

## ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

доктора химических наук Кулюхина Сергея Алексеевича о диссертации Караван Марии Дмитриевны «Функционализированные каликсарены: структура, экстракционные свойства и применение для фракционирования высокоактивных отходов», представленной на соискание учёной степени доктора химических наук по специальности 1.4.13 – Радиохимия

### Актуальность тематики диссертационного исследования.

Обращение с радиоактивными отходами (РАО) является одной из главных проблем атомной отрасли, особенно с учётом общей тенденции к увеличению доли атомной промышленности в энергобалансе страны. Принятая в России концепция закрытого ядерного топливного цикла (ЗЯТЦ) предусматривает переработку отработавшего ядерного топлива (ОЯТ) и выделение из него ценных компонентов, однако в процессе такой химической переработки образуются радиоактивные отходы – как кислые (после PUREX-процесса), так и щелочные (отходы реализации Атомного проекта, а также, потенциально, высокоактивный рафинат разработанного недавно для щелочной переработки ОЯТ КАРБЭКС-процесса), наиболее экономичным путём обращения с которыми считается фракционирование.

Для процессов экстракционного извлечения радионуклидов уже разработано достаточное количество различных соединений, в том числе производные каликсаренов (для азотнокислых сред) и каликс-краунов (для щелочных сред), которые доказали свою эффективность.

Тем не менее, для дальнейшего развития направления их применения в процессах переработки РАО необходимо глубокое и систематическое изучение механизмов и основных закономерностей выделения радионуклидов. Решению этих задач, необходимых в перспективе для поиска наиболее эффективных и безопасных методов извлечения радионуклидов, посвящена данная работа. Таким образом, **актуальность** представленной работы не вызывает сомнений.

### **Степень разработанности темы исследования.**

На основе систематического исследования экстракции актинидов и продуктов деления каликс- и тиакаликсаренами из азотнокислых сред, а также экстракции актинидов и цезия из карбонатно-щелочных сред с помощью тиакаликсаренов и гидроксикаликсаренов выбраны классы функционализированных каликсаренов для экстракционного и осадительного выделения РЗЭ, актинидов и некоторых осколочных элементов из азотнокислых сред (фосфорилированные каликсарены), а также для разделения РЗЭ и актинидов в карбонатно-щелочных средах (*пара-трет*-бутил-тиакаликс[4]арен) и совместного извлечения актинидов и цезия из карбонатно-щелочных сред.

На основании обнаруженной способности фосфорилированных каликс[4]аренов и гидроксикаликс[6,8]аренов образовывать мицеллы предложен метод выделения и концентрирования радионуклидов в аналитических целях из азотнокислых сред с помощью водорастворимых каликсаренфосфиноксидов, заключающийся в проведении мицеллярной экстракции и последующем выделении радионуклидов из мицеллизированной фазы ультразвуковым разрушением мицелл в растворе и электрохимическим осаждением радионуклида на металлическую мишень.

Эффективность разработанных автором диссертации методов жидкостной и мицеллярной экстракции из азотнокислых сред с помощью фосфорилированных каликс[4]аренов, а также экстракционного выделения актинидов и цезия из карбонатно-щелочных сред с помощью функционализированных гидроксикаликс[6, 8]аренов проверены на реальных высокоактивных отходах (ВАО) ФГУП ПО «Маяк».

**Цель работы** состояла в разработке физико-химических основ процессов экстракции актинидов и долгоживущих продуктов деления из кислотных и карбонатно-щелочных сред с использованием каликсаренов.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

- выявлены закономерности комплексообразования *f*-элементов с

фосфорилированными каликсаренами в гомогенной среде;

- установлены корреляции «структура-свойство» при экстракции актинидов и некоторых продуктов деления из азотнокислых сред фосфорилированными каликс- и тиакаликсаренами;

- установлены корреляции «структура-свойство» при экстракции цезия и актинидов из карбонатно-щелочных сред функционализированными гидроксикаликс- и гидрокситиакаликсаренами;

- разработаны и проверены мицеллярные методы выделения и концентрирования радионуклидов;

- разработаны и проверены процессы выделения актинидов и осколочных элементов из реальных азотнокислых и щелочных ВАО.

**Научная новизна** диссертации состоит в следующем:

1. впервые получен массив экспериментальных данных по комплексообразованию каликсаренов, содержащих фосфиноксидные группы в верхнем или нижнем ободе, а также каликсарен-дифосфонатов в гомогенной среде, включающий термодинамические характеристики процесса комплексообразования ( $-\Delta H$ ,  $T\Delta S$ ,  $-\Delta G$ ), константы устойчивости образующихся комплексов  $\log \beta$ , а также стехиометрию комплексов;

2. впервые получен массив экспериментальных данных по экстракции актинидов и продуктов деления каликс- и тиакаликсаренами из азотнокислых сред, а также по экстракции актинидов и цезия из карбонатно-щелочных сред с помощью тиакаликсаренов и гидроксикаликсаренов, включающий значения коэффициентов распределения радионуклидов и состав сольватов;

3. установлены взаимосвязи между структурой каликсаренов и их экстракционными свойствами по отношению к редкоземельным элементам, актинидам, цезию, стронцию и технецию;

4. обнаружена способность фосфорилированных каликс[4]аренов и гидроксикаликс[6,8]аренов образовывать мицеллы. Установлена корреляция между размерами образующихся мицелл и эффективностью экстракции радионуклидов.

**Практическая значимость работы** состоит в следующем:

1. выбраны классы функционализированных каликсаренов для экстракционного и осадительного выделения РЗЭ, актинидов и некоторых осколочных элементов из азотнокислых сред (фосфорилированные каликсарены), а также для разделения РЗЭ и актинидов в карбонатно-щелочных средах (*пара-трет*-бутил-тиакаликс[4]арен) и совместного извлечения актинидов и цезия из карбонатно-щелочных сред (функционализированные гидроксикаликс[n]арены);
2. предложен метод выделения и концентрирования радионуклидов в аналитических целях из азотнокислых сред с помощью водорастворимых каликсаренфосфиноксидов, заключающийся в проведении мицеллярной экстракции и последующем выделении радионуклидов из мицеллизированной фазы ультразвуковым разрушением мицелл в растворе и электрохимическим осаждением радионуклида на металлическую мишень;
3. разработаны и проверены на реальных ВАО ФГУП ПО «Маяк» принципиальные схемы выделения радионуклидов из азотнокислых сред методами жидкостной и мицеллярной экстракции с помощью фосфорилированных каликс[4]аренов, а также принципиальные схемы экстракционного выделения актинидов и цезия из карбонатно-щелочных сред с помощью функционализированных гидроксикаликс[6, 8]аренов.

**Объем и структура работы.**

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, выводов и списка литературы. Материал изложен на 307 страницах, содержит 146 рисунков, 68 таблиц, в том числе 20 таблиц приложений, в списке цитируемой литературы 265 наименований.

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель и задачи исследования, изложены научная новизна и практическая значимость работы, представлены методология и методы исследования.

В **первой** главе представлен литературный обзор, включающий анализ

современного состояния в области применения различных производных каликсаренов в экстракционном выделении цезия, стронция, лантанидов и актинидов из кислых и карбонатно-щелочных сред. При этом представлены данные о формах существования различных радионуклидов, включая актиниды в различных состояниях окисления, в кислых и щелочных средах. Особое место в данной главе уделено мицеллярной экстракции как альтернатив традиционному методу выделения радионуклидов. Научный уровень и полнота выполненного обзора подтверждается количеством процитированных работ (265 ссылок на публикации).

**Главы 2 – 5** содержат экспериментальные данные. В **главах 2 – 4** представлены результаты исследований на лабораторном уровне, в **главе 5** – результаты испытаний предлагаемых экстракционных систем на модельных и реальных ВАО ФГУП ПО «Маяк». При этом конкретные методики, с помощью которых были получены экспериментальные данные, приведены в каждой главе в качестве отдельной методической составляющей, поскольку в большинстве случаев в экспериментах использовалась индивидуальная методика.

**Глава 2** диссертации посвящена изучению процессов комплексообразования лигандов на основе каликсареновой платформы, близких по своей структуре и содержащих фосфиноксидные или дифосфонатные функциональные группы, по отношению к нитратам трёхвалентных лантанидов (La, Eu, Yb), Th(IV) и уранил-иона  $\text{UO}_2^{2+}$ . На основании изученных литературных данных для ряда нециклических моно- и полидентатных соединений автором диссертации сделан обобщённый вывод о том, что в целом высокая устойчивость комплексов может одновременно служить маркером высокой экстракционной способности соединения. В качестве двух растворителей с принципиально разными химическими свойствами были выбраны метанол и ацетонитрил. Для изучения комплексообразования автором диссертации были применены методы спектрофотометрии УФ и видимой области для нитратов  $\text{La}^{3+}$ ,  $\text{Eu}^{3+}$ ,  $\text{Yb}^{3+}$ ,  $\text{Th}^{4+}$

и  $\text{UO}_2^{2+}$ , и микрокалориметрическое титрование для нитратов  $\text{Eu}^{3+}$  и  $\text{UO}_2^{2+}$ . С использованием данных методов рассчитаны константы устойчивости образующихся комплексов  $\log \beta$  и их стехиометрия. Кроме того, с помощью микрокалориметрии получена подробная информация о термодинамических характеристиках процесса ( $-\Delta H$ ,  $T\Delta S$  и  $-\Delta G$ ). Анализ данных для трёх различных групп лигандов, различающихся структурно, позволил выявить некоторые особенности: так, в случае каликс[ $n$ ]аренов, замещённых фосфиноксидными группами по верхнему ободу, структурные особенности лигандов (степень конденсации  $n = 4, 6$  и размер алкильных радикалов –  $\text{Bu}$ ,  $i\text{-Pr}$ ,  $\text{Pr}$  – в функциональной группе) практически не влияют на стехиометрию и устойчивость комплексов. Природа заместителя в функциональных группах не оказывает значительного влияния и на термодинамические параметры комплексообразования. В случае каликс[ $n$ ]аренов, содержащих фосфиноксидные группы в нижнем ободу, размер полости каликсарена и наличие/отсутствие при этом разветвлённых заместителей в верхнем ободу ведёт к большей подвижности лиганда и увеличивает разнообразие состава образующихся комплексов с  $\text{Ln(III)}$  (1:1 или 2:1). Основная же особенность систем на основе каликсарен-дифосфонатов – многообразие форм существования образующихся комплексов, существенно зависящее от структуры лиганда, сольватирующей способности разбавителя и природы извлекаемого катиона. Полученные данные обладают научной новизной и дают представление о термодинамике процесса комплексообразования, а также позволяют сделать предположения относительно движущих сил образования устойчивых комплексов, но, в то же время, из-за близости значений параметров комплексообразования для структурно-отличных каликсаренов, не могут служить маркерами экстракционного поведения лигандов. С практической же точки зрения автором сделан выбор в пользу выявления наиболее важных особенностей в корреляции структуры каликсаренов и их эффективности применительно к экстракционному фракционированию ВАО.

В Главе 3 подробно рассмотрена экстракция  $^{241}\text{Am}$ ,  $^{152}\text{Eu}$ ,  $^{233}\text{U}$ ,  $^{239}\text{Pu}$  и  $^{99\text{m}}\text{Tc}$  каликс- и тиакаликсаренами из азотнокислых сред с помощью таких методов как  $\alpha$ - и  $\gamma$ -радиометрия. В качестве органического разбавителя для каликсаренов использовали нитробензотрифторид (*m*-НБТФ), дихлорметан и дихлорэтан. Установлено, что каликс[*n*]арены с фосфиноксидными группами в верхнем ободе проявляют различную экстракционную способность по отношению к изучаемым радионуклидам. Влияние оказывает степень конденсации (и, следовательно, количество функциональных групп) лиганда: тетрамеры извлекают радионуклиды лучше, чем гексамеры благодаря своей жёсткой конусной конформации. Значительное увеличение экстракционной способности по сравнению с моноаналогами за счёт наличия макроциклической платформы («кооперативный эффект»), наблюдаемое для каликсаренов с заместителями в верхнем ободе, не является систематическим для их аналогов с функциональными группами в нижнем ободе. Сравнение экстракционных свойств каликс[*n*]аренов и тикаликс[4]аренов выявило, что само по себе расширение полости каликсарена за счёт включения в цикл атомов серы (переход от каликс- и тиакаликсарену) приводит к увеличению экстракционной эффективности по отношению к  $^{241}\text{Am}$  и  $^{152}\text{Eu}$  в случае структурно-жёстких конусных конформаций лиганда и не оказывает выраженного влияния в случае более гибких 1,3-конусных конформаций лиганда.

Обнаруженная автором особенность каликс[4]аренфосфиноксидов с алкильными радикалами у атома фосфора - повышенная растворимость в воде, позволила предложить альтернативный подход к выделению радионуклидов, основанный на принципах мицеллярной экстракции. Размеры и форма образующихся мицелл изучены методом динамического рассеяния света, а также методами атомно-силовой и просвечивающей электронной микроскопии. Подтверждено образование агрегатов каликсарена различного размера в дихлорэтаноле (335 нм) и в воде (~4 нм для 0,1 моль/л каликсарена и ~200 нм для  $10^{-5}$  моль/л каликсарена) и существование по крайней мере 4 их

типов (круглые частицы разного размера, кристаллы, мелкие частицы размером 0,7 – 2 мкм). Экспериментальные данные, описанные в этом разделе, легли в основу технологической схемы извлечения радионуклидов из растворов ВАО ФГУП ПО «Маяк».

В **Главе 4** рассмотрена экстракция трёхвалентных лантанидов и актинидов, а также цезия каликсаренами из карбонатно-щелочных сред.

Автором проведено систематическое исследование экстракционных свойств различных групп новых функционализированных каликсаренов с целью выявления наиболее эффективных для извлечения радионуклидов. Полученные экспериментальные данные представляются полезными для предложения вариантов новых структур каликсаренов, которые могут быть наиболее селективными для разделения РЗЭ и ТПЭ, а также америция и кюрия.

Сравнение экстракционных свойств каликс[4]арен-дифосфонатов, уже изученных по отношению к кислым средам, показало, что они могут применяться и в кислых, и в щелочных средах, но их эффективность выше при экстракции  $^{241}\text{Am}$  и  $^{152}\text{Eu}$  из кислых сред, а селективность по отношению к америцию в паре Am/Eu выше в карбонатно-щелочной среде.

Изучение экстракционных свойств ряда тиакаликс[4]аренов позволило выявить лиганды, обладающие наилучшей эффективностью разделения пар Am/Eu и Am/Cm. Для производных тиакаликс[4]аренов коэффициенты разделения пары Am/Eu превышают значение 40 и для пары Am/Cm изменяются от 3 до 8. При этом на селективность экстракции в значительной степени влияет разбавитель. Данная особенность, очевидно, может быть полезной, так как открывает возможность изменения эффективности и селективности экстракционной системы путём подбора соответствующего разбавителя.

Изучение ряда *O*-замещённых пара-алкилкаликс[8]аренов позволило выявить, по всей видимости, ключевые особенности структуры, способствующие повышению эффективности извлечения  $^{241}\text{Am}$  и  $^{137}\text{Cs}$ : при экстракции цезия критически важным является наличие в молекуле

экстрагента краун-эфирного фрагмента, а для экстракции америция - наличие «мягких» мостиковых атомов серы. Для серии гидроксикаликс[8]аренов с разным соотношением *пара-трет*-бутильных и изо-нонильных групп в верхнем ободке экспериментально установлено влияние агрегационных процессов в растворах на эффективность экстракции радионуклидов, аналогичное эффекту, выявленному автором в случае водорастворимых каликс[4]аренфосфиноксидов с алкильными радикалами у атома фосфора. Методом динамического светорассеяния (ДРС) установлено, что наименее эффективный изо-нонильный каликсарен существует в растворах преимущественно в мономерной форме с размером частиц 1.3–1.9 нм в зависимости от разбавителя, а *трет*-бутильный каликсарен преимущественно образует крупные агрегаты размером 137–283 нм в зависимости от pH водной фазы. Для «смешанного» каликсарена, содержащего шесть *трет*-бутильных и две изо-нонильные группы, экспериментально установлено, что агрегация его частиц в растворе с течением времени возрастает и способствует повышению экстракционной способности системы. Остальные изученные каликсарены этого ряда, содержащие четыре и более изо-нонильных групп, находятся в растворах преимущественно в мономерной форме.

В Главе 5 описаны методы, предложенные для совместного извлечения радионуклидов как из модельных и реальных радиоактивных отходов, так и для выделения и концентрирования радионуклидов в аналитических целях с использованием функционализированных каликсаренов. Полученные фундаментальные данные легли в основу совместного выделения радионуклидов из азотнокислых сред методами жидкостной и мицеллярной экстракции, а также выделения актинидов и цезия из карбонатно-щелочных ВАО ФГУП ПО «Маяк».

В заключении приведены выводы по результатам диссертационной работы. Основные выводы диссертации обоснованы и логично вытекают из содержания работы.

Важнейшим результатом теоретических и экспериментальных

исследований является подтверждение возможности извлечения актинидов и продуктов деления из различных сред с использованием каликс[п]арен-производных, а также выявление основных структурных особенностей данных соединений, способствующих извлечению радионуклидов.

Полученные фундаментальные данные легли в основу совместного выделения РЗЭ, ТП, технеция и палладия из азотнокислых сред методами жидкостной и мицеллярной экстракции, а также выделения актинидов и цезия из карбонатно-щелочных ВАО ФГУП ПО «Маяк».

Представленные автором диссертационной работы научные результаты, положения и рекомендации получены впервые и отличаются несомненной **научной новизной**.

**Достоверность** и обоснованность научных положений, результатов и выводов обеспечена использованием современного сертифицированного аналитического оборудования, применением в работе различных методов исследования в независимых лабораториях, апробацией основных результаты работы на большом числе российских и международных конференций.

**Автореферат** диссертации в полной мере отражает её основное содержание. Результаты и выводы диссертации доложены и обсуждены на представительных российских и международных конференциях. По материалам работы опубликованы 17 статей, получено 2 патента на изобретение.

Вместе с тем, к диссертационной работе есть ряд **замечаний и вопросов**:

1. при изучении комплексообразования f-элементов с каликсаренами в метаноле и ацетонитриле неясно, почему спектрофотометрия была применена к соединениям пяти f-элементов, а микрокалориметрия – только к двум?
2. в разделе 3.2.1 (стр. 133) автором отмечено: *«Предварительные эксперименты показали, что ни режим добавления каликсарена, ни интенсивность перемешивания не влияют на коэффициенты*

распределения европия. Образование изолированной фазы происходит немедленно, и дальнейшее перемешивание не влияет на распределение радионуклида.» Возникает вопрос, как влияет порядок добавления растворов друг в друга?

3. в разделе 3.2.1 (стр. 134-135) автором отмечено, что «*эффективность мицеллярной экстракции (МЭ) обусловлена механизмом образования изолированной фазы.*» Неясно, чем различается механизм образования изолированной фазы для С45 и С67?
4. в разделе 3.2.2 (стр. 141) при изучении МЭ автором отмечено, что «*степень извлечения  $^{241}\text{Am}$  оказалась выше, чем у  $^{152}\text{Eu}$ , хотя его концентрация на три порядка ниже.*». В тоже время нигде не указаны концентрации радионуклидов, исследуемых в работе.
5. в разделе 4.4 (стр. 175 и 177) автором сравниваются экстракционные свойства «чистых» изонилкаликс[8]аренов **28** и **31** с изонилкаликс[8]ареном **ИН8**. Неясно, в чем заключается различие каликсаренов **28** и **31** от каликсарена **ИН8**?
6. большое количество экспериментальных точек, приведенных на рисунках в черно-белом формате (глава 2-4), затрудняет проводить анализ экспериментальных результатов;
7. в некоторых таблицах и на части рисунков отсутствуют погрешности для приведенных экспериментальных данных;
8. присутствуют опечатки.

Сделанные замечания не снижают теоретическую и практическую ценность диссертации, которая представляет собой завершённую научно-исследовательскую работу в актуальной области радиохимии. Научная новизна, актуальность и практическая значимость полученных результатов позволяют считать диссертацию полностью соответствующей критериям, предъявляемым к докторским диссертациям.

**Тема и содержание работы соответствуют профилю Совета по специальности 1.4.13 – радиохимия, конкретно следующим направлениям**

исследований, предусмотренных паспортом этой специальности: 2. Состояние и распределение радионуклидов в различных фазах. Процессы фазообразования и коллоидообразования. 5. Методы выделения, разделения и очистки радиоактивных элементов и изотопов. Экстракционные, сорбционные, электрохимические, хроматографические процессы разделения в радиохимии. Ядерно-физические методы в радиохимии. 8. Химия ядерного топлива. Научные основы радиохимической технологии и проблемы обращения с радиоактивными отходами. Радиохимические аспекты ядерной трансмутации.

Таким образом, диссертация Караван Марии Дмитриевны по своей актуальности, научной новизне, объёму выполненных исследований, практической значимости полученных результатов является научно-квалификационной работой, в которой содержится решение научной задачи о создании физико-химических основ процессов экстракционного выделения актинидов и долгоживущих продуктов деления из азотнокислых и карбонатно-щелочных сред с помощью нового класса перспективных соединений с каликсареновой платформой и их применения в аналитических и технологических целях, что полностью соответствует требованиям, предъявляемым к докторским диссертациям, установленным в п. 9 – 14 Постановления Правительства РФ от 24.09.2013 N 842 (ред. от 25.01.2024) *(вместе с «Положением о присуждении ученых степеней»)*, а её автор, **Караван Мария Дмитриевна**, заслуживает присуждения искомой ученой степени доктора химических наук по специальности 1.4.13 – Радиохимия.

Кулюхин Сергей Алексеевич,

доктор химических наук (02.00.14 – радиохимия),

Заместитель директора института по научной работе

Федерального государственного бюджетного учреждения науки  
Института физической химии и электрохимии имени А.Н. Фрумкина  
Российской академии наук (ИФХЭ РАН)

Адрес: 119071, Россия, г. Москва, Ленинский проспект, д. 31, корп. 4

<https://www.phyche.ac.ru/>

e-mail: [kulyukhin@ipc.rssi.ru](mailto:kulyukhin@ipc.rssi.ru)

тел.: +7 (495) 333-85-01

*Я, Кулюхин Сергей Алексеевич, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета, и их дальнейшую обработку.*

«05» марта 2024 г.



/Кулюхин С.А./

Подпись сотрудника Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт физической химии и электрохимии им. А.Н.Фrumкина Российской академии наук С.А. Кулюхина удостоверяю:

Начальник отдела кадров ИФХЭ РАН

«06» марта 2024 г.



Е.С. Медведева

### Сведения об официальном оппоненте

диссертационной работы *Караван Марии Дмитриевны*

*«Функционализированные каликсарены: структура, экстракционные свойства и применение для фракционирования высокоактивных отходов» на соискание учёной степени доктора химических наук по специальности 1.4.13 – «Радиохимия»*

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |                                                                                                                                                                                                               |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Ф.И.О.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | Кулюхин Сергей Алексеевич                                                                                                                                                                                     |
| Ученая степень, включая отрасль наук и номер специальности, по которой защищена докторская (кандидатская) диссертация, ученое (академическое) звание                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | доктор химических наук<br>(специальность 02.00.14 – радиохимия)                                                                                                                                               |
| Полное наименование места работы, структурное подразделение и должность                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физической химии и электрохимии имени А.Н. Фрумкина Российской академии наук (ИФХЭ РАН),<br>Заместитель директора института по научной работе |
| Адрес места работы                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | 119071 г. Москва, Ленинский проспект, д. 31, корп. 4                                                                                                                                                          |
| Телефон                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | +7 (495) 333 85 01                                                                                                                                                                                            |
| E-mail                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | kulyukhin@ipc.rssi.ru                                                                                                                                                                                         |
| Список публикаций в соответствующей сфере исследований за последние 5 лет в рецензируемых журналах (не более 15)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |                                                                                                                                                                                                               |
| 1. Kulemin V.V., Martynov K.V., Krasavina E.P., Rumer I.A., <b>Kulyukhin S.A.</b> Cast Stone Matrices Based on Basaltic Melt with Uranium-Bearing Silica Gel. // Radiochemistry. –2022. –V. 64, N 2. –P. 157-162.<br>2. Makarov A., Safonov A., Sitanskaia A., Martynov K., Zakharova E., <b>Kulyukhin S.</b> Clay and carbon materials-based engineered barriers for technetium immobilization // Progress in Nuclear Energy. –2022. –V. 152. –N 104398.<br>3. Nevolin Iu., Andreadi N., Petrov V., Shiryayev A., Yapaskurt V., Shatalova T., <b>Kulyukhin S.</b> Oxidation studies of $UM_3$ ( $M = Ru, Rh, Pd$ ) intermetallides // J. Nucl. Mater. –2022. –V. 568. –N 153885.<br>4. Martynov K.V., Kulemin V.V., Gorbacheva M.P., <b>Kulyukhin S.A.</b> Phase distribution of uranium in matrices obtained by co-melting basalt and uranium-containing aluminum oxide // Annals of Nuclear Energy. –2021. –V. 163. –N 108555.<br>5. Кулемин В.В., Красавина Е.П., Горбачева М.П., Румер И.А., Бессонов А.А., Крапухин В.Б., <b>Кулюхин С.А.</b> Иммобилизация урана в матрице $Al_2O_3$ // Радиохимия. –2021. –Т. 63, N 5. – С. 484-491. |                                                                                                                                                                                                               |

6. Кулюхин С.А., Неволин Ю.М., Бессонов А.А. Газофазная конверсия урансодержащих соединений Cs и Sr в нитрирующей атмосфере // Радиохимия. –2021. –Т. 63, N 5. –С. 440-446.

«05» марта 2024 г.



/Кулюхин С.А./

Подпись д.х.н. Кулюхина Сергея Алексеевича заверяю.

Директор Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физической химии и электрохимии имени А.Н. Фрумкина Российской академии наук (ИФХЭ РАН),

член-корреспондент РАН



/Буряк А.К./