

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию на соискание ученой степени кандидата химических наук Плаховой Татьяны Вячеславовны «Особенности формирования и поведения в водных растворах наночастиц диоксидов тория и церия - аналогов PuO_2 » по специальности 02.00.14 - Радиохимия и 02.00.21 – химия твердого тела

Актуальность тематики диссертационного исследования обусловлена широким спектром прикладных и фундаментальных задач, связанных с применением частиц нанометрового размера (далее - наночастицы), в совершенно разнообразных отраслях науки и техники: от нанотехнологий до атомной промышленности. Исследование поведения наночастиц, содержащих радиоактивные элементы, является одной из важнейших задач при разработке безопасных методов захоронения радиоактивных отходов (РАО), реабилитации загрязненных радионуклидами территорий и создании новых видов ядерного топлива.

В настоящее время существуют различные предположения об образовании аморфных, полимерных и кристаллических коллоидных частиц актинидов и лантанидов. Особое внимание уделяется процессам формирования наночастиц оксидов и гидроксидов f-элементов. Однако, несмотря на значительный объем информации, данные о зависимости природы подобных частиц от условий их формирования в литературе практически отсутствуют. Также нет сравнительной информации об образовании частиц 4f- и 5f-элементов. В то же время изучение процессов формирования наночастиц диоксидов церия, тория и плутония и их дальнейшее поведение в водных растворах позволит сравнить поведение 5f-элементов не только между собой, но и с 4f-элементами. Кроме того, будут получены новые сведения, необходимые для надежного предсказания поведения плутония в окружающей среде.

Поэтому, изучение природы наночастиц диоксидов церия, тория и плутония является крайне актуальной и своевременной задачей.

Цель работы состояла в определении закономерностей формирования и поведения в водных растворах наночастиц диоксидов состава MeO_2 , где в

качестве металла выступают торий, церий или плутоний.

Для достижения поставленной цели автором инициированы и решены задачи, к основным из которых необходимо отнести изучение процессов образования наночастиц диоксидов Ce, Th и Pu, а также сравнение их физико-химических свойств, включая растворимость. При этом главной задачей работы следует считать разработку нового подхода к синтезу наночастиц с заданными размерами и выявление связи размера наночастиц с их строением и свойствами.

Научная новизна диссертации состоит в следующем:

1. Впервые показано, что образующиеся при химическом осаждении наночастицы CeO_2 и PuO_2 обладают более высокой степенью кристалличности по сравнению с ThO_2 .
2. Установлено, что в результате осаждения из растворов Pu(III), Pu(IV), Pu(V) и Pu(VI) образуются одинаковые по размеру и кристалличности наночастицы PuO_2 , однако процесс осаждения из раствора Pu(VI) происходит более медленно.
3. Показано и впервые объяснено влияние размера частиц ThO_2 на структурные характеристики. Уменьшение размера кристаллитов до 2 нм ведет к существенному разупорядочению и уменьшению значения координационного числа Th-Th, а также приводит к увеличению параметра ячейки ThO_2 до 5.66 Å.
4. Обнаружено влияние размера частиц CeO_2 на электронное состояние атомов церия – при уменьшении размера кристаллитов до 2 нм происходит делокализация электронов атома на поверхности частицы, при этом показано отсутствие Ce(III) в структуре наночастиц. Установлено, что электронное состояние атомов Ce в частицах CeO_2 чувствительно к степени гидратации поверхности.
5. Установлен факт понижения концентрации церия в растворе в условиях подвижного равновесия при растворении высушенных наночастиц CeO_2 по сравнению с растворением свежесозаженных осадков. Впервые из экспериментальных данных с использованием модели восстановительного растворения рассчитано произведение растворимости свежесозаженных

наночастиц CeO_2 , которое составило $\lg K_{\text{sp}} = -59.3 \pm 0.3$.

Практическая значимость работы состоит в следующем:

1. Полученные сведения об особенностях осаждения наночастиц PuO_2 и его аналогов CeO_2 и ThO_2 могут быть использованы в существующих моделях поведения актинидов как в окружающей среде, так и в различных технологических процессах.
2. Разработана методика направленного синтеза монодисперсных образцов кристаллических наночастиц ThO_2 размером от 2 до 34 нм.
3. Установленная связь между условиями синтеза наночастиц ThO_2 , их структурой и свойствами может найти применение при развитии уран-ториевого топливного цикла.
4. Данные по влиянию размера частиц CeO_2 и их термической обработки на электронное состояние атомов церия в структуре оксида, а также информация о растворимости наночастиц CeO_2 различного размера могут значительно расширить перспективы применения CeO_2 в составе катализаторов или лечебных препаратов, обладающих антиоксидантными и радиопротекторными свойствами.

Объем и структура работы.

Диссертационная работа состоит из введения, обзора литературы (глава 1), экспериментальной части (глава 2), обсуждения результатов (глава 3-5), выводов, списка цитируемой литературы и приложения. Материал изложен на 146 страницах, содержит 67 рисунков и 9 таблиц, в списке цитируемой литературы 171 наименование.

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

В первой главе выполнен анализ литературных данных, отражающих современное состояние проблемы, методов и технологий, используемых для синтеза и изучения физико-химических свойств наночастиц диоксидов Ce, Th и Pu. Рассмотрены особенности поведения ионов Th^{4+} , Ce^{4+} и Pu^{4+} в водных

растворах, в том числе их реакции комплексообразования, гидролиза, полимеризации и образования коллоидных частиц, окислительно-восстановительные реакции. Приведен обзор основных подходов к контролируемому синтезу кристаллических наночастиц, а также изучению растворимости MeO_2 , проанализированы работы по изучению растворимости ThO_2 , CeO_2 и PuO_2 . Отдельно рассматриваются фазовые диаграммы систем $\text{Me} - \text{O}$, где $\text{Me} - \text{Ce, Th, Pu}$.

По главе 1 сделаны выводы о том, что в настоящий момент времени в литературе 1) нет единого мнения о механизмах формирования подобных коллоидных частиц и их кристаллической структуре, особенно в отношении коллоидов тория и плутония, 2) не проводились исследования влияния параметров химического осаждения на размер наночастиц ThO_2 и PuO_2 , 3) нет сравнительных данных о строении твердой фазы до и после ее контакта с раствором, т.е. после процесса растворения, и 4) отсутствует термодинамическое описание процесса растворения наночастиц CeO_2 .

Вторая глава диссертации посвящена методологии синтеза частиц ThO_2 , CeO_2 , PuO_2 из водных растворов, методам диагностики их фазового состава, размера, структурных особенностей. Также в главе приведена информация о проведении экспериментов по растворимости наночастиц.

Следует отметить, что успешное решение поставленных задач оказалось возможным благодаря использованию различных современных физико-химических методов исследования, таких как масс-спектрометрия с индуктивно-связанной плазмой (ИСП-МС), спектроскопия комбинационного рассеяния (КР), просвечивающая электронная микроскопия высокого разрешения (ПЭМВР), рентгеновская (РД) и электронная (ЭД) дифракция, термогравиметрический анализ и масс-спектрометрия (ТГА/МС), спектроскопия протяженной тонкой структуры рентгеновского поглощения (EXAFS), метод динамического светорассеяния (ДСР), сканирующая просвечивающая рентгеновская микроскопия (STXM), электронная дифракция с выделенной областью (SAED), спектроскопия околопороговой тонкой

структуры рентгеновского спектра поглощения высокого разрешения (HERFD XANES), спектроскопия рентгеновского поглощения низкоэнергетического (мягкого) края (soft-XAS), высокоэнергетическое рентгеновское рассеяние (HEXS), лазерно-искровая эмиссионная спектрометрия (LIBD), метод малоуглового рентгеновского рассеяния (МУРР).

В третьей главе представлены результаты экспериментов по формированию наночастиц ThO_2 , CeO_2 и PuO_2 в процессе их химического осаждения путем добавления щелочного раствора (NH_4OH или NaOH) к водным растворам азотнокислых солей Th(IV) , Ce(III, IV) и $\text{Pu(III, IV, V, VI)}$. В процессе работы было исследовано влияние природы исходной соли, ее концентрации, природы осадителя, величины pH осаждения на размер, кристалличность и морфологию синтезированных наночастиц.

Следует отметить, что влияние природы и концентрации исходной соли изучено не для всех элементов. Так, в экспериментах с церием использованы $(\text{NH}_4)_2\text{Ce}^{\text{IV}}(\text{NO}_3)_6$ и $\text{Ce}^{\text{III}}(\text{NO}_3)_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, с Th(IV) - $\text{Th}^{\text{IV}}(\text{NO}_3)_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ и с Pu - водные азотнокислые соли Pu(III) , Pu(IV) , Pu(V) и Pu(VI) . Влияние концентрации также изучено только в экспериментах с Ce и Th . В экспериментах с Pu использованы растворы с единственной концентрацией $(6-7) \cdot 10^{-4}$ моль/л.

В качестве основных методов характеристики твердой фазы в данной работе были выбраны рентгеновская дифракция (РД), просвечивающая электронная микроскопия высокого разрешения (ПЭМВР) и малоугловое рентгеновское рассеяние (МУРР).

В работе исследование наночастиц диоксидов металлов проводилось в следующем порядке: торий - церий - плутоний.

Для наночастиц диоксида Th(IV) установлено следующее. Фаза наночастиц ThO_2 с высокой степенью кристалличности формируется только в условиях высоких концентраций исходного нитрата Th (> 0.5 моль/л). По данным РД размер кристаллитов при осаждении образцов из 1.0 и 0.5 моль/л растворов соли Th(IV) водным раствором аммиака составляет 2.0 ± 0.2 нм. При понижении концентрации исходной соли Th(IV) от 0.5 моль/л до 10^{-4} моль/л

образуются рентгеноаморфные осадки, состоящие по данным ПЭМВР из агрегатов кристаллических частиц, имеющих средний размер 2.3 ± 0.4 нм. Одновременно в тексте диссертации (стр.57) указано, что по данным ПЭМВР все осадки ThO_2 , полученные осаждением из водных растворов 1.0, 0.1 и 0.01 моль/л нитрата тория, представляют собой агрегаты из кристаллических наночастиц с размерами около 2 нм. В данном случае неясно, какой размер имеют агрегаты и сколько наночастиц входит в их состав.

При изучении влияния pH на природу образующихся частиц ThO_2 было установлено, что фаза кристаллического ThO_2 образуется только при осаждении в сильнощелочных средах (3 моль/л NaOH). При уменьшении значения pH среды от 14 (среда 3 моль/л NaOH) до 6 образуются рентгеноаморфные осадки. При этом размер наночастиц ThO_2 , полученных осаждением из 0.1 моль/л $\text{Th}(\text{NO}_3)_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ при добавлении 3 моль/л NaOH, составил около 2.5 нм. Размеры кристаллитов, рассчитанные из РД и определенные из данных микроскопии, находятся в хорошем соответствии. Однако картина электронной дифракции (ЭД) отличается от картины РД, что автор объясняет дополнительной кристаллизацией аморфной составляющей образца в условиях просвечивающего микроскопа.

Анализ представленных выше результатов вызывает определенные вопросы. Если из 3 моль/л NaOH образуется только фаза кристаллического ThO_2 , то откуда появляется рентгеноаморфная фаза при осаждении ThO_2 из 0.1 моль/л раствора нитрата тория 3 моль/л раствором NaOH. И наоборот, откуда появляется кристаллическая фаза ThO_2 из 0.1 моль/л растворов нитрата тория, если ранее указано, что в данных растворах образуются рентгеноаморфные осадки.

Особый интерес представляют результаты работы по формированию наночастиц ThO_2 в условиях высушивания на воздухе при температуре 40°C и 150°C. Установлено, что высушивание свежесосажденной суспензии гидратированного оксида церия при 150°C приводит к заметному увеличению размера наночастиц и повышению их степени кристалличности. Так,

увеличение температуры высушивания с 40°C до 150°C приводит к росту размера наночастиц с 2.5 до 3.8 нм. При этом на размер конечных кристаллитов влияет pH раствора, из которого проводили осаждение. При понижении pH влияние температуры на величину размера наночастиц нивелируется.

К сожалению, результаты по формированию наночастиц ThO₂ в условиях высушивания на воздухе при температуре 40°C и 150°C не отражены в автореферате диссертации.

Исследования по формированию наночастиц CeO₂ проводились из растворов солей как четырех-, так и трехвалентного церия в условиях аналогичным осаждению ThO₂.

Установлено, что в отличие от ThO₂, при осаждении CeO₂ из раствора соли Ce(IV) раствором 3 моль/л аммиака по данным РД во всех случаях наблюдается формирование фазы нанокристаллического CeO₂ со структурой флюорита вне зависимости от концентрации исходной соли и величины pH, при которой проводился синтез. Размеры кристаллитов изменяются в диапазоне от 3.1 до 3.6 нм. Совершенно иная картина наблюдается в экспериментах с солями Ce(III). При изменении концентрации исходной соли от 10⁻⁴ до 0.8 моль/л размер кристаллитов увеличивается с 2.8 до 8.8 нм.

Впервые установлена связь условий синтеза и структурных особенностей наночастиц PuO₂, полученных методом химического осаждения из водных растворов 10⁻⁴ моль/л Pu(III), Pu(IV), Pu(V) и Pu(VI) добавлением 3 моль/л NH₄OH. Независимо от валентности Pu во всех случаях Т.В.Плаховой наблюдалось образование нанокристаллических образцов PuO₂ со средним размером частиц ~2.5 нм. При этом в каждом образце в незначительном количестве были обнаружены агрегаты размером до 60 нм.

Как и в системе с Th, все осадки PuO₂, полученные осаждением из водных растворов нитратов Pu(III), Pu(IV), Pu(V) и Pu(VI), состоят из агрегированных кристаллических наночастиц с размерами около 2 нм. В данном случае неясно, какой размер имеют агрегаты и сколько наночастиц входит в их состав.

Единственное различие в процессах осаждения наночастиц PuO₂ из водных

растворов Pu(III) , Pu(IV) , Pu(V) и Pu(VI) , наблюдаемое Т.В.Плаховой, заключалось в кинетике осаждения. В отличие от водных растворов Pu(III) , Pu(IV) и Pu(V) , в которых осаждение протекало быстро (через 10 мин в фазе осадка находилось более 98% Pu), осаждение из водных растворов Pu(VI) протекало в несколько стадий: 1-я - осаждение ~60 % Pu в течение 5 мин, 2-я - перекристаллизация осадка в течение 3 дн, 3-я - укрупнение осадка с понижением концентрации Pu в растворе.

В выводах к главе 3 на основании сравнения процессов образования ThO_2 , CeO_2 и PuO_2 Т.В.Плаховой сделано заключение, что в системах с Ce и Pu образуются хорошо закристаллизованные наночастицы CeO_2 и PuO_2 , в то время как в системах с Th образуются рентгеноаморфные осадки ThO_2 , состоящие из аморфной фазы с небольшими областями кристалличности. В то же время в работе постоянно упоминается об образовании кристаллических наночастиц ThO_2 . В связи с этим возникает вопрос, являются ли хорошо закристаллизованные наночастицы CeO_2 и PuO_2 безводными или представляют из себя гидраты.

В главе 4 на примере оксидных систем ThO_2 и CeO_2 представлены результаты по исследованию влияния размера наночастиц на электронные особенности металла в оксиде и его локальное атомное окружение.

Для получения наночастиц различного размера Т.В.Плаховой были проведены исследования по определению условий направленного синтеза наночастиц необходимого размера. В результате было установлено, что для синтеза разноразмерных кристаллитов ThO_2 может быть использован высокотемпературный отжиг предварительно высушенных образцов, синтезированных из 1 моль/л раствора азотнокислой соли Th(IV) и 3 моль/л водного раствора аммиака. Установлено, что отжиг порошка в течение 1 - 8 ч при температуре 300 – 800°C приводит к закономерному росту частиц от 2 (начальный образец) до 34 нм (отжиг в течение 4 ч при 800°C). Для синтеза наночастиц CeO_2 разного размера осаждение проводили из водных растворов соли Ce(III) различной концентрации.

Для определения влияния размера частиц ThO_2 и CeO_2 на электронные особенности атомов металла и локальное атомное окружение, образцы диоксидов с различным размером наночастиц были исследованы методом спектроскопии рентгеновского поглощения.

В результате Т.В.Плаховой установлено, что координационные числа (КЧ) Th-Th экспериментально определенные и теоретически рассчитанные для частиц сферической формы различного диаметра имеют симбатную зависимость, уменьшаясь с уменьшением размера кристаллитов. Для объяснения разницы между результатами эксперимента и расчета КЧ для образцов 2.5 и 3.8 нм Т.В.Плаховой предложена структурная модель «ядро-оболочка», рассчитанное по которой значение КЧ хорошо согласуется с экспериментальными данными.

Особое внимание Т.В.Плахова уделила изучению спектров рентгеновского поглощения, полученных для кристаллитов ThO_2 различного размера. Для объяснения изменения спектров при переходе от частиц с размерами 2.5-5.4 нм к частицам с размерами 5.4-34 нм было проведено моделирование спектров рентгеновского поглощения атомом тория с различным количеством ториевых атомов в ближайшем окружении. В результате было установлено, что причиной наблюдаемого изменения в спектрах является увеличение вклада поверхности при уменьшении размера частиц.

Аналогичные исследования были проведены для кристаллитов CeO_2 разного размера. Т.В.Плаховой было показано, что спектры рентгеновского поглощения синтезированных наночастиц CeO_2 совпадают со спектрами, полученными для объемного CeO_2 с размерами кристаллитов более 25 нм. Одновременно было доказано, что все синтезированные образцы, независимо от их размера и условий синтеза, содержат в своем составе только Ce(IV).

Несомненный интерес представляют результаты экспериментов по определению параметров элементарной ячейки ThO_2 в зависимости от размера кристаллитов. В результате исследований Т.В.Плаховой установлен факт снижения параметров элементарной ячейки ThO_2 с ростом размера

кристаллитов от 2 до 35 нм. Расширение элементарной ячейки, происходящее при уменьшении размера частиц, Т.В.Плахова связала с разной координацией атомов на поверхности и в объеме. Сделано предположение, что высококоординированные поверхностные атомы образуют более длинные связи, чем атомы в объеме, и тем самым оказывают расширяющее действие на кристаллическую структуру ввиду более высокой координации. Анализ данных термогравиметрического анализа (ТГА/МС) синтезированных кристаллитов ThO_2 подтвердил предположение Т.В.Плаховой о том, что наночастицы ThO_2 содержат на поверхности или в приповерхностных слоях координированные атомы тория. Именно за счет образования координационных связей атомов тория с карбонатными и гидроксильными группами на поверхности наночастицы расстояние между атомными плоскостями вблизи поверхности увеличивается. При этом этот эффект затрагивает несколько поверхностных слоев и ослабевает при движении от поверхности к центру. Следует отметить, что ТГА/МС кристаллитов CeO_2 также показал наличие на их поверхности следы карбонатных и гидроксильных групп. Для обоих диоксидов установлено, что, чем меньше размер их кристаллитов, тем выше потеря массы при ТГА/МС.

Глава 5 посвящена изучению поведения наночастиц ThO_2 и CeO_2 в водных растворах. К основным результатам исследований, проведенных Т.В.Плаховой, можно отнести определение устойчивости коллоидных частиц ThO_2 и CeO_2 , а также изучение процесса растворения CeO_2 .

В результате исследований Т.В.Плаховой установлено, что характер зависимости величины ζ -потенциала от значения рН одинаков для всех изученных систем и не зависит от природы оксида и размера первичных нанокристаллов. Найдено, что во всех образцах значение ζ -потенциала не превышает ± 45 мВ, а значение рН изоэлектрической точки свежееосажденных наночастиц ThO_2 с размерами 2 нм и CeO_2 с размерами 2, 5 и 8 нм равно 6.5 ± 0.5 .

Исследование растворимости кристаллитов CeO_2 с размерами 2 и 8 нм в 0.01 моль/л растворе NaClO_4 позволило Т.В.Плаховой установить, что на

растворимость не влияет размер кристаллитов, однако оказывает влияние их термическая обработка. После термической обработки свежееосажденных кристаллитов CeO_2 при температуре 40°C и выше их растворимость уменьшается приблизительно в 10 раз. Причем, чем выше температура отжига, тем медленнее кинетика растворения. Однако разница в растворимости свежееосажденных и высушенных образцов нанокристаллов CeO_2 снижается с увеличением pH системы и практически исчезает при значении $\text{pH} > 5$.

Для объяснения факта отсутствия влияния размера наночастиц на их растворимость Т.В.Плаховой был проведен анализ твердой фазы свежееосажденных образцов CeO_2 и образцов, полученных после сушки при 40 и 150°C .

В результате исследований Т.В.Плахова установила, что высушивание образцов CeO_2 при 40°C не сказывается на микроморфологии частиц, их распределении по размеру и не меняет их фазовый состав. В то же время спектры рентгеновского поглощения для свежееосажденных образцов и высушенных при 40°C и 150°C различаются. Выдвинута гипотеза, что основным фактором, определяющим изменения в спектрах, является гидратированная поверхность наночастиц. При этом сделано предположение, что процесс растворения нанодисперсного CeO_2 в большей степени контролируется гидратированной поверхностью оксида, чем его объемной составляющей. Выдвинутая гипотеза, по мнению Т.В.Плаховой, может объяснить не только влияние термической обработки частиц CeO_2 на их растворимость, но и одинаковую растворимость наночастиц различного размера, поскольку состав поверхности будет определяться методом синтеза или средой растворения, что в рамках данного исследования было одинаковым для образцов CeO_2 с размером частиц 2 и 8 нм.

Несомненный интерес представляют результаты по моделированию процесса растворения наночастиц CeO_2 . В качестве термодинамической модели, описывающей растворение нанокристаллов CeO_2 при $\text{pH} < 7$, была предложена модель восстановительного растворения, в результате которого в

растворе образуется Ce(III). Рассчитанное по данной модели произведение растворимости для наночастиц свежесозданного CeO₂ в 0.01 моль/л растворе NaClO₄ составило $\lg K_{sp} = -59.3 \pm 0.3$, что оказалось близким к значениям произведений растворимости ThO₂ ($\lg K_{sp} = -47.0 \pm 0.8$) и PuO₂ ($\lg K_{sp} = -58.5 \pm 0.7$), известным из литературы. Следует отметить, что в модели, предложенной в диссертации, процесс растворения CeO₂ включает участие не только ионов водорода, но и электронов. К сожалению, автор не объясняет механизм появления электронов в системе.

Выводы полностью отражают основные результаты диссертационной работы.

Достоверность результатов исследования подтверждается значительным объемом экспериментальных исследований, воспроизводимостью результатов, полученных в лабораторных условиях, а также согласованностью результатов с опубликованными данными, представленными в независимых источниках по близкой тематике. В работе использовали современные физико-химические методы анализа материалов, соответствующие современному научному уровню. Все основные положения, сформулированные в работе, экспериментально обоснованы и логично вытекают из содержания работы.

В целом диссертационная работа Т.В. Плаховой является самостоятельной и законченной научно-квалификационной работой, выполненной на высоком научном и экспериментальном уровне. Диссертационная работа написана грамотным языком, аккуратно оформлена.

Автореферат соответствует основному содержанию диссертации. Результаты работы представлены 11 тезисами докладов в материалах российских и международных конференций и опубликованы в 5 научных работах, опубликованных в высокорейтинговых журналах, включенных в перечень рецензируемых научных изданий для опубликования основных научных результатов диссертаций.

Результаты работы могут быть рекомендованы для изучения и внедрения в научных и образовательных организациях, а также на предприятиях ГК

Росатом.

Кроме вышеуказанных замечаний, по работе можно также отметить наличие опечаток и ошибку в нумерации разделов в оглавлении работы (после раздела 5.2.2 идет раздел 4.1.2).

Вместе с тем, все указанные замечания не умаляют значимости диссертационного исследования. Диссертация отвечает требованиям, установленным Московским государственным университетом имени М.В.Ломоносова к работам подобного рода. Содержание диссертации соответствует паспорту специальности 02.00.14 – "Радиохимия" и 02.00.21 – "Химия твердого тела" (по химическим наукам) и критериям, определенным пп. 2.1-2.5 Положения о присуждении ученых степеней в Московском государственном университете имени М.В.Ломоносова. Диссертация оформлена, согласно приложениям № 5, 6 Положения о диссертационном совете Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова.

Таким образом, соискатель **Плахова Татьяна Вячеславовна** заслуживает присуждения учёной степени кандидата химических наук по специальности 02.00.14 – Радиохимия и 02.00.21 - Химия твердого тела.

Официальный оппонент:

Доктор химических наук,

заместитель директора по научной работе

Федерального государственного бюджетного

учреждения науки Институт физической

химии и электрохимии им. А.Н.Фrumкина

Российской академии наук



Кулюхин Сергей Алексеевич

Контактные данные:

тел: +7(495) 333-85-01, e-mail: kulyukhin@ipc.rssi.ru

Специальность, по которой официальным оппонентом

защита диссертация:

02.00.14 – Радиохимия

Адрес места работы:

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

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физической химии и электрохимии им. А.Н.Фrumкина Российской академии наук

Тел./факс (495) 955-46-01 e-mail: dir@phych.ac.ru

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

«24» ноября 2019



 Е.С. Медведева