

**ОТЗЫВ официального оппонента**  
**на диссертацию на соискание ученой степени**  
**доктора химических наук Винокурова Сергея Евгеньевича**  
**на тему: «Минералоподобная магний-калий-фосфатная матрица для**  
**отверждения радиоактивных отходов»**  
**по специальности 02.00.14 – «Радиохимия»**

Диссертация Винокурова С.Е. посвящена разработке новой низкотемпературной минералоподобной магний-калий-фосфатной (МКФ) матрицы для иммобилизации радиоактивных отходов (РАО), обеспечивающей экологически безопасное долговременное хранение/захоронение отвержденных РАО различного химического и радионуклидного состава и уровня активности. МКФ матрица образуется в нормальных условиях, т.е. при комнатной температуре и атмосферном давлении, в результате кислотно-основной реакции между оксидом магния и дигидрофосфатом калия в водной среде. Актуальность диссертационной работы в этой связи несомненна, особенно с учетом известных ограничений промышленных матриц, в том числе цемента, стекла, битума и полимерных компаундов, а также необходимостью отверждения новых видов отходов сложного химического и радионуклидного состава, содержащих высокотоксичные долгоживущие актиноидные элементы и продукты деления ядерного топлива и для которых отсутствует опыт промышленного отверждения.

Для достижения поставленной цели в диссертационной работе были решены следующие задачи:

(а) выбраны условия получения МКФ матрицы и компаундов на ее основе для отверждения РАО различного химического состава и уровня активности;

(б) исследованы фазовый состав, структура, формы нахождения компонентов РАО и их распределение в объеме образующегося компаунда;

(в) исследована устойчивость компаундов к выщелачиванию макрокомпонентов и иммобилизованных радионуклидов, прежде всего  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{90}\text{Sr}$  и  $^{239}\text{Pu}$ , при контакте с водными растворами различного состава и при различных температурах;

(г) определено влияние низких и высоких температур, имитирующих различные условия размещения отвержденных РАО, на свойства компаундов;

(д) исследована радиационная устойчивость компаунда к воздействию бета- и гамма-излучения, и альфа-частиц с поглощенными дозами, характерными для захоронения отвержденных РАО;

(е) проведена апробация МКФ матрицы для отверждения РАО, образующихся и накопленных на радиохимических предприятиях страны.

Диссертация включает введение, краткий обзор известных данных по тематике исследований, шесть глав с описанием выполненных работ и обсуждения полученных результатов, выводы и список цитируемой литературы из 230 наименований. Диссертационная работа изложена на 221 странице текста, содержит 92 рисунка и 35 таблиц.

Во введении представлены актуальность темы диссертационной работы, цели и задачи исследования, научная новизна, практическая значимость работы, представлены выносимые на защиту положения, а также приведены сведения об апробации результатов работы, авторских публикациях и личном вкладе автора.

В первой главе представлены данные критического анализа литературных источников, посвященных промышленно применяемым и перспективным методам отверждения РАО, прежде всего содержащих высокотоксичные и долгоживущие радионуклиды, а также подробно рассмотрены основные нормируемые показатели качества получаемых компаундов для захоронения отходов и охарактеризованы применяемые методы их определения.

Во второй главе приведены результаты экспериментальных исследований по выбору оптимальных условий получения МКФ матрицы и компаунда на ее основе для отверждения имитаторов РАО различного химического состава по результатам исследований влияния ряда факторов, прежде всего характеристик, соотношения и порядка внесения связующих компонентов в отверждаемые имитаторы отходов, введения технологических добавок таких как замедлителя реакции синтеза матрицы и минеральных наполнителей как армирующих добавок.

В третьей главе представлены результаты экспериментальных исследований фазового состава, структуры и физико-химических свойства МКФ матрицы, а также образцов компаунда с иммобилизованными имитаторами РАО различного состава, в том числе:

- (а) азотнокислых растворов, содержащих компоненты РАО после переработки ОЯТ;
- (б) растворов смесей хлоридов металлов;
- (в) суспензии карбоната кальция как имитаторов новых типов РАО при переработке нитридного ОЯТ;
- (г) суспензии отработавших катионитов.

Четвертая глава посвящена экспериментальным исследованиям гидролитической устойчивости компаундов, которая определяет степень закрепления радионуклидов и определяется при проведении стандартных тестов. В главе представлены данные о скорости, степени и механизме выщелачивания радионуклидов, в том числе  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{239}\text{Pu}$ ,  $^{241}\text{Am}$ , при контакте компаундов, содержащих иммобилизованные имитаторы РАО различной природы, с выщелачивающими растворами.

В пятой главе представлены результаты экспериментальных исследований устойчивости компаунда к термическим циклам, необходимой для обоснования качества матрицы при размещении отвержденных отходов в приповерхностных хранилищах в возможной зоне промерзания-оттаивания, а также термической стойкости компаунда, которая обуславливает сохранение

его свойств при воздействии температур, которые могут достигаться при хранении компаунда, в том числе за счет тепловыделения распадающихся иммобилизованных радионуклидов.

В шестой главе рассмотрены результаты экспериментальных исследований радиационной устойчивости компаунда по данным механической прочности, структуры и водоустойчивости компаундов, а также оценено влияние радиационных эффектов, после облучения пучками ускоренных электронов, фотонами высокой энергии (гамма-облучения), а также в результате внутреннего облучения альфа-частицами с поглощенными дозами, ожидаемыми в условиях длительного хранения отвержденных РАО.

В седьмой главе рассмотрены основные результаты апробации МКФ матрицы, ее опытных и опытно-промышленных испытаний на предприятиях атомной отрасли страны, а также приведены примеры практического использования матрицы для иммобилизации РАО различной природы.

Сформулированные выводы диссертации обоснованы, информативны и полностью соответствуют поставленным задачам работы.

Научная новизна работы состоит в следующем:

(а) установлены оптимальные условия получения новой низкотемпературной минералоподобной МКФ матрицы и компаундов на ее основе для отверждения жидких РАО различного химического состава, в том числе получены данные детального исследования фазового состава, структуры и свойств матрицы и образующихся компаундов;

(б) впервые установлены формы нахождения урана, цезия, стронция, РЗЭ и других компонентов РАО таких как натрий и аммоний в образцах компаунда, полученных при отверждении растворов, имитирующих РАО;

(в) разработаны подходы к обеспечению высокой механической прочности, гидролитической устойчивости и термической стойкости компаунда, в том числе были установлены его теплофизические характеристики, с учетом условий размещения отвержденных отходов в

хранилищах, включающих воздействие различных температур и радиационного облучения;

(г) впервые установлены характеристики гидролитической устойчивости исследованных компаундов к выщелачиванию радионуклидов, в том числе  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{239}\text{Pu}$ ,  $^{237}\text{Np}$ ,  $^{241}\text{Am}$ ,  $^{99}\text{Tc}$ ,  $^{131}\text{I}$ , при контакте с водными растворами различного состава и при различных температурах и доказано их соответствие действующим требованиям к отвержденным РАО;

(д) впервые показана устойчивость образцов компаунда, полученного в выбранных условиях, к облучению с поглощенными дозами до 108 Гр ускоренными электронами, гамма-облучения, а также внутреннего облучения альфа-частицами, в том числе подтверждено сохранение механической прочности и гидролитической устойчивости компаунда.

Достоверность и обоснованность научных положений, полученных результатов и выводов диссертационной работы несомненны, поскольку обеспечены использованием современных расчетных и инструментальных методов анализа веществ и материалов, современного оборудования, а также высокой сходимостью результатов параллельных исследований.

В учетной системе Scopus h-индекс Винокурова С.Е. по результатам 67 опубликованных печатных работ составляет 11. Всего по теме диссертации опубликовано 35 работ, в том числе 20 статей в изданиях, индексируемых в системах Web of Science и/или Scopus, 5 статей в изданиях из списка ВАК при Минобрнауки России. Эти публикации полностью соответствуют теме диссертации и подтверждают оригинальность и научную новизну. Кроме того, авторские права защищены 2 патентами. Результаты работы также многократно представлены и обсуждены на ведущих российских и международных конференциях.

Автореферат диссертации Винокурова С.Е. на тему «Минералоподобная магний-калий-фосфатная матрица для отверждения радиоактивных отходов» полностью отражает содержание диссертации, содержит основные полученные результаты.

К диссертационной работе есть тем не менее несколько вопросов и замечаний, которые по моему мнению требуют ответов и разъяснений. Суммарно они сводятся к следующим:

1. Насколько важна чистота используемого оксида магния, и влияют ли примеси из отходов на процесс формирования МКФ матрицы?
2. Какой по оценке автора возможный масштаб использования разработанной МКФ матрицы в практике и насколько сравнима стоимость данного материала с используемым цементным компаундом?
3. Из текста диссертации и автореферата не совсем ясно, какая вода в составе компаунда (связанная, поровая, капиллярная) участвует в процессе радиолиза при облучении МКФ компаундов.
4. Неясно также пределы заполнения МКФ компаунда по РАО и были ли они установлены в работе.

Указанные вопросы и замечания, однако, нисколько не умаляют высокой 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» (по химическим наукам), а также критериям, определенным п.п. 2.1-2.5 Положения о присуждении ученых степеней в Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова, а также оформлена, согласно приложениям № 5, 6 Положения о диссертационном совете Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова.

Таким образом, соискатель Винокуров Сергей Евгеньевич заслуживает присуждения ученой степени доктора химических наук по специальности 02.00.14 – «Радиохимия».

**Официальный оппонент:**

доктор физико-математических наук,  
ведущий научный сотрудник, кафедра радиохимии Химического факультета  
ФГБОУ «Московский государственный университет имени  
М.В. Ломоносова»

Ожован Михаил Иванович



6.06.2022

Контактные данные:

тел.: +7 9296521757, e-mail: [m.i.ojovan@gmail.com](mailto:m.i.ojovan@gmail.com)

Специальность, по которой официальным оппонентом защищена  
диссертация: 02. 00.04 – «физическая химия»

Адрес места работы:

119991 Ленинские горы, д. 1, стр. 3  
ФГБОУ «Московский государственный университет имени  
М.В. Ломоносова», химический факультет  
Тел.: +7 (495) 939-16-71; e-mail: [dekanat@chem.msu.ru](mailto:dekanat@chem.msu.ru)

Подпись сотрудника Ожована Михаила Ивановича  
ведущего научного сотрудника, кафедра радиохимии Химического факультета ФГБОУ  
«Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова» удостоверяю: