

На правах рукописи



Шергин Александр Владимирович

Физико-химические закономерности ионообменного синтеза и люминесценции порошков состава $Y_{3-x}Eu_xAl_5O_{12}$ со структурой граната

1.4.4 Физическая химия

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата химических наук

Челябинск – 2026

Работа выполнена на кафедре химии твердого тела и нанопроцессов федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Челябинский государственный университет»

Научный руководитель:

Белая Елена Александровна, кандидат химических наук, доцент, заведующий кафедрой химии твердого тела и нанопроцессов федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Челябинский государственный университет»

Официальные оппоненты:

Красненко Татьяна Илларионовна, доктор химических наук, профессор, главный научный сотрудник лаборатории оксидных систем федерального государственного бюджетного учреждения науки Института химии твердого тела Уральского отделения Российской академии наук (г. Екатеринбург).

Рядун Алексей Андреевич, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории физико-химических методов исследования газовых сред федерального государственного бюджетного учреждения науки Института неорганической химии им. А.В. Николаева Сибирского отделения Российской академии наук (г. Новосибирск).

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный исследовательский центр «Коми научный центр Уральского отделения Российской академии наук».

Защита диссертации состоится 16.09.2026 г. в 15:30 на заседании диссертационного совета 24.2.437.03 при ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (НИУ)» по адресу: 454080, г. Челябинск, пр. Ленина 76, ауд. 1001.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Южно-Уральского государственного университета и на сайте: <https://www.susu.ru/ru/dissertation/24243703-d-21229804/shergin-aleksandr-vladimirovich>



Отзыв на автореферат, заверенный печатью организации, просьба отправлять по адресу: 454080, г. Челябинск, пр. Ленина 76, ЮУрГУ, Ученый совет университета. Тел.: +7(904)810-35-71, e-mail: sozykinsa@susu.ru

Автореферат разослан «___» _____ 2026 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
к.ф.-м.н., доцент



Созыкин Сергей Анатольевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Одной из фундаментальных задач физической химии является установление взаимосвязи между составом, структурой вещества и его функциональными свойствами. Решение этой задачи приобретает особую значимость при переходе к наноразмерному состоянию, где размерные эффекты и особенности локального атомного окружения начинают играть определяющую роль в формировании физико-химических характеристик материала. В связи с этим разработка методов синтеза, позволяющих не только получать наноразмерные частицы сложных оксидов, но и контролировать их структуру на ближнем и дальнем порядке, а также распределение легирующих примесей, является актуальным направлением современной химии и материаловедения.

Среди многочисленных объектов исследования особое место занимает алюмоиттриевый гранат $Y_3Al_5O_{12}$ (YAG), легированный ионами редкоземельных элементов. Этот материал обладает уникальным сочетанием физико-химических свойств: высокой термической и химической стабильностью и способностью к изовалентному замещению катионов иттрия на ионы редкоземельных элементов. Указанные особенности делают YAG перспективной матрицей для создания люминофоров, лазеров и сцинтилляционных материалов. В частности, активированные европием порошки YAG:Eu демонстрируют интенсивную узкополосную люминесценцию в красной области спектра, что открывает возможности их использования в качестве компонентов белых светодиодов с высоким индексом цветопередачи, а также в дисплейных технологиях и радиационной дозиметрии. Однако практическая реализация потенциала YAG:Eu сдерживается ограничениями традиционных методов синтеза. Твердофазный синтез является длительным и требует высоких температур термообработки, что приводит к неконтролируемому росту зерен и образованию прочных агломератов. Методы «мягкой химии» позволяют снизить температуру кристаллизации, но сталкиваются с проблемами нарушения стехиометрии из-за различий в поведении ионов при осаждении, неконтролируемой агломерацией частиц, а также риском загрязнения продукта остаточным углеродом. Гидротермальный синтез, обеспечивающий хорошую кристалличность продуктов, требует сложного аппаратного оформления и длительного времени проведения процесса. В этой связи поиск альтернативных подходов, сочетающих высокую гомогенизацию компонентов с простотой аппаратного оформления и возможностью точного контроля стехиометрии, является важной научной задачей. Перспективным направлением представляется использование катионообменных матриц в качестве трехмерных полимерных каркасов для удержания и гомогенизации катионов металлов. Ионообменный синтез, основанный на сорбции катионов из раствора на функциональных группах полимера с последующим пиролизом органической катионообменной матрицы, позволяет фиксировать заданное соотношение элементов непосредственно в объеме матрицы. Это обеспечивает атомарный уровень смешения компонентов и способствует формированию целевой оксидной фазы при относительно низких температурах. Использовать промышленные сульфокатиониты для ионообменного синтеза проблематично, поскольку они

обладают структурными ограничениями, затрудняющими диффузию крупных многозарядных ионов в глубь полимерной матрицы, что приводит к нарушению стехиометрии конечного продукта. Решением является синтез катионообменной матрицы, представляющей собой трехмерный каркас, обеспечивающей равномерное распределение катионов с точно заданной стехиометрией.

Ион Eu^{3+} , выбранный в качестве легирующей добавки для YAG, представляет собой эффективный спектроскопический зонд, чувствительный к локальному окружению в кристаллической решетке. Комплексный анализ его люминесцентных характеристик позволяет количественно оценить изменения локальной структуры при варьировании условий синтеза и выявить механизмы концентрационного тушения, что необходимо для оптимизации состава функциональных материалов.

Цель работы – установить физико-химические закономерности ионообменного синтеза люминофоров на основе алюмоиттриевого граната, легированного ионами европия.

В рамках данного исследования были поставлены следующие **задачи**:

1. Синтезировать катионообменную матрицу для проведения ионообменного синтеза. Исследовать ее состав, структуру и основные физико-химические характеристики.

2. Изучить закономерности сорбции ионов Y^{3+} и Al^{3+} на катионообменной матрице при их совместном присутствии в водном растворе, определить оптимальные условия ионообменного синтеза, обеспечивающие получение монофазных нанопорошков YAG с максимальным выходом, и исследовать морфологию частиц при различных условиях синтеза методом сканирующей электронной микроскопии.

3. Получить серию твердых растворов состава $\text{Y}_{3-x}\text{Eu}_x\text{Al}_5\text{O}_{12}$ ($x = 0,05\text{--}0,50$ а. е.) и исследовать влияние концентрации иона Eu^{3+} на фазовый состав и параметры кристаллической структуры методом рентгеновской дифракции.

4. Провести комплексное исследование люминесцентных свойств полученных образцов по спектральным данным для количественной оценки изменения локального окружения ионов Eu^{3+} , а также колориметрические характеристики эмиссии, для оценки перспектив практического применения синтезированных люминофоров.

Научная новизна

Впервые предложен и реализован подход к ионообменному синтезу нанопорошков алюмоиттриевого граната, с использованием катионообменной матрицы.

Впервые определены оптимальные условия получения монофазных нанопорошков YAG с высоким выходом, при температуре пиролиза 850–1000 °С. Установлены закономерности влияния параметров ионообменного синтеза: времени сорбции, режимов термообработки на фазовый состав и морфологию продукта.

С использованием комплекса люминесцентных методов анализа впервые выявлен немонотонный характер изменения локального окружения ионов Eu^{3+} с ростом их концентрации. Установлено, что концентрационное тушение

люминесценции при $x \geq 0,30$ а.е. обусловлено не статистическим распределением ионов Eu^{3+} , а его кластеризацией, инициированной пространственной неоднородностью распределения катионов на стадии ионообменной сорбции.

Показано, что критическая концентрация ионов Eu^{3+} равная 0,20 а.е., обеспечивает оптимальное сочетание интенсивности люминесценции и цветовых характеристик излучения с максимальной чистотой красного цвета 74,1%.

Практическая значимость работы

Практическая значимость работы состоит в разработке метода синтеза нанопорошков YAG:Eu на катионообменной матрице, обеспечивающий получение монофазных продуктов при относительно низких температурах термообработки, позволяющий получать твердые растворы $\text{Y}_{3-x}\text{Eu}_x\text{Al}_5\text{O}_{12}$ с максимальной интенсивностью люминесценции и высокой чистотой красного цвета, достигающей значения 74,1%.

Методология и методы исследования

В исследованиях, посвященных синтезу катионообменной матрицы, состав и структуру исследовали методами ИК-спектроскопии с помощью спектрометра Shimadzu IRAffinity-1S, а также методом термогравиметрии с синхронным масс-спектроскопическим детектированием газообразных продуктов на приборе NETZSCH STA 409 PC Luxx с квадрупольным масс-спектрометром NETZSCH QMS 403C Aełos.

Фазовый состав, морфологию и размер частиц, люминесцентные характеристики порошков YAG , и YAG:Eu , полученных на катионообменной матрице, исследовали с использованием порошкового рентгеновского дифрактометра ДРОН-3М, комплекса сканирующей электронной микроскопии Jeol JSM-7001F и спектрофлуориметра Horiba FluoroLog-3 соответственно.

Обработку экспериментальных данных проводили с использованием специализированных программных пакетов Powder Cell, Origin, MS Excel.

Положения, выносимые на защиту:

1. Катионообменная матрица на основе сульфированного полистирола, обеспечивает стехиометрическую сорбцию ионов Y^{3+} и Al^{3+} , что позволяет использовать ее в качестве прекурсора для ионообменного синтеза монофазных нанопорошков алюмоиттриевого граната. Оптимальными условиями ионообменного синтеза монофазного YAG с выходом ~99% являются: масса ионита 10 г на 1 г целевого продукта, время сорбции 30 минут, термообработка при 850 °С в течение 5 часов или при 1000 °С в течение 3 часов.

2. Твердые растворы $\text{Y}_{3-x}\text{Eu}_x\text{Al}_5\text{O}_{12}$, синтезированные на катионообменной матрице, сохраняют кубическую структуру граната вплоть до концентрации $x = 0,35$ а.е.; превышение этого предела приводит к образованию примесной фазы EuAlO_3 .

3. Концентрационное тушение люминесценции в нанопорошках YAG:Eu при $x \geq 0,30$ а.е. обусловлено не статистическим распределением ионов Eu^{3+} , а образованием кластеров ионов Eu^{3+} , что подтверждается двухэкспоненциальным

характером кинетики затухания, немонотонным поведением параметра асимметрии R и параметров Джадда-Оффельта.

4. Оптимальной концентрацией ионов Eu^{3+} , обеспечивающей высокую интенсивность люминесценции и наилучшие цветовые характеристики (координаты цветности $x = 0,605$, $y = 0,367$; чистота цвета 74,1%), достигаются при $x = 0,20$ а.е. Eu^{3+} .

Степень достоверности результатов

Достоверность полученных в работе результатов базируется на применении серии сертифицированных высокоточных приборов и комплекса взаимодополняющих физико-химических методик для анализа состава, кристаллической структуры, морфологии и оптических свойств синтезированных материалов. Подтверждением надежности выводов служит воспроизводимость экспериментальных данных, корректная статистическая обработка результатов, а также непротиворечивость данных, полученных с использованием независимых методов.

Апробация работы

Основные результаты диссертационного исследования докладывались на следующих конференциях:

Международная научная студенческая конференция «МНСК» (Новосибирск, 2023, 2024, 2025); Российская молодежная научная конференция с международным участием «Проблемы теоретической и экспериментальной химии» (Екатеринбург, 2023, 2024, 2025); Всероссийская конференция «Современные материалы и методы решения экологических проблем постиндустриальной агломерации» (Челябинск, 2023); III Международная научно-практическая конференция «Редкие металлы и материалы на их основе: технологии, свойства и применение РЕДМЕТ-2024» (Москва, 2024); XVI Симпозиум с международным участием «Термодинамика и материаловедение TiM-2025» (Санкт-Петербург, 2025); I региональная конференция «Физико-химические процессы в конденсированных средах» (Челябинск, 2025).

Исследования по теме работы были поддержаны грантом Фонда поддержки молодых ученых ФГБОУ ВО «Челябинский государственный университет» «Синтез люминофоров на основе алюмоиттриевого граната с использованием катионообменной матрицы» в 2025 г. (руководитель).

Личный вклад автора

Проведение анализа литературных данных по теме диссертационного исследования, синтез катионообменной матрицы и получение порошков беспримесного YAG и YAG:Eu. Реализация экспериментальных исследований с использованием комплекса физико-химических методов, обработка и интерпретация полученных данных. Обсуждение результатов и формулировка выводов проведены совместно с научным руководителем и соавторами публикаций.

Публикации

Результаты диссертационного исследования были изложены в 20 публикациях, в том числе 5 статьях в рецензируемых научных журналах, входящих в перечень ВАК и индексируемых в Web of Science и Scopus, 13 публикаций в сборниках материалов конференций и тезисах докладов на международных и всероссийских конференциях. По результатам диссертационного исследования также получен патент на изобретение, а также глава в учебно-методическом пособии.

Структура и объем диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, 4 глав, выводов и списка литературы. Работа изложена на 124 страницах машинописного текста, содержит 48 рисунков и 10 таблиц. Библиографический список содержит 137 наименований.

Благодарности

Автор диссертации выражает признательность научному руководителю к.х.н. Белой Е. А. за постановку задач, помощь в обсуждении результатов и всестороннюю поддержку; сотрудникам НОЦ «Нанотехнологии» ФГАОУ ВО «ЮУрГУ» (НИУ) за помощь в проведении отдельных экспериментов.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во **введении** обосновывается актуальность диссертационного исследования, сформулированы цели и задачи, описаны научная новизна, теоретическая и практическая значимость полученных результатов, приведены основные положения, выносимые на защиту, а также представлены сведения о личном вкладе автора и структура диссертации.

В **первой главе** представлены результаты анализа литературных данных, а именно современного состояния исследований в области синтеза и свойств алюмоиттриевого граната (YAG), легированного ионами редкоземельных элементов. Рассмотрена кристаллическая структура YAG. Показано, что YAG кристаллизуется в кубической сингонии (пр. гр. симм. $Ia\bar{3}d$), а додекаэдрические позиции иттрия (КЧ=8, локальная симметрия D_2) обеспечивают возможность изовалентного замещения ионами РЗЭ. Также описаны особенности люминесценции ионов РЗЭ, изложены основные положения теории Джадда-Оффельта применительно к иону Eu^{3+} . Так как данный ион является спектроскопическим зондом, показано, что по его спектральным данным можно оценить искажение его локального окружения.

Рассмотрены основные методы синтеза порошков YAG, а именно твердофазного спекания, совместного осаждения, золь-гель методов, включая метод Печини, и гидротермального синтеза; отмечены их преимущества и недостатки. Подробно рассмотрены основы ионообменного синтеза, классификация ионитов, приведены примеры анионообменного и катионообменного синтеза оксидных материалов. Показано, что промышленные сульфокатиониты (КУ-2 8) имеют высокую степень сшивки, что затрудняет диффузию трехзарядных ионов и ведет к нарушению стехиометрии. Таким образом

обоснована необходимость синтеза собственной катионообменной матрицы для получения нанопорошков YAG:Eu с заданными свойствами.

Обзор литературных данных позволил выявить основные ограничения традиционных методов синтеза алюмоиттриевого граната, обосновать перспективность ионообменного синтеза с использованием катионообменной матрицы, а также сформулировать цель и задачи диссертационного исследования.

Во **второй главе** содержится описание методик синтеза и исследования материалов.

Синтез катионообменной матрицы. Катионообменную матрицу получали методом прямого гетерогенного сульфирования упаковочного пенопласта. Сульфирование проводили 98%-м раствором серной кислоты при 120–150 °С до образования темно-коричневой резиноподобной массы. Полученный материал представляет собой частично сшитую сульфоновыми мостиками полистиролсульфоокислоту (ПССК) в H⁺-форме.

Методы исследования катионообменной матрицы. Состав и структуру матрицы изучали методами ИК-Фурье спектроскопии (*Shimadzu IRAffinity-1S*, диапазон 400–4000 см⁻¹) и синхронного термического анализа с масс-спектрометрией газообразных продуктов (*NETZSCH STA 409 PC Luxx + QMS 403C Aëlos* (ФГАОУ ВО «УрФУ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»), воздушная атмосфера, нагрев 10 °С/мин до 1000 °С). Содержание общей серы определяли сжиганием навески при 1000 °С в потоке воздуха, улавливанием SO₂ и SO₃ в 3% H₂O₂ и последующим титрованием, основываясь на ГОСТ 2059-95. Полную статическую ионообменную емкость (COE) находили по разности концентраций NaOH до и после контакта с ионитом, опираясь на методику, описанную в ГОСТ 20255.1-89. Коэффициент водопоглощения рассчитывали по разности масс образца после 24 ч выдержки в дистиллированной воде и после высушивания до постоянной массы по ГОСТ 4650-2014.

Синтез порошков YAG, оптимизация процесса и получение порошков YAG:Eu. Синтез порошков YAG проводили методом катионного обмена из водных растворов нитратов иттрия и алюминия, взятых в соотношении Y:Al = 3:5 на синтезированной катионообменной матрице по схеме, изображенной на рис. 1. Для этого к 100 мл исходного раствора добавляли навеску катионообменной матрицы и перемешивали 60 мин при комнатной температуре. Матрицу с адсорбированными катионами отделяли на воронке Бюхнера, сушили при 120 °С в течение 12 ч, затем прокаливали в муфельной печи при 1000 °С в течение 3 ч на воздухе. В случае получения серии замещенных образцов состава Y_{3-x}Eu_xAl₅O₁₂, где x=0,05-0,5 а.е. с шагом 0,05 а.е., в исходный раствор добавляли навеску нитрата европия.

Для оптимизации процесса ионообменного синтеза с целью получения монофазного YAG с максимальным выходом, варьировали массу катионообменной матрицы в пределах 9-13 г на 1 г целевого продукта, время ионного обмена в диапазоне 15-60 мин и режимы термообработки в интервале температур 800-1000 °С с выдержкой в течение 3-5 часов.

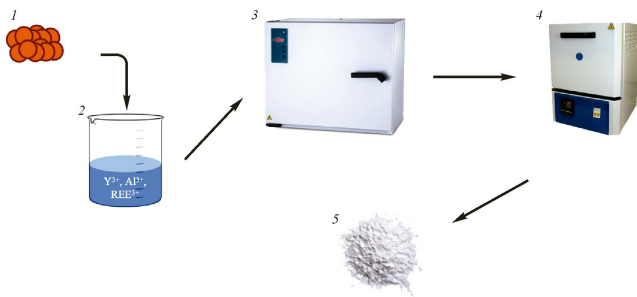


Рис. 1 – Схема синтеза порошков YAG на катионообменной матрице. (1–навеска катионообменной матрицы; 2–водный раствор катионов; 3–сушка при 120°C, 12 ч.; 4– термообработка в муфельной печи; 5–порошок YAG

Физико-химические методы исследования порошков YAG, YAG:Eu.

Фазовый состав и структуру порошков YAG и YAG:Eu изучали методом рентгенофазового анализа с помощью рентгеновского дифрактометра **ДРОН-3М**, $\text{CuK}\alpha$ -излучение, $\lambda = 1,5409 \text{ \AA}$, $2\theta = 10\text{-}70^\circ$, скорость $2^\circ/\text{мин}$). Идентификацию проводили по базе данных JCPDS. Полнопрофильный анализ по методу Ритвельда выполняли с помощью программы **Powder Cell 2.4**. Размер областей когерентного рассеяния (ОКР) рассчитывали по формуле Шеррера. Морфологию и размер частиц исследовали на сканирующем электронном микроскопе **Jeol JSM-7001F** (НОЦ «Нанотехнологии» ФГАОУ ВО «ЮУрГУ») в режиме вторичных электронов при увеличениях от 500 до 50000 раз. Спектры фотолюминесценции регистрировали на спектрофлуориметре **Horiba FluoroLog-3** (ФГБУН «Институт неорганической химии им. А.В. Николаева СО РАН») в диапазоне $\lambda = 250\text{-}750 \text{ нм}$ с разрешением 0,1 нм). Параметры Джадда-Оффельта Ω_2 и Ω_4 рассчитывали по интегральным интенсивностям переходов ${}^5D_0 \rightarrow F_{2,4}$ с использованием приведенных матричных элементов. Полную вероятность излучательных переходов A_r , радиационное время жизни τ_{rad} и коэффициенты ветвления β вычисляли по стандартным формулам. Колориметрические координаты (x, y) в системе CIE 1931, коррелированную цветовую температуру CCT и чистоту цвета CP определяли по спектрам эмиссии при возбуждении 395 нм. В качестве точки белого использовали источник D65 (x = 0,3127, y = 0,3290).

Исследование процессов сорбции катионов Y^{3+} и Al^{3+} на катионообменной матрице. Для изучения механизма сорбции катионов Y^{3+} и Al^{3+} на катионообменной матрице применяли метод равновесной сорбции. Для этого готовили серию растворов различных концентраций при постоянном стехиометрическом соотношении Y:Al= 3:5, в которые помещали навески матрицы и выдерживали в течение 24 ч при 25 °С. Концентрации ионов в фильтрате определяли гравиметрически: алюминий осаждали в виде оксидинолината, иттрий – в виде оксалата с последующим прокаливанием до оксидов.

Дополнительно для оценки состава внутриматричного раствора после набухания матрицы проводили центрифугирование (9000 об/мин, 10 мин) и анализировали полученный раствор.

Третья глава посвящена изучению структуры катионообменной матрицы и исследованию процессов сорбции ионов иттрия и алюминия из водного раствора, а также влиянию различных условий ионообменного синтеза на фазовый состав УАГ.

В разделе 3.1. представлены результаты исследований для установления состава и структуры катионообменной матрицы методами ИК-спектроскопии и термического анализа.

ИК-спектры исходного упаковочного пенопласта (рис. 2а) содержат полосы, характерные для полистирола: валентные колебания С–Н ароматического кольца ($3000\text{--}3100\text{ см}^{-1}$), алифатических $\text{CH}_2\text{--}$ и $\text{CH}_3\text{--}$ групп ($2800\text{--}3000\text{ см}^{-1}$), колебания ароматических $\text{C}=\text{C}$ связей ($1600\text{--}1450\text{ см}^{-1}$), а также внеплоскостные деформационные колебания С–Н ($700\text{--}900\text{ см}^{-1}$). После сульфирования (рис. 2б) в спектре появляются новые полосы: широкая область $3700\text{--}2500\text{ см}^{-1}$, соответствующие валентным колебаниям О–Н адсорбированной воды, асимметричные валентные колебания $\text{S}=\text{O}$ в $\text{--SO}_3\text{H}$ -группах ($1120\text{--}1150\text{ см}^{-1}$), валентные колебания S--O ($1000\text{--}1030\text{ см}^{-1}$) и полоса при 833 см^{-1} , характерная для пара-замещенных бензольных колец. Это подтверждает введение сульфогрупп в пара-положение.

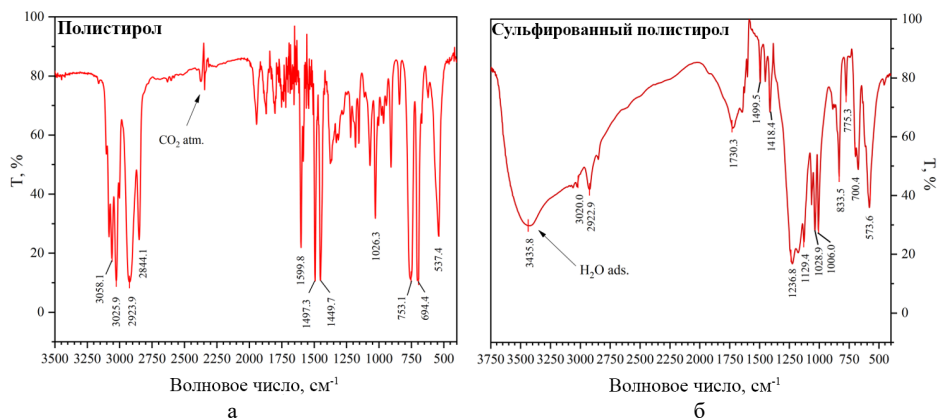


Рис. 2 – ИК-спектры для исходного упаковочного пенопласта (а) и для сульфированного полистирола (б)

Термический анализ (рис. 3–5, табл. 1) выявил четыре стадии деградации матрицы. Первая стадия соответствует дегидратации адсорбированной воды. Вторая стадия – отщепление сульфогрупп $\text{--SO}_3\text{H}$ с выделением SO_2 , SO_3 и H_2O . Третья стадия – разрушение углеводородного скелета полимера и отщепление сульфоновых мостиков $\text{--SO}_2\text{--}$, сопровождающееся выделением CO_2 , H_2O , SO_2 и SO_3 . Четвертая стадия – выгорание углеродного остатка до CO_2 . Присутствие SO_2 и SO_3 на третьей стадии подтверждает образование поперечных сульфоновых сшивок.

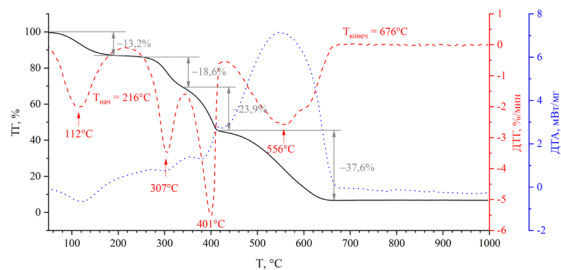


Рис. 3 – ТГ-, ДТГ-, ДТА-кривые термической деградации для синтезированной катионообменной матрицы на основе ПССК

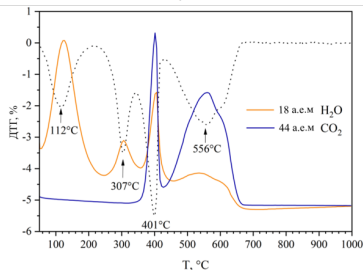


Рис. 4 – ДТГ-кривая, совмещенная с МС-детектированием газообразных продуктов термической деградации: 18 а.е.м. H₂O и 44 а.е.м. CO₂

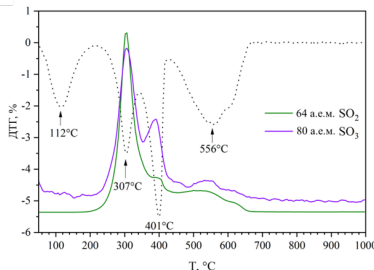


Рис. 5 – ДТГ-кривая, совмещенная с МС-детектированием газообразных продуктов термической деградации: 64 а.е.м. SO₂ и 80 а.е.м. SO₃

Таблица 1

Стадии термической деградации катионообменной матрицы

№ стадии	Температурный диапазон, °С	Потеря массы, %	Продукты	Процесс
I	50–180	13,2	H ₂ O	Дегидратация адсорбированной воды
II	216–350	18,6	H ₂ O, SO ₂ , SO ₃	Отщепление SO ₃ H-групп с их дегидратацией: $-\text{Ph}-\text{SO}_3\text{H} \rightarrow -\text{Ph} + \text{SO}_2 + \text{H}_2\text{O}$ $2\text{SO}_2 + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{SO}_3$
III	350–450	23,9	H ₂ O, CO ₂ , SO ₂ , SO ₃	Разложение органического скелета, отщепление и окисление сульфоновых мостиков: $n(-\text{Ph}-\text{CH}_2-)_n + m\text{O}_2 \rightarrow n\text{C} + n+m\text{H}_2\text{O}$ $\text{Ph}-\text{SO}_2-\text{Ph} \rightarrow 2-\text{Ph} + \text{SO}_2$ $2\text{SO}_2 + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{SO}_3$
IV	450–676	37,6	CO ₂	Окисление углеродного остатка до углекислого газа: $\text{C} + \text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2$

Характеристики катионообменной матрицы представлены в табл. 2.

Таблица 2

Характеристики катионообменной матрицы

Параметр	Значение
СОЕ, мг-экв/г	4,112±0,007
Содержание общей серы, мг/г	164±10
Содержание серы в –SO ₃ H-группах, мг/г	131,8±0,2
Коэффициент водопоглощения, %	97±1

Разность между содержанием общей серы и серы, связанной в концевых сульфогруппах, составляет 32 мг/г. Это может указывать на то, что часть серы

входит в состав сульфоновых мостиков $-\text{SO}_2-$, образовавшихся при межмолекулярной конденсации соседних сульфогрупп в условиях нагрева с концентрированной серной кислотой.

На основании полученных данных предложена схема сульфирования (рис. 6), включающая последовательное присоединение $-\text{SO}_3\text{H}$ -групп и их конденсацию с образованием $-\text{SO}_2-$ мостиков. В результате полученный полимер представляет собой нерастворимую в воде полистиролсульфоокислоту (ПССК).

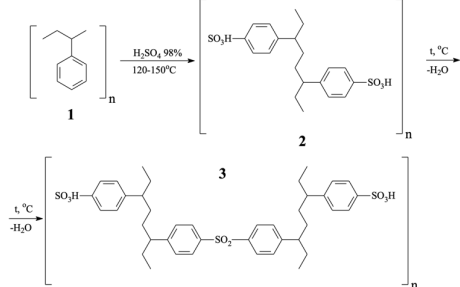


Рис. 6 – Схема сульфирования полистирола с образованием катионообменной матрицы

В разделе 3.2 исследован процесс сорбции катионов Y^{3+} и Al^{3+} из водного раствора при совместном присутствии на катионообменной матрице.

Анализ равновесных концентраций показал, что ионы Al^{3+} практически не сорбируются на сульфогруппах, что объясняется высокой энергией гидратации и малым радиусом ионов Al^{3+} , затрудняющими дегидратацию, необходимую для ионного обмена. Напротив, изотерма сорбции ионов Y^{3+} (рис. 7) имеет типичный для хемосорбции вид: резкий подъем при малых концентрациях с выходом на плато. Линеаризация в координатах модели Ленгмюра (рис. 8) подтверждает ионообменный механизм, коэффициент достоверности $R^2 = 0,972$. Рассчитаны предельная сорбционная емкость $q_{\text{max}} = 12,4$ ммоль/г и константа Ленгмюра $K_L = 0,52$ л/ммоль.

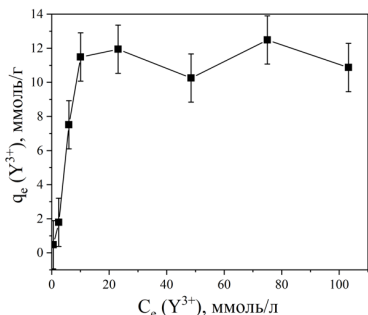


Рис. 7 – Изотерма сорбции ионов Y^{3+} на катионообменной матрице при 25°C

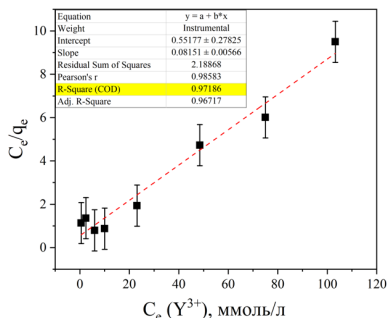


Рис. 8 – Линеаризация изотермы сорбции Y^{3+} в координатах модели Ленгмюра

Анализ внутриматричного раствора, извлеченного центрифугированием, показал, что ионы Y^{3+} присутствуют в следовых количествах, а концентрация ионов Al^{3+} близка к исходной. Это свидетельствует о том, что ион алюминия не участвует в ионном обмене, а проникает во внутриматричное пространство вместе с исходным раствором при набухании матрицы. Предложен комбинированный

механизм сорбции: ионы Y^{3+} сорбируются сульфогруппами по ионообменному механизму, тогда как Al^{3+} удерживается физически во внутриматричном пространстве. Такое сочетание обеспечивает после пиролиза формирование монофазного YAG со стехиометрическим соотношением $Y:Al = 3:5$.

В разделе 3.3 представлены результаты исследования влияния условий синтеза на фазовый состав и морфологию порошков YAG.

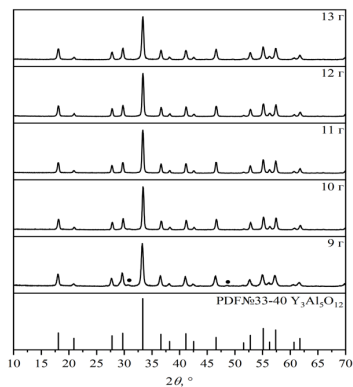


Рис. 9 – Дифрактограммы YAG в зависимости от массы катионообменного материала

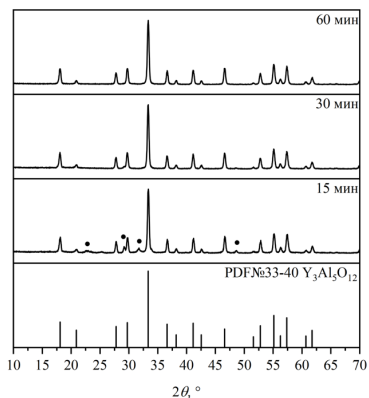


Рис. 10 – Дифрактограммы YAG в зависимости от времени ионного обмена

Для оптимизации синтеза YAG исследовали влияние массы ионита, времени ионного обмена, температуры и длительности отжига. Установлено, что при массе матрицы 9 г на 1 г продукта выход YAG снижается до 88% и появляется примесная фаза $Y_4Al_2O_9$ (YAM). При массе 10 г и более выход достигает ~99% и формируется монофазный YAG (рис. 9). Сокращение времени ионного обмена до 15 мин также приводит к появлению YAM и снижению выхода до 75%, таким образом оптимальное время ионного обмена, необходимое для получения монофазного YAG с максимальным выходом составило 30 мин (рис. 10).

По результатам изучения температурно-временной зависимости термообработки (рис. 11, 12), установлено, что температура отжига 800 °C недостаточна для полной кристаллизации, т. к. выход продукта YAG составил 58% и на дифрактограмме присутствует аморфная фаза. При 850 °C выход составляет 76%, однако на дифрактограмме присутствуют рефлексы, относящиеся к фазе YAM. Повышение температуры до 900 °C увеличивает выход YAG до 90%, при этом на дифрактограмме все еще присутствуют рефлексы, отвечающие фазе YAM. Монофазный YAG с максимальным выходом ~99% формируется при термической обработке 850 °C и 1000 °C с изотермической выдержкой 5 часов и 3 часа соответственно. Результаты фазового анализа и значения выхода конечного продукта представлены в табл. 3.

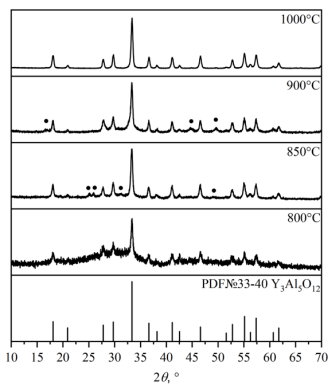


Рис. 11 – Диффрактограммы образцов YAG, полученных при различной температуре термообработки с изотермической выдержкой 3 часа

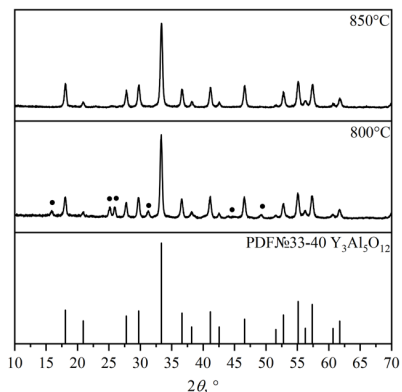


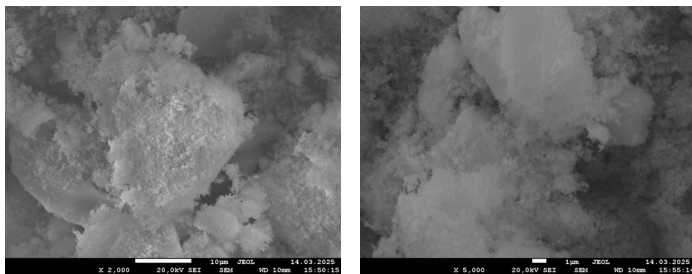
Рис. 12 – Диффрактограммы образцов YAG, полученных при различной температуре термообработки с изотермической выдержкой 5 часов

Таблица 3

Результаты фазового анализа и выход продукта при различных условиях синтеза

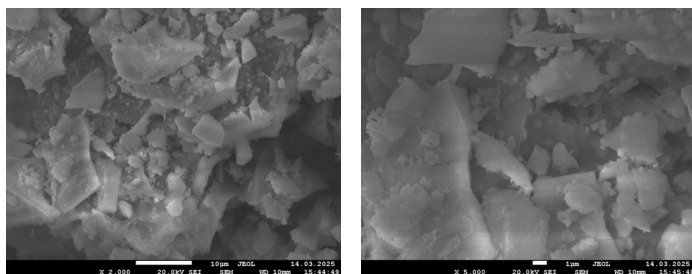
Параметр, ед. изм.	Значение	Выход продукта, %	Фазовый состав	ОКР, нм
Масса ионита, г	13	~99	YAG	30±2
	12	~99	YAG	34±2
	11	~99	YAG	33±2
	10	~99	YAG	33±2
	9	88	YAM+YAG	–
Время ионного обмена, мин	60	~99	YAG	33±2
	30	~99	YAG	34±2
	15	75	YAM+YAG	–
Температура прокали с выдержкой 3 ч, °C	1000	~99	YAG	33±2
	900	90	YAM+YAG	–
	850	76	YAM+YAG	–
	800	58	Аморфная фаза+YAG	–
Температура прокали с выдержкой 5 ч, °C	850	~99	YAG	29±2
	800	87	YAM+YAG	–

Размер областей когерентного рассеяния (ОКР) для монофазных образцов, рассчитанный по формуле Шеррера, составляет 28–34 нм (табл. 3). По данным сканирующей электронной микроскопии (рис. 13, 14), образец, полученный при 1000 °C в течение 3 часов, состоит из хлопьевидных наночастиц размером 30–50 нм, которые агрегированы в плотные кластеры размерами 2–10 мкм. Образец, прокаленный при 850 °C в течение 5 часов, имеет частицы неправильной формы размером 80–100 нм, объединенные в агломераты 1–10 мкм с более гладкой поверхностью.



а б

Рис. 13 – СЭМ-изображения образца YAG, полученного при 1000°C в течение 3 часов (*а* – увеличение x2000; *б* – увеличение x5000)



а б

Рис. 14 – СЭМ-изображения образца YAG, полученного при 850°C в течение 5 часов (*а* – увеличение x2000; *б* – увеличение x5000)

В четвертой главе рассмотрено влияние добавки Eu^{3+} на фазовый состав, структуру и люминесцентные свойства порошков YAG.

В разделе 4.1. изучена зависимость фазового состава и параметра элементарной ячейки YAG от количества легирующей добавки Eu^{3+} .

Результаты фазового анализа и уточнения структуры представлены на рис. 15 и табл. 4.

Таблица 4

Значения параметров структуры после уточнения

Образец	Параметр элементарной ячейки a , Å	Объем элементарной ячейки V , Å ³	ОКР, нм	R_p , %	R_{wp} , %
YAG	12,021±0,001	1737,2±0,1	28±2	9,5	13,3
YAG:0,05Eu	12,020±0,001	1736,5±0,1	29±2	2,3	12,7
YAG:0,1Eu	12,021±0,001	1737,1±0,1	30±2	8,6	11,5
YAG:0,15Eu	12,024±0,001	1738,5±0,1	28±2	8,7	11,5
YAG:0,2Eu	12,027±0,001	1739,7±0,1	30±2	9,4	12,9
YAG:0,25Eu	12,029±0,001	1740,4±0,1	31±2	9,9	13,6
YAG:0,3Eu	12,031±0,001	1741,6±0,1	28±2	8,7	11,5
YAG:0,35Eu	12,032±0,001	1741,7±0,1	30±2	9,0	11,8

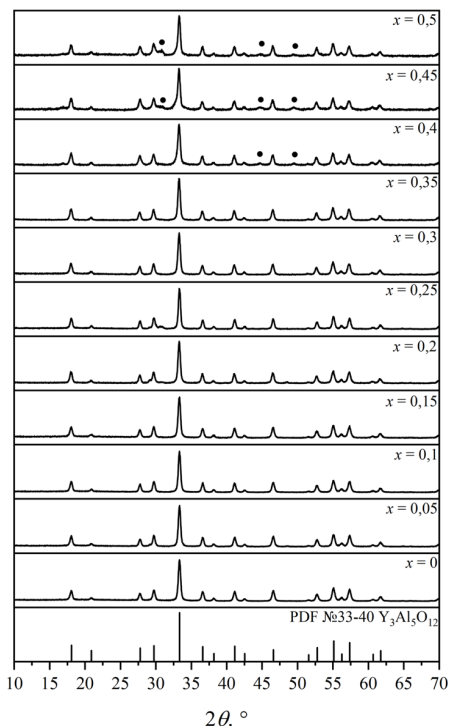


Рис. 15 – Дифрактограммы образцов YAG:xEu с различным содержанием Eu^{3+}

всех монофазных образцов находится в диапазоне 28–31 нм и не зависит от концентрации легирующей добавки.

В разделе 4.2 изложены результаты исследования спектрально-люминесцентных характеристик твердых растворов YAG:Eu и оценка изменения локальной симметрии иона Eu^{3+} .

Спектры возбуждения (рис. 16) содержат узкие полосы f-f переходов иона Eu^{3+} , наиболее интенсивная из которых соответствует переходу ${}^7F_0 \rightarrow {}^5L_6$ при 395 нм, а также широкую полосу переноса заряда (СТВ) $\text{O}^{2-} \rightarrow \text{Eu}^{3+}$ с максимумом около 250 нм. С ростом концентрации Eu^{3+} интегральная интенсивность полос возбуждения возрастает до $x = 0,30$ а.е., затем снижается из-за эффекта концентрационного тушения.

Рентгенофазовый анализ образцов состава $\text{Y}_{3-x}\text{Eu}_x\text{Al}_5\text{O}_{12}$, где $x = 0,05\text{--}0,50$ а.е., представленный на рис. 15, показал, что все дифрактограммы содержат рефлексы кубической фазы алюмоиттриевого граната. До концентрации $x = 0,35$ а.е. включительно образцы являются монофазными; при $x = 0,40$ а.е. появляются дополнительные дифракционные максимумы, соответствующие фазе алюмината европия EuAlO_3 со структурой перовскита. Таким образом, предел растворимости Eu^{3+} в решетке YAG при данных условиях синтеза составляет 0,35 а.е.

Уточнение структуры методом Ритвельда, проведенное для монофазных образцов, показало, что параметр элементарной ячейки закономерно возрастает с увеличением содержания Eu^{3+} в интервале $x = 0,05\text{--}0,30$ а.е. зависимость параметра элементарной ячейки от концентрации Eu^{3+} линейна и подчиняется правилу Вегарда, что подтверждает изовалентное замещение Y^{3+} на Eu^{3+} . Размер ОКР для

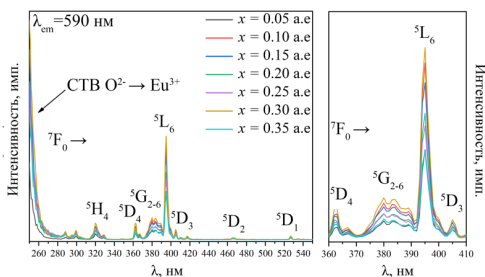


Рис. 16 – Спектры возбуждения фотolumинесценции для образцов YAG:xEu с содержанием $x = 0,05\text{--}0,35$ а.е.

Спектры эмиссии при возбуждении 395 нм (рис. 17) и 250 нм (рис. 18) демонстрируют серию узких линий, соответствующих переходам с метастабильного уровня 5D_0 на подуровни основного мультиплета 7F_1 ($J = 0-4$). На всех спектрах максимальную относительную интенсивность имеет магнитно-дипольный переход $^5D_0 \rightarrow ^7F_1$ (590 нм); его расщепление на две компоненты подтверждает локализацию Eu^{3+} в додекаэдрических позициях Y^{3+} с локальной симметрией D_2 .

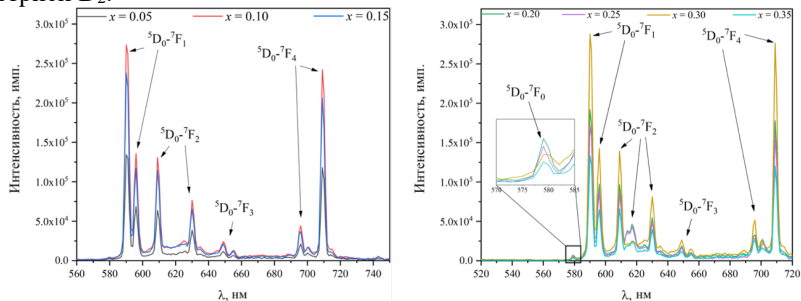


Рис. 17 – Спектры фотолуминесценции для образцов YAG:Eu при возбуждении 395 нм

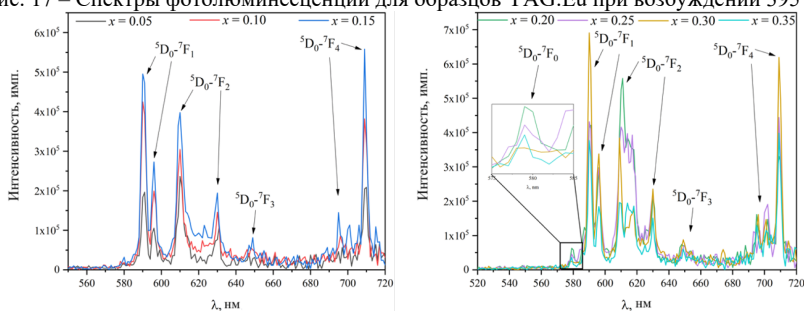


Рис. 18 – Спектры фотолуминесценции для образцов YAG:Eu при возбуждении 250 нм

Зависимости нормированной интегральной интенсивности переходов $^5D_0 \rightarrow ^7F_1$ и $^5D_0 \rightarrow ^7F_2$ при различных каналах возбуждения от концентрации ионов Eu^{3+} (рис. 19) показывают, что максимум достигается при $x = 0,30$ а.е. для возбуждения 395 нм и при $x = 0,20$ а.е. для возбуждения 250 нм. Параметр асимметрии R , определяемый как отношение интегральных интенсивностей переходов $^5D_0 \rightarrow ^7F_2$ к переходам $^5D_0 \rightarrow ^7F_1$ (рис. 20) при возбуждении 395 нм остается в пределах 0,9–1,4, что типично для нецентросимметричного окружения Eu^{3+} . При возбуждении 250 нм параметр R ведет себя немонотонно: при малых концентрациях он снижается, затем резко возрастает, достигая максимума при $x = 0,20$ а.е., после чего при $x = 0,30$ а.е. наблюдается более резкое падение, чем в случае прямого возбуждения, что указывает на чувствительность миграционных процессов к локальной симметрии и начало процессов кластеризации ионов Eu^{3+} .

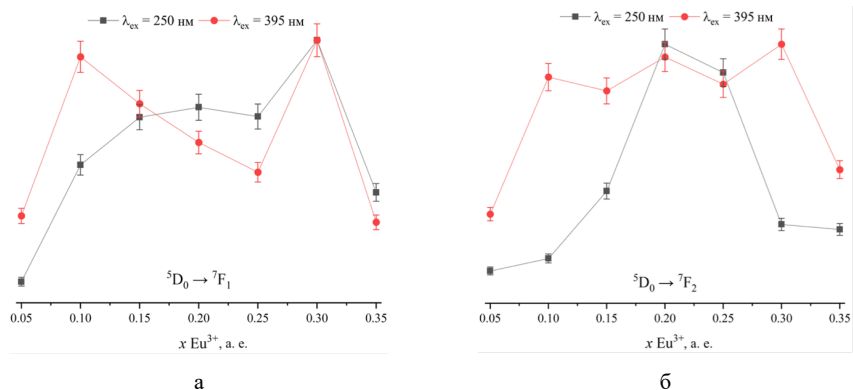


Рис. 19 – Зависимость нормированных интегральных интенсивностей переходов с уровня ${}^5\text{D}_0$ на ${}^7\text{F}_1$ (а) и ${}^7\text{F}_2$ (б) уровни при различных каналах возбуждения от концентрации Eu^{3+}

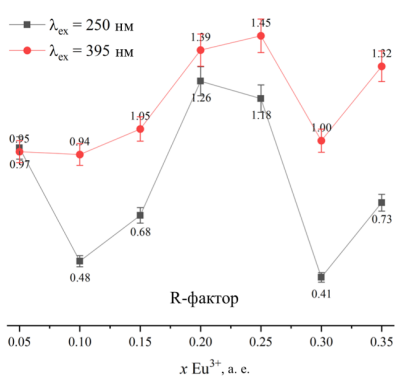


Рис. 20 – Зависимость параметра R от концентрации Eu^{3+} при различных каналах возбуждения

Из спектров эмиссии при возбуждении 395 нм рассчитаны параметры Ω_2 и Ω_4 (табл. 5) теории Джадда-Оффельта. Параметр Ω_2 , наиболее чувствительный к асимметрии локального окружения и ковалентности связи $\text{Eu}-\text{O}$, в области низких концентраций, при $x = 0,05-0,15$ а.е. остается практически постоянным, что характерно для изолированных ионов Eu^{3+} . При $x = 0,20-0,25$ а.е. значение параметра Ω_2 резко возрастает, а затем снижается при $x = 0,30$ а.е. и вновь увеличивается при $x = 0,35$ а.е. Такое немонотонное поведение свидетельствует о возможной качественной перестройке ближнего порядка, а именно формировании плотных кластеров Eu^{3+} при $x = 0,30$ а.е. и их дальнейшем укрупнении.

Параметр Ω_4 , отражающий свойства дальнего порядка, возрастает с ростом концентрации, достигая максимума при $x = 0,35$ а.е. Радиационное время жизни τ_{rad} лежит в диапазоне 6,7–7,9 мс, минимальные значения наблюдаются при $x = 0,20$ и 0,35, что коррелирует с ростом Ω_2 и указывает на увеличение вероятности излучательных переходов и, соответственно, сокращение времени жизни в более ковалентном и искаженном окружении.

Параметры Джарда-Оффельта и излучательные характеристики образцов YAG:Eu

№	$x \text{ Eu}^{3+}$	J-O параметры		Переходы						$\tau_{\text{rad}}, \text{ мс}$
		$\Omega_2 \times 10^{-20}, \text{ см}^2$	$\Omega_1 \times 10^{-20}, \text{ см}^2$	$^5D_0 \rightarrow ^7F_1$		$^5D_0 \rightarrow ^7F_2$		$^5D_0 \rightarrow ^7F_4$		
				$A_T, \text{ с}^{-1}$	$\beta, \%$	$A_T, \text{ с}^{-1}$	$\beta, \%$	$A_T, \text{ с}^{-1}$	$\beta, \%$	
1	0.05	1,30	2,74	49,45	38,55	40,24	31,38	38,54	30,06	7,80
2	0.10	1,32	2,79	49,45	38,20	40,83	31,55	39,15	30,25	7,73
3	0.15	1,40	2,76	49,45	37,66	43,08	32,82	38,76	29,52	7,62
4	0.20	1,75	3,24	49,45	33,22	53,87	36,19	45,53	30,59	6,72
5	0.25	1,74	3,09	49,45	33,37	55,29	37,31	43,45	29,32	6,75
6	0.30	1,40	3,14	49,45	36,14	43,17	31,56	44,18	32,30	7,31
7	0.35	1,64	3,40	49,45	33,46	50,61	34,24	47,73	32,30	6,77

На основе спектральных данных и параметров Джарда-Оффельта выделены четыре концентрационных интервала, соответствующие разным типам локального окружения Eu^{3+} . При $x \leq 0,15$ а.е. ионы Eu^{3+} изолированы и равномерно замещают Y^{3+} в регулярных позициях. В интервале $x = 0,20-0,25$ а.е. начинают формироваться пары и малые кластеры, что приводит к росту параметра Ω_2 и усилению ковалентности связи. При $x = 0,30$ а.е. образуются плотные кластеры Eu^{3+} которые действуют как ловушки для мигрирующей энергии, вызывая резкое падение интенсивности люминесценции и снижение параметра Ω_2 . При $x > 0,35$ а.е. кластеризация усиливается, и появляется примесная фаза EuAlO_3 .

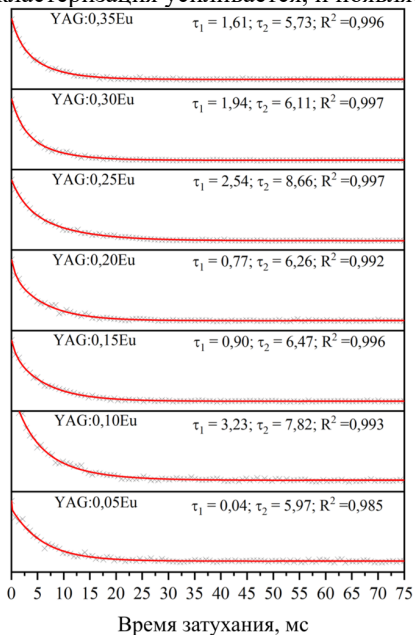


Рис. 21 – Кривые затухания фотолуминесценции порошков YAG:Eu при прямом импульсном возбуждении 395 нм

Кинетические кривые затухания (рис. 21) аппроксимированы двухэкспоненциальной функцией. При $x = 0,05$ а.е. доминирует медленная компонента с $\tau_2 = 5,97$ мс, характерная для изолированных ионов Eu^{3+} . С ростом концентрации увеличивается вклад быстрой компоненты τ_1 , достигая 53% при $x = 0,35$ а.е., что подтверждает образование кластеров. Абсолютный квантовый выход фотолуминесценции PLQY возрастает от $0,2\% \pm 0,5\%$ при $x = 0,05$ а.е. до $5,0 \pm 0,4\%$ при $x = 0,30$ а.е., затем снижается до $2,0 \pm 0,5\%$ при $x = 0,35$ а.е. Внутренний квантовый выход η , рассчитанный по среднему времени жизни находится в пределах $0,71-0,97$.

По спектрам эмиссии при возбуждении 395 нм рассчитаны координаты цветности в системе CIE 1931 и CIE Lab (рис. 22, 23), коррелированная цветовая температура CCT и чистота цвета CP (табл. 6). С увеличением концентрации Eu^{3+} от 0,05 до 0,20 а.е. координата x

смещается от 0,537 до 0,605, координата y от 0,361 до 0,367. Максимальная чистота цвета (74,1%) и наиболее насыщенное красное излучение достигаются при $x = 0,20$ а.е. (координаты $x = 0,605$, $y = 0,367$).

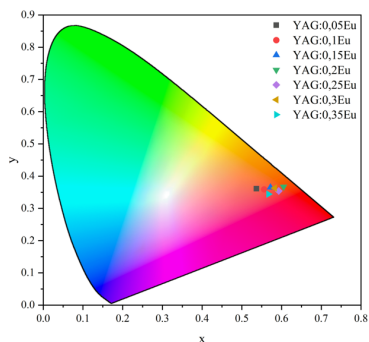


Рис. 22 – Координаты цветности порошков YAG:Eu в цветовом пространстве CIE 1931

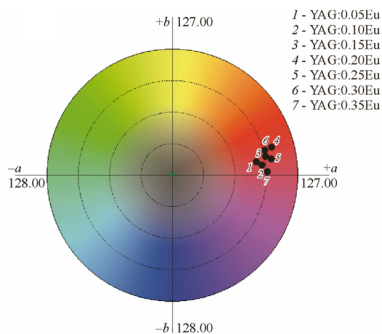


Рис. 23 – Координаты цветности порошков YAG:Eu в цветовом пространстве CIE Lab

Таблица 6

Цветовые характеристики порошков YAG:Eu

$N\bar{z}$	$x Eu^{3+}$	x	y	L	a	b	CCT, K	$CP, \%$
1	0,05	0,537	0,361	100	80,96	15,10	1718	57,4
2	0,10	0,556	0,359	100	89,83	10,71	1720	62,7
3	0,15	0,572	0,365	100	92,63	18,42	1737	65,9
4	0,20	0,605	0,367	100	104,33	20,44	1855	74,1
5	0,25	0,593	0,354	100	101,05	11,71	1901	71,2
6	0,30	0,583	0,363	100	96,25	18,84	1783	68,3
7	0,35	0,567	0,344	100	92,39	4,71	1841	65,6

Коррелированная цветовая температура всех образцов лежит в области 1700–1900 К, что соответствует «теплому» свечению. Полученные колориметрические параметры позволяют рекомендовать YAG:0,20Eu в качестве перспективного красного компонента для белых светодиодов, а также для сцинтилляторов и биомедицинских меток.

ВЫВОДЫ

7. Предложен метод синтеза катионообменной матрицы на основе сульфированного полистирола, пригодной для получения сложноксидных структур типа граната. Установлено, что полученный материал представляет собой частично сшитую сульфоновыми мостиками полистиролсульфокислоту с полной статической обменной емкостью 4,112 мг-экв/г и коэффициентом водопоглощения 97%, что обеспечивает эффективную сорбцию многозарядных катионов.

8. Исследованы процессы сорбции ионов Y^{3+} и Al^{3+} на синтезированной катионообменной матрице. Установлено, что сорбция ионов Y^{3+} протекает по ионообменному механизму, а ионы Al^{3+} сорбируются посредством капиллярного впитывания во внутриматричное пространство, что обеспечивает после пиролиза формирование монофазного YAG со стехиометрией $Y:Al = 3:5$.

9. Определены оптимальные условия ионообменного синтеза монофазных нанопорошков YAG с выходом ~99%: термообработка при 850 °С в течение 5 часов или при 1000 °С в течение 3 часов. Аналогичным образом получены твердые растворы состава $Y_{3-x}Eu_xAl_5O_{12}$ сохраняющие кубическую структуру граната (пр. гр. Ia3d) вплоть до концентрации $x = 0,35$ а.е. включительно. Превышение концентрации $x > 0,35$ а.е. приводит к образованию примесной фазы $EuAlO_3$.

10. По результатам комплексного исследования люминесцентных свойств образцов YAG:Eu установлено, что ионы Eu^{3+} с увеличением концентрации распределяются неравномерно по регулярным позициям в решетке YAG с образованием кластеров с низкой локальной симметрией, что подтверждается появлением дополнительной полосы, соответствующей переходу ${}^5D_0 \rightarrow {}^7F_0$ на спектрах эмиссии при $x > 0,20$ а.е., немонотонным изменением параметров Джадда-Оффельта и параметра асимметрии R.

11. Показано, что при $x = 0,20$ а.е. достигается максимальное значение чистоты цвета (74,1%), и наиболее насыщенное красное излучение. Коррелированная цветовая температура всех образцов находится в области «теплого» свечения (1700–1900 К), что делает их перспективными для использования в качестве красной компоненты в светодиодных источниках света, а также в дисплейных технологиях.

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК:

1. **Шергин, А.В.**, Белая, Е.А., Жеребцов, Д.А. Синтез наноразмерных порошков алюмоиттриевого граната с использованием ионообменной смолы // Ученые записки Крымского федерального университета имени В.И. Вернадского. Биология. Химия. – 2024. – Т. 10. – № 1. – С. 307-315. (6 с./ 8 с.) *перечень ВАК*
2. **Шергин, А.В.**, Белая Е.А. Ионообменный синтез редкоземельных форм алюмоиттриевого граната на катионообменной матрице // Журнал структурной химии. – 2025. – Т. 66. – № 6. – С. 146462. (11 с./ 12 с.) *Web of Science (Q4)*.
3. **Шергин, А.В.** Подбор оптимальных условий ионообменного синтеза нанопорошков алюмоиттриевого граната на катионообменной матрице / А.В. Шергин, П.К. Шидловская, Е.А. Белая, В.В. Фадеев // Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов. – 2025. – № 17. – С. 898-905. (7 с./ 8 с.) *Web of Science (Q4)*
4. **Шергин, А.В.** и др. Синтез и структура катионообменной матрицы на основе сульфированного полистирола для получения сложноксидных неорганических материалов / А.В. Шергин, П.К. Шидловская, В.Э. Эпп, Е.А. Белая, К.Г. Белова // Бутлеровские сообщения. – 2026. – Т. 86. – № 6. – С. 22-30. (9 с./ 12 с.) *перечень ВАК*
5. **Шергин, А.В.**, Шидловская, П.К. Белая, Е.А. Изменение локального окружения Eu^{3+} в нанопорошках YAG, синтезированных на катионообменной матрице // Журнал структурной химии. – 2026. – Т. 67. – № 6. – С. 166525. (12 с./ 13 с.) *Web of Science (Q4)*.

Патенты:

6. Белая, Е.А., **Шергин, А.В.**, Мусатов, В.В., Шидловская, П.К. : пат. [2853506] Рос. Федерация : МПК C01F 17/34, C01F 7/308, C30B 29/28 / заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «ЮУрГГПУ». – № 2024134443 ; заявл. 14.11.2024 ; опубл. 23.12.2025, Бюл. № 36. – 4 с. (3 с./ 4 с.)

Тезисы докладов и статьи в сборниках материалов конференций:

7. **Шергин, А.В.**, Белая, Е.А. Синтез и характеристики алюмоиттриевого граната, допированного ионами редкоземельных элементов // Химия : Материалы 61-й Междунар. науч. студ. конф. 17–26 апреля 2023 г. / Новосиб. гос. ун-т. – Новосибирск : ИПЦ НГУ, 2023. – с. 181. (0,8 с./1 с.)
8. **Шергин, А.В.**, Белая, Е.А. Получение люминофоров на основе алюмоиттриевого граната ионообменным синтезом // Химия : Материалы 62-й Междунар. науч. студ. конф. 17–23 апреля 2024 г. / Новосиб. гос. ун-т. – Новосибирск : ИПЦ НГУ, 2024. – с. 197. (0,8 с./ 1 с.)
9. **Шергин, А.В.**, Белая, Е.А. Оптические характеристики редкоземельных форм алюмоиттриевого граната, синтезированного ионообменным методом //

Химия : материалы 63-й Междунар. науч. студ. конф. 16–22 апреля 2025 г. / Новосиб. гос. ун-т. – Новосибирск : ИПЦ НГУ, 2025. – с. 201. (0,7 с./ 1 с.)

10. Шидловская, П.К., **Шергин, А.В.** Условия получения и характеристики порошков алюмоиттриевого граната, синтезированного ионообменным методом // Химия : материалы 63-й Междунар. науч. студ. конф. 16–22 апреля 2025 г. / Новосиб. гос. ун-т. – Новосибирск : ИПЦ НГУ, 2025. – с. 202. (0,6 с./ 1 с.)

11. **Шергин, А.В.**, Белая, Е.А. Ионообменный синтез $Y_3Al_5O_{12}$ // Проблемы теоретической и экспериментальной химии : тез. докл. XXXIII Рос. молодеж. науч. конф. с международ. участием, посвящ. 100-летию со дня рожд. проф. В. Ф. Барковского, Екатеринбург, 24–27 апр. 2023 г. / Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, Уральский федеральный университет. – Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2023. – с. 295. (0,8 с./ 1 с.)

12. **Шергин, А.В.**, Шидловская, П.К., Белая, Е.А. Ионообменный синтез люминофоров на основе $Y_3Al_5O_{12}$ // Проблемы теоретической и экспериментальной химии : тез. докл. XXXIV Рос. молодеж. науч. конф. с международ. участием, посвящ. 190-летию со дня рожд. Д. И. Менделеева, Екатеринбург, 23–26 апр. 2024 г. / Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, Уральский федеральный университет. – Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2024. – с. 308. (0,6 с./ 1 с.)

13. **Шергин, А.В.**, Шидловская, П.К., Белая, Е.А. Люминесцентные характеристики нанопорошков $YAG:Eu$, синтезированных на катионообменной матрице // Проблемы теоретической и экспериментальной химии : тез. докл. XXXV Рос. молодеж. науч. конф. с международ. участием, посвящ. 165-летию со дня рожд. Н. С. Курнакова, Екатеринбург, 22–25 апр. 2025 г. / Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, Уральский федеральный университет. – Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2025. – с. 295. (0,8 с./ 1 с.)

14. Шидловская, П.К., **Шергин, А.В.**, Белая, Е.А. Определение оптимальных условий ионообменного синтеза порошков состава $Y_3Al_5O_{12}$ // Проблемы теоретической и экспериментальной химии : тез. докл. XXXV Рос. молодеж. науч. конф. с международ. участием, посвящ. 165-летию со дня рожд. Н. С. Курнакова, Екатеринбург, 22–25 апр. 2025 г. / Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, Уральский федеральный университет. – Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2025. – с. 354. (0,7 с./ 1 с.)

15. **Шергин, А.В.**, Белая, Е.А. Синтез катионообменного материала с высокими сорбционными свойствами // Современные материалы и методы решения экологических проблем промышленной агломерации: сборник материалов I всероссийской научно-практической конференции / под ред. В.В. Авдина. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2024. – С. 106-108. (2 с./3 с.)

16. **Шергин, А.В.**, Белая, Е.А. Ионообменный синтез люминофоров на основе алюмоиттриевого граната // 3-я Международная научно-практическая конференция «Редкие металлы и материалы на их основе: технологии, свойства и применение» посвященная памяти академика Н.П. Сагина (РЕДМЕТ-2024): Сборник тезисов. Москва, 3–5 апреля 2024 г. – Москва: АО «Гиредмет» им. Н.П. Сагина, 2024. – С. 277-278. (1,8 с./ 2 с.)

17. **Шергин, А.В.**, Шидловская, П.К., Белая, Е.А. Структура и люминесцентные характеристики редкоземельных форм $Y_3Al_5O_{12}$, синтезированного на катионообменной матрице // Термодинамика и материаловедение: Тезисы докладов XVI Симпозиума с международным участием, Санкт-Петербург, 30 июня – 4 июля 2025 / ответственный за выпуск Е.К. Храпова. Санкт-Петербург: ФТИ им. А.Ф. Иоффе, 2025. – с. 145. (0,8 с./ 1 с.)

18. **Шергин, А.В.**, Шидловская, П.К., Белая, Е.А. Синтез люминесцентных материалов состава $Y_{3-x}RE_xAl_5O_{12}$ с использованием катионообменной матрицы // I Региональная научно-практическая конференция «Физико-химические процессы в конденсированных средах»: сб. тез. докл. (25-26 марта 2025 года, г. Челябинск) – г. Челябинск: Изд-во Челяб. гос. ун-та, 2025. – С. 31-34. (3,5 с./ 4 с.)

19. Шидловская, П.К., **Шергин, А.В.**, Белая, Е.А. Поиск оптимальных условий ионообменного синтеза порошков YAG // Достижения молодых ученых: химические науки: тезисы докладов X Всероссийской молодежной конференции (г. Уфа, 22 - 23 мая 2025 г.) / отв. ред. Р.М. Ахметханов / Уфимск. ун-т науки и технологий. – Уфа: Уфимский университет, 2025. – с. 37. (0,6 с./ 1 с.)

Главы в учебно-методических пособиях:

20. Ярошенко, Ф.А. Методы синтеза твердофазных соединений и материалов. Глава 7. Катионо-, анионообменный синтез: учебное пособие / Ф.А. Ярошенко, **А.В. Шергин**, А.Г. Макогон. Челябинск : Изд-во Челяб. гос. ун-та, 2023. – 151 с. (3 с./ 3 с.)

Шергин Александр Владимирович

Физико-химические закономерности ионообменного синтеза и люминесценции порошков состава $Y_{3-x}Eu_xAl_5O_{12}$ со структурой граната

Специальность 1.4.4. Физическая химия

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата химических наук

Подписано в печать 25.06.2026. Формат $60 \times 84 \frac{1}{16}$
Усл. печ. л. 1,4. Тираж 110 экз. Заказ 366

Отпечатано с готового оригинал-макета
в издательстве Челябинского государственного университета
454021, г. Челябинск, ул. Молодогвардейцев, 57б.