



**МОСКОВСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ**
имени **М.В. ЛОМОНОСОВА**
(МГУ)

Ленинские горы, Москва,

ГСП-1, 119991

Тел.: +7 (495) 939-10-00

Факс: +7 (495) 939-01-26

04.09.2026 № 394-26/013-03

На № _____

УТВЕРЖДАЮ
Проректор – начальник Управления научной политики
Федерального государственного бюджетного
образовательного учреждения высшего образования
«Московский государственный университет
имени М.В. Ломоносова»

доктор физ.-мат. наук, профессор,

член-корреспондент РАН

Федянин Андрей Анатольевич



А.А. Федянин 2026 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

**федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова» о на
диссертационную работу Кузнецова Артема Борисовича «Фазовые равновесия, изоморфизм и оптические свойства сложных боратов редкоземельных элементов», представленной на соискание ученой степени доктора химических наук по специальности
1.4.4. Физическая химия**

Актуальность темы диссертационной работы

Диссертационная работа Кузнецова Артема Борисовича посвящена комплексному исследованию фазовых равновесий, изоморфизма и процессов получения сложных боратов редкоземельных элементов, а также установлению взаимосвязей между реальным составом выращенных кристаллов, особенностями их структуры и оптическими свойствами.

Сложные бораты редкоземельных элементов представляют значительный интерес как функциональные материалы для фотоники. Их кристаллические структуры допускают разнообразные сочетания боро-кислородных групп, катионов различной валентности и нескольких неэквивалентных кристаллографических позиций. Это создает широкие возможности для регулирования люминесцентных и нелинейно-оптических характеристик, но одновременно существенно усложняет фазообразование и выращивание монокристаллов заданного состава.

Большинство практически интересных многокомпонентных боратов плавится инконгруэнтно. Их монокристаллы получают преимущественно из высокотемпературных растворов-расплавов, состав которых изменяется в ходе кристаллизации. При этом реальные

составы кристалла и исходной шихты могут заметно различаться вследствие изоморфных замещений, сегрегации компонентов, различия коэффициентов распределения и вхождения примесей из растворителя. В результате даже кристаллы, отнесенные к одному структурному типу и имеющие одинаковую номинальную формулу, могут существенно различаться по степени дефектности, локальному окружению активных ионов и функциональным характеристикам. Поэтому разработка нового материала не может ограничиваться выбором перспективной химической формулы и последующим подбором растворителя. Необходимы сведения о фазовых равновесиях, температурных границах существования фаз, областях гомогенности, полиморфных превращениях и устойчивости конкурирующих соединений. Только после этого возможен обоснованный выбор состава ростовой системы и температурного режима кристаллизации. Именно такая логика реализована в диссертационной работе Кузнецова А.Б. Исследование начинается с построения фазовых диаграмм и определения областей гомогенности. Затем устанавливаются структурные механизмы изменения состава, выбираются условия получения монокристаллов и изучается влияние реального состава на оптические свойства.

Следует особо отметить, что в работе разграничиваются номинальный состав шихты, состав равновесной твердой фазы и состав реально выращенного кристалла. Это принципиально важно для кристаллогенезиса многокомпонентных соединений. Фазовая диаграмма определяет набор термодинамически устойчивых фаз и пределы изменения их состава, тогда как конкретный состав кристалла дополнительно зависит от поведения компонентов в растворе-расплаве и условий роста.

Актуальность работы определяется также необходимостью ускорения исследований сложных многокомпонентных систем. Традиционный подход, основанный на последовательном синтезе большого числа дискретных составов, требует значительных временных и материальных затрат. Адаптация метода диффузионных пар к тугоплавким боратым системам позволила автору получать концентрационные профили, выявлять промежуточные фазы и уточнять концентрационные границы областей гомогенности при существенно меньшем числе отдельных синтезов.

Диссертационная работа находится на пересечении физической химии многокомпонентных систем, кристаллохимии, роста кристаллов и физики функциональных материалов. Поставленная проблема имеет самостоятельное фундаментальное значение и одновременно непосредственно связана с разработкой новых люминесцентных и нелинейно-оптических кристаллов.

Цель и задачи исследования

Целью диссертационной работы являлось установление физико-химических и кристаллохимических закономерностей фазообразования и изоморфизма в сложных боратах

редкоземельных элементов, а также выявление взаимосвязей между структурными особенностями кристаллов и их функциональными оптическими свойствами.

Для достижения поставленной цели автором решен широкий круг взаимосвязанных задач. Адаптирован метод диффузионных пар для исследования фазовых равновесий в сложных боратных системах. Изучены фазовые отношения в системах RBO_3 – MBO_3 , Na_3BO_3 – RBO_3 , $Sr_3B_2O_6$ – RBO_3 и Na_3BO_3 – $Sr_3B_2O_6$ – RBO_3 . Определены границы областей гомогенности промежуточных соединений и проанализированы механизмы изо- и гетеровалентного изоморфизма. Синтезированы и структурно охарактеризованы новые семейства сложных боратов. Для выбранных составов выращены монокристаллы из высокотемпературных растворов-расплавов, исследованы их состав, структурная однородность, люминесцентные и нелинейно-оптические свойства. Задачи сформулированы последовательно и соответствуют цели работы. Их решение позволило автору перейти от установления общих закономерностей фазообразования к анализу конкретных проблем выращивания функциональных кристаллов.

Общая характеристика диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, выводов, списка литературы и приложений. Работа содержит обширный экспериментальный материал, представленный в виде фазовых диаграмм, концентрационных профилей, изображений диффузионных зон и выращенных кристаллов, структурных моделей, спектральных зависимостей и результатов нелинейно-оптических измерений.

Во введении обоснована актуальность темы, сформулированы цель и задачи, научная новизна, теоретическая и практическая значимость, положения, выносимые на защиту, а также сведения о достоверности, апробации и личном вкладе автора.

Первая глава представляет собой аналитический обзор литературы по кристаллохимии, фазовым равновесиям и функциональным свойствам сложных боратов.

Рассмотрены основные типы боро-кислородных групп, способы их объединения в конечные комплексы, слои и каркасы, а также существующие классификации боратных структур. Проанализирована роль ориентации и поляризуемости анионных групп в формировании нелинейно-оптического отклика.

Значительное внимание уделено соединениям семейства $RM_3(BO_3)_4$, двойным системам со щелочными и щелочноземельными металлами, тройным ортоборатам и соединениям с конденсированными боро-кислородными группами. В обзоре обоснованно используется структурное родство боратов и ряда природных карбонатов. Структурные типы хантита, доломита, бюшлиита и эйтелита позволяют систематизировать распределение катионов в сложных ортоборатах и объяснить возможные варианты катионного порядка. Вместе с тем автор не ограничивается формальным сопоставлением структурных прототипов, а рассматривает влияние размеров и координационных предпочтений катионов на устойчивость

конкретных боратных фаз. Анализ литературы показывает, что для многих сложных боратов имеются сведения об идеальных кристаллических структурах и отдельных оптических характеристиках, но отсутствуют полные данные о фазовых равновесиях и пределах изменения состава. В результате номинальная формула нередко принимается за реальный состав соединения без учета области гомогенности и распределения катионов по позициям. Выявленное противоречие логично определяет направление диссертационной работы: от исследования равновесий и реального состава фаз к выращиванию кристаллов и изучению их свойств.

Во второй главе описаны методы получения и исследования материалов.

Поликристаллические образцы получали твердофазным синтезом и методом сжигания растворов. Монокристаллы выращивали из высокотемпературных растворов методами спонтанной и затравочной кристаллизации. Использовались боратные, молибдатные и фторидсодержащие растворители.

Особое место занимает разработка диффузионного подхода к изучению фазовых равновесий. Перенос метода диффузионных пар с металлических систем на сложные оксиды требует учета низких скоростей диффузии, летучести борсодержащего компонента, качества контакта исходных таблеток и возможности кинетического подавления отдельных фаз. Автором описаны подготовка исходных соединений, режимы длительных отжигов, анализ концентрационных профилей и критерии интерпретации диффузионных зон. Результаты сопоставлялись с данными твердофазного синтеза отдельных составов, рентгенофазового и термического анализа.

Для определения состава и структуры использованы порошковая и монокристаллическая рентгеновская дифракция, полнопрофильное уточнение, сканирующая электронная микроскопия и энергодисперсионный микроанализ. Термическое поведение исследовано методами ДСК, ДТА и, для отдельных объектов, высокотемпературной рентгеновской дифракцией.

Оптическая характеристика включала спектроскопию поглощения, ИК- и КР-спектроскопию, регистрацию спектров возбуждения и люминесценции, измерение времен жизни и абсолютного квантового выхода. Эффективность генерации второй гармоники оценивалась методом Куртца–Перри с контролем порошковых фракций и плотности мощности возбуждения.

Совокупность использованных методов соответствует поставленным задачам и обеспечивает исследование материала на всех основных этапах — от фазообразования до функционального отклика.

Основные результаты работы

Основной объем экспериментальных данных представлен в третьей главе.

Первый раздел посвящен системам RBO_3 – MBO_3 и хантитоподобным соединениям $RM_3(BO_3)_4$.

На примере системы $TbBO_3$ – $Al_2O_3 \cdot B_2O_3$ показано, что $TbAl_3(BO_3)_4$ следует рассматривать как фазу переменного состава. Определена ширина область гомогенности и установлено, что избыточные ионы Tb^{3+} входят в октаэдрические позиции Al^{3+} . Полученный результат имеет непосредственное значение для выращивания монокристаллов. Кристаллы, выращенные из раствора-расплава, отличаются по составу от номинальной формулы, причем в крупных образцах наблюдается изменение отношения $Tb:Al$ от центральной части к периферии. Автором проведена оптимизация состава растворителя путем варьирования отношений B/Al и Mo/K . Это позволило увеличить размеры кристаллов и улучшить качество прозрачных областей. Однако даже после оптимизации состав оставался внутри области гомогенности, но не всегда совпадал со стехиометрическим отношением 1:3. Сопоставление образцов различного состава показало, что увеличение содержания Tb в позициях Al сопровождается снижением квантового выхода люминесценции и эффективности генерации второй гармоники. Следовательно, для получения воспроизводимых оптических характеристик необходимо контролировать не только пространственную группу кристалла, но и его положение внутри области гомогенности.

При переходе от алюминия к галлию область гомогенности хантитоподобной фазы расширяется. Этот результат согласуется с уменьшением размерного несоответствия между катионами и подтверждает роль геометрической совместимости позиций в формировании твердых растворов.

Значительный интерес представляет систематическое исследование систем RBO_3 – $ScBO_3$ по ряду редкоземельных элементов. Для легких лантаноидов образуются хантитоподобные соединения $LnSc_3(BO_3)_4$. В системах с Sm и Eu обнаружены соединения $LnSc(BO_3)_2$ доломитового типа. При дальнейшем уменьшении ионного радиуса РЗЭ хантитоподобные промежуточные фазы исчезают и формируются области твердых растворов на основе простых ортоборатов. Выявленная последовательность отражает закономерное изменение фазообразования при варьировании размера редкоземельного катиона. Автор не ограничивается констатацией существования отдельных соединений, а объединяет их в общую схему морфотропной эволюции. На примере системы $SmBO_3$ – $ScBO_3$ установлено существование нового конгруэнтно плавящегося соединения $SmSc(BO_3)_2$ и нескольких модификаций $SmSc_3(BO_3)_4$. Для полученных фаз выращены монокристаллы и сопоставлены их структурные и оптические характеристики. Особенно показательно сравнение $SmBO_3$, $SmSc(BO_3)_2$ и $SmSc_3(BO_3)_4$. Эти соединения содержат один и тот же люминесцентный ион, но характеризуются разными способами организации катионной подрешетки. Увеличение

расстояния Sm–Sm в хантитоподобной структуре сопровождается резким снижением концентрационного тушения и многократным ростом интенсивности люминесценции.

Данный результат имеет не только прикладное, но и фундаментальное значение. Он показывает, что эффективность редкоземельного люминофора может регулироваться архитектурой самой кристаллической матрицы, а не только уменьшением общей концентрации активатора.

Большой объем исследований выполнен для хантитоподобных скандоборатов $Ln_xR_ySc_z(BO_3)_4$. Систематическое введение различных РЗЭ позволило определить закономерности их распределения между тригонально-призматическими позициями основного лантаноида и октаэдрическими позициями скандия. Крупные катионы преимущественно занимают позицию основного РЗЭ. Малые катионы входят главным образом в октаэдрические позиции Sc^{3+} . Ионы промежуточного размера распределяются между обеими подрешетками. Практическая значимость этой закономерности состоит в том, что состав исходной шихты не определяет однозначно локальное окружение активатора. В зависимости от размера допант может формировать один или несколько оптических центров, влиять на устойчивость полиморфной модификации и изменять нелинейно-оптический отклик. Показано, что введение ряда РЗЭ стабилизирует тригональную структуру R32. Для состава $Tb_{0,23}La_{0,77}Sc_3(BO_3)_4$ получена эффективность генерации второй гармоники, достигающая 4,5 значений относительно KDP.

Следующий блок исследований посвящен системам $Na_3BO_3-RBO_3$. Для выбранных РЗЭ построены фазовые диаграммы, установлены промежуточные соединения и определены концентрационные пределы устойчивости. Выращены монокристаллы на основе $Na_3R(BO_3)_2$ и $Na_3R_2(BO_3)_3$. Показано, что выбор температуры начала кристаллизации позволяет управлять образованием отдельных полиморфных модификаций. Тем самым результаты физико-химического анализа непосредственно использованы при построении ростового эксперимента. Интересным результатом стало обнаружение генерации второй гармоники в кристаллах твердых растворов на основе $Na_3Pr(BO_3)_2$ и $Na_3Gd(BO_3)_2$, имеющих центросимметричную среднюю структуру. Автор связывает наблюдаемый эффект с локальным нарушением симметрии вблизи дефектов, возникающих при гетеровалентном изоморфизме.

В системах $Sr_3B_2O_6-RBO_3$ выявлены существенные различия между соединениями с Nd и Yb. $Sr_3Nd_2(BO_3)_4$ характеризуется протяженной областью гомогенности. При отклонении от стехиометрического состава в противоположных направлениях предполагаются различные способы компенсации заряда. В иттербиевой системе вследствие большего размерного несоответствия области гомогенности значительно уже. Особенно важно, что максимальная интенсивность люминесценции Nd^{3+} обнаружена не для стехиометрического состава $Sr_3Nd_2(BO_3)_4$, а в части области гомогенности, смещенной в сторону избытка стронция.

Интенсивность возрастает приблизительно на 30%. Этот результат демонстрирует важный для материаловедения вывод: оптимальный функциональный состав не обязательно совпадает с целочисленной химической формулой соединения. Выбор состава внутри области гомогенности может использоваться как самостоятельный инструмент регулирования свойства.

Исследование тройных систем $\text{Na}_3\text{BO}_3\text{--Sr}_3\text{B}_2\text{O}_6\text{--RBO}_3$ позволило установить образование соединений $\text{NaSrR(BO}_3)_2$ для Y и тяжелых редкоземельных элементов. Для $\text{NaSrYb(BO}_3)_2$ выращены монокристаллы и установлен обратимый полиморфный переход $P2_1/m \leftrightarrow R3m$ при 548 °C. Низкотемпературная модификация характеризуется упорядоченным распределением Na и Sr, тогда как в высокотемпературной фазе эти катионы статистически распределены в общей позиции. Наблюдаемый переход сопровождается изменением координационного окружения Yb^{3+} и отражается в люминесцентных спектрах. Полученные данные показывают связь температурной перестройки катионной подсистемы с функциональными характеристиками кристалла.

Бликие структурные превращения установлены для соединений $\text{KSrR(BO}_3)_2$. Сопоставление различных представителей семейства позволило связать полиморфизм с размерным несоответствием щелочного и щелочноземельного катионов и с геометрической емкостью занимаемых ими позиций. Для семейства $\text{KCaR(BO}_3)_2$ определен иной вариант кристаллической структуры, характеризующийся специфическим распределением катионов по слоям. Установлено частичное взаимное замещение Ca^{2+} и R^{3+} .

В работе получено новое соединение $\text{Li}_3\text{Ba}_4\text{Sc}_3\text{B}_8\text{O}_{22}$. В его структуре одновременно присутствуют изолированные группы BO_3 и B_2O_5 . Такое сочетание формирует гибридный боро-кислородный каркас. В структуре выявлено значительное разупорядочение позиций лития. Допирование тербием позволило получить материал с интенсивной зеленой люминесценцией.

Завершающий раздел третьей главы посвящен пентаборатам $\text{K}_7\text{M}^{\text{II}}\text{R}^2(\text{B}_5\text{O}_{10})_3$. Выращены монокристаллы соединений с Ca, Sr и Ba, а также с различными редкоземельными катионами. Их структура построена из конденсированных групп B_5O_{10} и относится к нецентросимметричной пространственной группе $R32$. В изоструктурном ряду исследовано влияние природы катионов на температуру инконгруэнтного плавления, люминесцентные характеристики и генерацию второй гармоники. Показано, что замена Ca на Sr и Ba сопровождается изменением нелинейного отклика, тогда как введение Yb^{3+} может приводить к ослаблению регистрируемого сигнала вследствие поглощения на длине волны второй гармоники.

В четвертой главе выполнено обобщение полученного экспериментального материала. Автор рассматривает фазовое равновесие, область гомогенности, распределение катионов, полиморфизм и функциональные свойства как взаимосвязанные уровни описания кристаллического материала. Показано, что размер катиона определяет возможность его

размещения в конкретной позиции и оказывает существенное влияние на устойчивость структурного типа. Вместе с тем для интерпретации свойств необходимо учитывать координационные предпочтения, характер дефектов, расстояния между оптическими центрами, валентное состояние активатора и особенности фононной подсистемы.

Особенно важен раздел, посвященный переходу от фазовых диаграмм к выращиванию объемных кристаллов. На примере $\text{NdSc}_3(\text{BO}_3)_4$ и $\text{PrSc}_3(\text{BO}_3)_4$ изучено влияние легирования Y и La на полиморфизм, оптические характеристики и ростовую однородность. Для неодимовой матрицы изменение состава позволило улучшить отдельные характеристики, однако одновременное достижение высокой эффективности генерации второй гармоники, подавления нежелательного фазового перехода и оптической однородности оказалось затруднительным. Для $\text{PrSc}_3(\text{BO}_3)_4$ легирование иттрием повысило нелинейный отклик до 2,1–2,2 KDP без заметного ухудшения однородности кристалла. Приведенные результаты корректно показывают пределы применимости чисто термодинамического подхода. Фазовая диаграмма необходима для выбора устойчивой фазы и диапазона состава, но качество объемного кристалла дополнительно определяется кинетикой роста, сегрегацией и эволюцией состава жидкой фазы.

Научная новизна и значимость полученных результатов

Научная новизна диссертационной работы определяется прежде всего комплексным характером исследования.

Автором адаптирован метод диффузионных пар к сложным боратым системам и на его основе построены температурно-концентрационные диаграммы значительного числа систем.

Количественно определены области гомогенности нескольких десятков сложных боратов и показано, что переменный состав является характерным, а не исключительным свойством изученных фаз.

Выявлена закономерная смена типов фазообразования в системах $\text{RBO}_3\text{--ScBO}_3$ и обнаружены новые соединения доломитового типа.

Установлены закономерности распределения РЗЭ между различными кристаллографическими позициями в хантитоподобных скандоборатах.

Изучены полиморфные переходы, связанные с упорядочением и разупорядочением катионов в тройных ортоборатах.

Получены новые семейства соединений с различным строением борокислородной подсистемы.

На конкретных примерах показано, что изменение состава внутри одной области гомогенности может приводить как к ухудшению, так и к улучшению функциональных свойств.

Существенным достоинством является использование полученных фазовых и структурных данных при выборе условий выращивания монокристаллов и анализе причин их ростовой неоднородности.

Теоретическая значимость работы состоит в развитии представлений о фазообразовании и изоморфизме в многокомпонентных боратных системах. Полученные результаты показывают, что область гомогенности, позиционное распределение катионов и степень разупорядочения являются фундаментальными характеристиками кристаллической фазы.

Практическая значимость определяется возможностью использования построенных фазовых диаграмм при выборе составов шихты и температурных режимов кристаллизации. Получены монокристаллы с высоким квантовым выходом люминесценции и значительной эффективностью генерации второй гармоники. Результаты работы защищены патентами Российской Федерации.

Достоверность результатов и личный вклад автора

Достоверность результатов обеспечивается сочетанием независимых физико-химических методов.

Данные диффузионных экспериментов проверялись путем твердофазного синтеза отдельных составов, рентгенофазового и термического анализа. Кристаллические структуры определялись по монокристалльным и порошковым дифракционным данным.

Состав и однородность образцов исследовались методом СЭМ-ЭДС. Полиморфные переходы подтверждены термическими и высокотемпературными рентгенографическими исследованиями. Оптические свойства изучались на предварительно аттестованных образцах.

Основные результаты опубликованы в рецензируемых научных изданиях и представлены на российских и международных конференциях.

Личный вклад Кузнецова А.Б. является значительным. Автором адаптирована методика диффузионных экспериментов, проведены систематические исследования фазовых равновесий, выполнены синтезы и выращены монокристаллы из высокотемпературных растворов-расплавов.

Соискатель непосредственно участвовал в постановке задач структурных и оптических исследований, обработке и интерпретации полученных данных. Им выполнено сопоставление фазовых диаграмм, реальных составов кристаллов, структурных характеристик и функциональных свойств.

Масштаб экспериментальной работы, число изученных систем и уровень обобщения результатов соответствуют требованиям, предъявляемым к докторским диссертациям.

Замечания и вопросы

При общей высокой оценке диссертационной работы имеются следующие замечания и вопросы:

1. В работе убедительно показано, что фазовые диаграммы исходных боратных систем необходимы для выбора составов и температурных режимов выращивания. Вместе с тем

большинство монокристаллов получено из многокомпонентных растворов-расплавов, содержащих дополнительные компоненты. Было бы полезно более четко сформулировать, какую информацию бинарная или тройная диаграмма исходной системы позволяет непосредственно использовать при проектировании флюсовой кристаллизации, а какие параметры — положение ликвидуса, область первичной кристаллизации и состав растущего кристалла — определяются уже конкретным растворителем.

2. Для ряда хантитоподобных боратов установлено изменение состава выращенного кристалла по его объему. Автор связывает наблюдаемую зональность с коэффициентами распределения компонентов и изменением состава раствора-расплава в процессе кристаллизации. Вместе с тем вклад могут вносить скорость роста, степень пересыщения и приближение состава твердой фазы к границе области гомогенности. Какие из представленных в диссертации результатов позволяют автору разграничить равновесное распределение компонентов между жидкостью и кристаллом и собственно кинетические причины ростовой зональности?

3. Одним из наиболее содержательных результатов является различное влияние отклонения от стехиометрии на оптические свойства. В $\text{Tb}_x\text{Al}_{4-x}(\text{BO}_3)_4$ изменение соотношения $\text{Tb}^{3+}/\text{Al}^{3+}$ приводит к снижению квантового выхода и сигнала генерации второй гармоники, тогда как смещение состава $\text{Sr}_3\text{Nd}_2(\text{BO}_3)_4$ в сторону избытка стронция сопровождается усилением люминесценции. Какой общий кристаллохимический критерий, по мнению автора, позволяет предположить направление такого влияния? Что имеет определяющее значение: положение дефекта относительно активного иона, изменение расстояний между оптическими центрами, способ компенсации заряда, локальная симметрия или совокупность этих факторов?

4. В диссертации предложены конкретные размерные критерии образования ряда структурных типов, полиморфных превращений и распределения катионов между позициями. Следует ли рассматривать установленные граничные значения как универсальные правила или как эмпирические критерии, справедливые внутри определенных семейств соединений? Какие дополнительные параметры необходимо учитывать при переносе полученных закономерностей на другие боратные системы с иными координационными числами и характером катионного порядка?

5. При значительном объеме диссертации в тексте и автореферате имеются отдельные редакционные и справочные несогласованности. В частности, различаются приведенные сведения об общем числе публикаций и объеме диссертационной работы; формула эталонного кристалла KDP в одном из фрагментов записана как H_2KPO_4 вместо KH_2PO_4 ; не во всех разделах единообразно оформлены индексы в химических формулах, обозначения структурных модификаций, единицы измерения и ссылки на рисунки. Эти недочеты имеют

технический характер, не влияют на достоверность результатов и могут быть устранены при окончательном оформлении материалов.

Высказанные замечания преимущественно касаются границ применимости предложенных обобщений, интерпретации уже полученных результатов и оформления текста. Они не снижают общей высокой оценки диссертационной работы.

Заключение

Диссертационная работа Кузнецова Артема Борисовича «Фазовые равновесия, изоморфизм и оптические свойства сложных боратов редкоземельных элементов» представляет собой завершенное самостоятельное научное исследование, выполненное на высоком экспериментальном уровне. В работе решена важная научная проблема установления закономерностей фазообразования и изоморфизма в многокомпонентных боратных системах и использования этих закономерностей для направленного получения функциональных кристаллов.

К наиболее значимым результатам относятся разработка ускоренного подхода к исследованию фазовых равновесий, количественное определение областей гомогенности, установление закономерностей позиционного изоморфизма, выявление морфотропных и полиморфных превращений, получение новых семейств соединений и определение влияния реального состава кристаллов на их люминесцентные и нелинейно-оптические характеристики. Особенно положительно следует оценить последовательный переход от фазовой диаграммы к ростовому эксперименту. Автор показывает, как устойчивость фаз, области гомогенности, распределение катионов и изменение состава раствора-расплава определяют реальные составы и качество выращенных кристаллов.

Полученные результаты имеют существенное значение для физической химии многокомпонентных систем, кристаллохимии и кристаллогенеза сложных оксидных соединений. Диссертационная работа находится на пересечении физической химии многокомпонентных систем, кристаллохимии, роста кристаллов и физики функциональных материалов. Поставленная проблема имеет самостоятельное фундаментальное значение и одновременно непосредственно связана с разработкой новых люминесцентных и нелинейно-оптических кристаллов.

Автореферат отражает содержание диссертационной работы. Основные результаты опубликованы в рецензируемых научных изданиях и прошли достаточную апробацию.

По содержанию, использованным методам и характеру полученных результатов диссертационная работа соответствует специальности 1.4.4. Физическая химия.

Диссертационная работа Кузнецова Артема Борисовича соответствует требованиям пунктов 9–14 Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного постановлением

Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842 в действующей редакции, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора наук.

Кузнецов Артем Борисович заслуживает присуждения ученой степени доктора химических наук по специальности 1.4.4. Физическая химия.

Отзыв заслушан, обсужден и утвержден на заседании кафедры кристаллографии и кристаллохимии геологического факультета Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова» (протокол № 8/26 от 3 сентября 2026 г.).

Декан геологического факультета М
корр. РАН, д. х. н., профессор



 Еремин Н.Н.

Заместитель заведующего кафедрой
кристаллографии и кристаллохимии
геологического ф-та МГУ, д. х. н.

 Шванская Л.В.

Ученый секретарь кафедры кристаллографии
и кристаллохимии геологического ф-та МГУ,
к. г.-м. н.

 Кирюхина Г.В.

Отзыв подготовил доктор химических наук, доцент, ведущий научный сотрудник, заведующий лабораторией кристаллографии и роста кристаллов имени Н.И. Леонюка кафедры кристаллографии и кристаллохимии геологического факультета Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова Мальцев Виктор Викторович,

Контактные сведения: Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра кристаллографии и кристаллохимии 119234, г. Москва, Ленинские горы, д. 1 Телефон: +7 (495) 939-28-81 Электронная почта: maltsev@geol.msu.ru

Я, Мальцев Виктор Викторович, согласен на включение моих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета 24.1.086.01, и их дальнейшую обработку.

 В.В. Мальцев

« 3 » сентября 2026 г.