СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ | SIBERIAN FEDERAL UNIVERSITY

МИНОБРНАУКИ РОССИИ
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский федеральный университет»

660041, Красноярский край,
г. Красноярск, проспект Свободный, д. 79
телефон: (391) 244-82-13, тел./факс: (391) 244-86-25
http://www.sfu-kras.ru, e-mail: office@sfu-kras.ru

ОКПО 02067876; ОГРН 1022402137460;
ИНН/КПП 2463011853/246301001

04.09.2025 № 84

на № _____ от _____

УТВЕРЖДАЮ
Проректор по учебной работе
ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет»
Денис Сергеевич Гуц

_____

«04» сентября 2025 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации на диссертационную работу Архипина Анатолия Сергеевича «Структурные и физико-химические свойства некристаллических фаз, образованных оксидами кальция, магния, алюминия и титана», представленную на соискание ученой степени кандидата химических наук по специальности 1.4.4. – Физическая химия (Химические науки)

Диссертационная работа Архипина Анатолия Сергеевича посвящена изучению структурных и физико-химических свойств некристаллических фаз, обрадованных оксидами кальция, магния, алюминия и титана.

Актуальность диссертационной работы Архипина А.С. обусловлена необходимостью наличия достоверных структурных и физико-химических свойств аморфных веществ для их применения в различных областях, таких как геобаротермометрия, металлургия, материаловедение, стекольная промышленность и др. Для эффективного применения аморфных веществ необходимо обладать набором данных в формате «состав – структура – свойство». Стоит отметить, что в качестве объектов исследования автором были выбраны системы, в которых отсутствуют классические стеклообразующие оксиды, такие как SiO_2, B_2O_3, P_2O_5, поскольку такие

системы изучены гораздо менее комплексно и полно. В связи с этим основой всего исследования была выбрана система $CaO–Al_2O_3$, которая применяется в производстве глиноземистого цемента, различных видов керамики, специальных стекол с высокой ИК-прозрачностью, а также в металлургии как компонент шлаков и огнеупорных материалов. В ней Al_2O_3 выполняет роль каркасообразователя сетки. Таким образом, изучение влияния различных добавок (TiO_2, MgO) на структурных и физико-химические свойства некристаллических фаз в система $CaO–Al_2O_3$ является актуальной задачей в настоящее время.

Новизна работы заключается в том, что в диссертации Архипина А.С. впервые проведено комплексное и систематическое экспериментальное и расчетное исследование структурных и физико-химических свойств стекол в системах $CaO–Al_2O_3$, $CaO–Al_2O_3–TiO_2$ и $CaO–MgO–Al_2O_3$. Так, с помощью различных калориметрических методов впервые был получен набор термодинамических свойств стекол в исследуемых системах, а именно определены изобарные теплоемкости стекол, а также энтальпии растворения некоторых стекол, с последующим расчетом энтальпии их образования из оксидов. С точки зрения структуры стекол в исследуемых системах впервые экспериментально определено локальное окружение Ca, Al и Ti с помощью XANES-спектроскопии. С точки зрения реологии впервые были экспериментально измерены температуры стеклования в исследуемых системах, а также вязкость некоторых стекол в окрестности температуры стеклования в системе $CaO–Al_2O_3–TiO_2$. Помимо экспериментального исследования, в работе автором был впервые применен метод классической молекулярной динамики для расчетов различных структурных и физико-химических свойств стекол в системах $CaO–Al_2O_3–TiO_2$ и $CaO–MgO–Al_2O_3$.

Теоретическая и практическая значимость диссертационной работы состоит в том, что в ней получен комплекс структурных, термодинамических и реологических свойств стекол на основе оксидов кальция, магния, алюминия и титана. Полученные данные могут быть использованы для построения единой

физико-химической модели изученных объектов. Также, поскольку изучение систем проводилось по принципу пирамиды (от малокомпонентных к увеличению компонентности), то полученный в работе набор экспериментальных и расчетных данных может быть использован при моделировании термодинамических свойств фаз и фазовых равновесий с участием стекол и расплавов (в т.ч., в рамках методологии CALPHAD 3-го поколения). Полученные численные значения термодинамических функций могут быть в дальнейшем использованы в геологических и планетологических исследованиях для моделирования процессов, которые проходили при зарождении планет. Отработанная методология на модельном объекте, а также на стеклах в исследуемых системах, может быть, в дальнем успешно использована при изучении аморфных веществ в других многокомпонентных системах. Практическая значимость работы подтверждается и тем, что часть исследования была выполнена в рамках гранта № 075-15-2021-1353 «Развитие синхротронных и нейтронных исследований и инфраструктуры для материалов энергетики нового поколения и безопасного захоронения радиоактивных отходов».

Структура и общая характеристика работы. Диссертационная работа состоит из введения, обзора литературы, экспериментальной части, расчетной части, обсуждения результатов, выводов, списка литературы и приложения. Основной материал диссертационной работы изложен на 115 страницах, результаты работы продемонстрированы 46 рисунками и 22 таблицами. Список литературы включает 144 наименований. Приложение включает 19 страниц с таблицами и рисунками, где представлены первичные исходные данные результатов адиабатической калориметрии, калориметрии сброса и растворения и ДСК, демонстрация оптимизированных параметров потенциала Борна-Майера-Хаггинса для MgO и результаты расчета структурных свойств стекол в исследуемых системах с помощью метода классической молекулярной динамики.

Во **Введении** приведены актуальность исследования, практическая и теоретическая значимость, новизна, перечислены объекты исследования, а также сформулированы цели и задачи.

Обзор литературы состоит из трех разделов. В преамбуле рассмотрена общая информация, посвященная аморфному состоянию вещества. Далее автор решил поделить разделы по пути увеличения компонентности в системе. Таким образом, в первом разделе приведена подробная информация о двухкомпонентной системе $CaO–Al_2O_3$, являющаяся основой настоящего исследования. Во втором разделе кратко рассмотрены трехкомпонентные системы $CaO–Al_2O_3–TiO_2$ и $CaO–MgO–Al_2O_3$. А третий раздел содержит выводы по результатам анализа литературных данных. Архипиным А.С. отмечено, что стекла в системе $CaO–Al_2O_3$ полноценно изучены только с точки зрения структуры, а систематических исследований реологических и термодинамических свойств стекол в литературе найдено не было. В трехкомпонентных системах с добавками TiO_2 и MgO ($CaO–Al_2O_3–TiO_2$, $CaO–MgO–Al_2O_3$) как структурные, так и физико-химические свойства некристаллических фаз (стекол) изучены очень фрагментарно.

В **Экспериментальной части** работы представлена информация об используемых реактивах и о выборе исследуемых составов, подробны описаны методики синтеза стекол методом закалки и определения элементного состава после синтеза с помощью рентгенофлуоресцентного анализа.

Основным методом изучения структуры (раздел «Структурные свойства») стекол автор выбрал K-edge XANES-спектроскопию Ca, Al и Ti. С ее помощью было экспериментально определено локальное окружение исследуемых атомов. Стоит отметить, что для атомов Ca и Ti автор анализировал положение и относительную интенсивность предкраевого пика, из чего делал выводы о координационном числе атомов.

Основная часть работы посвящена экспериментальному изучению термодинамических свойств стекол. Для этого были использованы различные виды калориметрии, такие как адиабатическая калориметрия, калориметрия сброса и растворения, калориметрия сброса, дифференциальная сканирующая

калориметрия. Также была измерена плотность исследуемых стекол, что очень важно, поскольку молярный объем (плотность) может быть использован, как внутренний параметр при описании стекол. В разделе «Термодинамические свойства» подробно содержится информацию обо всех экспериментальных методах определения термодинамических свойств стекол, используемых в работе. На основе экспериментального определения изобарной теплоемкости, Архипин А.С. аппроксимировал полученные данные с помощью комбинации функций Планка-Эйнштейна.

В разделе «Реологические свойства» представлена информация об условиях эксперимента по определению температуры стеклования стекол, а также вязкости в окрестности температуры стеклования. Стоит отметить, что эксперимент по измерению вязкости стекол является сложным, но очень важным, поскольку в литературе гораздо больше уделено внимания измерению вязкости расплавов, нежели стекол. Поэтому данная часть работы безусловно является одним из главных результатов всего диссертационного исследования.

Стоит отдельно отметить, что перед тем, как приступить к исследованию термодинамических свойств стекол в исследуемых системах автор диссертации провел предварительное исследование термодинамических свойств на тестовом объекте $(CaO)_{0.501}(Al_2O_3)_{0.098}(SiO_2)_{0.401}$ (Ca40.10) в хорошо исследованной системе $CaO–Al_2O_3–SiO_2$ (разделе «Результаты экспериментального исследования модельного образца Ca40.10»). На данном тестовом образце была проведена отработка методик определения термодинамических свойств стекол методами адиабатической калориметрии и калориметрии сброса и растворения. Было показано, что полученные результаты воспроизводят литературные данные в пределах ошибки эксперимента, что еще раз подтверждает достоверность полученных автором экспериментальных данных.

Помимо экспериментального исследования стекол автор диссертации использовал метод классической молекулярной динамики, которой представлен в **Расчетной части**. В данной главе сначала представлена общая информация, касающаяся метода классической молекулярной динамики, перечислены достоинства данного метода, обоснован выбор межчастичного потенциала

взаимодействия (потенциал Борна-Майера-Хаггинса, BMH), обозначены основные этапы расчетной части работы.

Поскольку параметры взаимодействия потенциала BMH для CaO, Al_2O_3 и TiO_2 были найдены в литературе, то оптимизацию параметров Архипин А.С. проводил только для MgO. Оптимизация проводилась путем сопоставления структурных свойств (функции парной корреляции), полученных методом классической молекулярной динамики (МД) и *ab initio* молекулярной динамики (АМД), причем данные АМД считались «референсными», по ним оптимизировались параметры для классической МД. Было показано, что найденный набор параметров потенциала BMH позволяет адекватно описывать структурные, реологические и термодинамические свойства твердого и жидкого MgO.

В дальнейшем найденные параметры для MgO были объединены с параметрами для CaO, Al_2O_3 и TiO_2, представленными в литературе, и автор рассчитал структурные (КЧ Ca, Mg, Al и Ti) и термодинамические (изобарная теплоемкость, энтальпия образования из оксидов и плотность) свойства исследуемых стекол. Полученные данные Архипин А.С. далее сопоставил с экспериментальными результатами настоящей работы.

Главу **Обсуждение результатов** диссертант построил по принципу пирамиды. Довольно подробно он уделил внимание стеклу в двухкомпонентной системе $CaO–Al_2O_3$ состава C12A7. Для него был получен весь набор экспериментальных данных. Стоит отметить, что некоторые структурные и физико-химические свойства стекла данного состава были ранее получены в литературе. Таким образом, Архипин А.С. сначала проверил на этих свойствах (плотность, температура стеклования, локальное окружение атомов) воспроизводимость результатов, полученных в разных научных группах, а затем впервые провел эксперименты по определению термодинамических свойств стекла C12A7. Помимо этого стоит отметить, что некоторые свойства такие как изобарная теплоемкость и энтальпия образования из оксидов для стекла C12A7 были измерены независимо с помощью разных калориметрических методов, в результате чего значения термодинамических

свойств совпали в пределах ошибки эксперимента, что подтверждает достоверность полученных экспериментальных данных.

Для выяснения влияния добавки оксида титана на структурные и физико-химические свойства алюмикальциевых стекол, диссертант изучал различные сечения в трехкомпонентной системе. Так, в системе $CaO–Al_2O_3–TiO_2$ автор исследовал различное количество TiO_2 в составе при постоянном соотношении CaO/Al_2O_3 = 12/7; замещение атомов алюминия на атомы титана в составе стекла C12A7, а также различное соотношение CaO/Al_2O_3 при фиксированном количестве TiO_2. Таким образом, можно заключить, что автор исследовал данную систему в полном объеме в пределах области стеклования.

Для всех исследуемых стекол в данной системе была исследована структура (локальное окружение атомов) с помощью XANES-спектроскопии, а также некоторые физико-химические свойства: теплоемкость и температура стеклования с помощью метода ДСК, плотность по методу Архимеда. Также для стекла C12A7+7мол% TiO_2 были измерены низкотемпературная теплоемкость до 10 К с помощью адиабатической калориметрии и энтальпия образования из оксидов с помощью калориметрии сброса и растворения. Отдельно стоит отметить, что для двух образцов в этой системе автором была получена вязкость стекол около температуры стеклования, что в дальнейшем может быть использовано в оптимизации технологического производства при получении цементов. Из самых интересных результатов в этой системе можно выделить следующие: изменение состава стекол в результате допирования матрицы $Ca_{12}Al_{14}O_{33}$ оксидом титана или замещения алюминия на титан приводит к одинаковым эффектам с точки зрения изменения термохимических свойств, температуры стеклования, вязкости и плотности стекол (отрицательные тепловые эффекты смешения, нечувствительность теплоемкости к изменению состава, увеличение плотности, уменьшение вязкости и температуры стеклования с ростом содержания TiO_2); уменьшение соотношения CaO/Al_2O_3 при постоянном количестве TiO_2 приводит к увеличению соотношения числа мостиковых атомов кислорода Q^4/Q^2, температуры стеклования, вязкости, теплоемкости и к уменьшению плотности.

В случае изучения трехкомпонентной системы $CaO–MgO–Al_2O_3$, диссертант изучал влияние замещения CaO на MgO в стекле состава C12A7. Автором были использованы аналогичные инструментальные методы, что и в системе с TiO_2. В результате Архипиным А.С. было продемонстрировано, что замена CaO на MgO в стекле состава $Ca_{12}Al_{14}O_{33}$ приводит к увеличению соотношения числа мостиковых атомов кислорода Q^4/Q^2, энтальпии образования и уменьшению плотности, температуры стеклования; причем изобарная теплоемкость практически не изменяется в пределах ошибки эксперимента.

Еще одной важной задачей диссертант ставил проведение расчетов классической молекулярной динамики и оценку различных структурных и физико-химических свойств с последующим сравнением результатов расчета с экспериментально полученными данными. Таким образом, Архипиным А.С. было показано, что с помощью метода классической молекулярной динамики с потенциалом Борна-Майера-Хаггинса можно воспроизвести общие закономерности изменения структурных и физико-химических свойств стекол в системах $CaO–Al_2O_3–TiO_2$ и $CaO–MgO–Al_2O_3$, при этом количественно удается описать только координационные числа Ca и Mg, а также теплоемкость стекол; расчеты дают завышенные значения плотности и энтальпии образования из оксидов, не очень хорошее описание координационного числа Al и плохое – локального окружения Ti.

В разделе **Выводы** сформулированы важнейшие результаты диссертационного исследования и сделаны на их основании закономерные выводы.

Достоверность полученных результатов обусловлена применением комплексного подхода к изучению структурных и физико-химических свойств стекол в исследуемых системах. Автором работы использовано большое количество современных инструментальных методов, а также расчетов методом классической молекулярной динамики. В результате были получены воспроизводимые данные на независимых сериях образцов; согласие величин, полученных разными методами, в пределах погрешностей их определения;

согласие с немногочисленными экспериментальными данными, полученными в других научных коллективах при изучении таких же систем.

Также к достоинствам диссертации Архипина А.С. можно отнести отработку методики получения высокоточных результатов адиабатической калориметрии и калориметрии сброса и растворения на текстовом объекте в хорошо изученной трёхкомпонентной системе $CaO–Al_2O_3–SiO_2$, которая в дальнейшем может быть использована для исследования аморфных веществ в других системах.

Объем приведенных в диссертационной работе экспериментальных и расчетных исследований и качество обработки полученных результатов производят общее положительное впечатление, а сама работа **законченного, фундаментального исследования**, выполненного на высоком современном научном уровне.

Общие замечания

Несмотря на очевидные достоинства, при прочтении работы появился ряд вопросов и замечаний:

1. Для стекол C12A7, C12A7 + 5T и C12A7 + 7T не выявлены зависимости $C_P(T)$. Этот необычный факт никак не обсуждается.

2. Не указано, как проводилось согласование низкотемпературных и высокотемпературных измерений теплоемкости.

3. Данные по вязкости для ряда стекол представлены в полулогарифмических координатах. Полученные зависимости имеют нелинейный вид. Это связано с изменением структуры стекол в зависимости от температуры или с другими явлениями?

Указанные замечания не носят принципиальный характер и не снижают ценности результатов диссертационного исследования, достоверность которых не вызывает сомнений. Сделанные на их основании выводы достаточно обоснованы.

Заключение

Диссертация представляет собой завершенную научно-исследовательскую работу на актуальную тему. Автореферат и публикации полностью

соответствуют содержанию диссертационной работы. Положения, выносимые на защиту, вполне обоснованы. Результаты исследований опубликованы в четырех статьях в отечественных и международных журналах из «Белого списка» и Scopus, а также были представлены на шести профильных Российских и международных конференциях в виде устных докладов. Диссертационная работа демонстрирует высокую квалификацию и научный профессионализм автора.

Результаты диссертационной работы могут быть использованы в дальнейших исследованиях стекол в многокомпонентных оксидных системам, причем как полученные численные значения физико-химических свойств, так и отработанные методики их получения (МГУ, ИХС РАН, ОИВТ РАН, ННГУ); помещены в базы данных термодинамических свойств аморфных веществ; а также в качестве нового материала в образовательных учреждениях (МГУ, СПбГУ, ННГУ, НГУ, УрФУ, СФУ, КФУ).

Диссертационная работа Архипина Анатолия Сергеевича соответствует паспорту специальности 1.4.4. – физическая химия по пунктам п.2. «Экспериментальное определение термодинамических свойств веществ, расчет термодинамических функций простых и сложных систем, в том числе на основе методов статистической термодинамики, изучение термодинамических аспектов фазовых превращений и фазовых переходов» и п.10. «Создание и разработка методов компьютерного моделирования строения и механизмов превращений химических соединений на основе представлений квантовой механики, различных топологических и статистических методов, включая методы машинного обучения, методов молекулярной механики и молекулярной динамики, а также подходов типа структура-свойства».

Таким образом, можно заключить, что по объему проведенных исследований, научной новизне, достоверности полученных результатов, практической и теоретической значимости результатов выполненная Архипиным Анатолием Сергеевичем работа «Структурные и физико-химические свойства некристаллических фаз, образованных оксидами кальция, магния, алюминия и титана» полностью соответствует требованиям пп. 9-14

«Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 г. № 842 и пп. 2.1-2.5 «Положения о присуждении ученых степеней в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Института общей и неорганической химии им. Н.С. Курнакова Российской академии наук (ИОНХ РАН) от 29 марта 2024 г., предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата химических наук, а автор диссертационной работы Архипин Анатолий Сергеевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата химических наук по специальности 1.4.4. Физическая химия (Химические науки).

Отзыв на диссертацию и автореферат обсужден на заседании кафедры физической и неорганической химии «03» сентября 2025 г., протокол № 1.

Председатель семинара,
кандидат химических наук, 02.00.04 физическая химия, доцент
кафедра физической и неорганической химии,
заведующий кафедрой _____ Денисова Любовь Тимофеевна

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский федеральный университет»; ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет»
660041, Красноярский край, г. Красноярск, пр. Свободный, 79;
Тел. +7-(391)-2-44-82-13, office@sfu-kras.ru, http://www.sfu.ru/ru

ФГАОУ ВО СФУ
Подпись Л.Т. Денисовой заверяю
Ученый секретарь ученого совета
И.Ю. Макарчук
«03» 09 20 25 г.

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ» г. КРАСНОЯРСК * МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ * УЧЕНЫЙ СОВЕТ

СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ | SIBERIAN FEDERAL UNIVERSITY

МИНОБРНАУКИ РОССИИ
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский федеральный университет»

660041, Красноярский край,
г. Красноярск, проспект Свободный, д. 79
телефон: (391) 244-82-13, тел./факс: (391) 244-86-25
http://www.sfu-kras.ru, e-mail: office@sfu-kras.ru

ОКПО 02067876; ОГРН 1022402137460;
ИНН/КПП 2463011853/246301001

11.06.2025 № 874

на № _____ от _____

Институт общей и неорганической химии (ИОНХ РАН)

Председателю диссертационного совета 01.4.004.93
д-ру химических наук, академику
Еременко И.Л.

Ленинский проспект, д. 31, г. Москва, 119991

О согласии выступить
ведущей организацией

Уважаемый Игорь Леонидович!

ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет» согласен выступить ведущей организацией по диссертации Архипина Анатолия Сергеевича на тему **«Структурные и физико-химические свойства некристаллических фаз, образованных оксидами кальция, магния, алюминия и титана»** по специальности по специальности 1.4.4. – Физическая химия (химические науки) на соискание ученой степени кандидата наук.

Сведения о ведущей организации

Полное и сокращенное наименования организации	Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский федеральный университет»; ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет»
Место нахождения	Красноярский край, г. Красноярск
Почтовый адрес, телефон, адрес электронной почты	660041, Красноярский край, г. Красноярск, пр. Свободный, 79; +7-(391)-2-44-82-13, office@sfu-kras.ru
Адрес официального сайта в сети «Интернет»	http://www.sfu.ru/ru
Руководитель организации	Румянцев Максим Валерьевич, и. о. ректора, кандидат философских наук, доцент
Список основных публикаций сотрудников организации по теме диссертации соискателя в рецензируемых научных изданиях за последние 5 лет (не более 15)	

1. Л.Т. Денисова, Д.В. Белокопытова, Г.В. Васильев [и др.]. Теплоемкость и термодинамические свойства германатов $CaGd_2Ge_4O_{12}$ и $CaY_2Ge_4O_{12}$ в области 320-1000 K // Журнал физической химии. –2024. –Т. 98, № 8. –С. 3–7.
2. Л.Т. Денисова, Д.В. Белокопытова, Ю.Ф. Каргин [и др.]. Синтез и исследование термодинамических свойств германатов $CaYb_2Ge_4O_{12}$ и $CaLu_2Ge_4O_{12}$ в интервале температур 320-1050 K // Журнал неорганической химии. –2024. –Т. 69, № 9. –С. 1277–1283.
3. Л.Т. Денисова, Л.Г. Чумилина, Ю. Ф. Каргин [и др.]. Кристаллическая структура и термодинамические свойства титанатов $RGaTi_2O_7$ (R = Sm, Ho, Tm, Yb) // Неорганические материалы. – 2023. – Т. 59, № 6. – С. 631-637.
4. Л.Т. Денисова, Е.О. Голубева, Ю.Ф. Каргин [и др.]. Высокотемпературная теплоемкость и термодинамические функции германа $LiNaGe_4O_9$ // Неорганические материалы. –2023. – Т. 59, № 7. –С. 809–813.
5. Л.Т. Денисова, М.С. Молокеев, Л.А. Иртюго [и др.]. Кристаллическая структура и термодинамические свойства германата $CuEu_2Ge_2O_8$ // Физика твердого тела. – 2022. – Т. 64, № 12. – С. 2090-2093
6. Л.Т. Денисова, М.С. Молокеев, Н.А. Галиахметова [и др.]. Теплоемкость и термодинамические свойства германатов $CaR_2Ge_3O_{10}$ (R = Pr, Nd) в области 320–1000 K //Журнал физической химии. – 2022. – Т. 96, № 5. – С. 615-620.
7. Л.Т. Денисова, М.С. Молокеев, Ю.Ф. Каргин [и др.] Высокотемпературная теплоемкость и термодинамические свойства германатов $CaY_2Ge_3O_{10}$ и $CaY_2Ge_4O_{12}$ / // Неорганические материалы. – 2022. – Т. 58, № 4. – С. 432-436.

Проректор
по учебной работе Д.С. Гуц

Денисова Любовь Тимофеевна
+79029187148