ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА **24.1.045.01**, СОЗДАННОГО НА БАЗЕ **ФГБУН ИНСТИТУТА ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ЭЛЕКТРОХИМИИ УРАЛЬСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ РАН**, ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ КАНДИДАТА НАУК

аттестационное дело № _____

решение диссертационного совета от **23 сентября 2026 г. № 7**

о присуждении ***Филатову Никите Михайловичу***,

гражданину Российской Федерации,

ученой степени кандидата **химических** наук

Диссертация «Синтез и физико-химические свойства твердых электролитов на основе гафната стронция» по специальности 1.4.6. Электрохимия принята к защите **15 июля 2026 г., протокол № 6**, диссертационным советом 24.1.045.01, созданным на базе Института высокотемпературной электрохимии Уральского отделения Российской академии наук (ИВТЭ УрО РАН), 620066, г. Екатеринбург, ул. Академическая, д. 20; приказ № 105/нк от 11.04.2012.

Соискатель Филатов Никита Михайлович, 17 января 1997 года рождения, в 2021 г. окончил ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»; в 2026 г. окончил аспирантуру ИВТЭ УрО РАН; работает **младшим научным сотрудником** лаборатории кинетики ИВТЭ УрО РАН.

Диссертация выполнена в лаборатории кинетики ИВТЭ УрО РАН.

Научный руководитель – доктор химических наук ***Дунюшкина Лилия Адибовна***, ведущий научный сотрудник лаборатории кинетики ИВТЭ УрО РАН.

Официальные оппоненты:

Красненко Татьяна Илларионовна, доктор химических наук по специальности 1.4.4. Физическая химия, профессор, ведущий научный сотрудник лаборатории оксидных систем ФГБУН Института химии твердого тела Уральского отделения Российской академии наук,

Титов Александр Натанович, доктор физико-математических наук по специальности 1.3.8. Физика конденсированного состояния, главный научный сотрудник лаборатории электрических явлений ФГБУН Института физики металлов имени М.Н. Михеева Уральского отделения Российской академии наук,

дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация ФГБУН Институт электрофизики Уральского отделения Российской академии наук, в своём положительном отзыве, подписанном Калининой Еленой Георгиевной, доктором химических наук, главным научным сотрудником лаборатории комплексных электрофизических исследований, указала, что диссертация Н.М. Филатова посвящена решению актуальной задачи синтеза и исследования физико-химических свойств твердых электролитов на основе гафната стронция, перспективных протонных электролитов для создания твердооксидных электрохимических устройств среднетемпературного диапазона.

Соискатель имеет 13 опубликованных работ по теме диссертации, в том числе **5 статей** в рецензируемых научных изданиях, индексируемых в базах данных WoS и Scopus, 7 публикаций в материалах конференций, **патент РФ** (вклад соискателя в каждой публикации составляет не менее 40%).

Наиболее значимые научные работы:

1. Filatov, N.M. Effect of scandium on the phase composition, microstructure and electrical conductivity of strontium hafnate / N.M. Filatov, S.A. Belyakov, Y.V. Novikova, L.A. Dunyushkina // International Journal of Hydrogen Energy. – 2023. – Vol. 48. – №. 59. – P. 22649–22655. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.02.107

2. Filatov, N.M. Impact of dopants on electrical conductivity of proton-conducting $SrHfO_3$ perovskite / N.M. Filatov, A.A. Kolchugin, A.A. Pankratov, L.A. Dunyushkina // Ceramics International. – 2024. – Vol. 50. – №. 20. – P. 40282–40291. https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2024.07.458

3. Kalyakin, A.S. Sc-doped $SrHfO_3$ perovskite as electrolyte material for amperometric NO and H_2O sensors / A.S. Kalyakin, A.N. Volkov, N.M. Filatov, L.A. Dunyushkina // Ceramics International. – 2025. – Vol. 51. – №. 25. – P. 46107–46116. https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2025.07.322

Положительные отзывы на автореферат прислали:

1. Доктор химических наук ***Шляхтина Анна Викторовна***, ведущий научный сотрудник группы твердофазных процессов Института химической физики им. Н.Н. Семенова РАН, г. Москва. Вопросы и замечания:

• Поясните выбор $SrHfO_3$ и катиона А-подрешетки для исследований?

• Почему допант Lu увеличивает объём ячейки больше, чем Y или Yb?

• Почему вклад ионной проводимости не оценили из зависимостей $\sigma(P_{O2})$?

• Почему содопирование Sc/Y и Sc/Lu по-разному влияет на проводимость?

• Почему для сенсора выбран не самый проводящий состав $SrHf_{0.85}Sc_{0.15}O_{3-\delta}$?

2. Доктор технических наук ***Соловьев Андрей Александрович***, заведующий лабораторией прикладной электроники Института сильноточной электроники Сибирского отделения РАН, г. Томск:

• Не приведены результаты длительных испытаний проводимости.

• Проводимость лучших составов не сопоставлена с литературными данными.

3. Доктор химических наук ***Пономарева Валентина Георгиевна***, ведущий научный сотрудник лаборатории ионики твердого тела Института химии твердого тела и механохимии Сибирского отделения РАН, г. Новосибирск:

• Почему объем ячейки увеличивается больше при введении Lu, а не Y?

• Какова точность определения стехиометрии составов?

• Недостаточно данных по амперометрическому датчику и его схеме.

• Эффективен ли датчик pH_2O при больших временах отклика?

• Какова относительная плотность образцов?

4. Кандидат химических наук ***Корона Даниил Валентинович***, старший научный сотрудник лаборатории химического дизайна новых многофункциональных материалов Уральского федерального университета имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург:

• Поясните вывод о связи степени гидратации и протонного переноса.

5. Кандидат химических наук ***Андреев Роман Дмитриевич***, научный сотрудник лаборатории химического дизайна новых многофункциональных материалов Уральского федерального университета имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург:

• Как задавали и контролировали влажность атмосферы?

• В каком режиме производили термогравиметрические измерения?

• Есть ли научное обоснование выбора Sc, Y, Yb и Lu в качестве допантов?

• Вы пытались получить образцы с содержанием скандия больше 0.2?

• Как объяснить увеличение проводимости в ряду допантов Y–Yb–Sc–Lu?

6. Кандидат химических наук ***Мусская Ольга Николаевна***, ведущий научный сотрудник лаборатории фотохимиии и электрохимии Института общей и неорганической химии Национальной академии наук Беларуси, г. Минск:

• Приведенные дифрактограммы не наглядны.

• Не указаны погрешности расчета стандартной энергии гидратации.

• Не представлены СЭМ-снимки и КР-спектры.

7. Кандидат химических наук ***Егорова Анастасия Вячеславовна***, старший научный сотрудник лаборатории селективно проницаемой керамики и инжиниринга Института химии твердого тела Уральского отделения РАН, г. Екатеринбург:

• Почему содопирование Sc/Y и Sc/Lu по-разному влияет на проводимость?

• Сравнивали ли проводимость и стабильность гафнатов Sr и Ba?

Обоснование выбора официальных оппонентов и ведущей организации: Т.И. Красненко является специалистом в области химии твердого тела, занимается разработкой методик синтеза оксидных материалов, изучением их физико-химических свойств. А.Н. Титов – специалист в области структуры и физико-химических свойств интеркалатных халькогенидов переходных металлов, хорошо знаком с методами изучения соединений сложного состава, современными представлениями о природе химической связи в таких соединениях. Деятельность Института электрофизики УрО РАН включает изучение фазовых переходов и электродинамических процессов в конденсированных средах, строения и свойств оксидных керамик.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

разработана методика растворного автопиролитического синтеза допированных гафнатов стронция $SrHf_{1-x}M_xO_{3-\delta}$ (M = Sc, Y, Yb, Lu) и $SrHf_{0.8}Sc_{0.2-x}R_xO_{3-\delta}$ (R = Y, Lu), согласно которой в качестве исходной формы гафния используют оксодигидроксид гафния, а конечный продукт представляет собой мелкодисперсный порошок, не содержащий нежелательных примесей галогенидов;

предложен и экспериментально подтвержден подход к повышению ионной проводимости гафната стронция путем содопирования скандием и лютецием,

обеспечивающий увеличение электропроводности $SrHf_{0.8}Sc_{0.1}Lu_{0.1}O_{3-\delta}$ примерно в 2 раза по сравнению с $SrHf_{0.8}Sc_{0.2}O_{3-\delta}$ за счет уменьшения сопротивления межзеренных границ;

доказано, что в восстановительных атмосферах при 600 °С гафнаты стронция, допированные скандием, иттрием или лютецием, а также содопированные скандием и лютецием, являются униполярными протонными проводниками и обладают при высоких температурах устойчивостью к парам воды и углекислому газу, что свидетельствует о перспективности их применения в качестве твердых электролитов в электрохимических устройствах.

Теоретическая значимость исследования:

доказано, что степень гидратации гафнатов стронция, допированных скандием и лютецием, достигает 90 %, что указывает на несущественное влияние электростатического отталкивания и ассоциации дефектов на протонный перенос в них, при этом величины стандартных энтальпий гидратации, порядка -(83–116) кДж/моль, близки к значениям для известных протонных электролитов – цирконатов щелочноземельных элементов;

п*рименительно к проблематике диссертации результативно использован* комплекс современных методов: рентгенофазовый анализ с уточнением структуры методом Ритвельда, сканирующая электронная микроскопия, энергодисперсионная рентгеновская спектроскопия, дилатометрия, термогравиметрия, КР-спектроскопия, четырёхзондовый метод на постоянном токе, импедансная спектроскопия с обработкой методом распределения времён релаксации (DRT), вольтамперометрия;

изложены закономерности изменения фазового состава, кристаллической структуры, микроструктуры, термического расширения и электропроводности допированных гафнатов при варьировании типа и концентрации допантов, согласно которым все образцы имеют ромбическую кристаллическую структуру пространственной группы Pbnm; увеличение концентрации допанта приводит к увеличению среднего размера зерна и относительной плотности керамических образцов, термического коэффициента линейного расширения и электропроводности; комплексное влияние размерного фактора и электронной

структуры допанта приводит к возрастанию электропроводности в ряду $Y^{3+}\rightarrow Yb^{3+}\rightarrow Sc^{3+}\rightarrow Lu^{3+}$;

изучено влияние внешних факторов (температуры, парциального давления кислорода и влажности газовой атмосферы) на электропроводность синтезированных оксидов и для составов, допированных скандием, лютецием и иттрием, установлены области преобладания протонной (до 600°С), кислород-ионной (выше 700°С) проводимости, а также вклад дырочной проводимости в общую величину.

Значение полученных результатов исследования для практики:

создан и защищен патентом прототип датчика для амперометрического определения концентрации монооксида азота и паров воды в азоте, работающий в режиме кислород-ионного проводника при 700 – 800 °С, протонного – при 500–600 °С, и демонстрирующий высокую чувствительность (~100 мкА на 1% NO, и ~20 мкА на 1% H_2O);

определены составы гафнатов стронция, наиболее перспективные для использования в электрохимических устройствах: $SrHf_{0.85}Sc_{0.15}O_{3-\delta}$, $SrHf_{0.8}Sc_{0.2}O_{3-\delta}$ и $SrHf_{0.85}Lu_{0.10}O_{3-\delta}$ как протонные электролиты, $SrHf_{0.8}Sc_{0.1}Lu_{0.1}O_{3-\delta}$ – в качестве ионно-электронной мембраны.

Оценка достоверности результатов исследования выявила:

результаты получены на сертифицированном и аттестованном оборудовании (рентгеновские дифрактометры Rigaku D/MAX-2200VL/PC и Bruker D8 ADVANCE AXS, электронные микроскопы Tescan IRA 3 LMU и KYKY-EM8000, Рамановский микроскоп-спектрометр Renishaw U 1000, электронный прибор измерения длины Tesatronic TT-80, термовесы Pyris 1 TGA, термоанализатор Netzsch TG STA 409 PC Luxx, прибор для измерений методом БЭТ СОРБИ N 4.1, потенциостат-гальваностат Zive MP2);

использованы современные методики обработки полученных экспериментальных данных (Fullprof – для полнопрофильного анализа и уточнения кристаллической структуры методом Ритвельда, ImageJ – для оценки структурных параметров керамики и функциональных компонентов электрохимических ячеек, ZView и DRT tools – для анализа данных электрохимического импеданса);

установлена согласованность экспериментальных результатов, полученных с использованием различных методов исследования.

Личный вклад соискателя. Анализ литературы, синтез и физико-химическая аттестация материалов, интерпретация результатов, изготовление электрохимических ячеек и их аттестация, обработка, оформление результатов были выполнены лично диссертантом. Анализ и обсуждение полученных данных проводились совместно с научным руководителем доктором химических наук Дунюшкиной Л.А.

В соответствии с паспортом специальности **«1.4.6. Электрохимия»** работа направлена на изучение транспортных свойств твердых ионпроводящих систем – гафната стронция, допированного Sc, Y, Yb, Lu.

Результаты диссертационной работы могут быть рекомендованы для разработки электрохимических устройств на твердых электролитах в таких организациях, как Институт физики твердого тела им. Ю.А. Осипьяна РАН (г. Москва), Институт химии твердого тела и механохимии СО РАН (г. Новосибирск); ФИЦ проблем химической физики и медицинской химии РАН (г. Черноголовка); Челябинский государственный университет; ФИЦ химической физики им. Н.Н. Семенова РАН, МГУ им. М.В. Ломоносова (г. Москва); Санкт-Петербургский государственный университет; ИВТЭ УрО РАН, Институт химии твердого тела УрО РАН и УрФУ им. первого Президента России Б.Н. Ельцина (г. Екатеринбург).

В ходе защиты диссертации были высказаны критические замечания

1. В дальнейшем необходимо выяснить, почему на границе зерен происходит сегрегация лютеция.

2. Утверждение о том, что на гидратацию гафнатов слабо влияет ассоциация дефектов, требует обоснования.

3. Использовано широко распространенное представление о межзеренной зоне как отдельной фазе, отличающейся по химическому составу от объема. Но существует и другая модель (барьер Шоттки или двойной электрический слой), которую тоже можно использовать для определения толщины межзеренной зоны.

4. Преобладает констатация фактов, уровень обобщений мог бы быть выше.

Соискатель Филатов Н.М. ответил на заданные ему в ходе заседания вопросы

и согласился с замечаниями.

Диссертация Филатова Н.М. представляет научно-квалификационную работу, в которой решена важная для развития электрохимии твердооксидных протонных электролитов задача: установлены закономерности влияния акцепторного допирования и содопирования гафната стронция на структуру и транспортные свойства получаемых на его основе материалов, перспективных для применения в электрохимических устройствах.

На заседании 23 сентября 2026 г. диссертационный совет принял решение: присудить Филатову Н.М. ученую степень кандидата химических наук по специальности 1.4.6. Электрохимия.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве **19** человек, из них **6** докторов наук по научной специальности рассматриваемой диссертации, участвовавших в заседании, из **25** человек, входящих в состав совета, проголосовали: **18** за, **0** против, **1** недействительных бюллетеней.

Председатель диссертационного совета
член-корреспондент РАН,
доктор химических наук, профессор Зайков Юрий Павлович

Ученый секретарь диссертационного совета
кандидат химических наук Кулик Нина Павловна

25 сентября 2026