Заключение диссертационного совета 01.4.001.91
по диссертации на соискание ученой степени кандидата наук.
Решение диссертационного совета от «09» июля 2025 г.,
протокол № **064/ПР-09072025** о присуждении
Нагорнову Илье Алексеевичу, гражданину Российской Федерации,
ученой степени кандидата химических наук.

Диссертация «Высокодисперсные нанокомпозиты на основе ZnO, модифицированные наночастицами LnO_x (Ln=Ce, Pr, Eu), Pt, Pd и максена Ti_2CT_x, для хеморезистивных газовых сенсоров» по специальности 1.4.1 (неорганическая химия) принята диссертационным советом 01.4.001.91 к защите 03 июня 2025 года, протокол № 062/ПР-03062025.

Соискатель – Нагорнов Илья Алексеевич, 1999 года рождения, в 2021 году окончил Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева». В том же году поступил в аспирантуру при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте общей и неорганической химии им. Н.С. Курнакова Российской академии наук и окончил ее в 2025 году.

Соискатель работает в Лаборатории физикохимии керамических материалов ИОНХ РАН в должности младшего научного сотрудника.

Диссертация выполнена в Лаборатории физикохимии керамических материалов Института общей и неорганической химии им. Н.С. Курнакова Российской академии наук (ИОНХ РАН).

Научный руководитель:

Симоненко Елизавета Петровна, доктор химических наук, главный научный сотрудник Лаборатории физикохимии керамических материалов Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института общей и неорганической химии им. Н.С. Курнакова Российской академии наук.

Официальные оппоненты:

- Шилова Ольга Алексеевна, доктор химических наук, профессор, главный научный сотрудник лаборатории неорганического синтеза Филиала федерального государственного бюджетного учреждения «Петербургский институт ядерной физики им. Б.П. Константинова Национального исследовательского центра «Курчатовский институт» – Институт химии силикатов им. И.В. Гребенщикова (Филиал НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ – ИХС);

- Егорышева Анна Владимировна, доктор химических наук, главный научный сотрудник лаборатории синтеза функциональных материалов и переработки минерального сырья Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института общей и неорганической химии им. Н.С. Курнакова Российский академии наук (ИОНХ РАН).

Официальные оппоненты дали положительные отзывы на диссертацию, представленную соискателем. В отзывах оппонентов оценена актуальность избранной темы, степень обоснованности научных положений и выводов, сформулированной в диссертации, их достоверность и новизна.

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Дальневосточный федеральный университет».

Ведущая организация предоставила положительный отзыв на рассматриваемую диссертацию, в котором отражена значимость полученных автором диссертации результатов для развития современной неорганической химии, материаловедения и смежных дисциплин, оценена новизна, актуальность, теоретическая и практическая значимость полученных результатов, приведены рекомендации по их использованию.

В отзывах официальных оппонентов и ведущей организации приведено заключение о соответствии диссертации критериям, изложенным в пп. 2.1-2.5. Положения о присуждении учёных степеней в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте общей и неорганической химии им. Н.С. Курнакова Российской академии наук (ИОНХ РАН) от 29 марта 2024 г., а также заключение о том, что ее автор достоин присуждения искомой степени.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывался профилем их специализации, близкой к теме диссертации, а именно в области неорганической химии и неорганического материаловедения, в частности, химии оксидных полупроводниковых материалов и керамических композитов на их основе, а также, наличием публикаций в рецензируемых научных изданиях в области, близкой к диссертационному исследованию, и широкой возможностью дать объективную оценку всех аспектов рассматриваемой диссертационной работы.

Личный вклад диссертанта состоял в выполнении всего объема синтетической экспериментальной работы: проведение синтеза, выделение и очистка полученных веществ, поиск оптимальных методик синтеза, пробоподготовка образцов для их исследования физико-химическими методами, приготовление функциональных чернил для нанесения слоев. Им выполнен литературный обзор, посвященный теме исследования. Автор принимал участие в разработке задач и плана работы, интерпретации и анализе полученных данных, формулировании выводов.

Диссертационная работа Нагорнова И.А. соответствует пп. 1, 4, 5 паспорта специальности 1.4.1 – Неорганическая химия (химические науки).

Соискатель имеет 16 опубликованных работ, в том числе 10 статей по теме диссертации, опубликованных в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных для защиты на диссертационных советах ИОНХ РАН по соответствующей специальности:

1. Mokrushin A.S., **Nagornov I.A.**, Simonenko T.L., Simonenko N.P., Gorobtsov Ph.Yu., Khamova T.V., Kopitsa G.P., Evzrezov A.N., Simonenko E.P., Sevastyanov V.G., Kuznetsov N.T., Chemoresistive gas-sensitive ZnO/Pt nanocomposites films applied

by microplotter printing with increased sensitivity to benzene and hydrogen, **Materials Science and Engineering: B**, 2021, Vol. 271, 115233, DOI: 10.1016/j.mseb.2021.115233

2. **Nagornov I.A.**, Mokrushin A.S., Simonenko E.P., Simonenko N.P., Sevastyanov V.G., Kuznetsov N.T. Liquid-phase growth of nanocrystalline ZnO thin films and their gas-sensitive properties, **Russian Journal of Inorganic Chemistry**, 2022, 67. № 4, 539-546, DOI: 10.1134/S0036023622040143
3. E.P. Simonenko, N.P. Simonenko, **I.A. Nagornov**, T. L. Simonenko, Ph. Yu. Gorobtsov, A. S. Mokrushin, N.T. Kuznetsov Synthesis and Chemoresistive Properties of Single-Layer MXene Ti_2CT_x, **Russian Journal of Inorganic Chemistry**, 2022, 67, 1838–1847, DOI: 10.1134/S0036023622601222
4. Mokrushin A.S., **Nagornov I.A.**, Simonenko T.L., Simonenko N.P., Gorobtsov Ph.Yu., Arkhipushkin I.A., Simonenko E.P., Sevastyanov V.G., Kuznetsov N.T. Gas-sensitive nanostructured ZnO films praseodymium and europium doped: Electrical conductivity, selectivity, influence of UV irradiation and humidity, **Applied Surface Science**, 2022, 589, 152974, DOI: 10.1016/j.apsusc.2022.152974
5. Mokrushin A.S., **Nagornov I.A.**, Gorban Y.M., Simonenko T.L., Simonenko N.P., Arkhipushkin I.A., Simonenko E.P., Kuznetsov N.T. Effect of platinum nanoparticles on the chemoresistive gas sensitive properties of the ZnO/Pt composite, **Ceramics International**, 2023, Vol. 49 (11), Part A, 17600-17610, DOI: 10.1016/j.ceramint.2023.02.126
6. Mokrushin A.S., **Nagornov I.A.**, Gorobtsov Ph.Yu., Averin A.A., Simonenko T.L., Simonenko N.P., Simonenko E.P., Kuznetsov N.T. Effect of Ti_2CT_x MXene Oxidation on Its Gas-Sensitive Properties, **Chemosensors**, 2023, Vol. 11, 1-18, DOI: 10.3390/chemosensors11010013
7. Simonenko E.P., **Nagornov I.A.**, Mokrushin A.S., Averin A.A., Gorban Y.M., Simonenko T.L., Simonenko N.P., Kuznetsov N.T. Gas-Sensitive Properties of ZnO/Ti_2CT_x Nanocomposites, **Micromachines**, 2023, Vol. 14, 725, DOI: 10.3390/mi14040725
8. E. P. Simonenko, **I. A. Nagornov**, A. S. Mokrushin, V. M. Sapronova, Ph. Yu. Gorobtsov, N. P. Simonenko, N. T. Kuznetsov. Synthesis of Ti_2AlC in KBr melt: effect of temperature and component ratio, **Russian Journal of Inorganic Chemistry**, 2024, 69, № 11, 1744–1753, DOI: 10.1134/S0036023624602617
9. Mokrushin A.S., Dmitrieva S.A., **Nagornov I.A.**, Simonenko N.P., Vorobei A.M., Averin A.A., Simonenko E.P., Synthesis of high electroconductive ZnO/CNT nanocomposites with chemoresistive response at room temperature, **Russian Journal of Inorganic Chemistry**, 2024, V. 69, No. 12, P. 1836–1843, DOI: 10.1134/S0036023624602782
10. Mokrushin A.S., **Nagornov I.A.**, Gorban Y.M., Dmitrieva S.A., Simonenko T.L., Simonenko N.P., Doronina M.S., Vakhitov I.R., Nikitenko M.S., Khudonogov D.Yu., Vershinina O.V., Simonenko E.P. Synthesis of Pd-decorated ZnO nanocomposites with improved gas-sensitive properties for acetone detection, **Journal of Alloys and Compounds**, 2024, Vol. 25, p. 176856, DOI: 10.1016/j.jallcom.2024.176856

Количество цитирований основных публикаций по теме диссертации в международных базах данных Web of Science (индекс Хирша - 14, цитирований - 507),

Scopus (индекс Хирша - 15, цитирований - 545), РИНЦ (индекс Хирша - 16, цитирований - 654).

На диссертацию и автореферат поступило 3 отзыва от следующих лиц и организаций:

- ФГБОУ ВО Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева (к.т.н. Лемешев Д.О.),

- Государственный научный центр Российской Федерации АО «ОНПП «Технология» им. А.Г.Ромашина» (д.т.н. Харитонов Д.В. и к.х.н. Анашкина А.А.),

- ФГБУН Институт нефтехимического синтеза им. А.В. Топчиева РАН (к.х.н. Козлова А.А.),

Все поступившие отзывы - положительные.

Диссертационный совет считает, что представленная диссертация на соискание ученой степени кандидата химических наук является научно-квалификационной работой, в которой на основании выполненных автором исследований решены такие важные задачи современной неорганической химии и неорганического материаловедения, как:

1. Показано, что синтез нанодисперсного оксида цинка путем термической обработки раствора $[Zn(H_2O)(C_5H_7O_2)_2]$ в спиртах (*н*-бутанол, изоамиловый спирт, этиленгликоль) без добавления дополнительного гидролизующего агента позволяет создавать нанокомпозиты на основе ZnO, модифицированные высокодисперсными оксидами церия, празеодима, европия, наночастицами платины, палладия и многослойного максена Ti_2CT_x. Выявлено влияние на хеморезистивные свойства микроструктуры ZnO, природы и содержания введенных модификаторов. Определены закономерности, связывающие величину откликов на различные газы-аналиты с температурой детектирования и концентрацией аналитов.
2. Показано, что для впервые полученного нанокомпозита на основе ZnO, модифицированного 1-5 % мол. Ti_2CT_x, характерны высокие чувствительность и селективность по отношению к NO_2 (рабочая температура 200°C): отклик на 4 ppm NO_2 увеличивается от 5 (ZnO) до 26.7 (ZnO-5 % мол. Ti_2CT_x), а отношение отклика NO_2 к отклику на ацетон/этанол – от 1.6 (ZnO) до 20.5 (5 % мол. Ti_2CT_x).
3. Выявлено, что для полученных образцов индивидуального ZnO характерны высокие хеморезистивные отклики на NO_2 (при рабочих температурах 125-200°C) и CO (200-275°C). Отмечено, что для рецепторных слоев ZnO, синтезированных в среде этиленгликоля, наблюдается пониженная чувствительность к изменению влажности газового потока по сравнению с продуктами, полученными в среде одноатомных спиртов.
4. Показано, что при модифицировании ZnO высокодисперсными оксидами церия, празеодима и европия (1–5 % мол. LnO_x) наблюдается снижение чувствительности по отношению к NO_2 и происходит улучшение кинетических характеристик. Для материала ZnO, модифицированного оксидом празеодима,

выявлен рост значения отклика на NO_2 при повышении влажности газовой смеси до 75%.

5. Установлено, что декорирование ZnO, синтезированного в среде *н*- бутанола, наночастицами платины (0.5–3 % мол.) приводит к улучшению чувствительности к этанолу (для 3 % мол. Pt отклик на 100 ppm составил 47.1 при рабочей температуре 225 С). Показано, что декорирование ZnO наночастицами поверхностно окисленного палладия приводит к увеличению отклика на ацетон с пределом обнаружения 100 ppb (при температуре детектирования 250°С). Наибольший отклик на ацетон наблюдался для нанокомпозита ZnO 1 % мол. Pd (S~60 на 20 ppm ацетона).

Диссертационный совет отмечает, что представленная диссертация представляет собой самостоятельное, законченное исследование, обладающее внутренним единством. Положения, выносимые на защиту, содержат новые научные результаты и свидетельствуют о личном вкладе автора в науку:

1. Воспроизводимые методики синтеза индивидуального ZnO в результате термической обработки раствора $[Zn(H_2O)(C_5H_7O_2)_2]$ в спиртах (*н*-бутанол, изоамиловый спирт, этиленгликоль) без добавления дополнительного гидролизующего агента, а также нанокомпозитов ZnO-LnO_x (Ln = Ce, Pr, Eu), ZnO-Pt, ZnO-Pd и ZnO-Ti_2CT_x с содержанием модифицирующего компонента от 0.5 до 3 % мол.
2. Совокупность данных по установлению влияния условий получения ZnO (природы использованного спирта, температуры и длительности термической обработки) на его фазовый состав, микроструктуру, дисперсность и термическое поведение.
3. Результаты комплексного изучения чувствительности рецепторных слоев полученных индивидуального ZnO и нанокомпозитов ZnO-LnO_x (Ln = Ce, Pr, Eu), ZnO- Pt, ZnO-Pd и ZnO-Ti_2CT_x по отношению к широкому кругу газов-аналитов (NO_2, H_2, CH_4, CO, NH_3, бензол, ацетон, этанол), селективности и чувствительности к влажности; сведения о зависимости величины откликов от температуры детектирования и концентрации аналитов.

Диссертационный совет считает, что диссертация Нагорнова И.А. соответствует критериям, установленными пп. 2.1-2.5. Положения о присуждении учёных степеней в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте общей и неорганической химии им. Н.С. Курнакова Российской академии наук (ИОНХ РАН) от 29 марта 2024 г., а ее автор заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата химических наук по специальности 1.4.1. Неорганическая химия (химические науки).

На заседании от «09» июля 2025 г. диссертационный совет принял решение **присудить** Нагорнову И.А. ученую степень кандидата химических наук по специальности 1.4.1 - неорганическая химия.

При проведении тайного голосования диссертационного совета в количестве **13** человек, из них **12** докторов наук по специальности 1.4.1 – неорганическая химия,

участвовавших в заседании, из **14** человек, входящих в состав совета, дополнительно введены на разовую защиту **0 (нет)** человек, проголосовали:

«за» – 13 **(тринадцать),** «против» – нет **(нет)**, воздержались – нет **(нет)**.

Протокол счётной комиссии **№ 065/ПР-09072025.**

Председатель Диссертационного совета 01.4.001.91

чл.-корр. РАН Жижин К.Ю.

Ученый секретарь Диссертационного совета 01.4.001.91

к.х.н. Бузанов Г.А.

«09» июля 2025 г.