**УТВЕРЖДАЮ**

Проректор по науке и инновациям

_____ М.Р. Филонов

«27» 06 2025 г.

# ЗАКЛЮЧЕНИЕ

## Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»

Диссертация «Фазовые равновесия и термодинамические свойства фаз в системах, образованных Fe, Co и RE (RE = Sm, Tb, Ho)» в части проведения структурных исследований, включающих методы рентгенофазового анализа и сканирующей электронной микроскопии, экспериментального изучения фазовых равновесий и фазовых превращений, выполнена в НИЦ «Термохимия материалов» НИТУ МИСИС.

В период подготовки диссертации Баженова Ирина Александровна обучалась в очной аспирантуре факультета Экотехнологий и инжиниринга в НИЦ «Термохимия материалов» НИТУ МИСИС по специальности 22.06.01 – Технологии материалов с 01.09.2016 г. по 30.06.2020 г.; а впоследствии работала в лаборатории химической термодинамики химического факультета МГУ имени М.В.Ломоносова в должности ведущего инженера.

Документ, подтверждающий окончание обучения в аспирантуре выдан в 2020 г. Федеральным государственным автономным образовательным учреждением высшего образования «Национальный технологический университет МИСИС». Документы, подтверждающие сдачу кандидатских экзаменов по специальности 1.4.4 Физическая химия (химические науки) выданы в 2023 году ФГБУН Институтом общей и неорганической химии им. Н.С. Курнакова Российской академии наук (ИОНХ РАН).

Научный руководитель – доктор химических наук, Хван Александра Вячеславовна, и. о. зав. НИЛ химической термодинамики кафедры физической

химии химического факультета Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова».

По итогам обсуждения принято следующее заключение.

1. **Общая оценка выполненной соискателем ученой степени работы**

Диссертационная работа Баженовой Ирины Александровны имеет фундаментальный характер с перспективой последующего практического использования полученных результатов. Она посвящена экспериментальному исследованию фазовых равновесий и термодинамических свойств фаз в системах переходных (ПМ, Me) и редкоземельных (РЗМ, RE) металлов, а также определению стандартных энтальпий образования интерметаллидов в системе и выявлению зависимостей энтальпий образования в ряду лантаноидов.

Объектами исследования настоящей работы являются системы, образованные Fe, Co, Sm, Tb и Ho с числом компонентов не более трех:

- двухкомпонентные системы Tb-Co, Sm-Co, Sm-Fe, Ho-Fe ;
- трехкомпонентные системы Tb-Fe-Co и Sm-Fe-Co;

Выбор этих систем обусловлен перспективностью применений сплавов данных систем для практического применения и недостаточностью информации об условиях стабильности фаз в данных системах.

Литературные данные по фазовым равновесиям как в системах Tb-Fe-Co и Sm-Fe-Co, так и для некоторых ограничивающих бинарных систем фрагментарны и противоречивы, что делает особенно актуальным уточнение характера фазовых равновесий в данных системах в широкой области концентраций и температур.

- В результате проведенных исследований с использованием комплекса экспериментальных методов (СЭМ/МРСА, РФА, ДТА, калориметрии сброса и растворения) получен объемный массив новых экспериментальных данных о фазовых равновесиях и физико-химических свойствах в системах Tb-Fe-Co, Sm-Fe-Co и Fe-Ho. Анализ полученных экспериментальных данных позволил получить проекции ликвидуса и солидуса, диаграммы плавкости, изотермические сечения во всем диапазоне концентраций, политермические (вертикаль-

ные) сечения диаграммы, последовательности протекающих процессов (схемы реакций Шайля). Данные для энтальпий образования соединений $Ho_{1.88}Co_{17.12}$, $Er_{1.75}Co_{17.25}$, $Tb_2Co_7$ и $HoFe_3$ при 298.15 К (25 $^oC$) позволили исследовать закономерности изменения энтальпий образования в ряду лантаноидов.

2. **Личный вклад соискателя** состоит в анализе данных литературы по теме диссертации, планировании исследований, проведения структурных исследований, включающих методы рентгенофазового анализа и сканирующей электронной микроскопии, экспериментальному изучению фазовых равновесий и фазовых превращений, обработке и интерпретации полученных данных, анализе результатов исследований с последующим оформлением их в виде публикаций.

Личный вклад в работы, опубликованные в соавторстве: Автор совместно с соавторами публикаций выполнил экспериментальные исследования, осуществил детальный анализ и интерпретацию полученных экспериментальных данных. В работах, опубликованных в соавторстве, вклад Баженовой И.А. является основным в части постановки и проведения экспериментов. Подготовка публикаций полученных в работе результатов проводилась совместно с соавторами.

3. **Достоверность результатов** обусловлена использованием апробированных методов получения сплавов, современных методов исследования состава, морфологии и структуры полученных образцов (рентгеноструктурный и рентгенофазовый анализы, металлография с использованием оптической микроскопии и сканирующей электронной микроскопии, микрорентгеноспектральный анализ). Достоверность обеспечивается также использованием современной приборной базы и проведением серий параллельных экспериментов с получением сходящихся результатов, калибровки приборов с применением рекомендованных стандартов, обработкой экспериментальных данных с использованием стандартного программного обеспечения. Результаты работы прошли профессиональную экспертизу и опубликованы в международных рецензируемых журналах.

4. **Научная новизна работы** определяется тем, что в ней впервые:

- экспериментально во всем диапазоне составов исследована фазовая диаграмма двухкомпонентной системы Tb-Co, подтверждено существование восьми интерметаллических соединений $Tb_2Co_{17}$, $TbCo_5$, $Tb_2Co_7$, $TbCo_3$, $TbCo_2$, $Tb_4Co_3$, $Tb_{12}Co_7$ и $Tb_3Co$; установлены тип и параметры реакций, протекающих в системе;
- построены проекции ликвидуса и солидуса, диаграмма плавкости, изотермические сечения при 1200 и 1000 °C системы Tb-Fe-Co во всем диапазоне концентраций, а также политермические (вертикальные) сечения диаграммы с содержанием тербия 20, 30 и 40 ат.% Tb, предложена последовательность протекающих процессов (схемы реакций);
- установлено, что соединения $Tb_2(Fe,Co)_{17}$, $Tb(Fe,Co)_3$ и $Tb(Fe,Co)_2$ образуют непрерывные ряды твердых растворов, при этом соединения $TbCo_5$ и $Tb_2Co_7$ имеют самые широкие области гомогенности среди двойных фаз, а области гомогенности остальных фаз значительно уже;
- исследована область с высоким содержанием самария в системе Sm-Fe;
- методом калориметрии сброса и растворения экспериментально определены значения стандартных энтальпий образования $Ho_{1.88}Co_{17.12}$, $Er_{1.75}Co_{17.25}$, $Tb_2Co_7$ и $HoFe_3$ при 298.15 K (25 °C).

В результате проведенных исследований уточнены:

- диаграммы состояния двухкомпонентных систем Sm-Co, Sm-Fe и Ho-Fe;
- построены уточненные проекции ликвидуса и солидуса, диаграмма плавкости, изотермическое сечение при 1000 °C и предложена схема реакций в системе Sm-Fe-Co. Установлено, что в системе протекают альтернативные (по сравнению с предложенными ранее) реакции $L_{U2} + SmCo_5 \rightleftarrows Sm_2(Fe,Co)_{17} + Sm_2Co_7$, $L_{U3} + Sm_2Co_7 \rightleftarrows Sm_2(Fe,Co)_{17} + Sm(Fe,Co)_3$ и $L_{E1} \rightleftarrows (\gamma Sm) + Sm(Fe,Co)_2 + Sm_3Co$. Подтверждено существование фаз $Sm_5Co_{19}$ и $Sm_5Co_2$, идентифицированы фазовые равновесия с их участием;
- Уточнено значение стандартной энтальпии образования соединения $Tb_2Co_{17}$ при 298.15 K (25 °C).

5. **Практическая и теоретическая значимость работы**:

В результате проведенных исследований получен массив экспериментальных данных (параметров фазовых превращений, условий фазовых равновесий и термодинамических свойств интерметаллидов систем Sm-Fe-Co, Tb-Fe-Co, а также некоторых образующих их подсистем и системы Fe-Ho), необходимый для оценки условий получения и прогноза стабильности металлических сплавов заданного состава и структуры. Совокупность полученных данных позволяет выбрать оптимальное содержание основных и легирующих компонентов и условия термообработки материалов, предложить методы синтеза однофазных поликристаллических и монокристаллических материалов.

Значимость результатов исследования для фундаментальной науки определяется тем, что полученные сведения о термодинамических свойствах интерметаллидов и диаграммах состояний двух- и трехкомпонентных металлических систем являются неотъемлемой частью теоретического фундамента разработки новых конструкционных и функциональных материалов с заданным комплексом функциональных свойств. Они необходимы как для оптимизации условий получения бинарных или тройных сплавов на основе Fe, Co, Sm, Tb и Ho, так и при поиске новых областей применения материалов на их основе.

6. Текст диссертации соответствует установленным правилам научного цитирования, библиографические ссылки оформлены корректно.

7. Диссертационное исследование по своему содержанию соответствует следующим пунктам Паспорта специальности 1.4.4. Физическая химия (химические науки):

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.

П.12. Физико-химические основы процессов химической технологии и синтеза новых материалов

8. Основные идеи и положения работы изложены в 7 научных работах автора общим объемом 3,6 п.л., в том числе 4 публикациях (объемом 3,4 п.л.) в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК при Минобрнауки России для публикации результатов диссертаций.

1 Bajenova, J. Shakirova, A. Khvan, V. Cheverikin, E. Zanaeva. Experimental investigation of the phase equilibria in the Tb-Co and Tb-Co-Fe systems and magnetic properties of phases // Materials Today Communications. 2022. Vol. 32. P. 103960. https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2022.103960 (1.25 печатных листа / вклад Баженовой И.А. 65%; Q2)

2 Fartushna, I. Bajenova, J. Shakirova, A. Khvan, V. Cheverikin, E. Zanaeva,A. Kondratiev. Experimental investigation of the phase equilibria in Co–Fe-Sm system with special attention to the effect of Fe substitution in structure and magnetic properties of intermetallic phases// Intermetallic. 2022. Vol. 143.P. 107502. https://doi.org/10.1016/j.intermet.2022.107502, (0.9375 печатных листа / вклад Баженовой И.А. 65%; Q1)

3 I.A. Bajenova, E.V. Gvozdeva, A.V. Khvan, V.V. Cheverikin. An experimental investigation of the formation enthalpies of intermetallic phases in the TM(Co,Fe)-REM(Tb,Ho,Er) systems// Thermochimica Acta. 2023. Vol. 729.P. 179606. https://doi.org/10.1016/j.tca.2023.179606, (0.8125 печатных листа / вклад Баженовой И.А. 85%; Q2)

4 Bajenova, J. Shakirova, A. Khvan, V. Cheverikin Experimental Investigation of Phase Equilibria in Fe–Ho System Russian Journal of Physical Chemistry A, 2022, Vol. 96, No. 12, P. 2591–2597. https://doi.org/10.1134/S0036024422120056, (0.4375 печатных листа / вклад Баженовой И.А. 85%; Q4)

Сведения об апробации работы:

Результаты исследований представлены и обсуждены в 3-х докладах на профильных конференциях: XXIII International Conference on Chemical Thermodynamics in Russia, 22-27 августа 2022 год, Казань, Россия, XIX Российской ежегодной конференции молодых научных сотрудников и аспирантов Физико-химия и технология неорганических материалов, (18 - 21 октября 2022 года,

Москва, Россия), Международном молодежном научном форуме «ЛОМОНОСОВ-2023» (апрель 2023 г., Москва, Россия).

Исследования выполнялись при финансовой поддержке гранта РНФ №18-73-10219 Р, а также Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках программы повышения конкурентоспособности НИТУ-МИСИС (No К2-2019-003), согласно указу правительства от 16 марта 2013, N 211.

Результаты работы отмечены премией Ларри Кауфмана на Международной конференции CALPHAD XLVII в Сингапуре, 2019.

9. В своих научных трудах соискатель выявил закономерности в изменении характера фазовых равновесий при кристаллизации в системах Sm-Fe-Co, Tb-Fe-Co, а также некоторых образующих их подсистем и системы Fe-Ho) в широкой области температур и концентраций. Также автор получил новые экспериментальные данные по энтальпиям образования интерметаллидов из указанных систем, позволивших исследовать закономерности изменения энтальпий образования в ряду лантаноидов.

Таким образом, диссертация «Фазовые равновесия и термодинамические свойства фаз в системах, образованных Fe, Co и RE (RE = Sm, Tb, Ho)»
Баженовой Ирины Александровны соответствует требованиям, установленным постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 № 842 (ред. от 16.10.2024) "О порядке присуждения ученых степеней" и Положением о присуждении ученых степеней в ФГБУН Институте общей и неорганической химии им. Н.С. Курнакова Российской академии наук (ИОНХ РАН) к диссертационным исследованиям, на основании вышеуказанных пунктов.

***Экспертное заключение о возможности открытого опубликования рукописи диссертации на соискание ученой степени кандидата наук и автореферата диссертации прилагается.***

Представленная диссертация рекомендуется к защите на соискание ученой степени кандидата химических наук по научной специальности 1.4.4. физическая химия (по химических наукам) в диссертационном совете 01.4.004.93, ИОНХ РАН.

Заключение принято на заседании ученого совета института экотехнологий и инжиниринга НИТУ МИСИС. Присутствовало на заседании 15 чел. Результаты голосования: «за» – 15 чел., «против» – 0 чел., «воздержалось» – 0 чел., протокол № 09-24/25 от «26» июня 2025 г.

Председатель ученого совета
института экотехнологий иинжиниринга
НИТУ МИСИС, к.т.н. А.Я. Травянов

Отв. секретарь ученого совета
института экотехнологий и инжиниринга
НИТУ МИСИС, к.т.н. П.В. Петровский