

УТВЕРЖДАЮ

Директор НИЦ «Курчатовский институт» - ПИЯФ

С.Е. Горчаков

07.07.2023

## ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

ФГБУ Петербургский институт ядерной физики имени Б.П. Константинова  
НИЦ "Курчатовский институт"

на диссертационную работу Ваулина Артёма Александровича  
«НЕСОИЗМЕРИМЫЕ МАГНИТНЫЕ СТРУКТУРЫ И БЛИЖНИЙ  
МАГНИТНЫЙ ПОРЯДОК В РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫХ ИНТЕРМЕТАЛЛИДАХ  
 $\text{Ho}_3\text{Co}$ ,  $\text{Ho}_7\text{Rh}_3$  и  $R_5\text{Pd}_2$  ( $R = \text{Ho}, \text{Er}$ )», представленную на соискание учёной  
степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.12 –  
физика магнитных явлений

Представленная к защите диссертация посвящена детальному изучению магнитного упорядочения в целом ряде редкоземельных интерметаллидов, в которых определяющую роль играют локализованные  $4f$ -электроны и косвенный  $4f$ - $4f$  обмен через делокализованные  $s$ ,  $p$ ,  $d$  электроны редкоземельных ионов. В исследуемых интерметаллидах наблюдаются фундаментальные эффекты, связанные со взаимодействием структурной, магнитной и электронной подсистем, приводящие к формированию в основном состоянии сложных экзотических несоизмеримых магнитных упорядочений. Объекты изучения - бинарные редкоземельные интерметаллиды с высоким содержанием редкоземельного элемента вида  $R_nT_m$  ( $R$ -редкоземельный элемент,  $T$ -атом переходного металла  $n : m > 2$ ). Основной целью работы является полное количественное описание несоизмеримых магнитных фаз и установление их влияния на магнитные электрические и тепловые свойства четырех бинарных редкоземельных интерметаллидов с высоким содержанием редкоземельного элемента:  $\text{Ho}_3\text{Co}$ ,  $\text{Ho}_7\text{Rh}_3$ ,  $\text{Ho}_5\text{Pd}_2$  и  $\text{Er}_5\text{Pd}_2$ .

## **Актуальность темы диссертационного исследования**

Актуальны как выбор объектов исследования, так и примененные методы изучения их физических свойств и, в первую очередь, метод определения несоизмерных магнитных структур с использованием подхода магнитных суперпространственных групп. На сегодняшний день мало что известно о магнитных свойствах  $R_nT_m$  соединений с  $n/m > 2$  на микроскопическом уровне. Для всех исследуемых в настоящей работе соединений вообще не существует описания низкотемпературных несоизмеримых магнитных фаз, не установлены их магнитные фазовые диаграммы и поэтому нет однозначных объяснений механизмов аномального поведения магнитных, тепловых и электрических свойств в области низких температур, где ключевую роль играют эффекты магнитного упорядочения. В связи с этим проведение полного количественного описания несоизмеримых магнитных фаз и установление магнитных суперпространственных групп в  $\text{Ho}_3\text{Co}$  и  $\text{Ho}_7\text{Rh}_3$  безусловно является новым результатом. Решение загадки возникновения спонтанной намагниченности в области низких температур в  $\text{Ho}_3\text{Co}$  и  $\text{Ho}_7\text{Rh}_3$  было невозможно без построения полной модели низкотемпературной магнитной структуры. Поэтому данные результаты также являются новыми и актуальными.

## **Практическая значимость полученных результатов**

Исследования магнитного упорядочения в редкоземельных интерметаллидах, в которых определяющую роль играют локализованные  $4f$ -электроны и косвенный  $4f-4f$  обмен, представляют большую теоретическую и практическую значимость ввиду обнаружения в них разнообразных магнитных свойств и явлений. Сейчас одной из ключевых задач магнетизма является создание новых магнитных материалов, квантовыми свойствами которых можно эффективно управлять. Такие материалы могут стать основой спиновых квантовых технологий будущего. Здесь можно ожидать ярких фундаментальных открытий, а в более отдаленной перспективе - создания новых приборов и устройств для квантовой электроники. Представленная к защите работа как раз и является примером такого исследования. Наверное будет уместно процитировать академика Капицу, что «нет ничего более практически значимого, чем надежные фундаментальные данные».

## **Структура и содержание диссертационной работы**

Диссертация состоит из введения, первой главы, которую можно рассматривать как литературный обзор, второй главы, где описаны все экспериментальные методики, используемые при проведении исследований, в том числе методы синтеза поли- и монокристаллических образцов, и еще четырех содержательных глав, заключения с основными результатами и выводами работы, списка публикаций автора и списка

цитируемой литературы. Каждая из содержательных глав заканчивается подробными выводами к данной главе. Список литературы состоит из 175 наименований и в достаточной мере отражает основные научные публикации по обсуждаемым в диссертации вопросам.

**Во введении** обосновывается актуальность выбранной темы и степень ее разработанности, сформулированы цели и задачи работы, обоснован выбор объектов и методов исследования, отмечены научная новизна полученных результатов и практическая и теоретическая значимость работы, изложены основные положения, выносимые на защиту, а также приводится информация об апробации работы и отмечен личный вклад автора, обосновывается соответствие диссертации паспорту специальности.

**В первой главе** изложены литературные данные по магнетизму редкоземельных интерметаллидов с  $3d/4d$  переходными металлами с точки зрения основных взаимодействия, которые могут оказывать влияние на формирование магнитной структуры. Описаны косвенное обменное взаимодействие и эффект кристаллического поля в редкоземельных интерметаллидах. Рассмотрены основные подходы к анализу и описанию несоизмеримых магнитных структур, Представлены формализм волнового вектора и представлений анализ магнитных структур. Отмечены ключевые особенности формализма магнитных суперпространственных групп. Проведено сравнение подходов магнитных суперпространственных групп и метода неприводимых представлений. Проанализированы параметр порядка и общее уравнение инвариантности. Описаны структурные, магнитные, тепловые и электрические свойства редкоземельных интерметаллидов  $\text{Ho}_3\text{Co}$ ,  $\text{Ho}_7\text{Rh}_3$  и  $R_5\text{Pd}_2$  ( $R = \text{Ho}, \text{Er}$ ). На основании анализа литературных данных определены ключевые нерешенные проблемы. В конце главы снова сформулированы основные цели и задачи исследования.

**Во второй главе** представлено обоснование выбора и описание используемых в диссертации методов исследования: рентгеновской/синхротронной и нейтронной порошковой дифракции, измерения температурных и полевых зависимостей магнитных, тепловых и электрических свойств. Кроме того описана методика синтеза поликристаллов редкоземельных интерметаллидов, исследуемых в работе. Описание известных рентгеновских, синхротронных и нейтронных дифрактометров пожалуй детализировано больше чем надо, а вот представление основных программных пакетов и алгоритмов анализа дифракционных данных будет очень полезно для читателей диссертации, работающих в области математической обработки данных магнитного рассеяния нейтронов.

Последующие четыре главы посвящены изложению оригинальных результатов исследования конкретных редкоземельных интерметаллидов с  $3d/4d$  переходными металлами. Нужно отметить, как положительный момент, что эти четыре главы, практически равнозначны, как по объему изложения, так и по описанным исследованиям и полученным результатам, что в диссертациях бывает не так часто.

**Третья глава** посвящена изложению оригинальных результатов исследования магнитных свойств соединения  $\text{Ho}_3\text{Co}$ , описанию его несоизмеримой магнитной структуры сразу ниже температуры Нееля ( $T = 22$  К) и дальнейшей ее сложной эволюции при охлаждении вплоть до  $T = 1.5$  К. Также по данным нейтронной порошковой дифракции построены магнитные фазовые диаграммы интерметаллида  $\text{Ho}_3\text{Co}$ .

**В четвертой главе** описаны результаты исследования магнитных свойств соединения  $\text{Ho}_7\text{Rh}_3$  в постоянных и осциллирующих магнитных полях и измерения теплового расширения. Наблюдалось три магнитных фазовых перехода: 1) переход из парамагнитной в несоизмеримую антиферромагнитную структуру с модуляцией магнитных моментов типа поперечной спиновой волны при  $T_N = 32$  К; 2) процесс выравнивания магнитных моментов («оквадрачивание»), развивающийся в структуре поперечных спиновых волн ниже  $T_{t1} = 21$  К; 3) появление ферромагнитной компоненты в несоизмеримой магнитной структуре ниже  $T_{t2} = 9$  К. Отдельное внимание уделено решению и построению модели несоизмеримой магнитной структуры. Также изучен ближний магнитный порядок в  $\text{Ho}_7\text{Rh}_3$ , сохраняющийся вплоть до температур двукратно превышающих температуру Нееля  $T_N = 32$  К. Кроме того обсуждаются данные синхротронной дифракции в широкой области температур ниже и выше температуры Нееля.

**Пятая глава** посвящена исследованию влияния внешнего магнитного поля на магнитные, структурные и электрические свойства соединения  $\text{Ho}_5\text{Pd}_2$ . На основании магнитометрических измерений делается вывод о том, что в  $\text{Ho}_5\text{Pd}_2$  при температуре замерзания  $T_f = 27$  К возникает магнитное состояние типа кластерного стекла. Представлены результаты нейтронографического исследования магнитного состояния  $\text{Ho}_5\text{Pd}_2$  на монокристаллическом и порошковом образцах в полях до 50 кЭ. При помощи нейтрон-дифракционного эксперимента на монокристаллическом образце  $\text{Ho}_5\text{Pd}_2$  подтверждено отсутствие дальнего магнитного порядка вплоть до температуры  $T=1.5$  К.

**В шестой главе** изложены оригинальные результаты исследования магнитных, тепловых и электрических свойств изоструктурных бинарных соединений  $\text{Er}_{4.8}\text{Pd}_2$  и  $\text{Lu}_{4.8}\text{Pd}_2$ , содержатся сведения о рентгеноструктурной аттестации поликристаллических образцов  $\text{Er}_{4.8}\text{Pd}_2$  и  $\text{Lu}_{4.8}\text{Pd}_2$ . Содержание этой главы несколько выбивается из

представления ряда исследований предыдущих глав, т.к. в ней нет результатов нейтронной дифракции и соответственно решения и построения моделей спиновых структур в основном состоянии. Видимо эта работа еще ждет своей реализации.

В целом, в диссертации показано, что подход магнитных суперпространственных групп является более эффективным методом анализа магнитных структур бинарных редкоземельных интерметаллидов, изученных в диссертации, чем представленческий анализ по методу Э. Берто – Ю.А. Изюмова, т.к. здесь реализуются несоизмеримые магнитные фазы, чья симметрия описывается двумерными малыми неприводимыми представлениями или суперпозицией неприводимых представлений. Современный формализм суперпространственных групп магнитной симметрии объединяет в себе представленческий подход и подход Шубниковских групп магнитной симметрии, что позволяет наиболее полно описывать симметричные свойства несоизмеримых магнитных структур.

Отметим один нетривиальный результат из многих оригинальных результатов диссертации. При охлаждении ниже температуры Нееля  $T_N \approx 22$  К в  $\text{Ho}_3\text{Co}$  реализуется амплитудно-модулированная несоизмеримая магнитная структура типа волны спиновой плотности, описываемой комбинацией двух волновых векторов  $\mathbf{k}_{\text{IC}} = (0.155 \ 0 \ 0)$  и  $\mathbf{k}_C = 0$  и магнитной суперпространственной группой  $Pm'cn(00g)000$ . Эволюция гармонической спиновой волны по направлению к магнитной структуре типа «антифазных доменов» при охлаждении ниже  $T_t \approx 11$  К порождает фазу «спинового проскальзывания» с раскомпенсацией антиферромагнитной подрешетки. Нельзя не сказать еще об одном результате. Для соединения  $\text{Ho}_7\text{Rh}_3$  впервые показано, что несоизмеримый магнитный фазовый переход в магнитоупорядоченное состояние в семействе бинарных редкоземельных интерметаллидов вида  $R_7\text{Rh}_3$  может идти по одному четырехмерному физически неприводимому представлению  $m\Delta_6$ . Несоизмеримая магнитная структура типа волны спиновой плотности, связанная с этим неприводимым представлением, описывается волновым вектором  $\mathbf{k}_{\text{IC}} = (0 \ 0 \ 0.388)$  и магнитной суперпространственной группой  $Cmc2_1.1'(00g)0sss$ . Показано, что появление спонтанной намагниченности в области низких температур в интерметаллиде  $\text{Ho}_7\text{Rh}_3$  связано с магнитным фазовым переходом в одну из подгрупп индекса 2:  $Cmc'2'_1(00g)000$  или  $Cm'c2'_1(00g)s0s$ .

#### **Оценка достоверности и научной новизны результатов, представленных в диссертационной работе**

Достоверность полученных в диссертации положений и выводов определяется, в первую очередь, огромным экспериментальным материалом, полученным автором, а также грамотным и обоснованным применением самых последних теоретических

разработок в области определения несоразмерных магнитных структур на основе анализа магнитного рассеяния нейтронов.

### **Степень обоснованности научных положений и выводов, сформулированных в диссертации**

Основные результаты и выводы по работе достаточно надежно обоснованы, они подтверждены скупуплезными математическими расчетами в рамках современных подходов и самых актуальных программных продуктов, экспериментальными данными, полученными автором и, в силу этого, не вызывают каких-либо сомнений. Результаты диссертации своевременно опубликованы в виде 5 печатных работ в журналах, включенных в перечень ВАК и индексируемых базами данных «Web of Science» и «Scopus», и многократно докладывались на научных конференциях различного уровня.

По результатам доклада А.А. Ваулина на Проблемном совете ПИЯФ, как несомненное достоинство диссертации были отмечены «положения, выносимые на защиту», кратко, но очень четко сформулированные.

**Серьезные критические замечания по диссертационной работе отсутствуют.** По деталям можно заметить, что в литобзоре большое внимание уделено известному механизму РККИ взаимодействия, которое в исследуемых в диссертации соединениях не является определяющим.

По тексту диссертации есть несколько совсем не необходимых повторов. Так, например, цели и задачи изложены и во Введении и в Первой главе, причем практически теми же словами.

В некоторых местах текста, кажется, несколько нарушена последовательность нумерации цитируемой литературы.

В целом, диссертация представляет собой законченное научное исследование, выполненное на высоком уровне. Основные представленные к защите результаты являются новыми, актуальными и заслуживают общей положительной оценки работы. Материалы диссертации представляют интерес для исследователей, работающих в области физики магнетизма и магнитных явлений, а также материаловедении магнитных материалов. Качественные и количественные результаты работы могут быть использованы при анализе новых магнитных явлений и новых перспективных магнитных материалов. Такого рода исследования проводятся во многих институтах и научных центрах, в том числе НИЦ «Курчатовский институт», МГУ имени М.В. Ломоносова, СПбГУ, Казанском федеральном университете, Сколковском институте науки и

технологий, Казанском физико-техническом институте им. Е. К. Завойского КазНЦ РАН, Институте физики им. Л.В. Киренского СО РАН и др.

Указанные замечания не снижают научной ценности полученных автором результатов и не занижают общую положительную оценку работы. Таким образом, диссертация А.А. Ваулина «Несоизмеримые магнитные структуры и ближний магнитный порядок в редкоземельных интерметаллидах  $\text{Ho}_3\text{Co}$ ,  $\text{Ho}_7\text{Rh}_3$  и  $R_5\text{Pd}_2$  ( $R = \text{Ho}, \text{Er}$ )» соответствует всем критериям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, установленным в «Положении о порядке присуждения ученых степеней», утвержденном постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 года, № 842 с дополнениями от 21 апреля 2016 года № 335, а сам Артём Александрович Ваулин безусловно заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.12 – физика магнитных явлений.

Отзыв составлен д.ф.-м.н. А.И. Курбаковым на основании прочтения диссертации и автореферата, а также доклада А.А. Ваулина на заседании Проблемного Ученого Совета НИЦ «Курчатовский Институт» - ПИЯФ по физике конденсированного состояния 06.07.2023 г., протокол № 3 от 06.07. 2023.

Доктор физико-математических наук, специальность 01.04.07 – «Физика конденсированного состояния», руководитель Отделения нейтронных исследований, заведующий Лабораторией исследования материалов федерального государственного бюджетного учреждения «Петербургский институт ядерной физики им. Б.П. Константинова Национального исследовательского центра «Курчатовский институт» (НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ).  
188300, РФ, Ленинградская область, г. Гатчина, мкр. Орлова роща, д. 1,  
Тел.: +7(81371) 462-80,  
e-mail: kurbakov\_ai@pnpi.nrcki.ru.

Александр Иванович Курбаков

Подпись руководителя отделения, докт. физ.-мат. наук  
А.И. Курбакова удостоверяю.  
Заместитель директора  
НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ  
по научной работе  
доктор биологических наук

С.В. Саранцева

С отрывком ознакомлен  
19.07.2023 г.

7

Ваулин А.А.

**СВЕДЕНИЯ О ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ**

по диссертации Ваулина Артёма Александровича, выполненной на тему:  
«Несоизмеримые магнитные структуры и ближний магнитный порядок в редкоземельных интерметаллидах  $\text{Ho}_3\text{Co}$ ,  $\text{Ho}_7\text{Rh}_3$  и  $R_5\text{Pd}_2$  ( $R = \text{Ho}, \text{Er}$ )» по специальности 1.3.12 – физика магнитных явлений

1.	Полное наименование организации	Федеральное государственное бюджетное учреждение «Петербургский институт ядерной физики им. Б.П. Константинова Национального исследовательского центра «Курчатовский институт»
2.	Сокращенное наименование организации	НИЦ «Курчатовский Институт» - ПИЯФ
3.	Организационно-правовая форма организации	Федеральное государственное бюджетное учреждение
4.	Ведомственная принадлежность организации	НИЦ «Курчатовский Институт»
5.	Место нахождения	г. Гатчина, Лен. область, Российская Федерация
6.	Почтовый адрес организации	188300, мкр. Орлова роща, д. 1
7.	Телефон организации	Тел: <u>+7 (81371) 4-60-25</u> Факс: <u>+7 (81371) 3-60-25</u>
8.	Адрес электронной почты организации	<u>dir@pnpi.nrcki.ru</u>
9.	Адрес официального сайта организации в сети Интернет	<u>http://www.pnpi.spb.ru/</u>
10.	Руководитель организации	Горчаков Сергей Евгеньевич
11.	Наименование профильного структурного подразделения, занимающегося проблематикой диссертации	Проблемный Ученый Совет НИЦ «Курчатовский Институт» - ПИЯФ по физике конденсированного состояния
12.	Сведения о лице, утверждающем отзыв ведущей организации	Горчаков Сергей Евгеньевич, директор НИЦ «Курчатовский институт» - ПИЯФ
13.	Сведения о составителе отзыва из ведущей организации	Курбаков Александр Иванович, д.ф.-м.н, руководитель отделения нейтронных исследований, зав. лабораторией исследования материалов, зам. председателя Проблемного ученого совета
14.	<p align="center">Список основных публикаций работников структурного подразделения, составляющего отзыв, за последние пять лет по теме диссертации (не более 15 публикаций).</p> <p>1. A.N. Matveeva, I.A. Zobkalo, M. Meven, A. Sazonov, A.L. Freidman, S.V. Semenov, M.I. Kolkov, K.Yu. Terentjev, N. S. Pavlovskiy, K.A. Shaikhutdinov, V.Hutunu. «Complex interplay between 3d and 4f magnetic systems in multiferroic <math>\text{DyMnO}_3</math>» Journal of Magnetism and Magnetic Materials 569 (2023) 170415.</p> <p>2. D.O. Skanchenko, E.V. Altynbaev, V.A. Sidorov, G. Chaboussant, N. Martin, A.E. Petrova, D.A. Salamatin, S.V. Grigoriev, N.M. Chtchelkatchev, M.V. Magnitskaya, A.V. Tsvyaschenko «Split of the magnetic and crystallographic states in <math>\text{Fe}_{1-x}\text{Rh}_x\text{Ge}</math>» Journal of Alloys and Compounds 935 (2023) 167943.</p> <p>3. А.Н. Матвеева, И. А. Зобкало, А. Г. Пшеничная «Особенности магнетизма в <math>\text{Dy}_{1-x}\text{Ho}_x\text{MnO}_3</math>» Известия РАН. Серия физическая 87 (2023) 562.</p> <p>4. A.V. Syromyatnikov «Dynamics of spin-1/2 <math>J_1</math>-<math>J_2</math> model on the triangular lattice» Phys. Rev. B 106 (2022) 184415.</p>	

5. S.V. Grigoriev, N.M. Chubova, L.A. Azarova, O.I. Utesov «Transition from spiral to ferromagnetic structure in  $\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x\text{Si}$  compounds: Small-angle neutron scattering study» *Annals of Physics* 447 (2022) 169132.
6. O.I. Utesov «Magnetodipolar interaction and quasiparticles delocalization in disordered quantum magnets» *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* 560 (2022) 169640.
7. A.I. Kurbakov, A.E. Susloparova, V.Yu. Pomjakushin, Y. Skourski, E.L. Vavilova, T.M. Vasilchikova, G.V. Raganyan, A.N. Vasiliev «Commensurate helicoidal order in triangular layered magnet  $\text{Na}_2\text{MnTeO}_6$ » *Physical Review B* 105 (2022) 064416.
8. J.P. Bolletta, G.J. Cuello, V.Nassif, E. Suard, A.I. Kurbakov, A. Maignan, Ch. Martin, and R.E. Carbonio, «Room-temperature tuning of magnetic anisotropy in samarium-thulium orthoferrites» *Physical Review B* 105, 054407 (2022).
9. А.И. Курбаков, А.Н. Коршунов, А.Н. Пирогов, Е.Г. Герасимов, Н.В. Мушников «Магнитная нейтронография квазидвумерных магнетиков» *Кристаллография*, 66 (2021) 268.
10. M.N. Popova, E.P. Chukalina, D.A. Erofeev, I.A. Gudim, I.V. Golosovsky, A. Gukasov, A.A. Mukhin, and B.Z. Malkin «High-resolution optical spectroscopy, magnetic properties, and single-crystal neutron diffraction of multiferroic  $\text{HoFe}_3(\text{BO}_3)_4$ : Magnetic structure» *Physical Review B* 103 (2021) 094411.
11. I.V. Golosovsky, A.A. Mukhin, V. Skumryev, M. Boehm, W. Schmidt, L-P. Regnault, and I.A. Gudim «Magnetic excitations and exchange interactions in the substituted multiferroics  $(\text{Nd,Tb})\text{Fe}_3(\text{BO}_3)_4$  revealed by inelastic neutron scattering» *Physical Review B* 103 (2021) 214412.
12. S.V. Grigoriev, O.I. Utesov, N.M. Chubova, C.D. Dewhurst, D. Menzel, S.V. Maleyev «Critical fluctuations beyond the quantum phase transition in Dzyaloshinskii-Moriya helimagnets  $\text{Mn}_{1-x}\text{Fe}_x\text{Si}$ » *Журнал экспериментальной и теоретической физики* 159 (2021) 690.
13. O.I. Utesov, A.V. Syromyatnikov, «Phase competition in frustrated anisotropic antiferromagnet in strong magnetic field», *J. Magn. Magn. Mater.* 527 (2021) 167732
14. O.I. Utesov, A.V. Syromyatnikov, «Formation of spiral ordering by magnetic field in frustrated anisotropic antiferromagnets», *Phys. Rev. B* 100 (2019) 054439.
15. A.N. Korshunov, A.I. Kurbakov, I.A. Safiulina, A.E. Susloparova, V.Yu. Pomjakushin, Th. Mueller, «Long-range magnetic ordering in  $\text{Li}_2\text{MnGeO}_4$  and precursor short-range spin correlations» *Phys. Rev. B* 102 (2020) 214420.

Ведущая организация подтверждает, что соискатель не является ее сотрудником и не имеет научных работ по теме диссертации, подготовленных на базе ведущей организации или в соавторстве с ее сотрудниками.

Заместитель директора  
НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ  
по научной работе  
доктор биологических наук

С.В. Саранцева