

На правах рукописи

Ваулин Артём Александрович

НЕСОИЗМЕРИМЫЕ МАГНИТНЫЕ СТРУКТУРЫ И БЛИЖНИЙ
МАГНИТНЫЙ ПОРЯДОК В РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫХ ИНТЕРМЕТАЛЛИДАХ
 Ho_3Co , Ho_7Rh_3 и $R_5\text{Pd}_2$ ($R = \text{Ho}, \text{Er}$)

Специальность 1.3.12. Физика магнитных явлений

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Екатеринбург – 2023

Диссертационная работа выполнена в лаборатории перспективных магнитных материалов Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физики металлов имени М.Н. Михеева Уральского отделения Российской академии наук (ИФМ УрО РАН).

**Научный
руководитель:**

Губкин Андрей Фёдорович, кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, заведующий лабораторией нейтронных исследований вещества ФГБУН Институт физики металлов имени М. Н. Михеева Уральского отделения Российской академии наук (ИФМ УрО РАН), г. Екатеринбург.

**Официальные
оппоненты:**

Кокорина Елена Евгеньевна, кандидат физико-математических наук, ученый секретарь Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института электрофизики Уральского отделения Российской академии наук (ИЭФ УрО РАН), старший научный сотрудник лаборатории теоретической физики ИЭФ УрО РАН, г. Екатеринбург.

Ховайло Владимир Васильевич, доктор физико-математических наук, профессор кафедры функциональных наносистем и высокотемпературных материалов Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет МИСИС», г. Москва.

**Ведущая
организация:**

Федеральное государственное бюджетное учреждение Петербургский институт ядерной физики им. Б. П. Константинова национального исследовательского центра «Курчатовский институт», г. Гатчина.

Защита состоится 13 октября 2023 г. в 11:00 в диссертационном совете 24.133.01 базе ФГБУН Института физики металлов им. М.Н. Михеева УрО РАН по адресу: 620108, Екатеринбург, ул. Софьи Ковалевской, 18.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИФМ УрО РАН и на сайте www.imp.uran.ru.

Автореферат разослан _____ 2023 года.

Ученый секретарь

диссертационного совета

доктор физико-математических наук

Чарикова Татьяна Борисовна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования.

Магнитные фазовые переходы представляют значительный интерес для физики конденсированного состояния поскольку их изучение позволяет установить закономерности поведения макроскопических свойств магнитных материалов и оценить перспективность использования данных материалов при решении прикладных задач. Так, например, изменение магнитных, тепловых и электрических свойств редкоземельных интерметаллидов при магнитных фазовых переходах является одной из наиболее горячих и актуальных тем физики магнитных явлений. Среди большого количества редкоземельных интерметаллидов особый интерес представляют бинарные соединения с высоким содержанием редкоземельного элемента: R_3Co , R_5Pd_2 и R_7Rh_3 (R - редкоземельный элемент). Несмотря на большое количество опубликованных в литературе данных о макроскопических свойствах данных соединений на сегодняшний день мало что известно об их магнитных свойствах на микроскопическом уровне и, следовательно, о роли, которую играют эффекты магнитного упорядочения в аномальном поведении магнитных, тепловых и электрических свойств данных систем. Основная причина недостатка информации о магнитных структурах данных соединений заключается в том, что часто в них реализуются сложные несоизмеримые магнитные структуры, чьи трансформационные свойства описываются или двумерными неприводимыми представлениями или суперпозицией нескольких активных неприводимых представлений. Количественное описание подобных магнитных структур в рамках традиционного аппарата Шубниковских групп магнитной симметрии невозможно поскольку несоизмеримые магнитные фазы несовместимы с операциями трансляционной симметрии магнитного кристалла. Метод представлеческого анализа, описывающий конфигурацию магнитных моментов при помощи линейной комбинации базисных векторов активного неприводимого представления, обладает рядом ограничений и недостатков и не является эффективным инструментом в случае, когда активное неприводимое представление имеет размерность больше единицы или, когда магнитное состояние описывается суперпозицией нескольких неприводимых представлений. Поэтому решение задачи полного количественного описания сложных несоизмеримых магнитных структур соединений R_3Co , R_5Pd_2 и R_7Rh_3 возможно только при помощи нового формализма магнитных суперпространственных групп. Отметим, что данный подход никогда ранее не применялся для изучения несоизмеримых магнитных фаз в бинарных редкоземельных интерметаллидах вида R_nT_m (T - $3d(4d)$ переходный металл $n : m > 2 : 1$). Поэтому

существующая в научной литературе информация о магнитных структурах данных соединений ограничивается либо качественным описанием в терминах волновых векторов магнитных структур, либо количественным описанием наиболее простых структур в терминах линейной комбинации базисных векторов активного неприводимого представления. Зачастую же в литературе вообще нет данных о магнитных структурах данных системах. Таким образом, использование подхода магнитных суперпространственных групп для получения полного количественного описания несоизмеримых магнитных фаз в соединениях Ho_3Co , Ho_7Rh_3 , $R_5\text{Pd}_2$ и ($R = \text{Ho}, \text{Er}$) и установление роли несоизмеримых магнитных фаз в аномальном поведении магнитных, тепловых и электрических свойств данных систем является актуальной темой настоящей диссертационной работы.

Цель работы.

Целью настоящей 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: Ho_3Co , Ho_7Rh_3 , Ho_5Pd_2 и Er_5Pd_2 .

Для достижения поставленной цели в работе решались следующие **задачи**:

1. Синтез поликристаллических образцов бинарных редкоземельных интерметаллидов Ho_3Co , Ho_7Rh_3 , Ho_5Pd_2 , и Er_5Pd_2 , $(\text{Lu}_{1-x}\text{Gd}_x)_5\text{Pd}_2$. Синтез монокристалла Ho_5Pd_2 .
2. Аттестация фазового состава и кристаллической структуры синтезированных образцов методами рентгеновской дифракции, магнитометрии, металлографии.
3. Нейтрон-дифракционное исследование и полное количественное описание несоизмеримой магнитной структуры в Ho_3Co при помощи формализма магнитных суперпространственных групп. Установление механизма появления слабого ферромагнетизма в Ho_3Co .
4. Нейтрон-дифракционное исследование и полное количественное описание несоизмеримой магнитной структуры в Ho_7Rh_3 при помощи формализма магнитных суперпространственных групп. Изучение взаимосвязи между магнитными, тепловыми и электрическими свойствами Ho_7Rh_3 .
5. Нейтрон-дифракционное исследование магнитного состояния соединения Ho_5Pd_2 . Изучение влияния внешнего магнитного поля на магнитную, структурную и электронную подсистему Ho_5Pd_2 .

б. Экспериментальное исследование низкотемпературной теплоемкости в соединении $\text{Er}_{4.8}\text{Pd}_2$. Изучение взаимосвязи между магнитными, тепловыми и электрическими свойствами соединения $\text{Er}_{4.8}\text{Pd}_2$.

Научная новизна.

В данной диссертационной работе проведено полное количественное описание низкотемпературных несоизмеримых магнитных фаз и установлены магнитные суперпространственные группы несоизмеримых магнитных структур соединений Ho_3Co и Ho_7Rh_3 , что безусловно является новым результатом. На основании низкотемпературной магнитной структуры дается объяснение появления слабой спонтанной намагниченности в области низких температур в соединениях Ho_3Co и Ho_7Rh_3 . Впервые получены прямые экспериментальные данные, доказывающие существование ближнего магнитного порядка в Ho_7Rh_3 . Впервые при помощи нейтронной дифракции было установлено влияние внешнего магнитного поля на магнитные, электрические и структурные свойства интерметаллида Ho_5Pd_2 . Новым и ярким результатом с хорошим потенциалом применения в криогенной технике является открытие и объяснение большой объемной теплоемкости в области низких температур в соединении $\text{Er}_{4.8}\text{Pd}_2$.

Объекты исследования.

В работе изучаются представители трех семейств бинарных редкоземельных интерметаллидов с высоким содержанием редкоземельного элемента: $R_3\text{Co}$, $R_5\text{Pd}_2$ и $R_7\text{Rh}_3$. Характерной особенностью подобных систем является отсутствие дальнего магнитного порядка на $3d(4d)$ подрешетке поскольку критерий Стонера для $3d(4d)$ -зоны не выполняется. Таким образом, в соединениях $R_3\text{Co}$, $R_5\text{Pd}_2$ и $R_7\text{Rh}_3$ эффекты магнитного упорядочения реализуются исключительно на редкоземельной подрешетке. В работе сделан упор на исследование интерметаллидов с редкоземельным ионом $R = \text{Ho}$: Ho_3Co , Ho_7Rh_3 , Ho_5Pd_2 , поскольку гольмий является некрамерсовым ионом с синглетным основным состоянием. В подобных системах с некрамерсовыми ионами часто наблюдаются сложные магнитные фазовые диаграммы и несоизмеримые магнитные структуры, сохраняющие стабильность вплоть до самых низких температур. Интерес к соединению $\text{Er}_{4.8}\text{Pd}_2$, изучаемому в данной работе, связан, главным образом, с его необычными тепловыми свойствами.

Практическая и теоретическая значимость работы.

Полученные в диссертационной работе результаты способствуют дальнейшему развитию и систематизации представлений о механизмах формирования аномального поведения магнитных свойств в бинарных редкоземельных интерметаллидах R_nT_m ($n : m > 2 : 1$).

Модель магнитной структуры соединения Ho_7Rh_3 построенная в рамках использования формализма магнитных суперпространственных групп была оформлена в виде карточки по стандартизированной форме и внесена в международную базу данных магнитных структур MAGNDATA на Кристаллографическом сервере Университета Бильбао. На сегодняшний день это единственная карточка магнитной структуры соединений семейства $R_7\text{Rh}_3$ в базе данных MAGNDATA. Данная карточка может использоваться в дальнейших экспериментальных и теоретических исследованиях эффектов магнитного упорядочения в соединениях семейства $R_7\text{Rh}_3$.

В работе показано, что соединение $\text{Er}_{4.8}\text{Pd}_2$, обладает высокой объемной теплоемкостью в области температур ниже 50 К. Благодаря этому обстоятельству, соединение $\text{Er}_{4.8}\text{Pd}_2$ может использоваться при изготовлении регенераторов для рефрижераторов замкнутого цикла, работающих в области низких температур. Особый интерес представляет изготовление композитного материала $\text{Er}_3\text{Ni} + \text{Er}_{4.8}\text{Pd}_2$ поскольку Er_3Ni демонстрирует пик на теплоемкости при температуре $T_N \approx 6$ К, а $\text{Er}_{4.8}\text{Pd}_2$ демонстрирует размазанный максимум в широком интервале температур ниже 50 К.

Положения, выносимые на защиту.

1. При охлаждении ниже температуры Нееля $T_N \approx 22$ К в Ho_3Co реализуется амплитудно-модулированная несоизмеримая магнитная структура типа волны спиновой плотности, описываемой комбинацией двух волновых векторов $\mathbf{k}_{\text{IC}} = (0.155 \ 0 \ 0)$ и $\mathbf{k}_{\text{C}} = 0$ 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 «спиновой проскальзывания» с раскомпенсацией антиферромагнитной подрешетки.
2. При охлаждении ниже температуры Нееля $T_N \approx 32$ К в Ho_7Rh_3 реализуется магнитная структура типа волны спиновой плотности с волновым вектором $\mathbf{k}_{\text{IC}} = (0 \ 0 \ 0.388)$ и магнитной суперпространственной группой $Cmc2_1.1'(00g)0sss$.

3. При нагревании выше температуры Нееля $T_N \approx 32$ К в соединении Ho_7Rh_3 сохраняется ближний антиферромагнитный порядок вплоть до температур, двукратно превышающих температуру Нееля. Обнаруженный ближний антиферромагнитный порядок является причиной аномального поведения электросопротивления и теплового расширения, наблюдаемых в Ho_7Rh_3 и иных представителях семейства $R_7\text{Rh}_3$ в широком интервале температур выше температуры Нееля.

4. Приложение внешнего магнитного поля до 50 кЭ в Ho_5Pd_2 приводит к магнитоструктурному фазовому переходу в состояние с дальним ферромагнитным порядком и ромбоэдрической кристаллической структурой, описываемой пространственной группой $R\text{-}3m$. Этот переход сопровождается восстановлением металлического характера электропроводности в области низких температур.

5. Соединение $\text{Er}_{4.8}\text{Pd}_2$ обладает рекордными значениями объемной теплоемкости в области температур ниже 50 К. Причина высоких значений теплоемкости в данном соединении связана с комбинацией эффекта кристаллического поля и пространственно-неоднородного магнитного состояния типа «кластерного стекла».

Степень разработанности темы.

Ранее в работе [1] для соединения Ho_3Co проведённые магнитные исследования на монокристалле показали, что при охлаждении ниже температуры Нееля $T_N = 22$ К реализуется антиферромагнитное (АФМ) состояние с некомпланарной магнитной структурой. Вместе с тем, при охлаждении ниже температуры $T \approx 10$ К при намагничивании и размагничивании вдоль кристаллографического направления a , был обнаружен слабый ферромагнетизм (СФМ). Проведенный в работе [2] нейтрон-дифракционный эксперимент на порошковом образце Ho_3Co показал, что магнитная структура действительно является антиферромагнитной и несоизмеримой с кристаллохимической ячейкой во всей области температур ниже температуры Нееля. Тем не менее, попытка получить количественное описание несоизмеримой магнитной структуры соединения Ho_3Co успехом не увенчалась. Ввиду отсутствия модели магнитной структуры механизм возникновения слабого ферромагнетизма в Ho_3Co неизвестен.

Для соединения Ho_7Rh_3 в литературе имеются данные магнитных измерений на монокристаллическом образце, которые демонстрируют что при охлаждении ниже температуры Нееля $T_N = 32$ К реализуется антиферромагнитное состояние с некомпланарной магнитной структурой

[3, 4]. Вместе с тем, при охлаждении ниже температуры $T \approx 10$ К при намагничивании и размагничивании в базисной плоскости наблюдается наличие спонтанной намагниченности. Температурные зависимости электросопротивления Ho_7Rh_3 демонстрируют аномальное поведение в широком интервале температур ниже и выше температуры Нееля. Высказана гипотеза о существовании в Ho_7Rh_3 корреляций ближнего магнитного порядка в широком интервале температуры выше температуры Нееля. Проведенный в работе [5] нейтрон-дифракционный эксперимент на порошковом и монокристаллическом образцах Ho_7Rh_3 показали, что магнитная структура действительно является антиферромагнитной и несоизмеримой с кристаллохимической ячейкой во всей области температур ниже температуры Нееля. Тем не менее, попытка получить количественное описание несоизмеримой магнитной структуры соединения Ho_7Rh_3 успехом не увенчалась. Ввиду отсутствия достоверной модели магнитной структуры механизм возникновения спонтанной намагниченности в базисной плоскости в Ho_7Rh_3 неизвестен.

Проведенные в работе [6] магнитные и нейтронографические измерения на поликристаллическом образце Ho_5Pd_2 выявили магнитное состояние типа кластерного стекла. Сделан вывод о целесообразности проведения нейтронографического эксперимента на монокристалле с целью подтверждения несоизмеримого характера ближнего магнитного порядка в системе Ho_5Pd_2 . Обнаружено аномальное поведение температурных зависимостей электросопротивления в бинарных интерметаллидах $R_5\text{Pd}_2$. Сделано предположение о том, эффект слабой локализации носителей заряда является причиной аномального поведения электросопротивления в системах $R_5\text{Pd}_2$ [7]. Однако, на сегодняшний день нет данных о влиянии внешнего магнитного поля на магнитное состояние, электрические свойства и структурную подсистему Ho_5Pd_2 .

В литературе имеются данные магнитных измерений, подтверждающие реализацию низкотемпературного магнитного состояния типа «кластерное стекло» в соединении Er_5Pd_2 [8]. Косвенными методами обнаружены прямой магнитокалорический эффект в области температур чуть выше температуры замерзания и обратный магнитокалорический эффект в области низких температур. Как и в случае с Ho_5Pd_2 , в литературе нет данных о влиянии внешнего магнитного поля на магнитное состояние, электрические и тепловые свойства Er_5Pd_2 .

Результаты исследований, представленные автором в работе, позволили устранить эти пробелы в понимании физических свойств соединений Ho_3Co , Ho_7Rh_3 , $R_5\text{Pd}_2$ и ($R = \text{Ho}, \text{Er}$).

Методы исследования.

Основной метод исследования эффектов магнитного упорядочения в бинарных редкоземельных интерметаллидах Ho_3Co , Ho_7Rh_3 , Ho_5Pd_2 – дифракция медленных нейтронов на порошковых и монокристаллических образцах с использованием современных дифрактометров крупных международных нейтронных центров. Комплементарные данные о магнитных свойствах Ho_3Co , Ho_7Rh_3 , Ho_5Pd_2 , $\text{Er}_{4.8}\text{Pd}_2$ получены при помощи измерений на СКВИД-магнитометре (MPMS-XL-5) и на универсальной установке для измерений физических свойств (PPMS-9). Исследование электрических свойств Ho_5Pd_2 и $\text{Er}_{4.8}\text{Pd}_2$ проводилось на установке PPMS стандартным четырехконтактным методом в режиме АС. Исследование тепловых свойств Ho_7Rh_3 и $\text{Er}_{4.8}\text{Pd}_2$ проводилось на установке PPMS с использованием стандартной опции для измерения теплоемкости и нестандартной опции для измерения теплового расширения от Kuechler innovative measurement technology.

Степень достоверности и апробация материала.

Степень достоверности полученных результатов гарантируется комплексной аттестацией синтезированных образцов, использованием современного приборного парка, аттестованного на калибровочных образцах, применением апробированных и аттестованных на стандартных образцах методов анализа экспериментальных данных, применением известных и популярных программных пакетов для анализа экспериментальных данных. Полученные экспериментальные результаты согласуются между собой и существующими литературными данными. Результаты диссертационной работы прошли достаточную апробацию.

Основные положения диссертации докладывались на российских и международных конференциях: IX Всероссийская молодежная школа-семинар по проблемам физики конденсированного состояния вещества (СПФКС-19), (г. Екатеринбург, 2018); Конференции по использованию рассеяния нейтронов в конденсированных средах (РНИКС-2018), (г. Гатчина, 2018); European Conference on Neutron Scattering (ECNS 2019), (г. Санкт-Петербург, 2019); VII Euro-Asian Symposium «Trends in MAGnetism» (EASTMAG-2019), (г. Екатеринбург, 2019); XX Всероссийская молодежная школа-семинар по проблемам физики конденсированного состояния вещества

(СПФКС-20), (г. Екатеринбург, 2019); 54-я Школы ПИЯФ по Физике Конденсированного Состояния (Школа ФКС-2020), (г. Сестрорецк 2020); XXI Всероссийской школы-семинара по проблемам физики конденсированного состояния вещества (СПФКС-21), (г. Екатеринбург 2020); Конференции по использованию рассеяния нейтронов в исследовании конденсированных сред (РНИКС-2021), (г. Екатеринбург 2021); XXV International Union of Crystallography Congress (XXV IUCr Congress 2021), (г. Прага, Чехия 2021); VIII Euro-Asian Symposium «Trends in MAGnetism» (EASTMAG-2022), (г. Казань 2022).

Публикации.

Материалы диссертации опубликованы в 15 печатных работах: в 5 статьях в научных рецензируемых журналах, входящих в перечень ВАК и в 10 тезисах докладов на российских и международных конференциях.

Личный вклад автора.

Автор диссертации совместно с научным руководителем к.ф.-м.н. Губкиным А.Ф. участвовал в постановке цели и задач исследования. Автором выполнена подготовка компонентов к синтезу и синтезированы поликристаллические образцы Ho_3Co , Ho_7Rh_3 , Lu_5Pd_2 и $(\text{Lu}_{1-x}\text{Gd}_x)_5\text{Pd}_2$. Автором проведена фазовая и структурная аттестация образцов методами нейтронографии и рентгенографии при помощи программных пакетов FullProf Suite и JANA2006 для образцов Ho_3Co , Ho_7Rh_3 , Ho_5Pd_2 , Er_5Pd_2 , Lu_5Pd_2 и $(\text{Lu}_{1-x}\text{Gd}_x)_5\text{Pd}_2$. Автором лично выполнена подготовка образцов для измерений их макроскопических свойств различными методами, проведена обработка и анализ результатов экспериментальных данных. Автор принимал непосредственное участие в нейтрон-дифракционном эксперименте на образце Ho_5Pd_2 в Берлинском центре рассеяния нейтронов HZB, измерениях макроскопических свойств на установках MPMS и PPMS, участвовал пусконаладочных работах, аттестации и эксперименте на дилатометрической опции для установки PPMS. Автором разработан код в среде Python для анализа данных измерений теплоемкости и теплового расширения. Автором проведено уточнение моделей кристаллической структуры и магнитной структуры по данным нейтронной и синхротронной дифракции при помощи программных пакетов FullProf Suite, JANA2006 и JANA2020. Автор принимал непосредственное участие в обсуждении результатов, написании статей и тезисов докладов, представлял результаты на российских и международных конференциях.

Соответствие диссертации паспорту специальности.

Содержание диссертации соответствует пункту 3 «Экспериментальные исследования магнитных свойств и состояний веществ различными методами, установление взаимосвязи этих свойств и состояний с химическим составом и структурным состоянием, выявление закономерностей их изменения под влиянием различных внешних воздействий», пункту 4 «Исследование изменений различных физических свойств вещества, связанных с изменением их магнитных состояний и магнитных свойств» и пункту 5 «Исследование явлений, связанных с взаимодействием различного рода электромагнитных излучений и потоков элементарных частиц с магнитными моментами вещества или его структурных составляющих: атомов, атомных ядер, электронов (парамагнитный, ферромагнитный, ядерный магнитный, ядерный гамма резонансы и др.)» паспорта специальности 1.3.12. Физика магнитных явлений.

Структура и объем диссертации.

Диссертация состоит из оглавления, введения, 6 глав, заключения, списка использованных обозначений и сокращений, списка публикаций автора по теме диссертации, благодарностей и списка используемой литературы. Общий объем диссертации составляет 195 страниц, 79 рисунков, 22 таблицы. Список литературы содержит 175 наименования на 14 страницах.

Работа выполнена в рамках следующих программ и грантов. Государственное задание МИНОБРНАУКИ России («ПОТОК», № 22021000031-8), РФФ (проект № 18-72-10022), РФФИ (проект № 20-32-90047).

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность выбранной темы диссертации, сформулированы цель и задачи работы, отмечены научная новизна, научная и практическая значимость работы, приведены защищаемые положения.

В первой главе приводится краткое изложение литературных данных по тематике диссертации. Обсуждаются основные взаимодействия, которые могут оказывать влияние на формирование магнитной структуры редкоземельных интерметаллидов с $3d/4d$ переходными металлами. Рассмотрены основные подходы к анализу и описанию несоизмеримых магнитных структур, отмечены ключевые особенности формализма магнитных суперпространственных групп. Приводятся литературные данные о структурных, магнитных, тепловых и электрических свойствах

редкоземельных интерметаллидов Ho_3Co , Ho_7Rh_3 и $R_5\text{Pd}_2$ ($R = \text{Ho}, \text{Er}$). На основании анализа литературных данных сделан вывод о современном состоянии исследований и ключевых нерешенных проблемах. В конце главы сформулированы основные цели и задачи исследования.

Во второй главе приводится информация касательно экспериментальных методик, используемых при проведении исследования. Описана методика синтеза поликристаллов редкоземельных интерметаллидов Ho_3Co , Ho_7Rh_3 и $R_5\text{Pd}_2$ ($R = \text{Ho}, \text{Er}$) методом плавки в дуговой печи с нерасходуемым вольфрамовым электродом на водоохлаждаемом медном поддоне в атмосфере гелия. Приведено описание методов исследования кристаллической структуры образцов при помощи порошковой рентгеновской дифракции с использованием стационарной установки Empyrean производства PANalytical, а также, порошковой дифракционной линии высокого разрешения ID22 на высокоинтенсивном синхротронном источнике (ESRF, Франция). Подробно представлены методы и приборы для исследования магнитной структуры соединений Ho_3Co , Ho_7Rh_3 и $R_5\text{Pd}_2$ ($R = \text{Ho}, \text{Er}$): высокоразрешающий нейтронный дифрактометр HERMES (Токай, Япония), дифрактометр на холодных нейтронах DMC (Институт Пауля Шеррера, Швейцария), порошковый дифрактометр среднего разрешения E6 (Институт Ганна-Мейтнер, Берлин Германия), монокристалльный дифрактометр с опцией плоского конуса E2 (Институт Ганна-Мейтнер, Берлин, Германия). Описаны методики исследования магнитных, тепловых и электрических свойств образцов на измерительных комплексах PPMS-9 и MPMS-XL-5 произведенных Quantum Design Inc. Представлены основные программные пакеты и алгоритмы анализа дифракционных данных.

Третья глава посвящена исследованию несоизмеримой магнитной структуры и магнитных свойств соединения Ho_3Co .

В разделе 3.1 представлены результаты нейтронографической и рентгеноструктурной аттестации поликристаллических образцов Ho_3Co .

В разделе 3.2 представлены результаты магнитных измерений в постоянных и осциллирующих магнитных полях на поликристаллическом образце Ho_3Co . Было показано, что соединение Ho_3Co испытывает магнитный фазовый переход при температуре Нееля $T_N \approx 22$ К из парамагнитного состояния в упорядоченное состояние с дальним антиферромагнитным порядком. При охлаждении ниже $T_t \approx 11$ К наблюдается спин-переориентационный переход. Измерение температурных зависимостей реальной и мнимой компонент магнитной АС восприимчивости позволило

установить, что в области низких температур $T < 11$ К наблюдается значительная частотная зависимость магнитной восприимчивости, свидетельствующая о диссипации энергии в магнитной подсистеме. Сделано предположение, что наблюдаемые частотные зависимости магнитной АС восприимчивости связаны с появлением магнитной вязкости в системе при возникновении слабой спонтанной намагниченности вдоль кристаллографического направления a .

В разделах 3.3 и 3.4 представлены результаты нейтрон-дифракционного исследования магнитной структуры Ho_3Co . Из данных нейтронной дифракции были построены магнитные фазовые диаграммы соединения Ho_3Co (смотрите рисунок 1). В частности, при охлаждении ниже температуры Нееля $T_N \approx 22$ К в Ho_3Co реализуется двухкомпонентная магнитная структура, описываемая комбинацией двух волновых векторов: соизмеримая компонента с волновым вектором $\mathbf{k}_C = 0$ и несоизмеримая компонента с волновым вектором $\mathbf{k}_{IC} = \mu \mathbf{b}_1$ ($\mu = 0.133$, $b_1 = \frac{2\pi}{a}$). Уточнение магнитной структуры из данных нейтронной дифракции при температуре $T = 15$ К, проведенное по методу Ритвельда с использованием формализма магнитных суперпространственных групп, позволило получить полное количественное описание данной магнитной структуры. Установлено, что магнитная структура при $T = 15$ К определяется суперпозицией двух физически неприводимых представлений $[\mathbf{k}_C]m\Gamma_{4-}$ и $[\mathbf{k}_{IC}]m\Sigma_4$ и описывается магнитной суперпространственной группой $Pm'cn(00g)000$. Данная магнитная структура представляет собой набор скошенных поперечных спиновых волн, распространяющихся вдоль направления несоизмеримого волнового вектора \mathbf{k}_{IC} (смотри рисунок 2).

При дальнейшем охлаждении в области $T \sim 16$ К наблюдается перераспределение вкладов от соизмеримой и несоизмеримой компонент, а при температурах ниже $T_t = 11$ К соизмеримая компонента магнитной структуры оказывается практически полностью подавлена. Охлаждение образца ниже $T_t \approx 11$ К приводит к появлению нечетных гармоник $3\mathbf{k}_{IC}$, $5\mathbf{k}_{IC}$ на нейтронограммах, указывающих на эволюцию несоизмеримой амплитудно-модулированной магнитной структуры типа «волна спиновой плотности» по

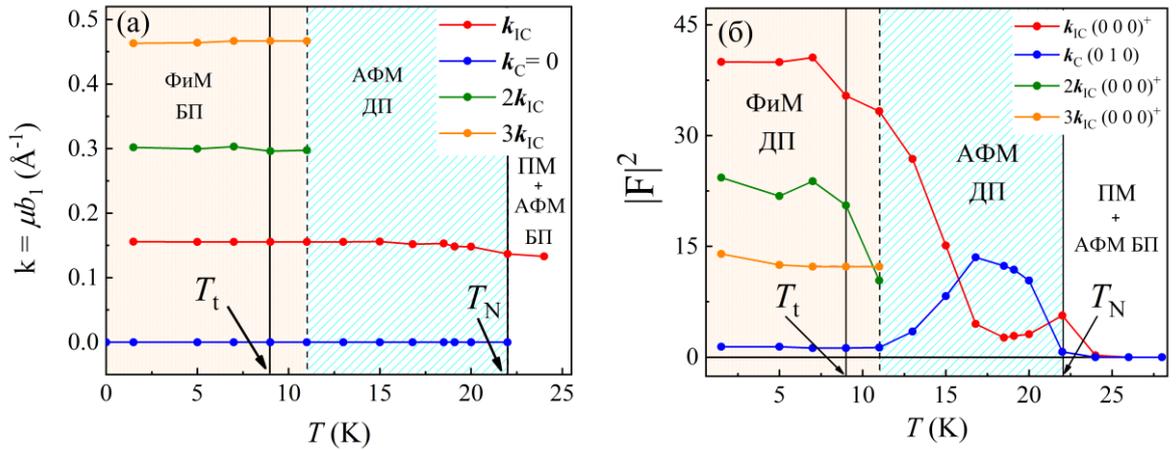


Рисунок 1 – Магнитные фазовые диаграммы соединения Ho_3Co построенные в виде: (а) температурных зависимостей волновых векторов магнитной структуры \mathbf{k}_C , \mathbf{k}_{1C} , $2\mathbf{k}_{1C}$, $3\mathbf{k}_{1C}$ и (б) температурных зависимостей структурного фактора $|\mathbf{F}|^2$ Брэгговских пиков $(0\ 1\ 0)$, $(\mu\ 0\ 0)^+$, $(2\mu\ 0\ 0)^+$ и $(3\mu\ 0\ 0)^+$. Величина $|\mathbf{F}|^2$ сателлита $(\mu\ 0\ 0)^+$ \mathbf{k}_{1C} уменьшена в 90 раз, рефлекса $(0\ 1\ 0)$ уменьшена в 5 раз

направлению к магнитной структуре с равными магнитными моментами типа «антифазных доменов». Для магнетика с несоизмеримой амплитудно-модулированной структурой подобное изменение магнитной структуры является одним из возможных способов минимизировать свою энтропию при понижении температуры [9].

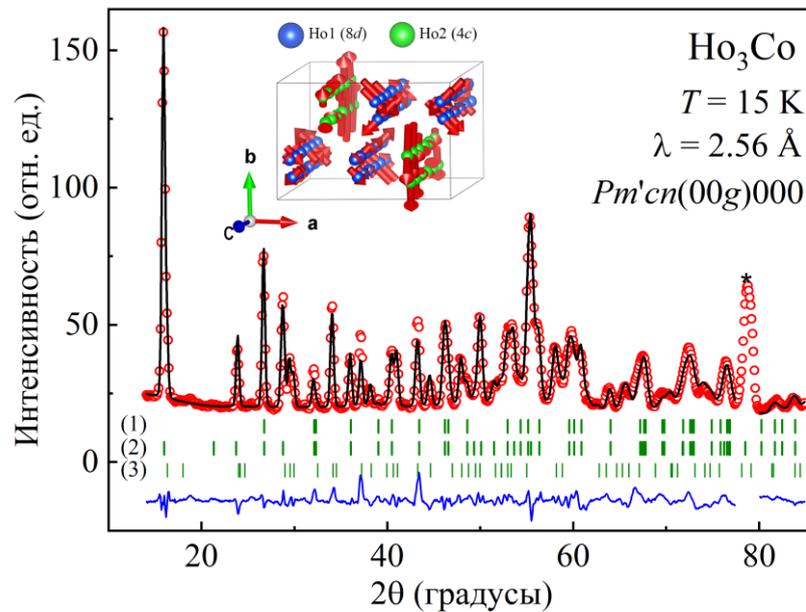


Рисунок 2 – Результаты уточнения магнитной структуры соединения Ho_3Co по данным нейтронной дифракции, измеренным при температуре 15 К. Метка (1) указывает на положения структурных пиков, метка (2) - магнитных пиков индексируемых \mathbf{k}_C , метка (3) - магнитных пиков, индексируемых \mathbf{k}_{1C} . Звёздочкой обозначен пик от алюминия

Помимо нечетных гармоник на данных нейтронной дифракции ниже $T_t \approx 11$ К присутствуют и четные гармоники $2\mathbf{k}_{IC}, 4\mathbf{k}_{IC}$. Ярко выраженная зависимость магнитной АС восприимчивости от частоты осциллирующего поля, а также появление слабой спонтанной намагниченности вдоль кристаллографического направления a [1] в области температур ниже $T_t \approx 11$ К указывают на магнитных характер сателлитов, индексируемых четными гармониками. На рисунке 3(а,б) показано схематичное изображение проекций магнитных моментов на кристаллографическое направление a для цепочек атомов Ho при температурах $T = 15$ и 4.2 К. Из рисунка видно, что дважды за период волны равный $T \approx 1/0.155 \approx 6.5$ параметров кристаллохимической ячейки возникает ситуация, когда два соседних магнитных момента параллельны. Во всех остальных случаях антиферромагнитный обмен сохраняет антипараллельное упорядочение между соседними атомами в цепочке. При высоких температурах система магнитных моментов минимизирует свою энергию, располагая пару параллельных моментов в узлах спиновой волны, где амплитуды моментов, образующих эту пару минимальны. При охлаждении образца гармоническая волна эволюционирует по направлению к магнитной структуре с равными магнитными моментами типа «антифазных доменов» и пара параллельных магнитных моментов увеличивает свою амплитуду. Существование такой пары в условиях антиферромагнитного обмена между ближайшими соседями энергетически невыгодно и система может минимизировать свою энергию за счет переворота (spin-flip) одного из образующих пару спинов. Данный эффект известен в литературе под

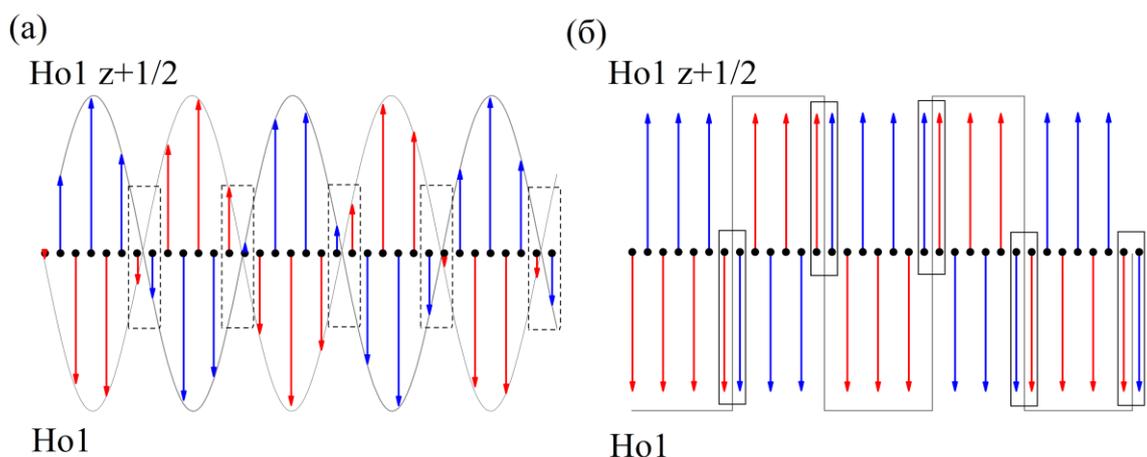


Рисунок 3 – (а) Схематичное изображение гармонической волны магнитной структуры на цепочке атомов Ho при $T = 15$ К. (б) Визуализация магнитной структуры с равными магнитными моментами типа «антифазных доменов» для одной цепочки при $T = 4.2$ К

названием «спинового проскальзывания», а магнитная фаза, где наблюдается такой эффект называется фазой «спинового проскальзывания» или «spin-slip» фазой [10]. Периодичность этого дефекта совпадает с периодом волны магнитной структуры и приводит к появлению четных гармоник на нейтронограммах. Раскомпенсация антиферромагнитной подрешетки вследствие эффекта спинового проскальзывания становится причиной появления спонтанной намагниченности вдоль направления a в области температур ниже $T_t \approx 11$ К.

В разделе 3.5 представлены выводы по главе 3.

Четвертая глава посвящена исследованию несоизмеримой магнитной структуры, ближнего магнитного порядка и физических свойств соединения Ho_7Rh_3 .

В разделе 4.1 представлены результаты нейтронографической и рентгеноструктурной аттестации поликристаллических образцов Ho_7Rh_3 .

В разделе 4.2 приведены данные магнитных измерений на поликристаллическом образце Ho_7Rh_3 в постоянных и осциллирующих магнитных полях. При помощи магнитных измерений показано, что при $T_N \approx 32$ К происходит магнитный фазовый переход из парамагнитного состояния в антиферромагнитное, а при $T_{t1} \approx 21$ К и $T_{t2} \approx 9$ К с спин-переориентационные переходы. Более того, данные линейной и нелинейной магнитной АС восприимчивости указывают на то, что при температуре $T_{t2} \approx 9$ К происходит магнитный фазовый переход с потерей операции «инверсии времени». Такое поведение характерно для магнитных фазовых переходов в состоянии со спонтанной намагниченностью.

В разделе 4.3 представлены результаты нейтрон-дифракционного исследования низкотемпературных магнитных структур в Ho_7Rh_3 . В частности, показано, что в Ho_7Rh_3 ближний антиферромагнитный порядок, сохраняется в парамагнитной фазе вплоть до температур, двукратно превышающих температуру Нееля $T_N \approx 32$ К. При температурах ниже температуры Нееля реализуется несоизмеримая магнитная структура, описываемая волновым вектором $\mathbf{k}_{IC} = (0\ 0\ \mu)$, где $\mu = 0.388$. При помощи метода магнитных суперпространственных групп получено полное количественное описание данной структуры. Показано, что симметричные свойства несоизмеримой магнитной фазы в Ho_7Rh_3 определяются одним физически неприводимым представлением $m\Delta_6$ и связанной с ним магнитной суперпространственной группой $Cmc2_1.1'(00g)0sss$. Дальнейшее охлаждение ниже $T_{t1} \approx 21$ К приводит к эволюции несоизмеримой амплитудно-модулированной магнитной структуры типа «волна спиновой

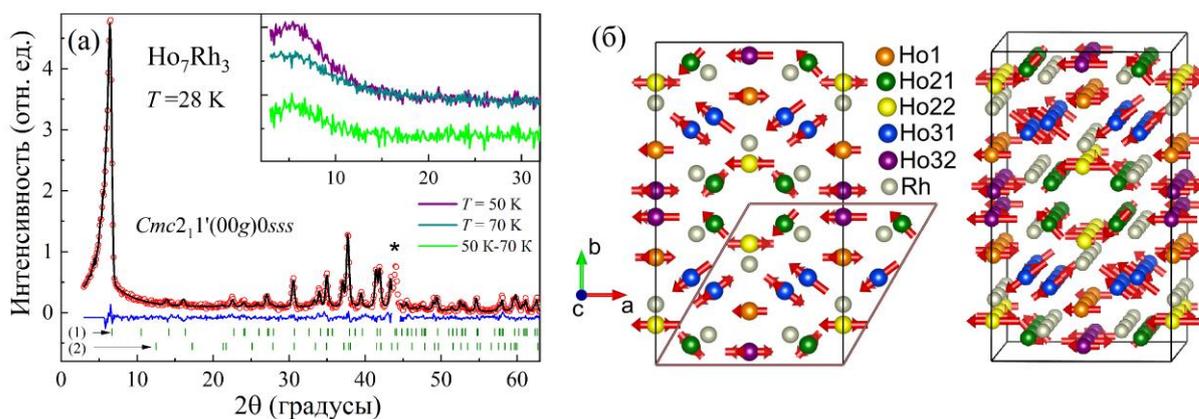


Рисунок 4 – Результат уточнения магнитной структуры соединения Ho_7Rh_3 по данным нейтронной дифракции при 28 К: (а) аппроксимация экспериментальных данных и (б) уточненная модель магнитной структуры. На вставке представлены порошковые нейтронограммы, измеренные при температурах 70 и 50 К и их разностная кривая

плотности» по направлению к магнитной структуре с равными магнитными моментами типа «антифазных доменов», проявляющейся в виде нечетных гармоник $3k_{\text{IC}}$ на нейтронограммах при температуре ниже $T_{t1} \approx 21$ К. Дальнейшее охлаждение образца ниже $T_{t2} \approx 9$ К приводит к магнитному фазовому переходу в несоизмеримую магнитную фазу с ферромагнитной компонентой. Установлено, что симметрия низкотемпературной магнитной фазы может быть описана одной из подгрупп индекса $i = 2$: $Cmc'2'_1(00g)000$ или $Cm'c2'_1(00g)s0s$, допускающей ферромагнетизм в базисной плоскости. Карточка магнитной структуры Ho_7Rh_3 добавлена в международную базу данных магнитных структур MAGNDATA.

В разделах 4.5 и 4.6 обсуждаются данные измерений теплового расширения и синхротронной дифракции в широкой области температур ниже и выше температуры Нееля. Сделан вывод о том, что ближний магнитный порядок в Ho_7Rh_3 является причиной аномального поведения теплового расширения и удельного электрического сопротивления в области температур выше температуры Нееля. В эксперименте по дифракции на синхротроне получено подтверждение отсутствия структурных фазовых превращений в Ho_7Rh_3 .

В разделе 4.7 приводятся основные выводы к главе 4.

Пятая глава посвящена исследованию влияния внешнего магнитного поля на магнитные, структурные и электрические свойства соединения Ho_5Pd_2 .

В разделе 5.1 содержатся данные аттестации монокристаллического и поликристаллических образцов Ho_5Pd_2 .

В разделе 5.2 проводится магнитометрическая аттестация образца и делается вывод о том, что в Ho_5Pd_2 при температуре замерзания $T_f = 27$ К

возникает магнитное состояние типа кластерного стекла, что хорошо согласуется с опубликованными ранее данными в работе [6]. Также в данном разделе обсуждаются результаты измерения температурных зависимостей электросопротивления в магнитных полях до 70 кЭ. Показано, что пространственно-неоднородное антиферромагнитное состояние Ho_5Pd_2 является ключевой причиной аномального поведения электросопротивления в области низких температур. В частности, приложение внешнего магнитного поля до 70 кЭ подавляет ближний АФМ порядок и приводит к восстановлению металлического характера проводимости в области низких температур (смотри рисунок 5(a)).

В разделах 5.3 и 5.4 представлены результаты нейтронографического исследования магнитного состояния Ho_5Pd_2 на монокристаллическом и порошковом образцах в полях до 50 кЭ. При помощи нейтрон-дифракционного эксперимента на монокристаллическом образце Ho_5Pd_2 подтверждено отсутствие дальнего магнитного порядка вплоть до температуры $T = 1.5$ К. Вместе с тем в области малых углов обнаружены магнитные сателлиты, индексируемые разными лучами звезды волновых векторов вида $\mathbf{k} = (\mu \delta 0)$, где $\mu \sim 0.30 \pm 0.06$, $\delta \sim 0.41 \pm 0.02$. Данные сателлиты могут быть связаны с несоизмеримостью конфигурации магнитных моментов в антиферромагнитных кластерах. Можно предположить альтернативное объяснение наблюдаемым в эксперименте магнитным сателлитам вокруг узла $(0\ 0\ 0)$, которое заключается в том, что в образце возникает магнитная субструктура периодичная в плоскости $(h\ k\ 0)$. Более того, слабая корреляция позиций магнитных сателлитов с решеткой и симметрия 4-го порядка на дифракционной картине могут свидетельствовать о существовании периодичной квази-решетки, состоящей из областей с

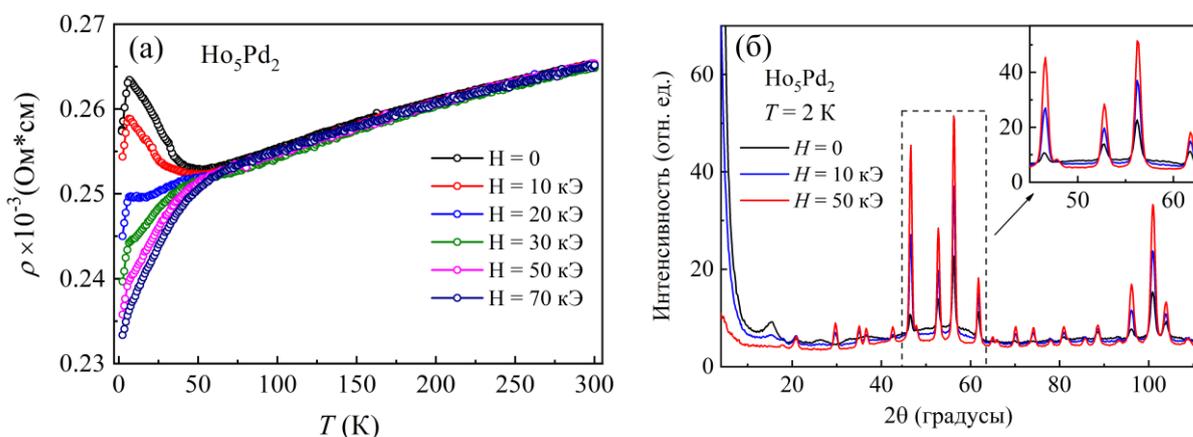


Рисунок 5 – (а) Температурные зависимости электросопротивления соединения Ho_5Pd_2 измеренные в полях до 70 кЭ. (б) Нейтронограммы поликристаллического образца Ho_5Pd_2 снятые при температуре 2 К в магнитных полях до 50 кЭ

ближним магнитным порядком. Также показано, что приложение внешнего магнитного поля подавляет пространственно-неоднородное магнитное состояние в Ho_3Pd_2 и индуцируется ферромагнитное состояние с дальним магнитным порядком. Этот переход сопровождается структурным фазовым переходом из кубической кристаллической структуры с пространственной группой $Fd-3m$ в ромбоэдрическую кристаллическую структуру с пространственной группой $R-3m$.

В разделе 5.4 дается обобщение основных результатов к главе 5.

Шестая глава посвящена исследованию магнитных, тепловых и электрических свойств изоструктурных бинарных соединений $\text{Er}_{4.8}\text{Pd}_2$ и $\text{Lu}_{4.8}\text{Pd}_2$.

В разделе 6.1 содержатся сведения о рентгеноструктурной аттестации поликристаллических образцов $\text{Er}_{4.8}\text{Pd}_2$ и $\text{Lu}_{4.8}\text{Pd}_2$.

В разделе 6.2 представлены результаты магнитометрической аттестации поликристаллических образцов $\text{Er}_{4.8}\text{Pd}_2$ и $\text{Lu}_{4.8}\text{Pd}_2$. Установлено, что $\text{Lu}_{4.8}\text{Pd}_2$ является парамагнетиком Паули, а в $\text{Er}_{4.8}\text{Pd}_2$ реализуется пространственно-неоднородное магнитное состояние типа кластерного стекла, как это было ранее показано в работе [8].

В разделе 6.3 представлены результаты исследования тепловых свойств соединения $\text{Er}_{4.8}\text{Pd}_2$. Обнаружено, что соединение $\text{Er}_{4.8}\text{Pd}_2$ обладает рекордными значениями объемной теплоемкости в области низких температур $T < 50$ К (смотри рисунок 6(а)). Для установления механизма возникновения высокой низкотемпературной теплоемкости в $\text{Er}_{4.8}\text{Pd}_2$ получены количественные оценки магнитных и немагнитных вкладов в теплоемкость и тепловое расширение соединения $\text{Er}_{4.8}\text{Pd}_2$. Из результатов аппроксимации экспериментальных кривых установлена схема расщепления мультиплета $^4I_{15/2}$ иона Er^{3+} кристаллическим полем кубической симметрии (смотри рисунок 6(б)). В частности, было показано, что вклад в энтропию, связанный с тепловым заселением основного дублетного состояния и первого возбужденного квартетного состояния при нагревании до ~ 50 К, составляет $\Delta S_{\text{кп}} = 4.8R \ln 6$. Реализация пространственно-неоднородного стекольного магнитного состояния обусловлена основным дублетным состоянием иона Er^{3+} и дает вклад в энтропию $\Delta S_{\text{М}} = 4.8R \ln 2$ (смотри рисунок 6(в)). Таким образом, суммарный вклад в энтропию от эффекта кристаллического поля и ближнего антиферромагнитного порядка при температурах ниже 50 К составляет $\Delta S_{\text{М+кп}}(T) = 4.8R \ln 12 = 99.1$ Дж моль $^{-1}$ К $^{-1}$. Для сравнения в интерметаллиде Er_3Ni , который обладает большой теплоемкостью в области низких температур и применяется для изготовления регенераторов

криокулеров максимальная доступная энтропия в области низких температур составляет $\Delta S_{\text{М+КП}}(T) = 3R \ln 16 = 69.1 \text{ Дж моль}^{-1} \text{ К}^{-1}$ [11, 12].

В разделе 6.4 представлены результаты исследования электрических свойств соединения $\text{Er}_{4.8}\text{Pd}_2$. Установлено, что приложение внешнего магнитного поля до 70 кЭ подавляет низкотемпературную аномалию на температурной зависимости электросопротивления $\rho(T)$ и восстанавливает металлический характер проводимости в $\text{Er}_{4.8}\text{Pd}_2$ (смотри рисунок 6(г)) также, как это наблюдалось для соединения Ho_5Pd_2 . Величина магниторезистивного эффекта в области низких температур достигает значения $\frac{\Delta\rho(H)}{\rho(0)} = -2.8\%$.

Сделан вывод о том, что аномальное поведение электросопротивления в соединении $\text{Er}_{4.8}\text{Pd}_2$ в области низких температур связано с пространственно-неоднородным электронным состоянием, возникающим вследствие реализации кластерного магнитного состояния.

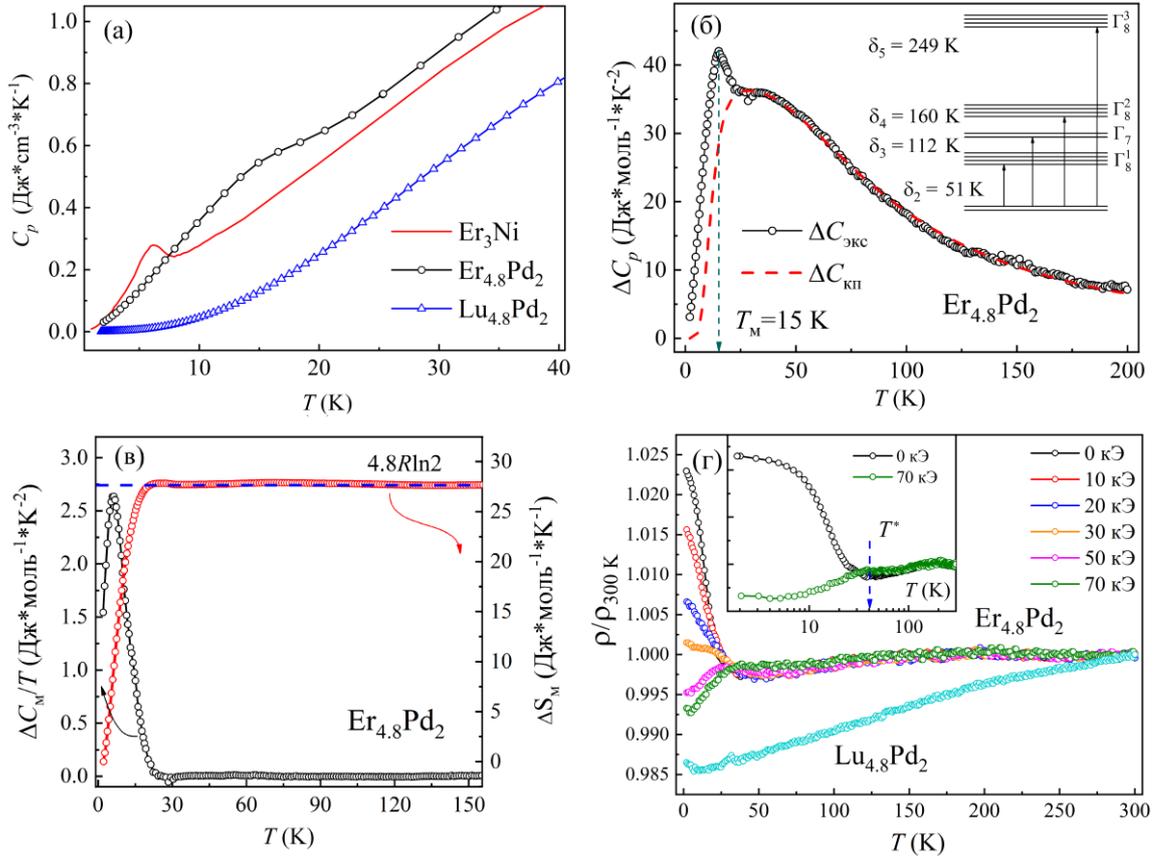


Рисунок 6 – (а) Температурные зависимости объёмной теплоемкости для бинарных соединений $\text{Er}_{4.8}\text{Pd}_2$, $\text{Lu}_{4.8}\text{Pd}_2$ и Er_3Ni . Для Er_3Ni данные взяты из работы [11]. (б) Температурная зависимость избыточного вклада в удельную теплоёмкость $\Delta C(T)$ обусловленного эффектом кристаллического поля и магнитным упорядочением. Красная штриховая линия - аппроксимация экспериментальных данных вкладом типа Шоттки. (в) Температурные зависимости вклада в теплоёмкость от магнитного упорядочения (черные символы) и магнитной энтропии (красные символы) для соединения $\text{Er}_{4.8}\text{Pd}_2$. (г) Температурные зависимости электросопротивления, измеренные в магнитных полях до 70 кЭ

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Установлено, что при охлаждении ниже температуры Нееля $T_N \approx 22$ К в Ho_3Co реализуется амплитудно-модулированная несоизмеримая магнитная структура типа волна спиновой плотности, описываемая комбинацией двух волновых векторов $\mathbf{k}_{\text{IC}} = (0.155 \ 0 \ 0)$ и $\mathbf{k}_{\text{C}} = 0$ и магнитной суперпространственной группой $Pm'cn(00g)000$.
2. Показано, что при охлаждении ниже $T_t \approx 11$ К в Ho_3Co эволюция гармонической волны спиновой плотности по направлению к магнитной структуре с равными моментами типа «антифазных доменов» порождает фазу «спиновой проскальзывания». Показано, что слабый ферромагнетизм фазы «спиновой проскальзывания» возникает вследствие конкуренции

ферромагнитного и антиферромагнитного обменов и раскомпенсации антиферромагнитной подрешетки.

3. На примере соединения Ho_7Rh_3 впервые показано, что магнитный фазовый переход в магнитоупорядоченное состояние в семействе бинарных редкоземельных интерметаллидов вида $R_7\text{Rh}_3$ может идти по одному неприводимому $m\Delta_6$. Несоизмеримая магнитная структура типа волны спиновой плотности, связанная с неприводимым представлением $m\Delta_6$, 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 Ho_7Rh_3 связано с магнитным фазовым переходом в одну из подгрупп индекса 2: $Cmc'2'_1(00g)000$ или $Cm'c2'_1(00g)s0s$. Карточка магнитной структуры соединения Ho_7Rh_3 внесена в международную базу данных магнитных структур MAGNDATA.

4. На примере соединения Ho_7Rh_3 впервые для семейства бинарных редкоземельных интерметаллидов типа $R_7\text{Rh}_3$ получены прямые доказательства существования ближнего антиферромагнитного порядка, сохраняющегося вплоть до температур, двукратно превышающих температуру Нееля $T_N = 32$ К. Отмечено, что ближний антиферромагнитный порядок является причиной аномального поведения электросопротивления и теплового расширения, наблюдаемых в Ho_7Rh_3 и иных представителях семейства $R_7\text{Rh}_3$ в широком интервале температур выше температуры Нееля.

5. Получены экспериментальные данные, подтверждающие существование экзотичного пространственно-неоднородного низкотемпературного магнитного состояния в Ho_5Pd_2 . Показано, что приложение внешнего магнитного поля приводит к магнитоструктурному переходу в состояние с дальним ферромагнитным порядком и ромбоэдрической кристаллической структурой, описываемой пространственной группой $R-3m$. Этот переход сопровождается восстановлением металлического характера электропроводности в Ho_5Pd_2 .

6. Впервые показано, что соединение $\text{Er}_{4.8}\text{Pd}_2$ обладает рекордными значениями объемной теплоемкости в области температур ниже 50 К. Получены количественные оценки основных вкладов в теплоемкость $\text{Er}_{4.8}\text{Pd}_2$. Установлено, что причина высоких значений низкотемпературной теплоемкости в данном соединении связана с комбинацией вкладов от эффекта кристаллического поля и пространственно-неоднородного магнитного состояния типа «кластерного стекла».

7. Установлено, что приложение внешнего магнитного поля до 70 кЭ подавляет низкотемпературную аномалию на температурной зависимости электросопротивления $\rho(T)$ и восстанавливает металлический характер проводимости в $\text{Er}_{4.8}\text{Pd}_2$. Показано, что причины аномального поведения электросопротивления в $\text{Er}_{4.8}\text{Pd}_2$ связаны с возникновением пространственно-неоднородного магнитного и, соответственно, электронного состояния при охлаждении ниже 40 К.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ АВТОРА

A1. Magnetic incommensurability, short-range correlations, and properties of Ho_7Rh_3 / A.F. Gubkin, **A.A. Vaulin**, T. Tsutaoka, A.F. Prekul, K. P. Skokov, N. V. Baranov // *Physical Review B*. – 2022. – Т. 106. – №. 13. – С. 134419;

A2. Magnetic glassiness and crystal field effects on thermal and electrical properties of Er_5Pd_2 -type compounds / **A.A. Vaulin**, A.M. Chirkova, E.A. Sherstobitova, D.A. Shishkin, E.M. Sherokalova, K.P. Skokov, N.V. Baranov, A.F. Gubkin // *Intermetallics*. – 2022. – Т. 144. – С. 107519;

A3. Low-temperature magnetic state of Ho_7Rh_3 studied by neutron diffraction and AC magnetic susceptibility / **A.A. Vaulin**, A.F. Prekul, T. Tsutaoka, N.V. Baranov, A.F. Gubkin // *Acta Crystallographica Section A: Foundations and Advances*. – 2021. – Т. 77. – С. C445-C445.

A4. Анализ несоизмеримых магнитных структур редкоземельных интерметаллидов Tb_3Ni и Ho_7Rh_3 с использованием формализма групп магнитной суперсимметрии / А.Ф. Губкин, **А.А. Ваулин**, Т. Тсутаока, Н.В. Баранов // *Физика металлов и металловедение*. – 2019. – V. 120. – P. 1250 – 1256.

A5. Квазибинарные интерметаллиды $(\text{Lu,Gd})_5\text{Pd}_2$: структурная аттестация и магнитные характеристики / **А.А. Ваулин**, Д.А. Шишкин, П.Б. Терентьев, Е.А. Шерстобитова, А.Ф. Губкин // *Фундаментальные проблемы современного материаловедения*. – 2016. – Т. 13. – №. 1. – С. 43-48.

СПИСОК ЦИТИРУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Irreversible field-induced magnetic phase transitions and properties of Ho₃Co / N. V. Baranov, T. Goto, G. Hilscher, P. E. Markin, H. Michor, N. V. Mushnikov, J.-G. Park, A. A. Yermakov // Journal of Physics: Condensed Matter. – 2005. – V. 17. – №. 21. – P. 3445.
2. Magnetic structures and magnetic phase transitions in Ho₃Co / A. Podlesnyak, A. Daoud-Aladine, O. Zaharko, P. Markin, N. Baranov // Journal of magnetism and magnetic materials. – 2004. – V. 272. – С. 565-567.
3. Magnetic and Electrical Properties of R₇Rh₃ (R = Gd, Tb, Dy, Ho, Er and Y) / T. Tsutaoka, Y. Nakamori, T. Tokunaga, Y. Itoh // Journal of the Physical Society of Japan. – 2001. – V. 70. – №. 1. – P. 199-202.
4. Magnetic order, phase transitions and electrical resistivity of Ho₇Rh₃ single crystals / T. Tsutaoka, K. Obata, A. A. Sherstobitov, E. G. Gerasimov, P. B. Terentev, N. V. Baranov // Journal of Alloys and Compounds. – 2016. – V. 654. – P. 126-132.
5. Magnetic and transport properties of Ho₇Rh₃ / T. Tsutaoka, Y. Nishiume, T. Tokunaga, Y. Nakamori, Y. Andoh, S. Kawano, G. Nakamoto, M. Kurisu // Physica B: Condensed Matter. – 2003. – V. 327. – №. 2-4. – P. 352-356.
6. A cluster- glass magnetic state in R₅Pd₂ (R = Ho, Tb) compounds evidenced by AC-susceptibility and neutron scattering measurements / A. F. Gubkin, E. A. Sherstobitova, P. B. Terentyev, A. Hoser, N. V. Baranov // Journal of Physics: Condensed Matter. – 2013. – V. 25. – №. 23. – P. 236003.
7. Paramanik, T., Resistivity minima in the disordered cluster glass intermetallic compound Dy₅Pd₂: influence of quantum interference effects / T. Paramanik, I. Das // RSC advances. – 2015. – V. 5. – №. 96. – P. 78406-78413.
8. Sharma, M. K. Complex magnetic behaviour and evidence of a superspin glass state in the binary intermetallic compound Er₅Pd₂ / M. K. Sharma, K. Yadav, K. Mukherjee // Journal of Physics: Condensed Matter. – 2018. – V. 30. – №. 21. – P. 215803.
9. Gignoux, D. Commensurability versus incommensurability in rare earth intermetallic compounds / D. Gignoux, D. Schmitt // Journal of magnetism and magnetic materials. – 1994. – V. 129. – №. 1. – P. 53-58.
10. Direct observation of spontaneous weak ferromagnetism in the superconductor ErNi₂B₂C / S. M. Choi, J. W. Lynn, D. Lopez et al. // Physical review letters. – 2001. – V. 87. – №. 10. – P. 107001.
11. Takahashi, Specific heat of a regenerator material Er₃Ni / A. Takahashi, Y. Tokai, M. S. Hashimoto // Japanese journal of applied physics. – 1994. – V. 33. – №. 2R. – P. 1023.
12. New magnetic material R₃T system with extremely large heat capacities used as heat regenerators / M. Sahashi, Y. Tokai, T. Kuriyama, H. Nakagome, R. Li, M. Ogawa, T. Hashimoto // Advances in Cryogenic Engineering. – Springer, Boston, MA, 1990. – V. 31. – P. 1175-1182.

Отпечатано на Ризографе ИФМ УрО РАН тир. 100 зак. № 58

Объем 1 печ. л. Формат 60x84 1/16

620108, г. Екатеринбург, ул. С. Ковалевской, 18