

УТВЕРЖДАЮ

Директор Федерального государственного

бюджетного учреждения науки

«Институт физики высоких давлений

им. Л.Ф. Верещагина Российской академии наук»

академик РАН

Бражкин В.В.

«6» ноября 2019 г.



## ОТЗЫВ

ведущей организации на диссертационную работу Хорошилова Артема Леонидовича «Особенности магнитотранспорта и теплоемкости каркасных стекол  $\text{Ho}_x\text{Lu}_{1-x}\text{B}_{12}$ », представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 – физика конденсированного состояния.

### Актуальность темы диссертационной работы

Исследование характеристик зарядового транспорта в сильнокоррелированных электронных системах (СКЭС) является перспективным для создания новых магнитных материалов с уникальными свойствами и для дальнейшего развития фундаментальных представлений о физических механизмах целого ряда наблюдающихся в них явлений. В частности, эффект колоссального отрицательного магнетосопротивления был найден в различных системах с магнитными d- и f- ионами, таких как манганиты и гексабориды. В ряде работ наличие в данных соединениях колоссального магнетосопротивления и сложной магнитной фазовой диаграммы связывается с формированием различных типов пространственных неоднородностей: развитием структурной и электронной неустойчивости, фазовым расслоением, возникновением магнитных кластеров, волн спиновой и зарядовой плотности и другими. В диссертационной работе А.Л. Хорошилова на примере твердых растворов замещения  $\text{Ho}_x\text{Lu}_{1-x}\text{B}_{12}$  рассмотрено влияние таких неоднородностей на анизотропию магнетосопротивления (МС) в антиферромагнитной и неупорядоченной фазах, в широком диапазоне температур и при различных конфигурациях магнитного поля. Особенности кристаллической структуры соединений  $\text{RB}_{12}$ , сочетающей в себе свойства жесткого ковалентного борного каркаса и разупорядоченной подрешетки редкоземельных ионов, дают возможность исследовать влияние структурной и электронной неустойчивости на свойства электронной и магнитной подсистемы в относительно простой модельной системе. В то же время, постепенное замещение немагнитных ионов лютеция ионами гольмия с частично заполненной 4f оболочкой позволяет наблюдать влияние магнитного

упорядочения на картину анизотропии рассеяния носителей заряда. Таким образом, тема диссертационной работы представляется актуальной, а выбор объектов и методики исследования оправданным.

## **Общая характеристика работы**

Диссертация состоит из введения, литературного обзора, пяти глав, заключения, списка работ автора по теме диссертации и списка цитируемой литературы. Полный объем диссертационной работы составляет 166 страниц, включая 67 рисунков и 1 таблицу, список цитируемой литературы содержит 202 наименования.

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертации, сформулирована цель и аргументирована научная новизна исследований, представлены выносимые на защиту научные положения, описана структура диссертации.

**В первой главе** представлен литературный обзор основных свойств наиболее известных СКЭС с электронной и структурной неустойчивостью – мanganитов, высокотемпературных сверхпроводящих купратов и ферропниктидов, некоторых моделей магнетосопротивления и результатов их применения для описания свойств СКЭС, а также свойств редкоземельных додекаборидов  $RB_{12}$ . В частности, в последнем параграфе рассматриваются особенности кристаллической структуры редкоземельных додекаборидов  $RB_{12}$ , обусловленные переходом в состояние «каркасного стекла» при азотных температурах, их влияние на физические характеристики исходных модельных систем  $LuB_{12}$  и  $HoB_{12}$ .

**Вторая глава** содержит описание методики роста монокристаллов  $Ho_xLu_{1-x}B_{12}$  и подготовки образцов к экспериментам, описание экспериментальных установок, использовавшихся в работе для исследований теплоемкости, намагниченности и гальваномагнитных измерений.

**В третьей главе** представлены результаты измерений теплоемкости твердых растворов замещения  $Ho_xLu_{1-x}B_{12}$  с концентрацией примесей голмия  $0.01 \leq x \leq 1$  во внешнем магнитном поле до 90 кЭ и намагниченности для составов с  $x \geq 0.5$  в полях до 50 кЭ. В данной главе также показаны зависимости разности теплоемкости для различных направлений магнитного поля в пределе малой концентрации голмия ( $x \approx 0.01$ ), построены магнитные фазовые диаграммы  $Ho_xLu_{1-x}B_{12}$  для трех главных кристаллографических направлений магнитного поля при  $x \geq 0.5$ . Найдено, что в парамагнитной фазе  $Ho_{0.01}Lu_{0.99}B_{12}$  зависимость теплоемкости от направления магнитного поля достигает 20%. Для данного состава также показано, что в полях выше 20 кЭ экспериментальные данные теплоемкости хорошо согласуются с расчетными кривыми, полученными в рамках модели

кристаллического электрического поля кубической симметрии для невзаимодействующих моментов.

**В четвертой главе** обсуждаются результаты измерений удельного сопротивления и поперечного магнетосопротивления  $\text{Ho}_x\text{Lu}_{1-x}\text{B}_{12}$  на постоянном токе  $I \parallel [1\bar{1}0]$  для направления внешнего магнитного поля  $H \parallel [001]$  в парамагнитной и антиферромагнитной фазах. В рамках данной главы проведена процедура разделения вкладов в магнетосопротивление, обсуждаются механизмы рассеяния носителей заряда, отвечающие данным вкладам. Согласно данной процедуре, МС в парамагнитной фазе определяется суммой положительного квадратичного вклада и отрицательного вклада, пропорционального функции Ланжевена. На основе анализа микроскопических параметров данных вкладов сообщается, что при температурах  $T_N < T < 15$  К в системе образуются магнитные кластеры, причем эффективный магнитный момент кластеров гольмия растет с увеличением температуры в диапазоне 2.7 - 8.7  $\mu\text{B}$  и падает с повышением концентрации. Такое поведение связывается с антиферромагнитным характером обмена внутри кластеров. В то же время, в антиферромагнитной фазе МС задается положительным линейным и отрицательным квадратичным вкладами.

**Пятая глава** посвящена детальному изучению анизотропии удельного сопротивления и поперечного магнетосопротивления  $\text{Ho}_x\text{Lu}_{1-x}\text{B}_{12}$  для направления тока  $I \parallel [1\bar{1}0]$  при различной ориентации вектора внешнего магнитного поля  $H$  относительно главных кристаллографических направлений, а также исследованию анизотропии вкладов и выяснению роли механизмов рассеяния носителей заряда, обсуждавшихся в четвертой главе. В данной главе продемонстрирована сильная анизотропия угловых зависимостей магнетосопротивления (до 50%) в парамагнитной фазе  $\text{Ho}_x\text{Lu}_{1-x}\text{B}_{12}$ , построены диаграммы рассеяния носителей заряда в неупорядоченной фазе и фазовые диаграммы МС в антиферромагнитной фазе. Установлено, что для всех составов при направлении поля  $H \parallel [001]$  наблюдается максимум МС. Аналогичная область максимальных значений МС также обнаруживается при  $H \parallel [001]$  на фазовых диаграммах МС в антиферромагнитной фазе. На основе процедуры разделения вкладов, проведенной для различных направлений поля  $H$ , а также выявленного скейлинга кривых МС установлено, что квадратичный положительной вклад в МС полностью определяет характер анизотропии в  $\text{Ho}_x\text{Lu}_{1-x}\text{B}_{12}$  в парамагнитной фазе, в то время как отрицательный вклад является практически изотропным. Также найдена величина анизотропии дрейфовой подвижности носителей заряда, изменяющаяся в диапазоне 1.5-3.9 с ростом концентрации гольмия. Квадратичный по полю вклад положительного МС в парамагнитной фазе интерпретируется как результат рассеяния

носителей заряда на динамических зарядовых страйпах, формирующихся в  $\text{Ho}_x\text{Lu}_{1-x}\text{B}_{12}$  в интервале температур ниже перехода в состояние каркасного стекла ( $T < T^* = 60$  К) вдоль направления [110] вследствие кооперативного динамического эффекта Яна-Теллера в борной подрешетке. При этом отрицательный вклад связывается с рассеянием носителей заряда на моментах кластеров ионов  $\text{Ho}^{3+}$ . В рамках данной интерпретации линейный положительный вклад в антиферромагнитной фазе  $\text{Ho}_x\text{Lu}_{1-x}\text{B}_{12}$  определяется рассеянием носителей заряда на волне спиновой плотности, сформированной из многочастичных спин-поляризованных 5d-состояний зоны проводимости, тогда как квадратичный отрицательный вклад определяется рассеянием носителей на локальных 4f-5d спиновых флуктуациях в окрестности ионов гольмия.

В заключении кратко изложены результаты диссертационной работы. Выводы диссертации обоснованы и не вызывают возражений. Сформулированы пять основных положений, выносимых на защиту.

### **Достоверность и полнота результатов**

Достоверность диссертационной работы подтверждается высоким качеством использовавшихся для измерений монокристаллических образцов, надежностью и точностью использовавшегося в работе экспериментального оборудования, а также сравнительным анализом полученных в работе оригинальных результатов с представленными в научной литературе данными в области, где такое сравнение возможно. Сформулированные в работе выводы были апробированы на 8 международных и 4 российских научных конференциях. Обоснованность выводов и полнота изложения материалов диссертации обеспечена публикацией 39 работ, включая 7 статей в журналах из списка ВАК и 32 тезисов докладов на российских и международных конференциях.

### **Научная новизна исследований**

1. Впервые обнаружена сильная (до 50%) анизотропия магнетосопротивления в парамагнитной фазе каркасных стекол  $\text{Ho}_x\text{Lu}_{1-x}\text{B}_{12}$  ( $0.01 \leq x \leq 1$ ).
2. Впервые в рамках предложенной процедуры разделения вкладов в МС показано, что отрицательный вклад в МС в неупорядоченной ПМ фазе  $\text{Ho}_x\text{Lu}_{1-x}\text{B}_{12}$  ( $0.01 \leq x \leq 1$ ) является изотропным, а эффект анизотропии МС определяется положительным вкладом.
3. Впервые построены угловые Н-ф диаграммы рассеяния носителей заряда в парамагнитной и антиферромагнитной фазах  $\text{Ho}_x\text{Lu}_{1-x}\text{B}_{12}$  ( $0.5 \leq x \leq 1$ ), обнаружено, что магнитная фазовая Н-ф диаграмма АФ фазы имеет форму малтийского креста, выделены магнитоупорядоченные фазы в АФ-состоянии, установлены соответствующие им фазовые

границы. Предложена интерпретация полученных результатов, основывающаяся на представлении о перенормировке РККИ-обмена в присутствии динамических зарядовых страйпов.

4. Впервые в результате проведенной процедуры разделения вкладов в МС показано, что эффект анизотропии в АФ-фазе  $\text{Ho}_x\text{Lu}_{1-x}\text{B}_{12}$  ( $0.5 \leq x \leq 1$ ), в основном, определяется уменьшением почти в 3 раза коэффициента линейного положительного вклада в МС с ростом внешнего магнитного поля.
5. Впервые обнаружена значительная зависимость теплоемкости от направления магнитного поля (до 20%) в сильных полях в каркасных стеклах  $\text{Ho}_x\text{Lu}_{1-x}\text{B}_{12}$  ( $x \approx 0.01$ ).

К важнейшим результатам диссертационной работы А.Л. Хорошилова можно отнести выявление эмпирических закономерностей рассеяния носителей заряда на системе магнитных кластеров с антиферромагнитным обменом в низкотемпературной области парамагнитной фазы в  $\text{Ho}_x\text{Lu}_{1-x}\text{B}_{12}$ , а также параметров анизотропии рассеяния носителей заряда на динамических зарядовых страйпах в парамагнитной и антиферромагнитной фазах  $\text{Ho}_x\text{Lu}_{1-x}\text{B}_{12}$ .

### **Научная и практическая значимость работы**

Полученные в диссертационной работе результаты обладают несомненной научной новизной и способствуют выяснению механизмов, лежащих в основе эффекта КМС в окрестности магнитного фазового перехода антиферромагнетик-парамагнетик, а также дальнейшему развитию фундаментальных представлений о природе сильных электронных корреляций, определяющих аномалии физических свойств и особенности формирования сложного магнитного основного состояния соединений с тяжелыми фермионами.

Полученные в работе результаты могут быть рекомендованы к использованию в ФИ РАН, ИФМ РАН, МИСиС, МИРЭА, МГУ.

### **Замечания по работе**

По диссертационной работе А.Л. Хорошилова могут быть сделаны следующие замечания:

1. В работе не приводится подробное исследование намагниченности  $\text{Ho}_x\text{Lu}_{1-x}\text{B}_{12}$ , а приведенные данные намагниченности используются только для построения фазовой диаграммы.

2. Использованная модель теплоемкости применяется для аппроксимации экспериментальных кривых теплоемкости лишь при концентрации гольмия  $x = 0.01$ , хотя в работе присутствуют данные и для больших концентраций.
3. Результаты исследования анизотропии магнетосопротивления приводятся для фиксированного токового направления, данные для других главных кристаллографических направлений отсутствуют, хотя картины рассеяния носителей для них могут существенно отличаться.
4. Представляется неудачным используемый в диссертации термин «анизотропия теплоемкости». Теплоемкость – термодинамическая величина, которая всегда изотропна, а в диссертации речь идет о зависимости этой величины от направления и величины внешнего магнитного поля.

### **Заключение**

Несмотря на сделанные замечания, диссертационная работа А.Л. Хорошилова заслуживает высокой положительной оценки. Диссертация представляет собой цельное экспериментальное исследование, рассмотренные в работе вопросы имеют в настоящее время большое значение для физики сильно коррелированных электронных систем.

Диссертация соответствует паспорту специальности 01.04.07. – «Физика конденсированного состояния» и полностью отвечает требованиям ВАК РФ, предъявляемым к кандидатским диссертациям, и п. 9 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. №842. Диссертант А.Л. Хорошилов заслуживает присуждения степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 – физика конденсированного состояния.

Научный доклад А.Л. Хорошилова по диссертационной работе «Особенности магнитотранспорта и теплоемкости каркасных стекол  $\text{Ho}_x\text{Lu}_{1-x}\text{B}_{12}$ » заслушан и обсужден на заседании общенинститутского семинара Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Институт физики высоких давлений им. Л.Ф. Верещагина Российской академии наук» (заседание от 1 июля 2019 года).

Заместитель директора по науке Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Институт физики высоких давлений им. Л.Ф. Верещагина Российской академии наук»,

д.ф.-м.н.



В.Н. Рыжов

## **Сведения о ведущей организации**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт физики высоких давлений им. Л.Ф. Верещагина Российской академии наук»

Почтовый адрес: 108840, г.Москва, г.Троицк, Калужское шоссе, стр. 14

Телефон: 8 (495)-851-05-82

Адрес электронной почты организации: hpp@hppi.troitsk.ru

Адрес официального сайта организации: <http://www.hppi.troitsk.ru/>

Ученый секретарь ИФВД РАН,  
к.ф-м.н.

Т.В. Валянская

