

на правах рукописи

УДК 537.311.31

Богач Алексей Викторович

**МАГНИТНЫЕ И ТРАНСПОРТНЫЕ СВОЙСТВА СОЕДИНЕНИЙ
С ТЯЖЕЛЫМИ ФЕРМИОНАМИ CeV_6 И $\text{Ce}(\text{Al},\text{M})_2$ ($\text{M} - \text{Co}, \text{Ni}$).**

01.04.07 – физика конденсированного состояния

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва 2006

Работа выполнена в Институте общей физики им.А.М.Прохорова
Российской Академии Наук

Научный руководитель:

кандидат физико-математических наук,
доцент Н. Е. Случанко

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук,
Бражкин Вадим Вениаминович
кандидат физико-математических наук,
Арсеев Петр Иварович

Ведущая организация:

Московский государственный институт стали и сплавов
(Технический Университет)

Защита состоится 27 декабря 2006 г. в 18 час. 00 мин. на заседании
Специализированного Совета К 212.156.01
при Московском физико-техническом институте по адресу:
117393, г. Москва, ул. Профсоюзная, 84/32.

Отзывы направлять по адресу:

141700, Московская обл., г. Долгопрудный, Институтский пер. 9, МФТИ.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МФТИ.

Автореферат разослан «__» ноября 2006 г.

Ученый секретарь

Специализированного Совета К 212.156.01

кандидат технических наук

Н. П. Чубинский

I. Общая характеристика работы

Актуальность темы. Одним из перспективных направлений исследований в области физики конденсированного состояния вещества и физического материаловедения является изучение свойств соединений на основе редкоземельных (РЗ) элементов. Интерес к РЗ соединениям обусловлен, в частности, особенностями их энергетического спектра, в котором близкими по энергии оказываются состояния зоны проводимости *s-p-d*-типа и локализованные *4f*-орбитали РЗ иона, и, в результате, становятся возможными переходы между различными зарядовыми и спиновыми конфигурациями. Такие переходы приводят к частичной делокализации *4f*-состояний, вследствие чего среднее число *4f*-электронов на центр (валентность иона) становится нецелочисленным. Кроме того, быстрые флуктуации электронной плотности происходят между магнитными и немагнитными состояниями РЗ ионов, и, таким образом, свойства подобных объектов оказываются зависящими от быстрых спиновых флуктуаций. Указанные флуктуации зарядовой и спиновой плотности в РЗ соединениях оказываются причиной перенормировки плотности электронных состояний на уровне Ферми, возникновения тяжелых носителей заряда (тяжелых фермионов), и, как следствие, появления низкотемпературных аномалий термодинамических и транспортных характеристик этих объектов. Среди особенностей физических свойств РЗ соединений отмечается необычный для металлических систем значительный рост с понижением температуры коэффициента Холла, резкое уменьшение удельного сопротивления в магнитном поле и др., и, в ряде случаев, формирование сложного магнитного основного состояния. В последнее десятилетие наибольший интерес исследователей в данной области был связан также с обнаружением режима “нефермижидкостного поведения” в окрестности квантовой критической точки. Таким образом, несмотря на полувековую историю, вопрос об учете эффектов сильных электронных корреляций, определяющих аномалии физических характеристик и формирование необычного основного магнитного/немагнитного состояния в этих соединениях вплоть до настоящего времени остается открытым.

Среди наиболее ярких, ставших классическими, примеров веществ с сильными электронными корреляциями, характеризующихся, в тоже время, сравнительно простой кубической структурой следует отметить соединения $CeAl_2$ и CeB_6 . В этих металлах реализуется сложное магнитоупорядоченное состояние, которое, вплоть до настоящего

времени, является предметом активных дискуссий. Дополнительным фактором, позволяющим отнести гексаборид церия к числу модельных объектов среди соединений с сильными электронными корреляциями, является равенство значений концентрации магнитных Ce- центров n_{df} и электронов проводимости n_e .

Цель работы. Для выяснения природы необычного низкотемпературного магнетизма соединений с сильными электронными корреляциями CeB_6 и $CeAl_2$ и описания их магнитных свойств представляет интерес проведение прецизионных измерений магнитных характеристик при низких и промежуточных температурах, отвечающих парамагнитной и магнитоупорядоченным фазам в этих системах. Поскольку несомненно важным является установление взаимосвязи между аномалиями магнитных и транспортных характеристик исследуемых соединений с сильными электронными корреляциями, в число задач настоящей работы включены прецизионные измерения эффекта Холла и магнитосопротивления CeB_6 и $CeAl_2$, а также сопоставление результатов с предсказаниями существующих теоретических моделей. С целью изучения влияния беспорядка замещения на формирование и перестройку магнитного основного состояния $CeAl_2$ в работе исследовались твердые растворы замещения $Ce(Al_{1-x}M_x)_2$ (M – Co, Ni, $x < 0.1$).

Таким образом, в работе представлено комплексное исследование магнитных и транспортных свойств соединений с тяжелыми фермионами CeB_6 и $CeAl_2$, а также твердых растворов замещения $Ce(Al_{1-x}M_x)_2$ (M – Co, Ni, $x < 0.1$) в широком диапазоне температур 1.8 – 300 К в магнитных полях до 70 кЭ.

Научная новизна работы.

1. Проведен комплексный анализ гальваномагнитных (коэффициент Холла, магнитосопротивление) и магнитных свойств соединений с тяжелыми фермионами $CeAl_2$ и CeB_6 .

2. Выполненные в работе на оригинальной установке детальные измерения угловых зависимостей коэффициента Холла соединения с тяжелыми фермионами $CeAl_2$ позволили разделить и классифицировать вклады в аномальный эффект Холла $R_H(H, T)$. В интервале температур $T < 10$ К обнаружено появление “четной по магнитному полю” аномальной магнитной составляющей холловского сопротивления, связанное с особенностями формирования многочастичных состояний, в том числе, с возникновением ферромагнитных

областей наноразмера и реализацией сложной магнитной фазовой H - T диаграммы в $CeAl_2$ при низких температурах.

3. Установлен сложный активационный характер изменения с температурой основной аномальной компоненты $R_H^a(T)$ в коэффициенте Холла $CeAl_2$, не согласующийся с предсказаниями моделей асимметричного рассеяния носителей заряда. Выполнены оценки параметров (эффективные массы, радиус локализации), характеризующих многочастичные спин-поляронные состояния, возникающие в матрице $CeAl_2$ при низких и промежуточных температурах.

4. В работе на основании данных транспортных и магнитных измерений проведен анализ влияния беспорядка замещения в твердых растворах $Ce(Al_{1-x}M_x)_2$ ($M - Co, Ni, x \leq 0.08$) на энергию связи многочастичных состояний при низких и промежуточных температурах. Впервые обнаружен рост коэффициента Холла в указанных интерметаллидах примерно в 20 раз при понижении температуры в интервале 2 – 300 К.

5. Полученные в работе результаты прецизионных измерений магнитосопротивления $Dr/r = f(H, T)$ и намагниченности для магнитного соединения с тяжелыми фермионами $CeAl_2$ и твердых растворов замещения $Ce(Al_{1-x}M_x)_2$ ($x = 0.05, M - Co, Ni$) в интервале 1.8 – 30 К в магнитном поле до 70 кЭ позволили выполнить детальный количественный анализ с разделением вкладов в магнитосопротивление. Показано, что наряду с основной “бриллюэновской” $-Dr/r \sim H^2$ компонентой отрицательного знака, необходимо учитывать также линейную $Dr/r \approx A(T)H$ и магнитную $Dr/r|_{mag}(H, T)$ составляющие в Dr/r , связанные с особенностями спин-флуктуационного режима и формирования магнитоупорядоченного состояния в магнетиках на основе Се. Представлены аргументы в пользу интерпретации эффекта магнитосопротивления в интерметаллидах на основе церия в рамках модели Йосиды [1].

6. Выполнены прецизионные измерения транспортных (сопротивление, коэффициент Холла) и магнитных характеристик гексаборида церия в интервале температур 1.8 - 300 К в магнитных полях до 70 кЭ на монокристаллических образцах CeB_6 высокого качества. В парамагнитной фазе CeB_6 найдено степенное поведение магнитной восприимчивости вида $\chi(T) \sim T^{-\beta}$, где $\beta \approx 0.8$, отвечающее паулиевскому вкладу многочастичных состояний, перенормируемых с понижением температуры вследствие корреляционных эффектов. Обнаружено, что с уменьшением температуры ниже азотной ($T^* \sim 80$ К) наблюдается переход к асимптотике слабой локализации удельного сопротивления $r_m(T) \sim T^{-\alpha}$, где $\alpha \approx 0.4$.

7. В интервале $3.3 \text{ К} \leq T \leq 7 \text{ К}$ обнаружено скоррелированное активационное поведение коэффициента Холла и магнитной восприимчивости гексаборида церия вида $c_p(T) \sim R_H(T) \sim \exp(E_{sp}/k_B T)$ с энергией активации $E_{sp}/k_B \approx 3.3 \text{ К} \approx T_Q$, отвечающее возникновению в матрице CeB_6 ферромагнитных областей наноразмера ($\sim 5 \text{ \AA}$). Предложен подход к интерпретации свойств CeB_6 , связывающий формирование магнитоупорядоченной фазы при $T_Q \approx 3.3 \text{ К}$ с образованием состояния с волной спиновой плотности (ВСП).

Практическая ценность результатов работы. Полученные в диссертационной работе результаты способствуют дальнейшему развитию представлений о природе эффектов сильных электронных корреляций, и механизмах определяющих возникновение аномалий физических свойств и особенности формирования сложного основного магнитного состояния соединений с тяжелыми фермионами. Кроме того, представляется целесообразным практическое применение результатов исследования при разработке и создании новых магниторезистивных датчиков.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались на XLIV, XLV, XLVI Научных конференциях МФТИ (ГУ) (Москва, 2001, 2002, 2003), The European Conference on Physics of Magnetism'02 (Познань, Польша, 2002), International Conference on Strongly Correlated Electron Systems (Краков, Польша, 2002), The 23rd International Conference on Low Temperature Physics (Хиросима, Япония, 2002), 33- и 34- Совещаниях по физике низких температур (Екатеринбург, 2003; Сочи, 2006), The International Conference on Strongly Correlated Electron Systems (SCES'04, SCES'05) (Карлсруэ, Германия, 2004; Вена, Австрия, 2005), Семинарах «Сильно коррелированные электронные системы и квантовые критические явления», ИФВД РАН (Троицк, 2004, 2005, 2006), Moscow International Symposium on Magnetism (Москва, 2002, 2005), International Symposium on Boron, Borides and Related Compounds (ISSB'05) (Гамбург, Германия, 2005).

Публикации. По результатам диссертации опубликовано 40 печатных работ, включая 15 статей и 25 тезисов докладов.

Объём и структура диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, основных выводов, заключения и списка цитируемой литературы из 126 наименований. Общий объем работы составляет 161 страницу, включая 49 иллюстраций и 1 таблицу.

II. Содержание работы.

Во введении обосновывается актуальность темы диссертационной работы, изложены основные цели и задачи исследования, а также перечислены основные положения, определяющие научную новизну диссертационной работы.

Первая глава представляет собой литературный обзор, в начале которого кратко рассматриваются особенности зонной структуры интерметаллидов на основе РЗ элементов. Такие соединения характеризуются гибридизацией s , p , d -состояний зоны проводимости и локализованных f -орбиталей РЗ элемента. Особенностью зонных спектров является узкий многочастичный резонанс в плотности состояний в окрестности E_F , который возникает, например, вследствие Кондо-компенсации локализованных магнитных моментов (ЛММ) в интерметаллидах на основе РЗ элементов. Указано также, что основным механизмом взаимодействия ЛММ РЗ ионов является косвенный обмен через электроны проводимости (РККИ-механизм).

Далее в литературном обзоре представлены известные к настоящему времени экспериментальные данные, полученные при исследованиях интерметаллидов $CeAl_2$ и CeB_6 , а также перечислены существующие теоретические подходы к описанию аномального коэффициента Холла и отрицательного магнитосопротивления, наблюдающегося в этих соединениях. Отмечается, что, несмотря на продолжительную историю исследований, магнитная структура и характер магнитных взаимодействий в парамагнитной и магнитоупорядоченных фазах $CeAl_2$ и CeB_6 вплоть до настоящего времени являются предметом активных дискуссий.

Вторая глава посвящена описанию экспериментальных установок и методик используемых в работе, а также особенностей синтеза, подготовке к экспериментам и аттестации образцов. В частности, описаны методы синтеза поликристаллических образцов

$Ce(Al_{1-x}M_x)_2$ ($0 \leq x \leq 0.08$, $M = Co, Ni$) (плавление в дуговой печи в атмосфере очищенного гелия) и монокристаллов CeB_6 (вертикальное бестигельное индукционное зонное плавление).

Описанию оригинальных автоматизированных установок для измерений гальваномагнитных характеристик и магнитных свойств во второй главе посвящены второй и третий параграфы соответственно. Измерения угловых зависимостей холловского сопротивления проводились стандартным четырехконтактным методом с пошаговым вращением образца в магнитном поле до 70 кЭ, в температурном диапазоне 1.8 – 300 К. Для обеспечения высокой точности измерений напряжений с образца использовались нановольтметры фирмы Keithley (США) модели 2182. Для стабилизации и регулирования температуры измерительной ячейки при гальваномагнитных и магнитных измерениях применялся быстродействующий температурный контроллер оригинальной конструкции с термометром сопротивления CERNOX 1050, что позволило обеспечить стабилизацию температуры с точностью ~ 0.01 К во всем используемом в работе диапазоне. Используемая в работе установка для измерения магнитных свойств в температурном диапазоне 1.8 – 300 К, в магнитных полях до 50 кЭ, представляла собой модифицированный вибрационный магнитометр LDJ-1500 (США). Основные изменения в LDJ-1500 сводились к замене приемных катушек, а также использованию усилителя с синхронным детектором Stanford Research SR830 (США), что позволило значительно повысить точность магнитных измерений.

Третья глава посвящена исследованию эффекта Холла в соединении с тяжелыми фермионами $CeAl_2$. В первом параграфе представлены полученные на поликристаллических образцах $CeAl_2$ температурные зависимости удельного сопротивления и магнитной восприимчивости. Кривая удельного сопротивления $r(T)$ характеризуется низкотемпературным максимумом вблизи $T_{max}^r \gg 5.5$ К, который подавляется в магнитных полях до 70 кЭ и смещается вверх по шкале температур. Излом на температурной зависимости $r(T)$ при $T = T_N \gg 3.8$ К отвечает переходу в сложное антиферромагнитное (АФ) состояние в $CeAl_2$. Температурная зависимость магнитной восприимчивости $\chi(T)$ характеризуется двумя участками кюри-вейссовского роста с параметрами $m_{eff1} \gg 2.5 m_B$ и $\Theta_{p1} \gg -32 \pm 2$ К при промежуточных температурах 25 - 300 К и $m_{eff2} \gg 1.7 m_B$ и $\Theta_{p2} \gg -4 \pm 0.3$ К в низкотемпературной области 4 - 25 К.

Далее представлены результаты измерений угловых зависимостей холловского сопротивления $r_H(j, H_0, T_0)$ соединения $CeAl_2$. Обнаружено, что как в магнитоупорядоченной фазе, так и в широкой окрестности фазовой границы в парамагнитном состоянии к основной компоненте холловского сопротивления вида $r_H(j) \sim \cos j$ добавляется вклад четных гармоник. В третьем параграфе предложен анализ результатов измерений угловых зависимостей холловского сопротивления интерметаллида $CeAl_2$, использующий соотношение

$$r_H(j, T_0, H_0) = r_{H0} + r_{H1} \sin(j - j_{01}) + r_{H2} \sin 2(j - j_{02}) \quad (1),$$

которое учитывает, наряду с основной, нечетной по магнитному полю составляющей r_{H1} и постоянным смещением r_{H0} , также вклад второй гармоники r_{H2} в холловский сигнал.

При анализе экспериментальных данных в рамках соотношения (1) обнаружено, что в магнитном поле $H < 30$ кЭ появление аномального магнитного вклада R_H^{am} в коэффициент Холла $CeAl_2$, соответствующего вкладу четной гармоники $r_{H2} \sin 2(j - j_{02})$ в (1), отвечает переходу в АФ состояние при температуре $T_N \approx 3.85$ К. С ростом величины H возникновение аномального магнитного вклада R_H^{am} регистрируется также и при температурах $T > T_N$, причем в поле $H \approx 60$ кЭ присутствие указанной компоненты наблюдается вплоть до температур $T \approx 8-10$ К. В работе найдено существенно немонотонное поведение составляющей $R_H^{am}(H)$ в области температур $T < T_N$, отвечающей магнитоупорядоченной фазе в $CeAl_2$, причем полевая зависимость $R_H^{am}(H)$ проходит через максимум вблизи $H_{max} \approx 15$ кЭ. При этом амплитуда вклада R_H^{am} оказывается сравнимой с амплитудой основного, нечетного по полю (член $r_{H1} \sin(j - j_{01})$ в (1)) вклада R_H^a в коэффициент Холла $CeAl_2$. В тоже время, анализ данных в рамках соотношения (1) позволил зарегистрировать резкое изменение фазового сдвига $D(j_{01} - j_{02}) \approx 60^\circ$ между основной и четной гармониками холловского сигнала в АФ фазе $CeAl_2$ в окрестности $H^* \approx 35$ кЭ. Поведение составляющей R_H^{am} связывается с особенностями сложной магнитной фазовой $H-T$ диаграммы и возникновением ферромагнитных областей наноразмера в $CeAl_2$ при низких температурах.

Полученный в рамках предложенной в работе процедуры разделения вкладов основной вклад в коэффициент Холла $CeAl_2$ оказывается положительным и заметно возрастает с понижением температуры, достигая максимальных значений при $T_{sf} = T_K \approx 5$ К. Выполненные измерения в сильных магнитных полях до 80 кЭ показывают, что амплитуда максимума $R_H^a(T)$ существенно подавляется с ростом H , причем указанная особенность на кривых $R_H^a(T)$ смещается вверх по шкале температур. Представленный на рис.1 анализ

полученных данных в координатах $(\ln(R_H^a) - R_H^{LaAl_2}) = f(1/T)$ позволил обнаружить сложную активационную зависимость аномального вклада R_H^a в коэффициент Холла $CeAl_2$. Так, в интервалах температур 50-300К (I) и 10-40К (II) с понижением температуры наблюдается аномальный активационный рост (рис. 1)

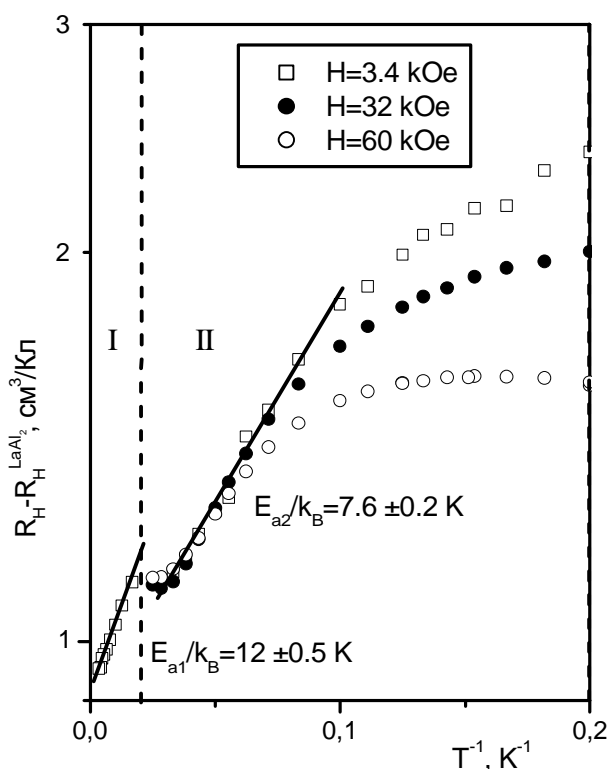
$$R_H^a(T) \sim \exp(E_{a1,2}/k_B T) \quad (2)$$

с энергиями активации $E_{a1}/k_B \approx 12 \pm 0.5$ К и $E_{a2}/k_B \approx 7.6 \pm 0.2$ К соответственно. Отметим, что приведенные значения E_{a1} и E_{a2} получены при учете в качестве составляющей в R_H^a $CeAl_2$ величины коэффициента Холла немагнитного аналога $LaAl_2$.

Столь необычное для металлической системы поведение коэффициента Холла $R_H^a(T)$, как отмечалось выше, не только не укладывается в рамки представлений модели Кондо-решетки, но также и не находит простого объяснения в модели асимметричного рассеяния носителей заряда [2,3], в основе которых лежит учет в качестве преобладающего фактора резонансного рассеяния с переворотом спина электронов проводимости на ЛММ редкоземельных ионов.

Для интерпретации обнаруженных аномалий низкотемпературного транспорта в соединении $CeAl_2$ в работе предлагается подход, основанный на формировании спин-поляронных состояний вследствие быстрых спиновых флуктуаций в непосредственной

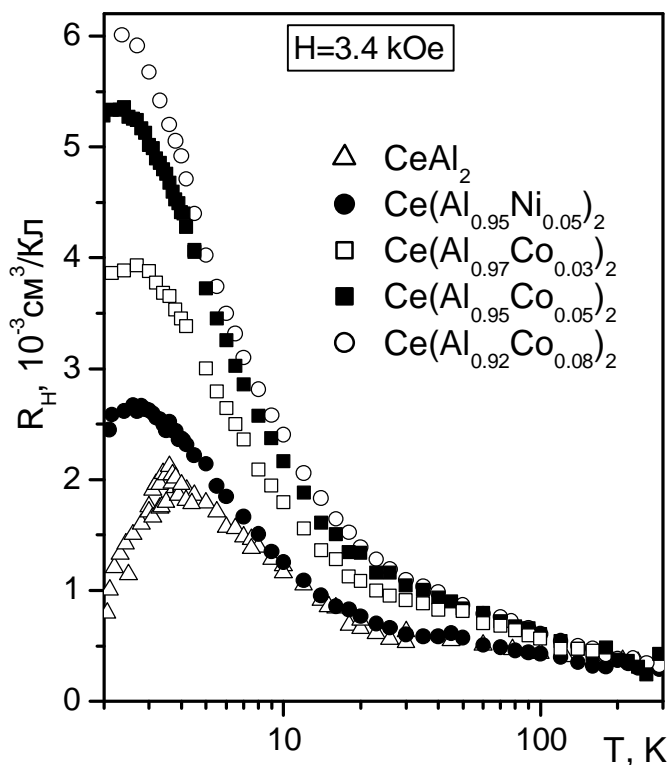
Рис. 1. Зависимости коэффициента Холла $R_H - R_H(LaAl_2)$ (см. текст) от температуры в соединении $CeAl_2$, представленные в обратных логарифмических координатах для различных значений напряженности магнитного поля.



окрестности ЛММ церия в матрице $CeAl_2$. При этом энергии активации $E_{a1,2}$ являются характеристиками спин-поляронных комплексов, образованных в окрестности Ce-центров. В заключении главы в рамках указанного подхода приводятся оценки радиуса локализации $a_{p1,2}^*$ и эффективной массы $m_{1,2}^*$ многочастичных состояний с энергиями связи $E_{a1}/k_B \approx 12$ К (50-300 К) и $E_{a2}/k_B \approx 7.6$ К (10-40 К) (рис. 1), которые оказываются равными: $m_1^*(60\text{К}) \approx 90 m_0$, $a_{p1}^* = 6.4 \text{ \AA}$ и $m_2^*(5\text{К}) \approx 57 m_0$, $a_{p2}^* = 10 \text{ \AA}$ для соответствующих диапазонов температур.

Четвертая глава посвящена исследованию транспортных и магнитных свойств твердых растворов замещения $Ce(Al_{1-x}M_x)_2$ (M – Co, Ni, $x < 0.1$). В первом параграфе представлены полученные на поликристаллических образцах $Ce(Al_{1-x}M_x)_2$ (M – Co, Ni, $x \leq 0.08$) температурные зависимости удельного сопротивления $\rho(T)$ и коэффициента Холла $R_H(T)$. Обнаружено, что увеличение концентрации примеси x приводит к подавлению дальнего магнитного порядка, формирующегося в $CeAl_2$ при низких температурах, а также к значительному росту амплитуды максимума $R_H(T)$ (приблизительно в 3 раза для $Ce(Al_{0.92}Co_{0.08})_2$ относительно $CeAl_2$, см. рис. 2). Таким образом, в работе найдено, что для твердого раствора замещения с металлическим типом проводимости $Ce(Al_{0.92}Co_{0.08})_2$ значение коэффициента Холла возрастает примерно в 20 раз при понижении температуры в интервале

Рис. 2. Температурные зависимости коэффициента Холла $R_H(T)$ в твердых растворах замещения $Ce(Al_{1-x}M_x)_2$.



2 – 300 К (рис. 2). На основе проведенного анализа концентрационных зависимостей коэффициента Холла $R_H(x)$, удельного сопротивления $\rho(x)$ и параметра $\mu_H(x) = R_H(x)/\rho(x)$ в работе высказывается предположение о возникновении режима “нефермижидкостного поведения”, обусловленного прохождением квантовой критической точки при концентрации $\text{Co } x \approx 2 \text{ at. \%}$ в ряду $\text{Ce}(\text{Al}_{1-x}\text{Co}_x)_2$.

Исследование данных коэффициента Холла $R_H(T)$ в активационных координатах $\ln(R_H - R_{LaAl_2}) = f(1/T)$ показало, что для всех измеренных растворов замещения $\text{Ce}(\text{Al}_{1-x}\text{M}_x)_2$ ($M - \text{Ni}, \text{Co}; x \leq 0.08$) в интервалах температур 50 - 300 К и 10 - 40 К наблюдается активационный рост $R_H(T)$ (1), причем энергии активации изменяются в пределах $E_{a1}/k_B \approx 12 \div 40 \text{ К}$ и $E_{a2}/k_B \approx 6.5 \div 9 \text{ К}$. Следует подчеркнуть, что при изменении x значительный рост амплитуды аномального эффекта Холла (см. рис. 2) оказывается связанным с существенным возрастанием энергии связи многочастичных состояний, формирующихся в окрестности Се-центров при промежуточных температурах (от $E_{a1}/k_B(\text{CeAl}_2) \approx 12 \text{ К}$ до $E_{a1}/k_B(\text{Ce}(\text{Al}_{0.92}\text{Co}_{0.08})_2) \approx 40 \text{ К}$). На основе полученных данных в рамках предложенного в третьей главе спин-поляронного подхода приводится оценка радиуса локализации тяжелых фермионов, который для всех исследуемых в работе соединений ряда $\text{Ce}(\text{Al}_{1-x}\text{M}_x)_2$ ($M - \text{Ni}, \text{Co}, x \leq 0.08$) принимает значения $a_p^* \leq 10 \text{ \AA}$.

Далее в четвертой главе представлены результаты проведенных в работе измерений температурных зависимостей магнитной восприимчивости $\chi(T)$ твердых растворов замещения $\text{Ce}(\text{Al}_{1-x}\text{M}_x)_2$ ($M - \text{Ni}, \text{Co}, x \leq 0.08$) в диапазоне 4.2 – 300 К и полевых зависимостей $M(H)$ намагниченности соединения CeAl_2 при низких температурах в магнитном поле до 60 кЭ. Показано, что увеличение концентрации примеси в диапазоне $0 \leq x \leq 0.08$ не приводит к сколь либо заметному изменению параметров кюри-вейссовской зависимости восприимчивости $\chi(T)$, найденной в работе для исходного состава CeAl_2 . Высокая точность измерений намагниченности позволила продифференцировать кривые $M(H)$ и перейти к анализу поведения полевых зависимостей дифференциальной магнитной восприимчивости $c(H, T_0) = dM(H, T_0)/dH$, представленных на рис. 3а. Особенности, обнаруженные на кривых $c(H, T_0)$ при низких температурах $T \leq T_N \approx 3.85 \text{ К}$ (широкий максимум при $H \geq 30 \text{ кЭ}$, особенность в виде “ступеньки” при $H^* \approx 12 \text{ кЭ}$), связываются с переходом в АФ состояние ($T \approx T_N(H)$), а также с магнитными ориентационными переходами в сложном магнитоупорядоченном состоянии соединения CeAl_2 .

В работе также выполнены исследования магнитосопротивления соединений с тяжелыми фермионами $Ce(Al_{1-x}M_x)_2$ (M – Ni, Co, $x = 0$ и 0.05) в интервале температур 1.8 - 25 К. Обнаружено, что в магнитных полях до 70 кЭ эффект отрицательного магнитосопротивления $Dr/r(H)$ достигает величины $\sim 65\%$ в соединении $CeAl_2$ и уменьшается до значений $\sim 20\%$ при замещении Al на кобальт и никель в ряду $Ce(Al_{1-x}M_x)_2$ с $x = 0.05$. Кроме того, в интервале $H < 20$ кЭ на полевых зависимостях $Dr(H, T_0)/r_0$ наблюдается максимум положительного магнитосопротивления для соединений $CeAl_2$ при $T^* \leq 3.3$ К и $Ce(Al_{0.95}Co_{0.05})_2$ при $T^* \leq 8.5$ К. На основе детального количественного анализа экспериментальных данных Dr/r в работе проводится разделение вкладов в магнитосопротивление исследуемых интерметаллидов. Показано, что наряду с основной “бриллюэновской” $-Dr/r \sim H^2$ компонентой отрицательного знака, необходимо учитывать также линейную $Dr/r \approx A(T)H$ и магнитную $Dr/r|_{mag}(H, T)$ составляющие в Dr/r , связанные с особенностями спин-флуктуационного режима и формирования магнитоупорядоченного состояния в магнетиках на основе Се. Для анализа поведения магнитосопротивления используется модель, предложенная Иосидой в [1], где на основании расчетов в рамках s - d обменной модели было получено соотношение:

$$-Dr/r = 0.61 \dot{a} M \hbar^2 / S^2 = b M_{loc}^2 \quad (3)$$

В малых магнитных полях с учетом нескольких аддитивных составляющих в локальной намагниченности M_{loc} выражение (3) может быть переписано в виде

$$-Dr/r = b(M_{loc} + m_{loc})^2 \gg b c_{loc}^2 H^2 + 2b c_{loc} m_{loc} H + b m_{loc}^2 \quad (4),$$

Дополнительное слагаемое m_{loc} в (4) отвечает появлению малой ферромагнитной добавки к намагниченности от магнитных областей наноразмера, возникающей при температурах $T < T^*$. При этом исследованное в четвертой главе поведение линейного и магнитного вкладов, отвечающих, соответственно, второму и третьему слагаемым в правой части (4), связывается с перестройкой магнитной структуры, обусловленной образованием ферромагнитных нанодоменов ($5d$ - зонный магнетизм), возникающих в матрице соединений с тяжелыми фермионами $Ce(Al_{1-x}M_x)_2$ наряду с ЛММ $4f$ - оболочек ионов Се. Отметим, что проведенный в работе анализ амплитуд найденных вкладов подтверждает обоснованность использования соотношений (3-4) для описания эффекта магнитосопротивления в исследуемых соединениях с тяжелыми фермионами.

Поскольку величина магнитосопротивления в интерметаллидах $Ce(Al_{1-x}M_x)_2$ ($x = 0$ и 0.05, M = Co, Ni) определяется, в основном, квадратичным (“бриллюэновским” по

терминологии [1]) членом в Dr/r , далее в работе приводится анализ этого вклада в магнитосопротивление систем $Ce(Al_{1-x}M_x)_2$. На рис. 3б представлены полевые зависимости локальной магнитной восприимчивости $\chi_{loc}(H,T) \equiv (1/H(d(Dr/r)/dH))^{1/2}$, полученной непосредственно из “бриллюэновского” вклада в магнитосопротивление $CeAl_2$. Схожее поведение объемной $\chi(H,T_0)$ (рис. 3а) и локальной $\chi_{loc}(H,T_0)$ (рис. 3б) восприимчивости свидетельствует в пользу применимости модели Иосиды [1] к описанию зарядового транспорта в исследуемых системах с сильными электронными корреляциями. Отметим, что поскольку из локальной намагниченности $CeAl_2$ в рамках соотношения (4) был выделен вклад m_{loc} , на кривых $\chi_{loc}(H,T_0)$ отсутствует особенность, наблюдаемая в $\chi(H,T_0)$ в области малых полей $H \leq H^* \approx 12$ кЭ, отвечающая намагничиванию ферромагнитных областей наноразмера в $CeAl_2$.

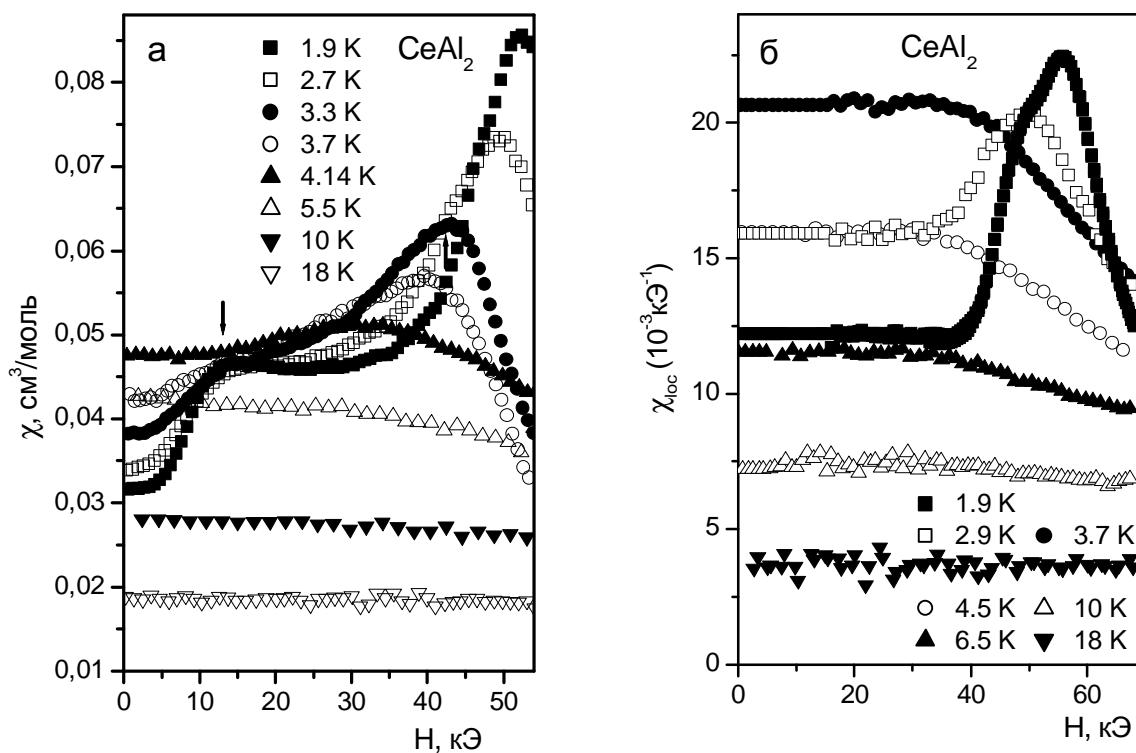


Рис. 3. Полевые зависимости (а) объемной $\chi(H,T_0)$ и (б) локальной $\chi_{loc}(H,T_0)$ магнитной восприимчивости (см. текст) соединения $CeAl_2$ для значений температуры в интервале 1.9 - 18 К.

Пятая глава посвящена комплексному исследованию транспортных и магнитных свойств соединения CeB_6 , считающегося классическим примером концентрированной кондо-системы с практически равными значениями концентрации магнитных Се- центров n_{df} и электронов проводимости n_e [4]. В начале главы приводятся полученные на монокристаллических образцах CeB_6 результаты исследования температурных зависимостей удельного сопротивления $r(T)$ и магнитной восприимчивости $c(T)$ в интервале температур 2 – 300 К. Обнаружено, что вопреки предсказаниям модели Кондо ($r(T) \sim \ln(T)$), изменение с температурой удельного сопротивления описывается асимптотикой $r(T) \sim T^{-0.39}$, отвечающей режиму слабой локализации носителей заряда. Аналогично в работе найдено, что поведение магнитной восприимчивости $c(T)$ в CeB_6 не может быть описано кюри-вейссовской зависимостью, причем в интервале температур 15 – 300 К, отвечающем парамагнитной фазе CeB_6 , вместо закона Кюри-Вейсса наблюдается зависимость вида $c(T) \sim T^{-0.8}$. Показано, что при анализе полученных в работе экспериментальных данных $c(T)$ совместно с результатами магнитных измерений авторов [5], диапазон применимости степенной зависимости $c(T) \sim T^{-0.8}$ для CeB_6 может быть расширен до 1000 К.

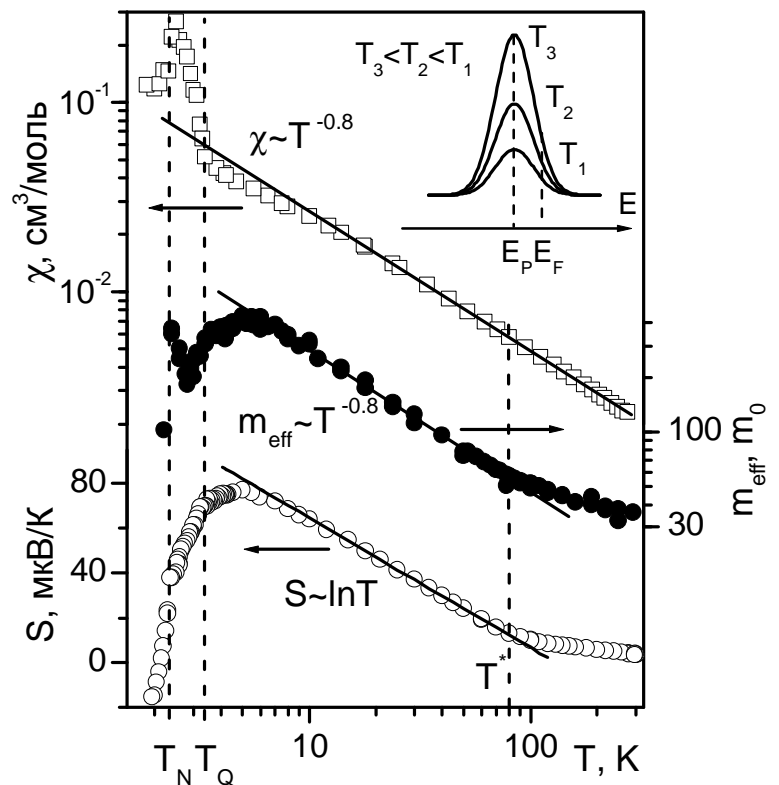
Далее в работе исследуется поведение намагниченности $M(H)$ и магнитосопротивления Dr/r CeB_6 в диапазоне температур 1.8 – 24 К в магнитных полях до 70 кЭ. Обнаружено, что при гелиевых температурах в используемом в работе диапазоне магнитного поля эффект отрицательного магнитосопротивления достигает величины ~95%. В рамках развитого в четвертой главе на основе модели Йосиды [1] подхода к описанию магнитосопротивления, (см. также соотношения (3-4)), полученные для CeB_6 результаты позволяют перейти к анализу поведения параметра $c_{loc}(H, T) = (1/H(d(Dr/r)/dH))^{1/2}$ и выполнить сопоставление с данными измерений дифференциальной магнитной восприимчивости $c(H, T) = dM(H, T_0)/dH$. Сравнение семейства кривых $c(H, T_0)$ и $c_{loc}(H, T_0)$, в том числе, сопоставление аномалий, соответствующих переходам в магнитном поле в антиферроквадрупольную (АФК) фазу из парамагнитного состояния (особенность в виде “ступеньки” при $T = T_0 > T_Q \approx 3.3$ К) и из АФ фазы (узкий пик при $T = T_0 < T_N \approx 2.3$ К), позволили установить целый ряд особенностей магнитной фазовой Н-Т диаграммы CeB_6 .

Представленные в пятой главе результаты исследований угловых зависимостей холловского сопротивления $r_H(j)$ гексаборида церия приводят к заключению, что в АФК фазе наблюдается значительный вклад в $r_H(j)$ от четных гармоник ($r_{H2}(j)$ в (1)). Кроме того, в АФ фазе на кривых $r_H(j)$ появляются протяженные участки $r_H(j) = \text{const}$ с резкими

(шириной менее 5°) переходами между ними, отвечающими ориентации магнитного поля \mathbf{H} вдоль диагоналей граней в ОЦК кристаллической структуре CeB_6 . Анализ основной составляющей в коэффициенте Холла $R_H(T)$ CeB_6 , выделенной в рамках соотношения (1), показал, что, вопреки предсказаниям моделей асимметричного рассеяния [2,3], $R_H(T)$ оказывается отрицательного знака и практически не зависит от температуры в диапазоне 5 – 300 К. Аналогично не находит объяснения в рамках моделей [2,3] обнаруженное в работе заметное (~ 3 раза) уменьшение с температурой холловской подвижности $\mu_H(T) = R_H(T)/r(T)$. С понижением температуры в интервале $T < 7$ К коэффициент Холла $R_H(T)$, оставаясь отрицательным, резко возрастает по абсолютной величине, достигая максимальных значений вблизи $T \sim 3$ К. Возникновение на угловых зависимостях $\rho_H(\varphi)$ вклада четных гармоник и отмеченный выше переход к зависимости типа меандра в АФ фазе CeB_6 , сопровождается заметным уменьшением абсолютных значений основного вклада в коэффициент Холла $R_H(T)$.

Проведенное в заключительном параграфе пятой главы сопоставление температурных зависимостей магнитной восприимчивости $\chi(T)$ и эффективной массы носителей заряда $m_{eff}(T)$, полученной из транспортных измерений (см. рис. 4), приводит к выводу о скоррелированном поведении указанных параметров $m_{eff}(T) \sim \chi(T) \sim T^{-0.8}$, что свидетельствует

Рис. 4. Температурные зависимости магнитной восприимчивости $\chi(T)$, эффективной массы $m_{eff}(T)$ и коэффициента термоэдс $S(T)$ (по данным [7]). На вставке схематически представлена перестройка плотности электронных состояний при возникновении многочастичного резонанса при E_P в окрестности энергии Ферми E_F . T_Q и T_N – температуры магнитных переходов, T^* – температура смены режима рассеяния носителей заряда (см. текст).



в пользу зонной природы парамагнитного отклика (паулиевский парамагнетизм) в CeB_6 . В такой ситуации, воспользовавшись выражением для паулиевской магнитной восприимчивости вида

$$c_p(T) = \frac{1}{2} g^2 m_B^2 N(E_F) \approx \frac{1}{4} g^2 m_B^2 \frac{m_{\text{eff}}^* k_F}{p^2 \hbar^2} \quad (5)$$

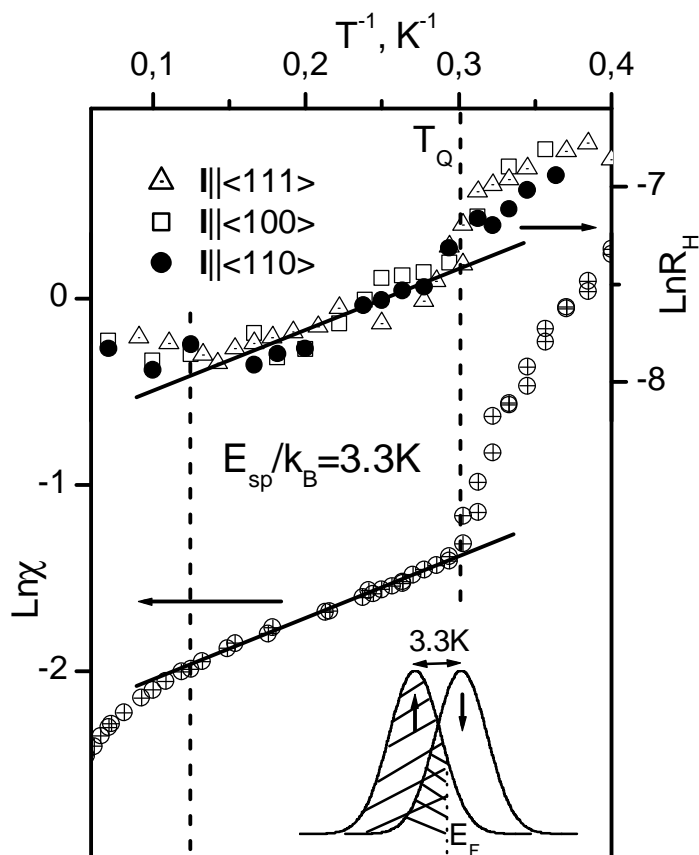
(см., например, [6]; $N(E_F)$ - плотность электронных состояний, k_F - фермиевский импульс, \hbar - постоянная Планка), изменение параметра $c_p(T)$ в парамагнитной фазе следует связать с перенормировкой плотности электронных состояний на уровне Ферми E_F . Причем выполненный в [7] детальный анализ поведения коэффициента термоэдс $S(T)$ в парамагнитной фазе CeB_6 приводит к выводу о расположении возникающего при понижении температуры резонанса в плотности состояний $N(E_p)$ при E_p несколько ниже уровня Ферми E_F : $E_p < E_F$ (см. вставку на рис. 4).

Также в заключительном параграфе приводится детальный анализ полученных в работе экспериментальных результатов, характеризующих поведение транспортных и магнитных свойств CeB_6 в парамагнитной фазе в непосредственной окрестности магнитного перехода при $T_Q \approx 3.3$ К. На рис. 5 температурные зависимости магнитной восприимчивости $c(T)$ и коэффициента Холла $R_H(T)$ представлены в интервале $T < 10$ К обратных логарифмических координатах. В работе обнаружено, что возрастание магнитной восприимчивости $c_p(T)$ и коэффициента Холла $R_H(T)$ в парамагнитной фазе с понижением температуры в интервале $T_Q \approx 3.3$ К \div 7 К оказывается скоррелированным между собой и с хорошей точностью описывается соотношением вида

$$c_p(T) \sim R_H(T) \sim \exp(E_{sp}/k_B T) \quad (6),$$

определяющим активационное поведение указанных параметров с энергией $E_{sp}/k_B \approx 3.3$ К \approx T_Q . В связи с этим, отметим результаты исследований рассеяния поляризованных нейтронов в CeB_6 [8]. Обнаруженный в [8] рост амплитуды интенсивности рассеяния поляризованных нейтронов, по мнению авторов отвечает возникновению заметной спиновой поляризации в $5d$ -полосе CeB_6 уже в парамагнитной фазе при $T_Q \leq T \leq 7$ К. В рамках используемого подхода, найденному в [8] формированию в парамагнитной фазе областей спиновой поляризации в окрестности Се-центров в $5d$ -полосе CeB_6 может быть сопоставлена характерная энергия связи образующихся спин-поляронных состояний $E_{sp}/k_B \approx 3.3$ К. С учетом найденных для CeB_6 в интервале 3.3 \div 7 К значений параметров $E_{sp}/k_B \approx 3.3$ К и $m_{\text{eff}}^* \sim 400$ К (рис. 4-5), в работе выполнена оценка радиуса локализации многочастичных состояний $a_{sp}^* \approx 5.4$ Å.

Рис. 5. Температурные зависимости магнитной восприимчивости $\chi(T)$ и коэффициента Холла $R_H(T)$ в обратных логарифмических координатах, измеренные для ориентации векторов \mathbf{I} и \mathbf{H} вдоль различных кристаллографических направлений в интервале температур $T < 10$ К. На вставке схематически показано спиновое расщепление резонанса вблизи E_F .



Таким образом, на основании полученных экспериментальных результатов и выполненных оценок в пятой главе показано, что вместо общепринятой интерпретации в терминах антиферроквадрупольной фазы в CeV_6 наиболее вероятным сценарием является возникновение состояния типа волны спиновой плотности (ВСП) из сформированных в парамагнитной фазе тяжелых фермионов- наноразмерных областей спиновой поляризации носителей заряда.

III. Основные выводы

1. Выполненные в работе детальные измерения эффекта Холла в соединении с тяжелыми фермионами CeAl_2 позволили разделить и классифицировать вклады в аномальный эффект Холла $R_H(H, T)$. В интервале температур $T < 10$ К обнаружено появление “четной по магнитному полю” аномальной магнитной составляющей холловского сопротивления,

связанное с особенностями формирования многочастичных состояний, в том числе, с возникновением ферромагнитных областей наноразмера и реализацией сложной магнитной фазовой H - T диаграммы в $CeAl_2$. Установлен сложный активационный характер изменения с температурой основной аномальной компоненты $R_H^a(T)$ в $CeAl_2$, не согласующийся с предсказаниями моделей асимметричного рассеяния носителей заряда. Выполнены оценки параметров (эффективные массы, радиус локализации), характеризующих многочастичные спин-поляронные состояния, возникающие в матрице $CeAl_2$ при низких и промежуточных температурах. В работе на основании данных транспортных и магнитных измерений проведен анализ влияния беспорядка замещения в твердых растворах $Ce(Al_{1-x}M_x)_2$ (M – Co, Ni, $x \leq 0.08$) на энергию связи многочастичных состояний. Впервые обнаружен рост коэффициента Холла в указанных интерметаллидах примерно в 20 раз при понижении температуры в интервале 2 – 300 К.

2. Полученные в работе результаты прецизионных измерений магнитосопротивления $Dr/r = f(H, T)$ и намагниченности для магнитного соединения с тяжелыми фермионами $CeAl_2$ и твердых растворов замещения $Ce(Al_{1-x}M_x)_2$ ($x = 0.05$, M – Co, Ni) в интервале 1.8 – 30 К в магнитном поле до 70 кЭ позволяют выполнить детальный количественный анализ с разделением вкладов в магнитосопротивление. Показано, что наряду с основной “бриллюэновской” $-Dr/r \sim H^2$ компонентой отрицательного знака, необходимо учитывать также линейную $Dr/r \approx A(T)H$ и магнитную $Dr/r|_{mag}(H, T)$ составляющие в Dr/r , связанные с особенностями спин-флуктуационного режима и формирования магнитоупорядоченного состояния в магнетиках на основе Ce. Представлены аргументы в пользу интерпретации эффекта магнитосопротивления в интерметаллидах на основе церия в рамках модели Иосиды.

3. Выполнены прецизионные измерения транспортных (сопротивление, коэффициент Холла) и магнитных характеристик гексаборида церия в интервале температур 1.8 - 300 К в магнитных полях до 70 кЭ на монокристаллических образцах CeB_6 высокого качества. В парамагнитной фазе CeB_6 найдено степенное поведение магнитной восприимчивости вида $\chi(T) \sim T^{-\beta}$, где $\beta \approx 0.8$, отвечающее паулиевскому вкладу многочастичных состояний, перенормируемых с понижением температуры в условиях сильного электрон-электронного взаимодействия. Обнаружено, что с уменьшением температуры ниже азотной ($T^* \sim 80$ К) наблюдается переход к асимптотике слабой локализации удельного сопротивления $r_m(T) \sim T^{-\alpha}$, где $\alpha \approx 0.4$. В интервале $3.3 \text{ К} \leq T \leq 7 \text{ К}$ обнаружено скоррелированное активационное

поведение коэффициента Холла и магнитной восприимчивости вида $c_p(T) \sim R_H(T) \sim \exp(E_{sp}/k_B T)$ с энергией активации $E_{sp}/k_B \approx 3.3 \text{ К} \approx T_Q$, отвечающее возникновению в матрице CeB_6 ферромагнитных областей наноразмера ($\sim 5 \text{ \AA}$). Предложен подход к интерпретации свойств CeB_6 , связывающий формирование магнитоупорядоченной фазы при $T \leq T_Q \approx 3.3 \text{ К}$ с образованием состояния с волной спиновой плотности (ВСП).

Список публикаций по теме диссертации.

1. Н.Е.Случанко, А.В.Богач, В.В.Глушков, С.В.Демишев, Н.А.Самарин, Г.С.Бурханов, О.Д.Чистяков, Низкотемпературные аномалии коэффициента Холла в магнитной Кондо-решетке $CeAl_2$. // Письма в ЖЭТФ, том 76, вып. 1, с. 31-34, 2002.
2. Н.Е.Случанко, А.В.Богач, И.Б.Воскобойников, В.В.Глушков, С.В.Демишев, Н.А.Самарин, Г.С.Бурханов, О.Д.Чистяков, Микроволновое магнитопоглощение в магнитной Кондо-решетке $CeAl_2$ при низких температурах. // Физика Твердого Тела, том 45, вып. 6, с. 1046-1051, 2003.
3. N.E.Sluchanko, A.V.Bogach, V.V.Glushkov, S.V.Demishev, Hall Effect and skew scattering in magnetic Kondo-lattice $CeAl_2$. // Acta Physica Polonica B, vol. 34, No 2, pp. 1093-1096, 2003.
4. N.E.Sluchanko, A.V.Bogach, V.V.Glushkov, S.V.Demishev, G.S.Burkhanov, O.D.Chystyakov, «Low Temperature transport anomalies in magnetic Kondo-lattice $CeAl_2$. // Journal of Magnetism and magnetic materials, vol. 258-259, pp. 225-227, 2003.
5. A.V.Bogach, N.E.Sluchanko, V.V.Glushkov, S.V.Demishev, H.Ohta, G.S.Burkhanov, O.D.Chystyakov, Hall effect anomalies in Kondo-lattice $CeAl_2$. // Physica B, vol. 329-333, pp. 541-542, 2003.
6. Н.Е.Случанко, А.В.Богач, В.В.Глушков, С.В.Демишев, М.И.Игнатов, Н.А.Самарин, Г.С.Бурханов, О.Д.Чистяков, Генезис аномального эффекта Холла в соединении $CeAl_2$. // ЖЭТФ, том 125, № 4, стр. 906-926, 2004.
7. N.E.Sluchanko, A.V.Bogach, G.S.Burkhanov, O.D.Chystyakov, V.V.Glushkov, S.V.Demishev, N.A.Samarin, D.N.Sluchanko, Magnetoresistance of Ce-based heavy fermion systems. // Physica B: Condensed Matter, vol. 308, pp. 359-361, 2005.
8. M.I.Ignatov, A.V.Bogach, V.V.Glushkov, S.V.Demishev, G.S.Burkhanov, O.D.Chystyakov, N.A.Samarin, N.E.Sluchanko, Crossover in charge transport of CeM_2 . // Physica B: Condensed Matter, vol. 363, pp. 252-254, 2005.

9. S.V.Demishev, A.V.Semeno, A.V.Bogach, Yu.B.Paderno, N.Yu.Shitsevalova, N.E.Sluchanko, Antiferro-quadrupole resonance in CeB₆. // Physica B: Condensed Matter, vol. 378, pp. 602-603, 2006.
10. M.I.Ignatov, A.V.Bogach, V.V.Glushkov, S.V.Demishev, Yu.B.Paderno, N.Yu.Shitsevalova, N.E.Sluchanko, The regimes of charge transport in CeB₆. // Physica B: Condensed Matter, vol. 378, pp. 780-781, 2006.
11. A.V.Bogach, G.S.Burkhanov, O.D.Chystyakov, V.V.Glushkov, S.V.Demishev, N.A.Samarin, Yu.B.Paderno, N.Yu.Shitsevalova, N.E.Sluchanko, Bulk and local magnetization in CeAl₂ and CeB₆. // Physica B: Condensed Matter, vol. 378, pp. 769-770, 2006.
12. A.V. Bogach, V.V.Glushkov, S.V.Demishev, N.A. Samarin, Yu. B. Paderno, A.V. Dukhnenko, N.Yu. Shitsevalova, N.E. Sluchanko, Magnetoresistance and magnetization anomalies in CeB₆. // Journal of Solid State Chemistry, vol. 179, pp. 2819-2822, 2006.
13. M.I.Ignatov, A.V.Bogach, S.V.Demishev, V.V.Glushkov, N.A.Samarin, A.V.Levchenko, Yu.B.Paderno, N.Yu.Shitsevalova, N.E.Sluchanko, Anomalous charge transport in CeB₆. // Journal of Solid State Chemistry, vol. 179, pp. 2805-2808, 2006.
14. S.V.Demishev, A.V.Semeno, A.V.Bogach, Yu.B.Paderno, N.Yu.Shitsevalova and N.E.Sluchanko, Magnetic resonance in cerium hexaboride caused by quadrupolar ordering. // Journal of Magnetism and Magnetic Materials, vol. 300, pp. e534-e537, 2006.
15. A.V.Bogach, G.S.Burkhanov, O.D.Chistyakov, V.V.Glushkov, S.V.Demishev, N.A.Samarin, Yu.B.Paderno, N.Yu.Shitsevalova and N.E.Sluchanko, Bulk and local magnetic susceptibility in CeAl₂ and CeB₆. // Journal of Magnetism and Magnetic Materials, vol. 300, pp. e1-e3, 2006
16. A.В.Богач, В.Глушков, С.В.Демишев, Н.Е.Случанко, Гальваномагнитные характеристики соединений со структурой фаз Лавеса на основе церия (CeM₂). // XLIV Научная конференция Московского Физико-Технического Института (Государственного Университета), тезисы докладов, часть VIII, 23-30 ноября, 2001, Москва, стр.43
17. A.В.Богач, В.Глушков, С.В.Демишев, Н.Е.Случанко, Низкотемпературные аномалии транспортных характеристик в магнитной Кондо-решетке CeAl₂. // XLV Научная конференция Московского Физико-Технического Института (Государственного Университета), труды конференции, часть VIII,, 29-30 ноября, 2002, Москва, стр.30-32
18. М.И.Игнатов, A.В.Богач, В.В.Глушков, С.В.Демишев, М.В.Кондрин, Н.Е.Случанко, Термоэдс в соединениях с быстрыми зарядовыми и спиновыми флуктуациями. // XLV Научная конференция Московского Физико-Технического Института (Государственного Университета), труды конференции, часть VIII,, 29-30 ноября, 2002, Москва, стр.33-35

19. N.E.Sluchanko, A.V.Bogach, V.V.Glushkov, S.V.Demishev, G.S.Burkhanov, O.D.Chistyakov, Anomalous Hall effect in magnetic Kondo-lattice $CeAl_2$. // Abstracts of The European Conference on Physics of Magnetism'02, July 1-5, 2002, Poznań, Poland, p.46
20. N.E.Sluchanko, A.V.Bogach, V.V.Glushkov, S.V.Demishev, G.S.Burkhanov, O.D.Chistyakov, Hall effect and skew scattering in magnetic Kondo-lattice $CeAl_2$. // International Conference on Strongly Correlated Electron Systems, Book of Abstracts, July 10-13, 2002, Cracow, Poland, p.72
21. A.V.Bogach, N.E.Sluchanko, V.V.Glushkov, S.V.Demishev, G.S.Burkhanov, H.Ohta, Hall anomalies in magnetic Kondo-lattice $CeAl_2$. // The 23rd International Conference on Low Temperature Physics, Book of Abstracts, August 20-27, 2002, Hiroshima, Japan, p.324
22. N.E.Sluchanko, A.V.Bogach, V.V.Glushkov, S.V.Demishev, G.S.Burkhanov, O.D.Chistyakov, Low temperature transport anomalies in magnetic Kondo-lattice $CeAl_2$. // Abstracts of Moscow International Symposium on Magnetism, Moscow 2002, p.188
23. А.В.Богач, В.Глушков, С.В.Демишев, Н.Е.Случанко, Магнитосопротивление в соединении с тяжелыми фермионами $CeAl_2$. // XLVI Научная конференция Московского Физико-Технического Института (Государственного Университета), труды конференции, часть VIII, 28-29 ноября, 2003, Москва, стр.20-21
24. М.И.Игнатов, А.В.Богач, В.В.Глушков, С.В.Демишев, Н.Е.Случанко, Термоэдс интерметаллидов на основе церия со структурой фаз Лавеса CeM_2 . // XLVI Научная конференция Московского Физико-Технического Института (Государственного Университета), труды конференции, часть VIII, 28-29 ноября, 2003, Москва, стр.22-23
25. М.И.Игнатов, А.В.Богач, В.В.Глушков, С.В.Демишев, Н.Е.Случанко, Г.С.Бурханов, О.Д.Чистяков, Термоэдс соединений с флуктуациями электронной плотности CeM_2 . (M=Al, Co, Ni, Rh, Ru, Ir) // Тезисы докладов XXXIII Совещания по физике низких температур, 17-20 июня, 2003, часть QL, стр.323-324
26. А.В.Богач, В.В.Глушков, С.В.Демишев, Н.Е.Случанко, Г.С.Бурханов, О.Д.Чистяков, Аномальный эффект Холла в системе с тяжелыми фермионами $CeAl_2$. // Тезисы докладов XXXIII Совещания по физике низких температур, 17-20 июня, 2003, часть QL, стр.172-173
27. M.I.Ignatov, A.V.Bogach, V.V.Glushkov, S.V.Demishev, N.E.Sluchanko, G.S.Burkhanov, O.D.Chistyakov, Crossover in charge transport of CeM_2 . // Abstracts of The International Conference on Strongly Correlated Electron Systems (SCES'04), July 26-30, 2004, Karlsruhe, Germany, p.83

- 28.** A.V.Bogach, G.S.Burkhanov, O.D.Chistyakov, V.V.Glushkov, S.V.Demishev, M.I.Ignatov, N.E.Sluchanko, Heavy fermions in $Ce(Al_{1-x}Ni_x)_2$. // Abstracts of The International Conference on Strongly Correlated Electron Systems (SCES'04), July 26-30, 2004, Karlsruhe, Germany, p.92
- 29.** D.N.Sluchanko, A.V.Bogach, G.S.Burkhanov, O.D.Chistyakov, V.V.Glushkov, S.V.Demishev, N.E.Sluchanko, Magnetoresistance of heavy fermions systems. // Abstracts of The International Conference on Strongly Correlated Electron Systems (SCES'04), July 26-30, 2004, Karlsruhe, Germany, p.92
- 30.** A.V.Bogach, G.S.Burkhanov, O.D.Chistyakov, V.V.Glushkov, S.V.Demishev, N.A.Samarin, Yu.B.Paderno, N.Yu.SHitsevalova, N.E.Sluchanko, Bulk and local magnetic susceptibility in $CeAl_2$ and CeB_6 . // Abstracts of Moscow International Symposium on Magnetism, June 25-30, 2005, Moscow, p.532
- 31.** A.V.Bogach, V.V.Glushkov, S.V.Demishev, Yu.B.Paderno, N.Yu.SHitsevalova, N.E.Sluchanko, Bulk and local magnetisation in $CeAl_2$ and CeB_6 . // Abstracts of the International Conference on Strongly Correlated Electron Systems SCES'05, July 26-30, 2005, Vienna, p.231
- 32.** M.I.Ignatov, A.V.Bogach, V.V.Glushkov, S.V.Demishev, Yu.B.Paderno, N.Yu.Shitsevalova, N.E.Sluchanko, The regimes of charge transport in CeB_6 . // Abstracts of the International Conference on Strongly Correlated Electron Systems SCES'05, July 26-30, 2005, Vienna, p.235
- 33.** M.I.Ignatov, A.V.Bogach, S.V.Demishev, V.V.Glushkov, A.V.Levchenko, Yu.B.Paderno, N.Yu.Shitsevalova, N.E.Sluchanko, Anomalous charge transport in CeB_6 . // Abstracts of the International Symposium on Boron, Borides and Related Compounds ISSB'05, University of Hamburg, August 21-26, 2005, p.129
- 34.** A.V.Bogach, V.V.Glushkov, S.V.Demishev, Yu.B.Paderno, N.Yu.SHitsevalova, N.E.Sluchanko, Magnetoresistance and magnetization anomalies in CeB_6 . // Abstracts of the International Symposium on Boron, Borides and Related Compounds ISSB'05, University of Hamburg, August 21-26, 2005, p.126
- 35.** С.В.Демишев, А.В.Семено, А.В.Богач, Ю.Б.Падерно, Н.Ю.Шицевалова, Н.Е.Случанко, Новый магнитный резонанс в гексабориде церия, обусловленный орбитальным упорядочением. // Труды 34 совещания по физике низких температур, т.1, Ростов-на Дону, п.Лоо, 26-30 сентября 2006 г., с.17-18
- 36.** В.В.Глушков, А.В.Богач, К.В.Гоньков, С.В.Демишев, М.И.Игнатов, В.Ю.Иванов, А.В.Кузнецов, Н.А.Самарин, К.Флахбарт, Е.И.Хайруллин, О.А.Чуркин, Н.Ю.Шицевалова, Н.Е.Случанко, Особенности магнитных и транспортных свойств соединения с колоссальным

магнитосопротивлением EuB_6 . // Труды 34 совещания по физике низких температур, т.1, Ростов-на Дону, п.Лео, 26-30 сентября 2006 г., с.63-64

37. М.И.Игнатов, А.В.Богач, Г.С.Бурханов, В.В.Глушков, С.В.Демишев, Т.В.Ищенко, Н.Ю.Шицевалова, О.Д.Чистяков, Н.Е.Случанко, Аномалии термоэдс в соединениях с тяжелыми фермионами CeB_6 , CeAl_3 и $\text{CeCu}_{6-x}\text{Au}_x$ // Труды 34 совещания по физике низких температур, т.1, Ростов-на Дону, п.Лео, 26-30 сентября 2006 г., с.151-152

38. Н.Е.Случанко, А.В.Богач, В.В.Глушков, С.В.Демишев, Н.Ю.Шицевалова, В.Б.Филипов, Низкотемпературные аномалии транспортных и магнитных характеристик соединения с тяжелыми фермионами CeB_6 . // Труды 34 совещания по физике низких температур, т.1, Ростов-на Дону, п.Лео, 26-30 сентября 2006 г., с.159-160

39. А.В.Богач, В.В.Глушков, С.В.Демишев, Д.Н.Случанко, Н.Ю.Шицевалова, А.В.Левченко, Н.Е.Случанко, Низкотемпературные аномалии магнитных характеристик в соединениях с атомными кластерами RB_{12} (R - Ho, Er, Tm). // Труды 34 совещания по физике низких температур, т.1, Ростов-на Дону, п.Лео, 26-30 сентября 2006 г., с.161-162

40. А.В.Богач, Г.С.Бурханов, В.В.Глушков, С.В.Демишев, О.Д.Чистяков, Н.Е.Случанко, Эффект Холла в системе с тяжелыми фермионами $\text{Ce}(\text{Al}_{1-x}\text{Co}_x)_2$. // Труды 34 совещания по физике низких температур, т.1, Ростов-на Дону, п.Лео, 26-30 сентября 2006 г., с.163-164

Цитированная литература.

-
- [1] K.Yosida, Anomalous electrical resistivity and magnetoresistance due to an *s-d* interaction in Cu-Mn alloys // *Phys. Rev.*, v. 107, pp. 396-403 (1957).
- [2] P.Coleman, P.W.Anderson, T.V.Ramakrishnan, Theory of the anomalous Hall constant of mixed-valence systems // *Phys. Rev. Lett.*, v. 55, pp. 414-417 (1985).
- [3] A.Fert, P.M.Levy, Theory of the Hall effect in heavy-fermion compounds // *Phys. Rev. B*, v. 36, pp. 1907-1916 (1987).
- [4] C.Marcenat, D.Jaccard, J.Sierro, J.Flouquet, Y.Onuki, T.Komatsubara, Extended transport measurements on high-purity CeB₆ // *J. Low Temp. Phys.*, v. 78, pp. 261-285 (1990).
- [5] M.Kawakami, S.Kunii, T.Komatsubara, T.Kasuya, Magnetic properties of CeB₆ single crystal // *Sol.St.Comm.*, v. 36, pp. 435-439 (1980).
- [6] Р.Уайт, Квантовая теория магнетизма // М., Мир, 1985, с. 105.
- [7] Н.Е.Случанко, А.В.Богач, В.В.Глушков, С.В.Демишев, В.Ю.Иванов, М.И.Игнатов, А.В.Кузнецов, Н.А.Самарин, А.В.Семено, Н.Ю.Шицевалова, Усиление зонного магнетизма и особенности магнитоупорядоченного состояния в соединении CeB₆ с сильными электронными корреляциями // *ЖЭТФ*, т. 131, в. 1, в печати (2007).
- [8] V.Plakhty, L.P.Regnault, A.V.Goltsev, S.Gavrilov, F.Yakhov, J.Flouquet, C.Vettier, S.Kunii, Itinerant magnetism in the Kondo crystal CeB₆ as indicated by polarized neutron scattering // *Phys.Rev.B*, v. 71, p. 100407 (4 pages) (2005).