

На правах рукописи

Гильманов Марат Ирикович

ЭЛЕКТРОННЫЙ СПИНОВЫЙ РЕЗОНАНС В ГЕКСАБОРИДАХ
РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ RB_6 ($R = Gd, Ce, Sm$)

01.04.07 – физика конденсированного состояния

Автореферат диссертации на соискание ученой степени

кандидата физико-математических наук

Москва - 2019

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте общей физики им. А.М.Прохорова Российской Академии Наук

Научный руководитель

кандидат физико-математических наук, **Семенов Алексей Валерьевич**

Официальные оппоненты:

Николаев Александр Васильевич, доктор физико-математических наук, лаборатория физики наноструктур и радиационных эффектов Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова, ведущий научный сотрудник,

Веденеев Сергей Иванович, доктор физико-математических наук, лаборатория сверхпроводниковых структур Физического института академии наук им. Лебедева, высококвалифицированный главный научный сотрудник.

Ведущая организация

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Федеральный исследовательский центр «Казанский научный центр Российской академии наук»» (ФИЦ КазНЦ РАН)

Защита состоится 25 ноября 2019 года в 15 час. 00 мин. на заседании диссертационного совета Д 002.063.02 при ИОФ РАН по адресу:

г. Москва, ул. Вавилова, д. 38, корп. 1, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ИОФ РАН

<https://diss.gpi.ru/>

Автореферат разослан «_____» _____ 20____ года.

Ученый секретарь

Макаров Вячеслав Петрович

диссертационного совета

тел. +7(499)503-87-77,394

1. Общая характеристика работы

Актуальность темы.

Основные успехи в области изучения электронного спинового резонанса (ЭСР) в металлах были достигнуты в 50-80х годах 20го века. Интенсивные исследования, которые велись в этой области, позволили построить теоретические модели ЭСР в металлах, включить в рассмотрение обменные и сверхтонкие взаимодействия, определить роль взаимодействия локализованных магнитных моментов (ЛММ) с электронами проводимости и получать из экспериментальных данных достоверные значения параметров ЭСР, таких как времена релаксации и g -фактор [1].

Однако растущий интерес к сильно коррелированным электронным системам (СКС) различной природы ставит перед физикой ЭСР новые задачи, которые не укладываются в рамки сформировавшихся представлений и требуют развития как новых теоретических подходов, так и методов высокочастотных ЭСР измерений. Одна из таких задач связана с наблюдением магнитного резонанса в концентрированных Кондо-системах (ККС). Сильные спиновые флуктуации, характерные для этого класса соединений, должны приводить к большой ширине резонансной линии $\Delta H \sim k_B T_K / \mu_B$ (где T_K – температура Кондо, k_B – константа Больцмана и μ_B – магнетон Бора). В связи с этим, регистрация ЭСР в ККС считалась невозможной, вплоть до обнаружения магнитного резонанса в соединении YbRh_2Si_2 в 2003 году [2]. Данное наблюдение дало толчок исследованиям различных ККС методами ЭСР и стимулировало глубокий экспериментальный поиск, в результате которого было обнаружено и изучено резонансное поглощение в различных ККС (CeRuPO , YbIr_2Si_2) [3]. Последующие исследования магнитных резонансов в ККС позволили связать возможность наблюдения ЭСР с существованием ферромагнитных корреляций в исследуемых материалах и предложить соответствующие теоретические модели.

С точки зрения исследования эффектов сильных электронных корреляций, перспективными модельными объектами оказываются гексабориды редкоземельных (РЗ) элементов, так как для них характерно широкое разнообразие видов основных состояний, сочетающееся с простой кубической решеткой и жесткой каркасной структурой борной подсистемы, которая способствует хорошей замещаемости РЗ ионов. Исследования ЭСР в некоторых гексаборидах РЗ элементов имеют длительную историю, например, в соединениях EuB_6 и GdB_6 , где ионы Eu^{2+} и Gd^{3+} находятся в S-состоянии ($\mathbf{L} = 0$), интенсивная линия ЭСР наблюдается в парамагнитной фазе в широком диапазоне температур, вплоть до $T \sim 900$ К [4]. Следует отметить, что современный интерес к данным соединениям связан с изучением необычных магнитных состояний, реализующихся в этих объектах. Поэтому, несмотря на существующие многочисленные исследования ЭСР в соединениях на основе EuB_6 и GdB_6 , в этом направлении продолжается экспериментальная работа.

Гораздо меньше информации по ЭСР имеется для случая гексаборидов с ненулевым орбитальным моментом ($\mathbf{L} \neq 0$) РЗ иона. Во многом это обусловлено сильным взаимодействием f -электронов с электронами проводимости, и, соответственно, сильными спиновыми флуктуациями, препятствующими регистрации ЭСР. Однако в редких случаях наблюдение ЭСР оказывается возможным. Так, в 2005 году был открыт магнитный резонанс в сильно коррелированном антиферромагнитном металле CeB_6 [5], что стало настоящим вызовом современным представлениям о ключевой роли ферромагнитных корреляций для возможности экспериментального детектирования линий магнитного резонанса. Тем не менее, несмотря на существенный прогресс в этой области, достигнутый в ряде экспериментальных и теоретических работ, вопрос о природе ЭСР в CeB_6 нельзя считать выясненным окончательно.

Еще одним материалом группы RB_6 , для которого применение метода

ЭСР представляется перспективным, является гексаборид самария (SmB_6). Растущий интерес к этому соединению определяется огромным вниманием, которое в современной физике СКС приковано к изучению топологических изоляторов (ТИ) и к поиску новых топологических систем и классов материалов, в том числе топологических Кондо-изоляторов (ТКИ). Бурное развитие этой области во многом связано с обнаружением эффекта стабилизации майорановских состояний на интерфейсе сверхпроводник – ТИ. Использование майорановских состояний в свою очередь является одним из перспективных методов для реализации квантовых битов информации (кубитов) [6]. Тем не менее, до сих пор остается не ясным, удовлетворяют ли те немногие материалы, рассматриваемые как кандидаты в ТКИ (SmB_6 , YbB_{12}), критериям, позволяющим отнести их к данному классу соединений. В то же время, если для классических ТИ метод ЭСР оказался достаточно эффективным, то систематических магниторезонансных исследований ТКИ не предпринималось. В случае SmB_6 можно отметить лишь ранние экспериментальные работы, и наблюдения ЭСР в образцах гексаборида самария, легированных различными магнитными примесями.

Целью настоящей работы является исследование магнитного резонанса в гексаборидах редкоземельных элементов GdB_6 , CeB_6 и SmB_6 , направленное на изучение особенностей их основных состояний и магнитной структуры методами ЭСР.

Для достижения поставленной цели были определены следующие задачи:

1. Разработка экспериментальной методики резонаторных измерений сильно-коррелированных электронных систем ЭСР в диапазоне частот 28-70 ГГц и методики измерения угловых зависимостей параметров резонансной линии ЭСР на частоте 60 ГГц.

2. Разработка методики анализа резонансной линии ЭСР в металлах для геометрии эксперимента, в которой ось цилиндрического резонатора перпендикулярна внешнему магнитному полю.

3. Исследование ЭСР в GdV_6 в широком диапазоне частот 28-70 ГГц.

4. Исследование угловых зависимостей параметров линии ЭСР в антиферроквадрупольной фазе CeV_6 на частоте 60 ГГц.

5. Поиск и исследование ЭСР в SmV_6 в широком интервале температур $T = 1.8-300$ К.

Научная новизна:

1. Разработана установка на основе высокочастотного ЭСР спектрометра, позволяющая проводить измерения зависимостей параметров спектра магнитного резонанса от направления магнитного поля в сильно-коррелированных металлических системах.

2. Разработан экспериментальный метод определения величины осциллирующей намагниченности металлов, основанный на сравнительном анализе резонансных линий ЭСР измеренных в двух различных экспериментальных геометриях.

3. Впервые обнаружен магнитный резонанс в антиферромагнитной фазе GdV_6 . Проведено исследование зависимостей спектров ЭСР в широком диапазоне частот 28-70 ГГц для кристаллографического направления [100]. Продемонстрировано, что anomalous поведение антиферромагнитного резонанса обусловлено эффектами смещения ионов Gd^{3+} из центральных положений решетки при температурах $T < 15.5$ К.

4. Впервые исследованы угловые зависимости параметров ЭСР в CeV_6 . Обнаружены существенные отличия от модели ЭСР в АФК фазе CeV_6 [7]. Обнаружена anomalous температурная зависимость осциллирующей намагниченности M_0 , которая в случае направления [100] в диапазоне температур $2.3 < T < 2.7$ К превышает статическую. Установлена взаимосвязь

между шириной линии ЭСР и удельным сопротивлением, свидетельствующая о возникновении электронного нематического эффекта.

5. Изучены температурные зависимости спектров ЭСР в нелегированном SmB_6 . Впервые определена структура спектров резонансного поглощения, образованная 4-мя основными линиями с g -факторами близкими к $g \sim 2$. Обнаружено критическое поведение суммарной интегральной интенсивности спектра ЭСР поглощения $I \sim (T^* - T)^{0.38}$ где $T^* = 5.38$ К. Изучена устойчивость наблюдаемого спектра по отношению к дефектам, вносимым в поверхностный слой.

6. Выполнено исследование полевых зависимостей намагниченности в топологическом Кондо изоляторе SmB_6 в диапазоне температур 2-10 К. Впервые показано, что при низких температурах $T < 5.5-6$ К в магнитных свойствах этого соединения существует вклад ЛММ с $\mu^* \sim 7-14\mu_B$. Большая величина μ^* для ЛММ, по-видимому, обусловлена спин-поляронным эффектом.

Практическая ценность результатов работы заключается в разработке экспериментальных методик исследования угловых зависимостей ЭСР в сильно-коррелированных металлах и определения величины осциллирующей намагниченности. Полученные в диссертационной работе результаты способствуют дальнейшему развитию представлений о природе эффектов сильных электронных корреляций, определяющих аномалии физических свойств и особенности формирования сложного основного состояния соединений данного класса, а также теории магнитного резонанса в этих системах.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Разработана методика для измерений угловых зависимостей параметров спектров магнитного резонанса в сильно коррелированных металлических системах. Разработана и апробирована методика определения

величины осциллирующей намагниченности в сильно коррелированных металлах.

2. Впервые обнаружен магнитный резонанс в антиферромагнитной фазе GdV_6 . Получены оценки поля анизотропии $H_A = 800$ Э и относительного сдвига ионов Gd^{3+} из центральных положений в решетке $\delta r \approx 0.2$ Å.

3. Впервые получены угловые зависимости характеристик ЭСР у CeV_6 , которые позволили обнаружить отклонения от зависимостей, предсказываемых современными моделями [7] для этого соединения.

4. Впервые исследованы температурные зависимости спектров ЭСР в топологическом Кондо-изоляторе SmV_6 и обнаружен магнитный фазовый переход при $T^* = 5.38$ К.

Достоверность результатов исследовательской работы определяется тщательной проработкой вопросов связанных с отбором, характеризацией и подготовкой образцов, подробным описанием экспериментальных методик и установок, и сопоставлением полученных оригинальных результатов с литературными данными из различных источников. Положения и выводы, сформулированные в диссертации, получили квалифицированную апробацию на международных и российских научных конференциях. Обоснованность выводов подтверждена публикациями результатов в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК РФ.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались на 13ой, 14ой, 15ой и 16ой конференциях «Сильно коррелированные электронные системы и квантовые критические явления», (Троицк, Москва, 2015, 2016, 2017, 2018), на Московском международном симпозиуме по магнетизму (MISM2017, Москва 2017), на 21ом и 22ом международных симпозиумах «Нанофизика и наноэлектроника» (Нижний Новгород, 2017, 2018), на 16ой и Чехословацкой конференции по магнетизму (CSMAG'16, Кошице, Словакия, 2016), на 37ой международной конференции «Совещание по физике низких температур» (Казань, 2015), на 14ой, 15ой и 16ой школах-

конференциях "Проблемы физики твердого тела и высоких давлений" (Сочи, 2015, 2016, 2017), на международных конференциях «Современные успехи магнитного резонанса» (MDMR, Казань, 2016, 2017, 2018), на 18ой международной школе-конференции «Современные проблемы магнитного резонанса и его применений» (Казань, 2015), на 3ей международной конференции «Лазерные, плазменные исследования и технологии ЛАПЛАЗ-2017» (Москва, 2017).

Публикации. По результатам диссертации опубликовано 26 печатных работ, включая 7 статей и 19 тезисов докладов.

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав и заключения. Полный объем диссертации составляет 143 страницы с 45 рисунками и 2 таблицами. Список литературы содержит 145 наименований.

2. Содержание работы

Во введении обосновывается актуальность проводимых в рамках данной диссертационной работы исследований, формулируются цели и ставятся задачи работы, рассматривается место работы в области исследования СКС, а также обосновывается научная новизна и практическая значимость работы.

В первой главе проводится обзор теоретических и экспериментальных научных работ по ЭСР в металлах. Обсуждаются решенные и актуальные нерешенные задачи исследования ЭСР в сильно коррелированных металлических системах, в том числе методики для определения абсолютной величины осциллирующей намагниченности M_0 (части намагниченности участвующей в ЭСР). Обосновывается выбор объектов исследования из класса гексаборидов редкоземельных элементов. Рассматриваются физические свойства редкоземельных гексаборидов RB_6 ($R = Gd, Ce, Sm$), их магнитная структура, характеристики основного состояния и известные

магнитные фазовые H - T диаграммы этих материалов. Представлен обзор исследований ЭСР у $R\text{V}_6$. Сформулированы актуальные проблемы в области изучения данных объектов.

Вторая глава посвящена методике измерений. Приведены описания экспериментальных установок: ЭСР спектрометра и установки для исследования гальваномагнитных свойств. Основные результаты данной работы получены на высокочастотном резонаторном ЭСР спектрометре, работающем в диапазоне температур 1.8-300 К и полей до 7 Тл. Использование набора резонаторов позволяет проводить измерения на частотах от 28 до 70 ГГц. Описана оригинальная методика измерения ЭСР в металлах, которая позволяет избежать неоднородностей высокочастотного и постоянного магнитных полей в образце, а также минимизировать влияние эффектов формы образца.

В главе приведены результаты апробации данной методики для регистрации ЭСР в нормальной фазе легированного немагнитной примесью сверхпроводящего додекаборида $\text{Zr}_{0.926}\text{Lu}_{0.074}\text{B}_{12}$.

Далее описывается методика, разработанная для исследования анизотропии ЭСР, и схема установки, созданной на ее основе. Данная установка позволяет осуществлять вращение образца относительно направления внешнего магнитного поля и получать угловые зависимости параметров линии ЭСР в металлических системах.

Рассматривается подход, разработанный для определения величины осциллирующей намагниченности M_0 в металлических СКС. Данный метод основан на сравнительном анализе ЭСР спектров, полученных в двух экспериментальных геометриях: с волновым вектором электромагнитного поля \mathbf{k} параллельным и перпендикулярным магнитному полю \mathbf{H} . Приводится описание и результаты апробации методики на сильно коррелированных системах EuB_6 и CeB_6 (Таблица 1). Полученные значения параметра M_0

сравниваются с результатами метода калибровки микроволновых потерь по температурным и полевым зависимостям $\rho(T)$ и $\rho(H)$, известными из литературы [8, 9]. На основании выполненного сопоставления делается вывод о достоверности определения величины осциллирующей части намагниченности, с помощью предложенного в настоящей работе метода.

В заключительной части главы кратко описана методика получения монокристаллов гексаборидов редкоземельных элементов, использованная в Институте проблем материаловедения НАНУ (Киев, Украина) для синтеза исследуемых образцов.

Таблица 1. Значения осциллирующей намагниченности M_0 , полученные по оригинальной методике для образцов EuB_6 и CeB_6 при разных температурах, и статическая намагниченность из литературных данных M_{st}

Образец	T , К	M_{st} , Гс	M_0 , Гс
EuB_6	4.2	911	905 ± 16
CeB_6	1.8	96	94 ± 7

Третья глава посвящена исследованию ЭСР в металлическом антиферромагнетике GdB_6 . Представлены результаты первого наблюдения магнитного резонанса в АФМ фазе этого соединения.

Выполненные эксперименты позволили обнаружить, что при температуре $T_N = 15.5$ К, происходит резкое изменение положения резонансного поля H_0 и ширины линии ЭСР ΔH (рисунок 1,а). На частоте $\nu = 60$ ГГц скачок с $\mu_0 H_0 (T = 15.6 \text{ К}) \approx 2$ Тл до $\mu_0 H_0 (T = 15.5 \text{ К}) \approx 4$ Тл происходит в узком диапазоне температур $\Delta T < 0.1$ К. Такое необычное поведение обусловлено переходом первого рода в АФМ фазу, связанным со взаимным сдвигом ионов Gd^{3+} из центрально-симметричных положений. При дальнейшем понижении температуры до $T = 1.8$ К спектр ЭСР эволюционирует в структуру, состоящую из 4-х линий, при этом положение линий поглощения смещается в область меньших значений магнитного поля

(Рисунок 1,а). Отмечается, что эволюция структуры спектра ЭСР в АФМ фазе происходит плавно от одной до четырех резонансных линий, и, таким образом, второй фазовый переход при $T_{N2} \approx 5-10$ К, известный из литературных источников [10], в характере спектра не проявляется.

Следует обратить внимание, что весь спектр при $T < T_N$ сдвигается в область низких полей, тогда как скачок положения линии при T_N происходит с увеличением резонансного поля. Для понимания такого, нехарактерного для АФМ резонанса, поведения, в работе проведена серия ЭСР измерений на частотах в диапазоне 28-70 ГГц при $T = 1.8$ К. Полученные зависимости резонансного поля от частоты могут быть хорошо аппроксимированы в рамках модели антиферромагнетика с легкой осью анизотропии $\nu/2\pi \cdot \gamma = (H_0^2 + 2H_A H_E)^{1/2}$, где γ - гиромагнитное отношение, H_E - обменное поле, H_A - поле анизотропии и $H_A \ll H_E$ (вставка на рисунке 1,б). Выполненный анализ позволил получить значения g -фактора $g = 1.27$ и параметра $(2H_A H_E)^{1/2} = 20$ кЭ в АФМ фазе. Величина H_E была ранее определена из измерений намагниченности в импульсном поле и составляет $H_E = 245$ кЭ [11], что позволяет оценить поле анизотропии в GdV_6 : $H_A = 800$ Э.

В работе показано, что эволюция спектров в АФМ фазе определяется комбинацией трех факторов. Скачок g -фактора приводит к сдвигу линии резонанса в область высоких полей, увеличение параметра $H_E H_A$ при формировании АФМ фазы смещает спектр в низкие поля, а воздействие на ион Gd^{3+} сложного асимметричного одноосного кристаллического поля приводит к формированию спектра из 4-х линий. При этом взаимное положение компонент спектра магнитного резонанса не меняется с температурой, а характерные величины наблюдаемого расщепления линии ~ 2 кЭ соответствуют типичным значениям известным из литературы для иона Gd^{3+} [12].

В работе обсуждается диполь-дипольное взаимодействие, как основная причина возникновения поля анизотропии H_A в АФМ фазе. В рамках этого

предположения выполнена оценка средних смещений ионов Gd^{3+} из центральных положений $\delta r \approx 0.4 \text{ \AA}$ ($\sim 10\%$ от постоянной решетки), которая оказывается сопоставима с известным из рентгеновских экспериментов [13] среднеквадратичным отклонением РЗ иона $\langle \delta^2 \rangle^{1/2} \approx 0.1 \text{ \AA}$ при комнатной температуре. Сильное изменение g -фактора в АФМ фазе в свою очередь может быть связано с димеризацией ионов Gd^{3+} .

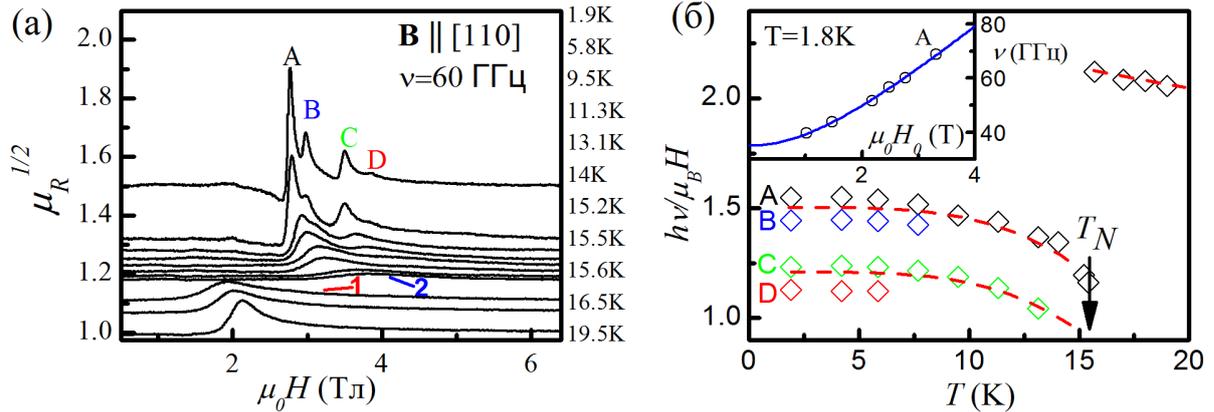


Рисунок 1. (а) Температурная эволюция спектров магнитного резонанса в GdV_6 при переходе в АФМ состояние. Кривые 1 и 2 соответствуют температурам 15.5 К и 15.6 К. (б) Зависимость обратного положения компонент спектра ЭСР от температуры. Вставка на панели (б) демонстрирует частотную зависимость положения моды А при $T = 1.8 \text{ К}$.

В заключительной части главы приведены результаты исследования ЭСР в парамагнитной фазе GdV_6 . В данной области фазовой диаграммы наблюдается единственная линия ЭСР, которая при температурах $T^* < \sim 70 \text{ К}$ начинает значительно уширяться и смещаться в область низких полей, отклоняясь от своего высокотемпературного положения $g \approx 2$. Обнаружено, что рост ширины линии ЭСР $\Delta H(T)$ оказывается пропорционален сдвигу g -фактора $\Delta g(T) \sim \Delta H(T)$. Интересно, что при этом ширина линии не расходится при приближении к переходу в АФМ фазу, что, вероятно, свидетельствует о различной физической природе механизмов, ответственных за АФМ переход и уширение резонансной линии.

В четвертой главе приведены результаты исследования температурных и угловых зависимостей параметров линии ЭСР в сильно-коррелированном металле CeV_6 на частоте 60 ГГц в магнитном поле до 7 Тл. Сигнал ЭСР в этом соединении имеет необычную природу и наблюдается только в антиферроквадрупольной (АФК) фазе при $T \leq 4$ К, что в современных моделях связывается с наличием ферромагнитных корреляций в АФК фазе CeV_6 .

Экспериментальные результаты, полученные для угловой зависимости g -фактора, сопоставлены с теоретической моделью, предложенной П. Шлоттманном [7] для основного состояния Γ_8 иона Ce^{3+} в АФК фазе. Данная модель позволяет объяснить наблюдение единственной резонансной линии в CeV_6 и рассчитать поведение g -фактора в зависимости от углов θ между направлением поля \mathbf{H} и кристаллографической осью [100] и φ – угла характеризующего упорядочение квадрупольных орбиталей. Обнаружено существенное отличие g -фактора ($1.4 < g < 1.75$) от теоретических предсказаний ($2 < g < 2.23$) (рисунок 2). При этом симметрия экспериментальной и теоретической кривых $g(\theta)$ может быть приведена в соответствие только в области температур $T \sim 2.65$ К, где она описывается эмпирической формулой:

$$g_{\text{exp}}(\theta, \varphi) = g(\theta, \varphi)b + g_0. \quad (1)$$

Здесь $g(\theta, \varphi)$ – модельная зависимость g -фактора из работы [7], а значения параметров $b = 0.3$, $g_0 = 1$ и $\varphi = \pi/3$ выбраны для наилучшего соответствия при температуре $T = 2.65$ К (рисунок 2).

Анализ угловых зависимостей ширины линии ЭСР $\Delta H(\theta)$ и удельного магнетосопротивления $\Delta \rho(\theta)$ в поле магнитного резонанса ($\mu_0 H_0 \sim 2.8$ Тл), нормированных на соответствующие значения этих параметров для направления [100], $\Delta \rho_n(\theta)$ и $\Delta H_n(\theta)$, позволил обнаружить между ними скейлинговую зависимость $1 - \Delta \rho_n(\theta) = a(1 - \Delta H_n(\theta))$, где $a \approx 0.1$ численный

коэффициент (рисунок 3,б). В работе отмечается, что такая корреляция свидетельствует о существенной роли спиновых флуктуаций в АФК фазе CeV_6 . При этом с одной стороны спиновые флуктуации влияют на спиновое рассеяние электронов, а с другой могут значительно изменять параметры резонансного поглощения. Наблюдаемая анизотропия спиновых флуктуаций, свидетельствует о возникновении в АФК фазе CeV_6 электронного нематического эффекта. Исследование угловых зависимостей магнетосопротивления, предпринятое в работе [14], позволило обнаружить спонтанное нарушение пространственной симметрии рассеяния носителей заряда в АФК фазе гексаборида церия и подтвердить существование нематической фазы, следующее из наших ЭСР экспериментов.

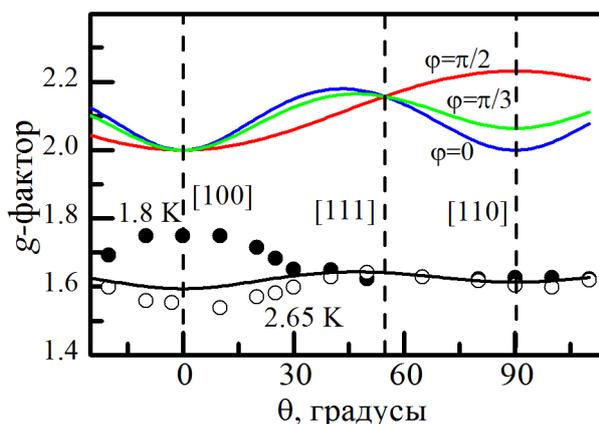


Рисунок 2. Угловые зависимости g -фактора, полученные при температурах 1.8 К и 2.65 К. Сплошные линии $g(\theta, \varphi)$ в районе $g \approx 2.1$ представляют теоретические зависимости для различных углов φ упорядочения антиферроквадрольных подрешеток [7]. Сплошная линия, проходящая через данные, соответствует эмпирической формуле (1).

Далее в главе приводятся результаты исследования температурных зависимостей параметров линии ЭСР для трех основных кристаллографических направлений [100], [110] и [111] (рисунок 3,а). Обнаружено, что для направлений поля вдоль осей [110] и [111] зависимости ширины линии ЭСР в рамках экспериментальной точности совпадают, а g -фактор слабо зависит от температуры и равен $g \sim 1.6$. В то же время, для

направления [100] значение сильно зависит от температуры и меняется с $g = 1.75$ при $T = 1.8$ К до $g = 1.4$ при $T = 3.4$ К (рисунок 3,а). При этом ширина резонансной линии до 3-х раз превышает соответствующий параметр для направлений [110] и [111]. Более того, для направления [100] наблюдается anomальное поведение осциллирующей намагниченности M_0 : её величина в диапазоне температур $2.3 < T < 2.7$ К на $\sim 20\%$ превышает величину статической намагниченности M_{st} . Anomальный характер поведения M_0 интерпретируется в работе в рамках модели Абрагамса-Вульфле [15] и связывается с наличием вклада в динамическую восприимчивость от взаимодействия электронов проводимости с ЛММ, который обнуляется в случае нулевой частоты $\omega = 0$ и принимает конечное значение в условиях ЭСР эксперимента.

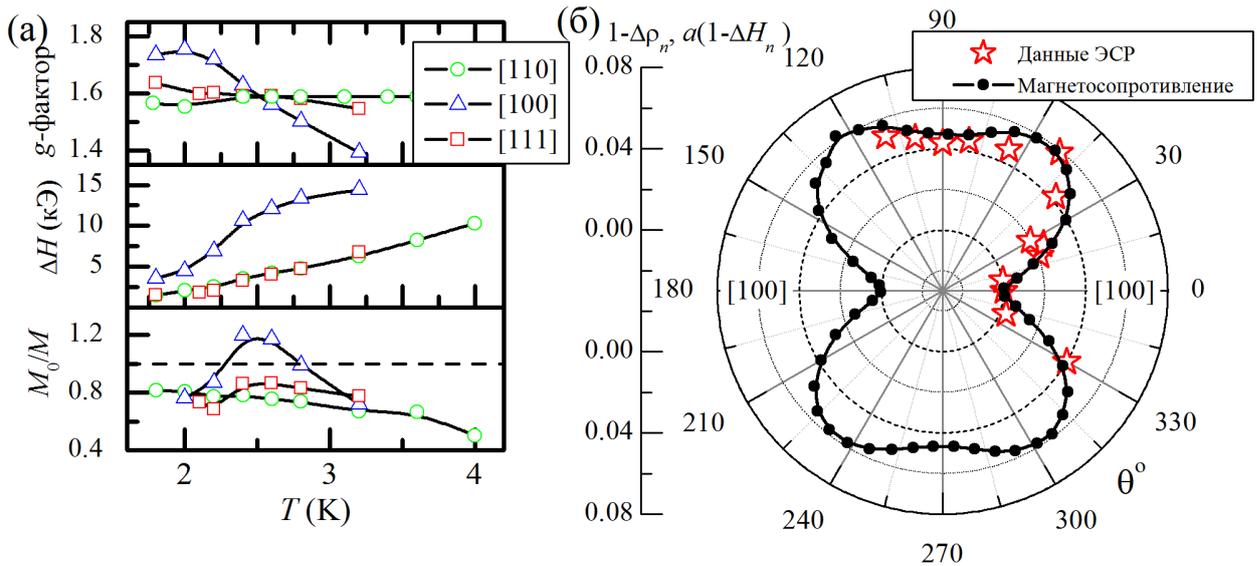


Рисунок 3. (а) Температурные зависимости спектроскопических параметров для разных кристаллографических направлений. (б) Сопоставление угловых зависимостей магнетосопротивления $\Delta\rho_n = \Delta\rho(B, \theta)/\Delta\rho(B, 0)$ и ширины линии $\Delta H_n = \Delta H(\theta)/\Delta H(0)$ при $T = 1.8$ К, нормированных на соответствующее значение при $\mathbf{H} \parallel [100]$.

В пятой главе приведены результаты исследования ЭСР и магнитных свойств гексаборида самария. Измерения ЭСР в монокристаллах SmB_6 проводились на частоте 60 ГГц, в полях до 7 Тл и в температурном диапазоне

$T = 1.8-7$ К. Обнаружено, что в области температур $T < 6$ К формируется спектр сложной структуры, состоящий из четырех узких линий $A_{1,2}$, $B_{1,2}$ ($g \sim 1.9$, $\Delta H \sim 50$ кЭ) и дополнительной более широкой линии C ($\Delta H \sim 170$ кЭ), предположительно связанной с циклотронным резонансом ($m_{\text{eff}} \sim 1.2m_0$). Для установления природы формирования сигнала ЭСР была изучена температурная эволюция спектра поглощения (рисунок 4,а,б). В работе обнаружено, что интегральная интенсивность, растет с понижением температуры и при $T < T^* = 5.34 \pm 0.05$ К и проявляет критическое поведение $I(T) \sim (T^* - T)^\alpha$ где $\alpha = 0.38$ (рисунок 5,а). Наблюдаемое необычное поведение интенсивности сигнала указывает на возможность возникновения магнитного упорядочения в поверхностном слое гексаборида самария, и может быть интерпретировано в рамках гипотезы о разрушении кондовских синглетных состояний («kondo breakdown») [16]. В этом случае на поверхности освобождаются нескомпенсированные моменты Sm^{3+} , которые увеличивают среднее значение валентности на поверхности SmB_6 и дают основной вклад в ЭСР поглощение.

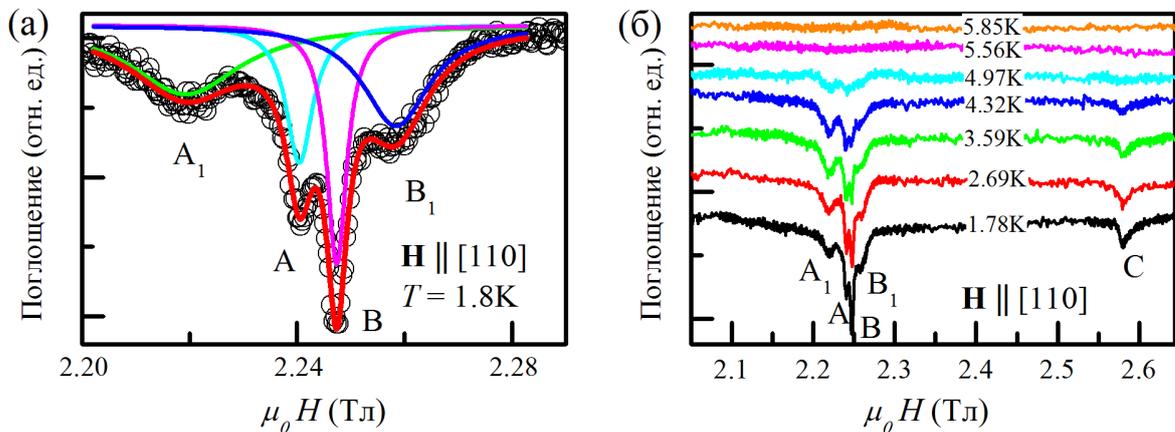


Рисунок 4. (а) Аппроксимация формы линии основного парамагнитного сигнала набором 4-х лоренцевых линий. (б) Температурная эволюция спектра резонансного магнитопоглощения поверхности [110] гексаборида самария.

Ключевую роль в физике ТКИ играет поверхность материала, поэтому для определения роли поверхностных топологических состояний в

формировании спектров ЭСР в работе было выполнено исследование влияния механической и химической обработки поверхности SmB_6 на параметры ЭСР. Эксперименты, проведенные с разными состояниями поверхности, показали, что резонанс оказывается устойчивым по отношению к вносимым дефектам, более того, положение и ширина линий не изменяются даже при значительном воздействии, оказанном на поверхностный слой.

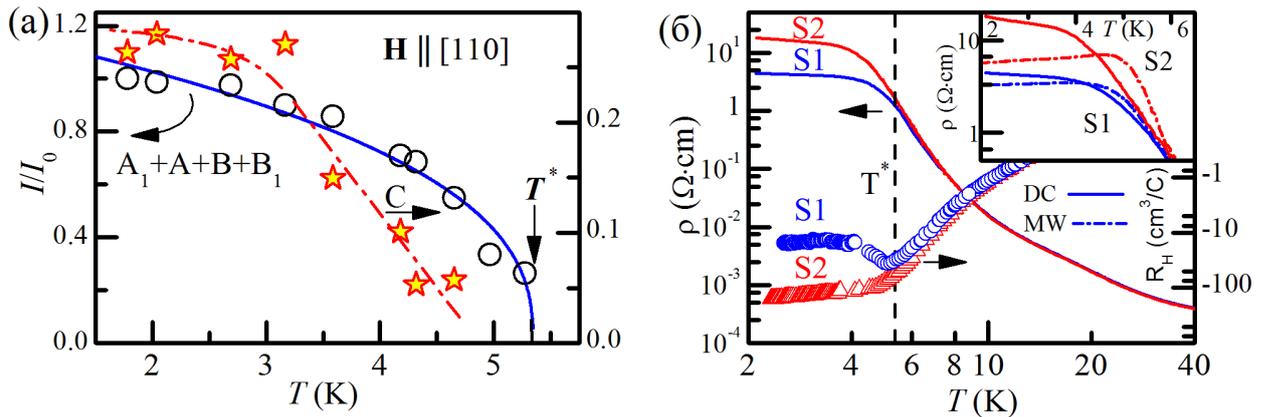


Рисунок 5. (а) Температурные зависимости суммарной интегральной интенсивности линий A_1 , A_2 , B_1 и B_2 (левая ось) и интенсивности линии C (правая ось), точки соответствуют экспериментальным данным, сплошная линия – аппроксимация степенной зависимостью, штрихпунктирная линия проведена для удобства восприятия данных. (б) Температурные зависимости удельного сопротивления и коэффициента Холла, измеренные на постоянном токе для двух состояний поверхности $[110]$. Вставка на панели (б) демонстрирует сравнение обратной микроволновой проводимости и сопротивления на постоянном токе.

Состояние поверхности характеризовалось путем измерения сопротивления и эффекта Холла у образца методом Ван дер Пау. Выполненные транспортные измерения позволили обнаружить расхождение между обратной высокочастотной проводимостью и удельным сопротивлением на постоянном токе ниже $T < 5$ К, а также оценить вклады объема и поверхности в поглощение микроволнового излучения в образце SmB_6 . Было показано, что высокочастотная проводимость в этом диапазоне

температур обладает металлическим поведением (вставка на рисунке 5,б), что свидетельствует в пользу существования проводящего слоя на поверхности SmB_6 . Необходимо заметить, что металлическое поведение проводимости в SmB_6 ранее не наблюдалось даже при ультранизких температурах.

Последний параграф главы посвящен исследованию полевых зависимостей статической намагниченности гексаборида самария. Обнаружено, что намагниченность формируется из линейного по полю и нелинейного насыщающегося вкладов. Предложен и подробно описан метод выделения и анализа нелинейного вклада в намагниченность, который, в общем случае, оказывается связан не только с ЛММ, но и с парамагнетизмом Паули поверхностных электронов. Выполненный анализ позволил установить, что при понижении температуры ниже $T^* \sim 6 \text{ К}$ происходит переход между двумя режимами поведения нелинейной части намагниченности гексаборида самария. Так, в диапазоне $T > T^*$ намагниченность качественно соответствует модели распада кондовских синглетов [16] и определяется парамагнетизмом Паули, включающим линейный и нелинейный вклад в намагниченность. В области $T < T^*$ к парамагнетизму Паули добавляется возникающий пороговым образом по температуре вклад ЛММ, что качественно согласуется с данными ЭСР измерений.

Выполненное разделение вкладов позволило оценить эффективную величину магнитного момента обнаруженных центров $\mu^* \sim 7-14\mu_B$. При этом данная оценка существенно превышает величины $\mu_{теор}^* \sim 1-5\mu_B$, ожидаемые для случаев изолированного магнитного иона Sm^{3+} ($J = 3/2, 5/2$) или некоторой парамагнитной примеси ($J = 1/2$) с g -фактором $g \sim 2$, наблюдаемым в ЭСР эксперименте. Такое расхождение указывает на возможную спин-поляронную природу локализованных магнитных моментов в SmB_6 .

В заключении обобщаются основные результаты диссертации. Указывается, что в работе выполнено исследование ЭСР в соединениях $R\text{V}_6$ в полях до 7 Тл и диапазоне температур 1.8-300 К. Впервые обнаружен и исследован антиферромагнитный резонанс в GdV_6 . Создана оригинальная методика для изучения угловых зависимостей спектров ЭСР и с ее помощью получены параметры линий ЭСР в CeV_6 . Исследовано формирование сигнала магнитного резонанса в соединении с переменной валентностью SmV_6 и его устойчивость по отношению к дефектам, вносимым на поверхность образца.

Основные результаты работы можно сформулировать следующим образом:

1. Разработаны экспериментальные методики высокочастотных измерений параметров ЭСР в образцах сильно-коррелированных металлов. (а) Методика исследований угловых зависимостей спектров магнитного резонанса в металлических системах в диапазоне температур 1.8-300 К и в полях сверхпроводящего соленоида до 7 Тл. (б) Методика измерения величины осциллирующей намагниченности M_0 , основанная на сравнительном анализе спектров ЭСР в двух экспериментальных геометриях: волновой вектор \mathbf{k} параллелен или перпендикулярен внешнему магнитному полю \mathbf{H} . Выполнена апробация метода на двух СКС: EuV_6 и CeV_6 . Полученные результаты (905 Гс для EuV_6 при $T = 4.2$ К и 94 Гс для CeV_6 при $T = 1.8$ К) находятся в хорошем соответствии со значениями, полученными другими методами [8,9].
2. Впервые проведено измерение ЭСР в АФМ фазе металлического антиферромагнетика GdV_6 ($T_N = 15.5$ К). При переходе в АФМ фазу наблюдается скачкообразное изменение положения резонансной линии H_0 (от $\mu_0 H_0 \approx 2$ Тл до $\mu_0 H_0 \approx 4$ Тл) с дальнейшей плавной эволюцией в структуру из 4-х линий и смещением в область низких полей. Измерения в диапазоне частот 28-70 ГГц показали, что зависимость положения линии ЭСР от частоты в АФМ фазе хорошо описывается в рамках модели резонанса в АФМ с легкой осью анизотропии $\nu/\gamma = (H_0^2 + 2H_A H_E)^{1/2}$ где H_E - обменное поле и

H_A - поле анизотропии. Моделирование позволяет получить значения g -фактора и поля анизотропии H_A в АФМ фазе: $g = 1.27$ и $H_A = 800$ Э. Величина H_A может быть обусловлена диполь-дипольным взаимодействием, связанным с взаимным сдвигом ионов Gd^{3+} , который можно оценить для этого случая как $\sim 10\%$ от постоянной решетки. Обнаружено, что в парамагнитной фазе ниже $T^* \sim 70$ К сдвиг g -фактора пропорционален отклонению ширины линии от высокотемпературной зависимости $\Delta g(T) \sim \Delta H(T)$. Такое поведение не характерно для АФМ металлов и, вероятно, связано с нелинейными эффектами смещения ионов Gd^{3+} из центрально-симметричных положений.

3. Впервые исследованы зависимости параметров ЭСР в АФК фазе CeB_6 от направления магнитного поля относительно кристаллографических направлений. Показано, что экспериментальные данные не описываются в рамках существующих моделей ЭСР для основного состояния Γ_8 в АФК фазе CeB_6 . В результате измерений температурных зависимостей ЭСР для основных кристаллографических направлений $[100]$, $[110]$ и $[111]$, обнаружено аномальное поведение параметров линии для направления $[100]$: (а) при приближении к границе АФК и парамагнитной фаз наблюдается значительное уширение линии ЭСР и сильное уменьшение g -фактора с $g = 1.75$ при $T = 1.8$ К до $g = 1.4$ при $T = 3.2$ К; (б) обнаружено, что осциллирующая намагниченность M_0 в этой геометрии эксперимента в диапазоне температур $2.3 < T < 2.7$ К на $\sim 20\%$ превышает статическую M_{st} . Совместный анализ транспортных и релаксационных свойств позволил обнаружить скейлинговую зависимость между шириной линии ЭСР и удельным сопротивлением образца, нормированных на соответствующее значение этих параметров при $\mathbf{H} \parallel [100]$, вида $1 - \Delta\rho_n = a(1 - \Delta H_n)$, где $a \approx 0.1$. Такое поведение позволяет предположить сильное влияние на формирование ЭСР спиновых флуктуаций, максимальных в направлении $[100]$.

4. Изучены температурные зависимости высокочастотного (60 ГГц) ЭСР в SmB_6 в диапазоне температур 1.8-7 К. Впервые обнаружена сложная структура из 4-х линий с g -факторами близкими к $g \sim 2$, суммарная

интегральная интенсивность которых демонстрирует критическое поведение $I(T) \sim (T^* - T)^\alpha$ где $\alpha = 0.38$ и характеристическая температура $T^* = 5.34 \pm 0.05$ К. Такое поведение оказывается устойчивым по отношению к различным обработкам поверхности образца и может свидетельствовать о формировании магнитного порядка в поверхностном слое. Обнаружена дополнительная линия магнитного резонанса, которая вероятно связана с дефектами донорного типа, либо с модой циклотронного резонанса, соответствующей эффективной массе $m \sim 1.2m_0$. Сравнительный анализ данных высокочастотной проводимости и сопротивления на постоянном токе позволил разделить объемный и поверхностный отклик и показать, что при температурах $T < 4$ К основной сигнал ЭСР формируется в приповерхностном слое.

5. Анализ нелинейной части полевой зависимости намагниченности у топологического Кондо изолятора SmB_6 позволил установить, что нелинейный вклад в намагниченность при низких температурах в общем случае связан не только с локализованными магнитными моментами, но и с парамагнетизмом Паули поверхностных электронов. Впервые показано, что понижение температуры в области $T^* \sim 5.5-6$ К индуцирует переход между двумя режимами, определяющими магнитные свойства SmB_6 . В диапазоне $T > T^*$ намагниченность качественно соответствует модели распада кондовских синглетов и определяется парамагнетизмом Паули, включающим линейный и нелинейный вклад в намагниченность. В области $T < T^*$ к парамагнетизму Паули добавляется возникающий пороговым образом по температуре вклад локализованных магнитных моментов. Выполненная оценка величины эффективных магнитных моментов, образующихся при $T < T^*$, дает аномально большие значения $\mu^* \sim 7-14\mu_B$, существенно превышающие $\mu^* \sim 3-5\mu_B$, ожидаемые для изолированного магнитного иона Sm^{3+} , что указывает на возможную спин-поляронную природу ЛММ у топологического Кондо изолятора SmB_6 .

Список публикаций автора по теме диссертации.

1. Semeno A.V., Gilmanov M.I., Bogach A.V., Krasnorussky V.N., Samarin A.N., Samarin N.A., Sluchanko N.E., Shitsevalova N.Yu., Filipov V.B., Glushkov V.V., Demishev S.V. Magnetic resonance anisotropy in CeB_6 : an entangled state of the art. // *Scientific Reports*. – 2016. – V. 6. – P. 39196-1-8.
2. Demishev S.V., Gilmanov M.I., Samarin A.N., Semeno A.V., Sluchanko N.E., Samarin N.A., Bogach A.V., Shitsevalova N.Yu., Filipov V.B., Karasev M.S., Glushkov V.V. Magnetic resonance probing of ground state in the mixed valence correlated topological insulator SmB_6 . // *Scientific Reports*. – 2018. – V. 8. – P. 7125-1-8.
3. Semeno A.V., Gilmanov M.I., Sluchanko N.E., Krasnorussky V.N., Shitsevalova N.Y., Filipov V.B., Flachbart K., Demishev S.V., Angular dependences of ESR parameters in antiferroquadrupolar phase of CeB_6 . // *Acta Physica Polonica A*. – 2017 – V. 131, N.4. – P. 1060-1062.
4. Gilmanov M.I., Semeno A.V., Samarin A.N., Demishev S.V., A novel method of ESR oscillating magnetization value determination in strongly correlated metals. // *EPJ Web of Conferences*. – 2018. – V. 185. – P. 02003-1-4.
5. Семенов А.В., Гильманов М.И., Случанко Н.Е., Шицевалова Н.Ю., Филипов В.Б., Демишев С.В. Антиферромагнитный резонанс в GdB_6 . // *Письма в ЖЭТФ* – 2018. – Т. 108, В.4. – С. 243-248.
6. С.В. Демишев, А.Н. Азаревич, А.В. Богач, М.И. Гильманов, В.Б. Филипов, Н.Ю. Шицевалова, В.В. Глушков. Магнитные свойства топологического Кондо изолятора SmB_6 : локализованные магнитные моменты и парамагнетизм Паули. // *Письма в ЖЭТФ*. – 2019. – Т. 109, В.3. – С. 152–159.
7. Sluchanko N.E., Azarevich A.N., Anisimov M.A., Bogach A.V., Gavrilkina S.Yu., Gilmanov M.I., Glushkov V.V., Demishev S.V., Khoroshilov A.L., Dukhnenko A.V., Mitsen K.V., Shitsevalova N.Yu., Filippov V.B., Voronov V.V., Flachbart K. Suppression of superconductivity in $Lu_xZr_{1-x}B_{12}$: Evidence of static

magnetic moments induced by nonmagnetic impurities. // *Physical Review B.* – 2016. – V. 93, N.8. – P. 085130-1-7.

8. Гильманов М.И., Семенов А.В., Богач А.В., Красноруссский В.Н., Самарин А.Н., Случанко Н.Е., Шицевалова Н.Ю., Филипов В.Б. Анизотропия параметров линии электронного спинового резонанса в антиферроквадрупольной фазе CeB_6 . // III Международная конференция «Лазерные, плазменные исследования и технологии ЛАПЛАЗ-2017», 24-27 января 2017 г. Сборник научных трудов, НИЯУ МИФИ, 2017 – С.103.

9. Demishev S.V., Krasnorussky V.N., Glushkov V.V., Semeno A.V., Gilmanov M.I., Bogach A.V., Samarin A.N., Samarin N.A., Sluchanko N.E., Shitsevalova N.Yu., Filipov V.B., Electron Nematic Effect in CeB_6 : The ESR and Magnetoresistance Evidence. // *Modern Development of Magnetic Resonance, Abstracts of the International Conference, Kazan, September 25-29, 2017* – P.61.

10. Demishev S.V., Gilmanov M.I., Samarin A.N., Semeno A.V., Sluchanko N.E., Shitsevalova N.Yu., Filipov V.B., Glushkov V.V., Magnetic Resonance in the Strongly Correlated Topological Insulator SmB_6 . // *Modern Development of Magnetic Resonance, Abstracts of the International Conference, Kazan, September 25-29, 2017* – P.63.

11. Демишев С.В., Семенов А.В., Гильманов М.И., Самарин А.Н., Красноруссский В.Н., Богач А.В., Глушков В.В., Шицевалова Н.Ю., Филипов В.Б., Случанко Н.Е., Магнитный резонанс в гексабориде церия. Нанозифика и нанозлектроника. // Материалы XXI Международного симпозиума. 13-16 марта 2017 г., Нижний Новгород, 2017 – С.177-178.

12. Gilmanov M.I., Semeno A.V., Samarin A.N., Demishev S.V., A novel method of ESR oscillating magnetization value determination in strongly correlated metals. // *Moscow International Symposium on Magnetism MISM-17, July 1 – 5, 2017, Moscow. Book of Abstracts. Lomonosov Moscow State University, 2017* – P.214.

13. Semeno A.V., Gilmanov M.I., Sluchanko N.E., Krasnorussky V.N., Shitsevalova N.Yu., Filipov V.B., Demishev S.V., Electron spin resonance anisotropy in the antiferroquadrupolar phase of CeB_6 . // *Moscow International*

Symposium on Magnetism MISM-17, July 1 – 5, 2017, Moscow. Book of Abstracts. Lomonosov Moscow State University, 2017 – P.440.

14. Гильманов М.И., Семенов А.В., Случанко Н.Е., Шицевалова Н.Ю., Филипов В.Б., Демишев С.В., Анизотропия электронного спинового резонанса в антиферроквадрупольной фазе CeB_6 . // XV Конференция «Сильно коррелированные электронные системы и квантовые критические явления», 8 июня 2017 г. Москва, г. Троицк, ИФВД РАН, Тезисы. М. ФИАН, 2017 – С. 32-33.

15. Семенов А.В., Гильманов М.И., Случанко Н.Е., Краснорусский В.Н., Шицевалова Н.Ю., Филипов В.Б., Демишев С.В., Динамические магнитные свойства антиферромагнитной и антиферро-квадрупольной фаз гексаборида церия. // XV Конференция «Сильно коррелированные электронные системы и квантовые критические явления», 8 июня 2017 г. Москва, г. Троицк, ИФВД РАН, Тезисы. М. ФИАН, 2017 – С.83-84.

16. Гильманов М.И., Семенов А.В., Случанко Н.Е., Шицевалова Н.Ю., Филипов В.Б., Демишев С.В., Угловые зависимости параметров электронного спинового резонанса в Кондо-системе CeB_6 . // XVI школа-конференция молодых ученых «Проблемы физики твердого тела и высоких давлений». Идеи и методы физики конденсированного состояния, II. Сочи, пансионат «Буревестник» 15-25 сентября 2017 г. Тезисы. М. ФИАН, 2017 – С.63-64.

17. Semeno A.V., Gilmanov M.I., Krasnorussky V.N., Sluchanko N.E., Shitsevalova N.Yu., Filipov V.B., Flachbart K., Demishev S.V., Angular dependencies of ESR parameters in antiferroquadrupolar phase of CeB_6 . // «16th Czech and Slovak Conference on Magnetism», June 13-17, 2016, Kosice, Slovakia, Book of abstracts – P.300.

18. Demishev S.V., Semeno A.V., Gilmanov M.I., Bogach A.V., Krasnorussky V.N., Samarin A.N., Samarin N.A., Sluchanko N.E., Shitsevalova N.Yu., Filipov V.B., V.V. Glushkov, Magnetic resonance anisotropy in CeB_6 . // Modern Development of Magnetic Resonance, Abstracts of the International Conference, Kazan, Oct. 31 – Nov. 4, 2016 – P.25.

19. Gilmanov M.I., Semeno A.V., Samarin A.N., Demishev S.V., Measurements of ESR oscillating magnetization value in strongly correlated metals. // Magnetic resonance anisotropy in CeB_6 . // Modern Development of Magnetic Resonance, Abstracts of the International Conference, Kazan, Oct. 31 – Nov. 4, 2016 – P.135.
20. Semeno A.V., Gilmanov M.I., Bogach A.V., Krasnorussky V.N., Samarin A.N., Shitsevalova N.Yu., Filipov V.B., Demishev S.V., Anomalous ESR behavior of the Lanthanum doped CeB_6 . // Modern Development of Magnetic Resonance, Abstracts of the International Conference, Kazan, Oct. 31 – Nov. 4, 2016 – P.26.
21. Семенов А.В., Гильманов М.И., Краснорусский В.Н., Случанко Н.Е., Шицевалова Н.Ю., Филипов В.Б., Демишев С.В., Угловые зависимости параметров линии электронного спинового резонанса в антиферроквадрупольной фазе CeB_6 . // XV школа-конференция "Проблемы физики твердого тела и высоких давлений", г.Сочи, пансионат "Буревестник", 16-25 сентября 2016г. Тезисы – С.170
22. Семенов А.В., Гильманов М.И., Самарин А.Н., Богач А.В., Краснорусский В.Н., Шицевалова Н.Ю., Филипов В.Б., Демишев С.В., Роль ферромагнитных корреляций в генезисе электронного спинового резонанса в системе $Ce_{1-x}La_xB_6$. // XXXVII Совещание по физике низких температур, Казань, 29 июня – 3 июля 2015, Сборник тезисов – С.64.
23. Семенов А.В., Гильманов М.И., Краснорусский В.Н., Случанко Н.Е., Шицевалова Н.Ю., Филипов В.Б., Демишев С.В., Угловые зависимости параметров линии электронного спинового резонанса в антиферроквадрупольной фазе CeB_6 . // XIV конференция "Сильно коррелированные электронные системы и квантовые критические явления", г. Москва, г. Троицк, ИФВД РАН, 3 июня 2016, Тезисы – С.14.
24. Gilmanov M.I., Semeno A.V., Samarin A.N., Demishev S.V., New experimental method of measurement of ESR oscillating magnetization value in strongly-correlated metals. // XVIII International Youth Scientific School «Actual problems of magnetic resonance and its application», Kazan, 26-30 October, 2015, Book of abstracts – P.88.

25. Гильманов М.И., Семено А.В., Самарин А.Н., Демишев С.В. Экспериментальный метод определения величины осциллирующей намагниченности в сильно-коррелированных металлах. // XIII конференция "Сильно коррелированные электронные системы и квантовые критические явления", г. Москва, г. Троицк, ИФВД РАН, 5 июня 2015, Тезисы – С.15.
26. Семено А.В., Богач А.В., Краснорусский В.Н., Гильманов М.И., Самарин А.Н., Демишев С.В. Роль ферромагнитных корреляций в генезисе электронного спинового резонанса в системе $Ce_{1-x}La_xB_6$. // XIV школа-конференция молодых ученых "Проблемы физики твердого тела и высоких давлений", г. Сочи, 11-20 сентября, 2015, Тезисы – С.17.

Цитируемая литература.

1. Barnes, S.E. Theory of electron spin resonance of magnetic ions in metals. // *Advances in Physics*. - 1981. - V. 30, N.6. - P. 801-938.
2. Sichelschmidt J., Ivanshin V.A., Ferstl J., Geibel C., Steglich F. Low temperature electron spin resonance of the Kondo ion in a heavy fermion metal: $YbRh_2Si_2$. // *Physical Review Letters*. - 2003. - V. 91, N.15. - P.156401-1-4.
3. Krellner C., Förster T., Jeevan H., Geibel C., Sichelschmidt J. Relevance of ferromagnetic correlations for the electron spin resonance in Kondo lattice systems. // *Physical Review Letters*. - 2008. - V.100. - P. 066401-1-4.
4. Sperlich G., Janneck K.H., Buschow K.H.J. Exchange narrowing in the ESR spectra of metallic $Gd_xLa_{1-x}B_6$ ($x = 1$ to 0.01). // *Physica Status Solidi B* - 1973. - V. 57, N.2. - P. 701-706.
5. Demishev S.V., Semeno A.V., Paderno Yu.B., Shitsevalova N.Yu., Sluchanko N.E. Experimental evidence for magnetic resonance in the antiferro-quadrupole phase. // *Physica Status Solidi B*. - 2005. - V. 242, N.3. - P. R27-R29.
6. Nayak C., Simon S.H., Stern A., Freedman M., Das Sarma S. Non-Abelian anyons and topological quantum computation. // *Reviews of Modern Physics*. - 2008. - V. 80, N.3. - P. 1083-1159.
7. Schlottmann P. Electron spin resonance in CeB_6 . // *Journal of Applied Physics*. - 2013. - V. 113, N.17. - P. 17E109-1-3.

8. Semeno A.V., Glushkov V.V., Bogach A.V., Sluchanko N.E., Dukhnenko A.V., Filipov V.B., Shitsevalova N.Yu., Demishev S.V. Electron spin resonance in EuB_6 . // *Physical Review B*. - 2009. - V. 79, N.1. - P. 014423-1-9.
9. Demishev S.V., Semeno A.V., Bogach A.V., Samarin N.A., Ishchenko T.V., Filipov V.B., Shitsevalova N.Yu., Sluchanko N.E. Magnetic spin resonance in CeB_6 . // *Physical Review B*. - 2009. - V. 80, N.24. - P. 245106-1-8.
10. Galéra R.-M. , Morin P., Kunii S., Kasuya T. Magnetic properties and phase diagrams in PrB_6 and GdB_6 . // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. - 1992. - V. 104-107, N.2. - P. 1336-1338.
11. Sugiyama K., Koyoshi Y., Kunii S., Kasuya T., Date M. High Field Magnetization of GdB_6 . // *Journal of the Physical Society of Japan*. - 1988. - V. 57, N.5. - P. 1762-1770.
12. Schwab G. EPR of Gd ions in Jahn-Teller-distorted rare-earth crystals TbAsO_4 , TmAsO_4 , and TmVO_4 . // *Physica Status Solidi B*. - 1975. - V. 68. - P. 359-367.
13. Takahashi Y., Ohshima K., Okamura F., Otani S., Tanaka T. Crystallographic Parameters of Atoms in the Single Crystals of the Compounds RB_6 (R=Y, La, Ce, Nd, Sm, Eu, Gd). // *Journal of the Physical Society of Japan*. - 1999. - V. 68, N.7. - P. 2304-2309.
14. Demishev S.V., Krasnorussky V.N., Bogach A.V., Voronov V.V., Shitsevalova N.Yu., Filipov V.B., Glushkov V.V., Sluchanko N.E. Electron nematic effect induced by magnetic field in antiferroquadrupole phase of CeB_6 . // *Scientific Reports*. - 2017. - V. 7, N.17430. - P. 1-8.
15. Abrahams E., Wölfle P. Phenomenology of ESR in heavy-fermion systems: Fermi-liquid and non-Fermi-liquid regimes. // *Physical Review B*. - 2009. - V. 80, N.23. - P. 235112-1-8.
16. Alexandrov V., Coleman P., Erten O. Kondo Breakdown in Topological Kondo Insulators. // *Physical Review Letters*. - 2015. - V. 114, N.17. - P. 177202-1-5.