

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА 24.1.111.01,
созданного на базе Федерального государственного бюджетного учреждения
науки Института радиотехники и электроники им. В.А.Котельникова
Российской академии наук, по диссертации на соискание ученой степени
кандидата наук.

аттестационное дело N _____
решение диссертационного совета от 20 марта 2026 г., № 02

**О присуждении Кузнецову Александру Сергеевичу, гражданину
России, ученой степени кандидата физико-математических наук.**

Диссертация на тему: «Магнитные фазовые переходы и магнитокалорический эффект в соединениях на основе Dy и Mn в сильных магнитных полях» принята к защите 19 декабря 2025 г., протокол № 17, диссертационным советом 24.1.111.01, созданным на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова Российской академии наук (ИРЭ им. В.А.Котельникова РАН) (125009, Москва, ул. Моховая, д.11. корп.7) (приказ Рособнадзора о создании совета № 2397-1776 от 07.12.2007 г.; приказ Минобрнауки РФ о продлении деятельности совета № 75/нк от 15.02.2013 г.)

Соискатель Кузнецов Александр Сергеевич, 1998 года рождения, окончил Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ» в 2021 году, получив квалификацию магистра по направлению «Ядерная энергетика и теплофизика». С 2021 года обучался в аспирантуре ИРЭ им. В.А.Котельникова РАН по специальности 1.3.12 – «Физика магнитных явлений» и в 2025 году успешно завершил обучение с присвоением квалификации «Исследователь. Преподаватель-исследователь».

В настоящее время Кузнецов А.С. работает в лаборатории № 192 «Магнитных явлений в микроэлектронике» Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова Российской академии наук (ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН) в должности инженера.

Работа выполнена в лаборатории №192 «Магнитных явлений в микроэлектронике» ФГБУН Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН.

Научный руководитель: Маширов Алексей Викторович, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории № 192 «Магнитных явлений в микроэлектронике» ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН (спец. 01.04.07 «Физика конденсированного состояния»).

Официальные оппоненты:

Марченков Вячеслав Викторович, доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физики металлов им. М.Н. Михеева УрО РАН;

Гамзатов Адлер Гудретдинович, кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник Института физики им. Х.И. Амирханова - обособленного подразделения Федерального государственного бюджетного учреждения науки Дагестанского федерального исследовательского центра РАН;

дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация – Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тверской государственный университет», физический факультет, кафедра магнетизма, в своем **положительном отзыве**, подписанном Карпенковым Алексеем Юрьевичем, кандидатом физико-математических наук, доцентом, заведующим кафедрой физики конденсированного состояния ФГБОУ ВО «Тверской государственный университет», и утвержденным и.о. проректора по научной деятельности ФГБОУ ВО «Тверской государственный университет», кандидатом физико-математических наук, доцентом Чемариной Юлией Владимировной, указала, что диссертация Кузнецова Александра Сергеевича «Магнитные фазовые переходы и магнитокалорический эффект в соединениях на основе Dy и Mn в сильных магнитных полях» представляет собой законченное научное исследование и удовлетворяет всем требованиям ВАК РФ, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор – Кузнецов А.С., **достоин** присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.12 - «Физика магнитных явлений». В отзыве отмечено, что работа представляет собой теоретическое и экспериментальное исследование, проведенное на высоком научном уровне. Цель диссертационного исследования достигнута. Основные положения работы и выводы сформулированы ясно и аргументированно. Работа обладает значительной научной и практической значимостью.

В отзыве указаны следующие замечания:

1. Кузнецов А.С. упоминает хладоемкость (RCP) как параметр для оценки эффективности использования магнитокалорического материала. Однако, из мировой литературы известно, что RCP является неверным описанием применимости магнитокалорического материала, см. [K.G. Sandeman, Scripta Materialia, (2012), 67, P. 566-571], [Anders Smith, Adv. Energy Mater., (2012), 2, P.1288-1318], [K. P. Skokov, A. Yu. Karpenkov, D. Yu. Karpenkov and O. Gutfleisch, Journal of Applied Physics, (2013), 113, P.17A945]. Более того, в последней книге Андрея Китановского «Преобразование магнитокалорической энергии: от теории к приложениям», которая не процитирована в работе и которая посвящена магнитокалорическим холодильникам, автор полностью игнорирует эту величину. Стоит отметить, что большинство недавно созданных прототипов магнитных рефрижераторов основаны на цикле активного магнитного регенератора (AMR), поскольку использование последнего обеспечивает наивысшие значения рабочего интервала температур. Для применения в AMR циклах магнитокалорический материал должен обладать большим значением адиабатического изменения температуры, нежели высокими значениями изотермического изменения энтропии. Это объясняется

требованиями максимизации процесса теплопередачи между материалом и теплопередающей средой.

2. В части диссертации, посвященной методикам эксперимента, представлена уникальная методика измерения магнитокалорического эффекта с использованием сверхпроводящего соленоида. Следовало бы представить в тексте диссертации график распределения поля в зазоре соленоида с указанием области однородного поля.

3. К сожалению, работа не лишена стилистических и технических ошибок:

- Стр. 76, абзац 1. Предложение «В полях $\mu_0 H < 1$ Тл намагниченность резко возрастает, что обуславливает смещение стенок доменных границ характерное для ферромагнитного упорядочения.» Данная формулировка содержит несколько физических неточностей: 1. Термин "стенки доменных границ" избыточен и некорректен, так как доменная граница сама по себе является стенкой (переходным слоем) между доменами. Достаточно говорить о «смещении доменных границ»; 2. В предложении нарушена причинно-следственная связь. Намагниченность возрастает вследствие смещения доменных границ, а не наоборот; 3. Утверждение, что данный механизм характерен исключительно для ферромагнетиков, неверно: смещение доменных границ наблюдается и в других типах магнитоупорядоченных структур (например, в ферримагнетиках).»

-Стр. 89 в последнем абзаце есть ошибка в указании на уравнение (8).

4. На странице 134 указано, что: «Следует оговориться, что оценка и представление величины $|\Delta T_{ad}|$ до сотых долей предусматривает отклонение только по термопаре, которое составило $\pm 0,03$ К и $\pm 0,02$ К для начальных температурах 68 и 76 К, соответственно.» Необходимо отметить, что при прямых измерениях МКЭ случайная составляющая суммарной ошибки, которая определяется на основании серии из идентичных измерений более чем в 2 раза меньше систематической составляющей ошибки, поэтому суммарная погрешность измерений совпадает с систематической. В дальнейшем для расчета систематической ошибки косвенных измерений использовалась

формула: $\Delta y = \sum_{i=1}^n \left| \frac{\partial f}{\partial x_i} \right| \cdot \Delta x_i$, где $\frac{\partial f}{\partial x_i}$ - частная производная функции $f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$,

Δx_i - абсолютная погрешность непосредственного измерения x_i .

Температура образца измерялась с помощью универсального вольтметра путем измерения контактной разницы потенциалов (термо-ЭДС) термопары и последующего перевода измеренного значения напряжения в градусы по градуировочной таблице. Систематические погрешности, возникающие при использовании величин, определяемых из таблиц, принимаются равными половине последнего значащего разряда. Поскольку данные, по которым строится график и в последующем происходит перевод напряжения в градусы, указаны до 0,1 мкВ, то погрешность определения температуры составляет 0,05 градуса.

По материалам диссертации опубликовано 11 научных работ, в том числе 5 статей в журналах, входящих в Международные реферативные базы данных и системы цитирования Scopus и Web of Science, а также в журналах, входящих в

Перечень рецензируемых научных изданий рекомендованных ВАК и индексируемых базой данных RSCI, 6 публикаций в трудах Всероссийских и Международных конференций. Публикации по материалам диссертации полностью отражают ее содержание.

Наиболее значимые работы по теме диссертации:

1. **Кузнецов, А.С.** Магнитокалорический эффект при адиабатическом размагничивании поликристаллического сплава $DyNi_2$ / А.С. Кузнецов, А.В. Маширов, А.М. Алиев, А.О. Петров, М.С. Аникин, И.И. Мусабилов, А.А. Амиров, И.А. Кон, В.В. Коледов, В.Г. Шавров // *Физика металлов и металловедение*. – 2022. – Т. 123. – № 4. – С. 425–429. {**Kuznetsov, A.S.** The magnetocaloric effect upon adiabatic demagnetization of a polycrystalline $DyNi_2$ alloy / A.S. Kuznetsov, A.V. Mashirov, A.O. Petrov, I.A. Kon, V.V. Koledov, V.G. Shavrov, A.M. Aliev, A.A. Amirov, M.S. Anikin, I.I. Musabirov // *Physics of Metals and Metallography*. – 2022. – V. 123. – № 4. – P. 397–401.}.
1. Колесов, К.А. Контактное термосопротивление в области криогенных температур в сильных магнитных полях / К.А. Колесов, А.В. Маширов, **А.С. Кузнецов**, В.В. Коледов, А.О. Петров, В.Г. Шавров // *Радиотехника и электроника*. – 2023. – Т. 68. – № 4. – С. 360–365. {Kolesov, K.A. Thermal contact resistance at cryogenic temperatures in the presence of strong magnetic fields / K.A. Kolesov, A.V. Mashirov, **A.S. Kuznetsov**, V.V. Koledov, A.O. Petrov, V.G. Shavrov // *Journal of Communications Technology and Electronics*. – 2023. – V. 68. – № 4. – P. 420–424.}.
2. **Кузнецов, А.С.** Обратный магнитокалорический эффект в соединении Mn_5Si_3 / А.С. Кузнецов, А.В. Маширов, И.И. Мусабилов, В.И. Митюк, М.С. Аникин, А.П. Каманцев, В.В. Коледов, В.Г. Шавров // *Радиотехника и электроника*. – 2023. – Т. 68. – № 4. – С. 353–359. {**Kuznetsov, A.S.** Inverse magnetocaloric effect in Mn_5Si_3 compound / A.S. Kuznetsov, A.V. Mashirov, I.I. Musabirov, V.I. Mitsiuk, M.S. Anikin, A.P. Kamantsev, V.V. Koledov, V.G. Shavrov // *Journal of Communications Technology and Electronics*. – 2023. – V. 68. – № 4. – P. 413–419.}.
3. **Kuznetsov, A.S.** Quasi-isothermal magnetocaloric effect in the $DyAl_2$ alloy in magnetic field up to 14 T / A.S. Kuznetsov, A.V. Mashirov, I.I. Musabirov, M.S. Anikin, V.I. Mitsiuk, Yu.S. Koshkid'ko, J. Ćwik, A.P. Kamantsev, E.E. Kokorina, K.A. Kolesov, V.G. Shavrov // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. – 2024. – V. 612. – P. 172612.
4. **Кузнецов, А.С.** Метамагнитный фазовый переход в соединении Mn_5Si_3 / А.С. Кузнецов, А.В. Маширов, И.И. Мусабилов, В.И. Митюк, А.В. Кошелев, К.А. Колесов, Р.Ю. Гайфуллин, В.В. Коледов, В.Г. Шавров // *Радиотехника и электроника*. – 2025. – Т. 70. – № 1. – С. 53–64.}.

В диссертации отсутствуют недостоверные сведения об опубликованных соискателем ученой степени работах.

На автореферат диссертации поступили отзывы из:

- Из ФГБОУ ВО «Челябинский государственный университет» от д. ф.-

м. н., профессора кафедры физики конденсированного состояния Соколовского В.В. **Отзыв положительный.** (Замечания: • Исходя из подписи к рисунку 3 и следующего за ним абзаца остается не ясным вопрос, о какой измеряемой величине идет речь – об адиабатическом изменении температуры или изотермическом выделении/поглощении тепла.; • На стр. 11 указано, что измерения магнитокалорического эффекта осуществлялись «с помощью дифференциальной медь-константановой микротермопары типа Т с диаметром проводов 50 мкм». Чем обусловлен выбор данного терморезистивного датчика?);

- Из Национального исследовательского центра «Курчатовский институт» от к. ф.-м. н., начальника лаборатории магнитных исследований Комлева А.С. **Отзыв положительный.** (Замечания: • В автореферате упомянуто, что автором проводилась оценка потерь на вихревые токи проводящего медного блока с разными скоростями ввода. Однако не приводится вывода о необходимости или несущественности учета данного явления в рассматриваемом диапазоне скоростей изменения поля; • На странице 14 утверждается, что для соединения $DuAl_2$ выполняется линейная зависимость изотермического выделения тепла от $(\mu_0 H)^{2/3}$ в области магнитных полей до 1,8 Тл. Хотя на Рисунке 3а приводятся экспериментальные результаты изотермического выделения тепла в полях до 14 Тл, в тексте не освещен вопрос о сохранении или нарушении обсуждаемого линейного закона в полях выше 1,8 Тл. Также в подписи к Рисунку 3 не совсем ясно, о чем идет речь – об адиабатическом изменении температуры или изотермическом выделении тепла.);
- Из ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» от к. ф.-м. н., заведующего научно-исследовательской лабораторией "Сверхпроводящие энергетические системы", доцента, ведущего научного сотрудника Института лазерных и плазменных технологий Покровского С.В. **Отзыв положительный.** (Замечания: • При построении магнитных фазовых диаграмм для соединений Mn_5Si_3 и $Mn_{1.75}Cu_{0.25}Sb$ критические поля и температуры определяются преимущественно по данным намагниченности. Вместе с тем, учитывая выраженный магнитоструктурный характер фазовых переходов первого рода, представляется желательным дополнить анализ данными по кристаллической структуре в магнитном поле (например, *in situ* рентгеновскими или нейтронными исследованиями), что позволило бы однозначно связать наблюдаемые фазовые состояния с изменениями симметрии кристаллической структуры; • В работе широко используется аппроксимация теплоёмкости в рамках линейной комбинации функций Зоммерфельда и Дебая. Однако вблизи фазовых переходов первого рода вклад магнитной подсистемы может существенно исказить классическое электрон-фононное разложение. Было бы полезно более подробно обсудить область применимости данной модели для Mn-содержащих соединений.);

- Из ФГАОУ ВО «Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта» от к. ф.-м. н., директора научно-образовательного центра «Умные материалы и биомедицинские приложения», доцента образовательно-научного кластера «Институт высоких технологий» Родионовой В.В. **Отзыв положительный.** (Замечания: • В автореферате кратко затронут вопрос сопоставления полученных значений относительной охлаждающей способности с характеристиками известных магнитокалорических материалов, что могло бы дополнительно подчеркнуть прикладную направленность работы; • Выбор концентрации $x = 0,25$ в соединении $Mn_{1,75}Cu_{0,25}Sb$ следовало дополнительно обосновать. Необходимо было пояснить, как это значение согласуется с общей логикой исследования и выбора составов в других бинарных системах, рассмотренных в работе).

Обоснование выбора официальных оппонентов и ведущей организации:

Марченков Вячеслав Викторович, доктор физико-математических наук, (специальность 01.04.07 – Физика конденсированного состояния), главный научный сотрудник, руководитель лаборатории низких температур Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физики металлов имени М.Н. Михеева Уральского отделения Российской академии наук (ИФМ УрО РАН) является признанным специалистом в области физики твердого тела, специализирующимся на исследованиях электронных и магнитных свойств металлов, сплавов и соединений на их основе при низких температурах в сильных магнитных полях.

Гамзатов Адлер Гудретдинович, кандидат физико-математических наук (специальность 01.04.07 – Физика конденсированного состояния), ведущий научный сотрудник Института физики им. Х.И. Амирханова - обособленного подразделения Федерального государственного бюджетного учреждения науки Дагестанского федерального исследовательского центра Российской академии наук является высококвалифицированным специалистом в области физики твердого тела, специализирующимся на исследованиях магнитокалорических и теплофизических свойств материалов.

Официальные оппоненты широко известны своими достижениями в данных отраслях науки, имеют многочисленные научные труды в рецензируемых научных журналах, способны определить актуальность, новизну, научную и практическую ценность оппонируемой диссертации.

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тверской государственный университет» (ФГБОУ ВО «Тверской государственный университет») известно своими разработками и исследованиями в области физики конденсированного состояния, в частности, уникальными результатами в изучении магнитных свойств редкоземельных сплавов, термомагнитных эффектов и физики сегнетоэлектриков, которые находят применение в создании инновационных сенсоров и экологичных систем охлаждения. Многочисленные работы его сотрудников в области оппонируемой диссертации свидетельствуют об их способности адекватно оценить результаты, представленные автором для

защиты.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований: в диссертационной работе получен ряд новых экспериментальных результатов. В частности, для изучаемого в работе соединения DyAl_2 обнаружено, что при температуре Кюри $T_C = 60$ К зависимость магнитокалорического эффекта в изотермических условиях ΔQ от величины $(\mu_0 H)^{2/3}$ является линейной в области магнитных полей от 0 до 1,8 Тл, при этом максимальная измеренная величина эффекта составляет $\Delta Q = 3,1$ кДж/кг при начальной температуре $T_0 = 71$ К в магнитном поле $\mu_0 H = 14$ Тл. Установлено, что в соединении Mn_5Si_3 магнитоиндуцированный фазовый переход 1-го рода между некопланарной антиферромагнитной фазой и неколлинеарной антиферромагнитной фазой в изотермических условиях сопровождается полевым гистерезисом. При намагничивании фазовый переход происходит в критическом поле $\mu_0 H_{C1} = 5,3$ Тл, а при размагничивании – в поле $\mu_0 H_{C1} = 3,5$ Тл при температуре $T = 20$ К. Кроме того, для соединения Mn_5Si_3 показано, что магнитокалорический эффект в адиабатических условиях демонстрирует инверсию знака при температуре $T_{in} = 59,3$ К в магнитном поле $\mu_0 H = 10$ Тл. Величины обратного и прямого эффектов достигают максимальных значений $\Delta T_{ad} = -2,1$ К при начальной температуре $T_0 = 32$ К и $\Delta T_{ad} = +0,9$ К при начальной температуре $T_0 = 62$ К, соответственно. Установлено, что в соединении $\text{Mn}_{1.75}\text{Cu}_{0.25}\text{Sb}$ фазовый переход 1-го рода из ферромагнитного в антиферромагнитное состояние блокируется магнитными полями выше $\mu_0 H = 5$ Тл при охлаждении от 300 К до 4 К.

Теоретическая значимость исследования: в работе исследованы структурные, магнитные и магнитокалорические свойства соединений, претерпевающих магнитные фазовые переходы 2-го рода – DyNi_2 , DyAl_2 и метамгнитоструктурные фазовые переходы 1-го рода – Mn_5Si_3 , $\text{Mn}_{1.75}\text{Cu}_{0.25}\text{Sb}$ при криогенных температурах. Результаты исследований изотермического выделения/поглощения тепла для соединения DyAl_2 получены впервые и расширяют представление о возможности применения данного образца в установках на основе твердотельного магнитного охлаждения. Результаты исследований структурных, магнитных и магнитокалорических свойств, а также особенности протекания магнитоструктурного фазового перехода 1-го рода в соединении $\text{Mn}_{1.75}\text{Cu}_{0.25}\text{Sb}$ получены впервые и расширяют знания о фазовой диаграмме состояний системы твердых растворов $\text{Mn}_{2-x}\text{Cu}_x\text{Sb}$, что позволяет упростить поиск перспективных составов среди материалов для применения в магнитном охлаждении. Полученные результаты существенно расширяют фундаментальные представления о природе фазовых переходов, а также об особенностях взаимосвязи магнитных и магнитокалорических свойств в системах на основе редкоземельных и переходных металлов.

Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что: результаты систематического исследования адиабатического изменения температуры, изотермического поглощения/выделения тепла и циклической стабильности прямыми методами в

сильных магнитных полях в материалах с фазового перехода 1-го (соединения Mn_5Si_3 и $Mn_{1.75}Cu_{0.25}Sb$) и 2-го рода (соединения $DyNi_2$, $DyAl_2$), позволяют количественно оценить рабочие параметры устройств на основе твердотельного магнитного охлаждения за один термодинамический цикл: разность температур, передаваемое количество теплоты, необратимые потери тепла, максимальную частоту и мощность. Особенности метамагнитоструктурного фазового перехода 1-го рода в системе $Mn_{1.75}Cu_{0.25}Sb$ и обнаруженный экспериментально, знакопеременный магнитокалорический эффект в соединении Mn_5Si_3 , открывает потенциал управления их магнитным состоянием для применения в спинтронных устройствах.

Оценка достоверности результатов исследования выявила: проведение исследований кристаллической структуры осуществлялось традиционным методом рентгеновской дифракции с помощью порошкового дифрактометра D8 Advance (Bruker) с использованием Cu-K α излучения. Однофазность синтезированных образцов подтверждалась методом рентгеноструктурного анализа, а химический состав и однородность проверялись методами элементного и микроструктурного анализа. В рамках исследований магнитных и магнитотепловых свойств, аттестация образцов осуществлялась современными методами с использованием вибрационных магнитометров PPMS-9T Quantum Design с приставкой P525 VSM и CFMS Cryogenic Ltd с приставкой 14T CFM VSM. В работе, кроме стандартных методов, использован оригинальный экспериментальный метод прямого измерения магнитокалорического ΔT – эффекта с помощью криомагнитной системы на основе сверхпроводящих соленоидов в полях величиной до 10 Тл и одновременного измерения магнитокалорических ΔT – и ΔQ – эффектов с помощью установки на основе биттеровского магнита в полях величиной до 14 Тл.

Достоверность представленных в диссертационной работе результатов обеспечивается использованием высокочистых исходных металлов, аттестацией полученных образцов и подтверждается воспроизводимостью результатов, которые не противоречат данным, известным из научной литературы. В расчетах использованы корректные физические модели и математические методы, которые соответствуют полученным экспериментальным результатам.

Основные результаты диссертационного исследования были опубликованы в ведущих международных и российских журналах, а также апробированы на специализированных всероссийских и международных конференциях.

Личный вклад соискателя состоит в том, что все материалы и результаты, вошедшие в данную диссертационную работу, подготовлены лично автором или при его непосредственном участии.

Диссертация соответствует шифру специальности 1.3.12. «Физика магнитных явлений» по пункту 3 «Экспериментальные исследования магнитных свойств и состояний веществ различными методами, установление взаимосвязи этих свойств и состояний с химическим составом и структурным состоянием, выявление закономерностей их изменения под влиянием различных внешних воздействий» и по пункту 4 «Исследование изменений различных физических свойств вещества, связанных с изменением их магнитных состояний и магнитных свойств»

В ходе защиты диссертации критических замечаний высказано не было. На все заданные в ходе заседания вопросы Кузнецов А.С. дал аргументированные ответы.

На заседании 20 марта 2026 г. диссертационный совет за решение научной задачи, развивающей представления о магнитных фазовых переходах и магнитокалорических свойствах соединений на основе редкоземельных и переходных металлов в сильных магнитных полях, имеющей значение для развития фундаментальных знаний в области физики магнитных явлений, принял решение присудить Кузнецову А.С. ученую степень кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.12 – Физика магнитных явлений.

При проведении тайного голосования участвующие в заседании члены диссертационного совета в количестве 17 человек, из которых 7 докторов наук по специальности рассматриваемой диссертации, участвовавших в заседании, из общего числа 19 человек, входящих в состав совета, проголосовали: за – 17, против – 0, недействительных бюллетеней – 0.

Заместитель председателя диссертационного совета,
доктор физико-математических наук, академик РАН

С.А. Никитов

Ученый секретарь диссертационного совета, доктор
физико-математических наук

И.Е. Кузнецова



20 марта 2026 г. -