

## ОТЗЫВ

официального оппонента Марченкова Вячеслава Викторовича на диссертационную работу Кузнецова Александра Сергеевича на тему «Магнитные фазовые переходы и магнитокалорический эффект в соединениях на основе Dy и Mn в сильных магнитных полях», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.12 – «Физика магнитных явлений»

Диссертационная работа Кузнецова Александра Сергеевича посвящена комплексному экспериментальному исследованию перспективных магнитокалорических материалов на основе диспрозия и марганца. В рамках выполненного исследования изучались соединения  $DyNi_2$ ,  $DyAl_2$ ,  $Mn_5Si_3$  и  $Mn_{1.75}Cu_{0.25}Sb$ , представляющие интерес с точки зрения их возможного применения в устройствах твердотельного магнитного охлаждения. Основное внимание в работе уделено прямым измерениям магнитокалорического эффекта и комплексному анализу взаимосвязи между кристаллической структурой, характером магнитных превращений и физическими свойствами изучаемых материалов. Подобные исследования представляют большой фундаментальный и практический интерес и являются весьма актуальными. Надо отметить, что магнитокалорические характеристики подобных материалов в значительной степени определяются особенностями магнитных фазовых переходов, однако соответствующие экспериментальные данные, особенно в области криогенных температур, в научной литературе до настоящего исследования были представлены фрагментарно. Тема настоящей диссертации является **актуальной**, а поставленная в диссертационной работе цель и сформулированные задачи обладают несомненной научной новизной и практической значимостью.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка использованной литературы.

**Во введении** диссертационной работы обоснована актуальность выбранной научной темы, проведен анализ текущего состояния дел и существующих в данной предметной области проблем и нерешенных вопросов, сформулированы цель и задачи, научная новизна, научная и практическая значимость, изложены основные положения, выносимые на защиту.

**Первая глава** содержит литературный обзор современного состояния исследований в области магнитных и магнитоструктурных фазовых переходов. Подробно представлены термодинамические соотношения магнитокалорического эффекта, а также методы прямого и косвенного определения его интегральных величин. Проведён анализ известных в научной литературе сведений по структурным, магнитным и магнитокалорическим свойствам соединений, которые представляют интерес для применения в технологии твердотельного магнитного охлаждения. Это интерметаллиды  $DyMe_2$  (где  $Me = Fe, Co, Ni, Al$ ), соединения  $Mn_5Si_3$  и твёрдые растворы на основе  $Mn_2Sb$ . В завершении главы обозначены существующие проблемы в рамках исследований для рассматриваемых модельных объектов.

**Вторая глава** посвящена описанию объектов исследования, методам их синтеза и аттестации. Рассмотрены методы измерения температурных и полевых зависимостей намагниченности на вибрационных магнитометрах, а также методики измерения теплоёмкости. Подробно описаны оригинальные экспериментальные методы прямого измерения магнитокалорического эффекта экстракционным способом. В завершении главы описаны косвенные методы расчётов магнитокалорического эффекта по данным магнито- и термометрии и проведена оценка влияния токов Фуко на экспериментальные результаты при использовании экстракционного способа.

**В третьей главе** представлены результаты экспериментальных исследований кристаллической структуры, магнитных и магнитокалорических свойств синтезированных соединений  $\text{DyNi}_2$  и  $\text{DyAl}_2$ . По температурным и полевым зависимостям намагниченности определены температуры магнитного упорядочения и магнитные моменты в пара- и ферромагнитном состояниях. Следует отметить результаты прямых измерений магнитокалорических  $\Delta T$ - и  $\Delta Q$ -эффектов для соединения  $\text{DyAl}_2$  в магнитных полях до 14 Тл, согласно которым выполняется линейная зависимость  $\Delta Q$  от  $(\mu_0 H)^{2/3}$  в области магнитных полей до 1,8 Тл. Последняя часть главы посвящена сравнительному анализу и оценке относительной охлаждающей способности, как показателя потенциального применения изученных соединений в качестве рабочих тел для установок магнитного охлаждения.

**Четвёртая глава** посвящена результатам экспериментальных исследований кристаллической структуры, магнитных и магнитокалорических свойств соединений  $\text{Mn}_5\text{Si}_3$  и  $\text{Mn}_{1.75}\text{Cu}_{0.25}\text{Sb}$ . Построена магнитная фазовая  $\mu_0 H$ - $T$  диаграмма соединения  $\text{Mn}_5\text{Si}_3$ , отражающая существование антиферромагнитной фазы с неколлинеарной магнитной структурой, формирование которой сопровождается гистерезисом и зависит от протокола измерений. Это установлено автором впервые. Кроме того, для соединения  $\text{Mn}_{1.75}\text{Cu}_{0.25}\text{Sb}$  показано, что температурная зависимость намагниченности в магнитном поле 5 Тл демонстрирует эффект кинетической блокировки низкотемпературной антиферромагнитной фазы при охлаждении от 300 К до 4 К. Приводятся результаты магнитокалорического  $\Delta T$ -эффекта для исследуемых соединений в сильных магнитных полях до 10 Тл, а также результаты циклических испытаний обратного магнитокалорического эффекта для соединения  $\text{Mn}_{1.75}\text{Cu}_{0.25}\text{Sb}$  в области температур метамгнитоструктурного фазового перехода 1-го рода с различной частотой включений в поле 5 Тл. В рамках анализа потенциального применения соединений для устройств на основе магнитного охлаждения показано, что соединение  $\text{Mn}_{1.75}\text{Cu}_{0.25}\text{Sb}$  является более перспективным по сравнению с  $\text{Mn}_5\text{Si}_3$ .

**В заключении** сформулированы основные результаты диссертационной работы.

В работе получен ряд новых результатов, из которых можно выделить наиболее важные и интересные, определяющие научную новизну работы:

- проведены прямые измерения температурных зависимостей адиабатического изменения температуры  $\Delta T_{\text{ad}}(T)$  и изотермического выделения/поглощения тепла  $\Delta Q(T)$  в соединении  $\text{DyAl}_2$ , выполненные в области температур магнитного фазового перехода в магнитных полях до 14 Тл;

- выполнены прямые измерения величины адиабатического изменения температуры  $\Delta T_{ad}$  в соединениях  $Mn_5Si_3$  и  $Mn_{1.75}Cu_{0.25}Sb$  в области температур магнитных фазовых переходов в магнитных полях до 10 Тл. Установлено, что величина  $\Delta T_{ad}$  соединения  $Mn_5Si_3$  претерпевает инверсию знака. Определена температура инверсии ( $T_{in}$ );
- выполнена теоретическая интерпретация экспериментальных кривых теплоемкости соединения  $Mn_5Si_3$  в рамках линейной комбинации функций Зоммерфельда и Дебая. Определена температура Дебая ( $\Theta_D$ ) и коэффициент электронной теплоемкости ( $\gamma$ ). Установлены относительные доли вкладов электронной, фононной и магнитной подсистем в полную величину теплоемкости;
- уточнены значения критических магнитных полей на магнитной фазовой  $\mu_0H, T$  – диаграмме соединения  $Mn_5Si_3$ , при которых существует промежуточная антиферромагнитная фаза (АФ1') с неколлинеарной магнитной структурой. Установлено, что переход из АФ1' в некопланарную антиферромагнитную (АФ1) структуру сопровождается гистерезисом по магнитному полю;
- проведены измерения температурных  $M(T)$  и полевых  $M(\mu_0H)$  зависимостей намагниченности соединения  $Mn_{1.75}Cu_{0.25}Sb$ . Показано, что в полях выше 5 Тл происходит блокировка образования антиферромагнитной фазы при охлаждении. Построена магнитная фазовая  $\mu_0H, T$  – диаграмма. Охарактеризована и количественно определена область метастабильного состояния, в котором сосуществуют ферри- и антиферромагнитная фазы.

**Практическая значимость** диссертационной работы определяется результатами прямых экспериментальных измерений магнитокалорического эффекта соединений  $DyAl_2$ ,  $DyNi_2$ ,  $Mn_5Si_3$  и  $Mn_{1.75}Cu_{0.25}Sb$  в сильных магнитных полях, что позволяет количественно определить ключевые рабочие параметры для материалов с фазовыми переходами 1-го и 2-го рода: разность температур, передаваемую теплоту, потери и мощность за единичный цикл. Обнаруженные особенности фазовых переходов в  $Mn_5Si_3$  и  $Mn_{1.75}Cu_{0.25}Sb$ , включая знакопеременный магнитокалорический эффект, открывают перспективы для управления магнитным состоянием в спинтронных устройствах.

Полученные автором результаты по исследованию магнитокалорических свойств соединений на основе Dy и Mn в условиях сильных магнитных полей расширяют существующие представления о физических механизмах магнитных фазовых превращений и могут быть использованы для последующих разработок новых магнитокалорических материалов.

**Достоверность** полученных в диссертационной работе результатов обеспечивалась использованием высокочистых исходных материалов, аттестацией исследуемых образцов и воспроизводимостью экспериментальных данных, а также их согласованностью с известными литературными результатами. В расчётах применялись корректные физические модели и адекватные математические методы, соответствующие экспериментальным данным.

Материалы и основные результаты диссертационной работы прошли апробацию на 11 всероссийских и международных конференциях. По теме исследования опубликовано 5 научных статей в изданиях, индексируемых в международных реферативных базах данных

Scopus и Web of Science, а также входящих в перечень изданий, рекомендованных ВАК и индексируемых базой данных RSCI.

Личный вклад автора диссертации заключается в участии в постановке цели и задач, в выборе объектов и методов исследований, проведении большинства экспериментов, создании необходимых конфигураций измерительных вставок, обработке полученных экспериментальных данных, выполнении теоретической интерпретации полученных результатов, участии в написании статей и тезисов докладов с последующим их представлением на различных конференциях.

Вместе с тем, к работе имеются следующие **вопросы и замечания**:

1. В главе 3 сообщается о понижении величин адиабатического изменения температуры и изотермического изменения энтропии при замещении Ni на Al в исследуемых соединениях  $DyNi_2$  и  $DyAl_2$ . При этом автор безальтернативно объясняет наблюдаемые изменения «ослаблением косвенного обменного взаимодействия локализованных магнитных моментов  $R$ -подрешетки». В выводах к главе 3 добавляется еще одно объяснение, связанное с «меньшим перекрытием  $4f$ -состояний на уровне Ферми». Для доказательства этого, желательно выполнить расчеты электронной структуры этих соединений или привести соответствующие литературные данные.
2. В главе 4 утверждается, что плотность электронных состояний  $N(E_F)$  на уровне Ферми в соединении  $Mn_5Si_3$  уменьшается с ростом магнитного поля. Этот вывод сделан на основе анализа температурных зависимостей коэффициентов  $A(T)$  и  $B(T)$ , которые являются коэффициентами разложения в модели Иное-Шимизу. Известны ли автору данные расчетов плотности электронных состояний для соединения  $Mn_5Si_3$  или родственных систем, из которых следует, что « $N(E_F)$  на уровне Ферми уменьшается с увеличением поля»?
3. Данная диссертация представляет собой большой научный труд, который, как и многие подобные работы, не лишен технических погрешностей в виде грамматических и стилистических ошибок, опечаток и опечаток. Приведем некоторые из них. Напр., на стр. 70 пропущена буква «х» - «... в магнитных поля...»; опечатки на стр. 89 «... для образца ...» и на стр. 105 «фзаы» вместо «фазы»; в списке литературы названия многих сплавов и соединений приведены без учета подстрочных индексов и т.п.

Указанные замечания не снижают общую положительную оценку диссертационной работы как актуального научного исследования. Все сформулированные в диссертации научные положения, выводы и рекомендации полностью научно обоснованы, являются новыми и достоверными.

Автореферат диссертации полностью соответствует требованиям п. 25 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», его содержание полностью отражает основное содержание диссертации.

В целом можно сказать, что диссертация Кузнецова А.С. является логически завершенным исследованием, которое выполнено на высоком научно-методическом уровне. Изложение материала отличается ясностью и последовательностью, композиция работы логична и целостна. Все представленные результаты полностью отвечают сформулированным цели и задачам исследования.

На основании изложенного можно заключить, что представленная диссертационная работа «Магнитные фазовые переходы и магнитокалорический эффект в соединениях на основе Dy и Mn в сильных магнитных полях» по объёму проведённых исследований и важности полученных результатов удовлетворяет всем требованиям пп. 9-11, 13-14 Постановления Правительства РФ № 842 от 24 сентября 2013 г (в текущей редакции) «Положения о порядке присуждения ученых степеней», предъявляемым к кандидатским диссертациям, а её автор – Кузнецов Александр Сергеевич заслуживает присуждения ему учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.12 – «Физика магнитных явлений».

**Официальный оппонент,**

доктор физико-математических наук (специальность 01.04.07 – «Физика конденсированного состояния»), главный научный сотрудник, заведующий лабораторией низких температур Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт физики металлов им. М.Н. Михеева Уральского отделения Российской академии наук.

«26» февраля 2026 г.

 Марченков Вячеслав Викторович

**Контактная информация:**

Институт физики металлов им. М.Н. Михеева Уральского отделения Российской академии наук

Адрес: 620108, г. Екатеринбург, ул. Софьи Ковалевской, д. 18

Телефон: +7 (343) 374-53-83

e-mail: [march@imp.uran.ru](mailto:march@imp.uran.ru)

Я, Марченков Вячеслав Викторович, даю согласие на включение своих персональных данных, содержащихся в настоящем отзыве, в документы, связанные с защитой диссертации Кузнецова Александра Сергеевича, и их дальнейшую обработку.

 Марченков Вячеслав Викторович

Подпись Марченкова В.В. заверяю  
Ученый секретарь ИФМ УрО РАН  
кандидат физ.-мат. наук





И.Ю. Арапова

**Сведения об официальном оппоненте**  
по диссертации Кузнецова Александра Сергеевича  
«Магнитные фазовые переходы и магнитокалорический эффект в соединениях на основе Dy  
и Mn в сильных магнитных полях»  
по специальности 1.3.12 – физика магнитных явлений  
на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук

Фамилия, имя, отчество	Марченков Вячеслав Викторович
Гражданство	РФ
Ученая степень (полностью)	доктор физико-математических наук
Научная специальность, по которой защищена диссертация	01.04.07 – физика конденсированного состояния
Ученое звание	старший научный сотрудник
Полное наименование организации в соответствии с уставом	Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики металлов имени М.Н. Михеева Уральского отделения Российской академии наук
Сокращенное наименование организации в соответствии с уставом	ИФМ УрО РАН
Ведомственная принадлежность организации	Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Структурное подразделение	Лаборатория низких температур
Должность	главный научный сотрудник, заведующий лабораторией
Почтовый индекс, адрес организации	620108, г. Екатеринбург, ул. С. Ковалевской, д. 18.
Веб-сайт	<a href="http://www.imp.uran.ru/">http://www.imp.uran.ru/</a>
Телефон	+7 (343) 374-53-83
Адрес электронной почты	march@imp.uran.ru
Список основных публикаций в рецензируемых изданиях, монографии, учебники за последние пять лет по теме диссертации (не более 15 публикаций)	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Vyacheslav V. Marchenkov, Alena A. Semiannikova, Evgenii D. Chernov, Alexey V. Lukoyanov, Valentin Yu. Irkhin, Yulia A. Perevozchikova, Elena B. Marchenkova. Co<sub>2</sub>MnZ (Z = Al, Si, Ga, Ge, Sn) Heusler alloys as candidate materials for spintronic and microelectronic applications: Electronic structure, transport, and magnetism. Solid State Sciences. — 2026. — V. 172. — P. 108155—108165.</li> <li>2. V.V. Sokolovskiy, M.V. Matyunina, V.D. Buchelnikov, V.V. Marchenkov. Magnetocaloric Effect: Optimization Problems and Solutions. New Magnetic Materials. Physics of Metals and Metallography (english only). — 2025. — V. 126 – No. 9. — P. 991—995.</li> <li>3. П.А. Игошев, В.Ю. Ирхин, С.М. Емельянова, В.В. Марченков. Магнитокалорический эффект и фазовое расслоение в сплавах Ni<sub>50</sub>Mn<sub>35</sub>Sb<sub>15-x</sub>Ge<sub>x</sub> (x</li> </ol>

- = 0, 2, 3). Челябинский физико-математический журнал. — 2025. — V. 10 – No. 2. — С. 236—244.
4. E.D. Chernov, A.N. Filanovich, E.I. Shreder, V.V. Marchenkov, L.A. Stashkova, A.V. Lukoyanov. New insights into the crystal structure and physical properties of the antiferromagnetic  $Mn_2MAI$  ( $M=Fe, Co, Ni$ ) alloys. Applied Physics A. Materials Science & Processing. — 2024. — V. 130. — P. 783—793.
  5. В.В. Соколовский, М. А. Загребин, В.Д. Бучельников, В.В. Марченков. Современные магнитокалорические материалы: существующие проблемы и перспективы исследований. Физика металлов и металловедение. — 2023. — V. 124 – No. 11. — P. 1019—1024.
  6. Vyacheslav V. Marchenkov, Valentin Yu. Irkhin. Magnetic States and Electronic Properties of Manganese-Based Intermetallic Compounds  $Mn_2YAl$  and  $Mn_3Z$  ( $Y = V, Cr, Fe, Co, Ni$ ;  $Z = Al, Ge, Sn, Si, Pt$ ). Materials. — 2023. — V. 16. — P. 6351—6370.
  7. V.V. Marchenkov, S.M. Emelyanova, E.B. Marchenkova. Martensitic transformation temperatures and Hall effect in  $Ni_{47-x}Mn_{41+x}In_{12}$  ( $x = 0, 1, 2$ ) alloys. Materials. — 2023. — V. 16. — P. 672—683.



В.В. Марченков

Ученый секретарь  
ИФМ УрО РАН  
к.ф.-м.н.



И.Ю. Арапова

« 26 » февраля 2026 г.

