

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
имени М.В. ЛОМОНОСОВА

*На правах рукописи*

**Амиров Абдулкарим Абдулнатипович**

**Калорические эффекты в мультиферроиках**

Специальность 1.3.12. Физика магнитных явлений

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени

доктора физико-математических наук

Москва – 2025

Диссертация подготовлена в образовательно-научном кластере «Институт высоких технологий» Балтийского федерального университета имени Иммануила Канта

**Научный консультант** – **Тишин Александр Метталинович**, доктор физико-математических наук, профессор

**Официальные оппоненты** – **Мушников Николай Варфоломеевич**, доктор физико-математических наук, академик РАН, Институт физики металлов имени М.Н. Михеева Уральского отделения Российской академии наук, директор

**Пирогов Юрий Андреевич**, доктор физико-математических наук, профессор, Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, физический факультет, кафедра медицинской физики, профессор

**Фетисов Леонид Юрьевич**, доктор физико-математических наук, доцент, МИРЭА – Российский технологический университет, Институт перспективных технологий и индустриального программирования, кафедра наноэлектроники, профессор

Защита диссертации состоится «**2**» **октября 2025 г. в 15 часов 20 минут** на заседании диссертационного совета МГУ.013.5 Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова по адресу: 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 8, криогенный корпус, конференц-зал.

E-mail: [perov@magn.ru](mailto:perov@magn.ru)

С диссертацией можно ознакомиться в отделе диссертаций научной библиотеки МГУ имени М.В. Ломоносова (Ломоносовский просп., д. 27) и на портале: <https://dissovet.msu.ru/dissertation/3445>

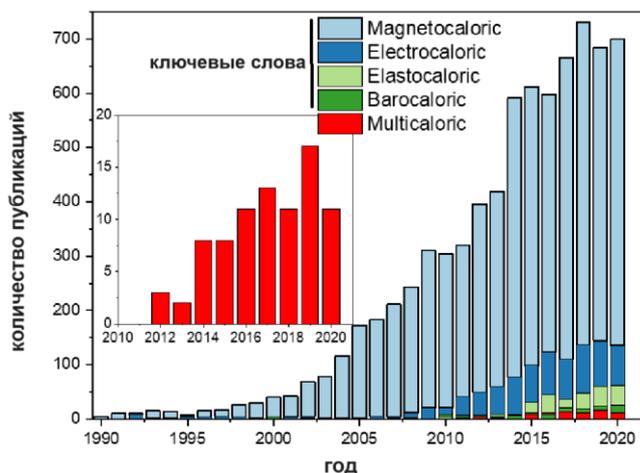
Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2025 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
кандидат физико-математических наук

Т.Б. Шапаева

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

На сегодняшний день, интерес к разработке новых систем охлаждения, как энергоэффективной и экологически безопасной альтернативы традиционным системам, по-прежнему актуален и востребован среди исследователей. Известно, что одним из перспективных подходов для решения



**Рисунок 1.** Диаграмма количества научных публикаций по годам, полученных из поисковых запросов в наукометрической базе данных Web of Science (ранее -Web of Knowledge); запросы выполнены по ключевым словам: «magnetocaloric», «electrocaloric», «barocaloric», «elastocaloric» и «multicaloric» [A33].

сохраняется повышенный интерес (Рисунок 1) [1-5]. Известны магнитокалорический (МКЭ) [1], электрокалорический (ЭКЭ)[4] и механокалорический (МехКЭ) [5] эффекты, природа которых заключается в изменении температуры (или энтропии) при изменении приложенных внешних полей (магнитных, электрических или упругих), соответствующих каждому из КЭ. Наиболее известными видами МехКЭ являются барокалорический (БКЭ) и эластокалорический (ЭлКЭ), природа которых связана с конкретным типом приложенного механического воздействия (изотропное или одноосное) [5]. Известны также относительно «экзотические» типы МехКЭ, такие как флексокалорический («flexocaloric») и твистокалорический («twistocaloric») эффекты, возникающие в результате

данной проблемы является твердотельное охлаждение, основанное на использовании в качестве рабочего тела твердотельные соединения. В контексте твердотельного охлаждения, использование в качестве рабочих тел материалов с «гигантскими» калорическими эффектами (КЭ) различной природы в последние десятилетия рассматривается перспективным и к исследованию таких материалов

приложения изгибной или скручивающей механической нагрузки, которые на сегодняшний день недостаточно изучены и менее распространены среди исследователей по сравнению с другими КЭ. Исследования КЭ на сегодняшний день развиваются самостоятельно как отдельные направления, и разработаны различные прототипы систем охлаждения на основе МКЭ, ЭКЭ и МехКЭ. В данном направлении относительно молодым и многообещающим является мультикалорический подход, основанный на комбинированном воздействии двух или более внешних полей различной природы. Явления, основанные на наблюдении КЭ в результате таких комбинированных воздействий, получили название мультикалорические эффекты (МультиКЭ), а материалы, в которых наблюдаются эти эффекты, называются мультикалорическими. Прикладной интерес к исследованию МультиКЭ прежде всего связан с поиском более эффективных термодинамических систем твердотельного охлаждения, в которых в качестве рабочих тел используются мультикалорические материалы [6]. Стоит отметить, что соединения, в которых наблюдаются мультикалорические эффекты (МультиКЭ) могут быть отнесены к мультиферроикам (multiferroics) – известному классу перспективных материалов. Это в первую очередь связано с тем, что наблюдение в этих материалах КЭ или МультиКЭ подразумевает сосуществование соответствующего типа известных ферроупорядочений: (ферромагнитного (ferromagnetic), сегнетоэлектрического (ferroelectric) и сегнетоэластического (ferroelastic)) [7]. В таком рассмотрении мультикалорические материалы или же мультикалорики могут быть отнесены к мультиферроидным системам с применением термодинамического подхода для описания КЭ, соответствующего каждому из типов ферроупорядочений. Стоит отметить, что на сегодняшний день одиночные КЭ хорошо изучены и развиваются как самостоятельные направления: предложено большое количество прототипов различных систем охлаждения на основе этих эффектов. Тем не менее, несмотря на достаточную **разработанность** данной

темы, проблема изучения природы КЭ при комбинации нескольких типов внешних воздействий, которые относятся к МультиКЭ, остается **актуальной** и малоизученной. Обзор работ по мультикалорическим материалам и эффектам не позволяет сделать вывод о комплексном и систематичном характере их исследований: достаточно большая часть работы посвящена теоретическому описанию мультикалорических явлений без подтверждения с помощью экспериментов, а ряд экспериментальных работ посвящен исследованию отдельного соединения. Также можно отметить, что отсутствует комплексный подход к изучению данной проблемы с использованием определенной систематизации материалов как по составу, так и по типу взаимодействий в них. Отдельный научный интерес в исследовании мультикалорических материалов представляет стрейнтроника – новое направление в физике, основанное на деформационной инженерии в основе которого лежит изучение физических эффектов, наведенных механическими деформациями в твердых телах [8]. Так, например, изменение параметров кристаллической структуры под действием механического напряжения быть рассмотрено как один из параметров порядка, при этом само механическое воздействие может быть использовано для управления магнитными материалами, что находится в основании магнитной стрейнтроники. При этом связь механического воздействия с магнитными и электрическими подсистемами материала лежит в основе природы мультиферроиков и активно исследуется в настоящее время [9]. Подходы, основанные на комбинации магнитного поля и механического напряжения, имеют огромный фундаментальный научный интерес для изучения материалов с фазовыми переходами (ФП) I рода, которые чувствительны к данному рода внешним воздействиям и могут быть актуальны для поиска и решения поиск способов контроля гистерезисными эффектами – одной из ключевых прикладных проблем магнетизма [10]. Резюмируя, можно отметить, что исследования

калорических и мультикалорических эффектов в мультиферроидных системах имеют как фундаментальную, так и прикладную значимость.

**Целью диссертационной работы** является выявление новых эффектов и комплексное исследование физических механизмов, влияющих на природу калорических и мультикалорических эффектов в области температур фазовых переходов в мультиферроидных материалах под одиночным или комбинированным воздействием внешних полей различной природы (магнитное, электрическое и механическое).

Для достижения цели, поставленной в рамках диссертационного исследования, были решены следующие **задачи**:

- анализ современного состояния исследований калорических и мультикалорических эффектов, а также актуализация основных трендов в их исследованиях. Систематизация мультикалорических материалов и выбор стратегии комплексных исследований их свойств. Разработка новых технологических подходов получения мультикалорических материалов и экспериментальных методов их исследования, а также модификация текущих;
- разработка новых экспериментальных установок и устройств, позволяющих изучать воздействия различных внешних полей на мультикалорические материалы;
- разработка расчетных моделей, описывающих калорические и мультикалорические эффекты в однофазных оксидных мультиферроиках с магнитоэлектрическим (МЭ) типом взаимодействия в области температур магнитного фазового перехода;
- исследование калорических и мультикалорических эффектов в «природных» мультиферроиках с ферромагнитным (ФМ) и ферроупругим упорядочениями под одиночным или комбинированным воздействием магнитного поля и механической нагрузки;

- изучение влияния магнитоэлектрического взаимодействия на калорические и мультикалорические эффекты в композитных мультиферроиках с различными типами связности компонент;
- поиск и демонстрация прикладных возможностей материалов с калорическими и мультикалорическими эффектами для различных практических приложений.

#### **Положения, выносимые на защиту:**

1. В оксидных мультиферроиках на основе  $BiFeO_3$  в области температур магнитного фазового перехода демонстрируют максимумы не только МКЭ, но и ЭКЭ, которые связаны с магнитоэлектрическим взаимодействием в данной области.
2. Постоянное гидростатическое давление до 12 кбар, приложенное к сплаву  $Fe_{49}Rh_{51}$ , не способно заметно усилить МКЭ, но позволяет управлять температурой максимума МКЭ.
3. Комбинированное приложение магнитного поля 1 Тл и одноосного растяжения 104 МПа в сплаве  $Fe_{48}Rh_{52}$  позволяет увеличить общий калорический эффект на ~17 % по сравнению с МКЭ при приложении только 1 Тл магнитного поля, а наблюдаемый при этом мультикалорический эффект не является математической суммой одиночных КЭ.
4. В керамических мультикалорических композитах смесового типа использование микрочастиц ферромагнитных и сегнетоэлектрических компонент с близкими друг другу температурами фазовых переходов, а также комбинации магнитного и электрического полей, позволяет усилить общий КЭ на ~34 % по сравнению с МКЭ при аналогичном значении приложенного магнитного поля.
5. В керамических МЭ композитах цилиндрического типа  $MnAs/PZT$  электрическое поле ~0,3 кВ/мм за счет обратного пьезоэффекта способно создавать квазиизостатическое сжатие ~3 МПа и управлять величиной

МКЭ  $MnAs$  в области магнитоструктурного фазового перехода  $\sim 317$  К при изменении магнитного поля на 1,8 Тл.

6. В пьезополимерных мультикалорических композитах с типом связности 0-3 магнитокалорические и магнитоэлектрические эффекты взаимосвязаны, при этом магнитокалорический эффект имеет вклады от магнитоэлектрического и пьезоэлектрического эффектов, которые возникают в результате межфазного взаимодействия.
7. Количество теплоты поглощаемой или выделяемой в результате МКЭ при изменении магнитного поля до 8 Тл в «умных» композитах, состоящих из слоя термочувствительного полимера, поли(N-изопропилакриламид), нанесенного на подложку из магнитокалорического материала, способно индуцировать в полимерном слое толщиной  $\leq 120$  мкм фазовый переход в области  $\sim 32$  °С и обратимо управлять его физико-химическими свойствами. Наблюдаемый эффект перспективен для биомедицинских приложений по магнитоуправляемому сбросу лекарственных средств.
8. Комбинация снятия магнитного поля 0,31 Тл и приложения одноосного механического сжатия 19 МПа в магнитном материале с ФП I рода - сплаве  $LaFe_{11.4}Mn_{0.3}Si_{1.3}H_{1.6}$  приводит к увеличению адиабатического изменения температуры на  $\sim 46$  % по сравнению с использованием одиночного воздействия - магнитного поля аналогичной величины.

**Научная новизна.** Научные результаты, полученные в ходе выполнения диссертационной работы, являются новыми:

1. Усовершенствована расчетная модель для оценки магнитокалорических параметров в области температур магнитных фазовых переходов типа «антиферромагнетик-парамагнетик» и «слабый ферромагнетик-антиферромагнетик» в оксидных мультиферроиках на основе феррита висмута  $BiFeO_3$ . Расчетные оценки изменения магнитной энтропии выполнены на серии образцов мультиферроиков  $BiFeO_3$  с различным

типом замещения  $V_i$  на основе экспериментальных данных магнитных измерений.

2. Впервые получены и исследованы керамические мультикалорические композиты типа связности 0-3 из смесей в выбранном соотношении магнитных и сегнетоэлектрических частиц с высокими значениями калорических эффектов в области комнатной температуры. Продемонстрированы возможности взаимного управления калорическими эффектами и наблюдения синергетического эффекта в такого типа композитах при соответствующем выборе протокола приложения магнитного и электрического полей.
3. Получены новые экспериментальные результаты по исследованию кинетики магнитного фазового перехода и мультикалорических эффектов в сплавах  $FeRh$  под комбинированным воздействием двух внешних полей: 1) гидростатического давления и магнитного поля и 2) одноосного растяжения и магнитного поля. В первом случае P-T диаграмма расширена до 12 кбар, ранее известные значения примененных для мультикалорических исследований значений давлений были ограничены 5 кбар [11]. Результаты прямых измерений мультикалорических эффектов при приложении магнитного поля и одноосного растяжения получены впервые. Разработанная для этих измерений экспериментальная установка является оригинальной и может быть модернизирована для прямых измерений мультикалорических эффектов на новых объектах исследования.
4. Были изготовлены и исследованы новые мультикалорические полимерные композиты двух типов: цилиндрические (с типом связности 1-3) и смесевые (тип связности 0-3). Исследованные объекты получены впервые, в них в качестве магнитных компонент использованы магнитные микропровода (тип 1-3) и микрочастицы (тип 0-3) с выраженными в области комнатной температуры магнитокалорическими свойствами, а в

качестве несущей матрицы использован пьезоэлектрический полимер поливинилденфторида.

5. Впервые экспериментально в режиме *in situ* продемонстрирована возможность управления состоянием термочувствительного полимера через магнитокалорический эффект для контролируемого сброса лекарственного средства. Используя в качестве тестового образца «умный» композит, состоящий из термочувствительного полимера – поли-N-изопропилакриламид, нанесенного на подложку гадолиния *Gd*, показана возможность обратимого контроля физико-химическими свойствами полимера путем разового включения или выключения магнитного поля. Предложенная концепция может быть использована для создания новых «умных» композитных материалов путем подбора соответствующих компонент: магнитокалорического сплава и термочувствительного полимера.

В целом, полученные результаты исследований вносят значительный вклад в понимание особенностей поведения материалов под комбинацией различных внешних воздействий и могут рассматриваться как перспективное направление исследований в магнетизме и физике фазовых переходов.

**Практическая значимость.** Результаты, представленные в данной диссертации, определенно будут востребованы среди исследователей, занимающихся исследованием калорических и мультикалорических эффектов и материалов для твердотельных систем охлаждения, работающих на их основе. Например, полученные в **параграфе 8.2** результаты могут быть актуальны для развития работ по созданию более эффективной мультикалорической системы охлаждения, призванной решить имеющиеся проблемы в повышении эффективности более известного магнитокалорического холодильника, такие как дороговизна постоянных магнитов, гистерезисные эффекты и др. Полученные в **параграфах 8.3 и 8.4** результаты демонстрируют перспективы применения мультикалориков в

нетрадиционных для этих материалов областях. Так, например, полученные **параграфе 8.3** результаты будут востребованы в исследованиях по поиску новых «умных» композитных материалов, управляемых магнитным полем для различных биомедицинских приложений, а результаты, отраженные в **параграфе 8.4** будут интересны для исследователей, занимающихся магнетоникой.

Кроме того, разработанные в ходе выполнения диссертационного исследования технологические основы получения композитов будут актуальны в области прикладного материаловедения для разработки перспективных композитных материалов для различных приложений (биомедицина, сенсорика, катализ и др.).

**Достоверность результатов.** Достоверность полученных экспериментальных результатов определяется использованием известных методов измерений, современного научного оборудования. Кроме того, измерения конкретного физического параметра с использованием различных экспериментальных методов, воспроизводимость результатов при повторных измерениях, использование общепринятых методов обработки данных, а также качественное совпадение наблюдаемых закономерностей с данными из литературных источников позволило оценить степень достоверности результатов. Обоснованность предложенных расчетных моделей подтверждается использованием общеизвестных теоретических подходов и совпадением полученных при моделировании результатов с известными расчетно-экспериментальными данными по исследуемым объектам.

**Апробация работы.** Основные результаты работы были представлены на 32 всероссийских и международных конференциях и школах в виде приглашенных, устных и постерных докладов: 20th International Conference on Magnetism (ICM-2015), Барселона, Испания, 50-я Школа ПИЯФ по Физике Конденсированного Состояния, Санкт-Петербург, Зеленогорск, Россия, 2016;

Joint IEEE International Symposium on the Applications of Ferroelectrics, European Conference on Applications of Polar Dielectrics & Workshop on Piezoresponse Force Microscopy (ISAF/ECAPD/PFM). Дармштадт, Германия, 2016, Moscow International Symposium on Magnetism (MISM-2017), Москва, Россия, 2017; XII (XIII) Международный семинар молодых ученых «Магнитные фазовые переходы», Махачкала, Россия, 2017; 2019; Конференция грантополучателей РФ «Лидеры науки», Москва, Россия, 2018, 7 (9) международный молодежный симпозиум физика бессвинцовых пьезоактивных и родственных материалов. Анализ современного состояния и перспективы развития (LPFM 2018, 2020) Ростов-на-Дону, Туапсе, Россия, 2018 (2020); Joint European Magnetic Symposia (JEMS 2018), Майнц, Германия, 2018; International Conference on Caloric Cooling (Thermag VIII), Дармштадт, Германия, 2018; International Baltic Conference on Magnetism (IBCM 2017, 2019, 2021), Светлогорск, Россия, 2017, 2019, 2021; Smart Composites International School (SCIS 2021, 2022), Калининград, Россия, 2021, 2022; Twenty-first Materials Research Society of Serbia Annual Conference (YUCOMAT 2019), г. Херцег-Нови, Черногория, 2019; Международная конференция «Мультиферроики: получение, свойства, применение», г. Витебск, Беларусь, 2019; 5th International Conference on Nanoscience, Nanotechnology and Nanobiotechnology (3NANO 2019), г. Бразилиа, Бразилия, 2019; International Workshop on Magnetic Wires (IWMW 2019), Светлогорск, Россия, 2019; VII (VIII) Euro-Asian Symposium “Trends in Magnetism” (EASTMAG – 2019, 2022), Екатеринбург (Казань), Россия, 2019 (2022); I (II, III) Международный научный семинар по калорическим материалам «Дни калорики» (Caloric Days) (Гуниб, Челябинск, Королёв, Дербент, Уфа) Россия, 2020 (2021, 2022, 2023, 2024); XXI Всероссийская школа-семинар по проблемам физики конденсированного состояния вещества (СПФКС-21), Екатеринбург, Россия, 2021; XVIII Международная научно-практическая конференция «Новые полимерные композиционные материалы. Микитаевские чтения», Нальчик,

Россия, 2022; Международная конференция «Новое в магнетизме и магнитных материалах» (НМММ XXV), Москва, 2024; 10th IIR Conference on Caloric Cooling and Applications of Caloric Materials (Thermag X), Baotou, China, 2024. Основные результаты были также доложены на ежегодном заседании секции «Магнетизм» Научного совета РАН по физике конденсированного состояния в 2024 г.

Уровень признания полученных в работе результатов может быть оценен также из наукометрических показателей автора, которые на момент представления работы составляли по базам данных Scopus (*Google Scholar*): число статей – 75 (110), индекс Хирша  $h=15(19)$ , число цитирований – 867 (1137).

**Личный вклад автора.** Личный вклад автора заключается в выборе темы исследования, постановке задач, формулировании основных теоретических и экспериментальных подходов, выборе методов исследования, организации экспериментов, разработке новых экспериментальных устройств и установок, привлечении и координации работ с исследовательскими группами для совместных работ. Большая часть экспериментов, их интерпретация выполнена автором лично или совместно с руководимыми автором студентами и аспирантами. Автор также принимал участие в интерпретации и обсуждении результатов, полученных совместно с партнерскими научными группами, вклад автора по каждой работе отмечен в списке публикаций, а в конце каждого из параграфов диссертации описано с кем данные работы выполнялись. Автором самостоятельно или в соавторстве были выполнены написание и подготовка к публикации статей по результатам исследований, где в большинстве из случаев являлся основным или одним из ведущих авторов, а также ответственным за переписку с редакцией журнала.

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 49 работ, в том числе 48 – в рецензируемых научных журналах, индексируемых в базах данных Web

of Science, Scopus, RSCI, а также в изданиях, рекомендованных для защиты в диссертационном совете МГУ по специальности. Список публикаций по теме диссертации составляет 31 статья в зарубежных журналах, индексируемых в WoS и/или Scopus, 17 статей в российских журналах, индексируемых в RSCI и 1 глава в монографии, изданной в зарубежном издании.

По материалам диссертации также получен 1 результат интеллектуальной деятельности – свидетельство о регистрации программы ЭВМ. Кроме того, опубликована статья «Мультикалорический эффект» на научно-образовательном портале «Большая российская энциклопедия» (ISSN: 2949-2076). Полный перечень работ автора по теме диссертации приведен в списке авторских публикаций.

Работы, выполненные в рамках диссертационного исследования, частично были поддержаны из средств Российского научного фонда (проекты № 18-79-10176, № 21-72-30032, № 22-73-10091, 18-12-00415 и 24-19-00782), Российского фонда фундаментальных исследований (мол\_а № 18-32-01036, № 20-12-50347, совместной программы «Михаил Ломоносов» (линия В) Министерства образования и науки РФ и Германской службы академических обменов (DAAD) для молодых ученых, программы повышения конкурентоспособности российских университетов «5-100» и государственной программы поддержки университетов «Приоритет-2030» при Балтийском федеральном университете им. И. Канта.

**Структура и объем диссертации.** Диссертационная работа состоит из введения, восьми глав, заключения, списков авторских публикаций по теме диссертации и цитируемой литературы из 396 наименований. Полный объем диссертационной работы составляет 300 страницы и включает: 144 рисунка, 62 формулы и 14 таблиц.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы, сформулированы цель диссертации и поставленные в ней задачи, а также положения, выносимые на защиту, обоснованы научная новизна и практическая значимость полученных результатов, изложено содержание диссертации по главам.

**Глава 1** посвящена литературному обзору работ по

мультикалорическим эффектам и материалам. В **параграфе 1.1.** дано определение термина

«мультикалорический эффект» и приведены основные термодинамические соотношения, описывающие одиночные калорические и мультикалорические эффекты.

**Мультикалорическим эффектом** называется явление, заключающееся в обратимом изменении температуры (или энтропии)



**Рисунок 2.** Схематическое изображение мультикалорического эффекта [A33].

вещества под воздействием двух или более внешних полей (магнитное, электрическое, механическое напряжение) в адиабатических (или изотермических) условиях (Рисунок 2) [A33]. Материалы, демонстрирующие мультикалорические эффекты, называются **мультикалориками** [4]. Мультикалорические материалы систематизированы на основе общепринятых и устоявшихся классификаций, в том числе применяемых к мультиферроикам и композитным материалам. Проведена систематизация мультикалориков с применением двух подходов: по виду приложенного поля и по их структуре. Сделан обзор мультикалорических эффектов как в «природных» мультикалориках (однофазных системах), которые они демонстрируют под действием внешних сил различной природы, так и в искусственно созданных

композитах, состоящих из двух компонент: магнитной и сегнетоэлектрической (СЭ). При этом рассмотрены разные технологические подходы к созданию композитных мультикалориков, отличающихся типом связности их компонент, для них были описаны перспективы применения для конкретных практических задач. Представлены различные стратегии получения мультикалорических материалов и наблюдения мультикалорических эффектов в них. В **параграфе 1.2.** проведен обзор литературы по изучению калорических и мультикалорических эффектов в «природных» мультиферроиках. В таких материалах природа калорических и мультикалорических эффектов обусловлена преимущественно особенностями их кристаллической структуры. В **параграфе 1.3.** проведен анализ литературы посвященной, исследованию мультикалорических эффектов в композитных мультиферроиках, которые в отличие от «природных», являются искусственно созданными средами с МЭ связью, которая возникает в результате взаимодействия магнитострикционной и пьезоэлектрической компонент композита. Систематизация и анализ полученной информации подводит к **параграфу 1.4.**, где обсуждаются некоторые прикладные аспекты мультикалорических материалов и приведены наиболее интересные примеры практических приложений на их основе. Анализ литературы и систематизация материала, представленного в **Главе 1**, выполнен на основе обзорных работ автора [А31,А33,А40,А42,А49], в которых описано современное состояние науки в данной области и отмечены перспективные направления в исследованиях мультикалорических материалов, в том числе для практических приложений. Сформулированные в результате анализа литературы выводы были учтены для модернизации экспериментальных методов и подходов на следующих этапах диссертационной работы.

**Глава 2** посвящена описанию экспериментальных методов для исследования КЭ и МультиКЭ, примененных в диссертационной работе. Кроме того, приведено описание оригинальных экспериментальных установок

и вставок для исследования мультикалорических эффектов и демонстрации прикладных аспектов мультикалорических материалов, разработанных в рамках диссертационной работы. В частности, в **параграфе 2.3.** представлены разработанные автором оригинальные экспериментальные методики и лабораторные установки для исследований мультикалорических эффектов прямыми методами. К ним относятся экспериментальная вставка для исследования, управляемого электрическим полем МКЭ в слоистых мультикалорических композитах с МЭ взаимодействием, и экспериментальная установка для исследования одиночных и комбинированных КЭ под действием магнитного поля 1 Тл и одноосного растяжения до  $\sim 150$  МПа [A7,A11,A14]. Отдельное внимание уделено изучению возможностей применения бесконтактных методов измерения КЭ, к которым относятся как хорошо известная ИК-термография, так и альтернативный метод, основанный на термооптическом эффекте (известен как «мираж эффект») [A41, A42]. Данный метод был апробирован на образце сплава  $\text{Fe}_{49}\text{Rh}_{51}$  и полученные с помощью разных методов (дифференциальная сканирующая калориметрия, «мираж-эффект», микротермопара) результаты измерений МКЭ находились в хорошем согласии между собой и сопоставимы с литературными данными [A22]. В **параграфе 2.4.** описаны технологические основы получения мультикалориков, в том числе полимерных композитных, модифицированных автором под конкретные задачи [A23,A25,A26,A36,A37].

**Глава 3** посвящена теоретическому рассмотрению КЭ в оксидных мультиферроиках на основе соединений феррита висмута  $\text{BiFeO}_3$ . В **параграфе 3.1** исследованы структура, магнитные свойства и оценен МКЭ в областях магнитных фазовых переходов в соединениях  $\text{BiFeO}_3$  замещенных редкоземельными элементами с общей формулой  $\text{R}_x\text{Bi}_{1-x}\text{FeO}_3$  (*RBFO*), где  $R = \text{La}, \text{Nd}, \text{Sm}, \text{Eu}, \text{Gd}, \text{Dy}, \text{Er}$  и  $x = 0$  (*BFO*), 0,05 (*RBFO5*), 0,10 (*RBFO10*) [A12,A13]. Рентгеноструктурный анализ показал, что замещение катионов висмута катионами редкоземельных элементов приводит к стабилизации

кристаллических решеток и получению образцов с преимущественным содержанием  $R3c$  фазы. Рассчитанные величины постоянных решеток систематически уменьшаются, что объясняется эффектом  $4f$ -сжатия, обусловленным изменением средних величин радиусов  $R^{3+}$  катионов в ряду  $La^{3+}-Er^{3+}$ . Поскольку измерения МКЭ в высокотемпературной области для соединений на основе  $BiFeO_3$  является сложной задачей, были выполнены соответствующие расчетные оценки величин МКЭ в серии  $RBFO$  с использованием модифицированной полуэмпирической модели, описывающей поведение температурной зависимости намагниченности и предложенной в работе [12]. В рамках модели [12] температурная зависимость намагниченности в окрестности точки Нееля может быть описана выражением:

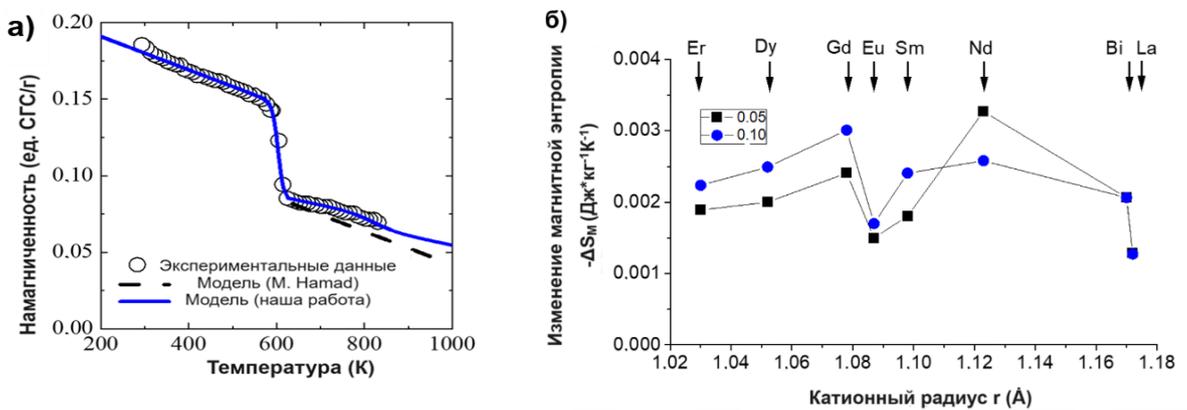
$$M = \left( \frac{M_i - M_f}{2} \right) \tanh[A(T_N - T)] + BT + C, \quad (1)$$

где  $M_i$  и  $M_f$  – точки начала и окончания температурного интервала магнитного фазового перехода. Величину  $A$  определяют как  $A = \frac{2(B - S_N)}{M_i - M_f}$ , где  $B = \left( \frac{dM}{dT} \right)_{T_i}$ ,  $S_N = \left( \frac{dM}{dT} \right)_{T_N}$  и  $C = \left( \frac{M_i + M_f}{2} \right) - BT_N$ . Величина вклада магнитной энтропии  $\Delta S_M$  варьируется в зависимости от величины внешнего поля, которое изменяется от 0 до значения  $H_{max}$ :

$$\Delta S_M = \left\{ -A \left( \frac{M_i - M_f}{2} \right) \operatorname{sech}^2[A(T_N - T)] + B \right\} H_{max} \quad (2)$$

Результаты построения температурных зависимостей намагниченностей  $RBFO$  в рамках модели [12] указывают на возможность применения и модернизации для различных магнитных материалов с фазовыми переходами II рода (манганиты, мультиферроики) [A2,A3,A12,A13,A21]. Подход, реализуемый алгоритмом, предложенным в работе [12] позволяет адекватно описывать температурные зависимости намагниченностей, форма которых близка к симметричной относительно точки  $M(T_N)$ , соответствующей

температуре магнитного перехода. Модель предполагает использование в качестве параметра.  $B$  характеристику, определяемую как чувствительность, которая с математической точки зрения есть не что иное, как тангенс угла наклона кривой ниже температуры перехода. С целью оптимизации модели можно разбить задачу на 2 части и, рассчитав температурные зависимости намагниченностей в областях  $T < T_N$  и  $T > T_N$ , «сшить» результаты моделирования в точке перехода. Это позволяет рассчитать зависимость, достаточно хорошо описывающую поведение намагниченности в широком интервале температур (рисунок 3а).



**Рисунок 3.** Температурная зависимость намагниченности  $M(T)$  для  $DyBFO_5$ : расчеты и эксперимент (а); динамика поведения изменения магнитной энтропии  $\Delta S_M$  для  $RBFO$  в области сФМ-АФМ перехода в зависимости от концентрации ( $x=0,05$  и  $0,1$ ) и типа  $R$ -катиона (б) [A12].

Основанием для обоснования возможности модифицирования данной модели и физической интерпретации получаемых результатов служит тот факт, что выше точки магнитного упорядочения, вклад в результирующую намагниченность, обусловленный соответствующим процессом спиновой переориентации, элиминируется. Поведение кривой  $M(T)$ , получаемой в результате моделирования на каждом из участков  $T < T_N$ ,  $T_N < T_{N1}$  и  $T_{N1} < T$ , при этом можно интерпретировать как результирующую намагниченность, обусловленную флуктуациями направлений спиновых моментов магнитоактивных катионов в областях соответствующих магнитных переходов. Следовательно, термодинамические характеристики, задаваемые выражениями 1 – 2 и рассчитанные в точках  $T_{N1}$  и  $T_{N2}$ , включают в себя вклады,

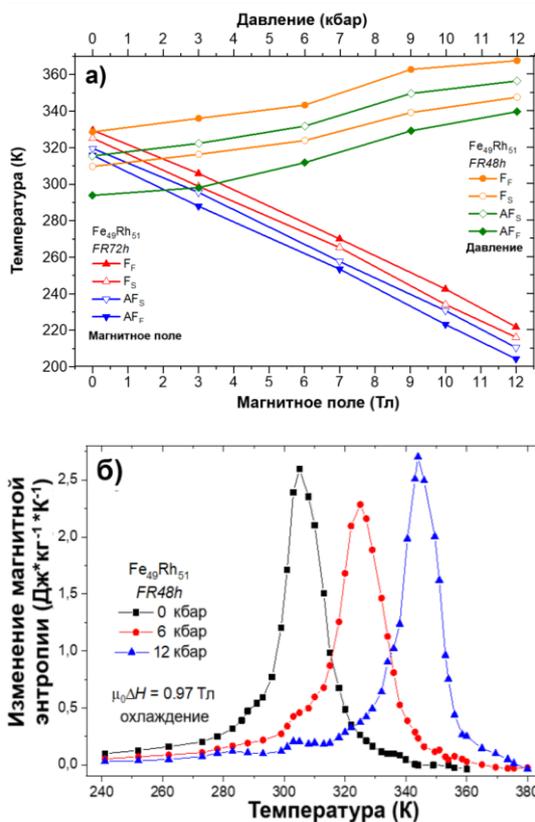
обусловленные перестройкой спиновой структуры при двух магнитных переходах – «слабый ферромагнетик-антиферромагнетик» (сФМ-АФМ) в диапазоне температур (640-650 К) и «антиферромагнетик-парамагнетик» (АФМ-ПМ) в диапазоне температур (818-822 К). Динамика изменения абсолютных величин изменения магнитной энтропии  $\Delta S_M$  от радиуса замещающего катиона представлена на рисунке 3б, среди которых выделяются максимумы  $\Delta S_M$  при  $R = Nd, Gd$ .

Изменение составов катионных подрешеток в значительной степени влияет на межподрешеточные  $R(Bi)-O-R(Bi)$  и внутримолекулярные  $Fe-O-Fe$  обменные взаимодействия. Изменение длин связей  $Fe-O$  и, как следствие, величин углов  $Fe-O-Fe$  и углов наклона кислородных октаэдров, приводит к изменению условий косвенных, через кислород, обменных АФМ взаимодействий. Искажения исходной матрицы ВФО, обусловленные размерным фактором, вызывают изменения магнитокалорических характеристик. При замещении катионов  $Bi^{3+}$   $R^{3+}$ -катионами изменяются параметры элементарных ячеек кристаллических решеток. С ростом степени замещения, расстояния  $Fe-O$  увеличиваются в соединениях с  $R=La, Nd$  и, наоборот, - (сокращаются) в составах с  $R=Sm, Eu, Gd$ , что соответственно уменьшает (усиливает) обменное взаимодействие между  $Fe-R$  катионами. Это приводит к соответствующему изменению намагниченности. Изменение величин углов  $Fe-O-Fe$  обуславливает соответствующие изменения как магнитных, так и магнитокалорических характеристик, малые значения которых наблюдаются в наиболее устойчивых соединениях. Отдельный интерес представляет изучение свойств соединений на основе феррита висмута, в котором вместо привычного редкоземельного замещения используется немагнитный ион. В качестве одного из таких примеров, в **параграфе 3.3** был рассмотрен случай, когда трехвалентный ион железа  $Fe^{3+}$  замещен двухвалентным ионом цинка  $Zn^{2+}$ . Для этой цели предварительно были проведены эксперименты для подтверждения взаимосвязи магнитных,

диэлектрических и МЭ свойств соединений на основе  $BiFeO_3$  в области температур АФМ-ПМ перехода [A1,A4,A5]. Далее с использованием модели, описанной в **параграфе 3.2** были рассчитаны магнитокалорические параметры и продемонстрирована их взаимосвязь с магнитными, диэлектрическими и МЭ свойствами в области температур АФМ-ПМ перехода [A6,A10]. В **параграфе 3.4.** на основе экспериментально измеренных температурных зависимостей намагниченности и диэлектрической проницаемости проведены расчетные оценки величин МКЭ и ЭКЭ в чистом  $BiFeO_3$  в области АФМ-ПМ перехода. В области температур 630-645 К были получены максимумы МКЭ и ЭКЭ, что свидетельствует об выраженном МЭ взаимодействии в этой области [A24]. Наблюдаемые парные КЭ могут быть отнесены к мультикалорическим, а феррит висмута к мультикалорику.

В **Главе 4** рассмотрены «природные» мультикалорические материалы с сосуществованием ферромагнитного и ферроупругого (или сегнетоэластического) упорядочений [13]. В качестве модельного объекта рассмотрены сплавы на основе  $FeRh$  с температурами магнитных фазовых переходов в области комнатных [A20,A29,A35,A46]. Реализованы два сценария комбинации внешнего воздействия: 1) магнитное поле и изотропное сжатие, 2) магнитное поле и одноосное растяжение. В **параграфе 4.2** изучено влияние сильного магнитного поля (до 12 Тл) и гидростатического давления (до 12 кбар) на стабильность метамагнитного изоструктурного фазового перехода (МИФП) и мультиКЭ в сплаве  $Fe_{49}Rh_{51}$ [A39]. Образцы сплава  $Fe_{49}Rh_{51}$  были получены методом индукционной плавки из высокочистых элементов Fe (99,98 %) и Rh (99,8 %) в атмосфере аргона, с последующим отжигом в откачанных кварцевых ампулах (~1 Па) при температуре 1273 К. Первая серия образцов ( $FR72h$ ) отжигалась в течение 72 часов с последующей закалкой в ледяную воду, а вторая серия ( $FR48h$ ) – в течение 48 часов и охлаждалась в печи. Влияние сильного магнитного поля (до 12 Тл) для образца  $FR72h$  изучалось через измерения температурных зависимостей

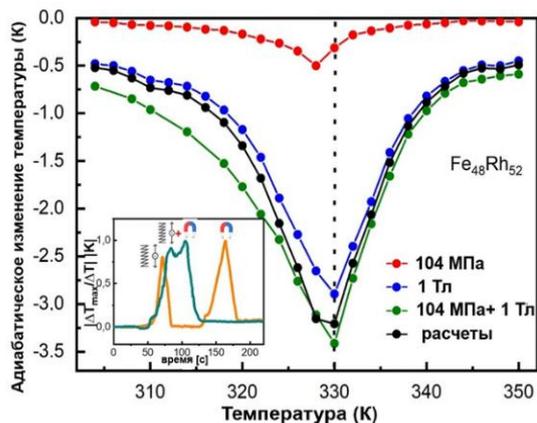
намагниченности и электросопротивления. Эксперименты по изучению мультиКЭ в области температуры МИФП образца *FR48h* при одновременном приложении магнитного поля (до 0,97 Тл) и гидростатического давления (до 12 кбар) были проведены с помощью маятникового магнитометра типа Доменикали. Из данных измерений намагниченности в магнитных полях до 12 Тл и гидростатическом давлении до 12 кбар были построены фазовые диаграммы магнитное поле-температура  $\mu_0H-T$  для образца *FR72h* и давление-температура  $P-T$  для образца *FR48h* (рисунок 4а). Магнитное поле и гидростатическое давление оказывает обратные относительно друг друга



**Рисунок 4.** Фазовые диаграммы  $\mu_0H-T$  для *FR72h* и  $P-T$  для *FR48h* (а); температурные зависимости изменения магнитной энтропии  $\Delta S_M$  для образца *FR48h* при  $\mu_0H=0,97$  Тл при приложенном гидростатическом давлении 0, 6 и 12 кбар в режиме охлаждения (б) [A39].

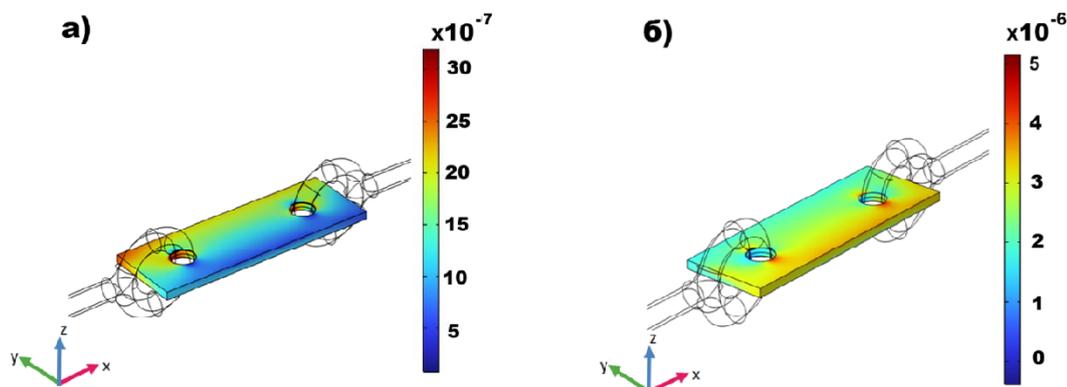
эффекты на температуру МИФП с удельными смещениями  $dT_m/\mu_0dH = -9,2$  К/Тл и  $dT_m/dP = 3,4$  К/кбар. Максимум изменения магнитной энтропии  $\Delta S_M$ , оцененный из измерений намагниченности с использованием соотношений Максвелла, для мультикалорического случая сдвигается в область высоких температур с  $\Delta S_M \sim 2,5$  Дж/(кг К) при 305 К до  $\Delta S_M \sim 2,7$  Дж/(кг К) при 344 К при приложении магнитного поля 0,97 Тл и гидростатического давления 12 кбар (рисунок 4б). Полученные результаты были объяснены расчетами энергий Гиббса и фононных спектров ФМ и АФМ фаз на основе первого принципа. Учет низкой концентрации дефектов на

смежных участках в расчетных ячейках позволило воспроизвести коэффициент  $dT_m/dP$ . В параграфе 4.3 исследованы одиночные калорические



**Рисунок 5.** Температурные зависимости адиабатического изменения температуры  $\Delta T_{AD}$  для одиночных и мультикалорических случаев для образца при  $Fe_{48}Rh_{52}$  [14].

Как видно, из сравнения рассчитанного  $\Delta T_{AD}^{МультиКЭ}$  (черные точки) =  $T_{AD}^{МКЭ}$  (синие точки) +  $\Delta T_{AD}^{ЭлКЭ}$  (красные точки) и измеренного МультиКЭ (зеленые точки) суммарный КЭ не является математической суммой одиночных КЭ (МКЭ+ЭлКЭ).



**Рисунок 6.** 3D карта распределения деформаций при одноосном растяжении образца  $Fe_{48}Rh_{52}$  в форме пластинки в случае симметричного (а) и несимметричного (б) расположения отверстий для троса [14].

(МКЭ и ЭлКЭ) и МультиКЭ в образце сплава  $Fe_{48}Rh_{52}$  под действием магнитного поля, одноосного растяжения и их комбинации с использованием оригинальной установки, описанной в параграфе 2.3 [14]. Как показывают результаты прямых измерений для

одиночных случаев наблюдается обратный КЭ  $\Delta T_{AD}^{МКЭ} = -2,9$  К (1 Тл) при 330 К для МКЭ и  $\Delta T_{AD}^{ЭлКЭ} = -0,5$  К (104

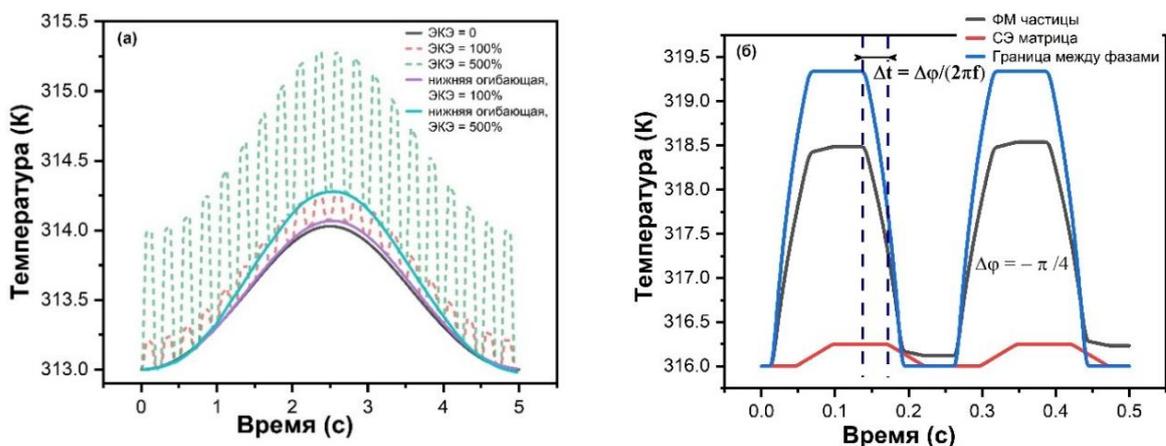
Как было показано для сплава Ni-Mn-Ga-Cu, вклад от взаимосвязи магнитной и структурной подсистем минимален, когда второе приложенное поле мало или близко к нулю, большой эффект наблюдается, когда оба поля (магнитное и механическое) велики [13]. Для выяснения природы реальных деформаций возникаемых при одноосном растяжении образца  $Fe_{48}Rh_{52}$  были проведены расчеты с использованием программного пакета мультифизических расчетов COMSOL на основе метода конечных элементов и эксперименты с использованием тензометрических датчиков. Проведенные расчеты, показали, что механические напряжения при растяжении распределяются неоднородно и более выражены в случае несимметричных отверстий (рисунок 6а-б). В действительности, в эксперименте отверстия, через которые растягивался образец расположены не строго симметрично, что вносит вклад в природу конечных деформаций, а, следовательно, и влияют на наблюдаемые в итоге параметры ЭКЭ.

В **Главе 5** исследованы композитные мультикалоритики с типом связности 0-3 (известны также как смесевые). Рассмотрены два вида композитов данного типа: керамические и полимерные. Для каждого из них разработаны технологически основы получения на основе известных методов и проведены комплексные исследования микроструктуры и фазового состава. В **параграфе 5.2** рассмотрены керамические мультикалоритические композиты, полученные из смеси ФМ и СЭ микрочастиц с высокими значениями МКЭ и ЭКЭ в области близких друг к другу температур магнитного и СЭ переходов [A19,A38]. Основная идея в данном подходе заключается в подборе магнитной и СЭ компонент с близкими друг другу максимумами КЭ для получения синергетического эффекта. Для этой цели была изготовлена серия композитов  $MnAs/PMN-PT$  на основе магнитокалоритического материала  $MnAs$  и СЭ модифицированной керамики твердого раствора магниобата-титаната свинца  $PMN-PT$ , проведены комплексные исследования магнитных, диэлектрических свойств и калорических эффектов [A38]. На основе полученных

экспериментальных результатов для образца  $0.3MnAs/0.7PMN-PT$  с 30 % масс. долей  $MnAs$  были предложены модели 2 сценариев (случаи 1 и 2) комбинированного приложения магнитного и электрического полей:

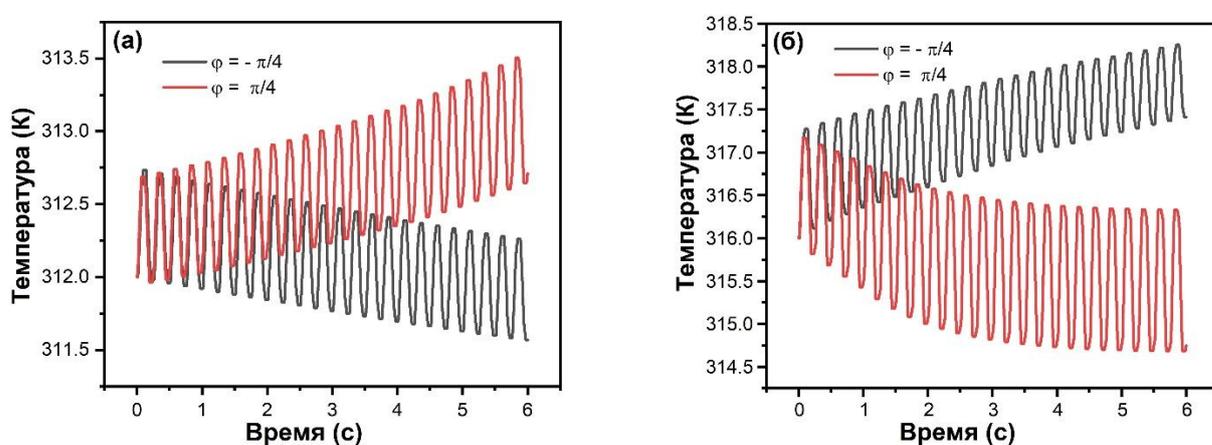
1) Напряженность магнитного поля меняется по синусоидальному закону, диаграмма изменения напряженности электрического поля соответствует меандру (коэффициент заполнения равен 0,5, длительность фронта/спада составляет 10%), частота импульсов электрического поля выше частоты магнитного поля в 20 раз (4 Гц и 0,2 Гц, соответственно). Рассматривались случаи, при котором ЭКЭ был равен нулю, был равен экспериментально полученному при 20 кВ/см, а также составлял 300% и 500% от экспериментального.

2) Диаграмма изменения электрического и магнитного полей соответствует меандру (с теми же параметрами, что и в случае 1). Частоты импульсов электрического и магнитного полей составляли 4 Гц, при этом варьировался фазовый сдвиг между изменением электрического и магнитного полей. В обоих случаях начальная температура выбиралась в точках чуть выше и чуть ниже максимума МКЭ в магнитной фазе. Изменение температуры композита главным образом определялось МКЭ вследствие его на порядок большей величины по сравнению с ЭКЭ в СЭ матрице.



**Рисунок 7.** Временные зависимости температуры образца в результате одиночных КЭ и мультиКЭ для случая 1 (а) и случае 2 (б); для случая 2 рабочая точка 316 К находится выше температуры МФП I рода [A38].

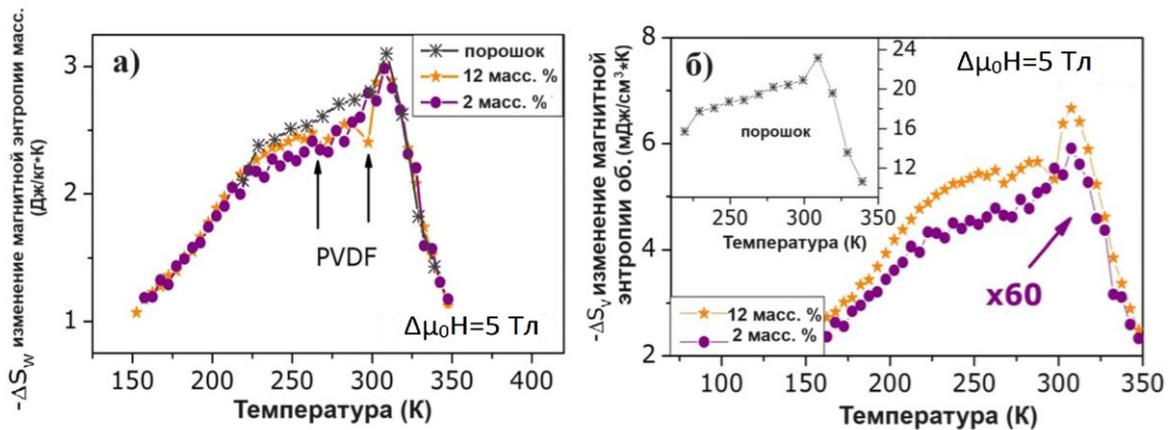
В первом случае было получено, что за счет периодического выделения и поглощения тепла, связанного с ЭКЭ, количество тепла, выделяемого и поглощаемого вследствие МКЭ изменяется ввиду периодического смещения начальной температуры ФМ частиц, что проявляется в изменении температуры, усредненной по импульсу ЭКЭ и в изменении огибающих температурной диаграммы ФМ частиц (Рисунок 7а). Временные зависимости МКЭ, ЭКЭ и мультиКЭ для случая 2 приведены на Рисунке 7б, и как видно, фазовый сдвиг  $\varphi = -\pi/4$  между приложенными магнитным и электрическим полями может обеспечить синергетический эффект и усилить мультиКЭ при рабочей температуре 316 К, которая выше температуры МФП I рода.



**Рисунок 8.** Временные зависимости температуры образца в результате мультиКЭ для случая 2 при двух различных режимах со сдвинутыми по фазе магнитным и электрическим полями, когда рабочая точка ниже (а) и выше (б) температуры МФП I рода [A38].

Во втором случае было получено, что при небольшом фазовом сдвиге (до  $\pi/2$ ) происходит плавное изменение средней температуры всей структуры, причем знак изменения температуры связан, как со знаком фазового сдвига, так и с начальной температурой композита (Рисунок 8 а-б). Такой результат обусловлен смещением начальной температуры ФМ компоненты за счет ЭКЭ в процессе выделения и поглощения тепла. **Параграф 5.3** посвящен исследованию полимерных мультикалорических композитов, где основное внимание уделено изучению взаимосвязи МКЭ и МЭ явлений в области температуры МФП I рода на примере серии образцов *GSG/PVDF*, состоящих

из магнитокалорических микрочастиц  $Gd_5Si_{2.4}Ge_{1.6}$  ( $GSG$ ), встроенных в пьезоэлектрическую матрицу поливинилденфторида ( $PVDF$ ) с концентрацией  $GSG$  2-20 % масс [A16]. На рисунке 9а-б приведены кривые  $\Delta S_M(T)$  для всех образцов с учетом массовой доли магнитного материала при изменении магнитного поля на 5 Тл. Максимальные значения изменения магнитной энтропии варьируются от 2,88 до 3,10 Дж/кг К для композитных образцов и исходного порошка  $GSG$ ,



**Рисунок 9.** Температурные зависимости изменения магнитной энтропии для порошковых и композитных образцов, рассчитанные с учетом массы магнитного материала (а) и объема измеряемых систем со значениями плотности  $1,70 \text{ г/см}^3$  и  $1,85 \text{ г/см}^3$  для 2 и 12 мас.% композитных образцов, соответственно (б) [A16].

соответственно, что указывает на отсутствие влияния матрицы  $PVDF$  на переход ФМ-ПМ при 308 К. Однако формы кривых  $\Delta S_M(T)$  для всех образцов претерпевают изменение в температурном диапазоне 230-295 К: для порошка  $GSG$  наблюдается небольшой горб из-за температурного гистерезиса  $M$ -фазы; композит с 12 мас.% долей  $GSG$  показывает отклонение от кривой для порошка  $GSG$  а при 265 К, а кривая для композита с 2 мас.% долей  $GSG$  имеет линейный рост выше 230 К. Такие различия свидетельствуют о том, что существует связь между СЭ фазами  $PVDF$  и магнитной фазой  $GSG$ , которая усиливает МЭ эффект. Стеклование аморфной  $\alpha$ -фазы происходит при температуре около 220 К, что приводит к релаксации полукристаллических цепочек с небольшим сопутствующим пьезоэлектрическим эффектом, который исчезает при температуре около 275 К. Для образца с содержанием 2 мас.% из-

за малого количества наполнителя эффект практически нулевой в диапазоне температур 200-300 К. Однако при более высоком содержании наполнителя вклад пирозлектричества в кривую  $\Delta S$  становится более очевидным, что указывает на взаимодействие между электроактивным *PVDF* и магнитными микрочастицами. Для инженерных приложений актуальна, изменение энтропии, учитывающей объем измеряемых систем, температурная зависимость которой приведена на Рисунке 9б. Значения максимумов  $\Delta S_{max}$  ожидаемо снижаются с  $\sim 24$  мДж/см<sup>3</sup>К для исходного порошка до  $\sim 6,62$  мДж/см<sup>3</sup>К и  $0,10$  мДж/см<sup>3</sup>К для образцов с 12 и 2 масс.% добавок, соответственно. Для лучшего понимания природы взаимосвязи МЭ эффекта и МКЭ был рассмотрен МЭ коэффициент  $\alpha_{ME}$  через адиабатическое изменение температуры  $\Delta T_{AD}$ , возникаемого в результате МКЭ:

$$\alpha_{ME} = \frac{dE}{dH} = \left( \frac{\partial E}{\partial T} \right) \left( \frac{\partial T}{\partial \Delta T} \right) \left( \frac{\partial \Delta T}{\partial H} \right) \quad (3)$$

Для магнитокалорического материала GSG  $\Delta T_{AD}$  может быть приведено через уравнение Белова-Горяги:

$$H = \frac{a_1}{k^{1/2}} \Delta T^{1/2} + \frac{a_2}{k^{3/2}} \Delta T^{3/2}, \quad (4)$$

где  $a_1 = a_T(T_C - T)$  и  $a_2$  – феноменологические коэффициенты, а  $k = a_T T / C$ , где  $a_T$  – постоянная, не зависящая от температуры и  $C$  – теплоемкость. В слабом магнитном поле доминирующей зависимостью является  $\Delta T \propto H^2$ , а в случае сильных магнитных полей  $\Delta T \propto H^{2/3}$ . Таким образом, основные производные члены, учитывающие различные режимы приложения магнитных полей, можно записать следующим образом:

$$\text{в слабом постоянном магнитном поле: } \Delta T \propto H^2 \rightarrow \frac{\partial T}{\partial H} \propto H;$$

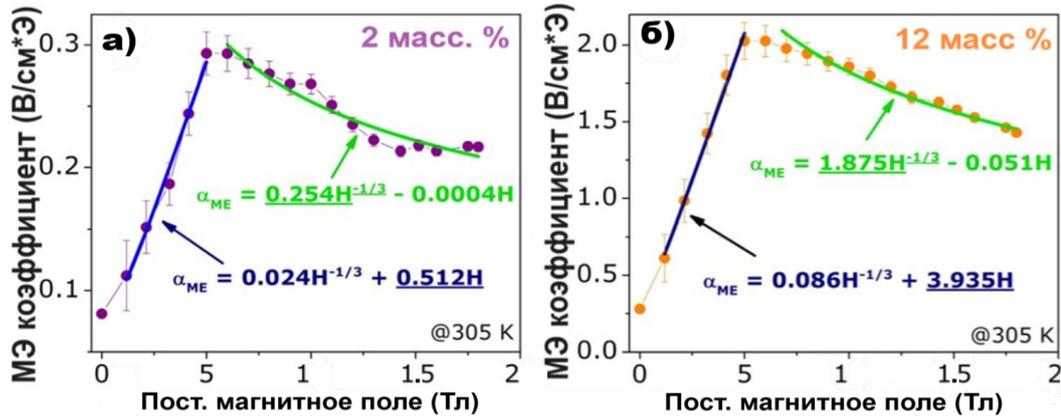
$$\text{в сильном постоянном магнитном поле: } \Delta T \propto H^{2/3} \rightarrow \frac{\partial T}{\partial H} \propto H^{-1/3}.$$

Следовательно, учитывая вклад, связанный с изменением температуры, МЭ коэффициент  $\alpha_{ME}$  можно описать следующим соотношением:

$$\alpha_{ME} = c_1 H^{-1/3} + c_2 H, \quad (5)$$

где  $c_1$  и  $c_2$  являются константами, связанными с двумя членами первой производной в уравнении 3.

Чтобы подтвердить такое поведение, была проведена аппроксимация кривой полевой зависимости  $\alpha_{ME}$  с учетом вышеуказанной функции, которая приведена на Рисунке 10а-б для композитов с 2 масс.% и 12 масс.%,

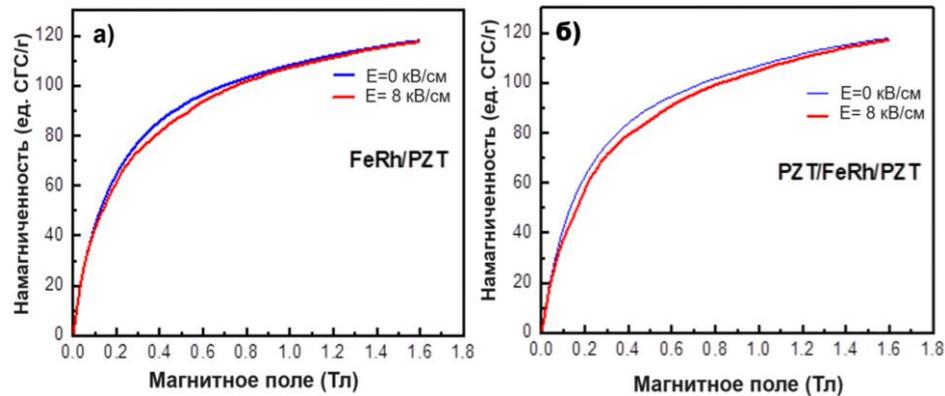


**Рисунок 10.** МЭ коэффициент по напряжению  $\alpha_{ME}$  как функция приложенного постоянного магнитного поля  $H_{DC}$  для образцов композита *GSG/PVDF* с 2 мас.% (а) и (б) 12 мас.% долей магнитных добавок при 305 К с аппроксимированной кривой, учитывающей термоиндуцированный механизм МЭ связи [A16].

соответственно. Как можно заметить, более высокое значение МЭ коэффициента ниже области насыщения связано с линейным членом  $c_2$ , а в режиме сильного постоянного магнитного поля - членом  $c_1$ , который связан со степенным членом уравнения 3, что подтверждает приведенное выше описание механизма. Наконец, на основании этих феноменологических наблюдений следует заключить, что МЭ эффект в композитах *GSG/PVDF* является результатом упругого взаимодействия магнитострикционных и пьезоэлектрических компонент с температурным вкладом, возникающим за счет магнитокалорического и пироэлектрического эффектов.

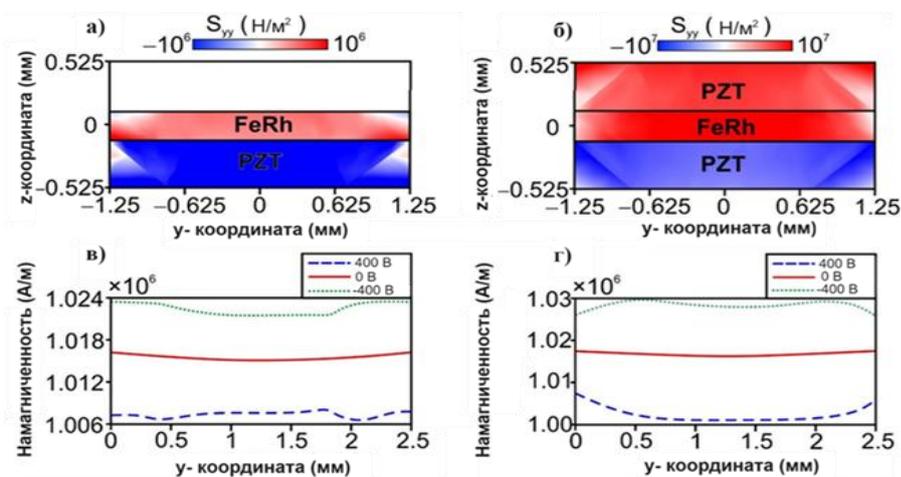
В **шестой** главе рассмотрены композитные мультикалорики с типом связности 2-2 (известны как слоистые) согласно предложенной в **первой** главе классификации. Объектами исследования были выбраны МЭ композиты на основе *FeRh* в качестве магнитной компоненты и коммерческой

пьезоэлектрической керамики *PZT*, предварительно исследованы их магнитные, магнитоэлектрические и магнитокалорические свойства [A7,A11, A14], а также проведен ряд расчетов [A8,A9,A15,A17]. На основе полученного задела научный интерес был сфокусирован на решение двух конкретных задач: 1) управление намагниченностью через электрическое поле и 2) контроль МКЭ через электрическое поле. В **Параграфе 6.2** на примере



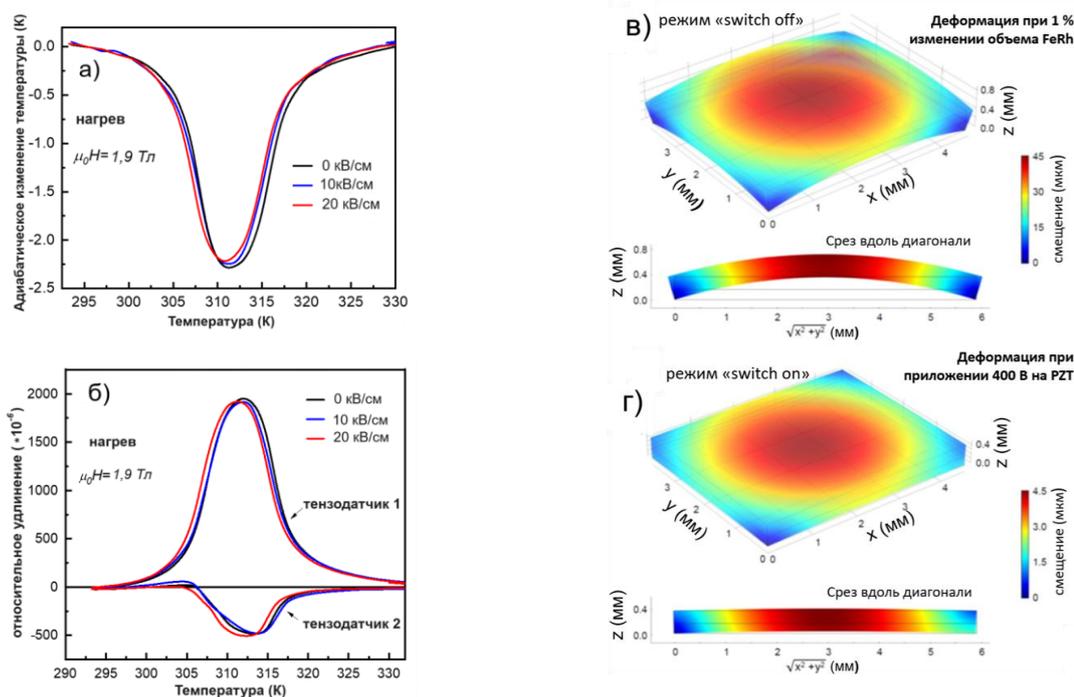
**Рисунок 11.** Кривые изотермического намагничивания, измеренные в режимах выключенного  $E=0$  кВ/см и включенного ( $E=8$  кВ/см) электрического поля при 320 К для двухслойных композитов *FeRh/PZT* (а) и трехслойных композитов *PZT/FeRh/PZT* (б) [A18].

образцов композитов *FeRh/PZT* и *PZT/FeRh/PZT* продемонстрирована возможность управления намагниченностью магнитной компоненты *FeRh* с помощью электрического напряжения (Рисунок 11а-б) [A18]. Результаты расчетов распределения механических напряжений и



**Рисунок 12.** 2D карты механических напряжений  $S_{yy}$  (а,в) и распределения намагниченности в *FeRh* (б,г) для двухслойных *FeRh/PZT* и трехслойных *PZT/FeRh/PZT* композитов, соответственно [A18].

намагниченности в сечении вдоль оси  $y$  при различных режимах подачи (положительное 400 В, нулевое и отрицательное -400 В) электрического поля для моделей двухслойных  $FeRh/PZT$  (рисунок 12а,в) и трехслойных  $PZT/FeRh/PZT$  (рисунок 12б,г) композитов наглядно демонстрируют наблюдаемые в образцах магнитоупругие эффекты, которые являются следствием механического воздействия, индуцируемый в PZT компоненте в результате обратного пьезоэлектрического эффекта при приложении электричества. Более эффективное управление намагниченностью позволяет достичь трехслойная компоновка, что находится в согласии с нашими экспериментами [A7]. В **Параграфе 6.3** путем одновременных измерений на специально разработанной экспериментальной вставке, описанной в **Параграфе 2.3**, было продемонстрировано влияние электрического поля на МКЭ и деформацию в

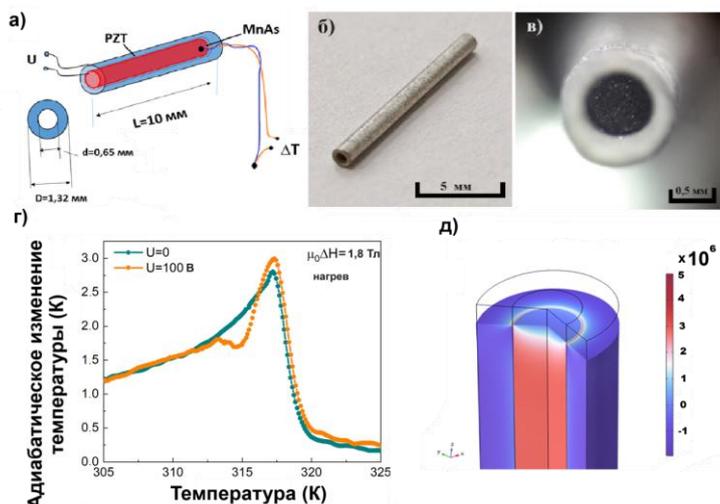


**Рисунок 13.** Температурные зависимости адиабатического изменения температуры  $\Delta T_{AD}$  (а) и деформации (б) при различных режимах включения электрического поля, измеренных в режиме нагрева; 2D-3D карты распределения деформации в образце композита  $Fe_{49}Rh_{51}/PZT$  при режимах выключенного (в) и включенного электрического поля (г) [A27].

двухслойном мультикалорическом композите  $Fe_{49}Rh_{51}/PZT$  (рисунок 13а-б) [A27]. Используя измерения деформации с помощью двух датчиков,

прикрепленных к противоположным сторонам композита, а также моделирования методом конечных элементов, было показано, что деформация конечным типом деформации в композите является изгиб (рисунок 13в-г). Механическая деформация, вызванная электрическим полем, не превышает  $\sim 500$  ppm ( $1\text{ppm}=10^{-6}$ ), что в 4 раза меньше, чем расширение *FeRh* при переходе  $\sim 2000$  ppm. Подача электрического напряжения на *PZT* способствует переходу, но препятствует дальнейшему расширению *FeRh* и, таким образом, блокирует переход АФМ-ФМ. Полученные быть использованы при разработке новых мультикалорических композитов с оптимальным соотношением ФМ и СЭ компонентами.

В Главе 7 рассмотрены композитные мультикалорики с типом связности 1-3 (известны также как цилиндрические) согласно предложенной в **первой** главе классификации. Рассмотрены два вида композитов: 1) неорганические, в которых оба компонента составляют неорганические материалы и 2) полимерные, где в качестве сегнетоэлектрической матрицы композита используется пьезоэлектрический полимер. В первом случае (**Параграф 7.2**) исследуемый композит представлял собой тонкую трубку из коммерческой пьезоэлектрической керамики *PZT* плотно заполненной

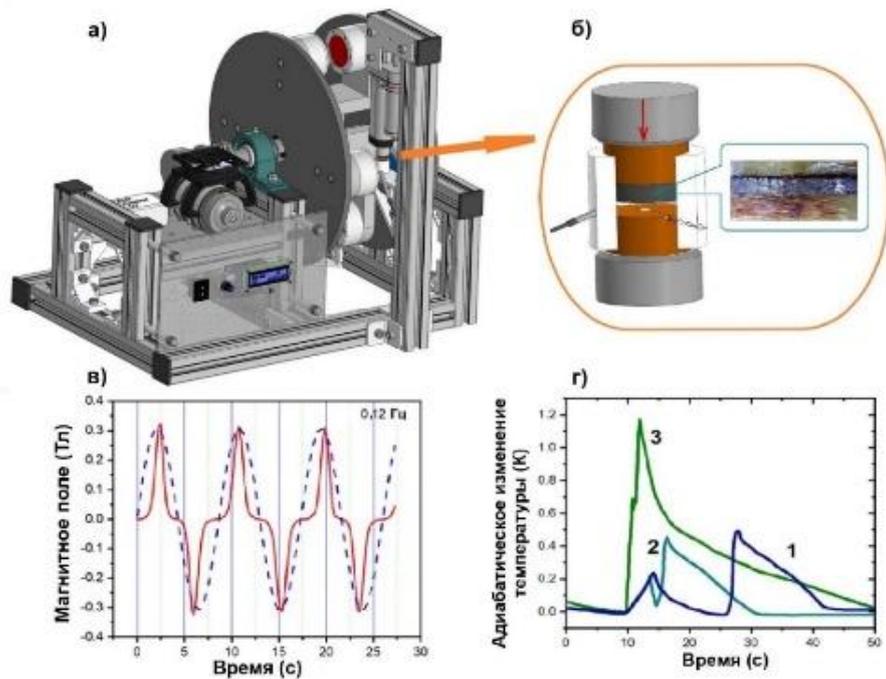


**Рисунок 14.** Схема композита *MnAs/PZT* (а), фото коммерческой пьезокерамики ЦТС-19 (*PZT*) в форме трубки (б) и композита в проекции, перпендикулярной оси цилиндра *PZT* (в); температурная зависимость МКЭ *MnAs/PZT* в нулевом и 100 В напряжении(г); 3D карта распределения механического напряжения в *MnAs/PZT* при 100 В (д) [A44].

магнитокалорическим материалом  $MnAs$  (рисунок 14а-д) [A44,A45]. С использованием численных расчетов и экспериментов было показано, что обратный пьезоэлектрический эффект может быть использован для создания квазиизостатического механического сжатия, которое, посредством изменения электрического напряжения может быть использовано для управления МКЭ в  $MnAs$  (рисунок 14д). Показано, что электрическое поле  $E \sim 0,3$  кВ/мм, приложенное к пьезоэлектрической компоненте PZT композита  $MnAs/PZT$ , способствует увеличению адиабатического изменения температуры на 0,2 К в области температуры магнитоструктурного фазового перехода  $MnAs \sim 317$  К при изменении магнитного поля на 1,8 Тл (рисунок 14г). Предложенный подход является компактным решением при исследовании материалов с выраженными магнитоупругими свойствами и может быть использован в технологиях стрейнтроники для управления магнитными свойствами функциональных материалов для задач, когда необходимо создать небольшие давления до  $\sim 10$  МПа с малым шагом  $\sim 0,5$  МПа. Квазизостатическое сжатие может быть индуцировано с помощью пьезоэлектриков, которое управляется через электрическое поле без использования камер высокого давления и гидравлических сред. В **Параграфе 7.3** рассматривается композитный мультикалорический материал цилиндрического типа на примере образца  $NiMnGa/PVDF$ , представляющего собой микропровода из магнитокалорического материала - сплава Гейслера состава  $Ni_{48.5}Mn_{22.7}Ga_{22.8}$  ( $NiMnGa$ ), встроенные в пьезополимерную матрицу  $PVDF$ . Максимум адиабатического изменения температуры  $\sim 0,04$  К наблюдался  $\sim 276$  К с узким гистерезисом и сопровождался максимумом МЭ коэффициента, что свидетельствует о выраженной взаимосвязи магнитных, магнитокалорических и МЭ свойств в области магнитного перехода [A23].

В **Главе 8** рассмотрены прикладные аспекты мультикалорических материалов и представлены конкретные решения на их основе для потенциальных приложений. В **Параграфе 8.2.** с использованием

коммерчески доступных комплектующих разработан и изготовлен компактный лабораторный прототип для демонстрации одиночных КЭ (ЭлКЭ и МКЭ) и МультиКЭ [А43], возникающих в результате разовых и циклических приложениях магнитного поля и одноосной механической нагрузки (рисунок 15 а-в). На примере сплава  $LaFe_{11.4}Mn_{0.3}Si_{1.3}H_{1.6}$  с фазовым переходом I рода в области комнатной температуры показана возможность наблюдения МКЭ, ЭлКЭ и МультиКЭ.



**Рисунок 15.** Цифровая модель лабораторного прототипа-демонстратора мультикалорического эффекта (а); схема монтажа образца с его фотографией в закрепленном для измерений виде (б); временная зависимость магнитного поля  $B(t)$  источника переменного магнитного поля на частоте 0,12 Гц (синий пунктир- зависимость для идеального гармонического случая) (в); временная зависимость абсолютного значения адиабатического изменения температуры  $|\Delta T|$  для мультиКЭ с различной разницей  $\Delta t$  вывода из магнитного поля 0,31 Тл и приложения 19 МПа одноосного сжатия: 16 с (1), 5 с (2) и 1 с (3) (г) [А43].

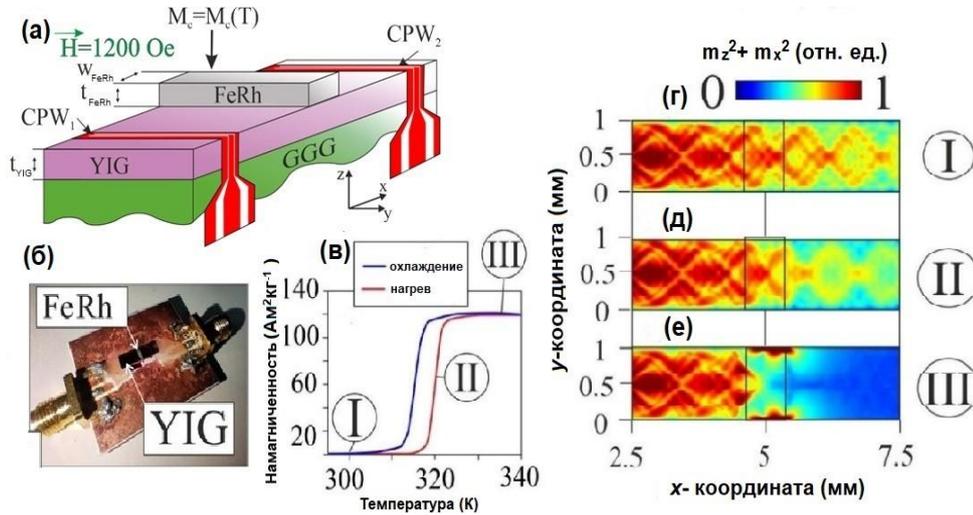
Показано, что путем подбора протоколов приложения комбинированных внешних воздействий: магнитного поля и механической нагрузки возможно наблюдение синергетического эффекта для адиабатического изменения температуры, которое составляет 1,17 К (0,31 Тл и 19 МПа) при температуре 291,5 К для МультиКЭ и превосходит соответствующее значение  $|\Delta T| = 0,75$  К (0,31 Тл) при температуре 291,65 К

для МКЭ (рисунок 15г). Предложенные подходы и полученные результаты могут быть использованы для разработки новых прототипов мультикалорических систем охлаждения и модернизации текущих. **Параграф 8.3.** посвящен поиску возможностей биомедицинского применения мультикалорических материалов. Ключевая идея заключалась в использовании поглощаемого или выделяемого в результате КЭ тепла для управления свойствами перспективных для биомедицины термочувствительных полимеров. Для проверки концепта была изготовлена оригинальная экспериментальная вставка, для наблюдения в *in situ* режиме за управлением свойствами полимера в результате МКЭ [A28]. Работоспособность идеи была проверена на примере смарт-композита PNIPAM/Gd, состоящего из слоя термочувствительного полимера поли(N-изопропилакриламид) (PNIPAM), нанесенного на подложку классического магнитокалорического материала *Gd* [A28]. *PNIPAM* является перспективным полимером с температурой нижнего критического растворения (НКТР) ~ 32°C, выше которого он претерпевает обратимый переход из набухшего гидратированного состояния в сморщенное дегидратированное состояние, теряя ~ 90% объема. Продемонстрировано обратимое управление свойствами *PNIPAM* в области ~ 32 °C при изменении магнитного поля до 8 Тл.

На основе полученных экспериментальных результатов и проведенных расчетов был разработан модельный образец смарт-композита на основе полимера PNIPAM, нанесенного на подложку сплава FeRh с модифицированной поверхностью, на которую был загружен доксорубицин [A47]. В режиме *in situ* с использованием разработанной экспериментальной вставки была продемонстрирована возможность индуцирования фазового перехода с НКТР в PNIPAM и высвобождения доксорубицина путем разового включения магнитного поля 3 Тл [A47]. Сброс лекарственного средства был подтвержден методами спектрофотометрии в УФ и видимой областях, а также рамановской спектроскопии.



намагниченности в сплаве  $FeRh$ , была разработана численная модель, основанная на методе конечных элементов. На этом этапе численного моделирования в области возбуждения CPW1 был задан входной сигнал с амплитудой  $b_0 = 0,01$  мТл, постепенно увеличивающейся в момент включения, и частотой  $f$  в виде:  $b_z(t) = b_0 \sin(2\pi ft)$ .



**Рисунок 17.** Схема композитной структуры  $YIG/FeRh$  с линиями возбуждения CPW<sub>1</sub> и детектирования CPW<sub>2</sub> на основе пленки железо-иттриевого граната  $Y_3Fe_5O_{12}$  ( $YIG$ ) толщиной  $t_{YIG}$ , выращенной на подложке гадолиний-галлиевого граната  $Gd_3Ga_5O_{12}$  ( $GGG$ ) и сплава  $Fe_{48}Rh_{52}$  с геометрическими размерами  $t_{ferh}$  и  $w_{ferh}$  (а); фотография экспериментальной схемы (полоса  $YIG$  и пластина  $FeRh$  показаны стрелками) (б); температурная зависимость намагниченности сплава  $Fe_{48}Rh_{52}$  (в); карты распределения динамической намагниченности в волноводной структуре в при различных значениях намагниченности в компоненте  $Fe_{48}Rh_{52}$  (г-е) [A32].

Полученные распределения динамической составляющей намагниченности  $m_z^2 + m_x^2$  показаны на рисунке 16г-е для различных значений  $M_{sat}$  намагниченности блока из сплава  $FeRh$  на частоте 5,2 ГГц. В соответствии с обозначениями, представленными на рисунке 16в были выбраны три значения  $M_{sat}$  намагниченности  $FeRh$ , которые соответствуют его различным магнитным состояниям. Следовательно, в случае I, то есть при минимальном значении нагрева и намагниченности, ничто не препятствует распространению спиновых волн (рисунок 17г). Однако при увеличении намагниченности до состояния II (рисунок 17д), наблюдается изменение длины волны после прохождения через блок  $FeRh$ , что вызвано сильным влиянием последнего на распределение внутреннего магнитного поля. в

исследуемой системе, а в случае III, когда намагниченность  $FeRh$  максимальна волна полностью затухает (рисунок 17e).

**В заключении** сформулированы основные результаты и выводы:

1. Установлено, что максимумы изменений магнитной энтропии в области температур магнитного фазового перехода для катионзамещенных оксидных мультиферроиков феррита висмута зависят как от типа замещающего редкоземельного иона, так и его концентрации и определяются не только магнитным моментом замещаемых ионов, но и их ионным радиусом. Наблюдаемый максимум ЭКЭ эффекта связан с МЭ взаимодействием, которая наиболее выражены в области температуры магнитных фазовых переходов.

2. Установлено, что приложение магнитного поля до 12 Тл расширяет ФМ область сдвигает МИФП в сторону более низких температур со степенью смещения  $dT_m/\mu_0dH = -9,2$  К/Тл, в то время как гидростатическое давление до 12 кбар восстанавливает стабильность АФМ фазы и сдвигает МИФП в высокотемпературную область со  $dT_m/dP = 3,4$  К/кбар. Исследования МультиКЭ, проведенные косвенным методом из измерений намагниченности под изостатическим сжатием, показывают, что гидростатическое давление может быть использовано для управления максимумом изменения магнитной энтропии. Полученная экспериментальная  $P-T$  диаграмма объясняется с помощью расчетов методом  $DFT$  в рамках эффектов обменной корреляции, выходящих за рамки хорошо известного  $GGA$ , а экспериментальный наклон  $dT_m/dP$  воспроизводится теоретически, когда в вычислительной суперячейке учитывались дефекты на противоположных участках.

3. Обнаружено, что в «природном» мультикалорике  $Fe_{48}Rh_{52}$  с сосуществующим ферромагнитным и сегнетоэластическим упорядочением комбинация приложения магнитного поля 1 Тл и одноосного растяжения 104 МПа приводит к наблюдению синергетического эффекта при котором максимум по абсолютному значению  $|\Delta T_{AD}^{МультиКЭ}| = |-3,41|$  К при 330 К, что

превышает аналогичные значения для одиночных калорических эффектов:  $|\Delta T_{AD}^{МКЭ}| = |-2,9|$  К (1Тл) для МКЭ и  $|\Delta T_{AD}^{ЭлКЭ}| = |-0,5|$  К (104 МПа) для ЭлКЭ. Показано, что при комбинированном приложении магнитного поля и одноосного растяжения МультиКЭ не является математической суммой одиночных КЭ и для усиления конечного эффекта следует учитывать несколько факторов: 1) геометрию образца и 2) амплитудно-временные характеристики прикладываемых полей.

4. Установлено, что в предложенной модели мультикалорического керамического композита *MnAs/PMN-PT* типа связности 0-3 фазовый сдвиг  $\varphi = -\pi/4$  между приложенными магнитным и электрическим полями может обеспечить синергетический эффект и усилить МультиКЭ при рабочей температуре 316 К, которая выше температуры МФП I рода ФМ компоненты композита. Показано, что при небольшом фазовом сдвиге (до  $\pi/2$ ) происходит плавное изменение средней температуры всей структуры, причем знак изменения температуры связан как со знаком фазового сдвига, так и с начальной температурой композита, что обусловлено смещением начальной температуры ФМ компоненты за счет ЭКЭ в процессе выделения и поглощения тепла

5. Обнаружено, что в полимерных мультикалорических композитах типа связности 0-3 *GSG/PVDF* введение магнитокалорических микрочастиц GSG в матрицу PVDF с концентрацией массовой доли 2 и 12 % приводит к увеличению доли содержания электроактивных  $\beta$ - и  $\gamma$  фаз, ответственных за пьезоэлектрические и пироэлектрические свойства. В результате, для образца с массовой долей магнитной компоненты 12 % при 305 К был обнаружен максимум МЭ коэффициента 2,2 В/см·Э, связанный магнитным фазовым переходом (ФМ-ПМ) магнитокалорической компоненты композита, который сопровождается максимумом изменения магнитной энтропии. Показано, что магнитополевая зависимость МЭ коэффициента для композитов GSG /PVDF коррелируется с уравнениями Белова-Горяги, описывающих полевою

зависимость МКЭ, а общее изменение энтропии может иметь вклад от пьезоэлектрического эффекта *PVDF* и МЭ взаимодействия магнитной и пьезоэлектрической компонент композита, что может быть использовано для дизайна новых мультикалорических композитов.

6. Установлено, что в объемном слоистом мультикалорическом композите  $Fe_{49}Rh_{51}/PZT$  с сопоставимыми значениями толщин пьезокерамики *PZT* и магнитокалорического материала  $Fe_{49}Rh_{51}$  механические напряжения, создаваемые при приложении электрического напряжения, способны управлять МКЭ, но недостаточны для того, чтобы вызвать магнитоструктурный переход  $Fe_{49}Rh_{51}$ . Проведенные расчеты на основе метода конечных элементов и эксперименты с использованием тензометрии показали, что в области температуры магнитного ФП I рода  $Fe_{49}Rh_{51}$  в результате комбинации приложенного магнитного поля и электрического поля деформация образца  $Fe_{49}Rh_{51}/PZT$  по природе близка к изгибу. Полученные результаты показывают применимость макроскопических слоистых структур, таких как композиты  $Fe_{49}Rh_{51}/PZT$  для оценки эффективности новых мультикалорических «толстых» композитов с многослойным соединением, когда толщины магнитокалорического и пьезоэлектрического слоев сопоставимы.

7. На примере сплава  $LaFe_{11.4}Mn_{0.3}Si_{1.3}H_{1.6}$  продемонстрирована возможность прямого наблюдения как одиночных – МКЭ, ЭлКЭ, так и МультиКЭ под действием в динамическом режиме магнитного поля и одноосной механической нагрузки. Продемонстрировано, что путем подбора протоколов приложения комбинированных внешних воздействий: магнитного поля и одноосной механической нагрузки, возможно наблюдение синергетического эффекта для адиабатического изменения температуры, которое по абсолютному значению составляет  $|\Delta T| = 1,17$  К (0,31 Тл + 19 МПа) при температуре 291,5 К для МультиКЭ и превосходит соответствующее значение  $|\Delta T| = 0,75$  К (0,31 Тл) при температуре 291,65 К для МКЭ.

Полученные результаты показывают применимость комбинации внешних полей различной природы для усиления общего калорического эффекта, как одного из путей оптимизации магнитокалорических систем охлаждения.

8. Обнаружено, что в композите, состоящего из термочувствительного полимера *PNIPAM* и магнитокалорического материала с температурой фазового перехода в области близкой к комнатной, обратимый фазовый переход в полимере в области температуры 32 °С из гидратированного состояния в дегидратированное может быть индуцирован за счет магнитокалорического эффекта путем включения (выключения) магнитного поля. Работоспособность идеи проверена на примере композитов *PNIPAM/Gd* и *PNIPAM/FeRh* с использованием специальной разработанной для этой цели экспериментальной вставки для *in situ* наблюдений в магнитном поле до 8 Тл. При этом на примере композита *PNIPAM/FeRh* продемонстрирована возможность использования предложенного подхода для сброска лекарственного средства доксорубицин в магнитном поле 3 Тл доступном для коммерческих томографов и предварительно подтверждена биосовместимость предложенного смарт-композита.

### Список публикаций по теме диссертации

Статьи в рецензируемых научных журналах, индексируемых в базах данных *Web of Science, Scopus, RSCI*, а также в изданиях, рекомендованных для защиты в диссертационном совете МГУ по специальности:

- A1. **Амиров А.А.**, Каллаев С.Н., Омаров З.М., Юсупов Д.М., Chaudhary Y., Bendre S.T., Макоед И.И. Теплоемкость наноструктурированных мультиферроиков  $\text{BiFe}_{1-x}\text{Zn}_x\text{O}_3$  // Физика твердого тела. – 2017. – Т.59, № 9. – С. 1859-1862. Импакт-фактор 0,78 (РИНЦ)\*. Объем: 0,46 п.л. Вклад автора: 0,7. [Переводная версия] **Amirov A. A.**, Kallaev S. N., Omarov Z. M., Yusupov D. M., Chaudhary Y. A., Bendre S. T., Makoed I. I. Heat capacity of nanostructured multiferroics  $\text{BiFe}_{1-x}\text{Zn}_x\text{O}_3$  // *Physics of the Solid State*. – 2017. – Vol. 59, issue 9. – P. 1859-1862. –DOI:10.1134/S1063783417090037. Импакт-фактор 0,90 (JIF)\*\* . Q4 (SJR)\*\*\*. Объем: 0,46 п.л. Вклад автора: 0,7.
- A2. Макоед И.И., Ревинский А.Ф., Горбачук Н.И., Пашченко А.В., Леденев Н.А., **Амиров А.А.**, Юсупов Д.М., Янушкевич К.И. Структура и диэлектрические свойства мультиферроиков  $\text{Bi}_{0.80}\text{Gd}_{0.20-x}\text{La}_x\text{FeO}_3$  // Известия Российской Академии Наук. Серия физическая. – 2018. – Т. 82, № 5. – P. 642-645. Импакт-фактор 0,75 (РИНЦ). Объем: 0,46 п.л. Вклад автора: 0,3. [Переводная версия] Makoed I. I., Ravinski A. F., Gorbachuk N. I., Pashchenko A. V., Liedienov N. A., **Amirov A. A.**, Yusupov D. M., Janushkevich K. I. Structure and dielectric properties of  $\text{Bi}_{0.80}\text{Gd}_{0.20-x}\text{La}_x\text{FeO}_3$  multiferroics // *Bulletin of the*

- Russian Academy of Sciences: Physics. – 2018. – Vol. 82, issue 5 – P. 570-573. – DOI:10.3103/S1062873818050210. Импакт-фактор 0,45 (JIF). Q4 (SJR). Объем: 0,46 п.л. Вклад автора: 0,3.
- A3. Pashchenko A.V., Liedienov N.A., Pashchenko V.P., Prokopenko V.K., Burhovetskii V.V., Voznyak A.V., Fesych I.V., Tatarchuk D.D., Didenko Y.V., Gudymenko A.I., Kladko V.P., **Amirov A.A.**, Levchenko G.G. Modification of multifunctional properties of the magnetoresistive  $\text{La}_{0.6}\text{Sr}_{0.15}\text{Bi}_{0.15}\text{Mn}_{1.1-x}\text{V}_x\text{O}_{3-\delta}$  ceramics when replacing manganese with 3d-ions of Cr, Fe, Co, Ni // Journal of Alloys and Compounds. – 2018. – Vol. 767. – P. 1117-1125. – DOI:10.1016/j.jallcom.2018.07.178. Импакт-фактор 6,30 (JIF). Q1 (SJR). Объем: 1,03 п.л. Вклад автора: 0,25.
- A4. Calisir I., **Amirov A. A.**, Kleppe A. K., Hall D. A. Optimisation of functional properties in lead-free  $\text{BiFeO}_3\text{-BaTiO}_3$  ceramics through  $\text{La}^{3+}$  substitution strategy // Journal of Materials Chemistry A. – 2018. – Vol. 6, issue 13. – P. 5378-5397. – DOI:10.1039/C7TA09497C. Импакт-фактор 9,50 (JIF). Q1(SJR). Объем: 4,50 п.л. Вклад автора: 0,5.
- A5. **Амиров А.А.**, Гусейнов М.М., Юсупов Д.М., Абдулкадирова Н.З., Chaudhary Y.A., Bendre S.T. Рентгеновские и мёссбауэровские исследования структурных особенностей мультиферроиков  $\text{BiFe}_{1-x}\text{Zn}_x\text{O}_3$  // Поверхность. рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. – 2018. – №.7. – С. 108-112. Импакт-фактор 0,30 (РИНЦ). Объем: 0,57 п.л. Вклад автора: 0,5. [Переводная версия] **Amirov A. A.**, Guseynov M. M., Yusupov D. M., Abdulkadirova N. Z., Chaudhary Y. A., Bendre S. T. X-Ray diffraction and mössbauer studies of the structural features of  $\text{BiFe}_{1-x}\text{Zn}_x\text{O}_3$  Multiferroics // Journal of Surface Investigation: X-Ray, Synchrotron and Neutron Techniques. – 2018. – Vol. 12. – P. 732-736. – DOI:10.1134/S1027451018040031. Импакт-фактор 0,52 (JIF). Q4 (SJR). Объем: 0,57 п.л. Вклад автора: 0,5.
- A6. **Amirov A. A.**, Makoed I. I., Chaudhari Y. A., Bendre S. T., Yusupov D. M., Asvarov A. S., Liedienov N. A., Pashchenko A. V. Magnetocaloric effect in  $\text{BiFe}_{1-x}\text{Zn}_x\text{O}_3$  Multiferroics // Journal of Superconductivity and Novel Magnetism. – 2018. – Vol. 31. – P. 3283-3288. – DOI:10.1007/s10948-018-4590-2. Импакт-фактор 1,70 (JIF). Q3 (SJR). Объем: 0,69 п.л. Вклад автора: 0,5.
- A7. Амиров А.А., Старков А.С., Старков И.А., Каманцев А.П., Родионов В.В. Управляемый электрическим полем магнитный переход в магнитоэлектрических композитах на основе сплава  $\text{Fe}_{49}\text{Rh}_{51}$  // Письма о материалах. – 2018. – Т. 8, № 3. – С. 353-357. – DOI: 10.22226/2410-3535-2018-3-353-357. Импакт-фактор 1,18 (РИНЦ), Q3 (SJR). Объем: 0,57 п.л. Вклад автора: 0,5.
- A8. Starkov I. A., **Amirov A. A.**, Starkov A. S. On Thermodynamic Description of Finite-Size Multiferroics // Materials Research Proceedings. – 2018. – Vol. 9. – P. 167-173. – DOI:10.21741/9781644900017-32. Импакт-фактор 0,46 (JIF), - (SJR). Объем: 0,80 п.л. Вклад автора: 0,5.
- A9. Старков А.С., Пахомов О.В., Родионов В.В., Амиров А.А., Старков И.А. Оценка термодинамической эффективности твердотельного охладителя на основе мультикалорического эффекта // Письма в журнал технической физики. – 2018. – Т. 44, № 6. – С. 42-49. Импакт-фактор 0,72 (РИНЦ). Объем: 0,462 п.л. Вклад автора: 0,3. [Переводная версия] Starkov A. S., Pakhomov O. V., Rodionov V. V., **Amirov A. A.**, Starkov I. A. Estimation of the thermodynamic efficiency of a solid-state cooler based on the multicaloric effect // Technical Physics Letters. – 2018. – Vol. 44, issue 3. – P. 243-246. – DOI: 10.1134/S1063785018030276. Импакт-фактор 0,80 (JIF). Q3 (SJR). Объем: 0,462 п.л. Вклад автора: 0,3.
- A10. **Amirov A. A.**, Chaudhari Y. A., Bendre S. T., Chichay K. A., Rodionova V. V., Yusupov D. M., Omarov Z. M. Phase transitions and magnetoelectric coupling in  $\text{BiFe}_{1-x}\text{Zn}_x\text{O}_3$  multiferroics // The European Physical Journal B - Condensed matter and complex systems.

- 2018. – Vol. 91, issue 4 – P. 63. – DOI:10.1140/epjb/e2018-80557-3. Импакт-фактор 1,60 (JIF). Q3 (SJR). Объем: 0,57 п.л. Вклад автора: 0,7.
- A11. **Amirov A. A.**, Rodionov V. V., Starkov I. A., Starkov A. S., Aliev A. M. Magneto-electric coupling in Fe<sub>48</sub>Rh<sub>52</sub>-PZT multiferroic composite // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. – 2019. – Vol. 470. – P. 77-80. – DOI:10.1016/j.jmmm.2018.02.064. Импакт-фактор 3,00 (JIF). Q2 (SJR). Объем: 0,46 п.л. Вклад автора: 0,5.
- A12. Makoed I. I., **Amirov A. A.**, Liedienov N. A., Pashchenko A. V., Yanushkevich K. I. Predicted model of magnetocaloric effect in BiFeO<sub>3</sub>-based multiferroics // *Solid State Sciences*. – 2019. – Vol. 95. – P. 105920. – DOI:10.1016/j.solidstatesciences.2019.06.009. Импакт-фактор 3,30 (JIF). Q1 (SJR). Объем: 0,80 п.л. Вклад автора: 0,5.
- A13. Makoed I. I., **Amirov A. A.**, Liedienov N. A., Pashchenko A. V., Yanushkevich K. I., Yakimchuk D. V., Kaniukov E. Y. Evolution of structure and magnetic properties in Eu<sub>x</sub>Bi<sub>1-x</sub>FeO<sub>3</sub> multiferroics obtained under high pressure // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. – 2019. – Vol. 489. – P. 165379. – DOI:10.1016/j.jmmm.2019.165379. Импакт-фактор 3,00 (JIF). Q2 (SJR). Объем: 1,15 п.л. Вклад автора: 0,5.
- A14. **Amirov A. A.**, Rodionov V. V., Komanicky V., Latyshev V., Kaniukov E. Y., Rodionova V. V. Magnetic phase transition and magnetoelectric coupling in FeRh/PZT film composite // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. – 2019. – Vol. 479. – P. 287-290. – DOI:10.1016/j.jmmm.2019.01.079. Импакт-фактор 3,00 (JIF). Q2 (SJR). Объем: 0,46 п.л. Вклад автора: 0,5.
- A15. Starkov I., **Amirov A.**, Nikulin V., Starkov K., Starkov A. Temperature hysteresis in bilayer FeRh/PZT structure // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2019. – Vol. 1389. – P. 012084. – DOI: 10.1088/1742-6596/1389/1/012084. Импакт-фактор 0,56 (JIF). Q4 (SJR). Объем: 0,69 п.л. Вклад автора: 0,7.
- A16. Andrade V. M., **Amirov A.**, Yusupov D., Pimentel B., Barroca N., Pire A. L., Belo J. H., Pereira A. M., Valente M. A., Araújo J. P., Reis M. S. Multicaloric effect in a multiferroic composite of Gd<sub>5</sub>(Si,Ge)<sub>4</sub> microparticles embedded into a ferroelectric PVDF matrix // *Scientific reports*. – 2019. – Vol. 9, issue 1. – P. 18308. – DOI:10.1038/s41598-019-54635-8. Импакт-фактор 3,90 (JIF). Q1 (SJR). Объем: 1,15 п.л. Вклад автора: 0,5.
- A17. Старков А.С., Пахомов О.В., Родионов В.В., **Амиров А.А.**, Старков И.А. Оценка термодинамической эффективности работы твердотельных охладителей и генераторов на мультикалорическом эффекте // *Журнал технической физики*. – 2019. – Т. 89, №.4. – С. 590-598. Импакт-фактор 0,71 (РИНЦ). Объем: 1,04 п.л. Вклад автора: 0,5. [Переводная версия] Starkov A. S., Pakhomov O. V., Rodionov V. V., **Amirov A. A.**, Starkov I. A. Evaluation of the thermodynamic efficiency of solid-state coolers and generators based on the multicaloric effect // *Technical Physics*. – 2019. – Vol. 64, issue 4. – P. 547-554. – DOI:10.1134/S1063784219040224. Импакт-фактор 1,10 (JIF). Q3 (SJR). Объем: 0,92 п.л. Вклад автора: 0,5.
- A18. **Amirov A.A.**, Baraban I.A., Grachev A.A., Kamantsev A.P., Rodionov V.V., Yusupov D.M., Rodionova V.V., Sadovnikov A.V. Voltage-induced strain to control the magnetization of bi FeRh/PZT and tri PZT/FeRh/PZT layered magnetoelectric composites // *AIP Advances*. – 2020. – Vol. 10.– 025124. – DOI: 10.1063/1.5130026. Импакт-фактор 1,40 (JIF). Q3 (SJR). Объем: 0,46 п.л. Вклад автора: 0,5.
- A19. Starkov I., **Amirov A.**, Khanov L., Starkov A. Magnetobarocaloric effect in (1-x)La<sub>0.85</sub>Ag<sub>0.15</sub>MnO<sub>3</sub>-(x)0.67 PNN-0.33PT magnetoelectric composite // *Ferroelectrics*. – 2020. – Vol. 569, issue 1. – P. 222-226. – DOI:10.1080/00150193.2020.1822680. Импакт-фактор 0,60 (JIF). Q4 (SJR). Объем: 0,5775 п.л. Вклад автора: 0,7.
- A20. Каманцев А.П., **Амиров А.А.**, Кошкидько Ю.С., Салазар Мехиа К., Маширов А.В., Алиев А.М., Коледов В.В., Шавров В.Г. Магнитокалорический эффект в сплаве Fe<sub>49</sub>Rh<sub>51</sub> в импульсных магнитных полях до 50 Т // *Физика твердого тела*. – 2020. – Т. 62. №.1 – С. 117-120. Импакт-фактор 0,78 (РИНЦ). Объем: 0,46 п.л. Вклад автора: 0,4.

- [Переводная версия] Kamantsev A. P., **Amirov A. A.**, Koshkid'ko Yu. S., Salazar Mejía C., Mashirov A. V., Aliev A. M., Koledov V. V., Shavrov V. G. Magnetocaloric effect in alloy Fe<sub>49</sub>Rh<sub>91</sub> in pulsed magnetic fields up to 50 T // *Physics of the Solid State*. – 2020. – Vol. 62. – P. 160-163. – DOI:10.1134/S1063783420010151. Импакт-фактор 0,90 (JIF). Q4 (SJR). Объем: 0,46 п.л. Вклад автора: 0,4.
- A21. Makoed I.I., Liedienov N.A., Pashchenko A.V., Levchenko G.G., Tatarchuk D.D., Didenko Y.V., **Amirov A.A.**, Rimski, G.S., Yanushkevich K.I. Influence of rare-earth doping on the structural and dielectric properties of orthoferrite La<sub>0.50</sub>R<sub>0.50</sub>FeO<sub>3</sub> ceramics synthesized under high pressure // *Journal of Alloys and Compounds*. – 2020. – Vol. 842. – P. 155859. – DOI: 10.1016/j.jallcom.2020.155859. Импакт-фактор 6,30 (JIF). Q1 (SJR). Объем: 1,27 п.л. Вклад автора: 0,25.
- A22. **Amirov A. A.**, Cugini F., Kamantsev A. P., Gottschall T., Solzi M., Aliev A. M., Spichkin Yu. I., Koledov V. V., Shavrov V. G. Direct measurements of the magnetocaloric effect of Fe<sub>49</sub>Rh<sub>51</sub> using the mirage effect // *Journal of Applied Physics*. – 2020. – Vol. 127, issue 23. – P.233905. – DOI: 10.1063/5.0006355. Импакт-фактор 2,70 (JIF). Q2 (SJR). Объем: 0,80 п.л. Вклад автора: 0,7.
- A23. **Amirov A. A.**, Yusupov D. M., Mukhuchev A. M., Zhukov A., Zhukova V., Rodionova V. V., Aliev A. M. Multiferroic polymer composite based on Heusler-type magnetic microwires with combined magnetocaloric and magnetoelectric effects // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. – 2020. – Vol. 510. – P. 166884. – DOI:10.1016/j.jmmm.2020.166884. Импакт-фактор 3,00 (JIF). Q1 (SJR). Объем: 0,46 п.л. Вклад автора: 0,7.
- A24. **Амиров А. А.**, Макоед И. И., Юсупов Д. М. Мультикалорический эффект в феррите висмута // *Челябинский физико-математический журнал*. – 2020. – Т. 5, №. 2. – С. 140-149. – DOI:10.24411/2500-0101-2020-15201. Импакт-фактор 0,24 (РИНЦ). Q3 (SJR). Объем: 1,15 п.л. Вклад автора: 0,7.
- A25. Амиров А. А., Юсупов Д. М., Соболев К. В. Полимерный мультикалорический композит Fe-Rh/PVDF // *Письма о материалах*. – 2021. – Т. 11, №. 2(42). – С. 213-217. – DOI:10.22226/2410-3535-2021-2-213-217. Импакт-фактор 1,18 (РИНЦ), Q3 (SJR). Объем: 0,57 п.л. Вклад автора: 0,7.
- A26. Omelyanchik A., Antipova V., Gritsenko C., Kolesnikova V., Murzin D., Han Y., Turutin A. V., Kubasov I. V., Kislyuk A. M., Ilina T. S., Kiselev D. A., Voronova M. I., Malinkovich M. D., Parkhomenko Y. N., Silibin M., Kozlova E. N., Peddis D., Levada K., Makarova L., **Amirov A.**, Rodionova V. Boosting magnetoelectric effect in polymer-based nanocomposites // *Nanomaterials*. – 2021. – Vol. 11, issue 5. – P. 1154. – DOI: 10.3390/nano11051154, Импакт-фактор 4,30 (JIF). Q1 (SJR). Объем: 2,54 п.л. Вклад автора: 0,25.
- A27. **Amirov A. A.**, Gottschall T., Chirkova A. M., Aliev A. M., Baranov N. V., Skokov K. P., Gutfleisch O. Electric-field manipulation of the magnetocaloric effect in a Fe<sub>49</sub>Rh<sub>51</sub>/PZT composite // *Journal of Physics D: Applied Physics*. – 2021. – Vol. 54, issue 50. – P.505002. – DOI: 10.1088/1361-6463/ac25ae. Импакт-фактор 3,10 (JIF). Q1 (SJR). Объем: 0,8 п.л. Вклад автора: 0,6.
- A28. **Amirov A. A.**, Yusupov D. M., Murliev E. K., Gritsenko C. A., Aliev A. M., Tishin A. M. Smart thermoresponsive composite activated by magnetocaloric effect // *Materials Letters*. – 2021. – Vol. 304. – P. 130626. – DOI: 10.1016/j.matlet.2021.130626. Импакт-фактор 2,70 (JIF). Q2 (SJR). Объем: 0,46 п.л. Вклад автора: 0,7.
- A29. Rodionov V., **Amirov A.**, Annaorazov M., Lähderanta E., Granovsky A., Aliev A., Rodionova V., Thermal hysteresis control in Fe<sub>49</sub>Rh<sub>51</sub> alloy through annealing process // *Processes*. – 2021. – Vol. 9, issue 5. – P. 772. – DOI:10.3390/pr9050772. Импакт-фактор 2,80 (JIF), Q2 (SJR). Объем: 1,03 п.л. Вклад автора: 0,25.
- A30. Одинцов С. А., **Амиров А. А.**, Грачев А. А., Родионова В. В., Садовников А. В., Модовая фильтрация поверхностных магнитостатических волн в YIG/FeRh // *Физика*

- твердого тела.– 2021. –Т.63, № 9. – С. 1317-1320.– DOI:10.21883/FTT.2021.09.51307.24Н. Импакт-фактор 0,78 (РИНЦ), Q4 (SJR). Объем: 0,46 п.л. Вклад автора: 0,4.
- A31. **Амиров А. А.** Современные тренды в исследовании мультикалорических материалов // Челябинский физико-математический журнал. – 2021. – Т. 6, № 1. – С. 78-86. – DOI: 10.47475/2500-0101-2021-16106. Импакт-фактор 0,24 (РИНЦ). Q3 (SJR). Объем: 1,03 п.л. Вклад автора: 1,0.
- A32. Odintsov S. A., **Amirov A. A.**, Kamantsev A. P., Grachev A. A., Rodionova V. V., Sadovnikov A. V., Tunable Spin Wave Propagation in YIG/Fe-Rh Stripe // IEEE Transactions on Magnetics. – 2022. – Vol. 58, issue 2. – P. 1-4. – DOI: 10.1109/TMAG.2021.3085402. Импакт-фактор 2,1 (JIF). Q2 (SJR). Объем: 0,46 п.л. Вклад автора: 0,4.
- A33. **Амиров А. А.**, Тишин А. М., Пахомов О. В. Мультикалорики - новые материалы энергетики и стрейнтроники (обзор) // Физика твердого тела. – 2022. – Т. 64, № 4. – С. 395-411. Импакт-фактор 0,78 (РИНЦ). Объем: 1,96 п.л. Вклад автора: 0,7. [Переводная версия] **Amirov A. A.**, Tishin A. M., Pakhomov O. V. Multicalorics – new materials for energy and straintronics (Review) // Physics of the Solid State. – 2022. – Vol. 64, issue 4. – P. 395-409. – DOI: 10.21883/PSS.2022.04.53494.34s. Импакт-фактор 0,9 (JIF). Q4 (SJR). Объем: 1,73 п.л. Вклад автора: 0,7.
- A34. Саломатова Е. И., Одинцов С. А., Сахаров В. К., Хивинцев Ю. В., **Амиров А. А.**, Садовников А. В. Распространение спиновых волн в композитной структуре YIG/FeRh в виде системы связанных микроволноводов // Физика твердого тела. – 2022. – Т. 64, № 9. – С. 1263-1266. Импакт-фактор 0,78 (РИНЦ). Объем: 0,46 п.л. Вклад автора: 0,3. [Переводная версия] Salomatova E. I., Odintsov S. A., Sakharov V. K., Khivintsev Yu. V., **Amirov A. A.**, Sadovnikov A. V. Spin wave propagation in a YIG/FeRh composite structure as a system of coupled microwaveguides // Physics of the Solid State. – 2022. – Vol. 64, issue 9. – P. 1255-1258. –DOI: 10.21883/PSS.2022.09.54161.12НН. Импакт-фактор 0,9 (JIF). Q4 (SJR). Объем: 0,46 п.л. Вклад автора: 0,3.
- A35. Тааев Т. А., Амиров А. А., Алиев А. М., Чиркова А., Солдатов И. В., Шефер Р. Исследование магнитного фазового перехода сплава Fe<sub>49</sub>Rh<sub>51</sub> с использованием Керр-микроскопии // Физика металлов и металловедение. – 2022. – Т. 123, № 4. – С. 430-435. Импакт-фактор 1,47 (РИНЦ). Объем: 0,57 п.л. Вклад автора: 0,3. [Переводная версия] Тааев Т. А., **Amirov A. A.**, Aliev A. M., Chirkova A., Soldatov I. V., Schäfer R. Kerr microscopy study of magnetic phase transition in Fe<sub>49</sub>Rh<sub>51</sub> // Physics of Metals and Metallography. – 2022. – Vol. 123, issue 4. – P. 402-406. – DOI:10.1134/S0031918X22040123. Импакт-фактор 1,10 (JIF). Q3 (SJR). Объем: 0,57 п.л. Вклад автора: 0,4.
- A36. Sobolev K., Kolesnikova V., Omelyanchik A., Alekhina Y., Antipova V., Makarova L., Peddis D., Raikher Y. L., Levada K., **Amirov A.**, Rodionova V. Effect of Piezoelectric BaTiO<sub>3</sub> Filler on Mechanical and Magnetoelectric Properties of Zn<sub>0.25</sub>Co<sub>0.75</sub>Fe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>/PVDF-TrFE Composites // Polymers. – 2022. – Vol. 14, issue 22. – P. 4807. – DOI: 10.3390/polym14224807. Импакт-фактор 4,90 (JIF). Q1 (SJR). Объем: 1,84 п.л. Вклад автора: 0,3.
- A37. Orudzhev F., Alikhanov N. M., **Amirov A. A.**, Rabadanova A., Selimov D., Shuaibov A., Gulakhmedov R., Abdurakhmanov M., Magomedova A., Ramazanov S., Sobola D., Giraev K., Amirov A. M., Rabadanov K., Gadzhimagomedov S., Rabadanov M., Rodionova V. Porous hybrid PVDF/BiFeO<sub>3</sub> smart composite with magnetic, piezophotocatalytic, and light-emission properties // Catalysts. – 2023. – Vol. 13, issue 5. – P. 874. – DOI: 10.3390/catal13050874. Импакт-фактор 4,00 (JIF). Q2 (SJR) Объем: 2,42 п.л. Вклад автора: 0,25.

- A38. **Amirov A.A.**, Anokhin A.S., Talanov M.V., Sokolovskiy V.V., Kutzhanov M.K., Huang H., Reznichenko L.A., Es'kov A.V., Aliev A.M. Multicaloric Effect in 0–3-Type MnAs/PMN–PT Composites // *Journal of Composites Science*. – 2023. – Vol. 7, issue 9. – P. 400. – DOI: 10.3390/jcs7090400. Импакт-фактор 3,70 (JIF). Q1 (SJR). Объем: 2,07 п.л. Вклад автора: 0,6.
- A39. Kamantsev A.P., **Amirov A.A.**, Zaporozhets V.D., Gribanov I.F., Golovchan A.V., Valkov V.I., Pavluchina O.O., Sokolovskiy V.V., Buchelnikov V.D., Aliev A.M., Koledov V.V. Effect of magnetic field and hydrostatic pressure on metamagnetic isostructural phase transition and multicaloric response of Fe<sub>49</sub>Rh<sub>51</sub> alloy // *Metals*. – 2023. – Vol. 13, issue 5. – P. 956. – DOI: 10.3390/met13050956. Импакт-фактор 2,5 (JIF), Q2 (SJR). Объем: 1,38 п.л. Вклад автора: 0,5.
- A40. Shao C., **Amirov A. A.**, Huang H. A review on different theoretical models of electrocaloric effect for refrigeration // *Frontiers in Energy*. – 2023. – Vol. 17, issue 4. – P.478-503. – DOI: 10.1007/s11708-023-0884-6. Импакт-фактор 2,40 (JIF), Q2 (SJR). Объем: 3,00 п.л. Вклад автора: 0,3.
- A41. Каманцев А. П., Амиров А. А., Юсупов Д. М., Головчан А. В., Ковалёв О. Е., Комлев А. С., Алиев А. М. Магнитокалорический эффект в композитах на основе La(Fe, Mn, Si)<sub>13</sub>H<sub>x</sub>: эксперимент и теория // *Физика металлов и металловедение*. – 2023. – Т. 124, № 11. – С. 1074-1085. Импакт-фактор 1,47 (РИНЦ). Объем: 1,37 п.л. Вклад автора: 0,5. [Переводная версия] Kamantsev A. P., **Amirov A. A.**, Yusupov D. M., Golovchan A. V., Kovalev O. E., Komlev A. S., Aliev A. M. Magnetocaloric Effect in La(Fe, Mn, Si)<sub>13</sub>H<sub>x</sub> Based Composites: Experiment and Theory // *Physics of Metals and Metallography*. – 2023. – Vol. 124. – P. 1121-1131. – DOI: 10.1134/S0031918X23601695. Импакт-фактор 1,10 (JIF). Q3 (SJR). Объем: 1,27 п.л. Вклад автора: 0,5.
- A42. Каманцев А. П., Амиров А. А., Юсупов Д. М., Бутвина Л. Н., Кошкидько Ю. С., Головчан А. В., Вальков В. И., Алиев А. М., Коледов В. В., Шавров В. Г. Современные бесконтактные оптические методы измерения магнитокалорического эффекта // *Физика металлов и металловедение*. – 2023. – Т. 124, № 11. – С. 1025-1043. Импакт-фактор 1,47 (РИНЦ). Объем: 2,19 п.л. Вклад автора: 0,5. [Переводная версия] Kamantsev A. P., **Amirov A. A.**, Yusupov D. M., Butvina L. N., Koshkid'ko Y. S., Golovchan A. V., Valkov V. I., Aliev A. M., Koledov V. V., Shavrov V. G. Advanced non-contact optical methods for measuring the magnetocaloric effect // *Physics of Metals and Metallography*. – 2023. – Vol. 124. – P. 1075-1091. – DOI: 10.1134/S0031918X23601646. Импакт-фактор 1,10 (JIF). Q3 (SJR). Объем: 1,96 п.л. Вклад автора: 0,5.
- A43. **Amirov A.**, Samsonov D. Demonstration of the multicaloric effect in a laboratory prototype // *Journal of Applied Physics*. – 2024. – Vol. 136, issue 5. – P. 053902. – DOI: 10.1063/5.0221231. Импакт-фактор 2,70 (JIF). Q2 (SJR). Объем: 1,27 п.л. Вклад автора: 0,7.
- A44. **Amirov A. A.**, Koliushenkov M. A., Mukhuchev A. A., Yusupov D. M., Govorina V. V., Neznakhin D. S., Govor G. A., Aliev A. M. Multicaloric response tuned by electric field in cylindrical MnAs/PZT magnetoelectric composite // *Journal of Applied Physics*. – 2024. – Vol. 136, issue 11. – P. 113903. – DOI: 10.1063/5.0231720. Импакт-фактор 2,70 (JIF). Q2 (SJR). Объем: 0,92 п.л. Вклад автора: 0,6.
- A45. Govorina V. V., **Amirov A. A.**, Stashkova L. A., Govor G. A., Neznakhin D. S. Anisotropy of the Magnetocaloric effect in MnAs single crystal // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. – 2024. – Vol. 609. – P. 172483. – DOI: 10.1016/j.jmmm.2024.172483. Импакт-фактор 3,00 (JIF). Q1 (SJR). Объем: 0,57 п.л. Вклад автора: 0,4.
- A46. **Amirov A.A.**, Chirkova A.M., Volegov A. S., Komlev A. S., Baranov N. V., Aliev A. M. Degradation of the magnetocaloric effect in Fe<sub>48</sub>Rh<sub>52</sub> alloys under cyclic magnetic field // *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics*. – 2024. – Vol. 88, issue S2 – P. S269

– S274. – DOI:10.1134/S1062873824709383. Импакт-фактор 0,45 (JIF). Q3 (SJR). Объем: 0,69 п.л. Вклад автора: 0,5.

- A47. **Amirov, A. A.**, Permyakova, E. S., Yusupov, D. M., Savintseva, I. V., Murliev, E. K., Rabadanov, K. S., Popov A. L., Chirkova A. M., Aliev A. M. Thermoresponsive PNIPAM/FeRh smart composite activated by a magnetic field for doxorubicin release // ACS Applied Engineering Materials. – 2025. – Vol. 3, issue 2. – P.410-418 – DOI: 10.1021/acsaenm.4c00730. Импакт-фактор 3,5 (JIF). Q2 (SJR). Объем: 0,92 п.л. Вклад автора: 0,7.
- A48. **Amirov A. A.**, Koliushenkov M. A., Yusupov D. M., Murliev E. K., Chirkova A. M., Kamantsev A. P. A model of a “smart” thermoresponsive composite with convertible surface geometry controlled by the magnetocaloric effect // Journal Composites Science. – 2025. – Vol. 9, issue 3. – P.97. – DOI: 10.3390/jcs9030097. Импакт-фактор 3,70 (JIF). Q1 (SJR). Объем: 1,03 п.л. Вклад автора: 0,6.

### **Иные публикации:**

#### **Монографии**

- A49. **Amirov A.** Magnetic Materials and Technologies for Medical Applications. В 11 т. Т. 15. Multiferroic, magnetic, and magnetoelectric nanomaterials for medical applications; ред. Tishin A. – 1-е издание. – Woodhead Publishing Series in Electronic and Optical Materials. – 2021. – 662 с. – ISBN: 9780128225325. Объем: 2,54 п.л. Вклад автора: 1.

\*«Двухлетний импакт-фактор РИНЦ» по базе данных сайта <https://elibrary.ru> по состоянию на 2025 год.

\* «Journal Impact Factor» по базе данных Journal Citation Reports по состоянию на 2025 год.

\*\*«Citations per document (2 years) » по базе данных Scimago Journal & Country Rank по состоянию на 2025 год.

#### **Список цитируемой литературы**

1. Tishin A.M., Spichkin Y.I. The magnetocaloric effect and its applications // The Magnetocaloric Effect and its Applications. - 2016. - P. 1–475. - DOI:10.1887/0750309229.
2. Klinar K., Law J.Y., Franco V., Moya X., Kitanovski A. Perspectives and Energy Applications of Magnetocaloric, Pyromagnetic, Electrocaloric, and Pyroelectric Materials // Advanced Energy Materials. - 2024. - Vol. 14. - P. 2401739. - DOI:10.1002/aenm.202401739.
3. Moya X., Kar-Narayan S., Mathur N.D. Caloric materials near ferroic phase transitions // Nature Materials. - 2014. - Vol. 13, № 5. - P. 439–450. - DOI:10.1038/nmat3951.
4. Greco A., Masselli C. Electrocaloric cooling: A review of the thermodynamic cycles, materials, models, and devices // Magnetochemistry. - 2020. - Vol. 6, № 4. - P. 1–31. - DOI:10.3390/magnetochemistry6040067.
5. Cazorla C. Novel mechanocaloric materials for solid-state cooling applications // Applied Physics Reviews. - 2019. - Vol. 6, № 4. - DOI:10.1063/1.5113620.
6. Hou H., Qian S., Takeuchi I. Materials, physics and systems for multicaloric cooling // Nature Reviews Materials. - 2022. - Vol. 7, № 8. - P. 633–652. - DOI:10.1038/s41578-022-00428-x.
7. Aizu K. Possible Species of Ferromagnetic, Ferroelectric, and Ferroelastic Crystals // Physical Review B. - 1970. - Vol. 2, № 3. - P. 754–772. - DOI:10.1103/PhysRevB.2.754.
8. Bukharaev A.A., Zvezdin A.K., Pyatakov A.P., Fetisov Y.K. Straintronics: a new trend in micro- and nanoelectronics and material science // Physics-Uspekhi. - 2018. - Vol. 188, № 12. - P. 1288–1330. - DOI:10.3367/ufnr.2018.01.038279.
9. Nan C.-W., Bichurin M.I., Dong S., Viehland D., Srinivasan G. Multiferroic magnetoelectric composites: Historical perspective, status, and future directions // Journal of Applied Physics. - 2008. - Vol. 103, № 3. - P. 31101. - DOI:10.1063/1.2836410.
10. Cohen L.F. Contributions to Hysteresis in Magnetocaloric Materials // Physica Status Solidi B. - 2018. - Vol. 255, № 2. - DOI:10.1002/pssb.201700317.

11. Stern-Taulats E., Castán T., Planes A., Lewis L.H., Barua R., Pramanick S., Majumdar S., Mañosa L. Giant multicaloric response of bulk  $\text{Fe}_{49}\text{Rh}_{51}$  // *Physical Review B*. - 2017. - Vol. 95, № 10. - DOI:10.1103/PhysRevB.95.104424.
12. Hamad M.A. Theoretical work on magnetocaloric effect in  $\text{La}_{0.75}\text{Ca}_{0.25}\text{MnO}_3$  // *Journal of Advanced Ceramics*. - 2012. - Vol. 1, № 4. - P. 290–295. - DOI:10.1007/s40145-012-0027-8.
13. Gràcia-Condal A., Planes A., Mañosa L., Wei Z., Guo J., Soto-Parra D., Liu J. Magnetic and structural entropy contributions to the multicaloric effects in Ni-Mn-Ga-Cu // *Physical Review Materials*. - 2022. - Vol. 6, № 8. - P. 084403. - DOI:10.1103/PhysRevMaterials.6.084403.
14. Amirov A., Yusupov D., Komlev A., Koliushenkov M, Kamantsev A., Aliev A., Multicaloric effect in  $\text{Fe}_{48}\text{Rh}_{52}$  alloy: case of combination magnetic field and uniaxial tension // *ArXiv*. – 2025. – <https://doi.org/10.48550/arXiv.2502.18087>.