

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ИМЕНИ М.В.ЛОМОНОСОВА

*На правах рукописи*

**Нугуманов Айдар Гайсович**

**Топологически устойчивые спиновые структуры  
в наноразмерных мультиферроиках**

1.3.3. - Теоретическая физика

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Москва – 2023 г.

Диссертация подготовлена на кафедре теоретической физики ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и технологий».

**Научный руководитель** – **Шарафуллин Ильдус Фанисович**,  
доктор физико-математических наук, доцент

**Официальные оппоненты** – **Загребин Михаил Александрович**,  
доктор физико-математических наук, доцент,  
профессор кафедры радиофизики и  
электроники физического факультета ФГБОУ  
ВО «Челябинский государственный  
университет».

**Савченко Александр Максимович**,  
доктор физико-математических наук,  
профессор, профессор кафедры квантовой  
статистики и теории поля физического  
факультета ФГБОУ ВО «Московский  
государственный университет имени М.В.  
Ломоносова».

**Бабаев Альберт Бабаевич**,  
кандидат физико-математических наук, доцент,  
ведущий научный сотрудник лаборатории  
вычислительной физики и физики фазовых  
переходов ФГБОУ ВО «Институт физики им.  
Х.И. Амирханова» ДФИЦ РАН.

Защита диссертации состоится 29 февраля 2024 г. в 13 часов 00 минут на заседании диссертационного совета МГУ.011.2-1 Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова по адресу: 119991, Москва, ГСП-1, Ленинские горы, МГУ имени М.В.Ломоносова, д. 1, стр. 2, физический факультет, ауд. 4-46.

Е-mail: [ff.dissovet@gmail.com](mailto:ff.dissovet@gmail.com)

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/011.2-1/2834>

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета МГУ.011.2-1  
доктор физико-математических наук,  
**профессор**

**П.А. Поляков**

## **Общая характеристика работы**

**Актуальность темы исследования.** Одной из фундаментальных задач современной теоретической физики является исследование систем взаимодействующих многих частиц, частный случай которых представлен широким классом магнитоэлектрических кристаллических систем, проявляющих одновременно при определённых физических условиях различные типы дальнего порядка. Вследствие сильной корреляции между компонентами таких систем, они проявляют уникальные физические свойства, имеющие важное практическое значение для использования в составе элементной базы информационно-вычислительной техники, микроэлектронных устройств и приборов физического эксперимента нового поколения.

Значительные перспективы демонстрируют различные магнитоэлектрические композитные мультиферроики, создаваемые путём комбинирования чередующихся ферромагнитных и ферроэлектрических наноплёнок различной толщины.

Слоистая структура композитных мультиферроиков естественным образом обеспечивает нарушение пространственной симметрии кристалла, в связи с чем возможно проявление различных поверхностных эффектов, локализующихся на границах между слоями с различным упорядочением (также называемых интерфейсами). Такие эффекты, в зависимости от характера межслойного взаимодействия, могут приводить к возникновению нетривиальных топологических магнитных наноструктур, чувствительных к электромагнитным полям малой интенсивности, что позволяет применять такие материалы для создания ультраплотных спинтронных логических элементов и ячеек памяти.

Наличие и конфигурация таких топологических магнитных наноструктур зависит от соотношения интенсивности различных присутствующих видов взаимодействия и величин внешнего магнитного и электрического полей. С помощью математического аппарата искусственных нейронных сетей (ИНС) можно с большой степенью точности предсказывать желаемые стабильные конфигурации (например, магнитных нановихрей, также называемых скирмионами) и соответствующих параметров. Это позволяет значительно уменьшить временные и вычислительные затраты при исследовании многомерного параметрического пространства конфигураций и является полезным инструментом для дизайна новых композитных мультиферроиков.

Исследование физических свойств композитных мультиферроиков на основе моделирования спиновых и ферроэлектрических структур представляет актуальную задачу современной теоретической физики.

## **Степень разработанности темы исследования**

В последнее десятилетие наблюдается растущий интерес к магнитоэлектрическим свойствам композитных мультиферроиков [1], также называемых свёрхрешётками, в связи с возможными приложениями в различных областях, таких как микроэлектроника, спиновый транспорт и оптоэлектроника

[2]. Особый интерес вызывают плёночные композитные мультиферроики, поскольку из-за малой толщины в них проявляются необычные явления, одним из примеров которых является гигантский магнитоэлектрический эффект [3].

В литературе можно найти обширные данные по экспериментальным исследованиям влияния толщин слоёв на критическое поведение сверхрешёток [4]. Теоретические исследования были в основном сконцентрированы на изучении свойств магнитных бислоёв. Фераун и др. использовали моделирование методом Монте-Карло для изучения фазовых диаграмм и магнитных свойств ферромагнитной сверхрешетки Изинга с чередующимися слоями (с амплитудами спинов 1 и 3/2 соответственно) [5]. В работе [6] Куи с коллегами изучали двухслойную ферроэлектрическую плёнку с антиферроэлектрическим межслойным взаимодействием. Ядав и др. [7] наблюдали сложную топологию электрической поляризации, используя конкуренцию между зарядовыми, орбитальными и решёточными степенями свободы в ферроэлектрических/параэлектрических сверхрешётках чередующихся слоёв титанатов свинца и стронция. Н. Джедреси и соавт. изучали связь между деформацией и ферромагнитными/ферроэлектрическими свойствами в слоистых гетероструктурах  $\text{CoFe}_2\text{O}_4/\text{BaTiO}_3$  [8].

Большой практический интерес представляют магнитные скирмионы – топологически защищённые вихревые нанообъекты – которые могут возникать в мультиферроиках в определенных диапазонах внешних полей и температур благодаря возможности сосуществования двух и более типов упорядочения, так как они потенциально могут использоваться носители информации в устройствах спинтроники [4]. Скирмионы обычно образуются под действием внешнего магнитного поля в нецентросимметричных наноплёнках или на интерфейсах гетероструктур и сверхрешёток с нарушенной поперечной симметрией [9]. Было обнаружено, что на интерфейсах композитных материалов возможно естественное возникновение скирмионов, обладающих уникальной динамикой по сравнению со спиновыми структурами на интерфейсах однородных материалов [10]. Применение скирмионов в спинтронике широко обсуждается, в частности Канг с соавт. в недавнем обзоре [11] отмечали их преимущества по сравнению с ранними магнитными устройствами, такими как магнитные пузыри. Среди наиболее важных применений скирмионов упомянем трековую память, логические элементы, транзисторы искусственных синапсов и нейронных устройств со скирмионной базой [12]. Роммингом и др. [14] впервые была продемонстрирована возможность управления скирмионами в бислое  $\text{Pd} / \text{Fe}$  на иридиевой подложке, что открывает возможность записывания и чтения индивидуальных скирмионов посредством спин-поляризованного туннельного тока. А.П. Пятаков с коллегами [14] установили возможность порождения скирмионов внешним электрическим полем за счет неоднородного магнитоэлектрического эффекта.

Многочисленные экспериментальные исследования выявили скирмионные структуры в металлических ферромагнетиках, допускающих магнитоэлектрическое взаимодействие вида Дзялошинского-Мории, например монослой  $\text{Fe}$  на различных подложках [15]. Уменьшение размеров скирмионов,

повышение их устойчивости к комнатным температурам, а также снижение энергозатрат на управление скирмионами являются актуальными проблемами спинтроники. Одним из способов является использование искусственных антиферромагнетиков [16], в которых два ферромагнитных слоя связаны антиферромагнитно через немагнитный слой [17].

Следует отметить, что численное моделирование мультиферроиков с несколькими видами взаимодействия даже при относительно небольшом количестве моделируемых частиц требует значительных вычислительных ресурсов. Значительный прогресс в развитии методов математического моделирования с использованием нейронных сетей в теории конденсированного состояния позволяет усовершенствовать и добиться серьезного ускорения методов исследования физических свойств материалов [18]. Например, Причиненко с соавт. [19] предложили новый метод глубокого машинного обучения для поиска параметров многослойной фотонной структуры по заданному оптическому спектру коэффициента отражения.

Экспериментальные фазовые диаграммы ряда материалов указывают на значительные переходные области между различными, что ставит задачу точного определения фазовых границ между, к примеру, скирмионами и геликоидальной структурой. Нейросети успешно применяются для идентификации магнитных фаз магнитных гамильтонианов, являющихся примером сильнокоррелированных материалов [20]. В [21] подход машинного обучения применялся для распознавания и классификации сложных неколлинеарных магнитных структур в двумерных материалах и было показано, что стандартная нейросеть с прямой связью может эффективно использоваться для контролируемого обучения на конфигурациях топологически защищенных скирмионных и спиральных магнитных структур.

## **Цели и задачи диссертационной работы**

**Основной целью** диссертационной работы является исследование различных моделей магнитоэлектрического взаимодействия в тонких плёнках мультиферроиков и влияния геометрии изучаемых моделей, а также конкуренции различных типов взаимодействия на формирование и устойчивость топологических магнитных вихрей, с конечной целью разработки новых запоминающих устройств на базе троичной логики.

Для достижения этой цели в работе поставлены следующие **задачи**:

1. Исследовать характер фазовых переходов в модели одноосного мультиферроика типа перовскита с антиферромагнитным и антиферроэлектрическим типами взаимодействия при помощи методов Монте-Карло и гистограммной техники.
2. Изучить возникновения топологических магнитных вихревых структур методом градиентного спуска в ферромагнитно – ферроэлектрической и ферромагнитно – антиферроэлектрической сверхрешётках с треугольной кристаллической решёткой и исследование их температурной стабильности в присутствии и отсутствии внешнего магнитного поля методом Монте-Карло.

3. Исследовать зависимости стабильной магнитной конфигурации композитной мультиферроидной плёнки с плоскостной треугольной симметрией от параметров магнитного, ферроэлектрического, магнитоэлектрического взаимодействия и внешнего магнитного поля при помощи аппарата искусственных нейронных сетей и метода градиентного спуска. Анализ параметрического «острова стабильности» решётки скирмионов.
4. Изучить зависимости амплитуды топологического заряда скирмионов в основном состоянии от параметров магнитного и магнитоэлектрического взаимодействия в форме Дзялошинского-Мория в композитной мультиферроидной плёнке с плоскостной треугольной симметрией и построение подробной фазовой диаграммы топологического заряда с помощью нейронной сети.

### **Научная новизна**

Все полученные результаты являются новыми, что определяется оригинальностью полученных результатов, подтверждается публикациями в ведущих физических научных журналах и заключается в следующем:

1. В работе проведен численный анализ температурного поведения как кристаллических, так и композитных мультиферроиков, и изучены характеристики фазовых переходов в зависимости от величин параметров взаимодействия и внешних электрического и магнитного полей. Показано, что присутствие полей обеспечивает устойчивость упорядоченных фаз в магнитной и ферроэлектрической подсистемах в большом диапазоне температур, а также позволяет управлять критической температурой.
2. Исследовано формирование вихревых спиновых структур на интерфейсных слоях мультиферроидных свехрешёток с фрустрированной треугольной решёткой и обнаружено возникновение скирмионов даже в отсутствии внешнего магнитного поля. Показано влияние внешнего магнитного поля и магнитоэлектрического взаимодействия типа Дзялошинского-Мория на конфигурацию вихревых спиновых структур в основном состоянии и определены условия температурной устойчивости скирмионов.
3. Впервые использован математический аппарат искусственных нейронных сетей для поиска устойчивых состояний в композитном мультиферроике. В параметрическом фазовом пространстве обнаружена большая область стабильности, в которой существует фаза скирмионной решётки в большом временном и температурном диапазоне.
4. Разработана методика вычисления топологического заряда на дискретной спиновой решётке и получена фазовая диаграмма топологических зарядов в основном состоянии композитного мультиферроика в пространстве параметров обменного и магнитоэлектрического взаимодействий.

### **Теоретическая и практическая значимость работы**

1. Изучены механизмы стабилизации магнитных скирмионов в свехрешетках ферромагнетик / ферроэлектрик при помощи варьирования толщины слоёв и

величины внешнего магнитного поля, что открывает предпосылки для новых решений устройств эффективной обработки и записи данных на основе скирмионов и топологических нелинейных наноразмерных структур.

2. Обнаруженные эффекты в мультиферроидных композитных наноплёнках позволяют предположить возможность дальнейшего уменьшения вышеупомянутых элементов компьютерной логики при сохранении управляемости не только при помощи внешних магнитных полей, но и электрического тока, решая таким образом проблему низкой энергоэффективности спинтронных устройств.
3. Высокая эффективность и запоминающая способность нейронных сетей объединена с высокой точностью метода градиентного спуска для поиска основных состояний системы многих взаимодействующих частиц, что позволит в дальнейшем более эффективный поиск материалов с требуемыми свойствами, такими как плотность записи и скорость чтения-записи информации.

Полученные результаты открывают широкие возможности для разработки и производства новейших типов запоминающих устройств со сверхплотной записью и низкой энергозатратностью.

#### **Методология и методы исследования**

В работе использовались компьютерные методы Монте-Карло для математического моделирования фазовых переходов и критических явлений, они являются общепринятыми и повсеместно используются в компьютерной физике, а результаты Монте-Карло моделирования фазовых переходов в объемных структурах согласуются с экспериментальными данными. Среди других использованных статистических подходов – гистограммный метод, позволяющий аппроксимировать энергетический спектр моделей для прямого вычисления термодинамических характеристик.

Для вычисления основного состояния был использован метод градиентного спуска, оптимизированный с помощью вспомогательных искусственных нейронных сетей.

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

1. Построена диаграмма зависимости топологического заряда скирмионов от интенсивностей основных параметров взаимодействия системы, в том числе обмена и взаимодействия Дзялошинского-Мории, и исследован вопрос о стабильности топологически защищенных структур по отношению к материальным параметрам.
2. Построены фазовые диаграммы в наноразмерных мультиферроиках с кубической симметрией, свидетельствующие о тесной взаимосвязи магнитных и ферроэлектрических фазовых переходов, имеющих различную природу значения температур переходов внутри пленок и на интерфейсе. Установлены критические значения параметров взаимодействия, при которых в системе наблюдается изменение типа фазового перехода.

3. Показано, что скирмионы в основном состоянии в магнитоэлектрических сверхрешетках с треугольной симметрией формируются в области значений параметра магнитоэлектрического взаимодействия  $J^{mf} \in [-1.0, -0.75]$  в отсутствие внешнего магнитного поля и распределяются в трехмерном пространстве ферромагнитного слоя. В магнитоэлектрических сверхрешетках с кубической симметрией такого эффекта не наблюдается. Толщина ферроэлектрического слоя не влияет на устойчивость скирмионной структуры и напротив, толщина магнитной пленки определяет стабильность скирмионной структуры: скирмионы формируются только для диапазона от четырех до шести магнитных слоев в отсутствие внешнего магнитного поля.
4. Предложен алгоритм на основе искусственных нейросетей, который обеспечивает быстрый поиск определенных устойчивых состояний в параметрическом пространстве, при этом каждый новый элемент обучающих данных повышает точность предсказания ИНС. Определены диапазоны значений параметров, которые соответствуют стабильным основным состояниям со скирмионной решеткой.
5. В двуслойной пленке антиферромагнетик/ферроэлектрик с треугольной симметрией обнаружены четыре четко различимые фазы, две из которых обладают высокими значениями топологического заряда, но при этом отличаются топологией скирмионов. Границы скирмионных фаз являются четко определёнными, при пересечении которых топологический заряд скирмионов претерпевает скачкообразное изменение. Внутри фаз происходит плавное изменение основного состояния.

### **Достоверность результатов**

Исследования, проведенные в диссертации, основаны на различных статистических методах, таких как методы моделирования Монте-Карло, метод энергетических гистограмм и методы стохастического и градиентного спуска. Полученные результаты хорошо согласуются с теоретическими результатами, получаемыми различными квантово-статистическими методами для изучаемых систем многих взаимодействующих частиц. Все основные результаты диссертации были опубликованы в ведущих рецензируемых международных и российских журналах с высоким импакт-фактором, а также представлены автором на многочисленных международных научных конференциях и рабочих совещаниях, где они активно обсуждались и получили одобрение научной общественности.

### **Апробация работы**

Все основные результаты работы обсуждались на семинарах физико-технического института и на кафедре теоретической физики ФГБОУ ВО «Башкирский государственный университет». Материалы диссертационной работы были представлены на 20 российских и международных научных конференциях, в их числе:



1. Межрегиональная школа-конференция «Теоретические и экспериментальные исследования в конденсированных средах», 2014, Уфа.
2. Moscow International Symposium on Magnetism «MISM-2014», 2014, Москва.
3. International conference Piezoresponse Force Microscopy and Nanoscale Phenomena in Polar Materials «PFM-2014», 2014, Екатеринбург.
4. VII Международная школа-конференция для студентов, аспирантов и молодых учёных «Фундаментальная математика и её приложения в естествознании», 2014, Уфа.
5. 53-я международная научная студенческая конференция «МНСК-2015», Новосибирск, 2015. С. 40.
6. Двадцать первая Всероссийская научная конференция студентов-физиков и молодых учёных «ВНКСФ-21», 2015, Омск.
7. XXII Международный молодёжный научный форум «ЛОМОНОСОВ-2015», 2015, Москва.
8. 18-th international meeting Order, Disorder and Properties of Oxides «ODPO-18», 2015, Ростов-на-Дону, п. Лоо.
9. VIII Международная школа-конференция для студентов, аспирантов и молодых учёных «Фундаментальная математика и её приложения в естествознании», 2015, Уфа.
10. 18-th international meeting Ordering in Minerals and Alloys «ОМА-18», 2015, Ростов-на-Дону, п. Лоо.
11. Международная конференция, посвящённая 80-летию члена-корреспондента РАН И. К. Камилова «Фазовые переходы, критические и нелинейные явления в конденсированных средах», 2015, Челябинск.
12. VI Euro-Asian Symposium "Trends in MAGnetism" (EASTMAG-2016), 2016, Красноярск.
13. Двадцать третья Всероссийская научная конференция студентов-физиков и молодых ученых «ВНКСФ-23», 2017, Екатеринбург – Ростов на Дону.
14. Moscow International Symposium on Magnetism «MISM-2017», 2017, Москва.
15. X Международная школа-конференция для студентов, аспирантов и молодых ученых «Фундаментальная математика и ее приложения в естествознании», 2018, Уфа.
16. V Всероссийская научная молодежная конференция с международным участием «Актуальные проблемы микро- и наноэлектроники», 2018, Уфа.
17. IV Межрегиональная школа-конференция студентов, аспирантов и молодых ученых-физиков «Теоретические и экспериментальные исследования нелинейных процессов в конденсированных средах», 2018, Уфа.
18. Joint European Magnetic Symposium «JEMS-2018», 2018, Майнц, Германия.
19. XXVI Международный Симпозиум «Нанозифика и Нанозифика», 2022, Нижний Новгород.
20. VIII Межрегиональная школа-конференция студентов, аспирантов и молодых ученых-физиков «Теоретические и экспериментальные исследования нелинейных процессов в конденсированных средах», 2022, Уфа.

## Публикации и личный вклад автора

Основные результаты диссертации опубликованы в 8 статьях в ведущих российских и зарубежных физических журналах, индексируемых в международных базах данных Web of Science и Scopus, см. номера [1] - [8]. Помимо этого, по материалам диссертации опубликованы более 20 работ в трудах конференций и рабочих совещаний, см. ссылки [9] - [20]. Личный вклад автора являлся определяющим при проведении численных исследований, разработке теоретических моделей, анализе полученных результатов и предоставлении их в печати. Непосредственное создание кода программ Монте-Карло моделирования и метода градиентного спуска, анализ и интерпретация результатов моделирования. При этом необходимо отметить, что теоретическое исследование основного состояния в объёмных мультиферроиках и сверхрешётках с межслойным магнитоэлектрическим взаимодействием проведено совместно с И.Ф. Шарафуллиным, М.Х. Харрасовым и Х.Т. Диеном в работах [1-3].

## Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, трёх глав, заключения, списка публикаций автора и списка цитируемой литературы. Общий объем диссертации составляет 99 страниц. Диссертация содержит 42 рисунка. Список литературы включает 123 ссылки.

## Краткое содержание диссертации

**Введение.** Во Введении обоснована актуальность темы исследований, изложены цели и задачи работы, методы исследования, показана ее научная новизна и значимость, приведены положения, выносимые на защиту, и личный вклад автора.

**Глава 1. Особенности фазовых переходов и критических явлений в мультиферроидных сверхрешётках** посвящена численному исследованию температурной стабильности упорядоченных конфигураций в магнитной и ферроэлектрической подсистемах, а также фазовых переходов в мультиферроиках двух типов: перовскитов и сверхрешёток составленных из чередующихся магнитных и ферроэлектрических слоёв различной толщины. Для магнитной и ферроэлектрической подсистем перовскитов выберем гамильтонианы в виде:

$$\mathcal{H}_m = - \sum_{(i,j)} \{J_{ij}(S_{ix}S_{iy} + S_{jx}S_{jy}) + \vec{H}\vec{S}_i\}$$
$$\mathcal{H}_f = - \int d\vec{x} \left\{ \chi_{ij}^{\alpha\beta} \vec{P}_i^\alpha \vec{P}_j^\beta + a_{ijm}^\alpha \vec{P}_i^\alpha \vec{S}_j \vec{S}_m - 2\vec{E}(\vec{P}^1 + \vec{P}^2) \right\}$$

Результаты моделирования показывают, что переход из антиферромагнитной фазы в парамагнитную для магнитной подсистемы и соответствующий переход из антиферроэлектрической фазы в таких кристаллах являются переходами второго рода. Рассматривалось магнитоэлектрическое взаимодействие на

границе магнитного и ферроэлектрического слоёв, было обнаружено, что при значениях магнитоэлектрического параметра ниже определённой интенсивности, температуры фазовых переходов в подсистемах расходятся а при значениях выше критического фазовый переход в системе приобретает характер первого рода.

**Глава 2. Скирмионы и фазовые переходы в ферромагнитно-ферроэлектрических сверхрешётках с треугольной симметрией.** Во второй главе исследуется образование скирмионов и скирмионных решёток в основном состоянии в мультиферроидной сверхрешетке с треугольной симметрией и перпендикулярным магнитоэлектрическим взаимодействием типа Дзялошинского-Мория на границах магнитных и ферроэлектрических слоёв, а также фазовые переходы в этих системах и стабильность скирмионов в зависимости от величины магнитоэлектрического взаимодействия и внешнего магнитного поля.

Для изучения стабильности спиновых структур используется магнитный параметр порядка, вычисляемый по формуле:

$$M_m = \sum_n M_m(n) = \frac{1}{N^2(t_a - t_0)} \sum_{i \in n} \left| \sum_{t_0}^{t_a} S_i(T, t) \cdot S_i^0(T = 0) \right|$$

Было обнаружено, что в отсутствии магнитного поля при превышении абсолютной величины магнитоэлектрического взаимодействия некоторого критического значения в основном состоянии возникают отдельные крупные скирмионы, а при дальнейшем увеличении их количество возрастает на интерфейсном слое и при этом их радиус уменьшается. Такое поведение не наблюдалось при моделировании мультиферроидной сверхрешётки и обусловлено естественной фрустрацией, создаваемой треугольной симметрией слоёв. Гигантские значения магнитоэлектрического параметра приводят к устранению фазового перехода на интерфейсном магнитном слое.

Было показано, что присутствие слабого магнитного поля играет роль стабилизирующего фактора для образующейся скирмионной решётки.

**Глава 3. Поиск стабильных скирмионных решеток в основном состоянии в наноплёнке мультиферроика и изучение фазового параметрического пространства топологических зарядов с помощью искусственных нейронных сетей.** В третьей главе предлагается обобщённый подход к исследованию различных упорядоченных конфигураций композитной мультиферроидной плёнки с треугольной симметрией в зависимости от параметров взаимодействия и величины внешнего магнитного поля при помощи аппарата искусственных нейронных сетей. В частности, нейросети применяются для хранения известных стабильных состояний плёнки и соответствующих параметров, а также для предсказания конфигурации для неизвестных комбинаций параметров и дальнейшего применения в качестве первого приближения для вычисления основного состояния методом градиентного спуска.

Было исследовано 2 случая:

1) Фазовое пространство 8 параметров для модели с конкурирующими обменными взаимодействиями, магнитоэлектрическим взаимодействием и внешним магнитным полем  $\{J_m^1, J_m^2, J_m^3, J_f, J_{mf}, H^x, H^y, H^z\}$ .

2) Фазовая плоскость с обменным и параллельным магнитоэлектрическим взаимодействием Дзялошинского-Мория в плоскости плёнки.

В первом случае в восьмимерном фазовом пространстве был обнаружен «остров стабильности», в котором идеальная скирмионная решётка и её незначительные вариации являются локальным минимумом энергии системы.

Во втором случае проведён детальный анализ основных состояний в плоскости  $-1 \leq J^m \leq 1, -1 \leq J^{mf} \leq 1$  и построена фазовая диаграмма, отражающая фазы с различной абсолютной величиной топологического заряда магнитного слоя. В частности, было обнаружено четыре чётко различимые фазы, две из которых содержат скирмионы с различной топологией (хиральные и нехиральные).

## **Заключение.**

Данная диссертационная работа посвящена разработке и исследованию различных моделей магнитоэлектрического взаимодействия, а также влияния внешних полей и фрустраций для управляющего воздействия на топологические магнитные вихри и скирмионы на интерфейсах сверхрешёточных композитных мультиферроиков.

6. Построена диаграмма зависимости топологического заряда скирмионов от интенсивностей основных параметров взаимодействия системы, в том числе обмена и взаимодействия Дзялошинского-Мории, и исследован вопрос о стабильности топологически защищённых структур по отношению к материальным параметрам.

7. Построены фазовые диаграммы в наноразмерных мультиферроиках с кубической симметрией, свидетельствующие о тесной взаимосвязи магнитных и ферроэлектрических фазовых переходов, имеющих различную природу значения температур переходов внутри плёнок и на интерфейсе. Установлены критические значения параметров взаимодействия, при которых в системе наблюдается изменение типа фазового перехода.

8. Показано, что скирмионы в основном состоянии в магнитоэлектрических сверхрешётках с треугольной симметрией формируются в области значений параметра магнитоэлектрического взаимодействия  $J^{mf} \in [-1.0, -0.75]$  отсутствии внешнего магнитного поля и распределяются в трёхмерном пространстве ферромагнитного слоя. В магнитоэлектрических сверхрешётках с кубической симметрией такого эффекта не наблюдается. Толщина ферроэлектрической плёнки магнитоэлектрической сверхрешётки не влияет на устойчивость скирмионной структуры и напротив, толщина магнитной плёнки определяет стабильность скирмионной структуры: скирмионы формируются только для диапазона слоев (4-6) магнитной плёнки в отсутствии внешнего

9. Предложен алгоритм на основе искусственных нейросетей, который обеспечивает быстрый поиск определенных устойчивых состояний в параметрическом пространстве, при этом каждый новый элемент обучающих данных повышает точность предсказания ИНС. Определены диапазоны значений параметров, которые соответствуют стабильным основным состояниям со скирмионной решеткой.
10. В двуслойной пленке антиферромагнетик/ферроэлектрик с треугольной симметрией обнаружены четыре четко различимые фазы, две из которых обладают высокими значениями топологического заряда, но при этом отличаются топологией скирмионов. Границы скирмионных фаз являются четко определёнными, при пересечении которых топологический заряд скирмионов претерпевает скачкообразное изменение. Внутри фаз происходит плавное изменение основного состояния.

### **Публикации автора по теме диссертации**

**в рецензируемых научных изданиях, индексируемых в международных базах данных Web of Science и SCOPUS**

1. Sharafullin, I. F. Modeling of magnetoelectric and surface properties in superlattices and nanofilms of multiferroics / I.F. Sharafullin, **A.G. Nugumanov**, A.R. Yuldasheva, A.R. Zharmukhametov, H.T. Diep // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. -2019.- V.475. - № 1. - pp. 453-457. (**ИФ 2.700. WoS**)
2. Sharafullin, I. F. Skyrmions and Phase Transitions in a Ferromagnetic/Ferroelectric Superlattices with Triangular Lattice / I.F. Sharafullin, **A.G. Nugumanov**, N.M. Nugaeva, H.T. Diep // IEEE Magnetic Letters - 2020. - V. 11. - № 1. - pp. 1-5. (**ИФ 1.200. WoS**).
3. Nugumanov, A. G. Search for stable skyrmion lattices at the ground state in a multiferroic nanofilm using artificial neural networks / **A.G. Nugumanov**, I.F. Sharafullin // Letters on Materials. - 2022. - V.12. - № 2. – pp. 116-120. (**ИФ 0.849. WoS**)
4. Nugumanov, A. G. Skyrmion phases in ground state of magnetoelectric bilayer induced by planar Dzyaloshinskii-Moriya interaction / **A.G. Nugumanov**, I.F. Sharafullin, M.Kh. Kharrasov // Letters on Materials. - 2023. - V.13. - № 4. – pp. 317-322. (**ИФ 0.849. WoS**)
5. Sharafullin, I. F. Monte Carlo study of phase transitions and skyrmion crystal in magneto-antiferroelectric heterostructures with triangular lattice / I.F. Sharafullin, **A.G. Nugumanov**, A.R. Yuldasheva, N.M. Nugaeva, M.Kh. Kharrasov, H.T. Diep // Chelyabinsk Physical and Mathematical Journal - 2020. – V. 5. - № 2. - pp. 202-210. (**ИФ 0.215. Scopus**)
6. Kharrasov, M. Kh. The Correlations between Dynamic Interactions in Antiferromagnetic Multiferroics / M.Kh. Kharrasov, I.R. Kyzyrgulov, I.F. Sharafullin, **A.G. Nugumanov** // Solid State Phenomena. - 2015. - V. 233. - № 1. - pp. 383-387. (**ИФ 0.211. Scopus**)

7. Харрасов, М. Х. Фазовые переходы и критические явления в пленках мультиферроиков с орторомбической магнитной структурой / М.Х. Харрасов, И. Р. Кызыргулов, И. Ф. Шарафуллин, **А.Г. Нугуманов** // Известия Российской академии наук. Серия физическая. – 2016. – Т. 80. – № 6. – С. 695-697.; переводная версия - Kharrasov, M. Kh. Phase transitions and critical phenomena in multiferroic films with orthorhombic magnetic structure / M.Kh. Kharrasov, I.R. Kyzrgulov, I.F. Sharafullin, **A.G. Nugumanov** // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. - 2016. - V. 80. - № 6. - pp. 695-697. (**ИФ 0.211. Scopus**)
8. Sharafullin, I. F. Stability of a Skyrmion Crystal in a Frustrated Antiferromagnetic Bilayer on a Triangular Lattice / I.F. Sharafullin, **A.G. Nugumanov**, A.Kh. Baisheva, A.R. Yuldasheva, H.T. Diep // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. - 2023. - V. 87 - № 4 - pp. 443-447. (**ИФ 0.211. Scopus**)

### **Публикации автора по теме диссертации в материалах конференций**

9. Нугуманов А.Г. Корреляции магнитоэлектрических взаимодействий в антиферромагнитном мультиферроике // Тезисы докладов Межрегиональной школы-конференции «Теоретические и экспериментальные исследования в конденсированных средах», Уфа: РИЦ БашГУ, 2014, с. 22.
10. Sharafullin I.F., Kharrasov M.Kh., Kyzrgulov I.R., Nugumanov A.G. The correlations between dynamic interactions in antiferromagnetic multiferroics // Book of Abstracts Moscow International Symposium on Magnetism «MISM-2014», М.: Printhouse.Leto, 2014, p. 126.
11. Sharafullin I.F., Kyzrgulov I.R., Nugumanov A.G. Dynamic Interactions in magnetic materials with strongly correlating subsystems // Abstract Book International conference Piezoresponse Force Microscopy and Nanoscale Phenomena in Polar Materials «PFM-2014», Ekaterinburg, 2014, p. 111.
12. Нугуманов А.Г. Магнитные свойства и магнитоэлектрическое взаимодействие в наноплёнках мультиферроиков // Материалы 53-й международной научной студенческой конференции «МНСК-2015», Новосибирск, 2015, с. 40.
13. Нугуманов А.Г., Шарафуллин И.Ф. Динамические явления и влияние внешних полей в тонких пленках мультиферроиков в области фазовых переходов // Материалы XXII Международного молодёжного научного форума «ЛОМОНОСОВ-2015», М: МАКС Пресс, 2015, с.49.
14. Шарафуллин И.Ф., Кызыргулов И.Р., Нугуманов А.Г. Фазовые переходы и критические явления в пленках мультиферроиков с орторомбической магнитной структурой // Тезисы докладов Международной конференции, посвящённой 80-летию члена-корреспондента РАН И.К. Камилова «Фазовые переходы, критические и нелинейные явления в конденсированных средах», Челябинск, 2015, с.116.

15. Kharrasov M. Kh., Kyzыrgulov I.R., Nugumanov A.G. Magneto-electric interaction, phase transitions and critical phenomena for multiferroic thin film by Monte-Carlo simulation // VI Euro-Asian Symposium "Trends in MAGnetism" (EASTMAG-2016): Abstracts, Krasnoyarsk, 2016, p. 51.
16. Nugumanov A.G., Sharafullin I.F. Phase transitions and critical phenomena in superlattice multiferroic nanofilms // Book of Abstracts Moscow International Symposium on Magnetism «MISM-2017», М.: Printhouse.Leto, Moscow, 2017, p. 378.
17. Sharafullin I.F., Yuldasheva A.R., Zharmukhametov A.R. Modeling of magnetoelectric, transport and surface properties in superlattices and nanofilms of multiferroics // Book of Abstracts Joint European Magnetic Symposium “JEMS-2018”, V. 2, p. 187.
18. Шарафуллин И.Ф., Нугуманов А.Г., Юлдашева А.Р., Баишева А.Х. Применение искусственных нейронных сетей для распознавания фазы скирмионной решетки // Труды XXVI Международного Симпозиума «Нанопизика и Нанопэлектроника», Нижний Новгород, Изд-во ННГУ им. Н.И. Лобачевского, 2022, Т.1, с. 396.
19. Ахметзянова Э.А., Баишева А.Х., Нугуманов А.Г., Шарафуллин И.Ф., Анализ магнитоэлектрических свойств и скирмионных решеток в магнитоэлектрических нанопленках с помощью искусственных нейронных сетей // VIII Межрегиональная школа-конференция студентов, аспирантов и молодых ученых-физиков «Теоретические и экспериментальные исследования нелинейных процессов в конденсированных средах», Уфа, РИЦ БашГУ, 2022, с. 9.
20. Нугуманов А.Г., Шарафуллин И.Ф., Абдрахманов Д.И. Плоскостная магнитная анизотропия на треугольной решётке // X Международная школа-конференция для студентов, аспирантов и молодых ученых «Фундаментальная математика и ее приложения в естествознании», Уфа, РИЦ БашГУ, 2023, с. 50.

### **Список цитируемой литературы**

1. Khomskii D. I. Multiferroics: Different ways to combine magnetism and ferroelectricity // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. – 2006. – V. 306. – №. 1. – pp. 1-8.
2. Jochum J. K. et al. Impact of magnetization and hyperfine field distribution on high magnetoelectric coupling strength in BaTiO<sub>3</sub>–BiFeO<sub>3</sub> multilayers // Nanoscale. – 2018. – V. 10. – №. 12. – pp. 5574-5580.
3. Wang J. et al. Giant magnetoelectric effect at the graphone/ferroelectric interface // Scientific Reports. – 2018. – V. 8. – №. 1. – p. 12448.
4. Koshibae W. et al. Memory functions of magnetic skyrmions // Japanese Journal of Applied Physics. – 2015. – V. 54. – №. 5. – p. 053001.

5. Feraoun A., Zaim A., Kerouad M. Phase diagrams and magnetic properties of a superlattice with alternate layers // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. – 2015. – V. 377. – № 1. – pp. 126-132.
6. Sun P. N., Cui L., Lü T. Q. Condensed matter: electronic structure, electrical, magnetic, and optical properties: Combined effect of the transition layer and interfacial coupling on the properties of ferroelectric bilayer film // *Chinese Physics B*. – 2009. – V. 18. – №. 4. – pp. 1658-1664.
7. Yadav A. K. et al. Observation of polar vortices in oxide superlattices // *Nature*. – 2016. – V. 530. – №. 7589. – pp. 198-201.
8. Jedrecy N. et al. Cross-correlation between strain, ferroelectricity, and ferromagnetism in epitaxial multiferroic CoFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>/BaTiO<sub>3</sub> heterostructures // *ACS applied materials & interfaces*. – 2018. – V. 10. – №. 33. – pp. 28003-28014.
9. El Hog S., Bailly-Reyre A., Diep H.T. Stability and phase transition of skyrmion crystals generated by Dzyaloshinskii-Moriya interaction // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. – 2018. – V. 455. – № 1. – pp. 32-38.
10. Pyatakov A. P. Magnetoelectricity goes local: From bulk multiferroic crystals to ferroelectricity localized on magnetic topological textures // *Physica B: Condensed Matter*. – 2018. – V. 542. – № 1. – pp. 59-62.
11. Kang W. et al. Skyrmion-electronics: An overview and outlook // *Proceedings of the IEEE*. – 2016. – V. 104. – №. 10. – pp. 2040-2061.
12. Parkin S. S. P., Hayashi M., Thomas L. Magnetic domain-wall racetrack memory // *Science*. – 2008. – B. 320. – №. 5873. – pp. 190-194.
13. Zhang X., Ezawa M., Zhou Y. Magnetic skyrmion logic gates: conversion, duplication and merging of skyrmions // *Scientific reports*. – 2015. – V. 5. – №. 1. – p. 9400.
14. Pyatakov A. P. et al. Magnetically switched electric polarity of domain walls in iron garnet films // *Europhysics Letters*. – 2011. – V. 93. – №. 1. – p. 17001.
15. Sharafullin I. F., Kharrasov M. K., Diep H. T. Dzyaloshinskii-Moriya interaction in magnetoferroelectric superlattices: Spin waves and skyrmions // *Physical Review B*. – 2019. – V. 99. – №. 21. – p. 214420.
16. Zhang X., Zhou Y., Ezawa M. Magnetic bilayer-skyrmions without skyrmion Hall effect // *Nature communications*. – 2016. – V. 7. – №. 1. – p. 10293.
17. Dong X. Y. et al. Machine learning of quantum phase transitions // *Physical Review B*. – 2019. – V. 99. – №. 12. – p. 121104.
18. Gurney K. *An introduction to neural networks*. – CRC press, 2018.
19. Prychynenko D. et al. Magnetic skyrmion as a nonlinear resistive element: a potential building block for reservoir computing // *Physical Review Applied*. – 2018. – V. 9. – №. 1. – p. 014034.
20. Sharafullin I. F., Diep H. T. Magnetic Skyrmions and Phase Transitions in Antiferromagnetic/Ferroelectric Bilayers // *JETP Letters*. – 2021. – V. 114. – №. 1. – pp. 536-539.
21. Safronov K. R., Bessonov V. O., Fedyanin A. A. Optimization of Multilayer Photonic Structures using Artificial Neural Networks to Obtain a Target Optical Response // *JETP Letters*. – 2021. – V. 114. – №. 1. – C. 321-325.