

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В.ЛОМОНОСОВА

На правах рукописи

Абдрахманов Данил Ирекович

**Влияние дефектов на формирование скирмионных
фаз в магнитных пленках**

1.3.3. Теоретическая физика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва – 2025

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** – **Кузьмин Дмитрий Александрович**,
доктор физико-математических наук, профессор
кафедры радиофизики и электроники физического
факультета ФГБОУ ВО «Челябинский
государственный университет».
- Рамазанов Магомедшейх Курбанович**,
кандидат физико-математических наук, ведущий
научный сотрудник Института физики им. Х.И.
Амирханова – обособленное подразделение ФГБУН
Дагестанского федерального исследовательского
центра Российской академии наук
- Устинов Алексей Борисович**,
доктор физико-математических наук, профессор
кафедры физической электроники и технологии
факультета электроники ФГАОУ ВО "Санкт-
Петербургский государственный
электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И.
Ульянова (Ленина)".

Защита диссертации состоится «25» декабря 2025 г. в 14 часов 00 минут на заседании диссертационного совета МГУ.011.2 Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова по адресу: 119991, Москва, ГСП-1, Ленинские горы, МГУ, дом 1, стр. 2, физический факультет, ауд. Н-16.

E-mail: 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/3660>

Автореферат разослан «__» _____ 20__ г.

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

П.А. Поляков

Общая характеристика работы

Исследование фазовых переходов и топологически защищенных вихревых нанообъектов – скирмионов в магнитных и мультиферроидных нанопленках (структурах) – одно из самых актуальных направлений современной физики и находится в фокусе повестки как экспериментальных, так и теоретических работ. Дело в том, что даже слабые анизотропные и обменные взаимодействия между спиновыми характеристиками могут сыграть определяющую роль в установлении вихревых конфигураций и влиять на стабильность и способность переключения состояния, что является предметом особенного интереса в связи с развитием современных информационных и коммуникационных технологий, основанных на тонкослойных материалах. Следует отметить роль фрустрации и конкурирующих магнитных и магнитоэлектрических взаимодействий в формировании фаз скирмионного газа и скирмионной решетки. Треугольное расположение магнитных ионов в слое обеспечивает геометрическую конкуренцию обменных магнитных взаимодействий и существенно стабилизирует топологически защищенные состояния в сверхрешетках и бислойных материалах.

Актуальность темы исследования

Актуальность вытекает из необходимости установить закономерности свойств и процессов, протекающих в магнитных и магнитоэлектрических нанопленках с учетом влияния различных внешних и внутренних факторов: внешнее магнитное поле, фрустрации, структурные дефекты, тепловые флуктуации. Анализ научной литературы показывает, что структурные дефекты и фрустрации в таких системах с конкурирующими обменными взаимодействиями являются определяющими в поведении системы. В настоящее время невыясненными остаются вопросы, связанные с влиянием структурных дефектов на фазовые переходы и критическое поведение, термодинамические и магнитоэлектрические свойства нанопленок. Для исследования систем с конкурирующими обменными взаимодействиями важно реализовать эффективные и достоверные методы вычислительной физики, поскольку реализация экспериментальных исследований требует значительных ресурсов. В связи с этим, исследование новых подходов к управлению магнитными топологически защищенными нанообъектами является крайне актуальным.

Наноструктурирование, изменение масштабных или материальных параметров системы для управления процессами формирования, разрушения скирмионных фаз, коллективным поведением магнитных скирмионов, пиннинг скирмионных решеток или отдельных скирмионов в локальных точках магнитной пленки позволяет преодолеть барьеры в создании устройств спинтроники.

Степень разработанности темы исследования

Неоднородные спиновые структуры являются предметом активных обсуждений в физике конденсированного состояния [1]. К таким структурам можно отнести магнитные вихри и скирмионы, которые могут формироваться в пленках, сочетающих в себе как магнитный, так и сегнетоэлектрический дальний порядок. Богданов и Яблонский [2] теоретически предсказали, что в магнитоупорядоченных кристаллах, принадлежащих к определенным кристаллографическим классам, может реализоваться термодинамически устойчивая система магнитных вихрей, аналогичная смешанному состоянию в сверхпроводниках. В работе [3] были теоретически определены структуры различных вихревых состояний в магнитных материалах с анизотропией типа «легкая ось» с взаимодействием Дзялошинского-Мория. В 2001 году Богданов и Рёслер [4] разработали феноменологическую теорию нарушения хиральной симметрии в магнитных наноструктурах с учетом индуцированных неоднородных хиральных взаимодействий и предсказали возникновение вихревых стабильных структур в тонких многослойных пленках.

Экспериментальное подтверждение существования скирмионов было впервые показано в 2009 году [5]. Далее скирмионы удалось экспериментально обнаружить во многих материалах, к примеру, в MnSi [6], в легированных полупроводниках $Fe_{1-x}Co_xSi$ [7], эпитаксиальных тонких пленках FeGe [8-9], мультиферроиках [10]. В описанных выше системах взаимодействие Дзялошинского-Мория играет ключевую роль в стабилизации скирмионных структур [11]. Оно возникает в несимметричных магнитных кристаллах, а также индуцируется на границе раздела гетероструктурных тонких пленок. Следует отметить, что это не единственный механизм образования скирмионных структур, например, стабилизация скирмионной фазы возможна при наличии фрустрации обменного взаимодействия в материалах с одноосной магнитной анизотропией во внешнем магнитном поле [12].

Скирмионы обладают топологической устойчивостью, а также могут быть стабильными при температурах близких к комнатным [13]. В силу малых размеров, до 100 нм, скирмионы потенциально можно использовать в различных устройствах спинтроники, таких как скирмионные транзисторы [14], логические элементы устройств [15], искусственные синапс-устройства для нейроморфных систем [16]. Наиболее перспективным является использование скирмионов в качестве элементарной ячейки памяти в современных устройствах записи и считывания информации [17, 18].

Для достижения этой цели необходимо разработать эффективный способ управления скирмионами. На данный момент известно несколько способов создания и уничтожения скирмионов, к таким можно отнести управление фазой магнитного образца с помощью магнитного поля [19]. Например, в [20] теоретически исследовалась возможность создания скирмионов с помощью магнитного диполя. В работе [21] сообщается о создании решеток скирмионов в многослойной структуре Pt/Co/Ta с помощью приложенного локального поля с использованием наконечников сканирующей силовой микроскопии. Создание и уничтожение скирмионов также возможно с помощью спин-

поляризованного тока [22], даже в отсутствии внешнего магнитного поля [23]. Использование электрического поля для управления магнитной структурой в хиральных образцах [24] и в мультиферроиках [25], позволяет избежать значительные потери на нагрев под действием спин-поляризованного тока.

Скирмионы стабилизированные в антиферромагнитных материалах движутся по ожидаемой траектории [26], а в ферромагнитных образцах скирмионы испытывают смещение перпендикулярно направлению своего движения из-за эффекта Холла [27]. При этом в антиферромагнетиках невозможен процесс электрического обнаружения, что является проблемой для практического применения.

Одним из требований для дальнейших технических приложений, особенно в устройствах памяти, является создание скирмионов в четко определенных локациях материала. Один из способов решения данной задачи основан на притяжении и закреплении скирмиона вблизи обменно-редуцированного дефекта [28, 29]. Скирмионы на поверхностных дефектах обладают стабильностью в более широком диапазоне напряженностей внешнего поля [30]. Кроме того, дефекты также могут служить центром закрепления скирмионов [31], а параметры дефектов могут использоваться для управления динамическими свойствами скирмионов в устройствах магнитной памяти [32].

Цели и задачи диссертационной работы

Основной целью диссертационной работы является разработка модели, описывающей обменно-редуцированные и структурные дефекты в магнитных и магнитоэлектрических пленках с конкурирующими обменными и спин-орбитальными взаимодействиями, а также исследование влияния дефектов указанных типов на формирование и устойчивость магнитных скирмионов на поверхностных слоях магнитных и магнитоэлектрических пленок.

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

1. Определить условия зарождения и параметрическую область значений конкурирующих взаимодействий, при которых формируется скирмионные структуры в основном состоянии для магнитных и магнитоэлектрических тонких пленок.
2. Рассмотреть модель, позволяющую описать наличие немагнитных дефектов в дискретных решетчатых системах, описываемых гамильтонианом магнитной и магнитоэлектрической пленок.
3. Исследовать влияние дефектов типа «отверстие» и обменно-редуцированного дефекта на локализацию скирмионов в зависимости от параметров дефекта в магнитной и магнитоэлектрической пленках.
4. В модели магнитоэлектрической нанопленки с плоскостным взаимодействием Дзялошинского – Мория описать эффект межслойного

взаимодействия, нарушающего трансляционную симметрию в магнитной конфигурации основного состояния.

Научная новизна

Научная новизна диссертационной работы определяется оригинальностью полученных результатов, подтверждается публикациями в ведущих российских и зарубежных физических научных журналах и заключается в следующем:

1. Определены параметры дефектов поверхности и конкурирующих взаимодействий в моделях магнитной и магнитоэлектрических пленок, что имеет большое значение с точки зрения разработки новых материалов и компонентной базы спинтроники с уникальными магнитными и транспортными свойствами.
2. Исследовано влияние дефекта на формирование скирмионной фазы в основном состоянии. Для магнитоэлектрического бислоя с неоднородным магнитоэлектрическим взаимодействием впервые показано формирование отдельных скирмионов в нулевом внешнем магнитном поле.
3. Предложен способ локализации магнитных скирмионов в модели магнитного и магнитоэлектрического бислоя путем внесения немагнитных дефектов, что очень важно для практического применения в устройствах наноэлектроники.

Теоретическая и практическая значимость работы

Определен параметрический диапазон конкурирующих взаимодействий для моделей магнитного и магнитоэлектрического бислоя, при которых возможно формирование фаз отдельных скирмионов и решетки скирмионов. Это является важным с точки зрения проектирования и создания функциональных материалов для устройств хранения информации нового поколения. Обнаружен эффект локализации магнитных скирмионов с помощью структурного дефекта в моделях магнитных и магнитоэлектрических пленок, который может быть использован для решения задачи зарождения магнитных скирмионов (топологически защищенных спиновых неоднородностей) в заданных локациях магнитной пленки.

Методология и методы исследования

Основу методологии исследования решетчатых моделей ферро/антиферромагнитных и ферроэлектрических систем составляет использование энергетических гамильтонианов, которые достаточно хорошо описывают большинство магнитных систем и активно рассматриваются как в работах посвященных исследованию топологических нетривиальных структур, возникающих в магнитных материалах, так и в задачах статистической физики.

Для моделирования термического нагрева и исследования фазовых переходов спиновых конфигураций используются хорошо апробированный численный метод Монте-Карло моделирования (алгоритм Метрополиса). Результаты моделирования методом Монте-Карло хорошо согласуются с экспериментальными данными в объемных магнитных материалах, а также в тонких наноструктурах.

Для определения основного состояния используется адаптированный метод наискорейшего спуска. Для классических ферромагнитных систем с невырожденными основными состояниями рассматриваемый метод минимизации хорошо согласуется с аналитическим решением.

Положения, выносимые на защиту

1. Структурный дефект в виде отверстия приводит к увеличению температуры фазового перехода (скирмионная фаза - беспорядок) в фрустрированной антиферромагнитной пленке. При этом размер дефекта в диапазоне $d \in (10, 50)$ узлов решетки не оказывает значительного влияния на температуру этого перехода.
2. В ферромагнитной бислоистой пленке (например, Pt/Co) во внешнем магнитном поле структурный дефект верхнего слоя приводит к формированию скирмионной фазы в области под дефектом вследствие возникновения неоднородности взаимодействий.
3. Определены пороговые значения диаметра дефекта, локализирующего топологически защищенные магнитные неоднородности в области под дефектом в пленках ферроэлектрик/ферромагнетик с магнитоэлектрическим взаимодействием.
4. Разработка методов локализации скирмионных фаз на основе создания дефектов в магнитоэлектрических и магнитных пленках. Исследование влияния дополнительных факторов (тепловых флуктуаций, внешнего магнитного поля, ширина обменного редуцирования) на топологически защищенные структуры и оценка предельных величин этих факторов, на площадь локализации скирмионов.

Степень достоверности и апробация работы.

Все основные результаты работы обсуждались на семинарах кафедры теоретической физики ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и технологий», часть результатов были представлены на российских и международных конференциях, таких как: International Conference on Applied Magnetism ICAM, 2024; XXV Международная конференция «Новое в Магнетизме и Магнитных Материалах», Москва, 2024; Атом: FROM ATOMISTIC TO MACRO, Челябинск, 2024; Дни калорики в Башкортостане: функциональные материалы и их приложения, Республика Башкортостан, 2024; Дни калорики в Челябинске: функциональные материалы и их приложения, Челябинск, 2025; XIV Международной школы-конференции

студентов, аспирантов и молодых ученых, Уфа, 2023; XIV Международной школы-конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, Уфа, 2024; и других.

Публикации и личный вклад автора

Основные результаты диссертации опубликованы в 7 работах [A1 – A7] рецензируемых научных изданиях, индексируемых в базе ядра Российского индекса научного цитирования "eLibrary Science Index", или, на основании решения Учёного совета МГУ по представлению учёных советов структурных подразделений МГУ, в изданиях из перечня, рекомендованного Минобрнауки России, по соответствующим научным специальностям и отраслям наук, а также в изданиях, текущие номера которых или их переводные версии вошли в одну из иных международных реферативных баз данных и систем цитирования, считаясь включенными в данный перечень. Личный вклад автора определяется написанием программы для расчета конфигураций основного состояния, исследованием устойчивости конфигураций относительно тепловых флуктуаций методом Монте-Карло для тонкопленочных магнитных структур, разработкой теоретических моделей, анализом и интерпретацией полученных результатов, выполнением численных экспериментов.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, трёх глав, заключения, списка публикаций автора и списка цитируемой литературы. Общий объем диссертации составляет 101 страницы. Диссертация содержит 30 рисунков. Список литературы включает 109 наименований.

Основное содержание диссертации

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

Первая глава посвящена исследованию модели антиферромагнитного фрустрированного монослоя на треугольной решетке с плоскостным взаимодействием Дзялошинского-Мория и дефектом, понижающим обменное взаимодействие. Для определения распределения намагниченности в конфигурациях основного состояния используется метод наискорейшего спуска.

Модель антиферромагнитного монослоя описывается гамильтонианом вида:

$$H_m = - \sum_{i,j} J_{ij}^{fm} \vec{S}_i \cdot \vec{S}_j - \sum_{i,j} \vec{D}_{ij} \cdot [\vec{S}_i \times \vec{S}_j] - \vec{h} \sum_i \vec{S}_i, \quad (1)$$

Дефект задается функцией зависимости параметра обменного взаимодействия от расстояния между центром дефекта и рассматриваемым спином K_{ij} , силы обменной модификации ε и ширины обменной зоны ϑ

$$J_{i,j}^{fm} = J_0 \left(1 + \varepsilon \cdot \exp \left(- \frac{K_{ij}}{\vartheta^2} \right) \right), \quad (2)$$

$$K_{ij} = \left| \frac{\vec{r}_i + \vec{r}_j}{2} - \vec{r}_q \right|, \quad (3)$$

Показано, что диаметр дефекта не влияет на размер и тип скирмиона, но устойчивость фазы скирмионной скирмиона увеличивается относительно напряженности внешнего магнитного поля (рис. 1). Увеличение диаметра и выбор соответствующего размера дефекта способствуют образованию большего количества скирмионов. Кроме того, скирмионы образуются при меньших значениях внешнего поля по сравнению со случаем в отсутствие дефекта. Чем больше размер дефекта, тем сильнее способность к образованию стабильной фазы решетки скирмионов в пленках, где решетка скирмионов стабилизируется конкурирующими взаимодействиями.

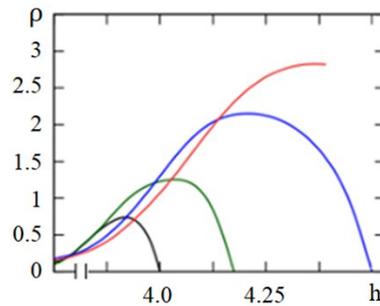


Рис. 1. Плотность скирмионов на магнитной пленке в зависимости от внешнего магнитного поля для $J_0 = -1$, $D = -0.4$, диаметр дефекта $\vartheta = 0$ узлов (черная линия), диаметр дефекта $\vartheta = 4$ узла (зеленая линия), диаметр дефекта $\vartheta = 7$ узлов (синяя линия), диаметр дефекта $\vartheta = 30$ узлов (красная линия).

Для моделирования тепловых флуктуаций использовался алгоритм Метрополиса. Усредненная энергия на спин $\langle E \rangle$, параметр порядка Q системы определяются следующим образом:

$$\langle E \rangle = \frac{\langle H \rangle}{2N}, \quad (4)$$

$$Q(T) = \frac{1}{N(t_a - t_0)} \sum_i \left| \sum_{t=t_0}^{t_a} \vec{S}_i(T, t) \cdot \vec{S}_i(T=0) \right|, \quad (5)$$

Фаза решетки скирмионов стабилизируется конкурирующими взаимодействиями. Моделирование Монте-Карло показывает, что диаметр дефекта в диапазоне $\in (10, 50)$ не влияет на температуру магнитного фазового перехода в такой большой области параметра ϑ . Но наличие дефекта малого размера (порядка размера скирмиона) приводит к смещению температуры фазового перехода (рис 2б) с $T = 0.34$ в отсутствие дефекта, в сторону $T \approx 0.5$ в присутствии дефекта.

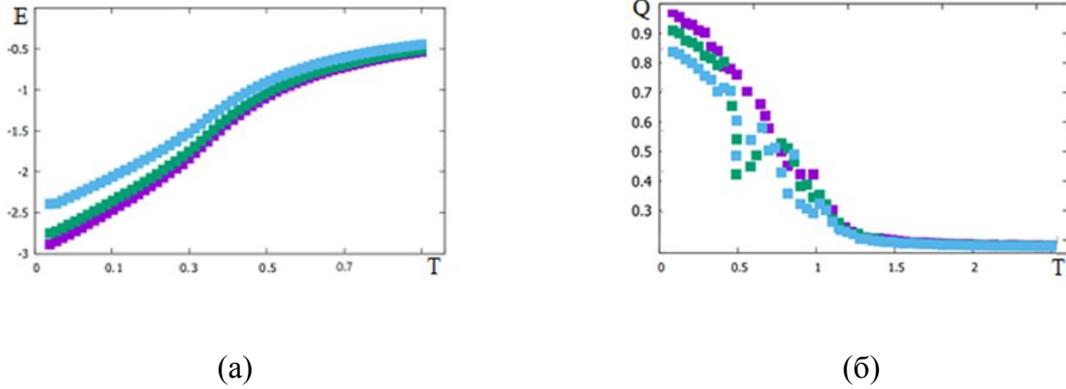


Рис. 2. (а) Энергия магнитной пленки в зависимости от температуры, (б) Параметр порядка магнитной пленки в зависимости от температуры для $J_0 = -1, h = 3.0, D = -0.4$, диаметр дефекта 0 узлов (пурпурный), диаметр дефекта 10 узлов (зеленый), диаметр дефекта 20 узлов (синий)

Это связано с тем, что дефект приводит к уменьшению энергии обменного взаимодействия; чем больше диаметр дефекта, тем сильнее увеличивается энергия основного состояния. В результате фаза решетки скирмиона становится более устойчивой к тепловым флуктуациям.

Во второй главе предложена модель ферромагнитной бислоистой пленки. В первом слое возникновение нетривиальных спиновых текстур обусловлено конкуренцией ферромагнитного обменного взаимодействия, внешнего магнитного поля и взаимодействием Дзялошинского-Мория, второй слой характеризуется только обменным взаимодействием со структурным дефектом типа «отверстие». Энергия взаимодействия спинов в плоскости решетки описывается гамильтонианом:

$$H = - \sum_{ij} J_{ij}^{fm} \vec{S}_i \cdot \vec{S}_j - \sum_{ij} \vec{D}_{ij} \cdot [\vec{S}_i \times \vec{S}_j] - \vec{h} \sum_i \vec{S}_i \quad (6)$$

Дефект характеризуется модификацией ферромагнитного обменного взаимодействия зависимостью:

$$J_{ij}^{fm} = \frac{J_0}{2} \left(1 + \tanh \left(\frac{2 |\vec{K}_{ij}| - d}{2\vartheta} \right) \right), \quad (7)$$

Фазовые диаграммы основного состояния демонстрируют области формирования скирмионной фазы в случае ферромагнитного монослоя (рис. 3а) и бислоя (рис.3б). Показано формирование скирмионной фазы именно в области магнитной пленки, локализованной под дефектом (рис. 3в).

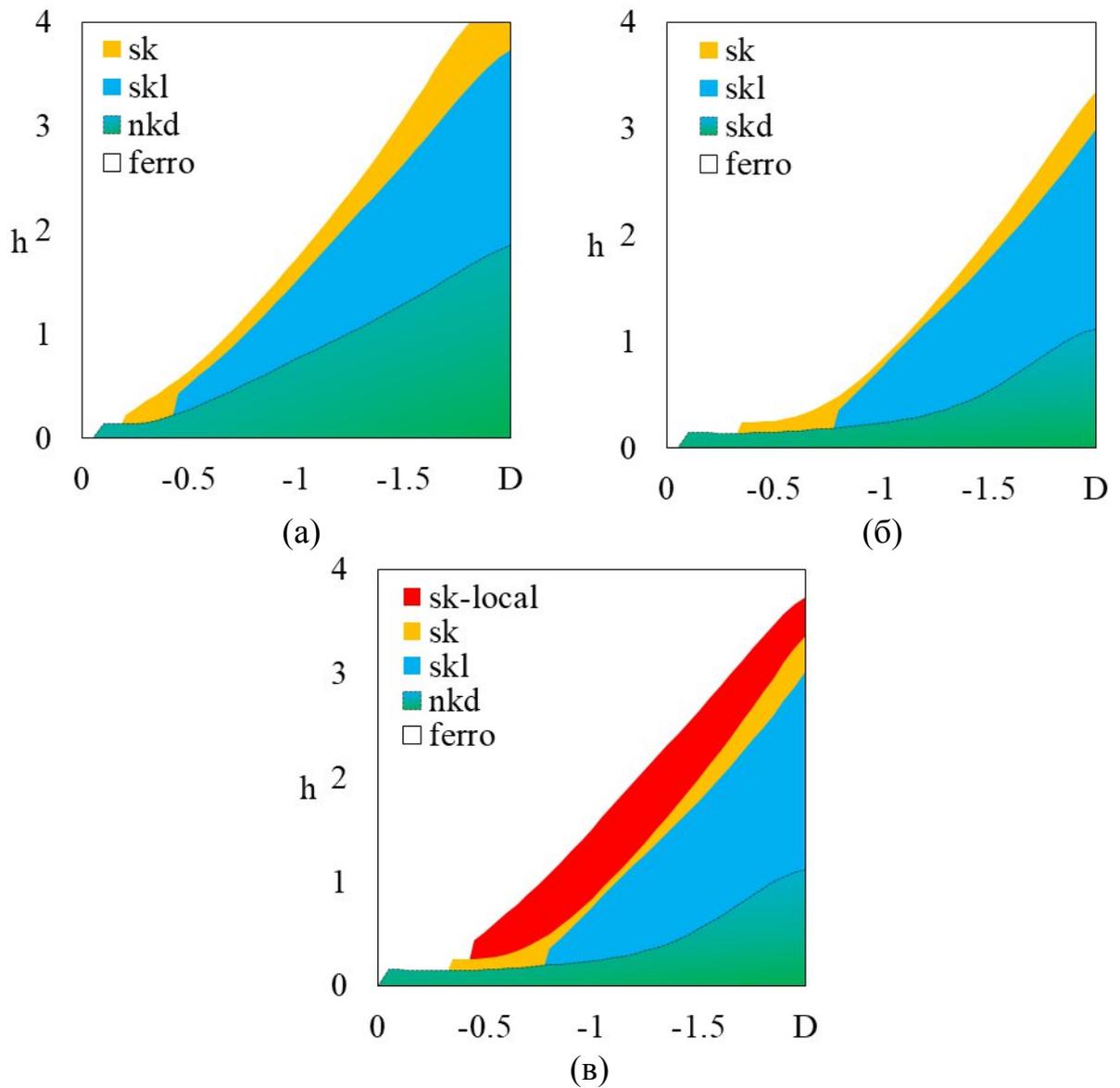


Рис. 3. Фазовая диаграмма конфигураций основного состояния в плоскости $h - D$: (а) ферромагнитный монослой с взаимодействием Дзялошинского-Мория, (б) ферромагнитный бислой с взаимодействием Дзялошинского-Мория, (в) бислойная пленка с дефектом в верхнем ферромагнитном слое. Зеленый цвет – фаза, которая характеризуется неколлинеарными доменными областями. Синяя область – фаза решетки скирмионов. Желтая область – фаза отдельных скирмионов или фаза «скирмионного газа». Незакрашенная область – ферромагнитная фаза. Красная область – скирмионная фаза, локализованная под дефектом.

Результаты расчетов спиновых конфигурации основного состояния позволяют сделать следующий вывод – наличие дополнительного слоя в

ферромагнитном бислое (рис. 3б) приводит к усилению влияния внешнего магнитного поля на наблюдаемые фазы в первом слое, в частности, к подавлению скирмионной фазы в области больших полей. Таким образом, наличие дефекта во втором слое может способствовать локальному ослаблению вклада внешнего поля из-за отсутствия магнитных ионов и приводит к образованию неколлинеарных структур в области, ограниченной под дефектом (рис. 3в, красный цвет).

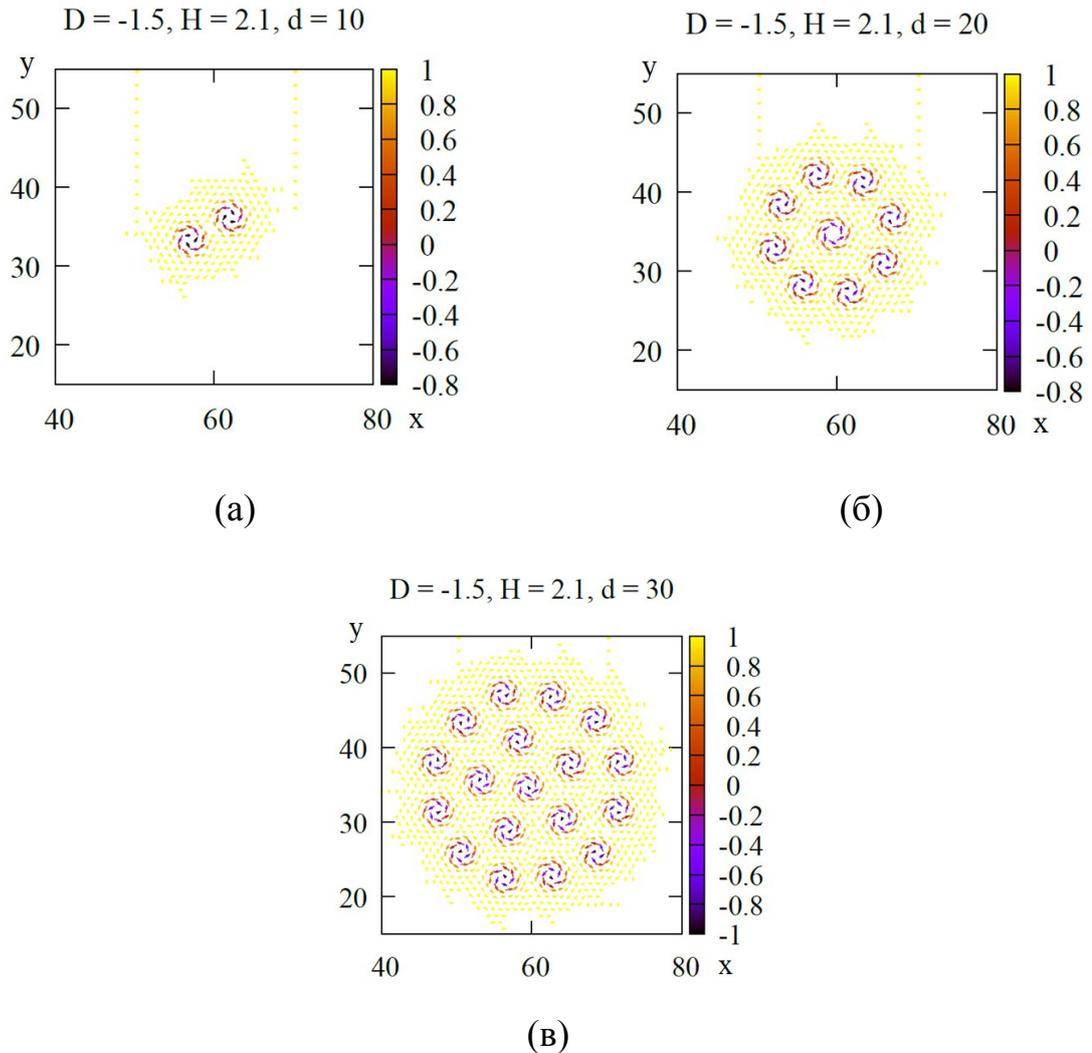


Рис. 4. Спиновые конфигурации основного состояния ферромагнитного бислоя при $D = -1.5$, $h = 2.1$ (а) $d = 10$, (б) $d = 20$, (в) $d = 30$.

Скирмионы в области под дефектом образуются в результате конкуренции ферромагнитного взаимодействия, взаимодействия Дзялошинского-Мория и внешнего магнитного поля, а размер дефекта влияет только на количество наблюдаемых скирмионов (рис. 4). Условие формирования одиночного скирмиона сводится к подбору дефекта такого размера, чтобы он был сопоставим с диаметром отдельного скирмиона, который наблюдается при различных параметрах конкурирующих взаимодействий в отсутствие дефекта на монослое.

В третьей главе предложена модель бислоистой магнитоэлектрической пленки с двумя типами дефектов – микроструктурный дефект типа «отверстия» и обменно-редуцированный дефект, с межслойным однородным и неоднородным магнитоэлектрическим взаимодействием. Модель описывает пленку, состоящую из двух монослоев, один из которых представляет собой сегнетоэлектрический слой с двумя типами дефектов. Гамильтониан системы имеет вид:

$$H = -\frac{1}{2}J^f \sum_{ij} G_{ij}^{\alpha} \vec{P}_i \vec{P}_j - J^{fm} \sum_{ij} \vec{S}_i \vec{S}_j - \sum_{ij} \vec{D}_{ij} [\vec{S}_i \times \vec{S}_j] - J^{mf} \sum_{ij,k} P_k^z \vec{S}_i \cdot \vec{S}_j - \vec{h} \sum_i \vec{S}_i, \quad (8)$$

Дефект типа «отверстие» и обменно-редуцированный дефект описываются выражениями (7) и (8) соответственно.

$$G_{ij}^1 = 1 + \tanh\left(\frac{2K_{ij} - d}{2\vartheta}\right), \quad (9)$$

$$G_{ij}^2 = 1 - \alpha \cdot \exp\left(-\frac{K_{ij}^2}{\beta^2}\right). \quad (10)$$

Для модели с однородным магнитоэлектрическим взаимодействием (6), показано, что дефект в верхнем сегнетоэлектрическом слое стабилизирует фазу скирмионов в области под дефектом относительно внешнего магнитного поля, тогда как в остальной части пленки спины выстраиваются вдоль внешнего магнитного поля и не содержат вихревых неоднородностей. Величина магнитоэлектрического взаимодействия J^{mf} не влияет на образование скирмионов в области под дефектом, но влияет на их коллапс в областях вне дефекта. Образование одного скирмиона (рис. 5а) под дефектом соответствует диаметру дефекта $d \in (6; 11)$ узлов решетки при размере скирмиона 6 – 7 узлов решетки. При значениях $d < 6$ скирмион под дефектом не образуется из-за недостаточного пространства неоднородности, а при $d > 11$ под дефектом могут образоваться два и более скирмиона (рис 5б, 5в). Диаметр дефекта должен быть сопоставим с диаметром отдельного скирмиона при определенных параметрах взаимодействия и напряженности внешнего поля для локализации одиночных скирмионов в области под дефектом.

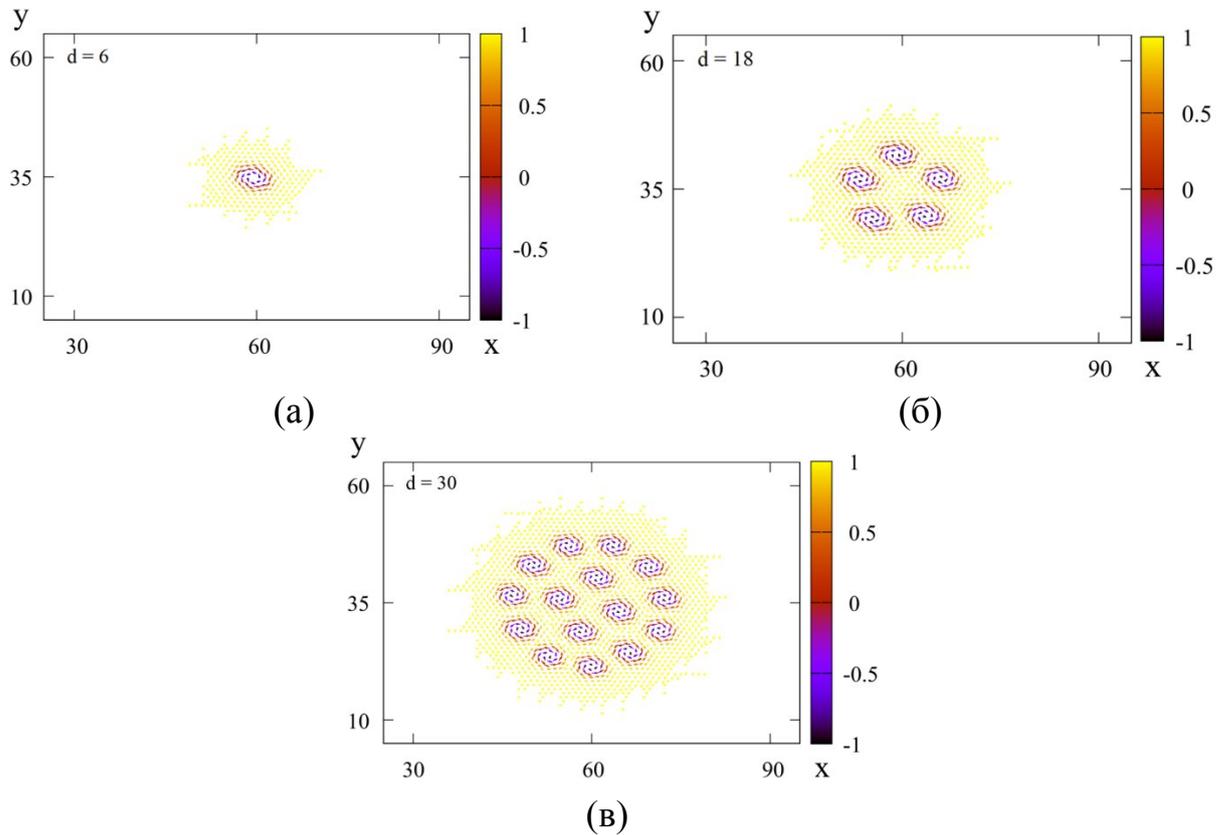
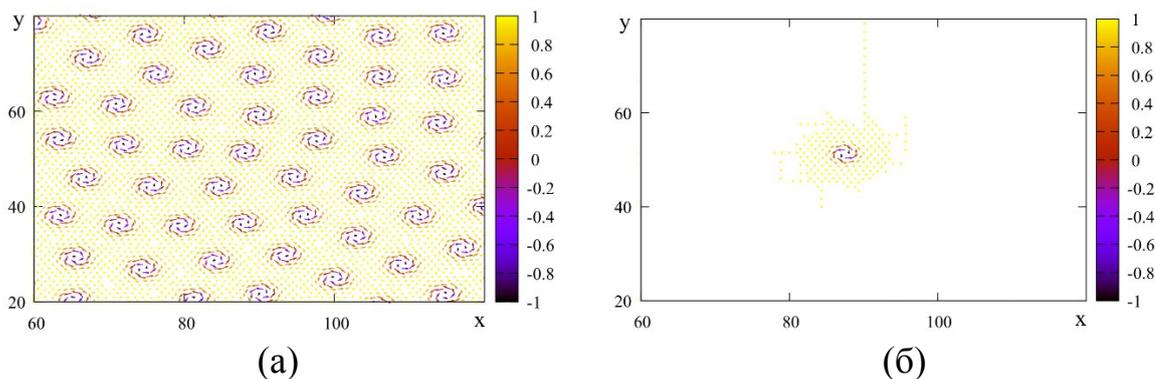
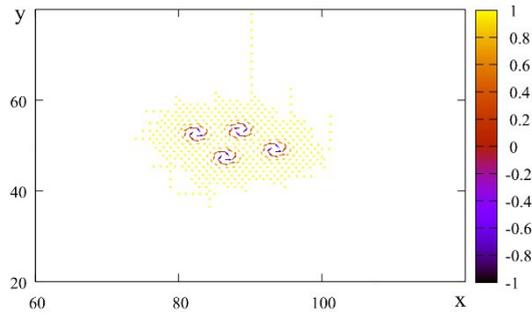


Рис. 5. Спиновые конфигурации основного состояния второго магнитного слоя с конкурирующими взаимодействиями $J^{mf} = 1.0$ для разных диаметров дефектов типа «отверстие». Размер решетки 80×80 . Белый цвет на графике характеризует выстраивание спинов в узлах строго вдоль поля (в сторону наблюдателя).

Для случая с обменно-редуцированным дефектом при достаточно малой ширине обменной модификации и слабом магнитоэлектрическом взаимодействии $J^{mf} = 0.5$ дефект не влияет на фазу решетки скирмионов (рис. 6а). При увеличении магнитоэлектрического взаимодействия скирмионы исчезают во всем магнитном слое за исключением области под обменно-редуцированным дефектом (рис. 6б, 6в). Чем больше область изменения параметра ферроэлектрического взаимодействия, тем больше область, в которой скирмионы не разрушаются под действием магнитоэлектрического взаимодействия.





(в)

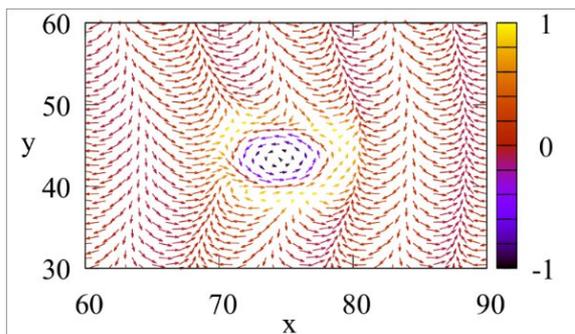
Рис. 6. Спиновые конфигурации основного состояния второго монослоя при $D = -1.0, h = 0.8$ для различного магнитоэлектрического взаимодействия (а) $J^{mf} = 0.5, \beta = 5$. (б) $J^{mf} = 1.0, \beta = 5$. (в) $J^{mf} = 1.0, \beta = 10$.

В случае неоднородного магнитоэлектрического взаимодействия, которое описывается гамильтонианом вида:

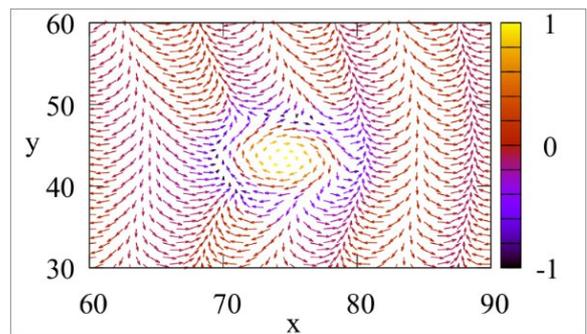
$$H_{int} = -J^{mf} \sum_{i,j,k} P_k^z (S_i^x \cdot S_j^y - S_i^y \cdot S_j^x) - \vec{h} \sum_i \vec{S}_i \quad (11)$$

показано, что в области малых значений параметра Дзялошинского-Мория $|D| \in (-1.0, 0.0)$ магнитоэлектрическое взаимодействие играет ключевую роль в подавлении скирмионных фаз. Но наличие дефекта в сегнетоэлектрическом слое способствует формированию неколлинеарных структур в области под дефектом, в этой области решающую роль в формировании скирмионной фазы играет взаимодействие Дзялошинского-Мория и внешнее магнитное поле. При включении магнитоэлектрического взаимодействия происходит смещение фаз, в которых наблюдаются скирмионы в основном состоянии, в область больших значений константы взаимодействия Дзялошинского-Мория.

Одиночный скирмион может быть локализован в области под дефектом при $D \in (-1.0, -0.4)$, $J^{mf} = 0.5$ в отсутствие внешнего магнитного поля (рис 7). В данном случае на формирование одиночного скирмиона влияет параметр D и размер дефекта. Чем больше вклад и величина абсолютного значения константы взаимодействия Дзялошинского-Мория, тем меньше диаметр дефекта для наблюдения одиночного скирмиона в области под дефектом.



(а)



(б)

Рис. 7. Спиновая конфигурация основного состояния ферромагнитной подсистемы при $h = 0.0, J^{mf} = 0.5$. (а) $D = -0.7$, (б) $D = -0.8$. Диаметр дефекта в сегнетоэлектрической подсистеме $d_{def} = 10$ узлов решетки.

При этом в диапазоне параметра $D \in (-0.8, -0.4)$ размер скирмиона сопоставим с диаметром дефекта. С увеличением абсолютного значения параметра Дзялошинского-Мория размер дефекта, для наблюдения одиночного скирмиона, смещается в сторону меньших радиусов. Размер дефекта в совокупности с взаимодействием Дзялошинского-Мория играет важную роль, поскольку корреляция диаметра дефекта относительно параметра D позволяет формировать одиночный скирмион внутри дефекта.

Заключение.

Основные результаты работы заключается в следующем:

1. Построена модель антиферромагнитной фрустрированной пленки со структурным дефектом типа «отверстие», показано, что наличие дефекта диаметром от 10 до 50 узлов решетки не влияет на критическую температуру разрушения скирмионной фазы, в тоже время устойчивость фазы скирмионной решетки скирмиона увеличивается относительно напряженности внешнего магнитного поля. Наличие структурного дефекта в антиферромагнитной фрустрированной пленке приводит к увеличению температуры фазового перехода.
2. Показано, что для модели ферромагнитного бислоя дефект в верхнем ферромагнитном слое стабилизирует фазу скирмионов в основном состоянии на нижнем ферромагнитном слое с взаимодействием Дзялошинского-Мория именно в области под дефектом, тогда как в остальной части пленки, внешнее магнитное поле разрушает вихревые неоднородности, выравнивая спины вдоль направления внешнего магнитного поля.
3. Показано, что образование одиночного скирмиона под дефектом типа «отверстие» возможно в модели ферромагнитного бислоя и магнитоэлектрического бислоя. Определены пороговые значения диаметра дефекта для локализации одиночных скирмионов в области под дефектом.
4. В магнитоэлектрическом бислое с обменно-редуцированным дефектом при малой ширине обменной модификации скирмионная фаза разрушается во всем ферромагнитном монослое, кроме области под обменно-редуцированным дефектом. Параметр редуцирования обменного ферроэлектрического взаимодействия определяет площадь локации, в которой скирмионы не разрушаются под действием магнитоэлектрического взаимодействия.

5. Показано образование одиночных скирмионов при нулевом внешнем магнитном поле на поверхностном ферромагнитном слое в модели магнитоэлектрической пленки с неоднородным магнитоэлектрическим взаимодействием в области, ограниченной структурным дефектом.

Публикации автора по теме диссертации

в рецензируемых научных журналах, удовлетворяющих Положению о присуждении учёных степеней в МГУ имени М.В. Ломоносова:

- A1. Sharafullin I. F., Yuldasheva A. R., **Abdrakhmanov D. I.**, Nugumanov A. G. Skyrmion Lattices Phase Driven by Interfacial-Engineered Dzyaloshinskii–Moriya Interaction in Frustrated Antiferromagnetic/Ferroelectric Bilayers // *The Physics of Metals and Metallography*. – 2023. – Vol. 124, No. 14. – P. 1697-1702. – EDN PDJALI. – Импакт-фактор 1.000 (JIF).
- A2. Sharafullin I. F., Yuldasheva A. R., **Abdrakhmanov D. I.**, Kizirgulov I.R., Diep H.T. Phase transitions driven by magnetoelectric and interfacial Dzyaloshinskii-Moriya interaction // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. – 2023. – Vol. 587. – P. 171317. – EDN TORGQI. – Импакт-фактор 3.000 (JIF).
- A3. Sharafullin I.F., **Abdrakhmanov D.I.**, Nugumanov A.G., Nurmatov K.J., Diep H.T. Effects of an Exchange-reducing Defect on a Skyrmion Interaction in Antiferromagnetic Frustrated Films // *IEEE Transactions on Magnetics*. – 2024. – V.60. - № 9. – p. 1500205. – 10.1109/TMAG.2024.3418188. – Импакт-фактор 1.900 (JIF).
- A4. Sharafullin I. F., **Abdrakhmanov D. I.**, Samigullina A. I., Latypova A. R. Effects of the Interlayer Interactions in Frustrated Magnetoelectric Thin Films // *Physics of Metals and Metallography*. – 2024. – Vol. 125, No. 14. – P. 1894-1900. – EDN IJLWK. – Импакт-фактор 1.000 (JIF).
- A5. Nugumanov A. G., **Abdrakhmanov D. I.**, Nugumanov R. R., Sharafullin I. F. Skyrmions in perforated magnetic film with Dzyaloshinskii-Moriya interaction // *Letters on Materials*. – 2025. – Vol. 15, No. 3(59). – EDN KCAZXO. – Импакт-фактор 0.520 (РИНЦ).
- A6. **Abdrakhmanov D.I.**, Sharafullin I.F., Yuldasheva A.R., Nugumanov A.G., Nurmatov K.J. Surface defects and skyrmions in magnetoelectric bilayers // *Journal of Physics: Condensed Matter*. – 2025. – Vol. 37. – No. 34. – P. 345403. – DOI 10.1088/1361-648X/adfa59. – Импакт-фактор 2.600 (JIF).
- A7. Юлдашева А. Р., Баишева А. Х., **Абдрахманов Д. И.**, Шарафуллин И. Ф. Фазовые переходы, скирмионный кристалл в фрустрированной антиферромагнитной треугольной решетке // *Инженерная физика*. – 2022. – № 10. – С. 27-31. – EDN LGZNXF. – Импакт-фактор 0.280 (РИНЦ).

Список литературы

1. Nagaosa N., Tokura Y. Topological properties and dynamics of magnetic skyrmions //Nature nanotechnology. – 2013. – Т. 8. – №. 12. – С. 899-911.
2. Bogdanov A. N., Yablonskii D. A. Thermodynamically stable “vortices” in magnetically ordered crystals. The mixed state of magnets //Zh. Eksp. Teor. Fiz. – 1989. – Т. 95. – №. 1. – С. 178.
3. Bogdanov A., Hubert A. Thermodynamically stable magnetic vortex states in magnetic crystals //Journal of magnetism and magnetic materials. – 1994. – Т. 138. – №. 3. – С. 255-269.
4. Bogdanov A. N., Rößler U. K. Chiral symmetry breaking in magnetic thin films and multilayers //Physical review letters. – 2001. – Т. 87. – №. 3. – С. 037203.
5. Mühlbauer S. et al. Skyrmion lattice in a chiral magnet //Science. – 2009. – Т. 323. – №. 5916. – С. 915-919.
6. Neubauer A. et al. Topological Hall effect in the A phase of MnSi //Physical review letters. – 2009. – Т. 102. – №. 18. – С. 186602.
7. Münzer W. et al. Skyrmion lattice in the doped semiconductor $\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x\text{Si}$ //Physical Review B—Condensed Matter and Materials Physics. – 2010. – Т. 81. – №. 4. – С. 041203.
8. Yu X. Z. et al. Near room-temperature formation of a skyrmion crystal in thin-films of the helimagnet FeGe //Nature materials. – 2011. – Т. 10. – №. 2. – С. 106-109.
9. Heinze S. et al. Spontaneous atomic-scale magnetic skyrmion lattice in two dimensions //nature physics. – 2011. – Т. 7. – №. 9. – С. 713-718.
10. Seki S. et al. Observation of skyrmions in a multiferroic material //Science. – 2012. – Т. 336. – №. 6078. – С. 198-201.
11. Garanin D. A., Chudnovsky E. M. Polyhexatic and polycrystalline states of skyrmion lattices //Physical Review B. – 2023. – Т. 107. – №. 1. – С. 014419.
12. Leonov A. O., Mostovoy M. Multiply periodic states and isolated skyrmions in an anisotropic frustrated magnet //Nature communications. – 2015. – Т. 6. – №. 1. – С. 8275.
13. Boulle O. et al. Room-temperature chiral magnetic skyrmions in ultrathin magnetic nanostructures //Nature nanotechnology. – 2016. – Т. 11. – №. 5. – С. 449-454.
14. Zhang X. et al. Magnetic skyrmion transistor: skyrmion motion in a voltage-gated nanotrack //Scientific reports. – 2015. – Т. 5. – №. 1. – С. 11369.

15. Zhang X., Ezawa M., Zhou Y. Magnetic skyrmion logic gates: conversion, duplication and merging of skyrmions //Scientific reports. – 2015. – T. 5. – №. 1. – C. 1-8.
16. Huang Y. et al. Magnetic skyrmion-based synaptic devices //Nanotechnology. – 2017. – T. 28. – №. 8. – C. 08LT02.
17. Fert A., Cros V., Sampaio J. Skyrmions on the track //Nature nanotechnology. – 2013. – T. 8. – №. 3. – C. 152-156.
18. Parkin S. S. P., Hayashi M., Thomas L. Magnetic domain-wall racetrack memory //science. – 2008. – T. 320. – №. 5873. – C. 190-194.
19. Yu X. Z. et al. Real-space observation of a two-dimensional skyrmion crystal //Nature. – 2010. – T. 465. – №. 7300. – C. 901-904.
20. Garanin D. A. et al. Writing skyrmions with a magnetic dipole //Journal of Applied Physics. – 2018. – T. 124. – №. 11.
21. Zhang S. et al. Direct writing of room temperature and zero field skyrmion lattices by a scanning local magnetic field //Applied Physics Letters. – 2018. – T. 112. – №. 13.
22. Tchoe Y., Han J. H. Skyrmion generation by current //Physical Review B—Condensed Matter and Materials Physics. – 2012. – T. 85. – №. 17. – C. 174416.
23. Romming N. et al. Writing and deleting single magnetic skyrmions //Science. – 2013. – T. 341. – №. 6146. – C. 636-639.
24. Okamura Y. et al. Transition to and from the skyrmion lattice phase by electric fields in a magnetoelectric compound //Nature communications. – 2016. – T. 7. – №. 1. – C. 12669.
25. Mochizuki M., Watanabe Y. Writing a skyrmion on multiferroic materials //Applied Physics Letters. – 2015. – T. 107. – №. 8.
26. Barker J., Tretiakov O. A. Static and dynamical properties of antiferromagnetic skyrmions in the presence of applied current and temperature //Physical review letters. – 2016. – T. 116. – №. 14. – C. 147203.
27. Zang J. et al. Dynamics of skyrmion crystals in metallic thin films //Physical review letters. – 2011. – T. 107. – №. 13. – C. 136804.
28. Derras-Chouk A., Chudnovsky E. M. Skyrmions near defects //Journal of Physics: Condensed Matter. – 2021. – T. 33. – №. 19. – C. 195802.
29. Reichhardt C., Reichhardt C. J. O., Milošević M. V. Statics and dynamics of skyrmions interacting with disorder and nanostructures //Reviews of Modern Physics. – 2022. – T. 94. – №. 3. – C. 035005.

30. Fallon K. et al. Controlled individual skyrmion nucleation at artificial defects formed by ion irradiation //Small. – 2020. – T. 16. – №. 13. – C. 1907450.
31. Hanneken C. et al. Pinning and movement of individual nanoscale magnetic skyrmions via defects //New Journal of Physics. – 2016. – T. 18. – №. 5. – C. 055009.
32. Temiryazev A. G. et al. Formation of a domain structure in multilayer CoPt films by magnetic probe of an atomic force microscope //Physics of the Solid State. – 2018. – T. 60. – C. 2200-2206.