

## ОТЗЫВ

*официального оппонента доктора физико-математических наук, доцента Загребина Михаила Александровича на диссертационную работу Нугуманова Айдара Гайсовича на тему «Топологически устойчивые спиновые структуры в наноразмерных мультиферроиках», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, по специальности 1.3.3. Теоретическая физика.*

В последнее время наблюдается значительный фундаментальный и практический интерес к исследованиям вихревых спиновых структур в многослойных нанопленках. Наноразмерные многослойные структуры представляют собой новый тип искусственно создаваемых материалов являются объектом интенсивных исследований, что связано как с обнаружением в них магнитных скирмионов и вихрей, которые могут формироваться в магнитных нанопленках или искусственно создаваемых магнитных гетероструктурах - сверхрешетках под влиянием различных внешних воздействий, так и с широким практическим применением сверхрешеток из нанослоев магнитных и ферроэлектрических материалов в устройствах нового поколения сверхбыстрой и плотной магнитной памяти, сенсорной технике. Комплексные и многосторонние исследования фазовых переходов и основных состояний с привлечением современных методов машинного обучения в таких структурах нанометрового масштаба позволят обеспечить значительный прогресс в этих областях. Этим определяется актуальность работ, которые ведутся в этом направлении.

Цель и задачи диссертационной работы А.Г. Нугуманова находятся в русле таких актуальных исследований. Диссертация посвящена изучению широкого круга явлений, происходящих в многослойных наноразмерных магнитоэлектрических системах.

Актуальность и новизна исследований обусловлена тем, что в них исследуются и моделируются условия зарождения, стабильности и устойчивости скирмионов и скирмионных решеток, что является необходимым для разработки способов управления топологическими нанообъектами в сверхрешетках мультиферроиков. Работа выполнена на высоком научном уровне, результаты работы представляют большой интерес, что подтверждается публикациями в высокорейтинговых международных изданиях.

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы, содержит 99 страниц текста, включая 42 рисунка. Список цитированной литературы содержит 122 наименования.

Во **Введении** сформулированы цели и задачи работы, обоснована актуальность, научная новизна и практическая значимость диссертационной работы, приведены научные положения, выносимые на защиту, отражено современное состояние исследований в данной области и личный вклад автора. В **Заключении** представлены основные результаты диссертационной работы.

**В первой главе** представлено исследование температурной стабильности и фазовых переходов в мультиферроиках с кристаллической структурой типа перовскит. Установлено, что фазовый переход из антиферромагнитно-антиферроэлектрической фазы в парамагнитную и диэлектрическую фазы соответственно относится ко второму типу фазовых переходов. При исследовании сверхрешеточных мультиферроиков с кубической симметрией и чередующимися магнитными и ферроэлектрическими слоями (связанными линейным магнитоэлектрическим взаимодействием только на границе раздела) температура фазового перехода расходится между магнитной и ферроэлектрической системами при определенном значении параметра магнитоэлектрического взаимодействия, однако выше этого значения фазовый переход происходит одновременно в обеих подсистемах и относится к первому роду.

**Во второй главе** показано, что при определенных значениях магнитоэлектрического взаимодействия типа Дзялошинского-Мория и внешнего магнитного поля в основном состоянии мультиферроидных сверхрешеток с треугольной симметрией возможно возникновение скирмионов и скирмионных решеток на границе раздела магнитных и ферроэлектрических слоев, изучены фазовые переходы и стабильность скирмионов. Обнаружено, что размер и количество скирмионов сильно зависят от величины параметра магнитоэлектрического взаимодействия, чего не наблюдалось при моделировании сверхрешетки с кубической симметрией. Также показано, что слабое внешнее магнитное поле стабилизирует идеальную скирмионную решетку, однако ожидаемо увеличение поля разрушает её, переводя систему в ферромагнитную фазу.

**Третья глава** диссертации посвящена применению методов машинного обучения и градиентного спуска для определения условий возникновения скирмионов в основном состоянии тонкой мультиферроидной плёнки с треугольной симметрией, состоящей из двух внешних ферроэлектрических и центрального магнитного слоя. Соискателем обнаружены параметрические «острова стабильности» идеальных скирмионных решеток и построена

фазовая диаграмма в измерениях «обменный параметр – параметр магнитоэлектрического взаимодействия – топологический заряд скирмиона».

Достоверность представленных в диссертационной работе Нугуманова А.Г. научных результатов несомненна и обеспечивается корректным применением современных методов моделирования, таких как метод Монте Карло, градиентный спуск и метод машинного обучения. Автореферат полностью и точно отражает содержание диссертации.

Новизна результатов и их научная значимость подтверждена публикациями диссертанта. По теме исследований опубликовано более 20 работ, из них, 8 статей в журналах, входящих в перечень рецензируемых научных журналов.

### **Замечания по диссертационной работе**

1. В главах 2 и 3 для определения основных состояний используется метод градиентного спуска, но отсутствует подробное описание конкретной реализации этого метода с обоснованием достоверности достижения минимума энергии.
2. Основным методом Монте-Карло, используемым в данной работе, является алгоритм Метрополиса, являющийся весьма чувствительным к размерным эффектам, но в работе отсутствует анализ влияния размеров системы на полученные результаты и выводы.
3. В описании работы искусственной нейронной сети, соискатель пишет о том, что она состоит из «скрытых» слоев, при этом не раскрытым остается вопрос о том, какой функционал и какое количество указанных «скрытых слоев» и каким критерием определяется это число.

Вместе с тем, указанные замечания не умаляют значимости диссертационного исследования и не снижают ценность полученных основных результатов и диссертационной работы в целом.

Диссертация удовлетворяет всем требованиям, установленным Московским государственным университетом имени М.В. Ломоносова к докторским диссертациям. Содержание диссертации соответствует паспорту специальности **1.3.3. Теоретическая физика** (по физико-математическим наукам), а также критериям, определенным пп. 2.1. – 2.5 Положения о присуждении ученых степеней в Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова; она оформлена согласно положениям № 5, 6

Положения о диссертационном совете Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова.

Таким образом, соискатель Нугуманов Айдар Гайсович безусловно заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.3. Теоретическая физика.

Официальный оппонент:

Доктор физико-математических наук,  
доцент, декан физического факультета  
ФГБОУ ВО «Челябинский государственный  
университет» Загребин Михаил Александрович

Контактные данные:

Тел: +7 (351) 799-71-19, e-mail: miczag@csu.ru

Специальность, по которой официальным оппонентом  
защищена диссертация:

1.3.8. Физика конденсированного состояния

Адрес места работы:

454001, г. Челябинск, ул.Братьев Кашириных, 129

Тел: +7 (351) 799-71-19, e-mail: miczag@csu.ru