



УТВЕРЖДАЮ:

Директор ИФМ УрО РАН
академик РАН

Г.И.Мухоморов
Н.В.Мушников

"23" *апреля* 2025 г.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физики металлов имени М.Н. Михеева Уральского отделения Российской академии наук (ИФМ УрО РАН)

Диссертация **“Нелинейные возбуждения в магнетиках со спиральной и полосовой доменной структурой”** выполнена в лаборатории квантовой теории конденсированного состояния Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физики металлов имени М.Н. Михеева Уральского отделения Российской академии наук.

В период подготовки диссертации соискатель **Расковалов Антон Александрович** работал в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте физики металлов имени М.Н. Михеева Уральского отделения Российской академии наук в лаборатории теории нелинейных явлений (2008–2024 гг.), с 2024 г. – в секторе теории нелинейных явлений в лаборатории квантовой теории конденсированного состояния, в должности инженера (2008–2011 гг.), младшего научного сотрудника (2011–2012 гг.), научного сотрудника (2012–2016 гг.), а затем – в должности старшего научного сотрудника (с 2016 г. по н. в.)

В 2010 г. окончил Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования “Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина”, Физико-технологический институт УрФУ по специальности «Прикладные математика и физика».

В 2012 г. защитил диссертацию на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.11 – Физика магнитных явлений (ДКН № 171552 от 17 февраля 2012 г.).

Научный консультант – доктор физико-математических наук **Киселев Владимир Валерьевич**, главный научный сотрудник лаборатории квантовой теории

конденсированного состояния Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физики металлов имени М.Н. Михеева Уральского отделения Российской академии наук.

По итогам обсуждения принято следующее заключение:

1. Актуальность темы

В магнитных материалах часто встречаются всевозможные периодические структуры, такие как полосовые доменные структуры ферро- и антиферромагнетиков, а также геликоидальные магнитные структуры, которые теоретически описываются одномерной решеткой солитонов (кинков). Для некоторых кристаллов специальной симметрии (кристаллов без центра инверсии) формирование геликоидальных структур обусловлено взаимодействием Дзялошинского – Мории. В последние годы открыты возможности синтеза молекулярных хиральных магнетиков со значительным вкладом взаимодействия Дзялошинского – Мории в магнитные свойства.

Одной из характерных особенностей указанных систем является наличие солитонов – пространственно локализованных частицеподобных волн, которые восстанавливают свою форму даже после взаимодействия с другими солитонами и нелинейными волнами.

Данная диссертационная работа посвящена исследованию магнитных солитонов в рамках интегрируемых моделей Ландау – Лифшица и sine-Gordon. Мотивацией работ, лежащих в основе данной диссертации, был поиск аналитических решений полностью интегрируемых моделей магнетизма в двух ситуациях: когда они описывают взаимодействие солитонных возбуждений с доменными стенками и доменами периодической доменной структуры, представляющей основное состояние системы, либо с фиксированной границей образца.

Такие задачи представляют существенную математическую трудность, в связи с чем до сих пор имеется довольно мало работ на подобные темы. В первом из указанных случаев решалась задача для безграничного образца, но на существенно нелинейном неоднородном периодическом фоне. В рамках диссертации найдены новые точные солитонные решения уравнений Ландау – Лифшица для легкоосного и двухосного ферромагнетиков при наличии доменной структуры, а также детально изучены громоздкие и непростые для анализа солитоны и мультисолитоны в решетке кинков (доменных стенок) геликоидальных магнетиков без центра инверсии в рамках модели sine-Gordon. В силу универсальности модели sine-Gordon, полученные результаты также

удалось использовать для аналитического описания солитонов электрической поляризации в циклоидальной структуре мультиферроиков.

Во втором случае строились решения уравнения Ландау – Лифшица на однородном фоне, но не в безграничном, а в полуограниченном образце одноосного ферромагнетика, который в некоторой точке имеет фиксированную границу. Благодаря известному калибровочному преобразованию, по найденным решениям уравнений Ландау – Лифшица для одноосного ферромагнетика были построены решения еще одной модели, – полубесконечного хирального ферромагнетика на фоне магнитной спирали, за формирование которой отвечает взаимодействие Дзялошинского.

Изученные в работе точные солитонные решения интегрируемых моделей магнетизма на нелинейном периодическом фоне **актуальны** как для развития общей теории интегрирования уравнений нелинейной математической физики, так и с точки зрения их применения в исследовании процессов перемагничивания доменной структуры при сильных внешних воздействиях. В ходе анализа локализованных возбуждений в доменных структурах легкоосного и двухосного ферромагнетиков установлена возможность существования слабо локализованных модуляций доменной структуры, которые могут быть как неподвижными, так и двигаться с большой скоростью. Неподвижные протяженные модуляции структуры представляют аналоги “солитонов Перегринна” – интенсивных всплесков на фоне основного состояния системы, широко исследуемых в гидродинамике и нелинейной оптике.

2. Личное участие автора в получении результатов, изложенных в диссертации

Личный вклад автора заключается в постановке цели и задач исследований; все результаты диссертационной работы получены лично автором. Построение точных решений уравнения Ландау – Лифшица на фоне доменной структуры ферромагнетиков с легкоосной и двухосной анизотропией выполнено совместно с д.ф.-м.н. В.В. Киселевым. Численный эксперимент по генерированию солитонов в доменной структуре легкоосного ферромагнетика проведен совместно с к.ф.-м.н. С.В. Баталовым. Научные результаты обсуждались автором с д.ф.-м.н. В.В. Киселевым и д.ф.-м.н., член-корр. РАН А.Б. Борисовым.

3. Степень достоверности результатов проведенных исследований

Достоверность полученных в диссертации результатов обеспечена использованием физически обоснованных теоретических моделей, применением для их исследования хорошо разработанного математического аппарата (метода обратной задачи рассеяния), наиболее полно выявляющего свойства симметрии решений; явным видом полученных

решений, что позволяет убедиться в их справедливости непосредственной подстановкой в исходные уравнения (в простейших случаях – вручную, в общем случае – численно), корреляцией полученных решений с известными ранее результатами при соответствующих предельных переходах.

4. Методология и методы исследования

В диссертационной работе получены и проанализированы новые точные решения интегрируемых моделей магнетизма – Ландау – Лифшица и sine-Gordon. Основным методом исследования служит модификация техники обратной задачи рассеяния – наиболее универсального метода современной нелинейной физики, а именно, процедура “одевания” на основе классической задачи Римана теории функции комплексной переменной.

5. Научная новизна результатов

1. Получены и детально проанализированы новые точные решения уравнений Ландау – Лифшица для ферромагнетика с легкоосной анизотропией описывающие солитонные возбуждения на фоне периодического основного состояния (полосовой доменной структуры).
2. Получены и детально проанализированы новые точные решения уравнений Ландау – Лифшица для ферромагнетика с двухосной анизотропией на фоне доменной структуры в физически выделенном случае слабой анизотропии, соответствующем модуляционной устойчивости структуры по линейному приближению. Проведен сравнительный анализ солитонных возбуждений в полосовых доменных структурах легкоосного и двухосного ферромагнетиков.
3. Получены и проанализированы точные решения, описывающие отражение движущихся солитонов от границы ферромагнетика с анизотропией типа “легкая плоскость” при краевых условиях, учитывающих частичное закрепление спинов на границе образца. Полученные результаты использованы для аналитического описания солитонов в хиральном полубезграничном ферромагнетике с легкоплоскостной анизотропией.
4. Детально исследованы строение и свойства пульсирующего солитона – бризера, – а также двухкинкового возбуждения в геликоидальной структуре магнетиков без центра инверсии. Решена задача о поглощении мощности продольной внешней накачки на частотах стоячих спиновых волн в геликоидальной структуре при наличии постоянного внешнего поля, перпендикулярного оси магнитной спирали. Показано, что диапазон частот пульсаций неподвижных бризеров лежит в щели спектра стоячих спиновых волн, что облегчает его обнаружение в геликоидальной структуре.

6. Научная и практическая значимость

Результаты диссертации важны для понимания закономерностей встраивания нелинейных возбуждений в периодическую доменную структуру, характера их взаимодействия с доменами и доменными стенками структуры, возможностей их возбуждения, делокализации и разрушения.

С практической точки зрения, результаты работы можно использовать для планирования экспериментов по обнаружению солитоноподобных возбуждений в доменных структурах одноосного и двухосного ферромагнетиков, в геликоидальной структуре магнетиков без центра инверсии и циклоидальной структуре мультиферроиков и управлению их свойствами с помощью внешних полей. Солитоны в геликоидальной магнитной структуре могут служить базовыми элементами при обработке информации в наноустройствах микросистемной техники и в информационно-телекоммуникационных системах. Солитоны в мультиферроиках могут найти применение при конструировании приборов и устройств, работающих без потерь энергии из-за протекания токов.

Полученные в диссертации аналитические решения, описывающие солитоны в полубезграничном легкоплоскостном ферромагнетике, могут быть использованы для постановки эксперимента по исследованию взаимодействия нелинейных волн намагниченности с границей легкоплоскостного ферромагнетика, а также хирального ферромагнетика с легкоплоскостной анизотропией. Рассчитанный в диссертации спектр поглощения мощности внешней накачки на частотах стоячих спиновых волн в геликоидальной магнитной структуре имеет практическое значение при постановке экспериментов о возбуждении в геликоидальной структуре солитонов и спиновых волн.

7. Соответствие содержания диссертации паспорту специальности, по которой она рекомендуется к защите.

Содержание диссертации соответствует п. 5 “Теория конденсированного состояния. Изучение различных состояний вещества и физических явлений в них. Статистическая физика. Теория фазовых переходов. Физическая кинетика” Паспорта специальности 1.3.3. Теоретическая физика. Исследование соответствует отрасли физико-математических наук.

Диссертационная работа соответствует требованиям, установленным п. 14 Положения о присуждении ученых степеней. Текст диссертации представляет собой научно-квалификационную работу, не содержит заимствованного материала без ссылки на автора и (или) источник заимствования, не содержит результатов научных работ, выполненных в соавторстве, без ссылок на соавторов.

8. Полнота изложения материалов диссертации в работах, опубликованных соискателем

Основное содержание диссертации достаточно полно изложено в 21 статье в журналах, включенных ВАК в Перечень ведущих рецензируемых журналов:

1. Киселев, В.В. Солитоны в доменной структуре ферромагнетика / В.В. Киселев, А.А. Расковалов. Текст: непосредственный // Теоретическая и математическая физика. – 2018. – Т. 197. – №1. – С. 89-107.
2. Borisov, A.B. Precessing solitons in the stripe domain structure / A.B. Borisov, V.V. Kiselev, A.A. Raskovalov. Текст: непосредственный // Low Temperature Physics. – 2018. – V. 44. – №8. – P. 765-774.
3. Киселев, В.В. Локализованные нелинейные возбуждения доменной структуры ферромагнетика / В.В. Киселев, А.А. Расковалов. Текст: непосредственный // Физика металлов и металловедение. – 2019. – Т. 120. – №2. – С. 115-129.
4. Kiselev, V.V. Solitons in the stripe domain structure of an easy-axis ferromagnet / V.V. Kiselev, A.A. Raskovalov. Текст: непосредственный // Chaos, Solitons and Fractals. – 2019. – V. 127. – P. 302-311.
5. Баталов, С.В. Генерирование солитонов в доменной структуре ферромагнетика / С.В. Баталов, В.В. Киселев, А.А. Расковалов. Текст: непосредственный // Журнал вычислительной математики и математической физики. – 2019. – Т. 59. – №8. – С. 117-126.
6. Расковалов, А.А. Резонансное взаимодействие бризеров в системе Манакова / А.А. Расковалов, А.А. Гелаш // Теоретическая и математическая физика. – 2022. – Т. 213. – №3. – С. 418-436.
7. Киселев, В.В. Нелинейная динамика квазиодномерной спиральной структуры / В.В. Киселев, А.А. Расковалов. Текст: непосредственный // Теоретическая и математическая физика. – 2012. – Т. 173. – №2. – С. 268-292.
8. Kiselev, V.V. Solitons and nonlinear waves in the spiral magnetic structures / V.V. Kiselev, A.A. Raskovalov. Текст: непосредственный // Chaos, Solitons and Fractals. – 2016. – V. 84. – P. 88-103.

9. Киселев, В.В. Нелинейные коллективные возбуждения в геликоидальных магнитных структурах / В.В. Киселев, А.А. Расковалов. Текст: непосредственный // Физика металлов и металловедение. – 2012. – Т. 113. – №12. – С. 1180-1192.
10. Kiselev, V.V. Solitons in the domain structure of a two-axis ferromagnet / V.V. Kiselev, A.A. Raskovalov. Текст: непосредственный // Chaos, Solitons and Fractals. – 2020. – V. 135. – P. 109803.
11. Kiselev, V.V. Soliton dynamics in the domain structure of a biaxial ferromagnet / V.V. Kiselev, A.A. Raskovalov. Текст: непосредственный // Low Temperature Physics. – 2020. – V. 46. – №11. – P. 1098 (1-10).
12. Киселев, В.В. Нелинейная динамика бризеров в спиральных структурах магнетиков / В.В. Киселев, А.А. Расковалов. Текст: непосредственный // Журнал экспериментальной и теоретической физики. – 2016. – Т. 149. – №6. – С. 1260-1269.
13. Киселев, В.В. Солитоны в полубесконечном ферромагнетике с анизотропией типа “легкая плоскость” / В.В. Киселев, А.А. Расковалов. Текст: непосредственный // Известия РАН. Серия физическая. – 2024. – Т. 88. – №9. – С. 36-41, K2.
14. Kiselev, V.V. Nonlinear dynamics of the semi-infinite ferromagnetic samples with an easy-plane anisotropy / V.V. Kiselev, A.A. Raskovalov. Текст: непосредственный // Chaos, Solitons and Fractals. – 2024. – V. 188. – P. 115500, K1.
15. Kiselev, V.V. Solitons in the semi-infinite ferromagnets with the different types of anisotropy / V.V. Kiselev, A.A. Raskovalov. Текст: непосредственный // Annals of Physics. – 2025. – V. 475. – P. 169933, K1.
16. Киселев, В.В. Нелинейная динамика полубесконечного ферромагнетика с геликоидальной структурой / В.В. Киселев, А.А. Расковалов. Текст: непосредственный // Физика твердого тела. – 2024. – Т. 66. – №10. – С. 1742-1753, K1.
17. Kiselev, V.V. Twokink excitation in a spiral magnetic structure / V.V. Kiselev, A.A. Raskovalov. Текст: непосредственный // Low Temperature Physics. – 2016. – V. 42. – №1. – P. 50-56.

18. Киселев, В.В. Нелинейная динамика квазиодномерной спиральной структуры / В.В. Киселев, А.А. Расковалов. Текст: непосредственный // Известия РАН. Серия физическая. – 2014. – Т. 78. – №2. – С. 151-154.
19. Киселев, В.В. Аналитическое описание солитонов и волн на фоне квазиодномерной магнитной спирали / В.В. Киселев, А.А. Расковалов. Текст: непосредственный // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. – 2016. – Т. 13. – С. 19-31.
20. Киселев, В.В. Стоячие спиновые волны и солитоны в квазиодномерной спиральной структуре / В.В. Киселев, А.А. Расковалов. Текст: непосредственный // Журнал экспериментальной и теоретической физики. – 2013. – Т. 143. – № 2. – С. 313-321.
21. Киселев, В.В. Солитоны электрической поляризации в мультиферроиках / В.В. Киселев, А.А. Расковалов. Текст: непосредственный // Физика твердого тела. – 2016. – Т. 58. – №3. – С. 485-490.

9. Апробация результатов

Материалы диссертации докладывались на XXII, XXIII, XXV Международных конференциях «Новое в магнетизме и магнитных материалах» (Астрахань, 2012 г.; Москва, 2018 г., 2024 г.); XXXIV, XXXV, XXXVI, XXXVII, XL Международных зимних школах физиков-теоретиков «Коуровка» (Новоуральск, 2012 г.; Верхняя Сысерть, 2014 г., 2016 г., 2018 г.; р. Башкортостан, с. Новоабзаково, 2024 г.); Научной сессии ИФМ УрО РАН по итогам 2016 г. (Екатеринбург, 2016 г.); VI, VIII Международной конференциях «Solitons, collapses and turbulence: Achievements, Developments and Perspectives» (Новосибирск, Академгородок, 2012 г.; Москва, Черноголовка, 2017 г.); Международной конференции «Нелинейные уравнения и комплексный анализ 2013» (Уфа, 2013 г.); XXV Научной сессии Совета по нелинейной динамике (Москва, 2016 г.); XIV, XV, XIX, XX, XXIII Всероссийских школах-семинарах по проблемам конденсированного состояния вещества СПФКС (Екатеринбург, 2014 г., 2015 г., 2018 г., 2019 г., 2023 г.); Международной конференции «Фазовые переходы, критические и нелинейные явления в конденсированных средах» (Челябинск, 2015 г.); Конференции «Phycis and Mathematics of Nonlinear Phenomena. 50 years of IST» (Галлиполи, Лечче, Италия, 2017 г.); XVIII Научной школе «Нелинейные волны – 2018» (Нижний Новгород, 2018); VII Евро-азиатский симпозиум «Trends in MAGnetism» (Екатеринбург, 2019 г.), Всероссийской конференции с международным участием «Электронные, спиновые и квантовые процессы в молекулярных и кристаллических системах» (Уфа, 2024 г.).

ВЫВОД: Диссертация **“Нелинейные возбуждения в магнетиках со спиральной и полосовой доменной структурой”** Расковалова Антона Александровича является научно-квалификационной работой, в которой содержится решение проблем, имеющих значение для теоретической физики и рекомендуется к защите на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.3. Теоретическая физика.

Заключение принято на заседании Научного совета по физике конденсированного состояния Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физики металлов имени М.Н. Михеева Уральского отделения Российской академии наук.


Присутствовало на заседании 16 человек из 26 членов Совета. Результаты голосования: "за" – 16 человек, "против" – нет, "воздержавшихся" – нет, протокол №3 от 18.04.2025 г.

Председатель Научного совета
по физике конденсированного состояния
д.ф.-м.н., член-корр. РАН


Стрельцов Сергей Владимирович

Ученый совет Института физики металлов имени М.Н. Михеева УрО РАН своим решением от 23.04.2025 г. (протокол № 8) рекомендовал диссертационную работу **Расковалова Антона Александровича** на тему **«Нелинейные возбуждения в магнетиках со спиральной и полосовой доменной структурой»**, представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.3. Теоретическая физика, к защите.

Ученый секретарь
ИФМ УрО РАН
кандидат физ.-мат. наук


Арапова Ирина Юрьевна

