

На правах рукописи

Ломакина Ирина Юрьевна

ОСОБЕННОСТИ НЕЛИНЕЙНОЙ ДИНАМИКИ  
ОДНОМЕРНЫХ МАГНИТНЫХ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ  
В ФЕРРО- И АНТИФЕРРОМАГНЕТИКАХ

01.04.07 – физика конденсированного состояния

Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Уфа – 2006

Работа выполнена	на кафедре теоретической физики ГОУ ВПО Башкирский государственный университет, в лаборатории теоретической физики Института физики молекул и кристаллов УНЦ РАН
Научный руководитель	доктор физико-математических наук, профессор Шамсутдинов Миниахат Асгатович
Научный консультант	доктор физико-математических наук, профессор Шиховцева Елена Сергеевна
Официальные оппоненты	доктор физико-математических наук, профессор Бучельников Василий Дмитриевич  доктор физико-математических наук, профессор Назаров Айрат Ахметович
Ведущая организация	Институт физики металлов УрО РАН

Защита состоится 14 апреля 2006 г. в 15 часов на заседании диссертационного совета Д 002.099.01 Института физики молекул и кристаллов УНЦ РАН, г. Уфа, Пр. Октября, 151.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института физики молекул и кристаллов УНЦ РАН

Автореферат разослан « 7 » марта 2006 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета

Г.С. Ломакин

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Принцип действия многих технических устройств основан на использовании временных и пространственных изменений намагниченности, в том числе явлений намагничивания и перемагничивания магнитных материалов. Перемагничивание определяется сугубо нелинейными процессами поворота намагниченности на значительные углы. Строгое их теоретическое рассмотрение в настоящее время далеко от завершения и представляет собой важную фундаментальную задачу физики конденсированного состояния и магнитных явлений.

Намагничивание ферритов-гранатов и редкоземельных ортоферритов, которые на протяжении многих десятилетий остаются широко используемыми в технике материалами, осуществляется преимущественно движением доменных границ. При этом процесс перемагничивания в начальной и конечной стадиях сопровождается зарождением домена обратной намагниченности, образованием ограничивающих его взаимодействующих 180-градусных доменных стенок и их последующей аннигиляцией или образованием 360-градусной доменной стенки [1, 2].

С точки зрения солитонной физики уединенная 180-градусная доменная граница представляет собой односолитонное образование, называемое кинком или топологическим солитоном [3]. Две сильно взаимодействующие доменные стенки представляют собой двухсолитонное образование. К таким образованиям относятся локализованные в пространстве магнитные неоднородности в виде динамической ноль-градусной доменной стенки и динамической 360-градусной доменной стенки. 360-градусную доменную стенку можно рассматривать как зародыш метастабильной фазы в магнитном поле в недрах стабильной. Напротив, ноль-градусную стенку – как зародыш устойчивой фазы в недрах метастабильной. С точки зрения нелинейной физики динамическая 360-градусная доменная стенка представляет собой магнитный  $4\pi$ -вобблер или, по-другому, магнитную неоднородность, образованную двумя сильно взаимодействующими солитонами (180-градусными стенками

разной полярности) с одинаковыми топологическими зарядами. Динамическая ноль-градусная доменная стенка представляет собой магнитный бризер, образованный сильно взаимодействующими солитонами с противоположными топологическими зарядами (180-градусными стенками одинаковой полярности). Следует отметить еще тот факт, что как динамическая ноль-градусная [3], так и динамическая 360-градусная [4] доменные стенки обладают внутренними степенями свободы, связанными с возможностью движения образующих их 180-градусных стенок относительно центра системы.

Роль односолитонного образования, т.е. 180-градусной доменной стенки, в процессе перемагничивания исследована достаточно полно [5]. При этом хорошо изучено влияние на скорость движения доменной стенки, как диссипации, так и внешнего магнитного поля [6–10]. Роль локализованных пространственных магнитных неоднородностей, представляющих собой двухсолитонные динамические образования, изучена гораздо слабее из-за их более сложной структуры, трудностей учета и экспериментального исследования их вклада в различные свойства магнитоупорядоченных веществ. В большинстве случаев приходится ограничиваться теоретическим изучением эволюции двухпараметрического солитона, динамических двухсолитонных и многосолитонных образований, пренебрегая диссипативными процессами [3, 9]. Пренебрежение затуханием и влиянием внешних полей затрудняет использование динамических двухсолитонных образований для описания динамики неоднородного перемагничивания, которое можно рассматривать как индуцированный фазовый переход первого рода, происходящий путем образования и роста зародышей. Аналогичная ситуация имеет место и в случае спонтанных фазовых переходов первого рода, в том числе при переходах антиферромагнетик  $\leftrightarrow$  слабый ферромагнетик. Например, в  $DyFeO_3$  при таком переходе наблюдаются два механизма зародышеобразования: стеночный и флуктуационный [11]. В качестве зародышей выступают 180-градусные антиферромагнитные доменные стенки, представляющие собой сильно взаимо-

действующие 90-градусные межфазные стенки, а также локализованные в пространстве магнитные неоднородности.

Таким образом, задача исследования динамики локализованных магнитных неоднородностей с учетом затухания и различных внешних воздействий остается актуальной задачей физики фазовых переходов и перемагничивания магнитных материалов, в конечном итоге – физики конденсированного состояния.

**Целью** диссертационной работы является исследование влияния внешнего магнитного поля, температуры и затухания на динамику одномерных локализованных магнитных неоднородностей при фазовом переходе первого рода и неоднородном перемагничивании в ферромагнетике и антиферромагнетике со слабым ферромагнетизмом.

Для достижения поставленной цели были решены следующие **задачи**.

1. Предложен эффективный приближенный метод анализа двухсолитонных решений уравнения Ландау-Лифшица-Гильберта и возмущенного уравнения синус-Гордона путем сведения задачи об интегрировании нелинейного волнового уравнения к исследованию динамической системы, описывающей эволюцию параметров солитонов. Эта система уравнений при определенной параметризации переходит к уравнениям, полученным с помощью теории возмущений [12–15], основанной на методе обратной задачи рассеяния.
2. Осуществлено численное исследование динамической системы, восстановление формы двухсолитонных решений уравнения Ландау-Лифшица-Гильберта и возмущения уравнения синус-Гордона, определены зависимости динамических характеристик магнитного солитона (амплитуды, частоты и т.д.) от параметров диссипации и внешних воздействий.

**Научная новизна** определяется тем, что исследование динамики зародыша перемагничивания и новой фазы в недрах старой фазы в ферро- и антиферромагнетиках с учетом диссипации, магнитного поля, магнитостатиче-

ского взаимодействия и температуры сведено к задаче изучения динамики двухсолитонных образований в виде взаимодействующих доменных стенок с одинаковыми и противоположными топологическими зарядами. Впервые определены условия существования нелинейных колебаний зародыша перемангничивания и новой фазы в форме бризера, образования домена новой фазы или домена обратной намагниченности при перемангничивании. Установлена зависимость от затухания процесса аннигиляции двух доменных стенок разной хиральности (с противоположными топологическими зарядами), таких как 90-градусных межфазных стенок при фазовом переходе первого рода и 180-градусных доменных границ при перемангничивании. Показана сильная зависимость от затухания динамики образования 180-градусной доменной границы при фазовом переходе и 360-градусной стенки при перемангничивании в результате взаимодействия двух доменных стенок меньшей градусности и одинаковой хиральности (с одинаковыми топологическими зарядами). Изучены условия образования и динамика одномерного зародыша новой фазы в виде локализованной магнитной неоднородности в «недрах» старой фазы при наличии в ромбическом антиферромагнетике областей с пониженным значением константы магнитной анизотропии.

**На защиту выносятся:**

1. Модель, описывающая динамику одномерного зародыша перемангничивания в ферромагнетике с учетом затухания и фактора качества материала.
2. Одномерная модель эволюции зародыша перемангничивания и взаимодействующих доменных стенок с противоположными топологическими зарядами в антиферромагнетике со слабым ферромагнетизмом.
3. Результаты исследования динамики одномерного зародыша новой фазы и межфазных стенок с учетом неоднородности константы магнитной анизотропии при фазовом переходе первого рода антиферромагнетизм  $\leftrightarrow$  слабый ферромагнетизм.

4. Результаты исследования динамики 360-градусной доменной стенки при перемагничивании и 180-градусной межфазной стенки при фазовом переходе первого рода в слабом ферромагнетике.

**Научная и практическая значимость диссертации.** Результаты диссертации носят теоретический характер, углубляют существующие представления о динамике зародышей при перемагничивании и фазовых переходах первого рода с образованием домена обратной намагниченности, взаимодействии доменных стенок с одинаковыми и противоположными топологическими зарядами. Результаты могут быть использованы при интерпретации экспериментальных данных по исследованию фазовых переходов и неоднородного перемагничивания ферритов-гранатов и ортоферритов.

**Апробация работы.** Результаты, изложенные в диссертации, докладывались и обсуждались на V международном семинаре, посвященном памяти К.П. Белова (Махачкала–2002), международной байкальской научной конференции «Магнитные материалы» (Иркутск–2003), выездной конференции по проблемам магнетизма в магнитных пленках, малых частицах и наноструктурных объектах (Астрахань–2003), Евро-Азиатском симпозиуме «Прогресс в магнетизме» EASTMAG–2004 (Красноярск–2004), международной конференции «Новые магнитные материалы в микроэлектронике» НМММ 19 (Москва–2004), международном симпозиуме по магнетизму MISM–2005 (Москва–2005), 8-м международном симпозиуме «Фазовые превращения в твердых растворах и сплавах» ОМА–2005 (Сочи–2005), международной конференции «Functional Materials» IFCM'2005 (Партенит–2005), международной конференции «Фазовые переходы, критические и нелинейные явления в конденсированных средах» (Махачкала–2005), международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых по фундаментальным наукам, (Москва, МГУ–2003), всероссийской школе-семинаре молодых ученых, посвященной памяти Х.И. Амирханова (г. Махачкала–2003), V и VI Молодежных семинарах по проблемам физики конденсированного состояния веще-

ства (Екатеринбург–2004, 2005), международной уфимской зимней школе-конференции по математике и физике для студентов, аспирантов и молодых ученых (Уфа–2005), XVIII Всероссийской Научной Конференции Студентов–Физиков и Молодых Ученых России (Екатеринбург–2002), Региональных школах-конференциях для студентов, аспирантов и молодых ученых по математике и физике (Уфа–2001, 2002, 2003, 2004).

**Публикации.** Основные результаты опубликованы в 16 печатных работах.

**Структура** диссертационной работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Работа содержит 137 страниц, включая 58 рисунков и список цитированной литературы из 110 наименований.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Первая глава** является обзорной, в ней приведены краткие сведения о ферромагнетиках и антиферромагнетиках со слабым ферромагнетизмом, а также о фазовых переходах и процессах перемагничивания в них. В главе приводится краткий анализ предшествующих работ по исследованию динамики локализованных магнитных неоднородностей, обоснование необходимости изучения двухсолитонных решений уравнения Ландау–Лифшица–Гильберта с точки зрения исследования процессов перемагничивания и фазовых переходов.

**Во второй главе** исследовано влияние внешнего магнитного поля и затухания на динамику зародыша перемагничивания в виде взаимодействующих доменных стенок с противоположными топологическими зарядами. Рассмотрение проводится на примере одноосного ферромагнетика, для плотности энергии которого можно написать выражение

$$w = A \left( \frac{\partial \mathbf{m}}{\partial y} \right)^2 - K m_z^2 + 2\pi M_s^2 m_y^2 - M_s \mathbf{H} \mathbf{m}, \quad (1)$$



где  $A$  – параметр неоднородного обменного взаимодействия;  $\mathbf{m} = \mathbf{M}/M_s$  – единичный вектор намагниченности  $\mathbf{M}$ ,  $M_s = |\mathbf{M}|$  – намагниченность насыщения;  $K$  – константа одноосной анизотропии;  $\mathbf{H}$  – внешнее магнитное поле. Изучение влияния внешнего магнитного поля и затухания на динамику локализованных одномерных магнитных неоднородностей сведено к исследованию системы обыкновенных нелинейных дифференциальных уравнений вида

$$\begin{cases} \Omega_\tau = f_1(\varepsilon, \Omega, \varphi, \alpha, h), \\ \varphi_\tau = f_2(\varepsilon, \Omega, \varphi, \alpha, h) \end{cases} \quad (2)$$

( $h = M_s H / 2K$ ,  $\varepsilon = Q^{-1} = 2\pi M_s^2 / K$ ), описывающих эволюцию параметров двухсолитонных решений уравнений Ландау–Лифшица–Гильберта

$$\operatorname{tg}^2 \frac{\theta}{2} = \frac{1 - \Omega}{\Omega + \varepsilon \sin^2 \varphi} \cdot \frac{1}{\operatorname{ch}^2(s\sqrt{1 - \Omega} \cdot \xi)}, \quad (-\varepsilon \sin^2 \varphi < \Omega < 1), \quad (3)$$

где  $\theta = \theta(\xi, \tau)$ ,  $\varphi = \varphi(\tau)$  – полярный и азимутальный углы вектора намагниченности,  $s = \pm 1$ .

Численный анализ полученной динамической системы позволил установить, что при начальных амплитудах зародыша перемагничивания (3), меньших амплитуды критического зародыша ( $\Omega_{cr} = h$ ,  $\varphi_{cr} = 0$ ) устойчивой фазы  $\mathbf{M} \uparrow \uparrow \mathbf{H}$  ( $\theta = \pi$ ) в недрах метастабильной  $\mathbf{M} \uparrow \downarrow \mathbf{H}$  ( $\theta = 0$ ), имеют место нелинейные колебания сильно взаимодействующих доменных стенок (см. рис. 1). Структура стенок периодически превращается из блоховской ( $\varphi = 0, \pi$ ) в неелевскую ( $\varphi = \pm\pi/2$ ) и обратно. При наличии диссипации нелинейные колебания являются затухающими (что согласуется с результатами аналитических исследований [12, 13] в случае малоамплитудных бризеров) с изменяющейся со временем частотой (рис. 2).

Установлено, что при начальных амплитудах, больших амплитуды критического зародыша, имеет место рост зародыша перемагничивания и об-

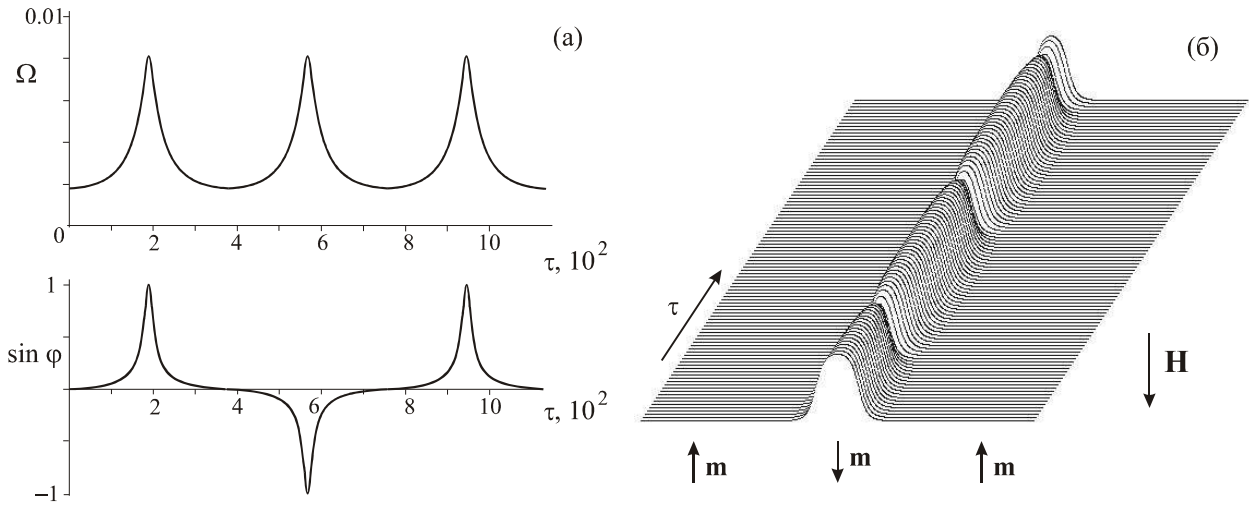


Рис. 1. Эволюция параметров бризера (а) и нелинейные колебания зародыша перемagnичивания (б) в отсутствие затухания ( $\alpha = 0$ ) при  $Q=10$ ,  $h=0.0015$ ,  $\Omega(0)=1.2h$ ,  $\varphi(0)=0$ .

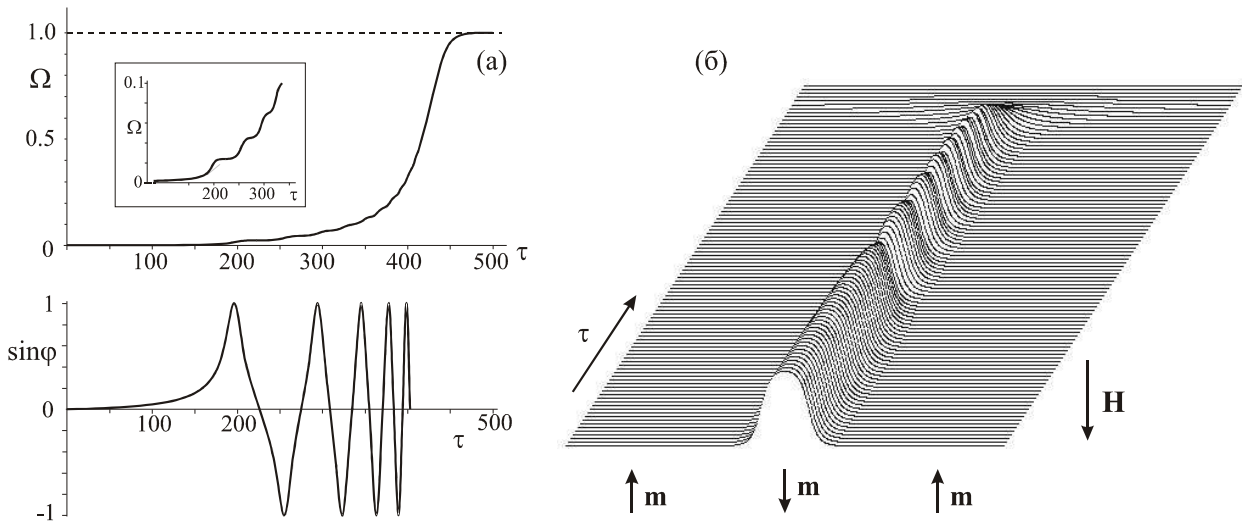


Рис. 2. Эволюция параметров бризера (а) и затухающие нелинейные колебания зародыша перемagnичивания (б) при  $\alpha = 0.03$ ,  $Q=10$ ,  $h=0.0015$ ,  $\Omega(0)=1.2h$ ,  $\varphi(0)=0$ .

разование уединенного домена с  $\mathbf{M} \uparrow \uparrow \mathbf{H}$ , разделенного 180-градусными доменными стенками с противоположными топологическими зарядами. Время эволюции зародыша перемagnичивания в домен обратной намагниченности увеличивается с ростом затухания и уменьшается с ростом поля (рис. 3).

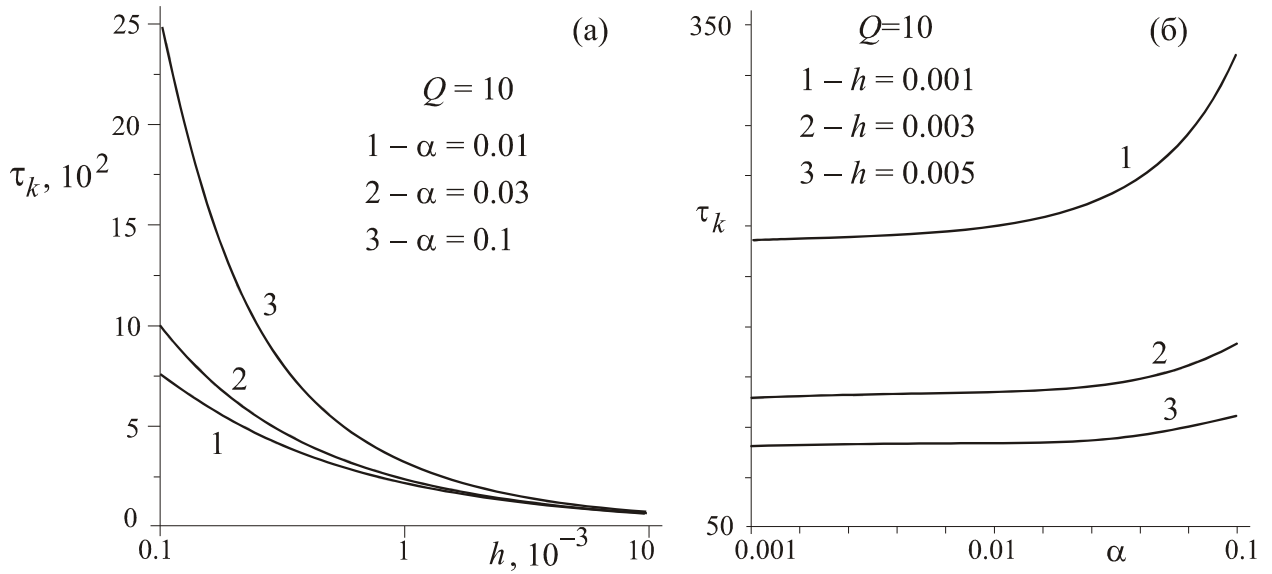


Рис. 3. Зависимость времени распада бризера на солитон-антисолитонную пару от внешнего поля  $h < h_w$  (а) и затухания (б) при заданном факторе качества.

Движение таких взаимодействующих 180-градусных доменных стенок относительно их общего неподвижного центра в полях, меньших полей Уокера, является стационарным (рис. 4,а). В полях  $h$ , больших поля Уокера  $h_w$ , процесс образования уединенного домена сопровождается осциллирующим движением взаимодействующих доменных стенок (рис. 4,б). При этом структура стенок периодически превращается из блоховской в неелевскую и обратно. В моменты наибольшего сближения структура стенок становится неелевской. Частота таких превращений сильно зависит от поля, затухания, фактора качества материала и начальной амплитуды зародыша перемангничивания.

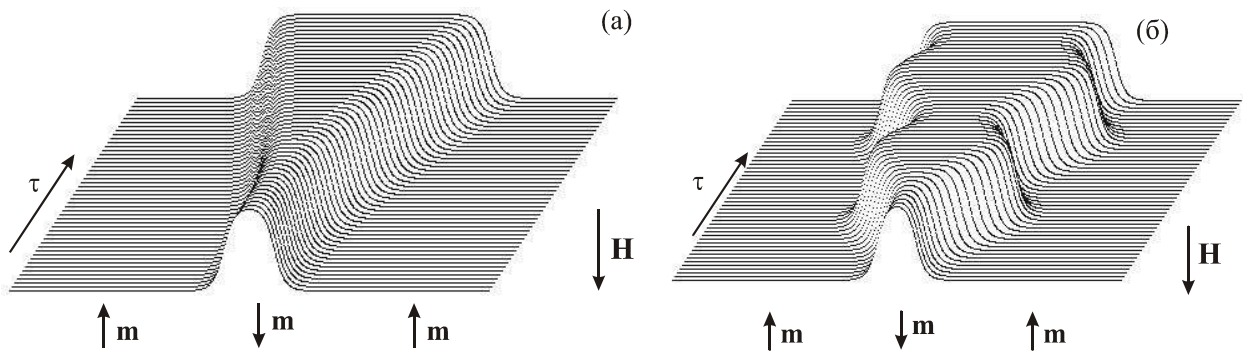


Рис. 4. Эволюция формы 180-градусных стенок с противоположными топологическими зарядами в полях, меньших (а) и больших (б) поля Уокера  $h_w$ .

**В третьей главе** исследовано влияние внешнего магнитного поля и затухания на динамику таких локализованных магнитных неоднородностей, как зародыш перемагничивания и взаимодействующие 180-градусные доменные стенки одинаковой и разной полярностей в высокотемпературной фазе  $G_x F_z$  слабых ферромагнетиков. При этом исходили из плотности функции Лагранжа  $L$  и диссипативной функции Рэлея  $R$  в магнитном поле  $\mathbf{H} \parallel \mathbf{c}$ -оси кристалла, записанной в виде [8, 9]

$$L = \frac{\chi_{\perp}}{2\gamma^2} \dot{\mathbf{i}}^2 - \frac{\chi_{\perp}}{\gamma} \mathbf{H}[\dot{\mathbf{i}} \dot{\mathbf{i}}] - F, \quad R = \frac{\beta M_0}{2\gamma} \dot{\mathbf{i}}^2 \quad (4)$$

$$F = \frac{1}{2} A(\nabla \mathbf{i})^2 - \frac{1}{2} \chi_{\perp} [\mathbf{H}^2 - (\mathbf{H} \mathbf{i})^2] - \frac{1}{2} K_{ab} l_x^2 - \frac{1}{2} K_{bc} l_z^2 - M_s H_z l_x,$$

Здесь  $\chi_{\perp} = M_0/H_E$  – антиферромагнитная восприимчивость,  $H_E$  – обменное поле,  $\gamma$  – гиромангнитное отношение,  $A$  – константа неоднородного обменного взаимодействия,  $K_{ab}$  и  $K_{bc}$  – константы магнитной анизотропии,  $M_s = M_0 H_D/H_E$  – величина слабоферромагнитного момента вдоль  $\mathbf{c}$ -оси,  $H_D$  – поле Дзялошинского,  $\beta$  – параметр затухания Гильберта.

Уравнение, описывающее динамику одномерных магнитных неоднородностей [8–10], движущихся вдоль  $a$ -оси имеет вид:

$$u_{tt} - u_{xx} + \sin u = 2h \sin(u/2) - \alpha u_t. \quad (5)$$

Здесь  $u = 2\theta$ ,  $\theta$  – угол между  $a$ -осью кристалла и вектором антиферромагнетизма,  $h = -M_s H/K_{ac}$  – безразмерное поле,  $\alpha = \beta M_0/\sqrt{K_{ac}\chi_{\perp}}$  – безразмерный параметр затухания.

Исследования динамики магнитных неоднородностей проведены исходя из развитого в работе приближенного метода интегрирования возмущенного двойного уравнения синус-Гордона при  $\alpha \ll 1, h \ll 1$ . При таком подходе исследование влияния поля и затухания на двухсолитонные решения нелинейного уравнения в частных производных сводится к анализу динамической

системы обыкновенных нелинейных дифференциальных уравнений первого порядка, описывающих эволюцию параметров солитонов:

$$\begin{cases} \Omega_t = \frac{2\varepsilon(h + \alpha\varepsilon)}{1 + \varepsilon^2} (1 - \Omega) \left[ 1 + \frac{\Omega + \varepsilon^2}{2\sqrt{(1 + \varepsilon^2)}(1 - \Omega)} \ln \frac{(\sqrt{1 + \varepsilon^2} + \sqrt{1 - \Omega})^2}{|\Omega + \varepsilon^2|} \right], \\ \varepsilon_t = \Omega + \varepsilon^2 - \alpha\varepsilon - h. \end{cases} \quad (6)$$

Динамика зародыша перемагничивания в форме бризера

$$\operatorname{tg}^2 \frac{\theta}{2} = \frac{1 - \Omega}{\Omega + \varepsilon^2} \cdot \frac{1}{\operatorname{ch} x \sqrt{1 - \Omega}}, \quad (0 < \Omega < 1)$$

определяется величиной его начальной амплитуды. При амплитудах, меньших амплитуды критического зародыша ( $\Omega_{cr} = h, \varepsilon_{cr} = 0$ ) стабильной фазы с вектором ферромагнетизма  $\mathbf{m} \uparrow \uparrow \mathbf{H}$  в недрах метастабильной с  $\mathbf{m} \uparrow \downarrow \mathbf{H}$ , бризер намагничённости совершает нелинейные колебания, которые при наличии диссипации являются затухающими. Такие колебания зародыша перемагничивания в слабых ферромагнетиках имеют место при начальной частоте, больше критической, определяемой среднегеометрической величиной поля Дзялошинского и внешнего магнитного поля как

$$\omega_{cr} = \omega_{AF} \sqrt{\Omega_{cr}} = \gamma \sqrt{H_D H}.$$

В случае отсутствия затухания частота нелинейных колебаний зародыша перемагничивания возрастает с ростом поля. При наличии диссипации со временем амплитуда колебаний уменьшается (рис. 5), а частота при малом затухании стремится к частоте низкочастотной ветви антиферромагнитного резонанса.

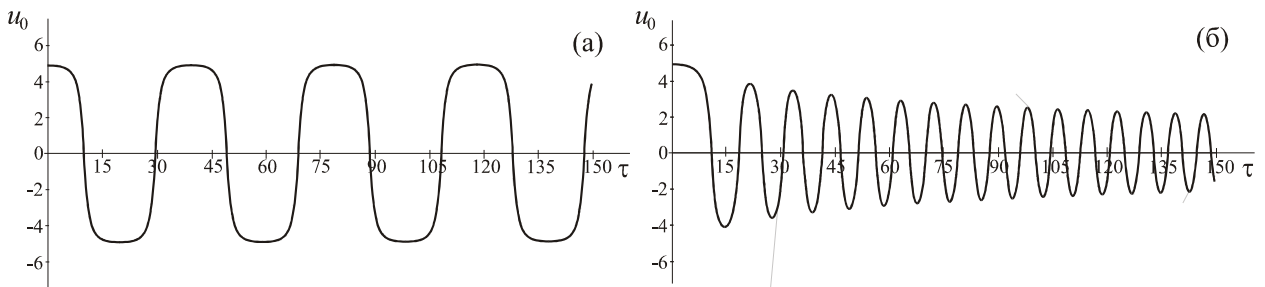


Рис. 5. Зависимость амплитуды колебаний зародыша перемагничивания в форме бризера от времени при  $h = 0.1$  и  $\alpha = 0$  (а),  $\alpha = 0.1$  (б).

В магнитном поле, противоположном намагниченности образца, пространственно локализованная одномерная магнитная неоднородность в форме бризера с начальной амплитудой, большей амплитуды критического зародыша, растет и распадается на две удаляющиеся друг от друга 180-градусные стенки, образуя домен с противоположным направлением намагниченности, что аналогично случаю ферромагнетика в полях, меньших поля Уокера. Время распада зародыша перемагничивания в виде сильно взаимодействующих доменных стенок на две слабо связанные 180-градусные стенки одинаковой полярности с противоположными топологическими зарядами возрастает с увеличением параметра затухания и уменьшается с ростом поля. Такие стенки в поле противоположного направления сближаются и аннигилируют (рис. 6). При заданном поле существует некоторое критическое значение параметра затухания, ниже которого доменные стенки одинаковой полярности, прежде чем аннигилировать, испытывают многократное рассеяние (рис. 6,б), сопровождающееся сменой полярности стенок. Построена линия раздела таких режимов аннигиляции на  $\alpha - h$  – плоскости (рис. 7).

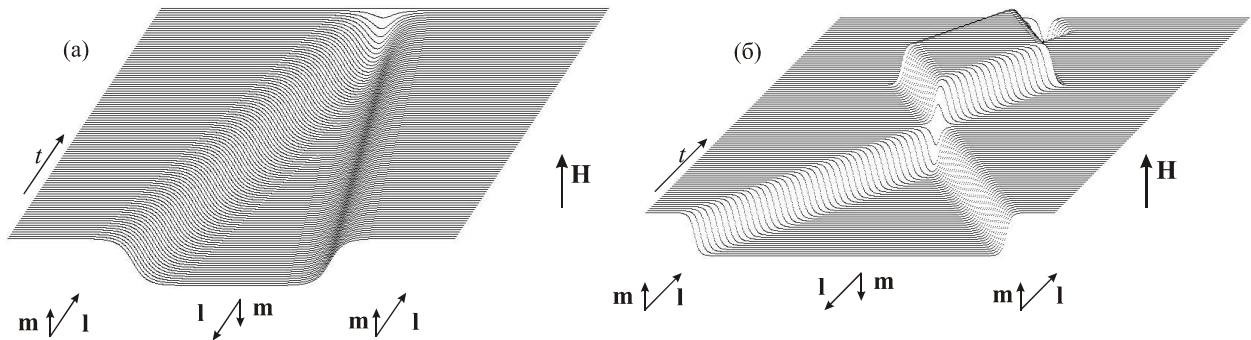
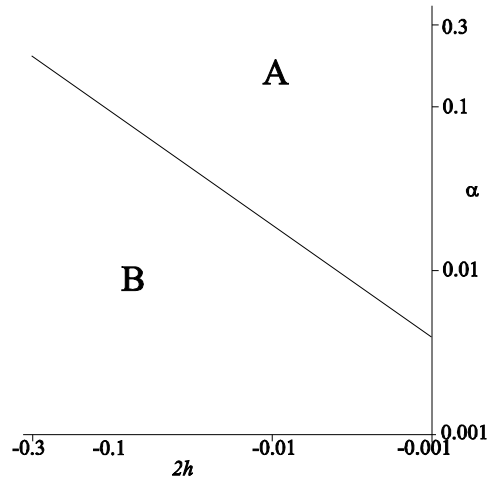


Рис. 6. Взаимодействующие 180-градусные стенки одинаковой полярности при  $h = -0.01$ ,  $\alpha = 0.05$  (а) и  $\alpha = 0.009$  (б).

Рассеяние 180-градусных стенок разной полярности с одинаковыми топологическими зарядами сопровождается образованием 360-градусной стенки, описываемой выражением

$$\operatorname{ctg} \frac{\theta}{2} = -\frac{\Omega + \varepsilon^2}{1 - \Omega} \operatorname{sh}^2 x \sqrt{1 - \Omega}, \quad (-\infty < \Omega < 0), \quad (7)$$

Рис. 7. Диаграмма характера аннигиляции стенок в плоскости  $(h, \alpha)$ . А – область одноактного процесса рассеяния; В – многоактного, сопровождающегося сменой полярности стенок.



и колебаниями 180-градусных стенок относительно центра 360-градусной стенки. В случае линейных колебаний их частота равна

$$\omega_{4\pi} = \gamma \left[ 2H_D H - \left( \frac{\beta H_E}{2} \right)^2 \right]^{1/2}.$$

В полях  $H > H_1 = (\beta H_E)^2 / 8H_D$  имеют место затухающие колебания взаимодействующих 180-градусных доменных стенок, а при  $H < H_1$  – их аperiodическое движение и образование статической 360-градусной стенки (рис. 8).

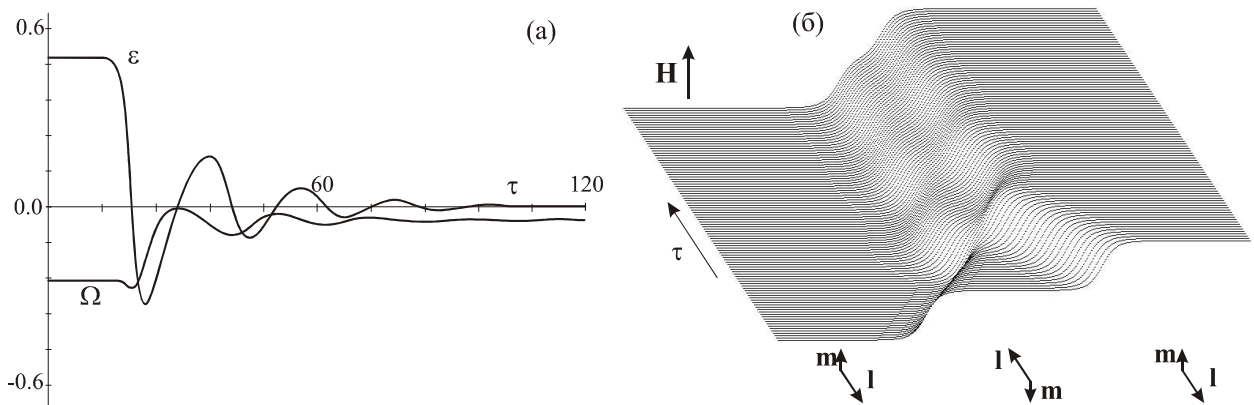


Рис. 8. Эволюция параметров решения в виде  $4\pi$  кинка (а) и затухающие осцилляции (б) двух 180-градусных стенок с образованием 360-градусной стенки с «перетяжкой» при  $\varepsilon_0 = -h/\alpha$ ,  $\Omega_0 = -(h/\alpha)^2 - 10^{-8}$ ,  $h = -0.05$ ,  $\alpha = 0.1$ .

Оценки показывают, что в иттриевом ортоферрите колебания 180-градусных стенок относительно их общего центра в полях, близких к полю на-

сыщения, являются слабозатухающими, а их частота  $\omega_{4\pi} \approx 10^{11} \text{ c}^{-1}$  меньше частоты антиферромагнитного резонанса  $\omega_{AF}$  на порядок и более.

**Четвертая глава** посвящена рассмотрению нелинейной динамики локализованных магнитных неоднородностей в антиферромагнетиках со слабым ферромагнетизмом вблизи точки фазового перехода первого рода антиферромагнетизм  $\leftrightarrow$  слабый ферромагнетизм, исходя из уравнения (5), где  $u = 4\theta$ ,  $h = -g = -(K_1 + K_2)/|K_2|$ ,  $K_i$  – константы магнитной анизотропии.

На основании методики, развитой в главе 3, исследована динамика зародыша новой стабильной фазы в недрах метастабильной, а также определены особенности аннигиляции 90-градусных межфазных стенок в зависимости от затухания и близости температуры к температуре фазового перехода. Исследована динамика образования 180-градусной антиферромагнитной доменной стенки в результате сближения двух 90-градусных межфазных стенок с одинаковыми топологическими зарядами. Оценки показали, что в  $DyFeO_3$  две взаимодействующие 90-градусные межфазные стенки с одинаковыми топологическими зарядами из-за большого затухания практически мгновенно, со временем релаксации  $t_r \sim (\gamma\alpha H_E)^{-1} \leq 10^{-13}$  с, должны переходить в состояние статической 180-градусной стенки с «перетяжкой».

Также в четвертой главе рассмотрено влияние плоского магнитного включения на динамику и условия образования зародыша новой фазы. При этом считалось, что первая константа магнитной анизотропии является функцией координаты

$$K_1(\xi) = K_1[1 + kf(\xi)], \quad (8)$$

где  $f(\xi) = \Theta(\xi + d/2) - \Theta(\xi - d/2)$ ,

$$\Theta(z) = \begin{cases} 1, & z \geq 0; \\ 0, & z < 0. \end{cases}$$

На основании численных исследований показано, что в зависимости от ширины  $d$  участка с пониженной анизотропией и относительной величины  $k$



( $|k| \ll 1$ ) уменьшения константы анизотропии домен новой метастабильной фазы в недрах стабильной с течением времени либо исчезает (рис. 9), либо локализуется (рис. 10) в области с пониженной анизотропией. Построена линия, разделяющая области образования зародыша новой фазы в недрах старой устойчивой фазы на  $k - d$ -плоскости (рис. 11).

Исчезновение локализованной магнитной неоднородности наблюдается, когда ширина  $d$  области с пониженной анизотропией много меньше ширины самой магнитной неоднородности (рис. 4).

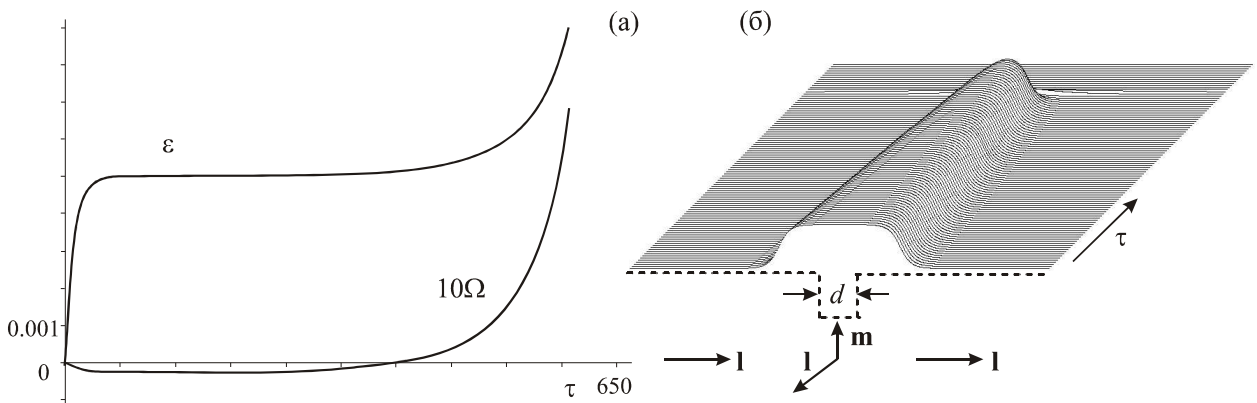
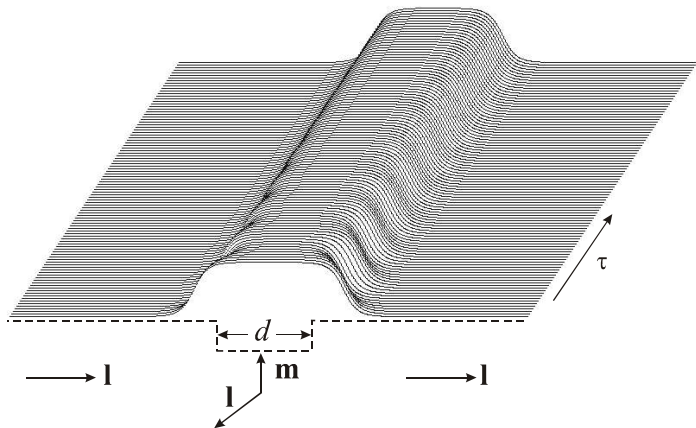


Рис. 9. Исчезновение первоначальной магнитной неоднородности в виде взаимодействующих 90-градусных межфазных стенок с разными топологическими зарядами.  $L(0)/\delta_0 = 17$ ,  $d = 5$ .

Рис. 10. Локализация домена новой фазы в области с пониженной анизотропией,  $d/\delta_0 = 12$ ,  $L(0)/\delta_0 = 17$ .



Показана сильная зависимость динамики зародыша новой фазы от его первоначальной ширины и параметров  $k$  и  $d$  плоского магнитного включения.

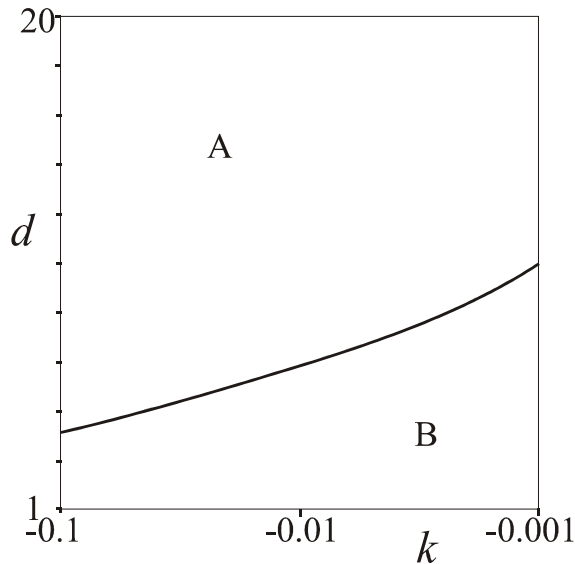


Рис. 11. Области закрепления на дефекте (А) и исчезновения (В) первоначальной магнитной неоднородности в виде взаимодействующих 90-градусных межфазных стенок с разными топологическими зарядами.  $L(0)/\delta_0 = 17$ .

На основании анализа результатов численных расчетов делается вывод о том, что в магнетике при наличии участков с пониженной анизотропией зародыш домена новой фазы может образоваться еще в недрах старой фазы до достижения системой температуры равновесного фазового перехода. Этим можно объяснить сосуществование как стеночного, так и флуктуационного механизмов образования зародышей слабоферромагнитной фазы внутри антиферромагнитной в  $DyFeO_3$  [11].

**В заключении** приведен перечень основных результатов и выводов, полученных автором в диссертационной работе.

В работе предложен эффективный приближенный метод изучения динамики двухсолитонных образований, основанный на исследовании динамической системы, описывающей эволюцию параметров солитонов уравнений Ландау-Лифшица-Гильберта и возмущенного уравнения синус-Гордона. В рамках предлагаемого метода исследована нелинейная динамика одномерных локализованных магнитных неоднородностей при перемагничивании и фазовом переходе первого рода в ферромагнетиках и антиферромагнетиках со слабым ферромагнетизмом, таких как ортоферриты. Показано, что динамика зародыша новой фазы, представляющего собой двухсолитонное образование, сильно зависит от начальной амплитуды, внешнего магнитного поля,

температуры, затухания, а в ферромагнетике – и от фактора качества материала.

1. Зародыш новой фазы в форме бризера с амплитудой, меньшей амплитуды критического зародыша, совершает нелинейные периодические колебания, которые при наличии диссипации являются затухающими. В случае, когда амплитуда первоначальной магнитной неоднородности больше амплитуды критического зародыша, происходит образование домена новой фазы (домена обратной намагниченности), ограниченного взаимодействующими доменными стенками. Причем в ферромагнетике в полях, больших поля Уокера, при этом имеют место блоховские осцилляции взаимодействующих доменных стенок относительно их общего центра.

2. Время образования уединенного домена перемагниченного состояния, ограниченного взаимодействующими доменными стенками с разными топологическими зарядами, увеличивается с ростом затухания и уменьшается с ростом поля.

3. Существует критическое значение параметра затухания, выше которого доменные стенки с разными топологическими зарядами в слабом ферромагнетике аннигилируют, испытывая многократное рассеяние, сопровождающееся сменой полярностей стенок, тогда как при меньших значениях аннигиляция происходит без смены полярности доменных стенок.

4. В слабых ферромагнетиках в магнитном поле доменные стенки разной полярности с одинаковыми топологическими зарядами при сближении образуют 360-градусную доменную стенку, в которой 180-градусные стенки в случае малых затуханий совершают затухающие колебания относительно их общего центра. Вблизи точки фазового перехода антиферромагнетизм ↔ слабый ферромагнетизм такие колебания имеют место, когда 90-градусные межфазные стенки с одинаковыми топологическими зарядами в результате изменения температуры образуют 180-градусную стенку.

5. Колебания зародыша новой фазы при фазовом переходе антиферромагнетизм ↔ слабый ферромагнетизм имеют место при начальной частоте,

большей некоторого критического значения, определяемого среднегеометрической величиной из обменного поля и поля анизотропии. Установлено, что зародыш новой фазы в виде локализованной магнитной неоднородности могут стать устойчивым образованием уже в недрах старой (стабильной) фазы при наличии в образце областей с пониженной магнитной анизотропией.

#### ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Рандошкин В.В., Червоненкис А.Я. Прикладная магнитооптика. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 320 с.
2. Кандаурова Г.С. Новые явления в низкочастотной динамике коллектива магнитных доменов // УФН. – 2002. – Т. 172. – № 10. – С. 1165–1187.
3. Косевич А.М., Иванов Б.А., Ковалев А.С. Нелинейные волны намагниченности. Динамические и топологические солитоны. – Киев: Наукова думка, 1983. – 192 с.
4. Островская Н.В., Попков А.Ф., Романов В.П. Устойчивость основного состояния  $360^\circ$  доменной границы одноосного ферромагнетика в магнитном поле // ФММ. – 1992. – №1. – С. 24–30.
5. Вонсовский С.В. Магнетизм. – М.: Наука, 1984. – 208 с.
6. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. К теории магнитной проницаемости ферромагнитных тел / В кн.: Ландау Л.Д. Собр. тр. – М.: Наука, 1969. – Т. 1. – С. 128–143.
7. Хуберт А. Теория доменных стенок в упорядоченных средах. М.: Мир, 1977. – 306 с.
8. Звездин А.К. О динамике доменных границ в слабых ферромагнетиках // Письма в ЖЭТФ. – 1979. – Т. 29. – вып. 10. – С. 605–610.
9. Барьяхтар В.Г., Иванов Б.А., Сукстанский А.Л. Нелинейные волны и динамика доменных границ в слабых ферромагнетиках // ЖЭТФ. – 1980. – Т. 78. – вып. 4. – С. 1509–1522.
10. Елеонский В.М., Кирова Н.Н., Кулагин Н.Е. О точных решениях уравнений Ландау–Лифшица для слабых ферромагнетиков // ЖЭТФ. – 1980. –

Т. 79. – вып. 1(7). – С. 321–332.

11. Гнатченко С.Л. Магнитнеоднородные состояния, образующиеся при фазовых переходах в многоподрешеточных магнетиках. Автореферат докторской диссертации. – Харьков: Ротапринт ФТИНТ АН УССР, 1991. 33 с.
12. Kivshar Yu.S., Malomed B.A. Dynamics of solitons in nearly integrable systems // *Rev. Mod. Phys.* – 1989. – V. 61. – №4. – P. 763–915.
13. Карпман В.И, Маслов Е.М., Соловьев В.В. Динамика бионов в длинных джозефсоновских контактах // *ЖЭТФ.* – 1983. – Т. 84. – вып. 1. – С. 289–300.
14. Kivshar Yu.S. Perturbation theory based on the Riemann problem for the Landau–Lifshitz equation // *Physica D.* – 1989. – V. 40. – P. 11–32.
15. Косевич А.М., Кившарь Ю.С. Эволюция солитон-антисолитонной пары под действием возмущений в системе, описываемой синус-уравнением Гордона // *ФНТ.* – 1982. – Т. 8. – №12. – С. 1270–1284.

#### СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

- A1. Shamsutdinov M.A., Shikhovtseva E.S., Lomakina I.Yu. Dynamics of a critical Nucleus in an antiferromagnet // *The Phys. Metals and Metallogr.* – 2003. – V. 95. – Suppl. 1. – P. S84–S88.
- A2. Шамсутдинов М.А., Ломакина И.Ю., Назаров В.Н. Динамика локализованных магнитных неоднородностей в слабых ферромагнетиках в магнитном поле при наличии затухания // *ФММ.* – 2005. – Т. 100. – №. 6. – С. 17–33.
- A3. Шамсутдинов М.А., Назаров В.Н., Ломакина И.Ю. Динамика зародыша перемагничивания в ферромагнетике // *ФММ.* – 2006. – Т. 101. – № 4. – С. 5–15.
- A4. Шамсутдинов М.А., Шиховцева Е.С., Ломакина И.Ю. Динамика зародышеобразования в антиферромагнетиках вблизи фазового перехода I рода // Сборник трудов V международного семинара «Магнитные фазовые переходы», посвященного памяти К.П. Белова (Махачкала, 11–14 сентября 2002). – Махачкала: Институт физики ДагНЦ РАН. – 2002. – С. 61–64.

- A5. Шамсутдинов М.А., Шиховцева Е.С., Ломакина И.Ю. Динамика взаимодействующих межфазных стенок в антиферромагнетиках // Вестник Башкирского университета. – 2003. – № 1. – С. 19–22.
- A6. Шамсутдинов М.А., Шиховцева Е.С., Ломакина И.Ю. Солитонный механизм зародышеобразования вблизи спин-переориентационного фазового перехода первого рода // Сборник трудов международного семинара «Выездная секция по проблемам магнетизма в магнитных пленках, малых частицах и наноструктурных объектах» (Астрахань, 10–14 сентября 2003). – Астрахань. – 2003. – С. 57–59.
- A7. Шамсутдинов М.А., Ломакина И.Ю. О солитонной модели зародыша перемагничивания в слабом ферромагнетике // Сборник трудов международной байкальской научной конференции «Магнитные материалы» (Иркутск, 19–22 сентября 2003). – Иркутск. – 2003 – С. 112–113.
- A8. Ломакина И.Ю. Нелинейные локализованные колебания намагниченности подрешеток в антиферромагнетиках вблизи точки фазового перехода первого рода // Сборник трудов всероссийской школы-семинара молодых ученых «Физика фазовых переходов», посвященной памяти Х.И. Амирханова (25–27 сентября 2003, Махачкала). – Махачкала: Институт физики ДагНЦ РАН. – 2003.– С. 9.
- A9. Shamsutdinov M.A., Lomakina I.Yu. On the interaction of two 180-degree domain walls in magnets in a magnetic field // Abstract book of Euro-Asian Symposium «Trends in magnetism» (Красноярск, 24–27 августа 2004). – Красноярск: Институт физики им. Л.В. Киренского СО РАН. – 2004. – С. 273.
- A10. Шамсутдинов М.А., Ломакина И.Ю., Шиховцева Е.С. Динамика двух взаимодействующих 180-градусных доменных стенок одинаковой полярности в магнитном поле // Труды международной конференции «Новые магнитные материалы микроэлектроники» НМММ 19 (Москва, 28 июня – 2 июля 2004). – М.: Изд-во МГУ. – 2004. – С. 153–155.
- A11. Shamsutdinov M.A., Lomakina I.Yu. Dynamic properties of localized magnetic inhomogeneities in weak ferromagnets // Book of Abstract of Moscow International Symposium of Magnetism (Moscow, June 25–30, 2005). – P.460–461.
- A12. Шамсутдинов М.А., Ломакина И.Ю., Назаров В.Н. Нелинейная динамика зародыша новой фазы вблизи фазового перехода I рода в

- магнетиках // Сборник трудов (Ч. II) 8-го Международного симпозиума «Фазовые превращения в твердых растворах и сплавах» ОМА–2005 (Сочи, 12–16 сентября 2005). – Ростов н/Д: Издательство Ростовского государственного педагогического университета. – 2005. – С. 187–190.
- A13. Shamsutdinov M.A., Nazarov V.N., Lomakina I.Yu. Dynamics of magnetization nucleus in ferromagnet // Abstracts of International conference «Functional Materials» IFCM'2005 (Ukraine, Crimea, Partenit, October 3–8, 2005). – P. 31.
- A14. Шамсутдинов М.А., Назаров В.Н., Ломакина И.Ю. Структура и динамика зародыша перемагничивания в ферромагнетике // Сборник трудов VII международного семинара «Магнитные фазовые переходы» (Махачкала, 22 ноября 2005) – Махачкала: Институт физики ДагНЦ РАН. – 2005. – С. 10–13.
- A15. Шамсутдинов М.А., Ломакина И.Ю. Динамика зародыша новой фазы вблизи фазового перехода первого рода в антиферромагнетиках с взаимодействием Дзялошинского // В кн. «Современные проблемы физики фазовых переходов и критических явлений». – Махачкала: Институт физики ДагНЦ РАН. – 2005. – С. 140–169.
- A16. Шамсутдинов М.А., Ломакина И.Ю., Назаров В.Н. Солитоны и динамика зародышей перемагничивания в магнетиках // Физика в Башкортостане. Выпуск 3. – Уфа: Гилем. – 2005. – С. 99–116.
- A17. Шамсутдинов М.А., Назаров В.Н., Ломакина И.Ю. Солитоны и динамика зародыша новой фазы в магнетиках // Лекции международной уфимской школы-конференции по математике и физике для студентов, аспирантов и молодых ученых (Уфа, 30 ноября – 6 декабря 2005) – Уфа: Издательство БашГУ. – 2005. – С. 83–111.