

на правах рукописи

**КАЮМОВ ИЛЬДАР РАИЛОВИЧ**

**ДИНАМИКА ЗАРОДЫШЕЙ ПЕРЕМАГНИЧИВАНИЯ  
В РОМБИЧЕСКИХ АНТИФЕРРОМАГНЕТИКАХ**

Специальность:

01.04.07 – Физика конденсированного состояния

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

УФА – 2011

Работа выполнена на кафедре теоретической физики ГОУ ВПО «Башкирский государственный университет».

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,  
профессор **Шамсутдинов Миниахат Асгатович**

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,  
профессор **Бучельников Василий Дмитриевич**

доктор физико-математических наук,  
профессор **Дорошенко Рюрик Александрович**

Ведущая организация: Институт физики Дагестанского научного центра  
РАН, г. Махачкала

Защита диссертации состоится «25» марта 2011 г. в 14.00 часов на заседании диссертационного совета ДМ 002.099.01 в Институте физики молекул и кристаллов УНЦ РАН по адресу г. Уфа, Проспект Октября, 71.

Отзывы направлять по адресу: 450075, г. Уфа, Проспект Октября, 151, ИФМК УНЦ РАН, диссертационный совет

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке ИФМК УНЦ РАН

Автореферат разослан «18» февраля 2011 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета

Ломакин Г.С.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Переходы спиновой переориентации весьма часто ответственны за аномальное поведение магнитных и других свойств магнитоупорядоченных веществ [1]. К настоящему времени особенности этих переходов наиболее хорошо изучены в ромбических антиферромагнетиках [1-5]. Экспериментальные исследования спин-переориентационных фазовых переходов в редкоземельных ортоферритах [1, 5] показывают, что в области спиновой переориентации возникает промежуточное (переходное) состояние, представляющее собой доменную структуру из чередующихся полосовых доменов равновесной конфигурации слабоферромагнитных и антиферромагнитных фаз.

Эволюцию зародыша новой фазы на этапе его зарождения (предпереходного состояния) условно можно разбить на два этапа. Первый этап соответствует собственно зарождению зародыша, а второй – предшествует переходу в промежуточное состояние.

Структура и динамика зародышей в виде доменов новой фазы после формирования равновесной конфигурации, изучена достаточно подробно как экспериментально, так и теоретически. Поведение же зародыша на этапе, предшествующем переходу в промежуточное состояние остается мало изученным. Это обусловлено двумя обстоятельствами. Во-первых, экспериментальное наблюдение предпереходного состояния является непростой задачей, требующей уникальной техники, поскольку установление равновесной конфигурации в межфазной границе происходит за очень короткое время (порядка нескольких микросекунд). Во-вторых, отсутствие модели, построенной на базе нелинейных уравнений магнитодинамики и адекватно описывающей процесс зарождения новой магнитной фазы в недрах исходной. С точки зрения фундаментальной науки исследование структуры и динамики уединенных магнитных неоднородностей вблизи точки фазового перехода представляет несомненный интерес для понимания природы предпереходных процессов, происходящих на этапе, предшествующем образованию зародыша в виде домена новой фазы.

Переходы спиновой переориентации можно рассматривать и с точки зрения физики процессов перемагничивания, если последние рассматривать как фазовый переход, происходящий путем образования и роста зародышей новой перемагниченной фазы [6]. Как известно, в процессе перемагничивания активную роль играют движущиеся навстречу друг другу межфазные/доменные границы [6, 7]. С точки зрения солитонной физики динамическая нуль-градусная

доменная граница представляет собой столкновение кинка и антикинка (двух межфазных/доменных границ одинаковой полярности). В динамическом режиме нуль-градусная доменная граница имеет дополнительные степени свободы, связанные с возможностью движения образующих ее межфазных/доменных границ относительно центра системы [8].

Структура и динамика двумерных магнитных неоднородностей, представляющих собой двухсолитонные образования в слабых ферромагнетиках была рассмотрена в отсутствие поля [9]. При наличии поля эволюция локализованных магнитных неоднородностей была рассмотрена только в одномерной модели [8]. Представляет интерес рассмотрение структуры и динамики двумерных локализованных магнитных неоднородностей в форме зародышей перемангничивания в слабых ферромагнетиках при наличии поля.

В настоящее время уделяется большое внимание управлению нелинейной динамикой различных систем с помощью периодических воздействий [10]. Известно, что генерация нелинейных колебаний в колебательной системе может происходить благодаря эффекту авторезонанса [10]. Влияние диссипации, присутствующей в реальных системах, на условия управляемой авторезонансной генерации нелинейных колебаний слабо исследовано.

Из всего вышеизложенного вытекает **актуальность** исследования структуры и динамики зародышей перемангничивания, а также условий управляемой авторезонансной генерации нелинейных колебаний магнитных неоднородностей в магнитоупорядоченных веществах. Знание механизмов процессов перемангничивания позволяют целенаправленно управлять свойствами магнитных материалов, непрерывно повышать уровень важнейших технических параметров.

**Целью** диссертационной работы является теоретическое исследование влияния внешнего магнитного поля и температуры на структуру и динамику зародышей перемангничивания в ромбических антиферромагнетиках вблизи и вдали от точки фазового перехода первого рода, а также исследование условий авторезонансной генерации и управления нелинейными колебаниями таких магнитных неоднородностей.

**Научная новизна.** 1) Исследована динамика двумерного зародыша новой стабильной слабоферромагнитной фазы, находящегося в недрах метастабильной фазы в области фазового перехода первого рода. 2) Изучена динамика одномерного зародыша новой стабильной слабоферромагнитной фазы, находяще-

гося в недрах метастабильной несимметричной фазы вблизи фазового перехода первого рода при наличии поля  $\mathbf{H} \parallel \mathbf{c}$ -оси. 3) Рассмотрена динамика двумерного зародыша перемангничивания в редкоземельных ортоферритах вдали от точки фазового перехода первого рода при наличии поля  $\mathbf{H} \parallel \mathbf{c}$ -оси. 4) Установлено, что в ромбических антиферромагнетиках возможна генерация, а также управление нелинейными колебаниями зародыша новой фазы и перемангничивания в режиме авторезонанса.

**На защиту выносятся следующие положения:**

- Эволюция зародыша новой стабильной слабоферромагнитной фазы  $G_x F_z$ , находящегося в недрах метастабильной фазы определяется скоростью его распространения, начальной амплитудой и близостью системы к точке фазового перехода первого рода.
- Возникновение периодической вдоль двумерного зародыша перемангничивания цепочки нуль-градусных солитонов происходит при «включении» внешнего магнитного поля  $\mathbf{H} \parallel \mathbf{c}$ -оси.
- Волна, описывающая прорастание клинообразного домена обратной намагниченности, может иметь скорость большую, чем предельная скорость стационарного движения доменной стенки.
- В слабых ферромагнетиках в режиме авторезонанса могут существовать высокоамплитудные пульсационные колебания доменных границ.

**Научная и практическая значимость работы.** Результаты диссертации носят теоретический характер, расширяют существующие представления о динамике зародышей новой фазы в процессах перемангничивания, а также углубляют представления о возможностях генерации и управления нелинейной динамикой колебательных систем на примере доменных границ в ромбических антиферромагнетиках со слабым ферромагнетизмом. В силу привлекательности исследуемых материалов в использовании различных магнитоэлектронных устройств, полученные результаты могут быть использованы для оптимизации их технических характеристик.

**Достоверность** полученных результатов и выводов определяется использованием современных методов математической и теоретической физики, а также физики магнитных явлений, совпадением результатов в предельных случаях с ранее известными.

**Апробация работы.** Результаты, изложенные в диссертации, докладывались и обсуждались на Международной конференции «Фазовые переходы, критические и нелинейные явления в конденсированных средах» (Махачкала – 2010); 13-ом Международном симпозиуме «Упорядочение в минералах и сплавах» ОМА-13 (Ростов-на-Дону – 2010); Международном молодежном научном форуме «ЛОМОНОСОВ-2010» (Москва – 2010); 12-ом международном симпозиуме «Порядок, беспорядок и свойства оксидов» ОДРО-12 (Ростов-на-Дону – 2009); XX международной школе-семинаре «Новые магнитные материалы микроэлектроники» (Москва – 2006); Международной научно-практической конференции «Роль классических университетов в формировании инновационной среды регионов» (Уфа – 2009); Международных, Всероссийских и региональных уфимских зимних школах-конференциях по математике и физике для студентов, аспирантов и молодых ученых (Уфа – 2005 - 2010); 12-14 Всероссийских научных конференций студентов-физиков и молодых ученых (Новосибирск – 2006, Ростов-на-Дону – Таганрог – 2007, Уфа - 2008); Всероссийской конференции студентов, аспирантов и молодых ученых по физике (Владивосток – 2010); Межрегиональной научно-технической конференции памяти профессора Валеева К.А. «Актуальные проблемы естественных и технических наук» (Уфа – 2009); VIII Молодёжном школе-семинаре по проблемам физики конденсированного состояния вещества (Екатеринбург – 2007); студенческих научно-практических конференциях по физике (Уфа – 2005, 2006).

Часть исследований, представленных в диссертации, выполнялись в рамках гранта Фонда содействия отечественной науке «Лучшие аспиранты РАН» за 2010 г.

**Публикации и личный вклад автора.** Основные результаты опубликованы в 14 печатных работах, включающих 4 статьи в центральной печати. Общий список основных публикаций автора приведен в конце диссертации. В совместных публикациях по теме диссертационной работы личный вклад автора заключается в участии в постановке задач, в проведении всех численных и аналитических расчетов, в обсуждении и интерпретации полученных результатов и написании статей.

**Структура и объем диссертационной работы.** Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы. Работа содержит 163 страницы, включая 60 рисунков и список цитированной литературы из 126 наименований.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** дано обоснование темы диссертации, показана актуальность решаемых задач, выявлена цель диссертации, их научная и практическая ценность, перечислены основные результаты, полученные в работе.

**Первая глава** является обзорной, в ней приведены общие краткие сведения о магнитных фазовых переходах и о некоторых явлениях, возникающих в области фазового перехода антиферромагнетизм-ферромагнетизм, процессах перемангничивания. Также в главе приводится краткий анализ предшествующих работ по исследованию динамики локализованных магнитных неоднородностей и авторезонансной генерации и управления нелинейными колебаниями в магнитоупорядоченных материалах.

**Во второй главе** в модели двухподрешеточного антиферромагнетика для редкоземельного ортоферрита исследована нелинейная динамика двумерного зародыша устойчивой слабоферромагнитной фазы  $G_x F_z$ , находящегося в недрах метастабильной антиферромагнитной фазы  $G_y$  вблизи точки фазового перехода первого рода. В качестве модели зародыша рассматривается область неоднородности ограниченная взаимодействующими 90-градусными межфазными границами, которые моделируются как двухсолитонные образования существующие в недрах исходной фазы. Исходили из функции Лагранжа слабо ферромагнетика ромбической симметрии [3, 4]

$$L = \frac{\chi_{\perp}}{2\gamma^2} \dot{\mathbf{i}}^2 - \frac{2\chi_{\perp}}{\gamma} \mathbf{H}[\mathbf{i}\dot{\mathbf{i}}] - \frac{1}{2} A \left[ \left( \frac{\partial \mathbf{I}}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial \mathbf{I}}{\partial y} \right)^2 + \left( \frac{\partial \mathbf{I}}{\partial z} \right)^2 \right] - F_a + M_c l_x H_z, \quad (1)$$

где  $F_a$  - энергия магнитной анизотропии определяется следующим образом

$$F_a = -\frac{1}{2} \tilde{K}_{ab} l_x^2 - \frac{1}{2} \tilde{K}_{bc} l_z^2 + \frac{1}{4} \left( K_2^{(11)} l_x^4 + K_2^{(13)} l_x^2 l_z^2 + K_2^{(33)} l_z^4 \right). \quad (2)$$

Здесь  $\chi_{\perp} = M_0 / H_E$  - перпендикулярная восприимчивость,  $H_E$  - обменное поле;  $\gamma$  - гиромагнитное отношение,  $A$  - константа неоднородного обменного взаимодействия,  $\tilde{K}_{ab} = K_{ab} - \chi_{\perp} H_y^2 / 2 = -K_1$ ,  $\tilde{K}_{bc} = K_{bc} - \chi_{\perp} H_z^2 / 2$ ,  $K_2^{(ij)}$  - эффективные константы магнитной анизотропии;  $M_c = M_0 H_D / H_E$  - слабоферромагнитный момент вдоль  $\mathbf{c}$ -оси,  $H_D$  - поле Дзялошинского.

Уравнение, описывающее динамику магнитных неоднородностей вблизи перехода типа Морина в магнитном поле  $\mathbf{H} = (0, H_y, 0)$ , имеет вид:

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial t^2} - \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} - \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} + \frac{1}{4} \sin(4\theta) = -\frac{1}{2} g \sin(2\theta). \quad (3)$$

В (3):  $\theta$  - угол между **b**-осью кристалла и вектором **l** в  $(ab)$ -плоскости;  $g = \chi_{\perp} \left( H_y^2 - (H_y^{\text{cr}})^2 \right) / (2|K_2|)$ , где  $H_y^{\text{cr}} = \left\{ 2(|K_2| - |K_{ab}|) / \chi_{\perp} \right\}^{1/2}$ . Параметр  $g$  - характеризует близость системы к точке фазового перехода первого рода.

Одно из двухсолитонных решений уравнения (3) можно представить в виде:

$$\text{tg}^2 \theta = \frac{1 - \Omega}{\Omega \mp B^2} \cdot \frac{1}{\text{ch}^2(x\sqrt{1 - \Omega})}, \quad (\pm B^2 < \Omega < 1). \quad (4)$$

В (4) параметры  $\Omega$  и  $B$  являются в общем случае ( $g \neq 0$ ) неизвестными функциями  $g$  и переменной  $\xi$ ; для медленных волн  $\xi = (y - Vt) / \sqrt{1 - V^2}$ , для быстрых волн  $\xi = (y - Vt) / \sqrt{V^2 - 1}$ . Верхний знак в главе 2 соответствует медленным волнам, а нижний знак - быстрым. Для определения зависимостей  $\Omega = \Omega(\xi, g)$  и  $B = B(\xi, g)$  получена следующая система:

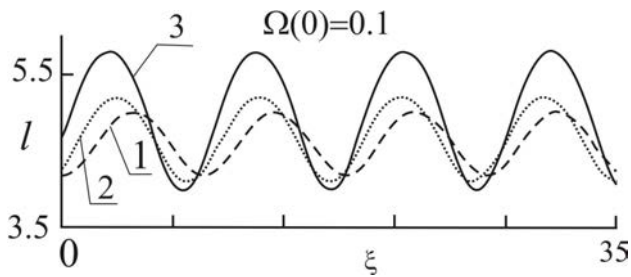
$$\begin{cases} \Omega_{\xi} = \pm \frac{2gB(a + J(a))}{1 + a}, \\ B_{\xi} = \Omega \mp B^2 + g, \end{cases} \quad (5)$$

где

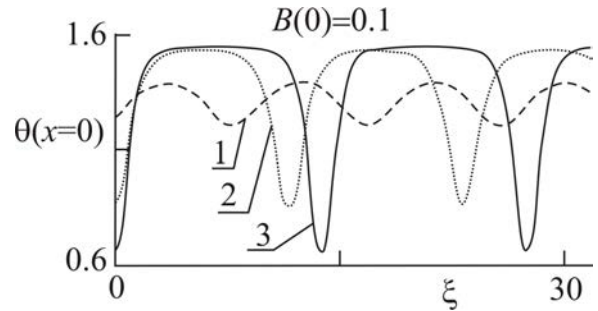
$$J(a) = \sqrt{\frac{a}{1+a}} \text{Arth} \sqrt{\frac{a}{1+a}}, \quad a = \frac{1 - \Omega}{\Omega \mp B^2}.$$

Численный анализ уравнений (4) - (5) позволил установить, что в случае медленных волн имеют место распространение периодических пульсаций ширины  $l$  (рис. 1) и амплитуды  $\theta(x=0)$  (рис. 2) зародыша стабильной слабоферромагнитной фазы в недрах метастабильной антиферромагнитной фазы, зародыш «дышит». При удалении от точки фазового перехода «дыхание» зародыша учащается. В случае быстрых периодических волн при докритической амплитуде начального зародыша новой фазы его распространение сопровождается нелинейными колебаниями векторов ферро- и антиферромагнетизма (см. рис. 3 - 4, где  $B = -\omega \text{ctg} \Phi(\xi)$ ,  $\Omega = \omega^2(\xi)$ ). Если начальная амплитуда зародыша больше некоторой критической, то в недрах фазы  $G_y$  происходит клинообразное прораствание зародыша фазы  $G_x F_z$ . В этом случае быстрая (тахинная) мода осуществляет фазовый переход, разрушая старую фазу.

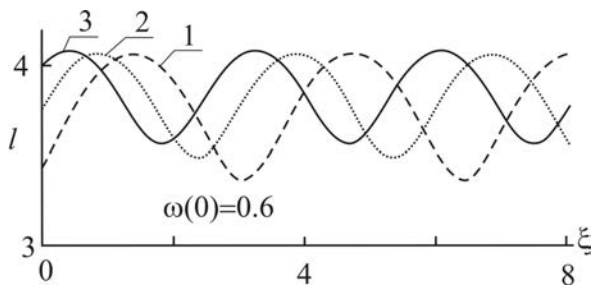




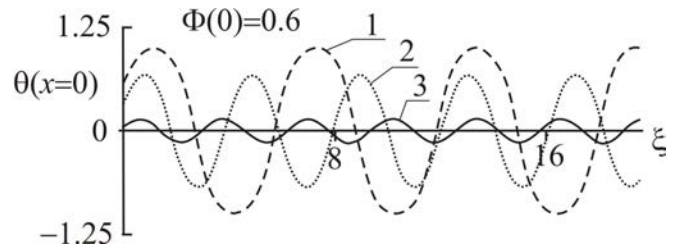
**Рис. 1.** Зависимость ширины  $l$  зародыша новой фазы от  $\xi$  при  $g = -0.06$  для: 1 -  $B(0) = 0$ , 2 -  $B(0) = 0.1$ , 3 -  $B(0) = 0.2$ .



**Рис. 2.** Зависимость амплитуды  $\theta(x=0)$  в центре зародыша фазы  $G_x F_z$  от  $\xi$  при  $g = -0.06$  для: 1 -  $\Omega(0) = 0.1$ , 2 -  $\Omega(0) = 0.4$ , 3 -  $\Omega(0) = 0.6$ .



**Рис. 3.** Зависимость ширины  $l$  зародыша новой фазы от  $\xi$  для быстрой периодической волны при  $g = -0.06$  для 1 -  $\Phi(0) = 0.4$ , 2 -  $\Phi(0) = 0.8$ , 3 -  $\Phi(0) = 1.2$ .



**Рис. 4.** Зависимость амплитуды  $\theta(x=0)$  в центре зародыша фазы  $G_x F_z$  от  $\xi$  для быстрой периодической волны при  $g = -0.06$  для 1 -  $\omega(0) = 0.6$ , 2 -  $\omega(0) = 0.8$ , 3 -  $\omega(0) = 0.99$ .

**В третьей главе** рассмотрена структура и динамика зародыша стабильной слабоферромагнитной фазы  $G_x F_z$ , находящегося в недрах метастабильной несимметричной (угловой) фазы  $G_y G_x F_z$  в магнитном поле  $\mathbf{H} \parallel \mathbf{c}$ -оси кристалла редкоземельного ортоферрита в области фазового перехода первого рода. Исследование динамики проводилось исходя из уравнения движения намагниченностей:

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial t^2} - \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} - \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} + \frac{1}{4} \sin(4\theta) = -\frac{g}{2} \sin(2\theta) + \frac{h}{2} \cos \theta. \quad (6)$$

Здесь  $g = (K_1 + K_2)/|K_2|$ ,  $h = 2M_c H_z / |K_2|$ . Уравнение (6) получено с использованием функции Лагранжа (1), и описывает эволюцию двумерных зародышей новой фазы в недрах исходной фазы. Исходя из плотности энергии рассматри-

ваемого редкоземельного ортоферрита определена форма критического зародыша новой фазы, который достаточен, чтобы инициировать переход всей системы из метастабильного ( $G_y G_x F_z$ ) в абсолютно устойчивое однородное состояние ( $G_x F_z$ ) в массивном бездефектном кристалле. Показано, что с увеличением магнитного поля при заданной температуре амплитуда критического зародыша уменьшается.

Изучение динамики зародыша слабоферромагнитной фазы  $G_x F_z$  находящегося в недрах несимметричной фазы  $G_y G_x F_z$  в магнитном поле  $\mathbf{H} \parallel \mathbf{c}$ -оси сведено к решению системы из двух нелинейных обыкновенных дифференциальных уравнений первого порядка, описывающей эволюцию параметров двухсолитонных решений уравнения (6). Исследование показывает, что в одномерной модели зародыша решение уравнения (6) имеет вид:

$$\theta = 4 \arctg \left( \sqrt{\frac{1-\Omega}{\Omega+\varepsilon^2}} \cdot \operatorname{sech}(x\sqrt{1-\Omega}) \right) + \frac{h}{2}, \quad -\varepsilon^2 < \Omega < 1, \quad (7)$$

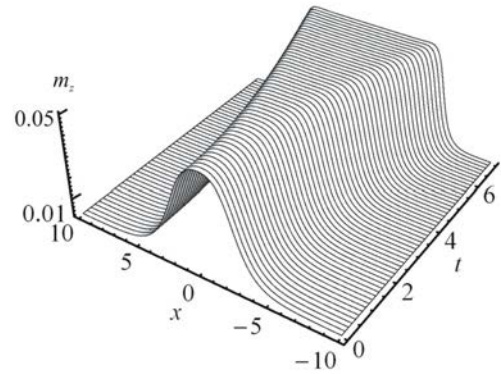
где зависимость параметров  $\Omega = \Omega(t, g, h)$ ,  $\varepsilon = \varepsilon(t, g, h)$  определяется из системы:

$$\begin{cases} \Omega_t = -\frac{2g\varepsilon(1-\Omega)}{1+\varepsilon^2} [1 + \Gamma_1^{(1d)}(\Omega, \varepsilon)] + 2h\varepsilon \sqrt{\frac{1-\Omega}{1+\varepsilon^2}} \Gamma_2^{(1d)}(\Omega, \varepsilon), \\ \varepsilon_t = \Omega + \varepsilon^2 + g - h \frac{\Gamma_2^{(1d)}(\Omega, \varepsilon)}{1 + \Gamma_1^{(1d)}(\Omega, \varepsilon)} \sqrt{\frac{1+\varepsilon^2}{1-\Omega}}. \end{cases} \quad (8)$$

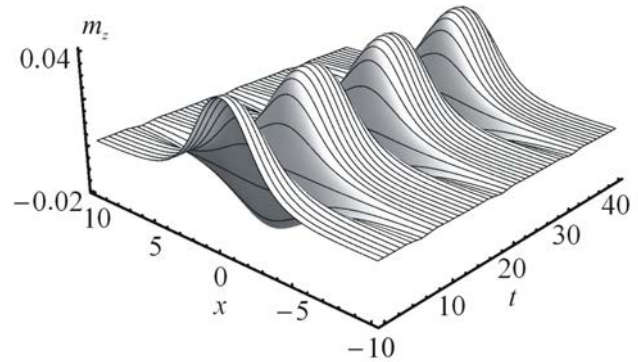
Здесь  $\Gamma_1^{(1d)}(\Omega, \varepsilon)$ ,  $\Gamma_2^{(1d)}(\Omega, \varepsilon)$  не приведены из-за их громоздкости. Анализ уравнений (7) - (8) позволил установить, что при данных значениях температуры и поля в случае начальной амплитуды одномерного зародыша больше критической, он распадается на две удаляющиеся друг от друга межфазные стенки, с образованием домена фазы  $G_x F_z$  (рис. 5). В случае начальной амплитуды меньше критической, зародыш слабоферромагнитной фазы  $G_x F_z$  совершает нелинейные колебания в виде бризера (рис. 6). В двумерной модели зародыша новой фазы двухсолитонное решение уравнения (6) по виду совпадает с (7), где теперь нужно сделать замены:  $t \rightarrow \xi = (y - Vt)/\sqrt{1-V^2}$ ,  $\varepsilon^2 \rightarrow -D^2$ . Уравнения для определения зависимостей  $\Omega = \Omega(\xi, g, h)$  и  $D = D(\xi, g, h)$  получаются из (8) путем указанных замен, а также в первом уравнении системы (8):  $\varepsilon \rightarrow -D$ . Исследование показало, что распространение нелинейных волн колебаний вектора

$\mathbf{m}$  вдоль двумерного зародыша стабильной фазы  $G_x F_z$  сопровождается пульсациями ширины и амплитуды зародыша новой фазы (рис. 7).

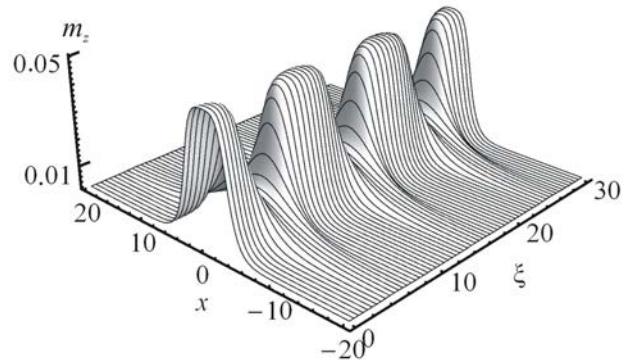
**Рис. 5.** Распад одномерного зародыша новой слабоферромагнитной фазы  $G_x F_z$  с образованием домена фазы  $G_x F_z$  при  $h = 0.1$ ,  $g = -0.05$ ,  $\Omega(t = 0) = 0.1$ ,  $\varepsilon(t = 0) = 0$ .



**Рис. 6.** Нелинейные колебания одномерного зародыша новой слабоферромагнитной фазы  $G_x F_z$  при  $h = 0.1$ ,  $g = -0.05$ ,  $\Omega(t = 0) = 0.4$ ,  $\varepsilon(t = 0) = 0$ .



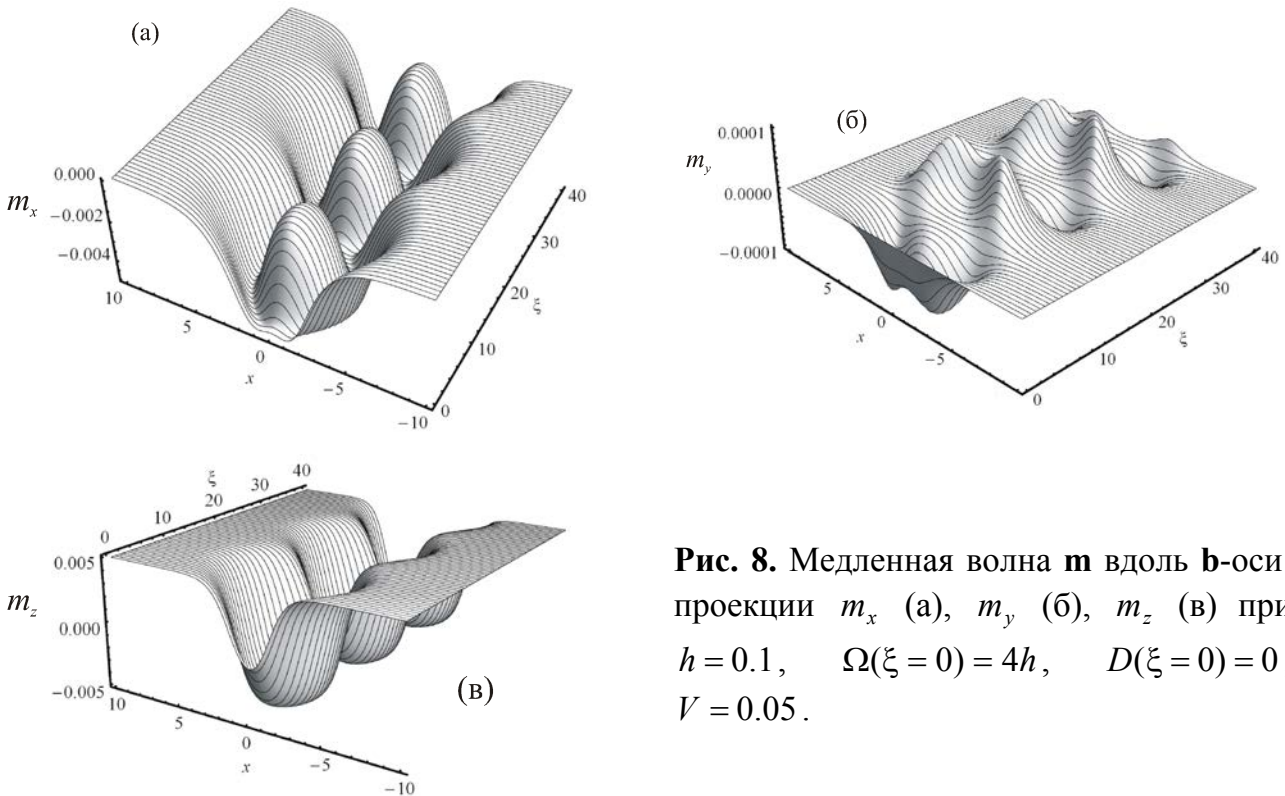
**Рис. 7.** Периодические волны вдоль двумерного зародыша новой слабоферромагнитной фазы  $G_x F_z$  в направлении  $\mathbf{b}$ -оси кристалла при  $h = 0.1$ ,  $g = -0.05$ ,  $V = 0.5$ ,  $\Omega(\xi = 0) = 0.017$ ,  $D(\xi = 0) = 0$ .



**В четвертой главе** теоретически исследовано влияние внешнего магнитного поля  $\mathbf{H} = (0, 0, -H)$  на динамику локализованных магнитных неоднородностей типа зародыша перемагничивания и взаимодействующих 180-градусных доменных стенок одинаковой полярности в редкоземельных ортоферритах исходя из уравнения (3), в котором нужно сделать замены:  $4\theta \rightarrow u$ ,  $g \rightarrow -h = -M_c H / K_{ac}$ . Рассмотрены медленные и быстрые волны намагниченности, распространяющиеся вдоль зародыша перемагничивания. Скорость распространения медленных волн меньше предельной скорости стационарного

движения доменных стенок вдоль **a**-оси. Для быстрых волн скорость распространения вдоль **b**-оси может быть как больше, так и меньше предельной скорости вдоль **a**-оси.

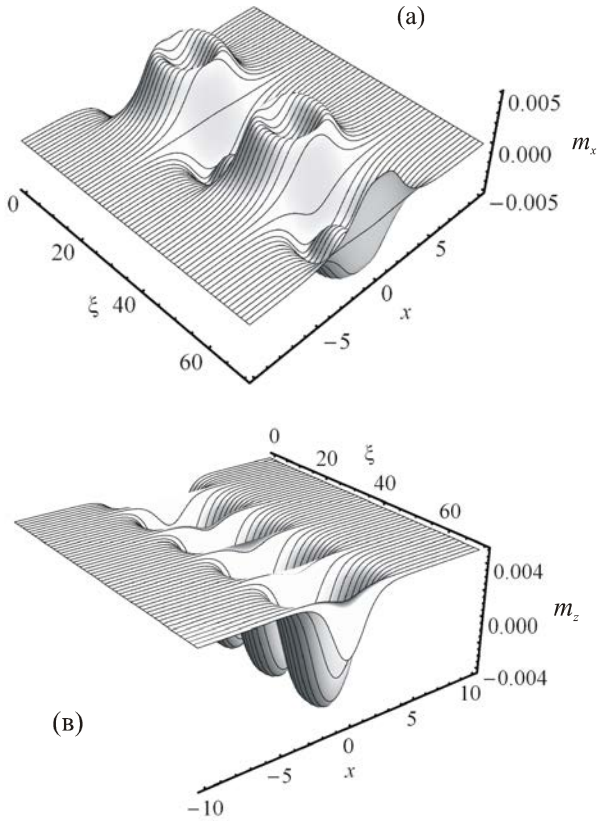
В случае медленных волн показано, что «включение» внешнего магнитного поля приводит к возникновению в системе стабильной периодической вдоль зародыша перемагничивания цепочки двумерных нуль-градусных солитонов (рис. 8). Этим солитонам можно сопоставить распространение периодических пульсаций ширины и амплитуды зародыша стабильной фазы, находящегося в недрах метастабильной родительской фазы. С увеличением внешнего магнитного поля частота этих пульсаций возрастает. В случае быстрых волн, в зависимости от начальной амплитуды зародыша, могут наблюдаться два сценария эволюции зародыша.



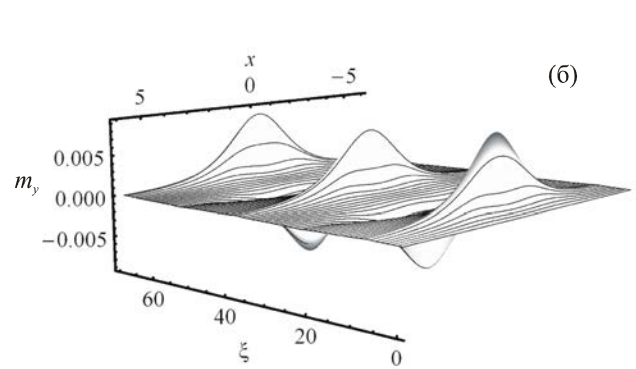
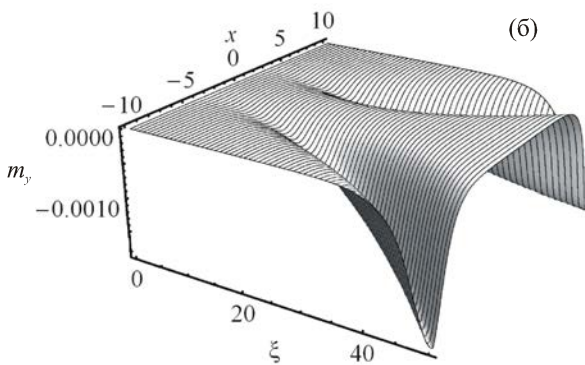
**Рис. 8.** Медленная волна  $\mathbf{m}$  вдоль **b**-оси: проекции  $m_x$  (а),  $m_y$  (б),  $m_z$  (в) при  $h = 0.1$ ,  $\Omega(\xi = 0) = 4h$ ,  $D(\xi = 0) = 0$ ;  $V = 0.05$ .

Один сценарий реализуется при начальной амплитуде, меньшей некоторой критической. Он сопровождается распространением бризероподобных колебаний векторов  $\mathbf{m}$  и  $\mathbf{l}$ , которые можно интерпретировать как пересечение двух доменных стенок, периодически меняющих свою полярность (рис. 9). В рамках другого сценария, когда начальная амплитуда больше критической, распространяется уединенная волна, которой можно сопоставить клинообразное прорастание

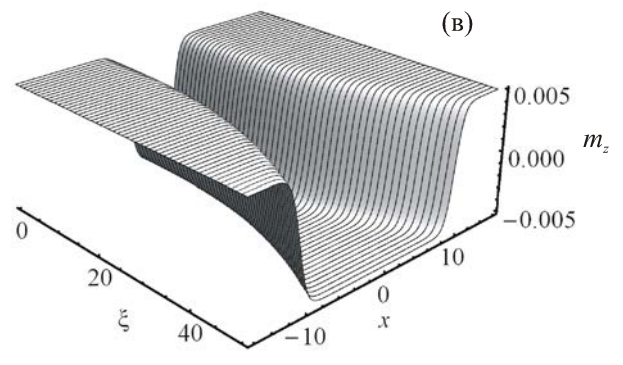
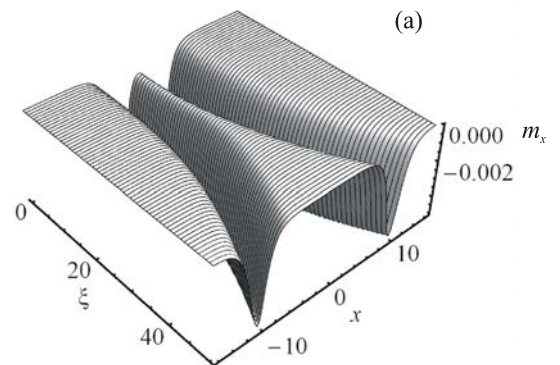
домена обратной намагниченности - домена перемангниченной фазы вдоль зародыша (рис. 10).



**Рис. 10.** Проращение домена обратной намагниченности  $\mathbf{m}$  вдоль  $\mathbf{b}$ -оси: проекции  $m_x$  (а),  $m_y$  (б),  $m_z$  (в) при  $h = 0.01$ ,  $\Omega(\xi = 0) = 0.8h$ ,  $G(\xi = 0) = 0$ ;  $V = 15$ .



**Рис. 9.** Периодическая волна распространения бризероподобных колебаний  $\mathbf{m}$ : проекции  $m_x$  (а),  $m_y$  (б),  $m_z$  (в);  $h = 0.06$ ,  $\omega(\xi = 0) = \sqrt{1.4h}$ ,  $\Phi(\xi = 0) = \pi/2$ ;  $V = 2.5$ .

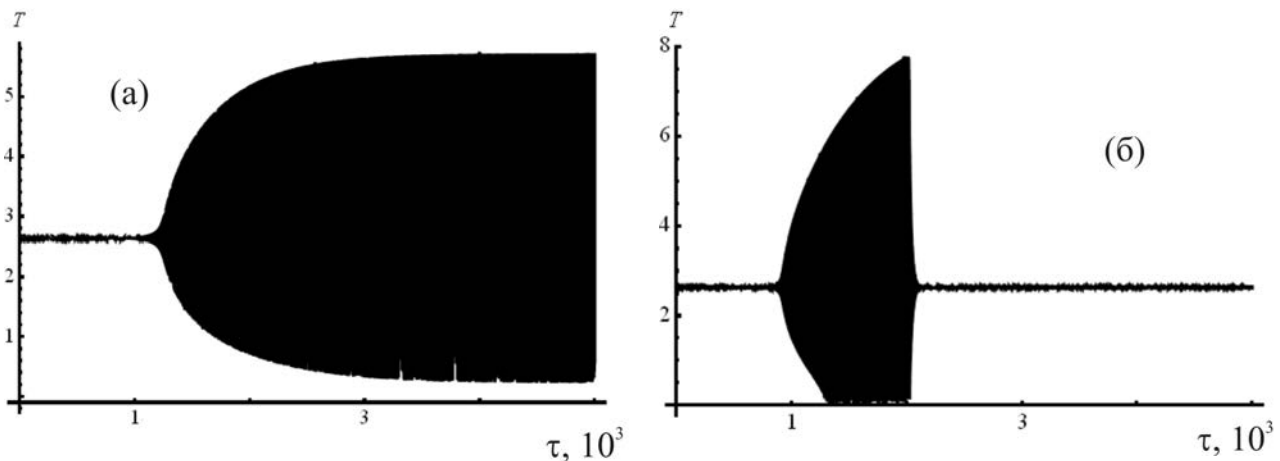


**Пятая глава** посвящена исследованию генерации высокоамплитудных нелинейных колебаний 360-градусной доменной стенки переменным полем малой амплитуды, а также выявлению возможности управления нелинейными пульсационными колебаниями 180-градусной доменной стенки в магнитном поле  $\mathbf{H} \parallel \mathbf{b}$ -оси кристалла в слабых ферромагнетиках.

**В разделе 5.1** исходя из уравнения, описывающего эволюцию одномерных магнитных неоднородностей, движущихся вдоль  $\mathbf{a}$ -оси [8]

$$u_{tt} - u_{xx} + \sin u = 2h \sin \frac{u}{2} - \beta u_t, \quad (9)$$

построена модель, описывающая генерацию ширины ( $T$ ) 360-градусной доменной границы переменным внешним магнитным полем  $h(t) = -h_0 - h_{10}(1 + pt) \sin \Phi(t)$  малой амплитуды  $h_0, h_{10} \ll 1$  с учетом затухания  $\beta$ . В (9):  $u = 2\theta(x, t)$ , где  $\theta$  - угол между  $\mathbf{a}$ -осью кристалла и вектором  $\mathbf{l}$  в  $(ac)$ -плоскости. Рассмотрены решения уравнения движения (9), описывающие возрастание и убывание ширины 360-градусной доменной границы. Показано, что при модуляции частоты поля накачки по закону гиперболического тангенса пульсационные колебания 360-градусной стенки можно вывести на высокоамплитудный стационарный режим (рис. 11). При модуляции частоты накачки по закону гармонического синуса возможно эффективное управление динамикой доменной стенки.



**Рис. 11.** Колебания ширины 360-градусной доменной границы в случае гиперболического закона модуляции частоты поля накачки: (а) - высокоамплитудный стационарный режим, (б) - режим колебаний, при котором происходит срыв амплитуды.

**В разделе 5.2** рассмотрены вынужденные пульсационные колебания 180-градусной доменной границы в переменном магнитном поле

$H = H_0 - H_1 \sin \Phi(t)$  исходя из уравнения (9), где  $u = 4\theta$ ,  $h = -g = -(K_1 + K_2)/|K_2|$ ,  $K_i$  - константы магнитной анизотропии. Найденные решения показывают возможность существования в ромбических антиферромагнетиках высокоамплитудных нелинейных пульсационных колебаний двух сильно взаимодействующих 90-градусных межфазных стенок относительно центра образованной ими 180-градусной доменной границы.

При модуляции частоты поля накачки по линейному закону, амплитуда пульсационных колебаний 180-градусной доменной стенки возрастает со временем вплоть до того момента, когда происходит ее срыв. При изменении частоты поля накачки по закону гиперболического тангенса колебания двух 90-градусных межфазных стенок относительно центра образованной ими 180-градусной доменной границы можно вывести на высокоамплитудный стационарный режим. В случае гармонической модуляции частоты поля накачки происходит периодическое нарастание и последующий срыв амплитуды колебаний ширины 180-градусной доменной границы. Найденны зависимости характерных расстояний 180-градусной доменной стенки от параметра, характеризующего амплитуду модуляции частоты внешнего поля накачки.

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

#### **Основные результаты и выводы диссертационной работы:**

- Построена нелинейная динамика двумерного зародыша устойчивой слабоферромагнитной фазы  $G_x F_z$  в недрах метастабильной антиферромагнитной фазы  $G_y$ . Показано, что колебания векторов  $\mathbf{m}$  и  $\mathbf{l}$  вдоль  $\mathbf{b}$ -оси кристалла в зародыше слабоферромагнитной фазы могут распространяться со скоростью как меньшей, так и большей предельной скорости, равной минимальной скорости спиновых волн на линейном участке их закона дисперсии. Установлено, что в случае медленных волн зародыш новой фазы «дышит». В случае быстрых волн в зависимости от начальных условий возможно либо распространение периодических волн колебаний намагниченностей, либо клинообразное прорастание зародыша фазы  $G_x F_z$  вдоль  $\mathbf{b}$ -оси кристалла, при котором быстрая (тахсионная) мода осуществляет фазовый переход, разрушая старую фазу.
- В редкоземельных ортоферритах в магнитном поле  $\mathbf{H} \parallel \mathbf{c}$ -оси изучена структура и динамика одно- и двумерного зародыша новой стабильной

слабоферромагнитной фазы  $G_x F_z$ , находящегося в недрах метастабильной несимметричной (угловой) фазы  $G_y G_x F_z$ . Определена форма критического зародыша новой фазы, который достаточен, чтобы инициировать переход всей системы из метастабильного ( $G_y G_x F_z$ ) в абсолютно устойчивое однородное состояние ( $G_x F_z$ ) в массивном бездефектном кристалле. В зависимости от скорости распространения волн намагниченности и начальной амплитуды зародыша показаны различные режимы его колебаний.

- В слабых ферромагнетиках предсказано существование медленных и быстрых волн колебаний векторов намагниченности, распространяющихся вдоль зародыша перемагничивания. Показано, что в случае медленных волн «включение» внешнего магнитного поля приводит к возникновению в системе стабильной периодической вдоль зародыша перемагничивания цепочки двумерных нуль-градусных солитонов. В случае быстрых волн, в зависимости от начальной амплитуды зародыша, могут наблюдаться два сценария эволюции зародыша: 1) бризероподобные колебания параметров порядка и 2) распространение уединенной волны, которой можно сопоставить клинообразное прорастание домена обратной намагниченности вдоль зародыша.
- Исследованы условия возбуждения нелинейных пульсационных колебаний 360- и 180-градусной доменной границы в режиме авторезонанса в ромбических антиферромагнетиках. Определены условия, при которых достигается динамическая стабильность и полное управление нелинейной динамикой частотно-модулированными переменными полями небольшой амплитуды. Показано, что форма установившихся нелинейных колебаний доменных границ определяется видом функции, задающей модуляцию частоты поля накачки.

### ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Белов, К. П. Ориентационные переходы в редкоземельных магнетиках: монография / К. П. Белов, А. К. Звездин, А. М. Кадомцева, Р. З. Левитин. М.: Наука, 1979. 318 с.
2. Бучельников, В. Д. Магнитоакустика редкоземельных ортоферритов / В. Д. Бучельников, Н. К. Даньшин, Л. Т. Цымбал, В. Г. Шавров // УФН. 1996. Т. 166, №6. С. 585-612.



3. Звездин, А. К. О динамике доменных границ в слабых ферромагнетиках / А. К. Звездин // Письма в ЖЭТФ. 1979. Т. 29, вып. 10. С. 605-610.
4. Барьяхтар, В. Г. Нелинейные волны и динамика доменных границ в слабых ферромагнетиках / В. Г. Барьяхтар, Б. А. Иванов, А. Л. Сукстанский // Журнал экспериментальной и теоретической физики. 1980. Т. 78, вып. 4. С. 1509-1522.
5. Гнатченко, С. Л. Визуальное и магнитооптическое исследование сосуществования магнитных фаз в окрестности температуры Морина в ортоферрите диспрозия / С. Л. Гнатченко, Н. Ф. Харченко, Р. Г. Шимчак // Известия АН СССР. Серия физическая. 1980. Т. 44, №7. С. 1460-1472.
6. Вонсовский, С. В. Магнетизм / С. В. Вонсовский. М.: Наука, 1971. 1032 с.
7. Кандаурова, Г. С. Новые явления в низкочастотной динамике коллектива магнитных доменов / Г. С. Кандаурова // УФН. 2002. Т. 172, № 10. С. 1165-1187.
8. Шамсутдинов, М. А. Ферро- и антиферромагнитодинамика. Нелинейные колебания, волны и солитоны: монография / М. А. Шамсутдинов, И. Ю. Ломакина, В. Н. Назаров, А. Т. Харисов, Д. М. Шамсутдинов. М.: Наука, 2009. 456 с.
9. Борисов, А. Б. Вихри и двумерные солитоны в легкоплоскостных магнетиках / А. Б. Борисов, А. П. Танкеев, А. Г. Шагалов // ФММ. 1985. Т. 60, № 3. С. 467-479.
10. Калякин, Л. А. Асимптотический анализ моделей авторезонанса / Л. А. Калякин // УМН. 2008. Т. 63, № 5. С. 3-72.

### СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

- A1. Шамсутдинов, М. А. Нелинейные локализованные волны намагниченности в недрах метастабильной фазы магнетика / М. А. Шамсутдинов, А. П. Танкеев, **И. Р. Каюмов** // Известия РАН. Серия физическая. 2007. Т. 71, №11. С. 1548-1550.
- A2. Шамсутдинов, М. А. Динамика зародыша перемагничивания в ромбических антиферромагнетиках со слабым ферромагнетизмом / М. А. Шамсутдинов, А. П. Танкеев, **И. Р. Каюмов** // Физика металлов и металловедение. 2011. Т. 11, №1. С. 27-39.
- A3. Каюмов, И. Р. Структура и динамика зародыша новой фазы в редкоземельных ортоферритах в магнитном поле в области перехода типа Морина / **И. Р. Каюмов**, М. А. Шамсутдинов, А. П. Танкеев // Вестник Челябинско-

го государственного университета. Физика. 2010. Вып. 8, №24 (205). С. 42-49.

- A4. Шамсутдинов, М. А. Динамика зародыша новой фазы в редкоземельных ортоферритах с переходами типа Морина / М. А. Шамсутдинов, А. П. Танкеев, **И. Р. Каюмов** // Вестник Башкирского университета. 2010. Т. 15, №4. С. 1107-1111.
- A5. Каюмов, И. Р. Структура двумерного зародыша перемангничивания / **И. Р. Каюмов** // Сборник трудов Международной уфимской зимней школы-конференции по математике и физике для студентов, аспирантов и молодых ученых: Том II, физика. Уфа: РИО БашГУ. 2005. С. 264-266.
- A6. Шамсутдинов, М. А. Нелинейные локализованные волны намагниченности в недрах метастабильной фазы магнетика / М. А. Шамсутдинов, А. П. Танкеев, **И. Р. Каюмов** // Сборник трудов XX Международной школы-семинара НМММ (12 июня – 16 июня 2006 г., Москва). М.: МГУ. 2006. С. 85-87.
- A7. Каюмов, И. Р. Структура двумерных ноль- и 360-градусных доменных стенок / **И. Р. Каюмов**, А. П. Танкеев, М. А. Шамсутдинов // Сборник научных трудов «Структурные и динамические эффекты в упорядоченных средах». Уфа: РИЦ БашГУ. 2006. С. 94-100.
- A8. Каюмов, И. Р. Двумерные неоднородности в магнетиках / **И. Р. Каюмов** // Сборник трудов Всероссийской школы-конференции для студентов, аспирантов и молодых ученых «Фундаментальная математика и ее приложения в естествознании». Уфа: РИЦ БашГУ. 2008. С. 148-152.
- A9. Шамсутдинов, М. А. Структура и динамика зародышей перемангничивания / М. А. Шамсутдинов, **И. Р. Каюмов**, А. П. Танкеев // Сборник трудов 12-го Международного симпозиума «Порядок, беспорядок и свойства оксидов» ОДРО-12, (17-22 сентября 2009г., Ростов-на-Дону, п. Лоо), Изд-во СКНЦ ВШ ЮФУ АПСН. 2009. С. 232-235.
- A10. Каюмов, И. Р. Структура и динамика двумерных магнитных неоднородностей / **И. Р. Каюмов**, М. А. Шамсутдинов, А. П. Танкеев // Межвузовский сборник научных трудов «Структурные и динамические эффекты в упорядоченных средах», Уфа: РИЦ БашГУ. 2009. С. 160-174.
- A11. Каюмов, И. Р. Динамика зародыша новой фазы с переходами типа Морина в антиферромагнетиках с взаимодействием Дзялошинского /

**И. Р. Каюмов**, М. А. Шамсутдинов, А. П. Танкеев // Международная школа-конференция для студентов, аспирантов и молодых ученых «Фундаментальная математика и ее приложения в естествознании»: Сборник трудов. Том 2. Физика. – Уфа: РИЦ БашГУ. 2009. С. 99-104.

A12. Каюмов, И. Р. Авторезонансная генерация нелинейных колебаний 360-градусной доменной стенки / **И. Р. Каюмов**, Л. А. Калякин, М. А. Шамсутдинов // Материалы международной конференции «Фазовые переходы, критические и нелинейные явления в конденсированных средах», 21-23 ноября 2010 г., Махачкала, Изд.: Института Физики ДНЦ РАН. 2010. С. 104-107.

A13. Каюмов, И. Р. Авторезонансное управление пульсационными колебаниями 180-градусной доменной границы в ромбическом антиферромагнетике / **И. Р. Каюмов**, М. А. Шамсутдинов // Международная школа-конференция для студентов, аспирантов и молодых ученых «Фундаментальная математика и ее приложения в естествознании»: Сборник трудов. – Уфа: РИЦ БашГУ. 2010. С. 111-116.

A14. Каюмов, И. Р. Нелинейная динамика зародыша коллинеарной фазы, находящегося в недрах угловой фазы / **И. Р. Каюмов** // Всероссийская конференция студентов, аспирантов и молодых ученых по физике. 12-14 мая 2010 г. Тезисы докладов. Владивосток. Издательство ДВГУ. 2010. С. 83-84.