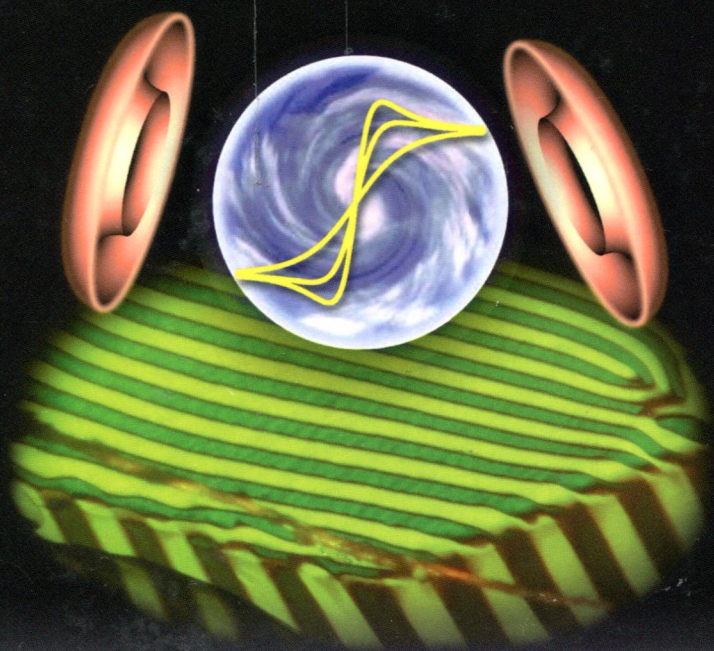


А. Б. БОРИСОВ
В. В. КИСЕЛЕВ

КВАЗИОДНОМЕРНЫЕ МАГНИТНЫЕ СОЛИТОНЫ



**А. Б. БОРИСОВ
В. В. КИСЕЛЕВ**

**КВАЗИОДНОМЕРНЫЕ
МАГНИТНЫЕ
СОЛИТОНЫ**



МОСКВА
ФИЗМАТЛИТ®
2015

УДК 530.182.1+537.6

ББК 22.31

Б 82

Борисов А. Б., Киселев В. В. **Квазиодномерные магнитные солитоны.** — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2015. — 520 с. — ISBN 978-5-9221-1590-2.

Монография содержит полное и замкнутое изложение современного состояния теории квазиодномерных магнитных солитонов. Кроме традиционного описания нелинейной динамики магнетиков с помощью уравнений Ландау–Лифшица, излагается метод феноменологических лагранжианов спиновых волн. Наиболее эффективные методы интегрирования нелинейных уравнений — метод обратной задачи рассеяния и процедура «одевания» — применяются для построения и анализа солитонных решений базовых моделей теории магнетизма: уравнений Ландау–Лифшица для изотропного ферромагнетика, ферромагнетиков с квадратичной по намагниченности анизотропией, двухподрешеточного ферримангнетика, а также киральных моделей для многоподрешеточных магнетиков. Специальные варианты редуکتивной теории возмущений развиты для изучения слабонелинейной динамики обменно-магнитостатических волн в пластинах конечной толщины, а также магнитоупругих солитонов. В рамках модели синус-Гордона аналитически описана сильнонелинейная динамика в спиральных структурах магнетиков без центра инверсии.

Книга адресована научным сотрудникам, аспирантам и студентам вузов соответствующих специальностей.

ISBN 978-5-9221-1590-2

© ФИЗМАТЛИТ, 2015

© А. Б. Борисов, В. В. Киселев, 2015

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	8
Глава 1. Феноменологическая теория магнетизма	11
1.1. Феноменологическое описание нелинейной динамики магнетиков с помощью магнитных подрешеток	11
1.1.1. Основные уравнения (11). 1.1.2. Связь с микротеорией (15).	
1.2. Феноменологический подход к релаксационным процессам в многоподрешеточных магнетиках.	22
1.3. Ферромагнитная пластина как пример ограниченного образца	25
1.3.1. Энергия, диссипативный функционал, условия существования однородной намагниченности в пластине (25). 1.3.2. Уравнения динамики (31). 1.3.3. Краевые условия, принцип Гамильтона (34).	
1.4. Магнитоупругие взаимодействия в многоподрешеточных магнетиках	35
1.5. Обменная симметрия и метод феноменологических лагранжианов	44
1.5.1. Обменная симметрия магнетиков (45). 1.5.2. Динамические симметрии, метод феноменологических лагранжианов для голдстоуновских частиц (49).	
1.6. Феноменологические лагранжианы нелинейной динамики голдстоуновских спиновых волн	62
1.7. Учет внешнего магнитного поля, релятивистских взаимодействий и процессов релаксации в методе феноменологических лагранжианов спиновых волн	75
1.8. Обсуждение эквивалентности подхода Ландау–Лифшица к описанию динамики магнетиков и метода феноменологических лагранжианов спиновых волн	79
1.9. Феноменологический лагранжиан магнитоупругих взаимодействий	87
Глава 2. Нелинейная динамика изотропного ферромагнетика. Методы интегрирования в теории солитонов	94
2.1. Метод обратной задачи рассеяния и солитоны	94

2.2. Основные уравнения квазиодномерной динамики изотропного ферромагнетика	105
2.2.1. Континуальная модель. Построение U - V -пары (105).	
2.2.2. Вспомогательные линейные уравнения (108).	
2.3. Прямая задача рассеяния	111
2.3.1. Интегральные представления функций Ёоста (111).	
2.3.2. Редукции на функции Ёоста и матрицу перехода (113).	
2.3.3. Свойства аналитичности функций Ёоста и элементов матрицы перехода (114).	
2.3.4. Эволюция данных рассеяния (117).	
2.4. Асимптотика элементов матрицы перехода при $ \lambda \rightarrow \infty$. Производящая функция интегралов движения	118
2.5. Дисперсионные соотношения. Связь результатов квазиклассической модели с квантовыми состояниями изотропной цепочки спинов	122
2.6. Обратная задача рассеяния	127
2.7. Солитонные решения	131
2.8. Матричная задача Римана	134
2.9. Интегрирование нелинейных уравнений с помощью матричной задачи Римана	139
2.9.1. «Одевание» частных решений интегрируемых моделей с использованием регулярной задачи Римана (139).	
2.9.2. Задача Римана с нулями (147).	
2.9.3. Схема «одевания» в общем случае (152).	
2.10. Анализ солитонных состояний изотропного ферромагнетика методом «одевания»	155
2.11. Радиальные волны в изотропном ферромагнетике	163
Глава 3. Нелинейная динамика ферромагнетика с анизотропией типа «легкая ось»	169
3.1. Квазиодномерная динамика ферромагнетика при учете размагничивающих полей и энергии магнитной анизотропии	169
3.1.1. Основные интегрируемые модели (169).	
3.1.2. Представления нулевой кривизны (172).	
3.2. Решения Ёоста, редукции для ферромагнетика с анизотропией типа «легкая ось» и равновесными значениями намагниченности на бесконечности	174
3.3. Прямая задача рассеяния	177
3.4. Обратная задача рассеяния в случае начальных распределений намагниченности с асимптотикой $\mathbf{S} \rightarrow (0, 0, 1)$ при $ x \rightarrow \infty$. Прецессирующие солитоны	185
3.5. Обратная задача рассеяния в случае начальных распределений намагниченности с асимптотическим поведением $\mathbf{S} \rightarrow (0, 0, \pm 1)$ при $x \rightarrow \pm\infty$. Доменные стенки	197
3.6. «Одевание» тривиальных решений $\mathbf{S} = (0, 0, \pm 1)$ уравнений Ландау–Лифшица с анизотропией типа «легкая ось»	205

3.7. Вынужденное движение доменной стенки в поле нелинейной спиновой волны	216
3.7.1. Постановка задачи (216). 3.7.2. Свойства решений Йоста. Метод «одевания» (221).	
3.8. Взаимодействие нелинейной волны с бризерами и зародышами перемангничивания	234
3.8.1. Построение бризерных решений (234). 3.8.2. Сценарии «разрушения» бризера волной (242). 3.8.3. Уединенный домен на фоне волны (246).	
3.9. Интегралы движения для солитонов на фоне волны	249
Глава 4. Динамика квазиодномерного ферромагнетика с анизотропией типа «легкая плоскость»	253
4.1. Солитоны на фоне волны намагниченности и метод «одевания»	253
4.2. Рассеяние волны прецессии произвольной амплитуды на алгебраических солитонах и волнах поворота намагниченности. Разрушение солитонов	257
4.3. Бризеры на фоне волны прецессии	264
4.4. Приложение модели легкоплоскостного ферромагнетика для анализа солитонов в спиральных структурах	269
Глава 5. Интегрирование уравнений ферромагнетика с двухосной магнитной анизотропией	272
5.1. Прямая и обратная задачи для уравнений Ландау–Лифшица анизотропного ферромагнетика	272
5.1.1. Преобразования прямой задачи рассеяния (273). 5.1.2. Обратное спектральное преобразование (278).	
5.2. Метод «одевания» на торе. Солитонные решения с асимптотиками $\mathbf{S} \rightarrow (0, 0, 1)$ при $x \rightarrow \pm\infty$	284
5.2.1. Бризеры двухосного ферромагнетика (289). 5.2.2. Взаимодействие двух доменных стенок (299).	
5.3. Солитонные решения модели двухосного ферромагнетика с асимптотиками $\mathbf{S} \rightarrow (0, 0, \pm 1)$ при $x \rightarrow \pm\infty$	304
5.4. Регулярная задача Римана на торе	308
5.5. Интегралы движения и спектр нелинейных возбуждений	312
Глава 6. Нелинейные волны и солитоны в системе двух кристаллографически неэквивалентных магнитных подрешеток	319
6.1. Эффективные уравнения ферромагнетика и их U – V -пара	319
6.2. Интегрирование динамических уравнений методом обратной задачи рассеяния	323
6.3. Солитоны в ферромагнетике	332
6.4. Элементарные возбуждения в ферромагнетике	338
6.5. Двумерные волны прецессии в изотропном ферромагнетике	343

Глава 7. Применение матричной задачи Римана к макроскопической динамике голдстоуновских возбуждений в упорядоченных магнетиках	349
7.1. Основные интегрируемые модели метода феноменологических лагранжианов для магнитных систем	349
7.2. Построение $U-V$ -пар. Основные соотношения	352
7.3. Нелинейная динамика недиссипативного спинового стекла. Модель главного кирального поля	357
7.4. Динамика неколлинеарного антиферромагнетика со структурой типа $YMnO_3$. Осесимметричная киральная модель	363
7.4.1. Процедура интегрирования модели (363). 7.4.2. Многоподрешеточные магнитные солитоны (369).	
7.5. Многосолитонные решения общих уравнений динамики голдстоуновских возбуждений (асимметричная киральная $SU(2)$ -модель)	375
Глава 8. Слабонелинейные магнитоэстатические и магнитоупругие солитоны	388
8.1. Нелинейная динамика обменно-дипольных спиновых волн в ферромагнитной пластине конечной толщины	389
8.1.1. Редуктивная теория возмущений (392). 8.1.2. Первый порядок теории возмущений. Спектр спиновых возбуждений (397). 8.1.3. Приближенное решение краевой задачи на собственные значения (399). 8.1.4. Нелинейное уравнение эволюции для огибающей спиновых волн при $\partial_k^2 \omega \neq 0$ (400).	
8.2. Квазисолитоны в окрестности точки нулевой дисперсии	404
8.3. Нелокальная динамика голдстоуновских возбуждений в антиферромагнитной пленке	412
8.3.1. Постановка задачи (413). 8.3.2. Эффективное уравнение слабонелинейной динамики голдстоуновских мод (415). 8.3.3. Анализ солитонных решений. Обменная релаксация солитонов (418).	
8.4. Нелинейный магнитоупругий резонанс длинных и коротких волн в магнетиках	421
8.4.1. Солитоны, обусловленные взаимодействием квазиакустических мод (426). 8.4.2. Взаимодействие активационных волн (430). 8.4.3. Магнитоупругий резонанс Бенни. Связь с интегрируемыми моделями (432).	
Глава 9. Нелинейная динамика спиральной (полосовой доменной) структуры	439
9.1. Основные уравнения	441
9.1.1. Модель sine-Gordon для геликоидальной структуры (441). 9.1.2. Процедура интегрирования (445).	
9.2. Солитоны в спиральной структуре	450
9.2.1. Лишняя доменная стенка (кинк) в структуре (451). 9.2.2. Бризеры (связанные состояния доменных границ) в струк-	

туре (457). 9.2.3. Трансляции структуры при столкновениях солитонов (463).	
9.3. Нелинейная динамика спиновых волн	468
9.4. Дисперсионные соотношения на торе и спектр интегралов движения	474
Приложение. Техника работы с эллиптическими функциями.	484
Список литературы	492