

НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК УКРАИНЫ  
ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУР  
ИМЕНИ Б. И. ВЕРКИНА

на правах рукописи

УДК 537. 611. 45;538. 22;539. 2

ХАЦЬКО

Евгений Николаевич

МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА  
НИЗКОСИММЕТРИЧНЫХ  
МАГНИТОДИЭЛЕКТРИКОВ

01. 04. 07 - физика твердого тела

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени  
доктора физико-математических наук

ХАРЬКОВ - 1995

АВ 32.942

Работа выполнена в Физико-техническом институте  
низких температур НАН Украины им. Б. И. Веркина

Официальные оппоненты: член-корреспондент НАН Украины  
профессор С. М. Рябченко  
(ИФ НАНУ, Киев);  
член-корреспондент НАН Украины  
профессор Н. Ф. Харченко  
(ФТИНТ НАНУ, Харьков);  
доктор физико-математических наук  
профессор Б. А. Иванов  
(ИМФ НАНУ, Киев).

ЛНБ України ім. В. Стефаніка



00753696 (-)

Ведущая организация: Донецкий Физико-технический институт НАНУ

Защита диссертации состоится «3» *октября* 1995 г.  
в 15 часов на заседании Специализированного совета Д. 02. 35. 02  
при ФТИНТ НАН Украины (310164, Харьков-164, пр. Ленина 47).

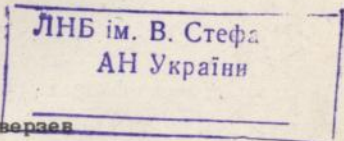
С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФТИНТ НАНУ.

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 1995 г.

Ученый секретарь Спец. совета Д. 02. 35. 02

доктор физ. - мат. наук

А. С. Ковалев



Ответственный за выпуск Ю. В. Перевражен

Подписано к печати 21. 08. 95

Физ. п. л. 2, 0

Уч. - изд. л. 2, 0

Заказ N 31

Тираж 100 экз.

Ротапринт ФТИНТ НАН Украины, 310164 Харьков-164, пр. Ленина 47

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность. В проблеме магнетизма одно из центральных мест занимает связь структуры вещества с его магнитными свойствами. Пространственная симметрия и симметрия магнитных взаимодействий являются фундаментальными характеристиками, определяющими свойства магнетиков.

Магнитные системы с высокой симметрией к настоящему времени изучены достаточно хорошо как в экспериментальном, так и в теоретическом отношении. Что касается низкосимметричных магнитодиэлектриков, то к моменту начала наших работ систематические экспериментальные исследования практически отсутствовали. В то же время низкая симметрия кристалла приводит к целому ряду отсутствующих в высокосимметричных системах особенностей поведения и, в первую очередь, к высокой анизотропии всех свойств. Существенно, что в таких магнетиках имеет место конкуренция одноионной и разноионной анизотропий, которая приводит к качественно иному устройству энергетической структуры магнитного иона и вызывает появление целого ряда особенностей, отсутствующих в слабоанизотропных системах и не описываемых в рамках квазиклассических теорий. В частности, увеличение одноионной анизотропии ведет к возможности проявления сугубо квантовых свойств, таких как несохранение длины намагниченности и др. Для низкосимметричных систем становится неприменимым традиционный единый феноменологический подход, основанный только на симметричных соображениях, и для описания их поведения существенным становится квантовый микроскопический подход с учетом конкретных свойств индивидуального иона.

Особенности поведения соединений с низкой симметрией взаимодействий вызваны, в первую очередь, влиянием потенци-

ала кристаллического поля низкой симметрии на вид электронного спектра магнитных ионов в кристалле, который может очень сильно отличаться от спектра свободного иона. Поскольку основное состояние магнитного иона, как правило, имеет ненулевой орбитальный момент и отличный от  $1/2$  суммарный спиновый момент, у свободного иона имеется вырожденное (или квазивырожденное) основное состояние. В кристалле это вырождение снимается частично либо полностью за счет спин-орбитального взаимодействия и влияния электрического потенциала кристаллического поля ионного окружения. Как результат, в магнитном кристалле с низкой локальной симметрией возникает сильная анизотропия, как одноионная, так и анизотропия спин-спиновых взаимодействий. Последнее обстоятельство приводит к тому, что в низкосимметричном магнетине обменное взаимодействие может не иметь изотропного гайзенберговского характера.

Еще одна проблема, возникающая в магнетиках с низкой кристаллической симметрией, связана тем, что в ряде случаев (например у редкоземельных ионов) в основном состоянии имеется значительный магнитный момент. В такой ситуации энергия диполь-дипольного взаимодействия и ее анизотропия должны играть существенную роль и могут значительно превышать обменную энергию. Характер фазовых переходов в таких системах представляет несомненный интерес для современной физики магнетизма, поскольку в этом случае появляется возможность изучения объектов с дальнедействующими спин-спиновыми взаимодействиями.

Низкая пространственная симметрия кристалла и наличие в решетке немагнитных ионов часто приводят к тому, что расстояния между магнитными ионами в разных направлениях оказы-

ваются существенно различными и какие-то направления окажутся выделенными по величине магнитных взаимодействий. В результате реализуется низкоразмерная магнитная структура, поведение которой существенно отличается от поведения обычных трехмерных магнетиков.

Наконец, в низкосимметричных кристаллах, содержащих ионы с ненулевым магнитным моментом, должна наблюдаться тесная связь взаимосвязь магнитных и структурных свойств. В. В. Переверзев связывает взаимосвязь магнитных и структурных свойств. Это связано с тем, что особенности фононного и электронного спектров этого класса соединений, а также наличие псевдовырожденного основного состояния магнитного иона приводят в ряде случаев к так называемому кооперативному эффекту Яна-Теллера, когда для снятия вырождения выгодным оказывается понижение симметрии кристалла. Наблюдающиеся при этом структурные фазовые переходы характеризуются рядом своеобразных особенностей из-за динамической связи электронной и фононной подсистем. Важную роль при этом играют магнитные взаимодействия. В кристаллах такого типа возможны метамагнитоупругие эффекты, когда магнитное поле может индуцировать структурный фазовый переход, что соответствует резкому нелинейному возрастанию деформации как функции магнитного поля.

Все вышесказанное определяет актуальность представленных в работе исследований, направленных на изучение обусловленных симметрией окружения магнитного иона особенностей магнитных свойств магнитодиэлектриков и влияния анизотропных взаимодействий на характер фазовых переходов в низкосимметричных системах.

Целью данной работы являлось комплексное исследование статических и динамических магнитных свойств систем с низкой

и магнитоупорядоченном состояниях, выяснение влияния симметрии кристаллического поля, спин-орбитального и обменного взаимодействий на энергетический спектр и взаимодействие элементарных возбуждений магнитного иона в низкосимметричной решетке, всестороннее исследование фазовых переходов в таких системах.

Для решения этой задачи было необходимо:

- создание аппаратуры и методики для исследования статических и динамических магнитных свойств сильно анизотропных веществ в широком интервале температур и магнитных полей;

- экспериментальное исследование угловых, температурных, полевых и частотных зависимостей магнитных свойств монокристаллов низкосимметричных магнитодиэлектриков;

- изучение характерных особенностей магнитного поведения низкосимметричных магнетиков в парамагнитной и упорядоченной областях;

- выяснение влияния индивидуальных особенностей энергетического спектра магнитного иона на магнитное поведение и выяснение роли различных взаимодействий в формировании этого спектра;

- выяснение особенностей и характера магнитных фазовых переходов типа порядок-беспорядок в низкосимметричных магнетиках;

- исследование особенностей магнитной структуры в упорядоченной фазе;

- исследование динамического поведения магнитной подсистемы в упорядоченной и неупорядоченной фазах, а также влияния фононной подсистемы на эти процессы;

- исследование особенностей спин-ориентационных фазовых переходов в низкоразмерных низкосимметричных магнетиках.

Объекты и методы исследования. В качестве объектов исследования выбраны, в основном, молибдаты и вольфраматы переходных и редкоземельных элементов. Этот выбор обусловлен следующими соображениями. Большинство ионов этих подгрупп обладают как спиновым, так и орбитальным магнитными моментами, имеются вырожденные орбитальные состояния и, как следствие, тесная взаимосвязь структурных и магнитных свойств. С другой стороны, имеются ионы с нулевым магнитным моментом, которые при необходимости могут служить хорошим диамагнитным аналогом, замещающим магнитный ион.

Кристаллическая структура этих соединений достаточно низкая для решения поставленной задачи и набор реализуемых структур достаточно широк для исследования различных типов конкретных ситуаций. Немаловажным обстоятельством является налаженная технология выращивания монокристаллических образцов необходимого качества. Весьма широкий набор изоструктурных кристаллов как магнитных, так и немагнитных позволяет проводить концентрационные исследования и наряду с магнитоцентрированными кристаллами изучать изоструктурные соединения с различной концентрацией магнитных ионов. Такой подход в ряде случаев позволяет разделить и оценить вклады различных взаимодействий в формирование магнитных свойств исследуемых веществ, а также исследовать эволюцию магнитных взаимодействий при магнитном разбавлении.

Еще одной особенностью проведенных в данной работе исследований является комплексность подхода. Использование различных экспериментальных методик позволяет получить взаимодополняющую информацию об объекте исследования. В работе исследовались температурные, угловые, частотные, полевые зависимости магнитной восприимчивости и намагничен-

ности, а также резонансных спектров ЭПР и АФМР.

Научная новизна. Проведены комплексные исследования низкосимметричных диэлектриков. Преобладающая часть результатов получена впервые и носит приоритетный характер. Этому способствовали высокий уровень измерительной и криогенной аппаратуры и комплексный характер выполненных исследований.

Экспериментально показано, что в отличие от слабоанизотропных магнетиков, свойства которых определяются пространственной симметрией, в поведении сильноанизотропных систем столь же фундаментальную роль играют также и другие характеристики - локальная симметрия полей, действующих на магнитный ион в кристалле, а также тип электронной структуры самих ионов. Эти факторы обуславливают ряд новых имеющих квантовую природу механизмов, конкуренция которых определяет эволюцию спиновой системы.

В работе получены новые результаты, относящиеся к физике магнитных диэлектриков:

- Разработан комплексный подход исследования низкосимметричных объектов, который включает не только непосредственное измерение магнитных свойств, но и использование данных о симметрии окружения магнитного иона, оптических, резонансных и релаксационных характеристик. Примененный подход позволил получить данные о особенностях энергетического спектра парамагнитного иона и последовательно описать магнитные свойства низкосимметричных кристаллов. Показана качественная взаимосвязь между характеристиками кристаллического поля и наблюдаемыми вариациями магнитной анизотропии от иона к иону.

- Показано, что для кристаллов с тетрагональной симметрией в парамагнитной области магнитные свойства обладают четко выраженной анизотропией и температурные зависимости

восприимчивости законом Кюри не описываются. Магнитные свойства определяются особенностями энергетического спектра конкретного иона в конкретной решетке. Структурная разупорядоченность приводит к возникновению ромбических искажений и понижению локальной симметрии магнитного иона.

- На основании экспериментальных данных по температурным зависимостям магнитной восприимчивости и ЭПР в рамках гамильтониана кристаллического поля найдены уровни энергии ионов и параметры кристаллического поля исследованных кристаллов в парамагнитной области температур.

- На примере иона  $\text{Pr}^{3+}$  показано, что схема расщепления уровней существенно меняется даже в поле одной и той же симметрии при небольшом изменении констант кристаллического поля. При этом основным состоянием оказывается либо синглет  $(\text{LiPr}(\text{MoO}_4)_2)_3$  либо некрамерсов квазидублет  $(\text{CsPr}(\text{MoO}_4)_2)_3$ , и для описания магнитных свойств необходим учет конкретной структуры спектра и величины момента.

- В общем виде произведен расчет расщепления нижнего уровня  $\Gamma_4$  основного термина  ${}^4F_{9/2}$  иона  $\text{Co}^{2+}$  в кристаллическом поле аксиальной и ромбической симметрии при учете спин-орбитального взаимодействия. Сравнение экспериментальных данных с проведенным расчетом позволяет определить величины констант кристаллического поля и найти значения энергий расщепления для соединений с ионом  $\text{Co}^{2+}$ .

- Показана принципиальная роль возбужденных состояний для правильного описания магнитных свойств  $\text{CoWO}_4$  в упорядоченном состоянии.

- Экспериментально обнаружено температурное вращение осей тензора магнитной восприимчивости в моноклинном кристалле  $\text{NaFe}(\text{WO}_4)_2$ . Показано, что к такому вращению

приводит низкая симметрия и конкуренция одноионной и разноионной анизотропий, наличие в кристалле различных тензорных взаимодействий, которые не могут быть приведены единым преобразованием к диагональной форме. В случае ромбической симметрии при некоторой характерной температуре наблюдается изменение знака разности главных значений восприимчивости.

- В широком классе двойных редкоземельных молибдатов обнаружены существенно низкотемпературные (1 К и ниже) магнитные переходы в сложное сильно анизотропное состояние.

- В упорядоченной фазе обнаружены спин-ориентационные фазовые переходы 1 рода метамагнитного типа, характерные для низкоразмерных изинговских магнетиков.

- Исследовано динамическое поведение магнитной подсистемы в упорядоченной и неупорядоченной фазах, а также влияние фононной подсистемы на эти процессы. В упорядоченном состоянии в  $\text{CeDy}(\text{MoO}_4)_2$  обнаружены аномально медленные процессы релаксации, связанные с перестройкой магнитной структуры. Анизотропия спектра времен релаксации при этом обусловлена анизотропией характера магнитных взаимодействий.

- Показано, что наблюдаемая триплетная структура спектра ЭПР в двойных молибдатах связана с наличием изинговских ферромагнитных цепочек, существующих при температуре намного выше температуры магнитного упорядочения.

- Проведенный для двойных редкоземельных молибдатов расчет диполь-дипольного взаимодействия показывает, что особенности геометрии структуры и наличие конкурирующих взаимодействий приводят к одномерным цепочечным структурам, слабо связанных между собой.

- На основании экспериментальных данных определены

магнитные структуры  $\text{SrEr}(\text{MoO}_4)_2$ ,  $\text{KEr}(\text{MoO}_4)_2$ ,  $\text{CeDy}(\text{MoO}_4)_2$  и  $\text{KDy}(\text{MoO}_4)_2$  в упорядоченной фазе. В результате конкуренции и сильной анизотропии взаимодействий реализуются сложные многоподрешеточные, существенно нелинейные магнитные структуры с различным характером упорядочения вдоль разных кристаллографических направлений.

- Обнаружена спин-флоп фаза в соединении  $\text{GdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ , определены эффективные поля магнитных взаимодействий, построена фазовая H-T диаграмма.

- При  $T=0,7$  К в монокристалле  $\text{Nd}_2\text{CuO}_4$  обнаружены спин-ориентационные фазовые переходы первого рода ( $H_{c1}=4,4$  Тл,  $H\parallel[100]$ ) и второго рода ( $H_{c2}=0,75$  Тл,  $H\parallel[110]$ ) в зависимости от ориентации магнитного поля. Показано, что в упорядоченном состоянии реализуется нелинейная антиферромагнитная структура.

- В импульсных магнитных полях в  $\text{Nd}_2\text{CuO}_4$  обнаружен сильный магнитокалорический эффект.

Научное и практическое значение диссертационной работы определяется тем, что полученные в ней результаты расширяют существующие представления физики магнитных диэлектриков, демонстрируют возможности комплексного подхода к исследованию этих систем, решают ряд важных вопросов, касающихся магнитных и резонансных свойств низкосимметричных магнетиков.

Практическая ценность полученных данных обусловлена возможностью их использования в построении адекватных теоретических моделей, для развития методов описания магнитных систем со сложным характером анизотропных взаимодействий, а также для применения и проверки уже существующих теоретических представлений.

Немаловажное практическое значение имеют разработанные

методики и установки для магнитных измерений для проведения исследований низкосимметричных магнетиков в широком интервале изменений физических параметров.

Существенное научное и прикладное значение имеет полученная в работе новая конкретная информация об исследованных семействах низкосимметричных магнетиков. Она включает такие важнейшие характеристики магнитных кристаллов, как температуры магнитного упорядочения, характеристики спектра магнитного иона, константы кристаллического поля и спин-спиновых взаимодействий, параметры магнито-ориентационных переходов и типы реализуемых магнитных структур.

Достоверность результатов обеспечивается использованием современного высокочувствительного оборудования, непротиворечивостью полученных результатов, применением адекватных теоретических представлений при интерпретации и обработке результатов. Достоверность доказывается совпадением результатов при применении различных методик, как собственных, так и других авторов.

Личный вклад автора. Представленная диссертация содержит итоги многолетней работы автора в области физики магнитных диэлектриков. Все приведенные в диссертации результаты получены автором либо им самим, либо в рамках сотрудничества, в котором он играл решающую роль в формулировке задач, постановке и проведении экспериментов, а также в обработке и трактовке результатов.

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на ряде конференций, совещаний, семинаров, в том числе:

- Всесоюзные конференции по физике магнитных явлений - Красноярск 1971, Баку 1975, Донецк 1977, Харьков 1979,

Донецк 1985, Калинин 1988, Ташкент 1991;

-Всесоюзные совещания по физике низких температур - Киев 1974, Таллин 1984, Тбилиси 1986, Ленинград 1988, Донецк 1990, Казань 1992, Дубна 1994;

-Всесоюзный семинар «Магнитные фазовые переходы и критические явления» - Махачкала 1984, 1989;

-Всесоюзная школа-семинар по физике сегнетоэластиков - Ужгород 1991, Воронеж 1994;

-Международная конференция стран-членов СЭВ по физике и технике низких температур - Братислава 1975, Бухарест 1977, Дрезден 1979, Вроцлав 1981, Будапешт 1987;

-Международная конференция по физике низких температур - Финляндия 1975;

-Германо-советский Семинар по высокотемпературной сверхпроводимости - Харьков 1989, Карлсруе 1990;

-Ежегодная конференция по магнетизму и магнитным материалам США - Миннеаполис 1993, Альбукерке 1994.

Структура диссертации. Диссертация состоит из введения, трех частей и заключения.

Во Введении обсуждается актуальность темы диссертации, формулируется цель работы, обосновывается выбор объектов исследования и экспериментальных методов, характеризуются новизна, научное и практическое значение, приводятся основные положения и выводы, выносимые на защиту, излагаются полученные результаты.

Первая часть посвящена описанию методики измерений и кристаллической структуры исследуемых объектов.

Решение поставленных в работе задач предъявляет ряд требований к методике эксперимента и измерительной технике. Главная особенность исследуемых объектов - крайне большая

анизотропия свойств. Это требует создания аппаратуры, способной с высокой точностью исследовать угловые зависимости магнитных свойств монокристаллических образцов в весьма широком диапазоне измеряемых величин. Кроме того, поскольку энергии взаимодействия магнитных ионов в большинстве исследуемых кристаллов относительно невелики, соответствующие температуры трехмерных магнитных фазовых переходов оказываются достаточно низкими. Это приводит, с одной стороны, к необходимости исследований при температурах существенно ниже 1 К, и, с другой стороны, к возможности исследований в широком интервале температур, вплоть до комнатной, ° для изучения парамагнитного состояния. Сильная связь спиновой системы с колебаниями решетки ведет к наличию магнитной релаксации, проявляющейся в широком диапазоне частот: от  $10^{-3}$ - $10^{-4}$  Гц до сотен МГц.

В связи с вышесказанным исследование магнитных свойств редкоземельных молибдатов требует применения разнообразной измерительной техники. Применяемые нами методики можно условно разделить на четыре группы по частотному диапазону:

1. Методы измерения статических магнитных свойств. Главным образом, это измерение магнитной восприимчивости и намагниченности образцов в зависимости от температуры, величины и направления магнитного поля, времени.

2. Методы измерений в переменных магнитных полях низких частот охватывающие диапазон от нескольких Гц до 10 кГц.

3. Радиочастотные методы, охватывающие диапазон частот от 10 кГц до 100 МГц.

4. Резонансные методы исследования (ЭПР, АФМР) в диапазоне длин волн 2,5 см - 1,5 мм (11-190 ГГц).

Необходимый интервал температур от комнатной до 0,5 К

получался с использованием гелиевых криостатов. Такой широкий температурный интервал обеспечивался применением специально разработанных криогенных контейнеров с различной степенью теплоизоляции для размещения образцов. Использование контейнеров позволило решить две задачи: 1) регулирование температуры с помощью либо нагревателей, либо и откачки паров  $He^4$  и  $He^3$  криогенными адсорбционными насосами и 2) возможность быстрой смены образцов без отогрева криостата.

Весь комплекс измерительной аппаратуры разработан и создан в Отделе радио и инфракрасной спектроскопии магнитных кристаллов ИТНТ НАН Украины.

Вторая часть посвящена исследованию особенностей магнитных свойств низосимметричных магнетиков в парамагнитной области температур, когда можно пренебречь спин-спиновым взаимодействием и когда магнитные свойства определяются энергетическим спектром конкретного иона в решетке данной симметрии.

В разделе 2.1 приведены результаты исследований соединений с редкоземельным ионом  $Nd^{3+}$  в кристаллах с тетрагональной симметрией кристаллической решетки.

Обнаружено, что все изученные соединения в парамагнитной области при отсутствии спин-спинового взаимодействия обладают четко выраженной анизотропией, и зависимости восприимчивости от температуры законом Кюри не описываются. Магнитные свойства обусловлены особенностями энергетического спектра  $Nd^{3+}$  в решетке шелита.

Температурный ход и анизотропию магнитной восприимчивости удается описать в рамках гамильтониана кристаллического поля, учитывая только основной терм  ${}^6J_{9/2}$ . Это позволяет определять энергии всех пяти уровней термина  ${}^6J_{9/2}$  и параметры

кристаллического поля.

В разделе 2.2 на примере исследованных магнитных свойств литиево-самариевого и литиево-празеодимового молибдатов показано, что структурная разупорядоченность приводит к возникновению ромбических искажений локальной симметрии редкоземельного иона, что сильно влияет на магнитные свойства. При этом роль ромбических искажений оказывается существенной из-за того, что расщепление основных термов ионов  $\text{Sm}^{3+}$  и  $\text{Pr}^{3+}$  в кристаллическом поле тетрагональной симметрии происходит так, что нижайшие уровни дают малые вклады в магнитные моменты, а ближайшие возбужденные состояния тетрагональными компонентами кристаллического поля не смешиваются. Появление ромбических компонент приводит к сильному смешиванию и существенно меняет характер волновых функций уровней и соответственно их вклад в магнитную восприимчивость.

В этом разделе также экспериментально показано, что магнитные свойства одного и того же иона могут радикально изменяться даже в поле одной симметрии при небольшом изменении констант кристаллического поля. Для иона  $\text{Pr}^{3+}$  в зависимости от величины и соотношения констант кристаллического поля нижним состоянием может оказаться либо синглет  $(\text{LiPr}(\text{MoO}_4)_2)$ , либо два близко расположенных уровня, возникающие при расщеплении дублета в поле ромбической симметрии  $(\text{CsPr}(\text{MoO}_4)_2)$ . В результате магнитные свойства этих кристаллов при низких температурах резко различаются.

Раздел 2.3 посвящен экспериментальному и теоретическому анализу магнитных свойств иона  $\text{Co}^{2+}$  в решетке вольфрамата кобальта  $\text{CoWO}_4$  - кристалла с моноклинной симметрией.

Измерения температурной зависимости магнитной восприимчивости  $\text{CoWO}_4$ , произведенные вдоль трех главных

магнитных осей, показали, что магнитные свойства этого антиферромагнетика обладают четко выраженной анизотропией во всем исследованном интервале температур 4,2-300 К, т. е. как ниже, так и выше точки Нееля ( $T_N=55$  К), причем температурный ход восприимчивостей законом Кюри-Вейсса не описывается. Вольфрамат кобальта является типичным двуосным антиферромагнетиком, главные магнитные оси которого не совпадают с кристаллографическими осями.

Наблюдаемая анизотропия магнитных свойств может быть обусловлена причинами разного характера. С одной стороны, низкая симметрия кристаллической структуры, отличный от нуля орбитальный момент и сильное спин-орбитальное взаимодействие приводят к анизотропии восприимчивости и отклонению её температурной зависимости от закона Кюри-Вейсса. С другой стороны, обменное взаимодействие в таких системах может быть анизотропным и также приводит к дополнительной анизотропии восприимчивости. Разделение этих вкладов при изучении магнитоцентрированного соединения крайне затруднительно. Однако можно исключить влияние обмена, изучая магниторазбавленные изоструктурные соединения.

В качестве такого соединения нами выбран диамагнитный  $ZnWO_4$ , в котором часть ионов  $Zn^{2+}$  изоструктурно замещена ионами  $Co^{2+}$ . При достаточно малой концентрации иона  $Co^{2+}$  (~2 %) влиянием обменного взаимодействия можно пренебречь. Результаты измерений показали, что  $Co^{2+}+ZnWO_4$  остается парамагнитным во всем исследованном интервале температур. Сопоставление зависимостей  $\chi_i(T)$   $Co^{2+}+ZnWO_4$  и  $CoWO_4$  выявило, что качественное поведение магнитных восприимчивостей аналогично. Поэтому был сделан вывод, что анизотропия магнитных свойств  $CoWO_4$  выше  $T_N$  главным образом обусловлена влиянием

внутрикристаллических полей и спин-орбитального взаимодействия. Следовательно, теоретический расчет магнитных свойств должен строиться на основе знания особенностей энергетического спектра одиночного иона  $\text{Co}^{2+}$  в решетке вольфрамата.

Ближайшее окружение иона  $\text{Co}^{2+}$  в кристалле вольфрамата состоит из шести ионов кислорода, образующих искаженный октаэдр. Основной терм  ${}^4F_{9/2}$  иона  $\text{Co}^{2+}$  в поле октаэдрической симметрии расщепляется на два орбитальных триплета  $\Gamma_4$  и  $\Gamma_5$  и синглет  $\Gamma_2$ , разделенных энергией  $(5-15) \cdot 10^3 \text{ см}^{-1}$ . Поэтому при расчете магнитных свойств с достаточной степенью точности можно пренебречь вкладом верхних состояний  $\Gamma_5$  и  $\Gamma_2$  и ограничиться нижайшим орбитальным триплетом  $\Gamma_4$ . Совместным действием спин-орбитального взаимодействия и низкосимметричных компонент кристаллического поля уровень  $\Gamma_4$  расщепляется на шесть дублетов Крамерса. В работе проведен в рамках теории кристаллического поля в общем виде расчет зависимости энергий шести нижних дублетов Крамерса и значений g-факторов двух нижних уровней в функции констант кристаллического поля и спин-орбитального взаимодействия. Используя гамильтониан кристаллического поля ромбической симметрии и спин-орбитального взаимодействия в операторном виде.

$$\mathcal{H} = \Delta [3\hat{L}_z^2 - L(L+1)] + \frac{\Gamma}{2} (\hat{L}_x^2 + \hat{L}_y^2) + \hat{L}\hat{S}$$

были получены исходные для расчета секулярные уравнения. В качестве базисных функций использовались орбитальные части волновых функций компонент уровня  $\Gamma_4$  и проекции полного спина  $S=3/2$ .  $\Delta$  и  $\Gamma$  - константы кристаллического поля аксиальной и ромбической симметрии, деленные на константу спин-орбитальной связи  $\lambda$ . Решение соответствующих секулярных уравнений шестого порядка дало возможность определить значения энергий  $E_n$  и вид волновых функций  $\langle n |$  для всех

шесть дублетов в функции параметров  $\Delta$  и  $\Gamma$ .

Энергетический спектр иона  $\text{Co}^{2+}$  во внешнем магнитном поле может быть рассчитан через матричные элементы оператора внешнего магнитного поля  $\langle \psi_{n,m} | \mu_B H_1 (\hat{L}_1 + 2\hat{S}_1) | \psi_{n,m} \rangle$  между  $n$  компонентами всех  $n$  дублетов Крамерса. Сопоставив каждому дублету эффективный спин  $S=1/2$ , можно найти значения эффективных  $g$ -факторов. Зависимости энергий  $E_n$  и  $g$ -факторов как функции параметров  $\Delta$  и  $\Gamma$  были рассчитаны с помощью ЭВМ.

Используя результаты измерений спектра ЭПР  $\text{Co}^{2+}$  в  $\text{ZnWO}_4$ , были найдены энергетические расстояния между основным и возбужденными состояниями уровня  $\Gamma_4$  (224, 548, 870, 1325, 1393  $\text{см}^{-1}$ ). Расстояние между двумя нижними дублетами Крамерса было оценено, кроме того, независимо по данным спин-решеточной релаксации. Полученная величина  $\Delta E = 200 \pm 30 \text{ см}^{-1}$  хорошо согласуется с результатами расчета.

После того, как определен энергетический спектр иона  $\text{Co}^{2+}$  в структуре  $\text{ZnWO}_4$ , следуя теории парамагнетизма Ван Флена, рассчитана магнитная восприимчивость и её зависимость от температуры.

В разделе 2.4 рассматривается поведение главных осей тензора магнитной восприимчивости при изменении температуры в низосимметричных магнетиках.

При исследовании температурных зависимостей магнитных ( $\chi$ ) и резонансных (ЭПР, ЯМР) свойств моноклинных кристаллов  $\text{NaFe}(\text{WO}_4)_2$  и  $\text{LiFe}(\text{WO}_4)_2$  экспериментально обнаружено вращение главных магнитных осей в  $\text{NaFe}(\text{WO}_4)_2$  при понижении температуры. При высоких (15 К и выше) температурах магнитная ось  $z$  практически совпадает с кристаллографической  $a$ , при понижении температуры происходит поворот осей тензора восприимчивости в плоскости  $ac$  так, что при  $\sim 5$  К угол магнитной оси  $z$  с

кристаллографической составляет  $45^{\circ}$ . Дальнейшее понижение температуры не влияет на положение магнитных осей. В то же время в изоструктурном  $\text{LiFe}(\text{WO}_4)_2$  вращение не наблюдается. Следовательно, этот эффект не связан с температурными особенностями спектра иона  $\text{Fe}^{3+}$  в моноклинной решетке.

Направления осей магнитной восприимчивости определяются совокупным вкладом одноионной анизотропии и анизотропии диполь-дипольного взаимодействия (анизотропией обменного взаимодействия для S-состояния можно пренебречь), причем одноионная анизотропия определяется пональной симметрией, а диполь-дипольная - пространственной. При изменении соотношения этих вкладов (при изменении внешних параметров) должно наблюдаться вращение тензора  $\chi$ .

Как показывает анализ пространственной структуры  $\text{LiFe}(\text{WO}_4)_2$  и  $\text{NaFe}(\text{WO}_4)_2$ , для  $\text{LiFe}(\text{WO}_4)_2$  пространственная анизотропия расположения магнитных ионов и, следовательно, анизотропия магнитных взаимодействий невелика. В то же время, в  $\text{NaFe}(\text{WO}_4)_2$  наблюдается ярко выраженная цепочечность структуры и сильная диполь-дипольная анизотропия, что проявляется и в магнитных свойствах (широкий максимум на  $\chi(T)$  выше  $T_N$ ).

Таким образом, моноклинный характер одноионной анизотропии и сильная анизотропия диполь-дипольного взаимодействия, обусловленная низкоразмерным характером структуры расположения магнитных ионов в кристаллической решетке, являются причиной наблюдаемого в  $\text{NaFe}(\text{WO}_4)_2$  поворота осей эллипсоида магнитной восприимчивости при низких температурах.

В разделе 2.5 обсуждается взаимосвязь структурных превращений с магнитными характеристиками низкосимметричных кристаллов.

Как уже говорилось, в низкосимметричных кристаллах

содержащих ионы с ненулевым спиновым и орбитальным моментами, должна наблюдаться тесная взаимосвязь магнитных и структурных свойств. Наличие вырожденного или псевдовырожденного основного состояния магнитного иона может привести к ситуации, когда изменение внешних условий (температура, магнитное и электрическое поле, давление) делает выгодным понижение симметрии кристалла, тем самым снимая вырождение и понижая энергию системы.

При исследовании магнитных и оптических свойств  $\text{CsDy}(\text{MoO}_4)_2$  при температуре 38 К обнаружен фазовый переход первого рода с резкой перестройкой энергетического спектра иона  $\text{Dy}^{3+}$ . Измерения температурных зависимостей главных значений магнитных восприимчивостей показывают, что выше и ниже перехода  $\text{CsPr}(\text{MoO}_4)_2$  остается парамагнитным, при этом в точке перехода наблюдаются резкие скачки восприимчивости. Все это позволяет идентифицировать этот переход как структурный.

Измерение времени спин-решеточной релаксации позволило совместно с оптическими данными определить энергии нижних уровней выше и ниже точки фазового перехода.

Анализ имеющихся экспериментальных данных по измерениям восприимчивости и ЭПР изоструктурных  $\text{CsDy}(\text{MoO}_4)_2$  разбавленных кристаллов подтверждает вывод о том, что при структурном переходе происходит разворот локальных осей иона  $\text{Dy}^{3+}$  и появляются два неэквивалентных парамагнитных центра.

В разделе 2.6 содержится краткий обзор результатов и выводы по части 2.

В третьей части приводятся результаты исследований магнитных фазовых переходов, магнитной структуры и свойств низкосимметричных и низкоразмерных магнетиков в магнитоупорядоченной области.

**Раздел 3.1** посвящен рассмотрению магнитных свойств моноклинного антиферромагнетика  $\text{CoWO}_4$ . Исходя из результатов расчета энергетического спектра иона  $\text{Co}^{2+}$  в решетке вольфрамата цинка, проведен анализ магнитных свойств антиферромагнитного  $\text{CoWO}_4$ . Использовался гайзенберговский гамильтониан обменного взаимодействия, в расчете учитывались два нижних дублета Крамерса. В модели молекулярного поля вычислены энергии расщепления двух нижних дублетов,  $g$ -факторы нижнего уровня, параметры кристаллического поля, спин-орбитального и обменного взаимодействий. Рассчитаны температурные зависимости главных значений магнитной восприимчивости выше  $T_c$ . Вычислен средний спин подрешетки в пределе  $T \rightarrow 0$  К. Показано, что отличие от нуля значения параллельной восприимчивости при  $T=0$  К обусловлено примешиванием внешним магнитным полем к волновым функциям основного состояния волновых функций возбужденных уровней.

**Раздел 3.2** содержит результаты исследований магнитных фазовых переходов в низкосимметричных магнетиках. В качестве объекта исследования выбраны редкоземельные молибдаты эрбия и диспрозия. Выбор обусловлен низкой симметрией решетки, относительно слабым обменом и особенностями электронного спектра этого класса соединений. В силу особенностей строения в этих соединениях имеются слои и цепочки парамагнитных редкоземельных ионов.

Исследования ЭПР показывают наличие неэквивалентных положений и сильно анизотропный изинговский характер  $g$ -факторов парамагнитных ионов.

В результате исследования температурных зависимостей магнитных восприимчивостей обнаружены существенно низкотемпературные магнитные фазовые переходы в упорядоченное состо-

яние:  $\text{CsEr}(\text{MoO}_4)_2$  при 0,84 К;  $\text{KEr}(\text{MoO}_4)_2$  - 0,9 К;  $\text{KDy}(\text{MoO}_4)_2$  - 1,1 К и  $\text{CsDy}(\text{MoO}_4)_2$  - 1,3 К. Во всех соединениях наблюдается крайне высокая анизотропия восприимчивости. Хотя в парамагнитной области восприимчивость описывается законом Кюри - Вейсса, парамагнитная константа Кюри  $\theta$ , связанная с обменным взаимодействием, крайне анизотропна и для разных направлений отличается не только по величине, но и по знаку. Это означает разный характер взаимодействия вдоль разных осей. Данные по восприимчивости говорят о том, что обнаруженные магнитные фазовые переходы происходят, как правило, в сложное неколлинеарное состояние.

Измерения полевых зависимостей намагниченности показывают, что в магнитоупорядоченном состоянии наблюдаются спин-ориентационные переходы в относительно малых полях. Обнаруженные переходы относятся к типу метамагнитных переходов, которые реализуются в случае, когда существует конкуренция обменов разного знака, а анизотропия существенно больше обмена и направления моментов подрешеток задаются полем анизотропии. Такой спин-ориентационный переход типичен для сильно анизотропных изинговских магнетиков. Фазовые переходы относятся к 1-му роду и происходят через смешанное состояние, представляющее собой смесь областей (доменов) антиферромагнитной и ферромагнитной фаз.

Одной из особенностей исследованных низкосимметричных кристаллов является наличие значительной области ближнего порядка, что проявляется в экспериментах по намагниченности, магнитному резонансу, динамической восприимчивости в релаксационных характеристиках.

Показано, что наблюдаемая в эксперименте триплетная структура спектра в  $\text{CsEr}(\text{MoO}_4)_2$  и  $\text{KEr}(\text{MoO}_4)_2$  вдоль оси  $b$

вызвана существованием в парамагнитной области изинговских цепочек, причем параметр взаимодействия в цепочке формируется двумя типами взаимодействия: в основном диполь-дипольным, но заметную роль играет и ферромагнитный обмен.

Температурные зависимости магнитной восприимчивости  $\text{CsEr}(\text{MoO}_4)_2$  и  $\text{KEr}(\text{MoO}_4)_2$  хорошо описываются в модели слабо связанных ферромагнитных изинговских цепочек.

В  $\text{CsDy}(\text{MoO}_4)_2$  в области магнитного фазового перехода как выше, так и ниже по температуре обнаружены процессы перестройки магнитной структуры с аномально большими временами релаксации. При приложении магнитного поля вдоль оси с временем установления равновесной намагниченности достигает десятков минут. Вдоль других осей подобных явлений не обнаружено. Температурная зависимость времени релаксации описывается экспоненциальной зависимостью вида  $\tau = \tau_0 e^{\Delta/kT}$  со значением  $\Delta_1 = 24,5$  К выше  $T_c$  и  $\Delta_2 = 6$  К ниже  $T_c$ . Причина такого необычного поведения, когда процессы релаксации со столь большими временами происходят только в одном направлении, остается до конца неясной. Конечно, существенную роль должно играть наличие цепочечной структуры. Обнаруженное поведение возможно для кластеров, свободное движение которых блокируется барьерами, определяемыми энергией анизотропии. В этом случае  $\Delta_1$  и  $\Delta_2$  являются энергиями активации выше и ниже точки магнитного фазового перехода.

Исследование концентрационных зависимостей динамической восприимчивости в системе  $\text{CsDy}_x\text{Eu}_{1-x}(\text{MoO}_4)_2$  показало, что процессы релаксации существенным образом зависят от симметрии кристалла. При концентрации, когда структурный переход первого рода в  $\text{CsDy}(\text{MoO}_4)_2$  сменяется переходом второго рода, релаксационные характеристики резко изменяются,

и эффекты, связанные с ближним порядком, исчезают.

Расчет энергии диполь-дипольного взаимодействия показывает, что существенно выше температуры трехмерного фазового перехода дипольное взаимодействие формирует ферромагнитные цепочки, случайным образом связанные друг с другом. По мере понижения температуры упорядочение происходит через смесь близлежащих по энергии состояний. Это объясняет наличие области ближнего порядка.

Анализ данных восприимчивости, ЭПР и намагниченности совместно с расчетом диполь-дипольного взаимодействия позволил установить магнитные структуры исследованных кристаллов. Только в  $\text{CsEr}(\text{MoO}_4)_2$  реализуется коллинеарная двухподрешеточная структура антиферромагнитно связанных ферромагнитных цепочек вдоль оси  $b$ , с моментами, направленными по  $b$ . В остальных соединениях магнитные структуры имеют сложный неколлинеарный характер: в  $\text{KEr}(\text{MoO}_4)_2$  результаты хорошо описываются четырехподрешеточной неколлинеарной антиферромагнитной структурой, моменты лежат в плоскости  $bc$  и развернуты на угол  $18^\circ$  относительно оси  $b$ ; в  $\text{CsDy}(\text{MoO}_4)_2$  моменты развернуты на  $45^\circ$  в плоскости  $ac$  и имеется ферромагнитный момент; наконец, в четырехподрешеточной структуре  $\text{KDy}(\text{MoO}_4)_2$ , так же с ферромагнитным моментом, направления подрешеток не лежат ни в одной из базисных плоскостей кристалла.

Раздел 3.3 посвящен исследованию влияния особенностей кристаллической структуры на магнитные свойства некоторых редкоземельных купратов, относящихся к новому классу высокотемпературных сверхпроводников. Интерес к этим соединениям, в первую очередь, связан с ролью магнитной подсистемы в механизме сверхпроводимости. Эти соединения отличает наличие двух магнитных подсистем, медной и редкоземельной, и

существенная роль симметрии окружения магнитного иона.

При исследовании восприимчивости, намагниченности и АФМР в соединении  $GdBa_2Cu_3O_{7-x}$ , принадлежащем к классическому семейству Y-Ba-Cu-O, в упорядоченном состоянии обнаружен спин-флоп переход, характерный для легкоосного антиферромагнетика, построена фазовая H-T диаграмма, определены параметры магнитных взаимодействий. Сравнение с близким соединением  $Gd_2CuO_4$  показывает, что поведение  $GdBa_2Cu_3O_{7-x}$  обусловлено особенностями структуры, приводящими к компенсации влияния медной магнитной подсистемы.

В другом соединении,  $Nd_2CuO_4$ , представителе другого семейства -  $R_{2-x}Ce_xCuO_4$ , которое относят к сверхпроводникам с электронным типом проводимости, характер обнаруженных низкотемпературных спин-ориентационных переходов и реализуемой магнитной структуры существенно отличается, и это также связано с симметрией кристаллической структуры. Показано, что наличие вырождения в базисной плоскости приводит к неколлинеарной магнитной структуре в этом соединении. В отличие от  $GdBa_2Cu_3O_{7-x}$  в  $Nd_2CuO_4$  при низких температурах влияние медной подсистемы весьма существенно, как следует из экспериментов в больших магнитных полях, и их нельзя рассматривать независимо.

В  $Nd_2CuO_4$  обнаружен сильный магнитокалорический эффект, который необходимо учитывать при экспериментах с импульсными полями.

В Заключении приведены основные результаты и выводы работы, которые вносятся на защиту.

1. Проведено систематическое исследование низкосимметричных магнитодиэлектриков разных типов. Экспериментально показано, что в отличие от высокосимметричных слабоанизотроп-

ных магнетиков, свойства которых определяются пространственной симметрией, в поведении сильноанизотропных систем столь же фундаментальную роль играют также другие характеристики - локальная симметрия полей, действующих на магнитные ионы в кристалле, а также тип электронной структуры самих ионов.

2. Получена новая конкретная информация о важнейших характеристиках низкосимметричных магнетиков: параметры кристаллического поля, характеристики энергетического спектра магнитного иона вблизи основного состояния, температуры магнитного упорядочения, поля спин-ориентационных фазовых переходов, величины обменного и диполь-дипольного взаимодействий.

3. На примере иона  $\text{Co}^{2+}$  в моноклинной структуре показано, что последовательное описание магнитных свойств низкосимметричного магнетика должно основываться на микроскопическом одноионном подходе, с учетом конкретной структуры спектра магнитного иона.

4. Показано, что экспериментально обнаруженный эффект температурного вращения эллипса магнитной восприимчивости в моноклинном кристалле связан с конкуренцией разного рода взаимодействий (однoионной и разноионной анизотропией).

5. Обнаружены и исследованы существенно низкотемпературные магнитные фазовые переходы в изинговских низкосимметричных и низкоразмерных магнетиках. Показано, что существенную роль в их магнитном поведении играют одномерные ферромагнитные изинговские цепочки, существующие в области температур намного выше температуры трехмерного магнитного упорядочения.

6. Развитый комплексный подход, использование разнообразных методик для измерения различных характеристик

исследованных объектов и анализ полученных данных позволил определить реализуемые в магнитоупорядоченном состоянии магнитные структуры. Существенная неколлинеарность и разнообразие магнитных структур даже для одного иона в близких кристаллических структурах определяются сильной одноионной анизотропией, более слабым диполь-дипольным взаимодействием и, в последнюю, но очень важную, определяющую всю структуру, очередь, - слабым обменом.

7. В области магнитного фазового перехода, как выше, так и ниже по температуре, обнаружены аномально медленные и крайне анизотропные, фактически одномерные, процессы релаксации в соединении  $\text{CsDy}(\text{MoO}_4)_2$ , связанные, очевидно, с перестройкой магнитной структуры в этой области. Определены энергии активации этого процесса. Однако конкретная природа этого явления осталась неясной.

Основные результаты работы изложены в следующих публикациях:

1. А. И. Звягин, Е. Н. Хацько. Анизотропия магнитных свойств вольфрамата цинка с примесью кобальта, *ФТТ* 10, 3730 (1968).

2. А. И. Звягин, Е. Н. Хацько. Магнитные свойства соединений иона  $\text{Co}^{2+}$  со структурой вольфрамата в парамагнитной области температур, *«Физика конденсированного состояния»* вып 2, 288, *ФТИНТ АН УССР, Харьков* (1968).

3. А. И. Звягин, Е. Н. Хацько. Магнитные свойства вольфрамата кобальта, *ФТТ* 12, 314 (1970).

4. А. Г. Андерс, А. И. Звягин, Е. Н. Хацько. Спектр ЭПР пары примесных ионов  $\text{Co}^{2+}$  в вольфрамите цинка, *ФТТ* 13, 2800 (1971).

5. Е. Н. Хацько, П. С. Калинин, А. И. Звягин, Л. Н. Пелих, М. И. Кобец. Магнитные свойства соединений иона  $\text{Nd}^{3+}$  со структурой шеелита, *«Физика конденсированного состояния»*, вып. 15, 34, *ФТИНТ АН УССР, Харьков* (1971).

6. П. С. Калинин, Е. Н. Хацько, А. И. Звягин. Ядерный магнитный резонанс в  $\text{Na}^{23}$  в  $\text{NaNd}(\text{WO}_4)_2$ , УФЖ 17, 1287 (1972).
7. Е. Н. Хацько, А. И. Звягин. Влияние кристаллического поля низкой симметрии на магнитные свойства  $\text{CoWO}_4$ , «*физика низких температур*», вып. 18, 3, ФТИНТ АН УССР, Харьков (1972).
8. Е. Н. Хацько, А. И. Звягин, Л. Н. Пелих. Магнитные свойства монокристаллов  $\text{ZnWO}_4$ - $\text{CoWO}_4$ , «*физика низких температур*», вып. 21, 28, ФТИНТ АН УССР, Харьков (1972).
9. А. И. Звягин, С. Д. Ельчанинова, Т. С. Стеценко, Л. Н. Пелих, Е. Н. Хацько. Низкотемпературный структурный фазовый переход в цезиеводиспрозиевом молибдате. ФНТ 1, 79, (1975).
10. П. С. Калинин, И. В. Скоробогатова, А. И. Звягин, Е. Н. Хацько, В. Г. Юрко. Проявление ромбических локальных искажений в тетрагональных двойных литиево-редкоземельных молибдатах. ФНТ 1, 923 (1975).
11. А. Г. Андерс, А. И. Звягин, П. С. Калинин, Е. Н. Хацько, В. Г. Юрко. Магнитные свойства низко размерного магнетика с моноклинной симметрией кристаллической структуры, ФНТ 1, 1012 (1975).
12. И. В. Скоробогатова, Е. Н. Хацько, С. Н. Гладченко. Энергетическая схема и магнитные свойства иона  $\text{Pr}^{3+}$  в двойном молибдате  $\text{CsPr}(\text{MoO}_4)_2$ , ФНТ 4, 1063 (1978).
13. Е. Н. Хацько, А. С. Черный. Энергетический спектр  $\text{CsDy}(\text{MoO}_4)_2$  в окрестностях структурного фазового перехода, ФНТ 7, 1048 (1981).
14. Е. Н. Хацько, А. С. Черный. Магнитный фазовый переход в  $\text{CsDy}(\text{MoO}_4)_2$  и  $\text{KDy}(\text{MoO}_4)_2$  - кристаллах с сильным анизотропным взаимодействием, ФНТ 11, 540 (1985).
15. Е. Н. Хацько, А. С. Черный. Low-frequency magnetic properties of  $\text{CsDy}(\text{MoO}_4)_2$  in region of magnetic and structural phase transition, *Ferroelectrics* 130, 477 (1987).

16. А. Фегер, П. Штефани, А. Орендачева, Э. Е. Андерс, А. Г. Андерс, С. В. Волоцкий, А. И. Звягин, С. В. Старцев, Е. Н. Хацько, А. С. Черный. Низкотемпературные тепловые и магниторезонансные свойства слоистого кристалла  $\text{CsGd}(\text{MoO}_4)_2$ , *ФНТ* 14, 1304 (1988).
17. А. И. Звягин, А. А. Степанов, Е. Н. Хацько, А. С. Черный, В. И. Доценко, Н. М. Чайковская. Магнитный фазовый переход в сверхпроводящей керамике  $\text{GdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ , *ФНТ* 15, 1094 (1989).
18. А. И. Звягин, М. И. Кобец, В. А. Пашенко, А. Степанов, Е. Н. Хацько, Detection and investigation of AFMR in  $\text{Gd}_2\text{CuO}_4$  and  $\text{Gd}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$ , *Physica B* 165&166, 1321 (1990).
19. А. И. Звягин, А. А. Степанов, Е. Н. Хацько, А. С. Черный, В. И. Доценко, Н. М. Чайковская. Magnetic properties of  $\text{GdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$  at low temperatures. *ФНТ* 16, 665 (1990).
20. А. И. Звягин, А. И. Каплиенко, М. И. Кобец, В. Г. Милкевич, А. А. Степанов, С. М. Третьяк, Е. Н. Хацько, Магнитные свойства и кристаллическая структура оротата кобальта, *ФНТ* 177, 259, (1991).
21. Е. Н. Хацько, А. С. Черный. Interconnection of structural and magnetic phase transition observed in single crystal  $\text{CsEu}_x\text{Dy}_{1-x}(\text{MoO}_4)_2$ , *Ferroelectrics*, 130, 321 (1991).
22. А. С. Черный, Е. Н. Хацько, G.Chouteau, J.M.Louis, А. А. Степанов, P.Wyder С. Н. Барило, Д. И. Жигунов. Spin-orientation phase transition in  $\text{Nd}_2\text{CuO}_4$ : a compound with noncolinear magnetic structure, *Phys.Rev.B* 45, 12600 (1992).
23. Е. Н. Хацько, А. С. Черный, А. И. Каплиенко. Магнитные свойства низкоразмерного изинговского магнетика  $\text{KEr}(\text{MoO}_4)_2$  *ФНТ* 19, 1217, (1993).
24. Е. Н. Хацько, А. С. Черный. Magnetic phase transition in  $\text{CsEr}(\text{MoO}_4)_2$  and  $\text{KDy}(\text{MoO}_4)_2$ -chain layered Ising compounds *J.Appl.Phys*, 76, 7117 (1994).
25. Е. Н. Хацько, А. С. Черный, М. И. Кобец, В. А. Пашенко, А. И. Кап-

лиенко, А. А. Гурскас, В. Г. Миткевич, С. М. Третьяк. Магнитные свойства и структура квазиодномерного изинговского магнетика  $\text{SrEr}(\text{MoO}_4)_2$ , *ФНТ* 20, 1022 (1994).

26. Е. Н. Хацько, А. С. Черный, А. И. Каплиенко, Спин-ориентационные фазовые переходы и магнитная структура низкоразмерного неколлинеарного изинговского магнетика  $\text{KDu}(\text{MoO}_4)_2$ , *ФНТ* 20, 1029 (1994),

27. Е. Н. Хацько, А. С. Черный, Динамика намагничивания вблизи магнитного фазового перехода в низкоразмерном  $\text{SrDu}(\text{MoO}_4)_2$  в области 0.4–4К, В кн: «24 Всесоюзная конф. по физике низких температур» Тез. докл. Тбилиси (1986).

28. Е. Н. Хацько, А. С. Черный, Магнитный фазовый переход в изинговском магнетике  $\text{KEr}(\text{MoO}_4)_2$ , В кн: 18 Всесоюзная конф. по физике магнитных явлений» Тезисы докл. Калинин (1988).

29. А. И. Звягин, А. Г. Андерс, С. В. Волоцкий, М. И. Кобец, В. А. Пашенко, А. А. Степанов, Е. Н. Хацько. Study of EPR and AFMR in  $\text{RBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$  ( $\text{R}=\text{Gd}^{3+}, \text{Er}^{3+}$ ) and  $\text{R}_2\text{CuO}_4$  ( $\text{R}=\text{Gd}^{3+}, \text{Nd}^{3+}$ ), В кн: *Proceeding of the Third German-Soviet Bilateral Semin. on High-Tempere Superconductivity*, 225 Karlsruhe, (1990).

30. А. И. Звягин, А. Стеланов, М. И. Кобец, В. А. Пашенко, Е. Н. Хацько, А. С. Черный, АФМР и ориентационные фазовые переходы в  $\text{Nd}_2\text{CuO}_4$ , В кн: «19 Всесоюзная конфер. по физике магнитных явлений» Тезисы докладов, Ташкент (1991).

31. Е. Н. Хацько, А. С. Черный. Влияние  $\text{Eu}^{3+}$  на ориентацию g-тензора в системе  $\text{SrDu}_x\text{Eu}_{1-x}(\text{MoO}_4)_2$  при низких температурах, В кн: 29 Всес. конф. по физике низких темпер., Тез. докладов, Казань, 1992г.

32. Е. Н. Хацько, М. И. Кобец, В. А. Пашенко, В. И. Кутько, Магнито-упругий структурный фазовый переход в  $\text{SrEr}(\text{MoO}_4)_2$ , В кн: VI Международной семинар по физике сегнетоэластиков, Воронеж (1994)

AB 32.942

С. М. Хацько. Магнітні властивості низькосиметричних діелектриків// На правах рукопису. Дисертація на здобуття вченого ступеня доктора фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.07 - фізика твердого тіла, Фізико-технічний інститут низьких температур НАН України, Харків, 1994.

Подано до захисту 32 наукові праці, що містять експериментальні дослідження магнітних властивостей низькосиметричних магнітодіелектриків. Показана суттєва роль симетрії оточення магнітного іона у формуванні магнітних властивостей низькосиметричних магнетиків як у магнітовпорядкованому, так і в парамагнітному стані. Виявлені та вивчені суто низькотемпературні магнітні фазові перетворення у рідкоземельних сполуках, показана наявність складних неколінеарних магнітних структур.

E.N.Khats'ko. Magnetic properties of low symmetric magnetodielectrics// Doctors degree in physics and mathematics manuscript. Institute for Low Temperature Physics and Engineering National Academy of Sc. of Ukraine. Kharkov, 1995.

The 32 scientific works containing the experimental investigation of magnetic properties of low symmetric magnetodielectrics are represented. It is shown the significant role of a symmetry of magnetic ion surrounding in forming of low symmetric magnetic properties both in ordered and paramagnetic state. There are detected and studied substantial low temperature magnetic phase transitions in rare earth compounds. It is indicated a complicates noncollinear magnetic structure presence.

Ключові слова: Магнітні властивості, анізотропія, енергетичний спектр, фазові перетворення, магнітна структура.