

**АКАДЕМИЯ НАУК УКРАИНЫ  
ДОНЕЦКИЙ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ**

на правах рукописи

**ШЕСТАКОВ АЛЕКСЕЙ АЛЕКСАНДРОВИЧ**

**ВЛИЯНИЕ РЕАЛЬНОЙ МАГНИТНОЙ  
СТРУКТУРЫ НА ВЫСОКОЧАСТОТНЫЕ И  
ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА  
МНОГОПОДРЕШЕТОЧНЫХ МАГНЕТИКОВ**

01.04.07 – Физика твердого тела

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертация на соискание ученой степени кандидата  
физико-математических наук

Донецк-1994

13 29,607

Работа выполнена в Донецком физико-техническом институте АН Украины

ЛННБ України ім. В. Стефаніка  
00777808 (.)

Научный руководитель:

доктор физико-математических наук КРИВОРУЧКО В.Ч.

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук ДАНЬШИН Н.К.  
кандидат физико-математических наук ЛЬВОВ В.А.

Ведущая организация: Физико-технический институт низких температур АН Украины, г. Харьков

Защита состоится "12" мая 1994 года в 13<sup>00</sup> часов на заседании специализированного совета Д016.32.01. в Донецком физико-техническом институте АН Украины (340114, Донецк, ул. Розы Люксембург 71).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Донецкого физико-технического института.

Автореферат разослан "8" апреля 1994 года

Ученый секретарь  
специализированного совета Д016.32.01  
физико-математических наук

*Е.Е. Соловьев*

Соловьев Е.Е.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. На протяжении последних десятилетий высокочастотные и термодинамические свойства многоподрешеточных магнетиков вызывают повышенный интерес у широкого круга исследователей и практиков. Развитие науки и техники ставит все новые и новые вопросы, связанные с исследованием реальных кристаллов. Так, открытие высокотемпературной сверхпроводимости (ВТСП) в  $R_{2-x}Sr_xCuO_4$  и  $RBa_2Cu_3O_{4-\delta}$  ( $R = La, Nd, Pr, Sm, Dy, Gd, \dots$ ) вызвало повышенный интерес к магнитным свойствам этих соединений. Характерной особенностью ВТСП систем является то, что в диэлектрической фазе все они – квазидвумерные антиферромагнетики. Как известно, без учета реальной многоподрешеточной структуры нельзя построить адекватную теорию квазинизкоразмерных магнетиков. Дело в том, что в таких магнетиках обменные моды магнитных колебаний, наравне с акустическими, участвуют в формировании их высокочастотных и термодинамических свойств. Кроме того, в квазинизкоразмерных системах величина слабого межслоевого обменного взаимодействия может оказаться сравнимой с величиной анизотропных взаимодействий. Все это указывает на то, что для удовлетворительного описания высокочастотных и термодинамических свойств низкоразмерных магнетиков необходимо учитывать их реальную многоподрешеточную структуру.

Многоподрешеточные магнетики вызывают интерес не только с академической, но и с технической точки зрения. Большинство традиционно используемых в технике сверхвысоких частот магнитоупорядоченных кристаллов являются многоподрешеточными. К ним относятся гексаферриты (24 магнитных подрешетки) и феррит-гранаты (например железо-иттриевый гранат (ЖИГ) с 20 магнитными подрешетками). Кроме того, многоподрешеточные магнетики в перспективе могут выполнять роль материалов для приборов субмиллиметрового диапазона, поскольку энергия активации обменных магновов соответствует именно этому диапазону. Все вышесказанное делает актуальной проблему построения конструктивной теории высокочастотных и термодинамических свойств многоподрешеточных магнетиков.

Цель диссертационной работы – учет влияния реальной магнитной структуры на высокочастотные и термодинамические свойства многоподрешеточных магнетиков. Выбор цели обусловлен тем, что исследова-

ные методы описания реальных многоподрешеточных систем часто дают лишь качественное описание результатов эксперимента. Актуальным же, в настоящее время, является выход на количественное соответствие теории и эксперимента, которое можно получить лишь при последовательном учете реальной магнитной структуры кристаллов.

Научную новизну работы определяют следующие результаты, которые выносятся на защиту:

1. С учетом реальной магнитной структуры теоретически определена и проанализирована температурная зависимость подрешеточной намагниченности  $La_2CuO_4$ . Сравнение экспериментальных данных и теоретических результатов позволило восстановить величины обменных и анизотропных взаимодействий в  $La_2CuO_4$  (см. табл. 1).

2. С учетом редкоземельной магнитной (РЗ) подсистемы исследованы высокочастотные свойства коллинеарных и ортогональных фаз  $Na_2CuO_4$ , допустимых пространственной группой  $I4/mmm$ . Проанализированы условия возбуждения частот АФМР и интенсивность поглощения высокочастотного поля на этих частотах. Показано, что наличие РЗ магнитной подсистемы приводит к возможности возбуждения собственных колебаний не только магнитным, но и электрическим полем, что и наблюдалось экспериментально [1],[2]. Установлено, что для данного соединения частоты АФМР различным образом зависят от величины внешнего магнитного поля, приложенного вдоль тетрагональной оси, что может быть использовано при экспериментальном определении состояния системы.

3. Проанализировано влияние магнитной примеси замещения на температурную зависимость подрешеточной намагниченности в соединении  $La_2Cu_{1-x}Fe_xO_4$ . Показано, что исходная квазидвумерная магнитная структура  $La_2CuO_4$  вблизи магнитной примеси замещения трехмеризуется. В приближении молекулярного поля дана оценка величины обменного взаимодействия  $J(Cu - Fe) \approx 0.25J(Cu - Cu)$ .

4. Изучен спектр примесных состояний квазидвумерного ферромагнетика в зависимости от величины взаимодействия атома примеси с атомами матрицы при различных соотношениях межслоевого и внутрислоевого обменных взаимодействий в матрице. Рассчитаны температурные зависимости намагниченности атома примеси и его ближай-

ших соседей, а также магнитный вклад в теплоемкость.

5. Построена регулярная процедура нахождения длинноволнового спектра многоподрешеточного ферримагнетика. Получены аналитические выражения для всех двадцати ветвей спектра спиновых волн ЖИГ в зависимости от волнового вектора.

Научное и практическое значение работы определяется тем, что полученные в ней результаты углубляют и расширяют существующие представления о природе магнитных свойств многоподрешеточных магнетиков. Все вычисления были проведены для конкретных соединений, что позволило учесть влияние реальной магнитной структуры на их высокочастотные и термодинамические свойства. Приведенные в диссертации значения величин магнитных взаимодействий в  $La_2CuO_4$  могут быть использованы при изучении различных характеристик данного соединения. Выяснение роли РЗ подсистемы в формировании высокочастотных свойств  $Nd_2CuO_4$  позволяет адекватным образом объяснить наблюдаемые и прогнозировать новые высокочастотные эффекты.

С методической точки зрения, предложенная в работе процедура вычисления спектра спиновых волн может быть применена для любых ферримагнетиков. Отметим, что для многих соединений именно длинноволновая часть спектра определяет термодинамику системы.

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы представлялись на следующих конференциях, совещаниях, семинарах: II Всесоюзная конференция по высокотемпературной сверхпроводимости (Киев, 1989); XXIX Совещание по физике низких температур (Казань, 1992); XIX Всесоюзная конференция по физике магнитных явлений (Ташкент, 1991); International symposium on high-T superconductivity and tunneling phenomena (Donetsk, 1992); VI научный семинар "Физика магнитных явлений" (Донецк, 1993).

Структура диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении сформулирована тема диссертации, обоснованы ее актуальность и выбор объектов исследования, указана цель работы, а также кратко изложено содержание диссертации.

В первой главе с учетом всех магнитных подрешеток системы был проанализирован спектр спиновых волн и температурная зависимость подрешеточной намагниченности и теплоемкости  $La_2CuO_4$ . Показано, что наиболее существенное влияние на высокочастотные и термодинамические свойства данного соединения оказывают следующие взаимодействия: внутрислоевое обменное взаимодействие ближайших соседей  $J$ ; обусловленные орторомбическими искажениями внутрислоевое обменно-релятивистское взаимодействие Дзялошинского  $d$  и межслоевой эффективный обмен  $i$ ; из анизотропных взаимодействий - сохраняющиеся в тетрагональной фазе одноосные анизотропии внутри- ( $A_1$ ) и межслоевой ( $A$ ) происхождения. Сравнение теоретических результатов с данными прецизионных измерений методом ЯКР подрешеточной намагниченности  $La_2CuO_4$  (см. рис.1) позволило восстановить величины эффективных обменных и анизотропных взаимодействий в данном соединении (см. табл.1).

Ко времени начала данных исследований в литературе приводились оценки величины  $J$  в диапазоне от 850К до 1600К. Различия в оценках анизотропных взаимодействий и слабого трехмеризирующего обмена составляли два порядка. Необходимо отметить, что для восстановления параметров магнитных взаимодействий в  $La_2CuO_4$  применялись не только разные экспериментальные методики, но и теоретические модели, учитывающие различные анизотропные взаимодействия. Используемое нами теоретическое описание учитывает все наиболее существенные взаимодействия. Это позволяет систематизировать полученные ранее результаты.

Наши расчеты показывают, что наилучшего совпадения экспериментальной и теоретической температурной зависимости подрешеточной намагниченности  $La_2CuO_4$  можно достичь при  $J = 1000 \div 1200K$ ;  $i = 0.01 \div 0.1K$ ;  $A_1 = 0.1 \div 5K$ ;  $A = 0.05 \div 0.2K$ ;  $d \simeq 6K$  (см. табл.1). Для различных значений  $J$  в этом интервале получены возможные значения анизотропных параметров. Анализ спектра спиновых волн, с точки

Таблица 1: Значения магнитных параметров  $La_2CuO_4$ , при которых теоретическая зависимость  $M(T)$  совпадает (в пределах 1-2%) с экспериментальной вплоть до температуры  $T^*$

N п/п	J	i	A	$A_2$	d	$T^*$
1	880	0.03	0.4	1.5	6	280
2	1000	0.01	0.1	3	6	260
3	1000	0.01	0.2	1.4	6	260
4	1000	0.01	0.4	0.15	6	270
5	1000	0.1	0.1	1.5	6	260
6	1000	0.1	0.2	0.6	6	270
7	1100	0.01	0.1	1.2	6	260
8	1100	0.01	0.2	0.4	6	260
9	1100	0.045	0.08	1	6	260
10	1100	0.1	0.1	0.5	6	260
11	1100	0.1	0.2	0.05	6	250
12	1100	0.01	0.05	1.1	6	240
13	1200	0.01	0.1	0.5	6	243
14	1200	0.01	0.2	0.1	6	220
15	1200	0.1	0.05	0.4	6	245
16	1200	0.1	0.1	0.1	6	240
17	1250	0.02	0.08	0.4	6	220

Примечание. Значения всех параметров приведены в К.

зрения влияния на него слабых трехмерных взаимодействий, показал, что при определенных условиях одна из обменных мод может оказаться ниже акустических.

В  $La_2CuO_4$  только ионы меди имеют отличный от нуля магнитный момент. В то же время, широко исследуемые на практике соединения  $R_2CuO_4$  ( $R = Nd, Sm, Gd$ ) имеют редкоземельную (РЗ) магнитную подсистему, оказывающую заметное влияние на высокочастотные и термодинамические свойства этих магнетиков. Выяснению роли РЗ подсистемы в формировании высокочастотных свойств  $Nd_2CuO_4$ , посвящается вторая глава.

Необходимо отметить, что более высокая, по сравнению с  $La_2CuO_4$ , симметрия кристаллической решетки, сохраняющаяся до самых низких температур, приводит к возможности существования как коллинеарных, так и существенно неколлинеарных магнитных фаз. Неколлинеарная магнитная структура была предложена в связи с нейтронными экспериментами, выполненными на  $Nd_2CuO_4$ . Однако, в результате

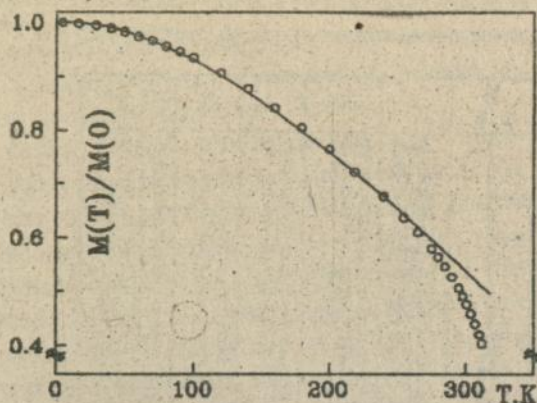


Рис. 1: Экспериментальная (точки) и теоретическая (сплошная кривая  $J = 1100\text{K}$ ;  $i = 0.045\text{K}$ ;  $A_z = 1\text{K}$ ;  $A = 0.08\text{K}$ ;  $d = 6\text{K}$ ) зависимости подрешеточной намагниченности  $\text{La}_2\text{CuO}_4$ .

дальнейших обсуждений выяснилось, что нейтроннографические данные не могут быть интерпретированы однозначно. В этой связи особую актуальность приобретают исследования по магниторезонансным свойствам и спин-переориентационным фазовым переходам, которые достаточно однозначно связаны с типом магнитной структуры.

Теоретический анализ экспериментов по антиферромагнитному резонансу (АФМР) и ориентационным фазовым переходам в  $\text{Nd}_2\text{CuO}_4$  возможен с двух различных позиций. Так, в работе [3] предполагается, что кристаллическая структура данного соединения при  $T \approx 300\text{K}$  испытывает структурный переход из симметричной фазы с пространственной группой  $I4/m\bar{m}m$  в дисимметричную фазу с пространственной группой  $P4/m\bar{m}m$ . При этом тетрагональный характер решетки сохраняется, а ионы меди смещаются в базисной плоскости. В рамках такого подхода исследованы допустимые симметрией магнитные структуры и нормальные моды однородных колебаний медной подсистемы  $\text{Nd}_2\text{CuO}_4$ , особенности одномагнитного рассеяния света на обменных модах.

Иной подход, основанный на предположении, что пространственная группа кристалла  $I4/m\bar{m}m$  сохраняется вплоть до самых низких

температур, предложен в работе [4]. В рамках такого подхода исследованы допустимые симметрией магнитные фазы и нормальные моды опвородных колебаний.

Вместе с тем, ко времени начала наших исследований, оба подхода были недостаточно разработаны. Прежде всего это относится к выяснению роли РЗ магнитных моментов, которые в реальных кристаллах оказывают заметное влияние на высокочастотные и термодинамические свойства системы. Во второй главе, в рамках предположений [4] исследованы высокочастотные свойства  $Nd_2CuO_4$  во внешнем магнитном поле, направленном вдоль тетрагональной оси. Нами явно учтена РЗ подсистема, наличие которой проявляется уже при температурах значительно превышающих температуру упорядочения самой РЗ подсистемы. С учетом РЗ подсистемы сформулированы условия существования коллинеарных и неколлинеарных магнитных фаз; дана симметричная классификация собственных магнитных колебаний и проанализирована возможность их возбуждения радиочастотными методами. Показано, что наличие РЗ магнитной подсистемы приводит к возможности возбуждения собственных колебаний не только магнитным, но и электрическим полями, что наблюдалось экспериментально [1], [2]. Выполнен сравнительный анализ резонансных свойств  $Nd_2CuO_4$  для различных магнитных фаз, реализуемых в этом соединении. Показано, что, в отличие от коллинеарных фаз, в неколлинеарных фазах существуют частоты АФМР линейно зависящие от внешнего магнитного поля. Такая зависимость наблюдалась экспериментально и подтверждает предположение о существовании неколлинеарной структуры в  $Nd_2CuO_4$ . Отметим, что аналогичный результат в подходе [3] одновременно с нами был получен в работе [5].

В третьей главе обсуждается влияние примеси на магнитные свойства квазинизкоразмерных магнетиков. Исследования данной главы тесно связаны с материалом первой главы. Дело в том, что для восстановления магнитных параметров ВТСП материалов (и не только их), часто применяются различные экспериментальные методики, требующие наличия примесных атомов. Примесь неизбежно искажает исходную магнитную структуру, что зачастую выпускается из виду при расшифровке экспериментальных результатов. Как показано в диссертации, учет этого искажения особенно существенен для квазинизко-

размерных систем. Так, при измерении намагниченности  $La_2CuO_4$  методом Мессбауэровской спектроскопии, фактически измеряется не намагниченность ионов  $Cu^{2+}$ , а намагниченность ионов  $Fe^{3+}$  в матрице  $La_2CuO_4$ . Следствием этого является существенное различие данных по температурной зависимости подрешеточной намагниченности полученных разными методами. Анализ влияния примеси замещения на магнитную структуру  $La_2CuO_4$  и посвящен первый раздел данной главы. Показано, что введение слабо связанной примеси в матрицу  $La_2CuO_4$  приводит не только к изменению величин магнитных взаимодействий, но и к возникновению трехмеризации магнитной структуры вблизи примеси. Во втором и третьем разделах главы изучается влияние такого трехмеризирующего "примесного" взаимодействия на магнитные свойства квазидвумерного ферромагнетика с присесью. Исследован спектр магнитных примесных состояний квазидвумерного гайзенберговского ФМ с простой тетрагональной решеткой. Энергия примесных  $s$ -,  $p$ -,  $d$ -,  $f$ -мод получена как функция обменной энергии взаимодействия примесь-матрица ( $S'I'$ ) и отношения обменных параметров матрицы  $\lambda = i/I$  ( $I$  - внутрислоевое,  $i$  - межслоевое обменные взаимодействия спинов матрицы). Показано, что  $s_0$ -,  $s_1$ -,  $p$ - и  $f$ -уровни проявляют те же особенности поведения что и в 2D-системе. А именно:  $s_2$ -,  $p$ - и  $f$ -состояния существуют только для сильно связанной примеси, а низколежащий  $s_0$ -уровень - только для слабо связанной примеси. В то же время, условия возникновения  $s_1$ - и  $d$ - состояний сильно зависят от трехмеризирующего параметра  $\lambda$ . Так, если при  $\lambda = 1$   $d$ -уровень возникает при  $\delta = I'/I = 4.09$ , то при  $\lambda = 10^{-6}$  это состояние появляется уже при  $\delta = 0.85$ , а в 2D системе,  $\lambda = 0$ , локальный  $d$ -уровень возникает при любом  $\delta \neq 0$ . Аналогичное поведение от  $\lambda$  установлено и для локального  $s_1$ -уровня. На рис.2 представлена зависимость энергии  $s$ -уровней от величины параметра  $\delta$  при различных  $\lambda$ .

Изучено влияние примесного атома на распределение намагниченности вблизи примеси и на теплоемкость.

Как известно, для изучения высокочастотных и термодинамических свойств магнетиков прежде всего необходимо определять спектр элементарных возбуждений. В тоже время микроскопической теория магнетика, содержащего более чем два магнитных иона в элементарной ячейке, технически достаточно сложна. Значительные вычислитель-

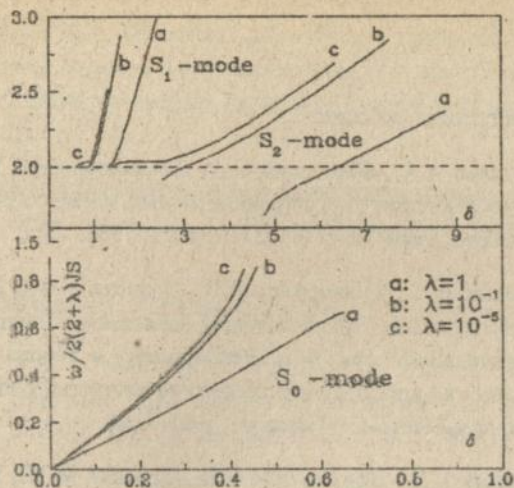


Рис. 2: Зависимость энергии  $z$ -состояний от параметра  $\delta = I'/I$  при различных величинах  $\lambda = i/I$ .

ные трудности возникают уже при нахождении спектра элементарных возбуждений, не говоря уже об исчерпывающем описании высокочастотных и термодинамических свойств. Если гамильтониан и основное состояние обладают некоторой дополнительной симметрией, можно значительно упростить расчет спектра, применив метод расширенной трансляционной симметрии (РТС) [6]. Вместе с тем, для многих соединений, к числу которых относятся, например, феррит-гранаты, применение метода РТС невозможно из-за отсутствия такой симметрии. В четвертой главе для таких систем предложена регулярная процедура нахождения спектра многоподрешеточного ферромагнетика в длинноволновом приближении. Известно, что с помощью симметричного анализа можно легко определить спектр спиновых волн для некоторых, наиболее симметричных, направлений волнового вектора. В этой главе показано, что зная спектр в выделенных направлениях, можно определить спектр для произвольных направлений волнового вектора. Получены аналитические выражения для всех двадцати ветвей спектра спиновых волн ЖИГ в зависимости от волнового вектора.

Основные новые результаты, полученные в диссертации, опублико-

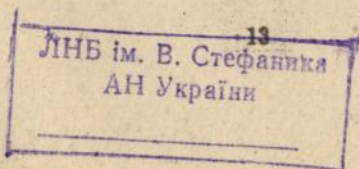
ваны в следующих работах:

1. Шестаков А.А., Яблонский Д.А. Длинноволновое приближение в теории спектров многоподрешеточных магнетиков.  $Y_3Fe_5O_{12}$ . // Препринт ДонФТИ № 89-51.- Донецк, 1989.- 32 с.
2. Дорошев В.Д., Криворучко В.Н., Савоста М.М., Шестаков А.А., Яблонский Д.А. Температурная зависимость подрешеточной намагниченности  $La_2CuO_4$ . Эксперимент и теория. // в кн.: XIX Всесоюзная конференция по физике магнитных явлений. Тезисы докладов. Часть 2.- Ташкент, 1991.- с.30.
3. Дорошев В.Д., Криворучко В.Н., Савоста М.М., Шестаков А.А., Яблонский Д.А. Экспериментальное и теоретическое исследование температурной зависимости подрешеточной намагниченности  $La_2CuO_4$ . // ЖЭТФ.- 1992.- т.101, вып.1.- с.190-202.
4. Криворучко В.Н., Шестаков А.А. Резонансные свойства  $Nd_2CuO_4$ . // в кн.: XXIX Сопещание по физике низких температур. Тезисы докладов. Часть 3.- Казань, 1992.
5. Krivoruchko V.N., Shestakov A.A. The resonance properties of  $Nd_2CuO_4$ . //in: International symposium on high- $T_c$  superconductivity and tunneling phenomena.- Donetsk, 1992.- p.30.
6. Криворучко В.Н., Шестаков А.А., Яблонский Д.А. Магнитная структура и резонансные свойства  $Nd_2CuO_4$ . // ФНТ.- 1992.- т.18.- с.1230-1241.
7. Дорошев В.Д., Криворучко В.Н., Шестаков А.А. Трехмеризация магнитной структуры  $La_2CuO_4$  вблизи примеси замещения. // ФТТ.- 1993.- т.35, №3.- с. 847-849.
8. Дорошев В.Д., Шестаков А.А. Влияние примеси замещения на магнитную структуру  $La_2CuO_4$ . // в кн.: VI научный семинар "Физика магнитных явлений". Тезисы докладов.- Донецк, 1993.- с.151.

9. Криворучко В.Н., Шестаков А.А. Спектр примесных возбуждений квазидвумерного ферромагнетика. // в кн.: VI научный семинар "Физика магнитных явлений". Тезисы докладов.- Донецк, 1993.- с.30.
10. Криворучко В.Н., Шестаков А.А. Примесные состояния квазидвумерного ферромагнетика. // ФНТ.-1993.-т.19.- N11.-с.1223-1226.

## Цитированная литература

- [1] Еременко В.В., Звягин С.А., Пишко В.В., Цапенко В.В., Барило С.Н., Жигунов Д.И. Обнаружение магнитного резонанса в  $Rr_2CuO_4$  и  $Nd_2CuO_4$ . // Письма в ЖЭТФ.- 1990.- т.52, вып.6.- с.955-956.
- [2] Степанов А.А., Кобец М.И., Пащенко В.А., Звягин А.И., Жигунов Д.И., Барило С.Н. АФМР и ориентационные фазовые переходы в  $Nd_2CuO_4$ . Доказательство существования неколлинеарной структуры. // ФНТ.- 1991.- т.17, №6.- с.793-795.
- [3] Блякин В.А., Витебский И.М., Колотий О.Д., Лавриненко Н.М., Семиноженко В.П., Соболев В.Л. Влияние особенностей кристаллической структуры на магнитные свойства  $Nd_2CuO_4$ . // ЖЭТФ.- 1990.- т.98, вып.6(12).- с.2098-2109.
- [4] Яблонский Д.А. Особенности магнитного упорядочения высокотемпературных сверхпроводников со структурой  $R_2CuO_4$ . // СФХТ.- 1990.- т.3, N12.- с.2706-2711.
- [5] Блякин В.А., Пашкевич Ю.Г., Еременко В.В., Звягин С.А., Пишко В.В. Антиферромагнитный резонанс в  $Nd_2CuO_4$ . // ФНТ.- 1992.- т.18.- с.1215-1229.
- [6] Алистратов А.Л., Яблонский Д.А., Расширенная трансляционная симметрия в теории многоподрешеточных магнетиков. Спинные волны, фазовые переходы, доменные границы в антиферромагнетиках типа  $UX_n$ . // ЖЭТФ.- 1988.- т.94, вып.11.- с.194-207.



Ответственный за выпуск М.А. Белоголовский

Подписано к печати

Формат 60 x 84/16. Бумага офсетная.

Печать офсетная. Усл. печ. л. 1.0. Уч.-изд. 1.0.

Тираж 100 экз. Заказ 1

---

Ротапринт ИЭП АН Украины

340048, Донецк-48, ул. Университетская, 77

461783

AB 29.601

**AB 29.601**