

## Влияние высокого давления на кристаллическую и магнитную структуру кобальтита $\text{Nd}_{0.78}\text{Ba}_{0.22}\text{CoO}_3$

Н. О. Голосова<sup>+</sup>, Д. П. Козленко<sup>+</sup>, В. В. Сиколенко<sup>+\*</sup>, А. П. Сазонов<sup>∇</sup>, И. О. Троянчук<sup>∇</sup>, Б. Н. Савенко<sup>+</sup>,  
В. П. Глазков<sup>□</sup>

<sup>+</sup>Объединенный институт ядерных исследований, 141980 Дубна, Россия

<sup>\*</sup>Berlin Neutron Scattering Center, Hahn-Meitner Institut, D-14109 Berlin, Germany

<sup>∇</sup>Объединенный институт физики твердого тела и полупроводников НАН Беларуси, 220072 Минск, Беларусь

<sup>□</sup>Российский научный центр “Курчатовский институт”, 123182 Москва, Россия

Поступила в редакцию 16 мая 2006 г.

Методом нейтронной дифракции исследована кристаллическая и магнитная структура кобальтита  $\text{Nd}_{0.78}\text{Ba}_{0.22}\text{CoO}_3$  при высоких давлениях до 4.2 ГПа в диапазоне температур 10–300 К. Получены барические зависимости структурных параметров. При нормальном давлении ниже  $T_C \sim 140$  К наблюдалось ферромагнитное упорядочение Co подрешетки, а при  $T_F \sim 40$  К – появление ферримагнитного упорядочения подрешеток Co и Nd с антипараллельным направлением магнитных моментов. Величина магнитного момента Co и температура  $T_C$  слабо изменяются под давлением, что свидетельствует о стабильности исходного промежуточно-спинового ( $S = 1$ ) состояния ионов  $\text{Co}^{3+}$ . Такое поведение значительно отличается от характерного поведения близких по химическому составу и структуре кобальтитов с ферромагнитным упорядочением только подрешетки Co, в которых наблюдается существенное подавление величины магнитного момента Co и уменьшение  $T_C$  при воздействии давления, связанное с изменением состояния ионов  $\text{Co}^{3+}$  с промежуточно-спинового на немагнитное низкоспиновое ( $S = 0$ ). Обсуждается взаимосвязь между наличием магнитного взаимодействия подрешеток R–Co и стабильностью спинового состояния ионов  $\text{Co}^{3+}$  в  $\text{Nd}_{0.78}\text{Ba}_{0.22}\text{CoO}_3$  под давлением.

PACS: 62.50.+p, 75.25.+z, 75.47.Lx

**Введение.** Легированные кобальтиты  $\text{R}_{1-x}\text{A}_x\text{CoO}_3$  (R – редкоземельный, A – щелочноземельный элемент) имеют ряд уникальных физических свойств и широкий круг технологических применений в качестве электродов, газовых мембран, катализаторов, что вызывает большой интерес к всестороннему исследованию данных соединений [1]. Нелегированные соединения  $\text{RCoO}_3$  при нормальном давлении и низких температурах являются немагнитными диэлектриками. С повышением температуры происходит переход в парамагнитное состояние, связанное с изменением электронной конфигурации ионов  $\text{Co}^{3+}$  с низкоспиновой (НС,  $t_{2g}^6 e_g^0$ ,  $S = 0$ ) на промежуточно-спиновую (ПС,  $t_{2g}^5 e_g^1$ ,  $S = 1$ ) при  $T \sim 100$  К ( $\text{LaCoO}_3$ ) – 800 К ( $\text{YCoO}_3$ ), а также переход диэлектрик-металл при  $T \sim 500$  К ( $\text{LaCoO}_3$ ) – 800 К ( $\text{YCoO}_3$ ) [2–5]. В случае  $\text{LaCoO}_3$  переход в металлическое состояние сопровождается увеличением эффективного парамагнитного момента, которое, как предполагается, может быть связано с еще одним изменением электронной конфигурации ионов  $\text{Co}^{3+}$  с ПС на высокоспиновое (ВС) состояние ( $t_{2g}^4 e_g^2$ ,  $S = 2$ ) [2, 4, 6].

При замещении редкоземельного щелочноземельным элементом в соединениях  $\text{R}_{1-x}\text{A}_x\text{CoO}_3$  ( $\text{R}_{1-x}\text{A}_x[(\text{Co}^{3+})_{1-x}(\text{Co}^{4+})_x]\text{O}_3$ ) при  $x > 0.18$  наблюдается возникновение ферромагнитного (ФМ) металлического состояния [1, 7–10], которое может быть объяснено на основе механизма двойного обмена делокализованных  $e_g$  электронов между ионами  $\text{Co}^{3+}$ , находящимися в ПС ( $t_{2g}^5 e_g^1$ ,  $S = 1$ ) состоянии, и  $\text{Co}^{4+}$ , находящимися в НС состоянии ( $t_{2g}^5 e_g^0$ ,  $S = 1/2$ ) посредством ионов кислорода. Недавно было обнаружено, что влияние высокого давления приводит к значительному изменению магнитных и транспортных свойств легированных кобальтитов. В соединениях  $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{CoO}_3$  и  $\text{La}_{1-x}\text{Ca}_x\text{CoO}_3$  наблюдается уменьшение температуры Кюри, магнитного момента ионов Co и сильное подавление электропроводности [11–13]. В соединениях  $\text{Pr}_{1-x}\text{Ca}_x\text{CoO}_3$  происходит индуцированный давлением переход из металлического в диэлектрическое состояние [14]. Было предположено, что такое поведение при высоких давлениях вызвано изменением спинового состояния части ионов  $\text{Co}^{3+}$  из магнитного ПС ( $t_{2g}^5 e_g^1$ ,  $S = 1$ ) в немагнитное НС ( $t_{2g}^6 e_g^0$ ,  $S = 0$ )

[11–13]. Исследование магнитных свойств  $\text{LaCoO}_3$  также показало, что приложение высокого давления приводит к заметному увеличению разницы между уровнями энергии НС и ПС состояний и, как следствие, к значительному уменьшению заселенности ПС состояния [15]. Данная разница определяется энергией расщепления основного состояния ионов кобальта в кристаллическом электрическом поле, которая зависит от геометрии октаэдров  $\text{CoO}_6$  и длины валентной связи  $\text{Co-O}$ .

Для количественного объяснения наблюдаемых в легированных кобальтатах физических явлений необходима информация об изменениях кристаллической и магнитной структуры данных соединений при высоких давлениях. В настоящее время поведение кристаллической и магнитной структуры под давлением было достаточно подробно изучено только для случая легированных кобальтитов  $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{CoO}_3$  с ромбоэдрической структурой. В то же время влияние высокого давления на легированные кобальтиты с орторомбической структурой и меньшим ионным радиусом R-элемента (Pr, Nd и др.) мало изучено. Отдельно среди орторомбических кобальтитов можно выделить соединения  $\text{Nd}_{1-x}\text{Sr}_x\text{CoO}_3$  и  $\text{Nd}_{1-x}\text{Ba}_x\text{CoO}_3$ , в которых из-за магнитного взаимодействия между подрешетками редкоземельных и переходных элементов наблюдается ферримагнитное упорядочение магнитных моментов ионов Nd и Co антипараллельно друг другу [1, 10, 16]. Настоящая работа посвящена исследованию влияния внешнего высокого давления на кристаллическую и магнитную структуру кобальтита  $\text{Nd}_{0.78}\text{Ba}_{0.22}\text{CoO}_3$  в области низких температур методом нейтронной дифракции и изучению взаимосвязи между наблюдаемыми структурными изменениями и изменениями магнитных свойств.

**1. Описание эксперимента.** Соединение  $\text{Nd}_{0.78}\text{Ba}_{0.22}\text{CoO}_3$  было получено методом стандартной твердофазной реакции, подробности описаны в [1]. Эксперименты по нейтронной дифракции проводились на спектрометре ДН-12 [17] импульсного высокопоточного реактора ИБР-2 (ЛНФ им. И.М. Франка, ОИЯИ, Дубна) с использованием камер высокого давления с сапфировыми наковальнями [18] в диапазоне внешних высоких давлений до 4.2 ГПа и температур 10–300 К. Дифракционные спектры измерялись при угле рассеяния  $2\theta = 90^\circ$  с разрешением  $\Delta d/d = 0.016$ . Характерное время измерения одного спектра – 20 ч. Объем исследуемых образцов составлял  $V \sim 2.5 \text{ мм}^3$ . Давление в камере измерялось по сдвигу линии люминесценции рубина с точностью 0.05 ГПа. В качестве величины

давления на образце использовалось значение, усредненное по величинам, определенным в нескольких точках поверхности образца. Градиент распределения давления по поверхности образца не превышал 15%. Для проведения измерений с камерой высокого давления при низких температурах использовался специализированный криостат на базе гелиевого рефрижератора замкнутого цикла. Анализ дифракционных данных производился методом Ритвельда с помощью программ MRIA [19] (кристаллическая структура), и FullProf [20] (магнитная структура).

**2. Полученные результаты и обсуждение.** Фрагменты дифракционных спектров  $\text{Nd}_{0.78}\text{Ba}_{0.22}\text{CoO}_3$ , измеренных при внешних давлениях 0 и 4.2 ГПа и температурах 290 и 10 К, показаны на рис.1. Во всем исследуемом интер-

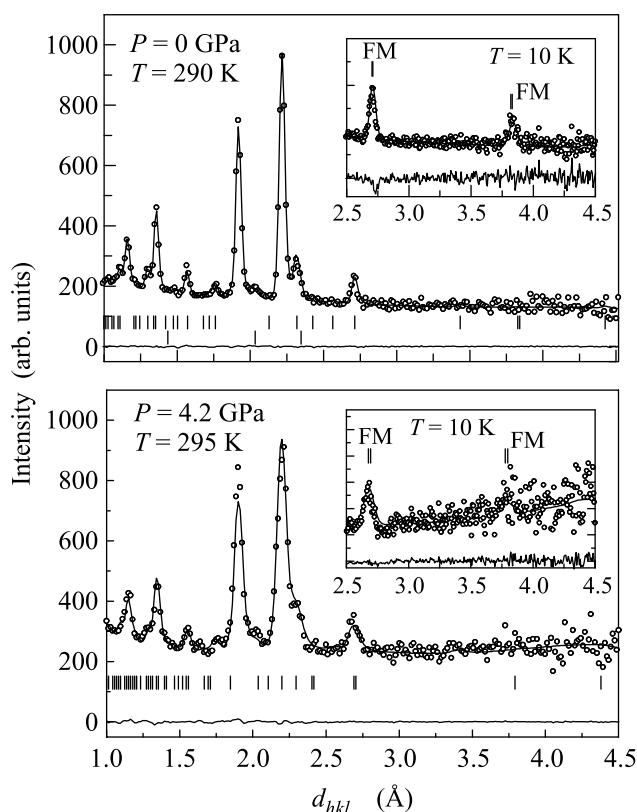


Рис.1. Фрагменты дифракционных спектров  $\text{Nd}_{0.78}\text{Ba}_{0.22}\text{CoO}_3$ , измеренных при температурах 290 и 10 К (вставка) при давлениях 0 ГПа (вверху) и 4.2 ГПа (внизу) и обработанные по методу Ритвельда. Показаны экспериментальные точки, вычисленный профиль и разностная кривая для  $T = 290 \text{ К}$ , отнормированная на среднее квадратичное отклонение в точке

вале давлений кристаллическая структура этого соединения сохраняет исходную орторомбичес-

Структурные параметры соединения  $\text{Nd}_{0.78}\text{Ba}_{0.22}\text{CoO}_3$  при различных давлениях и температурах. Атомы Nd/Ba находятся в позициях 4(a) ( $x, 0.25, z$ ), атомы Co – 4(b) (0, 0, 0.5), атомы O(1) – 4(e) ( $x, 0.25, z$ ) и атомы O(2) – 8(d) ( $x, y, z$ ) пространственной группы *R<sub>3</sub>ma*. Также приведены значения валентных связей Co-O1, Co-O2<sub>a,b</sub>, валентных углов Co-O1-Co и Co-O2-Co и магнитных моментов ионов  $\text{Co}^{3+}/\text{Co}^{4+}$  (при  $T = 10$  К).

<i>P</i> (ГПа)	0		4.2	
<i>T</i> (К)	290	10	290	10
<i>a</i> (Å)	5.461(3)	5.447(3)	5.408(5)	5.389(5)
<i>b</i> (Å)	7.655(4)	7.634(4)	7.580(7)	7.554(7)
<i>c</i> (Å)	5.421(3)	5.409(3)	5.370(5)	5.352(5)
Nd/Ba: <i>x</i>	0.012(2)	0.013(2)	0.003(5)	0.000(5)
<i>z</i>	0.003(2)	0.005(2)	0.014(5)	0.027(5)
O1: <i>x</i>	0.512(3)	0.497(3)	0.538(4)	0.545(4)
<i>z</i>	0.051(3)	0.058(3)	0.024(5)	0.022(5)
O2: <i>x</i>	0.269(3)	0.268(3)	0.254(6)	0.255(6)
<i>y</i>	0.031(3)	0.028(3)	0.036(6)	0.032(6)
<i>z</i>	0.731(3)	0.732(3)	0.746(6)	0.745(6)
Co-O1 (Å)	1.935(5)	1.934(5)	1.910(7)	1.908(7)
Co-O2 <sub>a</sub> (Å)	1.945(5)	1.937(5)	1.926(7)	1.915(7)
Co-O2 <sub>b</sub> (Å)	1.943(5)	1.935(5)	1.925(7)	1.914(7)
Co-O1-Co (°)	163.1(2)	161.3(2)	165.4(4)	163.8(4)
Co-O2-Co (°)	163.5(2)	164.9(2)	163.4(4)	165.2(4)
$\mu_{\text{Co}}$ (μВ)	–	0.8(1)	–	0.8(1)
<i>R<sub>p</sub></i> (%)	6.62	5.72	7.38	11.12
<i>R<sub>wp</sub></i> (%)	3.95	3.11	6.45	8.95

кую симметрию (пр. гр. *R<sub>3</sub>ma*). Рассчитанные на основе дифракционных данных структурные параметры  $\text{Nd}_{0.78}\text{Ba}_{0.22}\text{CoO}_3$  при различных давлениях и температурах представлены в таблице. Их величины при нормальных условиях находятся в хорошем согласии с предыдущими исследованиями [1]. С увеличением давления происходит практически изотропное сжатие кристаллической решетки, рассчитанные коэффициенты линейной сжимаемости параметров элементарной ячейки при  $T = 290$  К (таблица)  $k_i = -(1/a_{i0})(da_i/dP)_T$  ( $a_i = a, b, c$ ) составляют  $k_a = 0.0023$ ,  $k_b = 0.0023$  и  $k_c = 0.0022$  ГПа<sup>-1</sup>, соответственно. Их значения близки к величинам, полученным для кобальтитов с ромбоэдрической кристаллической структурой  $\text{LaCoO}_3$ ,  $k_a = 0.00194$ ,  $k_c = 0.00214$  ГПа<sup>-1</sup> [21] и  $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{CoO}_3$ ,  $k_a = 0.0020$ ,  $k_c = 0.0026$  ГПа<sup>-1</sup> [12]. С понижением температуры параметры элементарной ячейки при  $P = 0$  и 4.2 ГПа почти линейно уменьшаются (рис.2). Рассчитанные коэффициенты объемного теплового расширения  $\alpha_V = (1/V_0)(dV/dT)_P$  имеют довольно близкие значения  $2.8(4) \cdot 10^{-5}$  и  $3.6(5) \cdot 10^{-5}$  К<sup>-1</sup> при  $P = 0$  и 4.2 ГПа, соответственно.

В кристаллической решетке  $\text{Nd}_{0.78}\text{Ba}_{0.22}\text{CoO}_3$  с орторомбически искаженной структурой перовскита ионы кобальта располагаются в центре октаэдра, образованного шестью атомами кислорода. В дан-

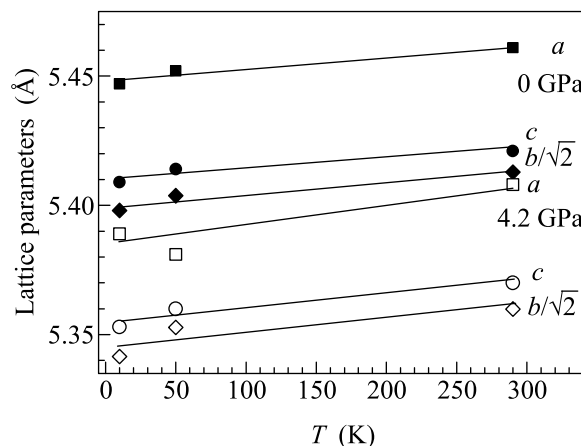


Рис.2. Температурные зависимости параметров элементарной ячейки  $\text{Nd}_{0.78}\text{Ba}_{0.22}\text{CoO}_3$  при давлениях 0 (черные точки) и 4.2 ГПа (светлые точки)

ной структуре есть три неэквивалентных валентных связи Co-O – Co-O1, направленная вдоль оси *b*, и Co-O2<sub>a</sub>, Co-O2<sub>b</sub>, расположенные в плоскости (*ac*). С увеличением давления происходит уменьшение всех длин связи Co-O1, Co-O2<sub>a</sub>, Co-O2<sub>b</sub> и увеличение валентных углов Co-O1-Co и Co-O2-Co (таблица). Коэффициенты линейной сжимаемости длин связи при  $T = 290$  К составляют  $k_{\text{Co-O1}} = 0.0030$ ,  $k_{\text{Co-O2}_a} = 0.0021$  и  $k_{\text{Co-O2}_b} = 0.0022$  ГПа<sup>-1</sup>. Эти значения близки к величинам, полученным для ромбоэдричес-

кого соединения  $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{CoO}_3$  [12] и изоструктурных орторомбических манганитов [22, 23].

С понижением температуры при нормальном давлении в дифракционных спектрах  $\text{Nd}_{0.78}\text{Ba}_{0.22}\text{CoO}_3$  наблюдалось увеличение интегральных интенсивностей групп пиков (200)/(002)/(121) на  $d = 2.70 \text{ \AA}$  и (101)/(020) на  $d = 3.82 \text{ \AA}$  (ядерный вклад в эту группу близок к нулю) (рис. 1) ниже  $T_C \sim 140 \text{ K}$ . При  $T = 50 \text{ K}$  экспериментальное отношение интегральных интенсивностей этих пиков  $Q = I_{(101)/(020)}/I_{(200)/(002)/(121)} = 3.2$ , что, согласно проведенному анализу дифракционных данных по методу Ритвельда, соответствует ферромагнитному упорядочению ионов Co вдоль оси  $b$  орторомбической структуры [16] с величиной магнитного момента  $\mu_{\text{Co}} = 0.70(7) \mu_B$ . При дальнейшем понижении температуры до  $10 \text{ K}$  наблюдалось значительное уменьшение отношения интегральных интенсивностей до величины  $Q = 1.3$ , которая существенно отличается от значения 2.4 (при  $10 \text{ K}$ ), ожидаемого для ФМ упорядочения ионов Co. При этом температурное поведение намагниченности  $\text{Nd}_{0.78}\text{Ba}_{0.22}\text{CoO}_3$ , измеренной в магнитном поле  $100 \text{ \AA}$  (рис.3, более под-

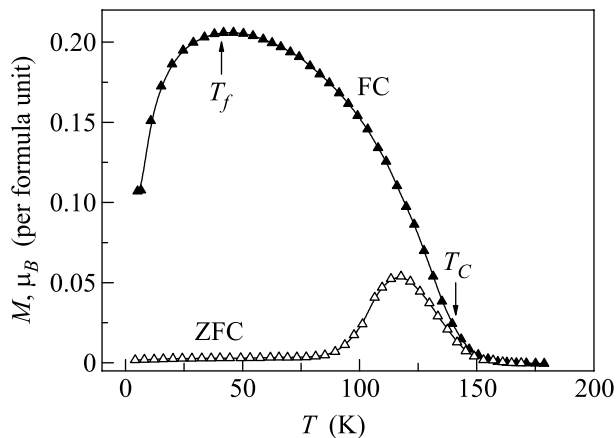


Рис.3. Намагниченность  $\text{Nd}_{0.78}\text{Ba}_{0.22}\text{CoO}_3$ , измеренная при нагревании в магнитном поле  $H = 100 \text{ \AA}$  после охлаждения в поле  $H = 100 \text{ \AA}$  (FC) и  $0 \text{ \AA}$  (ZFC)

робно результаты исследований магнитных свойств соединений  $\text{Nd}_{1-x}\text{Ba}_x\text{CoO}_3$  изложены в [12]), также отличается от ожидаемого для простого ферромагнетика. В области  $40 \text{ K} < T < T_C$  наблюдается возрастание намагниченности, а при  $T < 40 \text{ K}$  – ее уменьшение. Похожий эффект обнаружен также в  $\text{Nd}_{0.67}\text{Sr}_{0.33}\text{CoO}_3$  [10, 16]. В этом случае с помощью прецизионного нейтронографического исследования магнитной структуры было показано [16], что он связан с появлением ферримагнитного упорядочения ионов Co и Nd ниже  $T_F \approx 40 \text{ K}$ , характерной

особенностью которого является наличие ФМ Co и Nd подрешеток ионов с антипараллельным направлением магнитных моментов и их различной величиной в подрешетках (рис.4). Причина такого поведе-

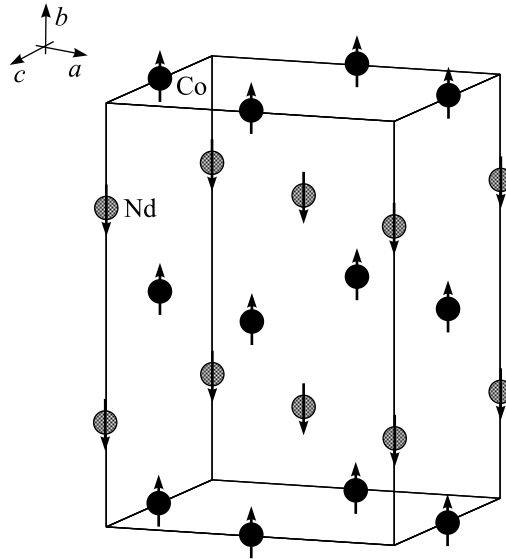


Рис.4. Ферримагнитная структура  $\text{Nd}_{0.78}\text{Ba}_{0.22}\text{CoO}_3$  (схематически показаны только атомы Co и Nd)

ния – слабое  $f-d$ -сверхобменное антиферромагнитное взаимодействие между подрешетками Co и Nd, приводящее к упорядочению магнитных моментов Nd, индуцированному магнитным полем, создаваемым ферромагнитной подрешеткой ионов Co [1, 16]. Описанная выше модель ферримагнитной структуры хорошо согласуется с дифракционными данными (рис.1) при  $T = 10 \text{ K}$ . Рассчитанные значения магнитных моментов ионов Nd и Co при этой температуре составили  $\mu_{\text{Nd}} = 0.86(7) \mu_B$ ,  $\mu_{\text{Co}} = 0.80(7) \mu_B$ , соответствующая величина  $Q \approx 1.3$  близка к экспериментальной.

Магнитный момент переходных металлов в оксидных соединениях определяется в основном спиновым вкладом. Порядок его величины в легированных кобальтатах  $\text{R}_{1-x}\text{A}_x\text{CoO}_3$  свидетельствует о том, что ионы  $\text{Co}^{3+}$  могут находиться либо в НС ( $S = 0$ ), либо в ПС ( $S = 1$ ) состояниях, а ионы  $\text{Co}^{4+}$  находятся в НС состоянии с  $S = 1/2$  [7, 12]. Полученная оценка значения  $\mu_{\text{Co}} = 0.80 \mu_B$  соответствует концентрации ионов  $\text{Co}^{3+}$  в НС состоянии около 50%. Для сравнения, аналогичная величина для  $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{CoO}_3$  составляет всего около 10% при нормальном давлении [7, 12]. При давлении  $P = 4.2 \text{ ГПа}$  и  $T = 50 \text{ K}$  рассчитанное из дифракционных данных соотношение интегральных интенсивностей  $Q \approx 4$  сравнимо с полученным при нормальном давлении, что соответствует ФМ

упорядочению только подрешетки Co. Рассчитанная величина магнитного момента  $\mu_{Co} = 0.7(1) \mu_B$  также близка к полученной при  $P = 0$ , что свидетельствует о незначительном изменении температуры Кюри под давлением. При  $P = 4.2$  ГПа и  $T = 10$  К полученное значение отношения интегральных интенсивностей  $Q \approx 1.8$  согласуется с моделью ферромагнитного упорядочения подрешеток Co и Nd с почти одинаковыми по абсолютной величине магнитными моментами  $\mu_{Co} \approx -\mu_{Nd} = 0.8(1) \mu_B$  (соответствующая величина  $Q \approx 1.4$ ).

В близком по химическому составу нелегированном кобальтите  $LaCoO_3$  влияние высокого давления приводит к стабилизации немагнитного HS состояния и подавлению парамагнитного PS состояния [15]. В легированных кобальтитах  $La_{1-x}Sr_xCoO_3$  и  $La_{1-x}Ca_xCoO_3$  ( $x = 0.15-0.3$ ) обнаружено заметное уменьшение величины магнитного момента ионов Co и температуры Кюри под давлением [11–13]. В  $Pr_{0.6}Ca_{0.4}CoO_3$  влияние сравнительно небольших давлений  $P \approx 1.5$  ГПа приводит к почти полному подавлению намагниченности [14]. Данные эффекты обусловлены подавлением PS состояния и стабилизацией HS состояния ионов  $Co^{3+}$  при высоких давлениях. В то же время воздействие высокого давления до 4.2 ГПа не приводит к уменьшению величины магнитного момента ионов Co в  $Nd_{0.78}Ba_{0.22}CoO_3$ . Данное различие может быть обусловлено наличием магнитной корреляции между подрешетками Nd и Co в  $Nd_{0.78}Ba_{0.22}CoO_3$ , которая отсутствует в  $La_{1-x}Sr_xCoO_3$ ,  $La_{1-x}Ca_xCoO_3$  и, по-видимому, существенно более слабо выражена в  $Pr_{1-x}Ca_xCoO_3$  из-за меньшей величины магнитного момента Pr по сравнению с Nd.

**Заключение.** Результаты настоящей работы показывают, что в  $Nd_{0.78}Ba_{0.22}CoO_3$  при нормальном давлении и низких температурах возникает ферромагнитное упорядочение магнитных подрешеток Nd и Co с противоположно направленными магнитными моментами. Воздействие высокого давления приводит к почти изотропному сжатию параметров орторомбической решетки и уменьшению длин связей Co–O. В отличие от других легированных кобальтитов –  $La_{1-x}Sr_xCoO_3$ ,  $La_{1-x}Ca_xCoO_3$  и  $Pr_{1-x}Ca_xCoO_3$ , в  $Nd_{0.78}Ba_{0.22}CoO_3$  не происходит подавления магнитного момента ионов  $Co^{3+}$  и температура Кюри остается почти неизменной в исследуемом диапазоне давлений. Данное обстоятельство указывает на существенное значение магнитного взаимодействия между редкоземельной и Co подрешеткой, более сильно выраженного в кобальтитах  $Nd_{1-x}A_xCoO_3$  ( $A = Ba, Sr$ ) по сравнению с други-

ми соединениями, которое, по видимому, является одним из главных факторов, обуславливающих стабильность промежуточного спинового состояния при воздействии давления в  $Nd_{0.78}Ba_{0.22}CoO_3$ .

Авторы благодарны С.Е. Кичанову за помощь в проведении эксперимента.

1. A. P. Sazonov, I. O. Troyanchuk, V. V. Sikolenko et al., *J. Phys.: Condens. Matter* **17**, 4181 (2005).
2. K. Asai, A. Yoneda, O. Yokokura et al., *J. Phys. Soc. Jpn.* **67**, 290 (1998).
3. J.-Q. Yan, J.-S. Zhou, and J. B. Goodenough, *Phys. Rev. B* **69**, 134409 (2004).
4. M. A. Senaris-Rodriguez and J. B. Goodenough, *J. Solid State Chem.* **116**, 224 (1995).
5. K. Knizek, Z. Jirak, J. Hejtmanek et al., *Eur. Phys. J. B* **47**, 213 (2005).
6. M. A. Korotin, S. Yu. Ezhov, I. V. Solovyev et al., *Phys. Rev. B* **54**, 5309 (1996).
7. J. Wu and C. Leighton, *Phys. Rev. B* **67**, 174408 (2003).
8. M. Kriener, C. Zobel, A. Reichl et al., *Phys. Rev. B* **69**, 094417 (2004).
9. I. O. Troyanchuk, D. D. Khalyavin, T. K. Solovykh et al., *J. Phys.: Condens. Matter* **12**, 2485 (2000).
10. D. D. Stauffer and C. Leighton, *Phys. Rev. B* **70**, 214414 (2004).
11. R. Lengsdorf, M. Ait-Tahar, S. S. Saxena et al., *Phys. Rev. B* **69**, 140403 (2004).
12. Н. О. Голосова, Д. П. Козленко, В. И. Воронин и др., *ФТТ* **48**, 90 (2006).
13. I. Fita, R. Szymczak, R. Puzniak et al., *Phys. Rev. B* **71**, 214404 (2005).
14. T. Fujita, T. Miyashita, Y. Yasui et al., *J. Phys. Soc. Jpn.* **73**, 1987 (2004).
15. K. Asai, O. Yokokura, M. Suzuki et al., *J. Phys. Soc. Jpn.* **66**, 967 (1997).
16. A. Krimmel, M. Reehuis, M. Paraskevopoulos et al., *Phys. Rev. B* **64**, 224404 (2001).
17. V. L. Aksenov, A. M. Balagurov, V. P. Glazkov et al., *Physica B* **265**, 258 (1999).
18. V. P. Glazkov and I. N. Goncharenko, *Fizika i Tekhnika Vysokih Davlenij* (in Russian) **1**, 56 (1991).
19. V. B. Zlokazov and V. V. Chernyshev, *J. Appl. Cryst.* **25**, 447 (1992).
20. J. Rodriguez-Carvajal, *Physica B* **192**, 55 (1993).
21. T. Vogt, J. A. Hriljac, N. C. Hyatt et al., *Phys. Rev. B* **67**, 140401 (2003).
22. D. P. Kozlenko, Z. Jirak, I. N. Goncharenko et al., *J. Phys.: Condens. Matter* **16**, 5883 (2004).
23. A. Arulraj, R. E. Dinnebier, S. Carlson et al., *Phys. Rev. Lett.* **94**, 165504 (2005).