

На правах рукописи



ДАНГ НГОК ТОАН

**ВЛИЯНИЕ ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ
НА КРИСТАЛЛИЧЕСКУЮ И МАГНИТНУЮ СТРУКТУРУ
ПРАЗЕОДИМ-СТРОНЦИЕВЫХ МАНГАНИТОВ**

Специальность 01.04.07 - физика конденсированного состояния

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Тула 2013

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Тульский государственный университет».

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, профессор
Левин Даниил Михайлович

Научный консультант: доктор физико-математических наук
Козленко Денис Петрович

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук, профессор **Захвалинский Василий Сергеевич**, профессор кафедры общей и прикладной физики Белгородского государственного национального исследовательского университета, г. Белгород

кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник **Клементьев Евгений Станиславович**, старший научный сотрудник ФГБУН "Институт ядерных исследований" РАН, г. Москва

Ведущая организация: ГБОУ ВПО МО "Международный университет природы, общества и человека «Дубна»", г. Дубна, Московская обл.

Защита состоится 12 октября 2013 г. в 13:30 часов на заседании диссертационного совета Д 212.015.04 при Белгородском государственном национальном исследовательском университете, адрес: 308015, г. Белгород, ул. Победы, 85.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Белгородского государственного национального исследовательского университета.

Автореферат разослан «___» сентября 2013 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат физ.-мат. наук



В. А. Беленко

Общая характеристика работы

Актуальность работы. Перовскито-подобные манганиты $A_{1-x}A'_xMnO_3$ (A – редкоземельный, A' – щелочноземельный элементы) проявляют большое разнообразие физических свойств в зависимости от типа A, A'-элементов и степени легирования x. К ним относятся структурные и магнитные фазовые переходы, переходы металл-диэлектрик, зарядовое упорядочение, фазовое расслоение, эффект колоссального магнетосопротивления (КМС) и др. Большинство этих явлений обусловлено наличием сильной корреляции между магнитными, электронными и транспортными свойствами манганитов, что приводит к их высокой чувствительности к изменению внешних условий (температуры, внешнего магнитного и электрического поля, высокого давления) и делает эти соединения перспективными для создания нового поколения записывающих и считывающих устройств для хранения информации, чувствительных датчиков магнитного поля и температуры и др.

Известно, что разнообразие типов магнитного упорядочения в манганитах, в первую очередь, связано с особенностями кристаллической структуры и, в частности, с искажениями кислородных октаэдров MnO_6 , валентных углов Mn-O-Mn, длин межатомных связей Mn-O и др. Для понимания природы и механизмов физических явлений, наблюдаемых в перовскитоподобных манганитах, важным является установление взаимосвязи кристаллических структурных параметров с изменениями магнитных структур и макроскопических свойств (магнитных и транспортных).

Магнитные свойства манганитов определяются балансом двух конкурирующих взаимодействий – двойного обмена, связанного с выигрышем в кинетической энергии за счет переноса делокализованных e_g электронов в цепочках $Mn^{3+}-O^{2-}-Mn^{4+}$ и способствующего ферромагнитному (ФМ) упорядочению магнитных моментов Mn, и антиферромагнитного (АФМ) сверхобмена между магнитными моментами Mn, сформированными локализованными t_{2g} электронами. При концентрациях $0.2 < x < 0.5$ двойной обмен является доминирующим взаимодействием, что приводит к переходу из парамагнитного диэлектрического в ферромагнитное металлическое состояние при температуре Кюри, очень близкой к температуре перехода диэлектрик-металл. При концентрациях $x > 0.5$ доминирующим магнитным взаимодействием становится АФМ сверхобмен между магнитными моментами Mn, сформированными локализованными t_{2g} электронами. В результате, при повышении концентрации x в манганитах $La_{1-x}Sr_xMnO_3$, $Pr_{1-x}Sr_xMnO_3$ и $Nd_{1-x}Sr_xMnO_3$ при низких температурах наблюдается следующая общая последовательность магнитных фазовых переходов: скошенное антиферромагнитное АФМ (диэлектрическое) → ферромагнитное ФМ (металлическое) → АФМ А-типа (металлическое) → АФМ С-типа (диэлектрическое) → АФМ G-типа (диэлектрическое).

Недавно был обнаружен ряд новых явлений в празеодим-стронциевых манганитах $Pr_{1-x}Sr_xMnO_3$ при воздействии внешнего высокого давления. В исследованиях электросопротивления $Pr_{0.7}Sr_{0.3}MnO_3$ при давлении около 0.6 ГПа был обнаружен резкий рост температуры перехода диэлектрик-металл, которая

в манганитах примерно равна температуре Кюри, с барическим коэффициентом $dT_{\text{IM(C)}}/dP \approx 20$ К/ГПа; при более высоких давлениях этот коэффициент заметно уменьшался.

В соединении $\text{Pr}_{0.5}\text{Sr}_{0.5}\text{MnO}_3$ был обнаружен резкий рост температуры фазового перехода из промежуточного ФМ состояния в основное АФМ металлическое состояние с большим барическим коэффициентом $dT_N/dP \approx 14$ К/ГПа, при этом температура Кюри для промежуточного ФМ состояния уменьшалась с отрицательным барическим коэффициентом $dT_N/dP \approx -3.2$ К/ГПа. При исследовании электросопротивления в манганите $\text{Pr}_{0.5}\text{Sr}_{0.5}\text{MnO}_3$ установлено, что воздействие высокого давления приводит к подавлению основного АФМ металлического состояния, при $P = 2.4$ ГПа наблюдается его полное исчезновение.

При нейтронографических исследованиях было обнаружено индуцированное давлением возникновение АФМ состояния А-типа в $\text{Pr}_{0.52}\text{Sr}_{0.48}\text{MnO}_3$ и АФМ состояния С-типа в $\text{Pr}_{0.44}\text{Sr}_{0.56}\text{MnO}_3$. Теоретические фазовые диаграммы манганитов также предполагают возможность изменения типа магнитной структуры при высоких давлениях.

Для соединений $\text{Pr}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$ с концентрациями Sr вблизи границы раздела фаз на равновесной диаграмме состояния ($x \approx 0.3$ соответствует превращению АФМ \leftrightarrow ФМ, $x \approx 0.85 - 0.9$ разделяет области АФМ состояния С-типа и G-типа), незначительные вариации концентрации или химического состава или внешнего условия могут привести к изменению магнитных состояний и физических свойств системы. Однако детальных структурных исследований празеодим-стронциевых манганитов при высоких давлениях для этой концентрационной области еще не проводилось, что не позволяет сформировать полное представление обо всех возможных структурных и магнитных превращениях на диаграмме состояния соединений $\text{Pr}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$ в широком диапазоне температур и давлений.

Целью работы является установление основных закономерностей влияния высокого давления на кристаллическую и магнитную структуру празеодим-стронциевых манганитов $\text{Pr}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$ ($x = 0.3, 0.4, 0.85, 0.9$) и определение на этой основе структурных механизмов формирования магнитных и других физических свойств этих соединений.

Для достижения указанной цели были поставлены следующие **задачи**:

- С применением методов дифракции нейтронов, рентгеновской дифракции и Рамановской спектроскопии провести исследование кристаллической и магнитной структуры празеодим-стронциевых манганитов в широком диапазоне давлений и температур.
- Получить данные о типах структурных и магнитных фазовых переходов в манганитах в зависимости от состава и давления.
- Найти барические зависимости параметров кристаллической решетки, а также частот колебательных мод. Получить явный вид уравнения состояния Берча-Мурнагана для различных структурных фаз манганита $\text{Pr}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$.

- Найти значения температур Кюри и Нееля для магнитных фазовых переходов в исследованных манганитах, а также их барические зависимости.

Методы исследования. Для достижения целей диссертационной работы и выполнения поставленных задач требуется привлечение широкого спектра экспериментальных методов. Сведения о структуре исследуемых соединений и ее изменениях под действием внешних факторов получены с помощью взаимодополняемых методов дифракции нейтронов и рентгеновского излучения, дающих разностороннюю информацию о физических свойствах исследуемых объектов при различных давлениях и температурах.

Для исследования атомной динамики кристаллической решетки при высоком давлении был использован метод комбинационного рассеяния света.

Положения, выносимые на защиту

1. В манганите $\text{Pr}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$ при давлении $P \approx 6$ ГПа и комнатной температуре происходит индуцированный давлением структурный фазовый переход от низкобарической орторомбической кристаллической фазы со структурой $Pnma$ к высокобарической орторомбической кристаллической структуре $Imma$.

2. В соединении $\text{Pr}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$ при различных давлениях и температурах наблюдаются следующие виды магнитных превращений: ФМ \leftrightarrow ПМ, при атмосферном давлении температура Кюри $T_C = 270$ К, барический коэффициент температуры Кюри $dT_C/dP \approx 2.2(3)$ К/ГПа; индуцированный давлением магнитный фазовый переход ФМ \leftrightarrow АФМ А-типа, при давлении $P = 1.9$ ГПа температура Нееля $T_N = 152(3)$ К, барическая зависимость T_N отсутствует.

3. Соединение $\text{Pr}_{0.6}\text{Sr}_{0.4}\text{MnO}_3$ имеет орторомбическую кристаллическую структуру с пространственной группой $Pnma$ и в исследованном диапазоне температур и давлений структурный фазовый переход не испытывает. Обнаружен магнитный ФМ \leftrightarrow ПМ переход с температурой Кюри $T_C = 320(5)$ К. В области низких температур присутствует индуцированный давлением фазовый переход ФМ \leftrightarrow АФМ А-типа.

4. В манганите $\text{Pr}_{0.15}\text{Sr}_{0.85}\text{MnO}_3$ при давлении $P \approx 2$ ГПа и комнатной температуре происходит индуцированный давлением структурный фазовый переход от низкобарической кубической кристаллической фазы со структурой $Pm\bar{3}m$ к высокобарической тетрагональной кристаллической структуре $I4/mcm$. Температура структурного фазового перехода при атмосферном давлении $T_{ct} \approx 270$ К, барический коэффициент $dT_{ct}/dP \approx 28(2)$ К/ГПа. Структурное превращение сопровождается формированием магнитной АФМ фазы С-типа, температура Нееля $T_N \approx 260$ К с барическим коэффициентом $dT_N/dP = 3.8(9)$ К/ГПа.

5. Высокобарическое магнитное состояние соединения $\text{Pr}_{0.1}\text{Sr}_{0.9}\text{MnO}_3$ характеризуется сосуществованием двух АФМ фаз С-типа и G-типа с температурами Нееля АФМ фазы С-типа $T_N = 220(7)$ К, барический коэффициент $4.0(5)$ К/ГПа, для АФМ фазы G-типа $T_N = 180(6)$ К и не зависит от давления.

Научная новизна. Получены новые данные, уточняющие вид фазовой диаграммы состояний системы $\text{Pr}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$, и установлен характер магнитных превращений при различных давлениях и температурах.

В системе $\text{Pr}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$ различного состава впервые обнаружены индуцируемые давлением структурные фазовые переходы. В манганите $\text{Pr}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$ это фазовый переход $Pnma \leftrightarrow Imma$, температура превращения $T_{ct} = 295$ К при давлении $P = 6$ ГПа. Фазовый переход $Pm\bar{3}m \leftrightarrow I4/mcm$ обнаружен в манганитах $\text{Pr}_{0.15}\text{Sr}_{0.85}\text{MnO}_3$ и $\text{Pr}_{0.1}\text{Sr}_{0.9}\text{MnO}_3$. Структурные фазовые переходы сопровождаются изменениями в спектрах колебательных мод, что обусловлено влиянием статических кооперативных ян-теллеровских искажений кислородных октаэдров.

В манганитах $\text{Pr}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$ и $\text{Pr}_{0.6}\text{Sr}_{0.4}\text{MnO}_3$ при давлении выше 1.9 ГПа обнаружено подавление исходного ФМ состояния и появление АФМ состояния А-типа, связанное с анизотропным сжатием кислородных октаэдров. Установлено, что повышение давления приводит к росту температуры Кюри, что обусловлено барическим искажением межатомных расстояний и валентных углов в кислородных октаэдрах.

В манганитах $\text{Pr}_{0.15}\text{Sr}_{0.85}\text{MnO}_3$ и $\text{Pr}_{0.1}\text{Sr}_{0.9}\text{MnO}_3$ впервые обнаружены индуцированные давлением магнитные фазовые переходы из парамагнитного состояния в стабильное АФМ состояние С-типа (в $\text{Pr}_{0.15}\text{Sr}_{0.85}\text{MnO}_3$) и С- и G- типов (в $\text{Pr}_{0.1}\text{Sr}_{0.9}\text{MnO}_3$). Получены барические зависимости температур структурного и магнитного фазовых переходов в АФМ состояния С-типа и G-типа.

Для всех исследуемых соединений впервые получены барические зависимости структурных параметров.

Научная и практическая значимость работы. Полученные в диссертационной работе экспериментальные результаты важны для развития представлений о структурных механизмах магнитных явлений, наблюдаемых в манганитах, и их роли в формировании физических свойств исследуемых и родственных кристаллических материалов.

Сложные магнитные оксиды имеют перспективные технологические применения в качестве магнитных носителей для хранения информации, магнито-резистивных головок для считывания информации, сверхчувствительных датчиков магнитного поля и температуры, постоянных магнитов, элементов полупроводниковых электронных приборов.

Полученные экспериментальные результаты могут служить основой для теоретических расчетов физических свойств данных соединений в зависимости от структурных параметров, что имеет большое значение для структурного дизайна функциональных материалов с заданными свойствами.

Личный вклад автора. Все результаты, приведенные в диссертации, получены самим автором или при ее непосредственном участии. Автор участвовал в постановке задач, решаемых в рамках диссертационной работы, проведении экспериментальных исследований, обсуждении, анализе и интерпретации полученных данных, формулировке научных выводов, а также в подготовке статей к публикации.

Достоверность научных выводов, положений, рекомендаций подтверждается корректной постановкой задачи и обоснованным выбором методов исследования, регулярным контролем корректности постановки экспериментов и методов обработки и анализа экспериментальных данных, сходимостью результатов, полученных альтернативными методами. Полученные экспериментальные данные анализировались и сопоставлялись с известными экспериментальными результатами других исследователей.

Апробация диссертации. Результаты, вошедшие в диссертацию, были доложены и обсуждены на следующих научных конференциях: XIV научная конференция молодых ученых и специалистов ОИЯИ (Дубна, 2010), V-ая магистерская научно-техническая конференция ТулГУ (Тула, 2010), Международная научно-практическая конференция “Многомасштабное моделирование структур и нанотехнологии” (Тула, 2011), Международная научная школа “Современная нейтронография: от перспективных материалов к нанотехнологиям” (Дубна, 2011), VIII национальная конференция “Рентгеновское синхротронное излучения, нейтроны и электроны для исследования наносистем и материалов. Нано-Био-Инфо-Когнитивные технологии” (Москва, 2011), XVI научная конференция молодых ученых и специалистов ОИЯИ, (Дубна, 2012), 46-ая научная школа ФГБУ “ПИЯФ” по физике конденсированного состояния (Петербург, 2012), Международная молодежная научная школа “Проблема физики твердого тела” (Дубна, 2012).

Публикации. По теме диссертации опубликованы 14 печатных работ, в том числе 5 статей представлены в журналах, определенных перечнем Высшей аттестационной комиссии.

Структура диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка цитируемой литературы, списка сокращений и обозначений. Диссертация содержит 123 страницы машинописного текста, 46 рисунков, 9 таблиц и 122 библиографические ссылки.

Содержание диссертации

Во **введении** дано обоснование актуальности работы, сформулированы цель и задачи работы, основные положения, выносимые на защиту. Дается характеристика научной новизны и практической ценности полученных результатов, дана информация по апробации работы и кратко изложена структура и содержание диссертации.

В **первой главе** приводится обзор опубликованных результатов исследования магнитной и кристаллической структуры и физических свойств манганитов $\text{Pr}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$ различного состава. Представлены сведения о влиянии высокого давления и температуры на свойства празеодим-стронциевых манганитов.

Вторая глава посвящена описанию экспериментальных методов, используемых в данной работе. Представлены схемы и параметры экспериментальных установок (нейтронные и рентгеновские дифрактометры, спектрометр комбинационного рассеяния света и др.), которые использовались при проведении

экспериментов. Описаны методы обработки экспериментальных данных, а также техника, используемая для создания высокого давления.

Эксперименты по нейтронной дифракции при высоких давлениях проводили на спектрометре ДН-12 (импульсный высокопоточный реактор ИБР-2, ЛНФ ОИЯИ, г. Дубна). Использование образцов малого объема (до 3 мм^3) в сочетании с мультidetекторными низкофоновыми системами регистрации рассеянных нейтронов позволило успешно проводить эксперименты при давлениях до 5 ГПа, создаваемых в камерах высокого давления с сапфировыми наковальнями. Анализ нейтронных дифракционных данных проводили методом Ритвельда с помощью программ MRIA (кристаллическая структура) и FullProf (магнитная структура).

Эксперименты по рентгеновской дифракции при высоких давлениях были выполнены на специальном дифрактометре (Баварский Геоинститут, Германия), состоящем из высокопоточного генератора рентгеновского излучения FRD (Mo K_α -излучение с $\lambda = 0.7115 \text{ \AA}$), фокусирующей оптической системы FluxMax и детектора APEX CCD. Для создания высокого давления в образце использовали камеру высокого давления с алмазными наковальнями.

Дополнительно к дифракции нейтронов использовали дифракцию синхротронного излучения, что позволило существенно повысить точность измерения барических зависимостей параметров кристаллической структуры манганитов. Исследования проводили с использованием дифрактометра, действующего на синхротронном источнике DORIS-III (Гамбург, Германия).

Для экспериментов по комбинационному рассеянию света использовали спектрометр LabRam с гелий-неоновым лазером (Баварский Геоинститут, Германия) с длиной волны 632 нм. Нагружение образцов проводили в камере высокого давления с алмазными наковальнями.

В **третьей главе** представлены результаты исследований влияния высокого давления на кристаллическую и магнитную структуру и колебательный спектр манганитов $\text{Pr}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$ ($x = 0.3, 0.4$), полученные с помощью методов нейтронной и рентгеновской дифракции и комбинационного рассеяния света.

На рис. 1 представлены участки рентгеновских дифракционных спектров $\text{Pr}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$, полученных при различных давлениях и комнатной температуре.

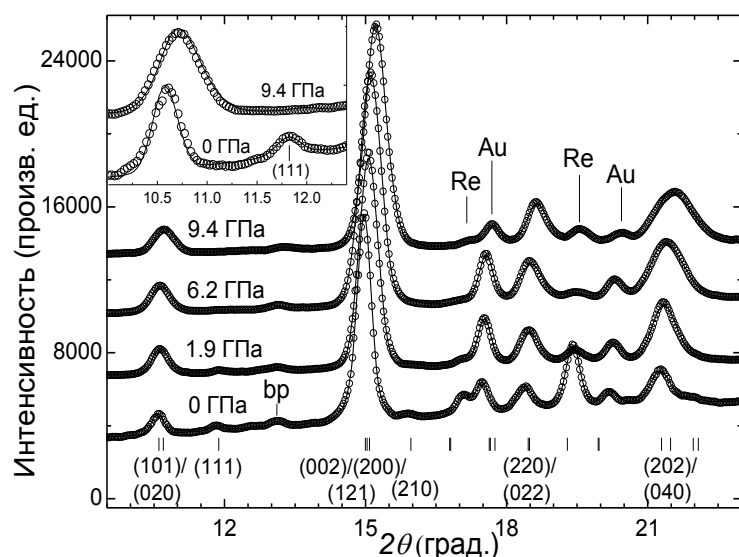


Рисунок 1. Участки рентгеновских дифракционных спектров $\text{Pr}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$, полученных при различных давлениях и комнатной температуре

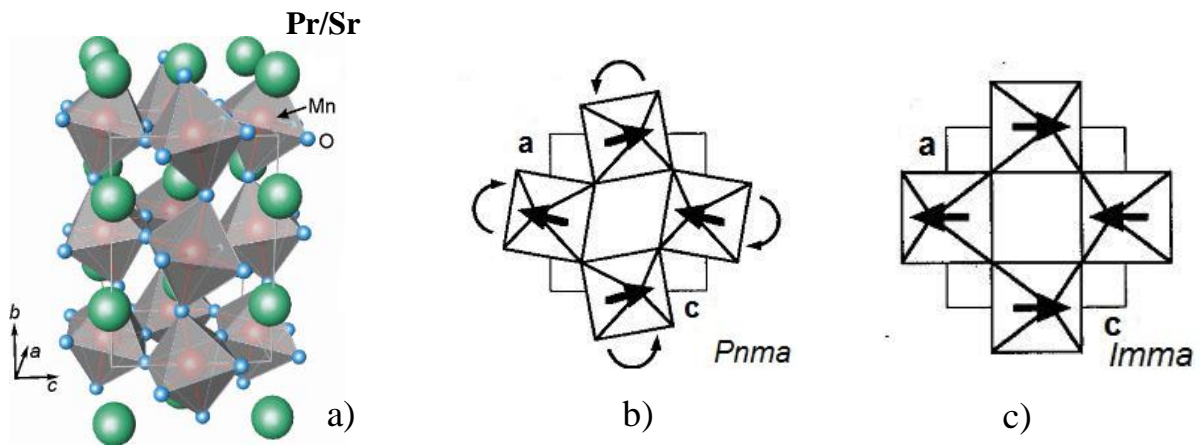


Рисунок 2. Орторомбическая кристаллическая структура манганита $Pr_{0.7}Sr_{0.3}MnO_3$: *a* – общий вид кристаллической решетки, *b* – структура симметрии $Pnma$, *c* – структура симметрии $Imma$

При давлениях до 6 ГПа соединение $Pr_{0.7}Sr_{0.3}MnO_3$ имеет орторомбическую кристаллическую структуру симметрии $Pnma$. При повышении давления до $P \approx 6$ ГПа обнаружено практически полное исчезновение дифракционного пика (111), что указывает на развитие в этом манганите структурного фазового перехода от структуры $Pnma$ в более высокосимметричную фазу. Анализ дифракционных данных в области $P > 6$ ГПа показал, что новая фаза имеет орторомбическую структуру симметрии $Imma$. Обе фазы $Pnma$ и $Imma$ имеют сходные перовскитоподобные решетки с параметрами элементарной ячейки $a_p\sqrt{2} \times 2a_p \times a_p\sqrt{2}$ (a_p – параметр идеальной кубической ячейки). Главное различие между ними состоит в разном характере поворота кислородных октаэдров по отношению к осям элементарной ячейки – $a\bar{b}^+a^-$ для симметрии $Pnma$ (рис. 2b) и $a\bar{b}^0a^-$ для симметрии $Imma$ (рис. 2c). Структурный фазовый переход $Pnma - Imma$ проявляется в виде изломов на барических зависимостях параметров и объема элементарной ячейки (рис. 3). Сжимаемость элементарной ячейки анизотропна и характеризуется наиболее выраженным уменьшением параметра b (рис. 3a).

Барическую зависимость объема элементарной ячейки (рис. 3b) аппроксимировали уравнением состояния Берча-Мурнагана третьей степени

$$P(x) = (3/2)B_0(x^{-7/3} - x^{-5/3})(1 + (3/4)(B_1 - 4)(x^{-2/3} - 1)),$$

где $x = V/V_0$ относительное изменение объема, V_0 – объем элементарной ячейки при давлении $P = 0$; $B_0 = -V_0(\partial P/\partial V)_T$ – изотермический модуль всестороннего сжатия, $B' = (dB_0/dP)_T$ – производная модуля объемного сжатия по давлению. Полученные значения составили: для $Pnma$ фазы $B_0 = 120(5)$ ГПа, $B' = 4(1)$, $V_0 = 233.7(3) \text{ \AA}^3$; для $Imma$ фазы $B_0 = 168(5)$ ГПа, $B' = 4(1)$, $V_0 = 233.2(3) \text{ \AA}^3$.

На рис. 4 представлены спектры рамановского рассеяния света $Pr_{0.7}Sr_{0.3}MnO_3$, полученные при различных давлениях и комнатной температуре. При давлениях $P < 7$ ГПа в спектрах присутствуют два пика, расположенных на $\nu \approx 440 \text{ см}^{-1}$ и 570 см^{-1} , которые соответствуют изгибающей моде (B) симметрии A_g и антисимметричной растягивающей моде (AS) симметрии B_{1g} . Как показал анализ, характер рамановских спектров для $Pr_{0.7}Sr_{0.3}MnO_3$ близок к наблюдае-

тому в CaMnO_3 , где отсутствуют ян-теллеровские локальные деформации и изменение симметрии решетки, и существенно отличается от спектров родственных допированных соединений $\text{A}_{1-x}\text{A}'_x\text{MnO}_3$ ($\text{A} = \text{La}, \text{Pr}, \text{A}' = \text{Ca}$) с меньшим значением $\langle r_A \rangle$, в которых наблюдаются интенсивные пики растягивающих фононных мод на $\nu \approx 500 \text{ см}^{-1}$ и 620 см^{-1} , связанные с локальными ян-теллеровскими структурными искажениями. Такое различие может быть обусловлено тем, что в $\text{Pr}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$ температура Кюри и температура перехода диэлектрик-металл в области повышенных давлений становятся близкими к комнатной температуре, что приводит к значительному ослаблению электрон-фононного взаимодействия и подавлению ян-теллеровских искажений. В области структурного фазового перехода $Pnma - Imma$ наблюдается подавление интенсивности AS моды и изменение наклона барической зависимости изгибающей колебательной B моды (рис. 4b).

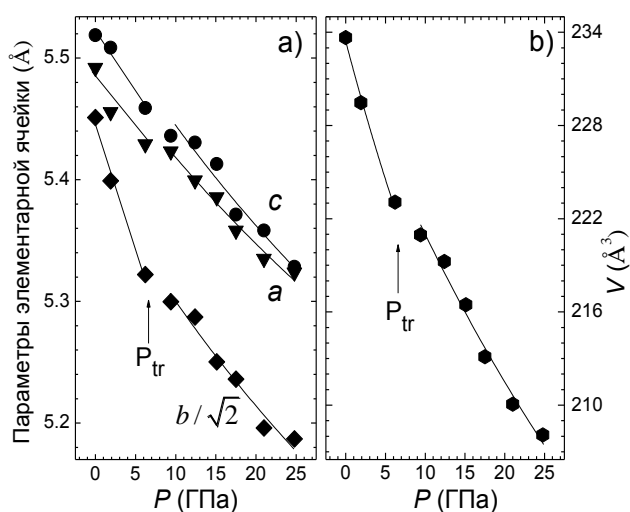


Рисунок 3. Барические зависимости параметров (a) и объема (b) элементарной ячейки мanganита $\text{Pr}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$

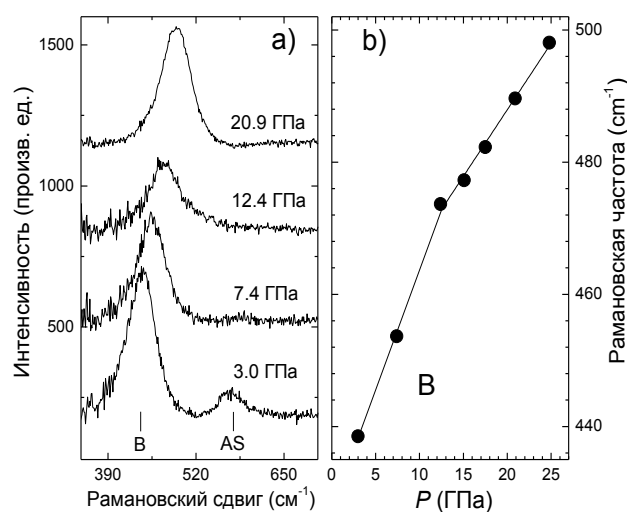


Рисунок 4. Рамановские спектры мanganита $\text{Pr}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$ при различных давлениях и комнатной температуре (a) и зависимость частоты изгибающей моды B от давления (b)

Нейтронные дифракционные спектры $\text{Pr}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$ (рис. 5), полученные при давлениях до 4 ГПа и температурах 10 – 295 К, соответствуют орторомбической кристаллической структуре симметрии $Pnma$. В структуре с симметрией $Pnma$ кислородные октаэдры MnO_6 содержат три пары неэквивалентных связей: связи Mn-O1 направлены вдоль оси b , связи Mn-O2a и Mn-O2b расположены в плоскости (ac). Длины связи Mn-O2a и Mn-O2b имеют близкие значения, поэтому исследовали барическое поведение их усреднённого значения $\langle \text{Mn-O2} \rangle$. При повышении давления до 4.5 ГПа наблюдается анизотропное сжатие кислородных октаэдров MnO_6 преимущественно вдоль кристаллографической оси b (рис. 7a), при этом величина валентного угла $\langle \text{Mn-O-Mn} \rangle$ линейно возрастает от 160.9 до 163.4° (рис. 7b).

С понижением температуры $T < T_C = 273 \text{ К}$ наблюдается появление магнитного вклада в интенсивность ядерных рефлексов (101)/(020) при $d_{hkl} \approx 3.88 \text{ \AA}$

и (200)/(002)/(121) при $d_{hkl} \approx 2.75 \text{ \AA}$ (рис. 5), что свидетельствует о возникновении ферромагнитного упорядочения (рис. 6а).

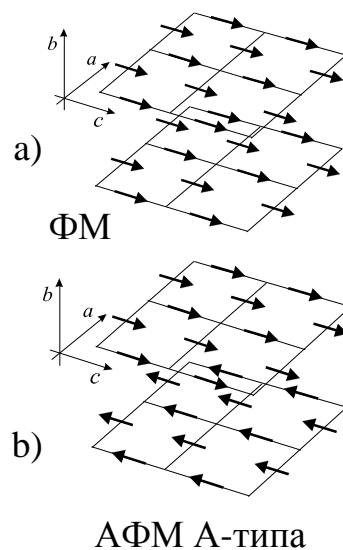
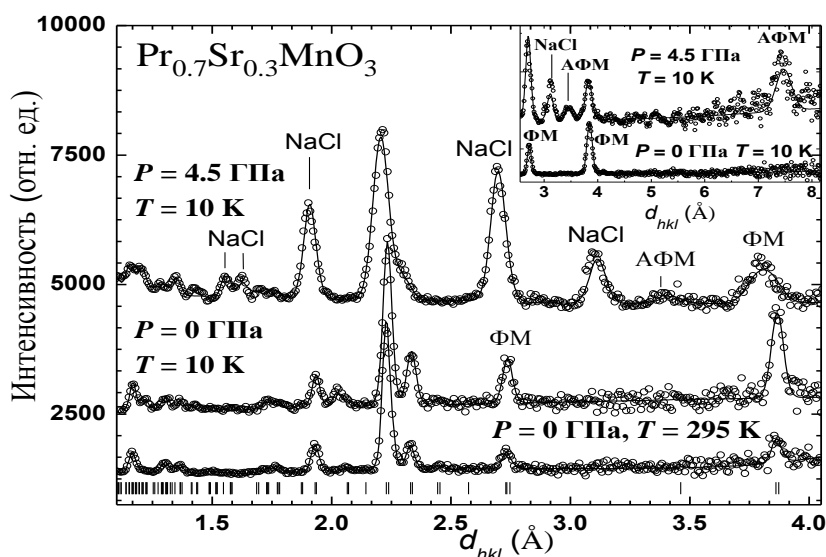


Рисунок 5. Участки нейтронных дифракционных спектров манганита $Pr_{0.7}Sr_{0.3}MnO_3$, полученных при $P = 0$ и 4.5 ГПа, $T = 295$ К и 10 К (углы рассеяния $2\theta = 90^\circ$ и 45.5° - вставка)

Рисунок 6. Вид магнитной структуры $Pr_{0.7}Sr_{0.3}MnO_3$: а – ФМ структура, б – АФМ структура А-типа

При высоком давлении $P > 1.9$ ГПа в области температур ниже $T_N = 152(3)$ К появляются новые магнитные рефлексы на $d_{hkl} \approx 3.44$ и 7.47 \AA (рис. 5), что соответствуют появлению АФМ фазы А-типа. Магнитные моменты Mn в такой АФМ структуре ориентированы параллельно друг другу в пределах плоскостей (ac). В соседних же плоскостях вдоль оси b направление моментов меняется на противоположное (рис. 6б). При повышении давления наблюдаются уменьшение эффективного магнитного момента ФМ фазы и увеличение магнитного момента АФМ фазы А-типа. Это свидетельствует о барическом повышении объемной доли АФМ фазы. Так, при давлении $P = 4.5$ ГПа и температуре $T = 10$ К объемные доли ФМ и АФМ А-типа составили 58% и 42% , соответственно.

При увеличении давления наблюдается линейный рост температуры Кюри T_C (вставка на рис. 8) с барическим коэффициентом $dT_C/dP \approx 2.2(3)$ К/ГПа. При этом температура Нееля АФМ фазы $T_N = 152(3)$ К от давления практически не зависит.

Как показал анализ нейтронных дифракционных спектров манганита $Pr_{0.6}Sr_{0.4}MnO_3$, во всем исследуемом интервале давлений до 1.9 ГПа и температур от 10 до 295 К этот манганит имеет орторомбическую кристаллическую структуру симметрии $Rnma$. Поведение магнитной структуры соединения $Pr_{0.6}Sr_{0.4}MnO_3$ аналогично $Pr_{0.7}Sr_{0.3}MnO_3$. При температуре ниже температуры Кюри $T_C = 320(5)$ К наблюдается возникновение ферромагнитного упорядочения. При $P = 1.9$ ГПа и $T = 10$ К обнаружены магнитные рефлексы при $d_{hkl} \approx 3.45 \text{ \AA}$ и 7.48 \AA , указывающие на формирование новой АФМ фазы А-типа, которая сосуществует с исходной ФМ фазой. Рассчитаны значения упорядоченного магнитного момента ионов Mn при $P = 1.9$ ГПа и $T = 10$ К: для ФМ фазы

$\mu = 1.9(1) \mu_B$, для АФМ фазы $\mu = 1.6(2) \mu_B$, μ_B – магнетон Бора. Рассчитанные на основе эффективных значений магнитных моментов при $P = 1.9$ ГПа и $T = 10$ К объемные доли ФМ и АФМ А-типа составили 58 % и 42 %, соответственно.

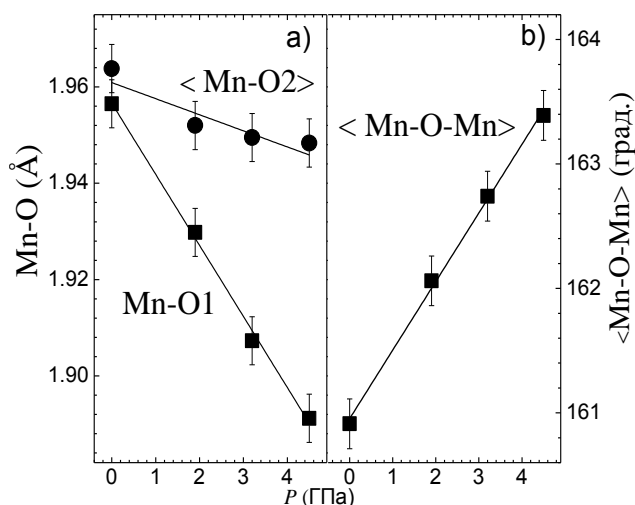


Рисунок 7. Барические зависимости *a* – длин связей Mn-O1 и <Mn-O2>, *b* – среднего валентного угла <Mn-O-Mn> для $Pr_{0.7}Sr_{0.3}MnO_3$ при $T = 295$ K

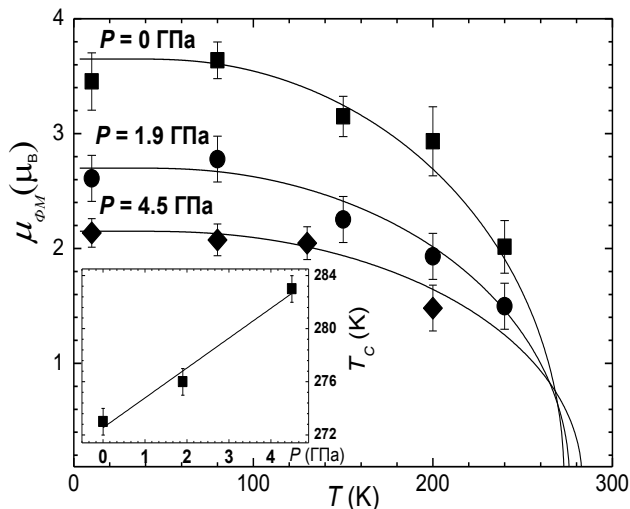


Рисунок 8. Температурные зависимости эффективного магнитного момента ионов Mn ФМ и АФМ фаз манганита $Pr_{0.7}Sr_{0.3}MnO_3$ при различных давлениях

Полученные результаты свидетельствуют о том, что причиной наблюдаемой нестабильности ФМ состояния и появления нового АФМ состояния А-типа в $Pr_{0.7}Sr_{0.3}MnO_3$ и $Pr_{0.6}Sr_{0.4}MnO_3$ при высоких давлениях может являться анизотропное сжатие кислородных октаэдров MnO_6 вдоль кристаллографической оси *b*. В этом случае происходит преимущественное заселение $d(x^2-z^2) e_g$ орбиталей по сравнению с $d(3y^2-r^2) e_g$ орбиталями ионов Mn, что приводит к усилению АФМ сверхобменных взаимодействия вдоль направления преимущественного сжатия и создает предпочтительные условия для формирования АФМ состояния А-типа.

В четвертой главе представлены результаты рентгеновских и нейтронных исследований кристаллической и магнитной структуры манганитов $Pr_{1-x}Sr_xMnO_3$ ($x = 0.85, 0.9$) при высоких давлениях. Согласно данным нейтронной дифракции соединение $Pr_{0.15}Sr_{0.85}MnO_3$ при нормальных условиях имеет кубическую кристаллическую структуру гексоктаэдрического типа симметрии, пространственная группа $Pm\bar{3}m$, схема которой представлена на рис. 9а.

На дифракционном спектре при низких температурах появились новые магнитные рефлексы на $d_{hkl} \approx 3.14$ Å и 5.36 Å, а также наблюдали расщепление дифракционных пиков на $d_{hkl} \approx 1.91$ и 3.82 Å. Анализ экспериментальных данных показал, что изменения дифракционных спектров соответствуют возникновению АФМ состояния С-типа. Одновременно получает развитие структурного фазового перехода из кубической симметрии $Pm\bar{3}m$ в тетрагональную кристаллическую структуру симметрии $I4/mcm$, которая является следствием раз-

ворота MnO_6 октаэдров относительно оси c вида ($a^0a^0c^-$) (рис. 9b). Параметры элементарной ячейки этой структуры связаны с параметрами идеальной кубической структуры перовскита соотношением $a_t \approx a_p \sqrt{2}$ и $c_t \approx 2a_p$.

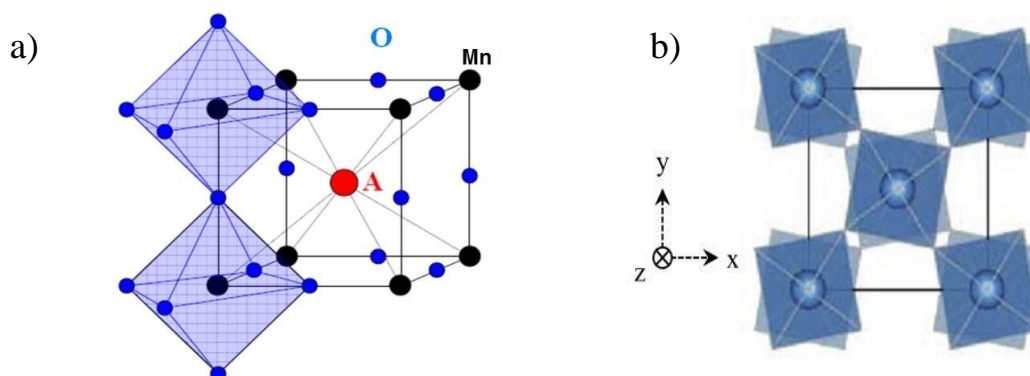


Рисунок 9. Кубическая (a) и тетрагональная (b) кристаллическая структура манганита $\text{Pr}_{0.15}\text{Sr}_{0.85}\text{MnO}_3$

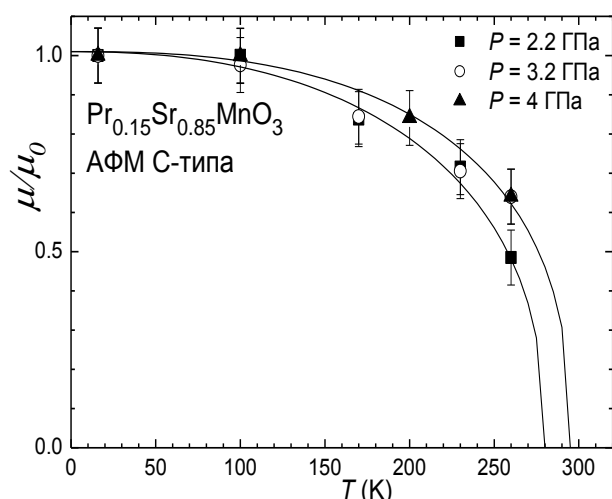


Рисунок 10. Температурные зависимости относительной величины магнитных моментов иона Mn манганита $\text{Pr}_{0.15}\text{Sr}_{0.85}\text{MnO}_3$, нормализованных на значение при $T = 16$ К, полученные при различных давлениях

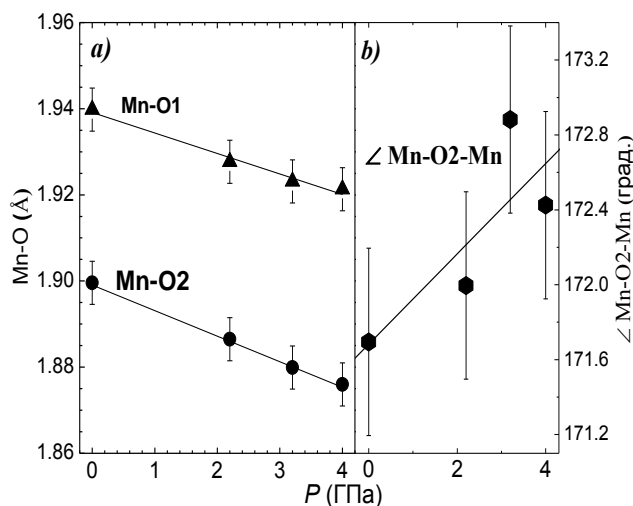


Рисунок 11. Барические зависимости Mn-O длин связи и Mn-O2-Mn валентного угла для тетрагональной фазы $I4/mcm$ $\text{Pr}_{0.15}\text{Sr}_{0.85}\text{MnO}_3$ при $T = 16$ К

В структуре тетрагональной АФМ фазы С-типа магнитные моменты Mn формируют ферромагнитные цепочки вдоль оси c с антиферромагнитным соединением между соседними цепочками (рис. 12a). Поскольку высокотемпературное состояние манганита $\text{Pr}_{0.15}\text{Sr}_{0.85}\text{MnO}_3$ является парамагнитным, в данном случае происходит фазовый переход ПМ – АФМ с точкой Нееля $T_N \approx 260$ К при давлении $P = 0$ ГПа. Анализ температурных зависимостей упорядоченного магнитного момента иона Mn АФМ фазы С-типа, полученных при различных давлениях (рис. 10), показал, что это АФМ состояние остается стабильным при высоких давлениях до 4 ГПа. При увеличении давления температура Нееля T_N линейно возрастает с барическим коэффициентом $dT_N/dP = 3.8(9)$ К/ГПа.

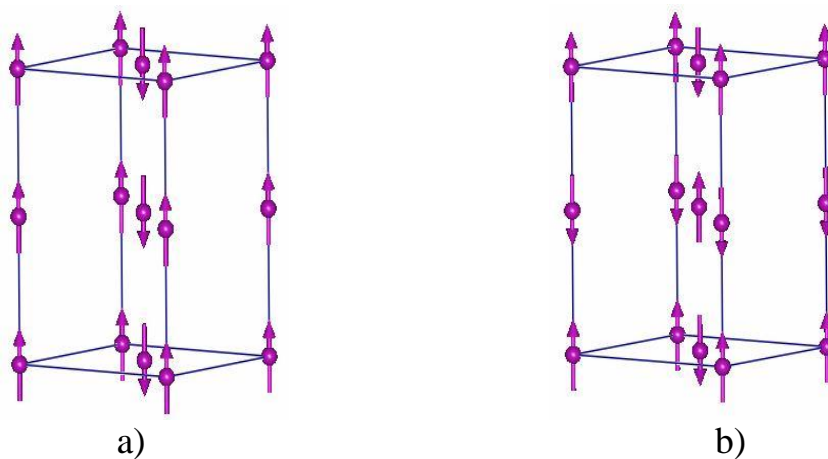


Рисунок 12. Структура тетрагональной АФМ фазы С-типа (а) и G-типа (b)

В тетрагональной структуре манганитов $\text{Pr}_{0.15}\text{Sr}_{0.85}\text{MnO}_3$ кислородные октаэдры MnO_6 содержат два типа неэквивалентных связей Mn-O: Mn-O1, направленные вдоль оси c , и Mn-O2, лежащие в плоскости (ab) . При сжатии наблюдается линейное уменьшение длин связи Mn-O, при этом валентный угол Mn-O2-Mn, лежащий на (ab) плоскости тетрагональной структуры $\text{Pr}_{0.15}\text{Sr}_{0.85}\text{MnO}_3$, незначительно увеличивает (рис. 11). Значение валентного угла Mn-O1-Mn, ориентированного вдоль оси c , постоянно и равно 180° .

На рис. 13 представлены участки рентгеновских дифракционных спектров $\text{Pr}_{0.15}\text{Sr}_{0.85}\text{MnO}_3$, измеренных при комнатной температуре и различных давлениях. Анализ полученных данных показал, что дифракционные спектры манганита $\text{Pr}_{0.15}\text{Sr}_{0.85}\text{MnO}_3$ при давлениях до 55 ГПа соответствуют тетрагональной кристаллической структуре симметрии $I4/mcm$. Получены барические зависимости параметров элементарной ячейки тетрагональной структуры a и c (рис. 14). На основании полученных данных было построено уравнение состояния Берча-Мурнагана для тетрагональной фазы $\text{Pr}_{0.15}\text{Sr}_{0.85}\text{MnO}_3$, параметры которого составили $B_0 = 225(8)$ ГПа, $B' = 4(1)$ и $V_0 = 223.4(8) \text{ \AA}^3$.

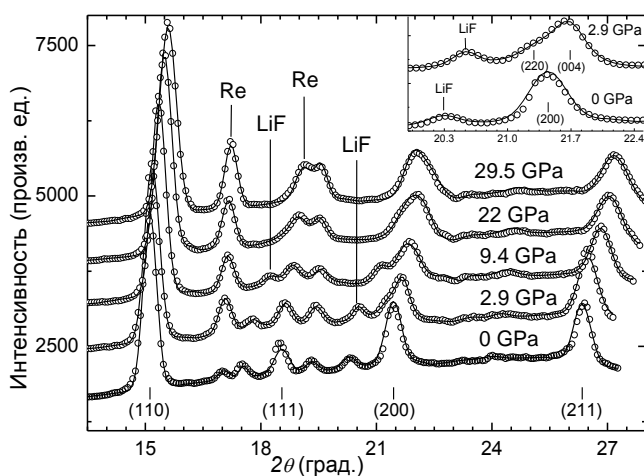


Рисунок 13. Участки рентгеновских дифракционных спектров манганита $\text{Pr}_{0.15}\text{Sr}_{0.85}\text{MnO}_3$, полученных при различных давлениях и комнатной температуре

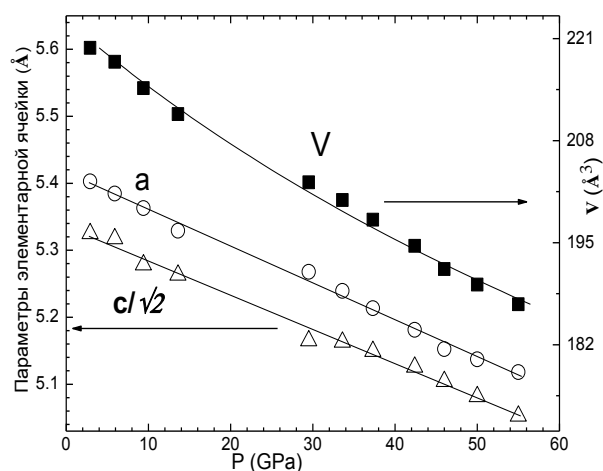


Рисунок 14. Барические зависимости параметров и объема элементарной ячейки $\text{Pr}_{0.15}\text{Sr}_{0.85}\text{MnO}_3$

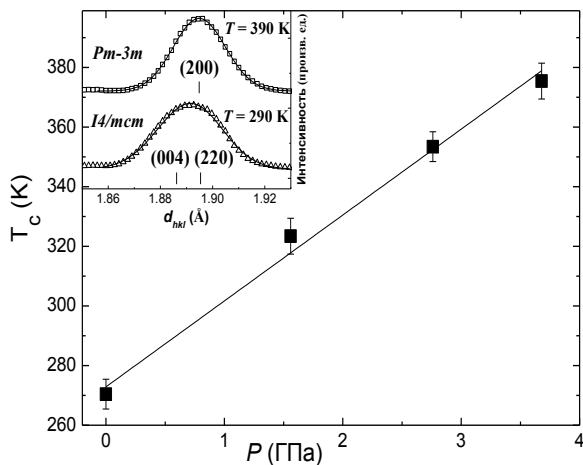


Рисунок 15. Барическая зависимость температуры перехода из кубической в тетрагональную фазу $Pr_{0.15}Sr_{0.85}MnO_3$. Вставка - участки рентгеновских дифракционных спектров при давлении $P = 1.6$ ГПа и температурах $T = 290$ и 390 К

Структурный фазовый переход в $Pr_{0.15}Sr_{0.85}MnO_3$ из кубической $Pm\bar{3}m$ в тетрагональную структуру $I4/mcm$ является экспериментально достаточно трудноразрешимым. Поэтому точное измерение барической зависимости температуры превращения T_{ct} требует применения высокоточной методики анализа кристаллической структуры материала, обладающей большей чувствительностью и точностью по сравнению с классическим методом рентгеноструктурного анализа. В данной работе для установления барической зависимости температуры перехода T_{ct} использовали дифракцию синхротронного излучения, которое для решения поставленной задачи имеет существенные преимущества по сравнению с обыкновенным рентгеновским излучением. Эксперименты проводили при давлениях до 4 ГПа и температурах 290 – 400 К.

Обработка дифракционных спектров позволила получить зависимости параметров и объема элементарной ячейки кубической и тетрагональной фаз от давления и температуры. На основании этих данных определены значения температур перехода от кубической фазы низкого давления к тетрагональной фазе высокого давления. Установлено, что при повышении давления температура структурного фазового перехода T_{ct} линейно увеличивается с барическим коэффициентом $dT_{ct}/dP = 28(2)$ К/ГПа (рис. 15), значение которого оказалось существенно выше барического коэффициента для температуры Нееля магнитного фазового перехода. Интересно отметить, что при нормальном давлении формирование АФМ упорядочения с точкой Нееля $T_N \approx 260$ К сопровождается структурным фазовым переходом при температуре $T_{ct} \approx 270$ К, близкой к T_N . При высоких давлениях температуры структурного и магнитного фазовых переходов становятся существенно различными, в частности при давлении 4 ГПа $T_{ct} \approx 375$ К, а температура Нееля $T_N \approx 295$ К.

Участки нейтронных дифракционных спектров $Pr_{0.1}Sr_{0.9}MnO_3$, полученных при различных давлениях и температурах, представлены на рис. 16. При нормальных условиях манганит $Pr_{0.1}Sr_{0.9}MnO_3$ имеет кубическую кристаллическую структуру симметрии $Pm\bar{3}m$.

При низкой температуре $T = 10$ К на нейтронном дифракционном спектре манганита $Pr_{0.1}Sr_{0.9}MnO_3$ наблюдаются появление новых магнитных рефлексов на $d_{hkl} \approx 3.15, 4.38$ и 5.32 Å и расщепление структурных дифракционных пиков на $d_{hkl} \approx 1.91$ и 3.85 Å (рис. 16), что свидетельствует о развитии магнитного фазового превращения, связанного с появлением АФМ фаз С-типа и G-типа, кото-

рое сопровождается фазовым переходом из кубической в тетрагональную структуру с пространственной группой $I4/mcm$.

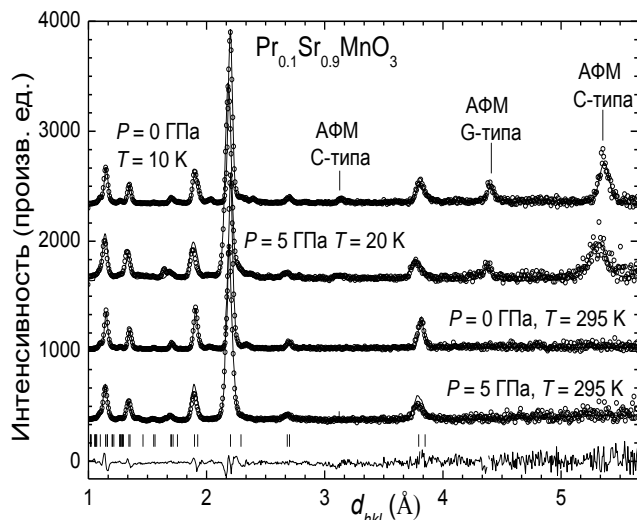


Рисунок 16. Участки нейтронных дифракционных спектров манганита $Pr_{0.1}Sr_{0.9}MnO_3$, полученных при $P = 0$ и 5 ГПа и $T = 295$, 20 и 10 К при угле рассеяния $2\theta = 90^\circ$

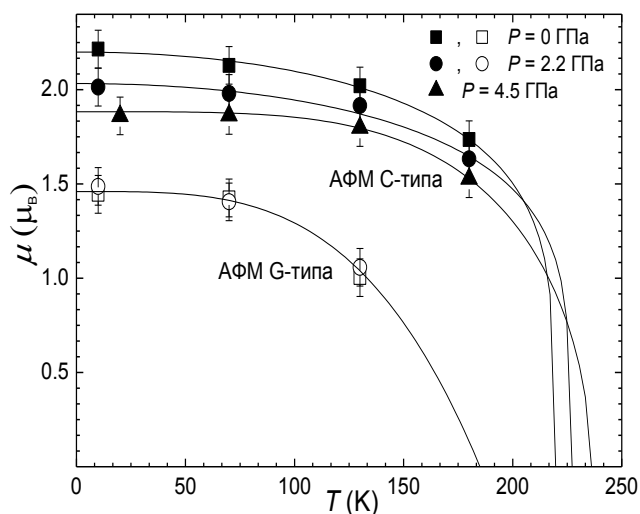


Рисунок 17. Температурные зависимости эффективного магнитного момента ионов Mn АФМ фаз С-типа и G-типа $Pr_{0.1}Sr_{0.9}MnO_3$ при различных давлениях

В АФМ фазе G-типа направление магнитного момента каждого иона Mn противоположно направлению магнитных моментов соседних ему Mn ионов (рис. 12b). Используя полученные экспериментальные данные для различных давлений и температур рассчитали значения магнитных моментов ионов марганца при $T = 10$ К и температуры Нееля для обеих магнитных фаз: для АФМ фазы С-типа $\mu = 2.3(5) \mu_B$, $T_N = 220(7)$ К, для АФМ фазы G-типа $\mu = 1.4(2) \mu_B$, $T_N = 180(6)$ К. При высоких давлениях до 5 ГПа АФМ состояния С и G-типа остаются стабильными. Упорядоченный магнитный момент ионов Mn в АФМ фазе С-типа при $T = 10$ К уменьшается до значения $1.9(3) \mu_B$ при $P = 5$ ГПа, что свидетельствует о постепенном уменьшении объемной доли этой АФМ фазы. Величина магнитного момента ионов Mn в фазе G-типа при высоком давлении не изменяется и составляет $1.5(3) \mu_B$ при давлении $P = 5$ ГПа и температуре $T = 10$ К.

Анализ температурных зависимостей магнитного момента ионов Mn АФМ фаз С-типа и G-типа $Pr_{0.1}Sr_{0.9}MnO_3$ при различных давлениях (рис. 17) показал, что при повышении давления температура Нееля T_N АФМ фазы С-типа линейно возрастает с барическим коэффициентом $dT_N/dP = 4.0(5)$ К/ГПа, что близко аналогичному значению для $Pr_{0.15}Sr_{0.85}MnO_3$. Температура T_N АФМ фазы G-типа при $P \leq 5$ ГПа слабо зависит от давления (рис. 17). Это может указывать на различные механизмы формирования антиферромагнитных состояний С- и G-типа в манганите $Pr_{0.1}Sr_{0.9}MnO_3$.

При комнатной температуре во всем исследуемом диапазоне давлений до 5 ГПа кубическая кристаллическая структура $Pr_{0.1}Sr_{0.9}MnO_3$ остается стабильной. При повышении давления наблюдается линейное уменьшение параметра и объ-

ема элементарной ячейки (рис. 18). В тетрагональной фазе при низких температурах с увеличением давления происходят линейное уменьшение длин связей Mn-O1 и Mn-O2 и увеличение валентного угла Mn-O2-Mn (рис. 19).

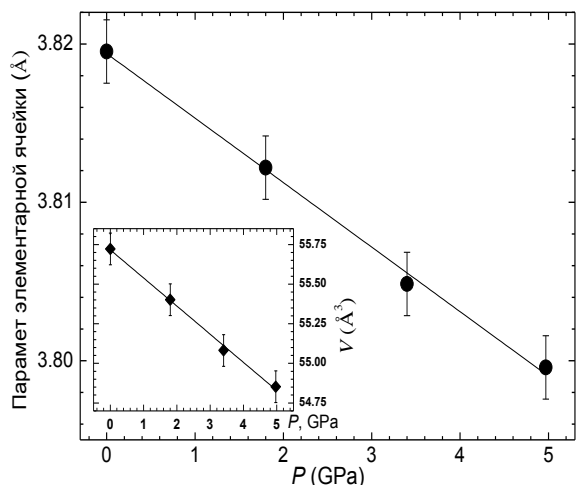


Рисунок 18. Барические зависимости параметра и объема (вставка) элементарной ячейки $Pr_{0.1}Sr_{0.9}MnO_3$ при $T = 295$ К

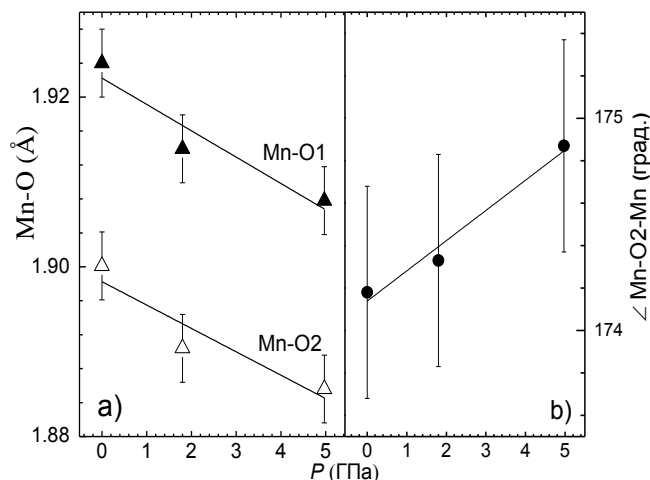


Рисунок 19. Барические зависимости Mn-O длин связи и Mn-O2-Mn валентного угла для тетрагональной фазы $I4/mcm$ $Pr_{0.1}Sr_{0.9}MnO_3$ при $T = 70$ К

Закключение и выводы

В работе проведено комплексное исследование влияния высоких давлений на тип и физические характеристики кристаллической и магнитной структуры празеодим-стронциевых манганитов ($x = 0.3, 0.4, 0.85, 0.9$). Полученные барические зависимости температур фазовых превращений имеют ценность и в качестве справочного материала, и как данные, позволяющие уточнить и дополнить равновесную фазовую диаграмму состояния манганитов $Pr_{1-x}Sr_xMnO_3$. Установленные в работе закономерности развития магнитных превращений дают возможность понять особенности и физические механизмы формирования высокобарических антиферромагнитных состояний.

На основании полученных результатов в целом по работе можно сделать следующие **выводы**.

1. При давлении $P \approx 6$ ГПа ($T = 295$ К) в манганите $Pr_{0.7}Sr_{0.3}MnO_3$ обнаружен структурный фазовый переход от орторомбической кристаллической структуры с пространственной группой $Pnma$ к высокобарической структуре с пространственной группой $Imma$. Для обеих структурных фаз получены барические зависимости параметров элементарной ячейки, частот колебательных мод, межатомных расстояний и валентных углов в кислородных октаэдрах MnO_6 . Установлен характер аномального барического поведения частот колебательных мод и структурных параметров кислородного октаэдра в области фазового перехода.

2. По полученным экспериментальным данным для фаз $Pr_{0.7}Sr_{0.3}MnO_3$ с пространственными группами $Pnma$ и $Imma$ рассчитаны термические уравнения состояния Берча-Мурнагана. Найдены значения изотермического модуля упру-

гости всестороннего сжатия: для фазы $Pnma$ $B_0 = 120(5)$ ГПа, для фазы $Imma$ $B_0 = 168(5)$ ГПа.

3. При атмосферном давлении и температурах $T \leq T_c = 270$ К манганит $Pr_{0.7}Sr_{0.3}MnO_3$ находится в упорядоченном ферромагнитном состоянии, магнитные моменты ионов Mn ($\mu_{FM} = 3.4(2)$ μ_B при $T = 10$ К) расположены в плоскости (ac). При давлениях выше 1.9 ГПа и температурах $T \leq T_N = 152$ К обнаружен магнитный фазовый переход из ФМ в АФМ фазу А-типа. Природа ФМ – АФМ магнитного фазового перехода связана с преимущественным анизотропным сжатием кислородных октаэдров вдоль оси b . Показано, что в диапазоне температур от 10 К до T_N обе фазы сосуществуют одновременно. Повышение давления приводит к постепенному уменьшению объема ФМ фазы и увеличению объема АФМ фазы. При $P = 4.5$ ГПа и $T = 10$ К объемная доля ФМ фазы составляет 58 %, $\mu_{FM} = 2.1(1)$ μ_B ; объемная доля АФМ фазы А-типа – 42 %, $\mu_{AFM} = 1.8(1)$ μ_B .

4. Установлено, что при давлениях до 5 ГПа барическая зависимость температуры Кюри $Pr_{0.7}Sr_{0.3}MnO_3$ имеет линейный возрастающий характер с барическим коэффициентом 2.2(3) К/ГПа. Температура Нееля T_N от давления не зависит.

5. В манганите $Pr_{0.6}Sr_{0.4}MnO_3$ при $P = 0$ ГПа происходит ПМ – ФМ магнитный фазовый переход с температурой Кюри $T_c = 320(5)$ К. При температуре $T = 10$ К величина магнитного момента ионов Mn в ферромагнитной фазе $\mu_{FM} = 3.0(1)$ μ_B .

При давлении $P = 1.9$ ГПа в $Pr_{0.6}Sr_{0.4}MnO_3$ обнаружен магнитный фазовый переход из ФМ в высокобарическую АФМ фазу А-типа. ФМ и АФМ фазы сосуществуют друг с другом во всем исследуемом диапазоне давлений. Для температуры 10 К объемная доля ФМ фазы составляет 58 %, значение магнитного момента ионов Mn $\mu_{FM} = 1.9(1)$ μ_B ; объемная доля АФМ фазы А-типа – 42 %, $\mu_{AFM} = 1.6(1)$ μ_B .

6. При давлении $P \approx 2$ ГПа ($T = 295$ К) в манганите $Pr_{0.15}Sr_{0.85}MnO_3$ обнаружен структурный фазовый переход от кубической фазы гексоктаэдрического типа, пространственная группа $R\bar{3}m$ к тетрагональной фазе дитетрагонально-дипирамидального вида симметрии, пространственная группа $I4/mcm$. Температура структурного фазового перехода из кубической в тетрагональную фазу $T_{ct} \approx 270$ К при $P = 0$ ГПа линейно увеличивается при повышении давления с барическим коэффициентом $dT_{ct}/dP \approx 28(2)$ К/ГПа.

7. Для тетрагональной фазы получены барические зависимости параметров элементарной ячейки, межатомных расстояний и валентных углов в кислородных октаэдрах MnO_6 . По полученным экспериментальным данным рассчитано термическое уравнение состояния Берча-Мурнагана тетрагональной фазы и найдено значение изотермического модуля упругости всестороннего сжатия $B_0 = 225(8)$ ГПа.

8. В области повышенных давлений в манганите $Pr_{0.15}Sr_{0.85}MnO_3$ обнаружен магнитный фазовый переход из парамагнитного в антиферромагнитное состояние С-типа. В отсутствие внешнего давления температура превращения

$T_N \approx 260$ К. Барическая зависимость T_N является линейной с барическим коэффициентом $dT_N/dP = 3.8(9)$ К/ГПа.

9. При комнатной температуре в диапазоне давлений до 5 ГПа перовскитоподобная кубическая кристаллическая структура манганита $\text{Pr}_{0.1}\text{Sr}_{0.9}\text{MnO}_3$ с пространственной группой $R\bar{3}m$ остается стабильной. При повышении давления в манганите $\text{Pr}_{0.1}\text{Sr}_{0.9}\text{MnO}_3$ обнаружен магнитный фазовый переход из парамагнитного в антиферромагнитное состояние С-типа и G-типа, который сопровождается структурным фазовым переходом из кубической в тетрагональную фазу с пространственной группой $I4/mcm$. Рассчитаны значения магнитных моментов ионов марганца (при $T = 10$ К) и температуры Нееля для обеих магнитных фаз: для АФМ фазы С-типа $\mu = 2.3(5)$ μ_B , $T_N = 220(7)$ К, для АФМ фазы G-типа $\mu = 1.4(2)$ μ_B , $T_N = 180(6)$ К.

10. Установлено, что при давлениях до 5 ГПа температура Нееля T_N АФМ фазы С-типа линейно возрастает с барическим коэффициентом $dT_N/dP = 4.0(5)$ К/ГПа. Температура T_N АФМ фазы G-типа от давления зависит слабо, что указывает на различия в механизмах формирования в манганите $\text{Pr}_{0.1}\text{Sr}_{0.9}\text{MnO}_3$ антиферромагнитных состояний С- и G-типа.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах

1. Kozlenko D. P., **Dang N. T.**, Jirak Z., Kichanov S. E., Lukin E. V., Savenko B. N., Dubrovinsky L.S., Lathe C., Martin C. Structural and magnetic phase transitions in $\text{Pr}_{0.15}\text{Sr}_{0.85}\text{MnO}_3$ at high pressure // Eur. Phys. J. B. 2010. V. 77. P. 407-411.

2. **Данг Н. Т.**, Козленко Д. П., Кичанов С. Е., Савенко Б. Н. Влияние высокого давления на кристаллическую и магнитную структуру манганитов $\text{Pr}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$ ($x = 0.3, 0.4$) // Изв. ТулГУ. Сер. Естест. Науки. 2011. В. 2. С. 265-275.

3. **Данг Н. Т.**, Козленко Д. П., Кичанов С. Е., Ирак З., Лукин Е. В., Савенко Б. Н. Влияние высокого давления на кристаллическую и магнитную структуру манганита $\text{Pr}_{0.1}\text{Sr}_{0.9}\text{MnO}_3$ // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования 2012. N. 10. С. 37-40.

4. **Данг Н. Т.**, Козленко Д. П., Кичанов С. Е., Dubrovinsky L. S., Jirák Z., Левин Д. М., Лукин Е. В., Савенко Б. Н. Структурные и магнитные фазовые переходы в манганите $\text{Pr}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$ при высоком давлении // Письма в ЖЭТФ. 2013. Т. 97. В. 9. С. 624-629.

5. **Данг Н. Т.**, Левин Д. М., Козленко Д. П., Кичанов С. Е., Савенко Б. Н. Структурные и магнитные фазовые переходы при высоких давлениях в манганитах $\text{Pr}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$ ($x = 0.85, 0.9$) // Изв. ТулГУ. Сер. Естест. Науки. 2013. В. 2. Ч. 1. С. 185-196.

6. Kozlenko D. P., **Dang N. T.**, Jirak Z., Kichanov S. E., Lukin E. V., Savenko B. N., Dubrovinsky L.S., Lathe C., Martin C. Structural and magnetic phase transitions in $\text{Pr}_{0.15}\text{Sr}_{0.85}\text{MnO}_3$ at high pressure // Communication of The Join Institute for Nuclear Research. E14-2010-26. 12 p.

7. **Данг Н. Т.**, Козленко Д. П., Лукин Е. В., Кичанов С. Е., Савенко Б. Н. Влияние высокого давления на кристаллическую и магнитную структуру ман-

ганита $\text{Pr}_{0.15}\text{Sr}_{0.85}\text{MnO}_3$ // Труды XIV научной конференции молодых учёных и специалистов ОИЯИ. Дубна: ОИЯИ. 2010. С. 163-166.

8. **Данг Н. Т.**, Левин Д. М., Козленко Д. П. Структурные и магнитные фазовые переходы в $\text{Pr}_{0.15}\text{Sr}_{0.85}\text{MnO}_3$ при высоком давлении // Сборник тезисов докладов V-ой магистерской научно-технической конференции. Тула: Изд. ТулГУ, 2010. С. 107-108.

9. Kozlenko D. P., Dubrovinsky L.S., **Dang N. T.**, Jirak Z., Lukin E. V., Savenko B. N. Structural phase transition in $\text{Pr}_{0.15}\text{Sr}_{0.85}\text{MnO}_3$ at high pressure // Annual report Bayerisches Geoinstitut. Bayreuth: BGI, 2010. P. 189-191.

10. Козленко Д. П., **Данг Н. Т.**, Кичанов С. Е., Савенко Б. Н. Структурные и магнитные фазовые переходы в манганите $\text{Pr}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$ при высоком давлении // Сборник тезисов докладов VIII национальной конференции РСНЭ-НБИК. М.: ИК РАН-НИЦ КИ, 2011. С. 316.

11. **Данг Н. Т.**, Козленко Д. П., Кичанов С. Е., Савенко Б. Н. Влияние высокого давления на кристаллические и магнитные структуры манганитов $\text{Pr}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$ ($x = 0.85, 0.9$) // Материалы международной научно-практической конференции “Многомасштабное моделирование структур и нанотехнологии”. Тула: Изд. ТГПУ. 2011. С. 83-90.

12. **Данг Н. Т.**, Козленко Д. П., Кичанов С. Е., Савенко Б. Н. Индуцированный давлением структурный фазовый переход в манганите $\text{Pr}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$ // Сборник тезисов докладов международной научной школы для молодежи “Современная нейтронография: от перспективных материалов к нанотехнологиям”. Дубна: ОИЯИ. 2011. С. 11.

13. **Данг Н. Т.**, Козленко Д. П., Кичанов С. Е., Савенко Б. Н., Лукин Е. В. Влияние высокого давления на кристаллическую и магнитную структуру манганита $\text{Pr}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$ // Сборник тезисов докладов 42-ой школы ФГБУ «ПИЯФ» по физике конденсированного состояния. Гатчина: ФГБУ «ПИЯФ», 2011. С. 194-196.

14. **Данг Н. Т.**, Козленко Д. П., Лукин Е. В., Кичанов С. Е., Савенко Б. Н. Влияние высокого давления на кристаллическую и магнитную структуру манганита $\text{Pr}_{0.15}\text{Sr}_{0.85}\text{MnO}_3$ // Труды XVI научной конференции молодых учёных и специалистов ОИЯИ. Дубна: ОИЯИ. 2012. С. 163-166.

Изд. лиц. ЛР №020300 от 12.02.97. Подписано в печать 06.09.2013.

Формат бумаги 60x84 1/16. Бумага офсетная.

Усл.-печ. л. 1,2. Уч.-изд. л. 1,0

Тираж 100 экз. Заказ 036

Тульский государственный университет

300012, г. Тула, просп. Ленина, 92.

Отпечатано в Издательстве ТулГУ

300012, г. Тула, просп. Ленина, 95