

Министерство образования Республики Беларусь

*Учреждение образования*

«Белорусский государственный педагогический университет  
имени Максима Танка»

**РАЗВИТИЕ  
ФУНДАМЕНТАЛЬНОЙ НАУКИ  
В БГПУ**

*Материалы  
научно-практической конференции*

*г. Минск, 19 ноября 2015 г.*

Минск 2016

# ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ И КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ, НАНОМАТЕРИАЛЫ

УДК 573.312.62

RESEARCH OF INTERRELATION  
OF ELECTROPHYSICAL AND  
STRUCTURAL CHARACTERISTICS  
OF THE OXIDE MAGNETIC AND  
SUPERCONDUCTING MATERIALS

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМОСВЯЗИ  
ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ И СТРУКТУРНЫХ  
ХАРАКТЕРИСТИК ОКСИДНЫХ МАГНИТНЫХ  
И СВЕРХПРОВОДЯЩИХ МАТЕРИАЛОВ

*В. М. Добрянский, И. О. Троянчук,  
Л. С. Лобановский, О. В. Зинкевич*

*V. Dobryanski, I. Troyanchuk,  
L. Lobanovski, O. Zinkevich*

Исследованы новые перспективные материалы многокомпонентных соединений на основе La, Ba, Co, Sr, Mn, Cr, Fe, O. Установлены закономерности изменения физических свойств керамики от состава и условий получения. Установлено, что уменьшение содержания кислорода ведет к фазовому переходу из ферромагнитного состояния в антиферромагнитное, или в состояние типа спинового стекла; замещение марганца на галлий и хром ведет к фазовому расслоению на антиферромагнитную и ферромагнитную фазы, тогда как замещение на железо стабилизирует состояние типа спинового стекла. Ферромагнитная фаза в хром-замещенных составах намного стабильнее, чем в случае других замещений. Магнитные свойства объясняются в рамках сверхобменных взаимодействий, и локализации большинства  $e_g$ -электронов марганца. Стабилизация ферромагнетизма в хром-замещенных составах обусловлена тем, что положительный и отрицательный вклады в сверхобменное взаимодействие между ионами  $Mn^{3+}$  и  $Cr^{3+}$  близки по величине.

The new perspective materials based on complex oxides La, Ba, Co, Sr, Mn, Cr, Fe, O have been studied. The dependencies of the physical properties from composition and conditions of the preparation are established. It is shown that decrease in oxygen content leads to transition from ferromagnetic into antiferromagnetic or spin glass state. Substitution of the manganese by gallium or chromium leads to phase separation into ferromagnetic and antiferromagnetic phases. Ferromagnetic phase in the case of chromium substituted compositions is much more stable than in the case of the another doping. Magnetic properties are explained in frame of superexchange interactions and localized character of the majority of  $e_g$ -manganese electrons. Stable ferromagnetism in chromium doped compounds is associated with close value of positive and negative interactions between  $Mn^{3+}$  and  $Cr^{3+}$  ions.

Интерес к функциональной керамике на основе кобальтитов и мангани-  
тов в последние годы настолько возрос, что можно говорить как о важней-  
шей тенденции современного материаловедения. Причины этого обуслов-  
лены многими обстоятельствами, и прежде всего возможностью создания  
новых материалов с необходимыми свойствами в пределах одной и той же  
химической композиции. Материалы на основе перовскитных соединений

обладают многообразными и уникальными магнитными и сверхпроводящими свойствами, что делает их привлекательными для практических применений.

В кобальтитах реализуются различные спиновые состояния ионов кобальта с ярко выраженной связью между магнитными и транспортными свойствами. Ионы  $\text{Co}^{3+}$  могут принимать низкоспиновое (LS)-, промежуточное спиновое (IS)- или высокоспиновое (HS)- состояния, почти вырожденные по энергии, поэтому температура, давление или магнитное поле могут привести к смене основного состояния. Высокая температура или магнитное поле обычно стабилизируют (HS) состояние, а внешнее давление способствует переходу в (LS) состояние. Ряд кобальтитов проявляет резко выраженную связь магнитных и магнитотранспортных свойств. Так, в сложных кобальтитах типа  $\text{LnBaCo}_2\text{O}_{5.5}$  (Ln – лантаноид) переход из антиферромагнитного состояния в неколлинеарное ферромагнитное вызывает скачок электросопротивления и эффект колоссального магнитосопротивления. Например, в  $\text{LaCoO}_3$  при повышении температуры происходит переход ионов кобальта из низкоспинового состояния в промежуточное спиновое состояние. В системе твердых растворов  $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{CoO}_{3.5}$  вблизи  $x \approx 0.18$  происходит формирование металлического ферромагнитного состояния, тогда как при меньших концентрациях стронция реализуется состояние типа спинового стекла. Однако в  $\text{La}_{1-x}\text{Ba}_x\text{CoO}_{3.5}$  незначительно допированном ионами бария ( $x \sim 0.2$ ) обнаружены диэлектрическая антиферромагнитная и полупроводниковая ферромагнитная фазы. Близкие к стехиометрии по кислороду  $\text{La}_{0.5}\text{Sr}_{0.5}\text{CoO}_3$  и  $\text{La}_{0.5}\text{Ba}_{0.5}\text{CoO}_3$ , несмотря на схожесть магнитных свойств, проявляют различные магнитотранспортные свойства. Оба эти соединения являются ферромагнетиками с  $T_C \sim 250$  и  $180$  К соответственно.  $\text{La}_{0.5}\text{Sr}_{0.5}\text{CoO}_{3.5}$  проявляет металлический характер поведения в парамагнитной и магнитоупорядоченной фазах, однако  $\text{La}_{0.5}\text{Ba}_{0.5}\text{CoO}_3$  ниже точки Кюри при  $T_{\text{MI}} \sim 140$  К переходит из металлического в слабо выраженное полупроводниковое состояние. Вблизи перехода обнаружено тетрагональное структурное искажение.  $\text{La}_{0.5}\text{Ba}_{0.5}\text{CoO}_3$  проявляет большой магниторезистивный эффект при низких температурах, тогда как в  $\text{La}_{0.5}\text{Sr}_{0.5}\text{CoO}_{3.5}$  магниторезистивный эффект при низких температурах очень мал [6]. Необходимо отметить, что дефицит кислорода в  $\text{La}_{0.5}\text{Ba}_{0.5}\text{CoO}_{3.5}$  ведет к макроскопическому фазовому расслоению на ферромагнитную и антиферромагнитную фазы при температуре, близкой к  $150$  К [6]. Эта температура близка к наблюдаемому переходу металл–диэлектрик в  $\text{La}_{0.5}\text{Ba}_{0.5}\text{CoO}_3$ . Природа ферромагнитного упорядочения в кобальтитах является предметом дискуссии. Ферромагнетизм кобальтитов объясняется в разных моделях: сверхобменных взаимодействий через кислород, зонного магнетизма и двойного обмена. Чтобы

понять причины большого магниторезистивного эффекта в  $\text{La}_{0.5}\text{Ba}_{0.5}\text{CoO}_3$ , мы провели исследования свойств системы  $\text{La}_{1-x}\text{Ba}_x\text{CoO}_{3-\delta}$  [1].

В манганитах  $\text{Ln}_{1-x}\text{A}_x\text{MnO}_3$  (Ln – лантаноид, А – щелочноземельный ион) магнитные свойства и электропроводность коррелируют друг с другом. Ферромагнитное упорядочение, возникающее при появлении разновалентных ионов марганца, может привести к металлической проводимости. Ферромагнетизм манганитов традиционно объясняют в модели двойного обмена, предложенной К. Зинером в 1951 г. В этой модели ферромагнетизм обусловлен свободным перемещением носителей заряда между разновалентными ионами марганца. При этом предполагается, что сверхобменные взаимодействия в основном антиферромагнитны и не дают существенного вклада в ферромагнитную часть обмена. Однако обнаружено, что ферромагнитное состояние может возникнуть в манганитах без эффекта смешанной валентности ионов  $\text{Mn}^{3+}$  и  $\text{Mn}^{4+}$ . Например, базовое соединение  $\text{LaMnO}_3$  выше температуры перехода орбитальный порядок – беспорядок (вблизи 750 К) ведет себя по магнитным свойствам как ферромагнетик с аппроксимированной точкой Кюри 160 К. Это означает, что орбитальное разупорядочение может привести к смене от антиферромагнитных к ферромагнитным обменным взаимодействиям. Установлено, что дальний ферромагнитный порядок возникает в системах  $\text{LaMn}_{1-x}\text{Ga}_x\text{O}_3$  и  $\text{LaMn}_{1-x}\text{Sc}_x\text{O}_3$  при  $x > 0.15$  без наличия ионов  $\text{Mn}^{4+}$  [5–8]. Диэлектрическое ферромагнитное состояние также было обнаружено в манганите  $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{Mn}_{0.85}\text{Nb}_{0.15}\text{O}_3$ , в котором ионы разновалентного марганца также отсутствуют. Точки Кюри оптимально легированных манганитов, вычисленные исходя из теории двойного обмена, оказались значительно меньше определенных экспериментально. Поэтому ситуация с магнитными взаимодействиями в манганитах остается неясной.

Для исследований выбраны многокомпонентные твердые растворы на основе  $\text{BaSr}_2\text{CaCu}_4\text{O}_x$ ,  $(\text{Ba}, \text{Sr}, \text{Ca})\text{CuO}_2$ ,  $\text{YSrCa}_2\text{Cu}_4\text{O}_x$ ,  $\text{La}_{1-x}\text{Ba}_x\text{CoO}_{3-\delta}$ ,  $\text{Pr}_{0.5}\text{Sr}_{0.5}\text{Co}_{1-x}\text{Mn}_x\text{O}_3$ ,  $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{CoO}_3$ ,  $\text{Sm}_{1-x}\text{Ca}_x\text{FeSbO}_4$ ,  $\text{Sr}_{2-x}\text{Ba}_x\text{CuO}_{3+\delta}$ ,  $\text{La}_{0.5}\text{Ba}_{0.5}\text{Co}_{1-x}\text{Fe}_x\text{O}_3$  и  $\text{La}_{0.75}\text{Ba}_{0.25}\text{CoO}_{2.98}$ ,  $\text{La}_{0.75}\text{Ba}_{0.25}\text{CoO}_{2.95}$ ,  $\text{La}_{0.75}\text{Ba}_{0.25}\text{CoO}_{2.9}$ ,  $\text{La}_{0.75}\text{Ba}_{0.25}\text{CoO}_{2.92}$ ,  $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{Mn}_{1-x}\text{Cr}_x\text{O}_3$ ,  $\text{La}_{0.75}\text{Ba}_{0.25}\text{CoO}_{3-\delta}$ ,  $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{Mn}_{1-x}\text{Cr}_x\text{O}_3$ ,  $\text{La}_{0.45}\text{Ba}_{0.55}\text{CoO}_{3-x}$ ,  $\text{La}_{0.45}\text{Ba}_{0.55}\text{CoO}_{3-x}$ ,  $\text{Bi}_{1-x}\text{Ca}_x\text{Fe}_{1-x}\text{Mn}_x\text{O}_3$ ,  $\text{Bi}_{1-x}\text{Ca}_x\text{Fe}_{1-x}\text{Mn}_x\text{O}_3$ ,  $\text{BiFeO}_3$  и  $\text{BiFeO}_3$ , легированные ионами кальция и титана. С целью изучения механизма обменных взаимодействий проведено сравнительное исследование магнитных свойств составов, в которых ионы марганца замещены на парамагнитные ионы железа и хрома, а также на диамагнитные ионы галлия. В качестве базового состава из манганитов выбран  $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$ , в котором точка Кюри самая высокая  $T_c = 390$  К. Предыдущие исследования показали, что эти замещения ведут к постепенному разрушению ферромагнит-

ного состояния, что было проинтерпретировано в рамках ослабления двойного обмена, ионы железа и хрома входят в решетку манганитов в трехвалентном состоянии. Поэтому сравнивая свойства составов с одинаковым уровнем замещения, можно выделить эффекты, связанные с магнитными взаимодействиями между ионами разного типа.

Исследование магнитных и магнитотранспортных свойств анион-дефицитных перовскитов  $\text{La}_{1-x}\text{Ba}_x\text{CoO}_{3-\delta}$  показали, что магнитосопротивление максимально вблизи концентрационных границ магнитного фазового превращения [1]. Большая величина магнитосопротивления объясняется иницированием магнитным полем перехода антиферромагнетик–ферромагнетик, который сопровождается изменением спинового состояния ионов кобальта.

Методом нейтронной дифракции было исследовано влияние замещения кобальта на марганец и ниобий на магнитную и кристаллическую структуру допированных кобальтитов [2]. В образцах  $\text{Pr}_{0.5}\text{Sr}_{0.5}\text{Co}_{1-x}\text{Mn}_x\text{O}_3$  при увеличении  $x$  наблюдалась серия кристаллоструктурных переходов: из моноклинной  $I2/a$  в орторомбическую  $\text{Immm}$ , затем в высокотемпературную тетрагональную  $I4/mcm$  и низкотемпературную орторомбическую. При высоких уровнях замещения марганца наблюдается антиферромагнитное упорядочение А-типа. При замещении кобальта на ниобий в составах  $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{CoO}_3$  наблюдается изменение длин связей  $\text{Co-O}$  и объема элементарной ячейки, сопровождаемое уменьшением ферромагнитного момента. Замещение  $\text{Co}$  на  $\text{Nb}$  препятствует формированию  $\text{Co}^{4+}$  и приводит к стабилизации  $\text{Co}^{3+}$  в высокоспиновом состоянии.

Развит способ получения керамик с применением высокого давления холодного прессования для формирования керамических образцов перед стадией спекания. Этот метод был использован при получении серии ВТСП материалов на основе висмута, легированного стронцием, и керамик  $\text{Sm}_{1-x}\text{Ca}_x\text{FeSbO}$  и  $\text{Sr}_{2-x}\text{Ba}_x\text{CuO}_{3+d}$ . Изучены структурные и электрофизические характеристики в зависимости от состава и условий механо-термообработки [3; 4].

Проведено исследование магнитных свойств и кристаллической структуры системы кобальтитов  $\text{La}_{0.5}\text{Sr}_{0.5}\text{CoO}_{3-\tau}$  в зависимости от содержания кислорода. Показано, что составы с содержанием кислорода  $\tau < 0,1$  являются ферромагнитными с  $T_C$  до 250 К, тогда как при  $\tau > 0,15$  возникает антиферромагнитное состояние с точкой Нееля выше комнатной температуры ( $\tau > 0,25$ ) [5].

Проведено исследование магнитных и магнитотранспортных свойств системы твердых растворов  $\text{La}_{0.5}\text{Ba}_{0.5}\text{Co}_{1-x}\text{Fe}_x\text{O}_3$ . Показано, что составы  $0.05 \leq x \leq 0.15$  являются диэлектрическими ферромагнетиками с большой

величиной магниторезистивного эффекта. В составе  $x = 0.05$  вблизи точки Кюри обнаружен переход из металлического парамагнитного состояния в диэлектрическое ферромагнитное. Приведена модель сверхобменных взаимодействий через кислород с учетом локальных ян-теллеровских корреляций [6].

Установленные закономерности формирования магнитосопротивления и электропроводности в твердых растворах  $\text{Pr}_{0.5}\text{Sr}_{0.5}\text{CoO}_3$ ;  $\text{Pr}_{0.5}\text{Sr}_{0.5}\text{Co}_{1-x}\text{Mn}_x\text{O}_3$  и  $\text{La}_{1-x}\text{Ba}_x\text{CoO}_{3-\delta}$  на основе сложных оксидов переходных элементов делают их перспективными для создания новых магниторезистивных материалов и катализаторов химических реакций. А информация о механизме образования магнитного состояния и его влияние на электротранспортные и магнитные свойства сложных перовскитоподобных оксидов, проявляющих эффект магнитосопротивления, представляют интерес для фундаментальных исследований в связи с неясностью его природы. Результаты могут использоваться при разработке новых материалов для устройств сепарации газов, электродов топливных ячеек. Сложные оксиды переходных металлов позволяют создание новых электродных материалов для топливным ячейкам, кислородным мембранам и катализаторам [7–9].

Приведены результаты исследований: температурной зависимости намагниченности образца  $\text{La}_{0.75}\text{Ba}_{0.25}\text{CoO}_{2.98}$  в магнитном поле 0.05 Тл; полевой зависимости намагниченности образца  $\text{La}_{0.75}\text{Ba}_{0.25}\text{CoO}_{2.98}$  при температуре 5 К; температурной зависимости намагниченности закаленного образца  $\text{La}_{0.75}\text{Ba}_{0.25}\text{CoO}_{2.95}$  в магнитном поле 0.05 Тл; полевой зависимости намагниченности закаленного образца  $\text{La}_{0.75}\text{Ba}_{0.25}\text{CoO}_{2.95}$  при температуре 5 К; полевой зависимости намагниченности восстановленного образца  $\text{La}_{0.75}\text{Ba}_{0.25}\text{CoO}_{2.9}$  при различных температурах; температурной зависимости намагниченности восстановленного образца  $\text{La}_{0.75}\text{Ba}_{0.25}\text{CoO}_{2.95}$  в магнитном поле 0.01 Тл; петли магнитного гистерезиса образца  $\text{La}_{0.75}\text{Ba}_{0.25}\text{CoO}_{2.92}$  при 5 К и 40 К; температурной зависимости намагниченности образца  $\text{La}_{0.75}\text{Ba}_{0.25}\text{CoO}_{2.92}$  в магнитном поле 1 Тл и температурной зависимости намагниченности образца  $\text{La}_{0.75}\text{Ba}_{0.25}\text{CoO}_{2.92}$ , измеренной в магнитном поле 0.05 Т [10–13]. Из приведенных результатов исследований намагниченности сделан вывод, что уменьшение содержания кислорода в составах  $\text{La}_{0.75}\text{Ba}_{0.25}\text{CoO}_{3-d}$  ведет к фазовому переходу из ферромагнитного состояния в антиферромагнитное, или в состояние типа спинового стекла. Уменьшение содержания кислорода в кобальтите  $\text{La}_{0.45}\text{Ba}_{0.55}\text{CoO}_{3-x}$  приводит к смене ферромагнитного проводящего состояния на антиферромагнитное диэлектрическое. В  $\text{La}_{0.45}\text{Ba}_{0.55}\text{CoO}_{2.8}$  при температуре выше 140 К доминирует ферромагнитное взаимодействие. При более низкой температуре антиферромагнитное взаимодействие становится сильнее. Низкотемпературная фаза

проявляет метамагнетизм, обусловленный переходом антиферромагнетик-ферромагнетик во внешнем поле. Антиферромагнитная фаза является диэлектрической, тогда как ферромагнитная – проводящей. Большое магнитосопротивление, выявленное при низких температурах в  $\text{La}_{0.45}\text{Ba}_{0.55}\text{CoO}_{2.8}$ , обусловлено переходом антиферромагнитной фазы в ферромагнитную. Предполагается, что ферромагнитной фазе соответствует промежуточное спиновое состояние ионов кобальта, тогда как антиферромагнитной – смешанное высоко/низкоспиновое состояние [10–19].

На основании исследований намагниченности и кристаллической структуры систем  $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{Mn}_{1-x}\text{Me}_x\text{O}_3$  ( $\text{Me} = \text{Ga}, \text{Fe}, \text{Cr}; x < 0.3$ ), сделан вывод, что замещение марганца на галлий и хром ведет к фазовому расщеплению на антиферромагнитную и ферромагнитную фазы, тогда как замещение на железо стабилизирует состояние типа спинового стекла. Ферромагнитная фаза в хром-замещенных составах намного стабильнее, чем в случае других замещений. Магнитные свойства объясняются в рамках сверхобменных взаимодействий и локализации большинства  $e_g$ -электронов марганца. Стабилизация ферромагнетизма в хром-замещенных составах обусловлена тем, что положительный и отрицательный вклады в сверхобменное взаимодействие между ионами  $\text{Mn}^{3+}$  и  $\text{Cr}^{3+}$  близки по величине [25–26].

Приведены результаты исследования магнитотранспортных свойств  $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{Mn}_{1-x}\text{Cr}_x\text{O}_3$  и пьезоэлектрических свойств  $\text{BiFeO}_3$ , легированного ионами кальция и титана. Исследования твердых растворов  $\text{Bi}_{1-x}\text{A}_x\text{Fe}_{1-y}\text{B}_y\text{O}_3$  (где  $\text{A} - \text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{B} - \text{Mn}^{3+}$ ) показали, что образцы в интервале концентраций  $x < 0.18$  кристаллизуются в полярной ромбоэдрической пространственной группе  $R\bar{3}c$ . При  $x > 0.18$  образцы кристаллизуются в орторомбической неполярной пространственной группе  $Rnma$ . При частичном замещении ионов висмута ионами лантана в результате размерного эффекта возникают локальные кристаллоструктурные искажения и, как следствие, локальные напряжения, меняющиеся под воздействием электрического поля. Это обеспечивает большой пьезоэлектрический эффект. Таким образом, частичная замена ионов висмута лантаном в А-подрешетке перовскитной структуры позволяет получить пьезоэлектрический материал, проявляющий пьезоэлектрический эффект при комнатной температуре с величиной линейного пьезоэлектрического коэффициента  $d_{33}^{\text{eff}}$  по крайней мере в  $\sim 2.5$  раза больше, чем у феррита висмута  $\text{BiFeO}_3$ . Из полевых зависимостей намагниченности следует, что образцы в полярной ромбоэдрической фазе не обладают спонтанной намагниченностью. Однако зависимость намагниченности от поля нелинейная. Скорее всего, это обусловлено обратимым по полю переходом в слабоферромагнитную фазу. Образцы в неполярной орторомбической фазе  $Rnma$  обладают небольшой спонтанной намагниченностью, что скорее всего обусловлено взаимодействием Дзялошинского–Мория [28–26].

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Переход ферромагнетик–антиферромагнетик в системе кобальтитов  $\text{La}_{0.5}\text{Sr}_{0.5}\text{CoO}_{3-x}$  / И. О. Троянчук [и др.] // Вестник БГУ. Сер. 1, Физика. Математика. Информатика. – 2012. – № 3. – С. 56–59.
2. Структура и магнитные свойства  $\text{Pr}_{0.5}\text{Sr}_{0.5}\text{Co}_{1-x}\text{Mn}_x\text{O}_3$ . Актуальные проблемы физики твердого тела / В. М. Добрянский [и др.] // Сб. док. Международной научной конференции. 18–21 октября 2011 г., Минск, Т. 2. – С.132–135.
3. Добрянский, В. М. Магнитные и транспортные свойства нанокристаллических ферромагнетиков со структурой перовскита / В. М. Добрянский, И. Е. Вольнец // Материалы 19 респ. науч. конф. аспирантов, магистрантов и студентов. Физика конденсированного состояния. Гродно, 19–20 апреля 2011 г.
4. Добрянский, В. М. Фазовые переходы и магнитокалорический эффект в арсениде марганца / В. М. Добрянский, Г. А. Говор, В. И. Митюк // Вестник БГУ. Сер. 1, Физика. Математика. Информатика. – 2012. – № 2. – С. 67–71.
5. Troyanchuk, I. O. Antiferromagnet-ferromagnet transition in the cobaltites / I. O. Troyanchuk, M. V. Bushinsky, D. V. Karpinsky // Low Temperature Physics/Fizika Nizkikh Temperatur, 2012, v. 38, No. 7, pp. 833–841.
6. Переход ферромагнетик–антиферромагнетик в системе кобальтитов  $\text{La}_{0.5}\text{Sr}_{0.5}\text{CoO}_{3-x}$  / И. О. Троянчук [и др.] // Вестник БГУ. Сер. 1, Физика. Математика. Информатика. – 2012. № 3. – С. 56–59.
7. Кристаллическая структура и магнитные свойства высококоэрцитивных ферритов  $\text{Sr}_{1-x}\text{Pr}_x\text{Fe}_{12-x}\text{Zn}_x\text{O}_{19}$  / Д. Д. Польшко [и др.] // Неорганические материалы. – 2011. – Т. 47. – № 1. – С. 81–86.
8. Магнитные свойства эвтектического сплава системы  $\text{InSb-MnSb}$  / Л. С. Лобановский [и др.] // Вестник фонда фундаментальных исследований. – 2011. – № 1. – С. 64–71.
9. Лобановский, Л. С. Магнитные свойства сверхстехиометрического  $\text{CaFe}_2\text{O}_{4+\delta}$ , синтезированного термобарическим методом / Л. С. Лобановский, С. В. Труханов // Кристаллография. – Т. 56, № 3. – С. 516–520.
10. First Order Magnetic Phase Transition in Layered  $\text{Sr}_3\text{YCo}_4\text{O}_{10.5} + \delta$  Type Cobaltites / I. O. Troyanchuk // JETP Letters, 2011, Vol. 94, No. 12, pp. 849–852. Pleiades Publishing, 11.
11. Магнитные и транспортные свойства системы  $\text{La}_{0.5}\text{Ba}_{0.5}\text{Co}_{1-x}\text{Fe}_x\text{O}_{1-b}$  / В. М. Добрянский [и др.] // Актуальные проблемы физики твердого тела: сб. док. Междунар. науч. конф., 15–18 октября 2013 г., Минск. – Т. 1. – С. 132–135.
12. Величины большого магнитоэлектрического эффекта в кобальтитах  $\text{La}_{1-x}\text{Ba}_x\text{CoO}_{1-b}$  / В. М. Добрянский [и др.] // Актуальные проблемы физики твердого тела: сб. док. Междунар. науч. конф., 15–18 октября 2013 г., Минск. – Т. 1. – С. 235–237.
13. Магнитные и транспортные свойства системы  $\text{La}_{0.5}\text{Ba}_{0.5}\text{Co}_{1-x}\text{Fe}_x\text{O}_{1-b}$  / В. М. Добрянский [и др.] // Актуальные проблемы физики твердого тела: сб. док. Междунар. науч. конф., 15–18 октября 2013 г., Минск. – Т. 1. – С. 182–185.
14. Переход металл–диэлектрик и магнитные свойства  $\text{La}_{0.5}\text{Ba}_{0.5}\text{Co}_{1-x}\text{Fe}_x\text{O}_{3-b}$  / И. О. Троянчук [и др.] // Доклады Национальной академии наук Беларуси. 2013. Том 57, № 3, ст 58.
15. Ферромагнитное упорядочение в манганитах  $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{Mn}_{0.85}\text{Mo}_{0.15}\text{O}_3$  ( $M = \text{NB}^{5+}, \text{SB}^{5+}$ ) / И. О. Троянчук [и др.] // Вестник БГУ. Сер. 1, Физика. Математика. Информатика. – 2014. № 1. – С. 48–53.



16. V. V. Sikolenko, V. V. Efimov, S. Schorr, C. Ritter, I. O. Troyanchuk. *Physics of the Solid State* 2014, Volume 56, Issue 1, p 77–80
17. V. V. Sikolenko, V. V. Efimov, S. Schorr, C. Ritter, I. O. Troyanchuk Neutron diffraction studies of the structure of substituted complex cobalt oxides *Powder Diffraction* Volume 28, Supplement S2, 2013, pp S126–S132.
18. A. Vityaz, S. A. Kovaleva, L. S. Lobanovskii, V. T. Senyut', T. F. Grigor'eva, and T. V. Gamzeieva. Structure and Magnetic Properties of Sintered Alloys Based on Mechanically Activated Fe-Ga Powders. *Журнал «Inorganic Materials: Applied Research»*, 2014, Vol. 5, No. 1, pp. 81–87. P.
19. V. V. Sikolenko, V. V. Efimov, S. Schorr, C. Ritter, I. O. Troyanchuk. Neutron diffraction studies of the structure of substituted complex cobalt oxides. *Physics of the Solid State* 2014, Volume 56, Issue 1, p 77–80.
20. Ферромагнитное упорядочение в манганитах  $LA_{0,7}SR_{0,3}Mn_{0,85}Mo_{0,15}O_3$  ( $M = Nb^{5+}, Sb^{5+}$ ) / И. О. Троянчук [и др.] // Вестник БГУ. Сер. 1, Физика. Математика. Информатика. – 2014. – № 1. – С. 48–53.
21. I. O. Troyanchuk, V. M, V. V. Efimov, V. V. Sikolenko, Karpinsky D.V et al. Ferromagnetic interactions in Mn based perovskites. *J. Phys.: Condens. Matter* 26(2014) 390002 (6pp).
22. I. O. Troyanchuk, V. M, V. V. Efimov, V. V. Sikolenko, Karpinsky D.V et al. Phase coexistence in  $Bi_{1-x}Pr_xFeO_3$  ceramics. *J. Mater. Sci.* DOI 101007/s 19853-014-8398-6.
23. Магнитное упорядочение в манганитах, легированных ионами Ga, Fe и Cr / В. М. Добрянский [и др.] // Вестник БГУ. Сер. 1, Физика. Математика. Информатика. – 2015. № 1. – С. 60–64.
24. Магнитные свойства манганитов, допированных ионами галлия, железа и хрома / И. О. Троянчук [и др.] // ЖЭТФ. – 2015. – Т. 147, вып 5. С. 970–975.
25. Влияние содержания кислорода на магнитные и транспортные свойства кобальтита  $La_{0,45}Ba_{0,35}CoO_{3-x}$  / И. О. Троянчук [и др.] // ФТТ. – 2015. – Т. 57. – Вып. 12. – С. 2354–2357.
26. I. O. Troyanchuk, M. V. Bushinsky, V. M. Dobryanskii, V. V. Efimov, V. V. Sikolenko, D. M. Tobens, Tereshko N. V. Magnetic interactions in  $LA_{0,7}SR_{0,3}Mn_{1-x}Me_xO_3$  ( $M = Ca, Fe, Cr$ ). *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 394(2015) 212–216.