

УДК: 538.9

DOI: 10.34824/VKNIRAN.2024.17.2.012

## МАГНЕТИЗМ МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ СПЛАВОВ НА ОСНОВЕ ТЯЖЕЛЫХ РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫХ МЕТАЛЛОВ

© Умхаева Зарган Сайпудиновна (а), Карпенков Алексей Юрьевич (b), Терёшина Ирина Семеновна (с), Панкратов Николай Юрьевич (d),  
Алиев Ислам Магомедович (e)

- (а) Комплексный научно-исследовательский институт им. Х.И. Ибрагимова РАН, отдел материаловедения, заведующая отделом, доцент, доктор физико-математических наук, zargan.umhaeva@yandex.ru, Грозный
- (b) Тверской государственный университет, кафедра физики конденсированного состояния, заведующий кафедрой, кандидат физико-математических наук, karpenkov\_alex@mail.ru, Тверь
- (с) Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, кафедра физики твердого тела, внс, доктор физико-математических наук, irina\_tereshina@mail.ru, Москва
- (d) Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, кафедра общей физики и магнитоупорядоченного состояния, ст. преподаватель, кандидат физико-математических наук, pankratov@phys.msu.ru, Москва
- (e) Комплексный научно-исследовательский институт им. Х.И. Ибрагимова РАН, отдел материаловедения, снс, кандидат физико-математических наук, ialiew@mail.ru, Грозный

**Аннотация.** В данной работе представлены результаты исследования структуры, магнитных и магнитоотрицательных свойств интерметаллических соединений на основе тяжелых редкоземельных элементов R стехиометрии  $RFe_2$ , где  $R = Tb, Gd, Dy$  и  $Er$ . Для получения новых многокомпонентных сплавов нами использован достаточно сложный тип замещения в редкоземельной (РЗМ) подрешетке. В РЗМ подрешетку сначала вводятся атомы слабомагнитного самария в стационарной концентрации 20 ат. %, а затем, атомы немагнитного иттрия при значениях параметра замещения  $x = 0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0$ . Такой тип замещения приводит к конкуренции всех типов обменных взаимодействий, являющихся причиной магнитного упорядочения в сплавах исследованных систем в определенной температурной области. Конкуренция между ними приводит в сплавах систем  $(R_{1-x}Y_x)_{0.8}Sm_{0.2}Fe_2$ , где  $R = Tb, Gd, Dy$  и  $Er$ , к ряду уникальных магнитных фазовых превращений, включая явление взаимной магнитной компенсации РЗМ и Fe-подрешеток, инверсию знака констант магнитоотрицательности и спиновую переориентацию. Показано, что указанный тип замещения в редкоземельной подрешетке существенно влияет на природу магнетизма в исследованных сплавах.

**Ключевые слова:** редкоземельные интерметаллиды, фазы Лавеса, удельная намагниченность, магнитный момент, магнитоотрицательность, обменные взаимодействия.

## MAGNETISM OF MULTICOMPONENT ALLOYS BASED ON HEAVY RARE EARTH METALS

**Umkhaeva Zargan Saipudinovna (a), Karpenkov Alexei Yurievich (b),  
Tereshina Irina Semenovna (c), Pankratov Nicolay Yurievich (d),  
Aliiev Islam Movldievich (e)**

- (a) Kh. Ibragimov Complex Institute of the Russian Academy of Sciences, Department of Materials Science, Department Head, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, zargan.umhaeva@yandex.ru, Grozny.
- (b) Tver State University, Department of Condensed State physics, Head of Department, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, karpenkov\_alex@mail.ru, Tver.
- (c) M.V. Lomonosov Moscow State University, Department of the Solid State Physics, Leading researcher of, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, irina\_tereshina@mail.ru, Moscow.
- (d) M.V. Lomonosov Moscow State University, Department of General Physics and Magnetically Ordered State, Senior Lecturer, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, pankratov@phys.msu.ru, Moscow.
- (e) Kh. Ibragimov Complex Institute of the Russian Academy of Sciences, Department of Materials Science, Senior researcher, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, ialiev@mail.ru, Grozny.

**Annotation.** This paper presents the results of a study of the structure, magnetic and magnetostrictive properties of intermetallic compounds based on heavy rare earth elements R stoichiometry  $RFe_2$ , where  $R = Tb, Gd, Dy$  and  $Er$ . To obtain new multicomponent alloys, we used a rather complex type of substitution in a rare earth (REM) sublattice. Atoms of weakly magnetic samarium in a stationary concentration of 20 at % are first introduced into the REM sublattice and then non-magnetic yttrium atoms at the values of the substitution parameter  $x = 0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0$ .

This type of substitution leads to competition of all types of exchange interactions, which are the cause of magnetic ordering in the alloys of the studied systems in a certain temperature range. The competition between them leads in alloys of  $(R_{1-x}Y_x)_{0.8}Sm_{0.2}Fe_2$  systems, where  $R = Tb, Gd, Dy$  and  $Er$ , to a number of unique magnetic phase transformations, including the phenomenon of mutual magnetic compensation of REM and Fe sublattices, inversion of the sign of magnetostriction constants and spin reorientation.

It is shown that this type of substitution in a rare-earth sublattice significantly affects the nature of magnetism in the studied alloys.

**Key words:** rare earth intermetallides, Laves phases, specific magnetization, magnetic moment, magnetostriction, exchange interactions.

### ВВЕДЕНИЕ

История исследования магнитных свойств редкоземельных магнетиков берет свое начало с середины прошлого столетия, когда в 1959 г. была опубликована первая работа по магнетизму соединения интерметаллида  $GdCo_5$  [1]. Соединения данной стехиометрии, в том числе полученное впоследствии соединение  $SmCo_5$  [2], вызывали интерес только для использования в качестве постоянных магнитов. Однако, оказалось, что соединения редкоземельных металлов (РЗМ) с элементами группы железа (Fe, Co, Ni и Mn) стехиометрии  $RM_2$  обладают рядом уникальных магнитных свойств. Редкоземельные интерметаллиды указанной стехиометрии принято называть фазами Лавеса. Известно, что данная стехиометрия встречается в двух структурных типах: кубическая решетка типа  $MgCu_2$  или фаза Лавеса C15 и гексагональная решетка типа  $MgZn_2$  – фаза Лавеса C14 [3].

Фаза Лавеса C15 обладает кубической симметрией, содержит 8 формульных единиц, т.е. 24 атома, располагающихся в двух неэквивалентных положениях [4]: 8(a) и 16(d) из которых 8 атомов РЗМ и 16 атомов Fe. А структура фазы Лавеса C14 – гексагональная, в ней 4 формульных единиц и, следовательно, всего 12 атомов: 4 атома РЗМ и 8 атомов Fe. Фазы Лавеса  $RM_2$  обладают высокой плотностью упаковки, большими координационными числами и высокой симметрией.

Наиболее интересны их магнитные свойства, которые существенно зависят от их структурных особенностей [3, 5]. Поэтому изучение структуры твердых тел и физических свойств в их органической взаимосвязи является достаточно актуальной задачей физики конденсированного состояния и позволяет прогнозировать и получать материалы с определенным набором физико-химических характеристик.

Наибольший интерес вызывают фазы Лавеса типа  $RFe_2$ , так как они при относительно простой кристаллической структуре обладают рядом уникальных магнитных свойств, как гигантская магнитострикция [6] и большой магнитокалорический эффект [5] и достаточно высокие температуры Кюри. Если оба типа атомов в фазах Лавеса обладают магнитным моментом, то чаще всего их представляют в виде двухподрешеточных магнетиков, у которых одна подрешетка состоит из редкоземельных R-ионов, а другая – из 3d-переходных ионов [7]. В результате возникает коллинеарная магнитная структура, в которой магнитные моменты R и 3d-подрешеток параллельны друг к другу, причем для легких редкоземельных элементов суммарные магнитные моменты  $M_R$  и  $M_{3d}$  редкоземельной и 3d-переходной подрешеток направлены в одну и ту же сторону, поэтому полный магнитный момент равен:  $M_{RM_2} = M_R + 2M_{3d}$ .

Если редкоземельный элемент относится к тяжелым РЗМ, то суммарные магнитные моменты  $M_R$  и  $M_{3d}$  редкоземельной и 3d-переходной подрешеток антипараллельны, поэтому полный магнитный равен соотношению:  $M_{RM_2} = M_R - 2M_{3d}$ .

В первом случае мы имеем дело с ферромагнитным упорядочением магнитных моментов атомов редкоземельного магнетика, а во втором – с ферримагнитным.

Тип магнитного порядка в редкоземельных интерметаллидах, а, следовательно, и его практически важные свойства обусловлены обменными взаимодействиями, которые, как известно, в бинарных соединениях бывают трех типов: между переходными 3d-ионами (Fe - Fe); между редкоземельными ионами (R-R) и между редкоземельными и 3d-переходными ионами (R-Fe). В зависимости от знака интеграла обменного взаимодействия [8] в магнетиках реализуется ферро- или ферримагнитный порядок расположения магнитных моментов атомов, из которых состоит тот или иной магнетик. Таким образом,

соединения с легкими РЗМ обладают ферромагнетизмом, а с тяжелыми РЗМ проявляют ферримагнетизм [5], как и было сказано выше.

При замещении атомов в редкоземельной или 3d- подрешетке создаются многокомпонентные композиции, в которых изменяя значение параметра замещения в широком диапазоне, а, следовательно, и межатомные расстояния, можно влиять на обменные взаимодействия для получения сплавов с наиболее оптимальными магнитными характеристиками в заданном интервале температур и полей. При этом можно наблюдать большое разнообразие фазовых переходов: структурных, магнитных, магнитоориентационных, спин-переориентационных.

Таким образом, варьируя не только концентрацию компонент, но и температуру и внешние поля можно наблюдать ряд уникальных явлений в области фазовых превращений, обусловленных изменением знака и величины обменных взаимодействий под влиянием перечисленных выше внешних факторов.

Поэтому в данной работе была поставлена цель – исследование фазового состава, атомно-кристаллической структуры и определение основных магнитных характеристик многокомпонентных сплавов  $(R_{1-x}Y_x)_{0.8}Sm_{0.2}Fe_2$ , где  $R = Tb, Gd, Dy$  и  $Er$  в зависимости от параметра замещения  $x$ .

За основу системы взяты бинарные соединения  $TbFe_2, GdFe_2, DyFe_2, ErFe_2$  и  $SmFe_2$ , часть из которых обладает рекордными значениями констант магнитострикции [9]. В данных системах происходит замещение в редкоземельной подрешетке сначала легким редкоземельным элементом  $Sm$  в стационарной концентрации, а затем немагнитным  $Y$  при различных значениях параметра замещения  $x = 0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0$ . В результате, в сплавах системы будет наблюдаться конкуренция обменных взаимодействий  $R-Fe$  ( $R = Tb, Gd, Dy$  и  $Er$ ) и  $Sm-Fe$  в зависимости от концентрации иттрия, вводимого в редкоземельную подрешетку. Поэтому исследование сплавов данной системы позволит изучить не только межподрешеточное обменное взаимодействие  $R-Fe$  при разбавлении редкоземельной подрешетки атомами немагнитного иттрия, но и обменное взаимодействие в самой редкоземельной подрешетке.

Фазы Лавеса являются перспективными материалами для применения в качестве магнитострикционных элементов в ряде устройств ультразвуковой техники, оптоэлектроники, автоматики и радиотехники. Большой магнитокалорический эффект указывает на перспективность РЗМ и их сплавов в качестве рабочих тел в магнитных холодильных машинах [10]. А поиск экологически чистых источников энергии указывает на возможность использования их в качестве аккумуляторов водорода и дейтерия. Редкоземельные интерметаллиды и сплавы на их основе широко используются в качестве датчиков малых перемещений и постоянных магнитов. Тот факт, что соединения  $R-Co$  демонстрируют оптимальные магнитные свойства в области азотных температур, открывает широкие перспективы их использованию в криогенных устройствах. В последнее время интерметаллиды  $RFe_2$  интенсивно используются в медицине и в энергосберегающих технологиях, а также в робототехнике.

## ОБРАЗЦЫ И МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЯ

Для достижения поставленной цели нами впервые синтезированы новые многокомпонентные сплавы четырех систем на основе тяжелых редкоземельных металлов ( $Tb_{1-x}Y_x$ )<sub>0.8</sub>Sm<sub>0.2</sub>Fe<sub>2</sub>, ( $Gd_{1-x}Y_x$ )<sub>0.8</sub>Sm<sub>0.2</sub>Fe<sub>2</sub>, ( $Dy_{1-x}Y_x$ )<sub>0.8</sub>Sm<sub>0.2</sub>Fe<sub>2</sub> и ( $Er_{1-x}Y_x$ )<sub>0.8</sub>Sm<sub>0.2</sub>Fe<sub>2</sub>.

Параметр замещения в данных сплавах принимает значения  $x = 0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0$ .

Синтез сплавов ( $Tb_{1-x}Y_x$ )<sub>0.8</sub>Sm<sub>0.2</sub>Fe<sub>2</sub> произведен нами на основе высокочистых РЗМ и Fe в дуговой печи с нерасходуемым вольфрамовым электродом на медном водоохлаждаемом поду специальной конструкции в атмосфере очищенного инертного газа (аргона) при нормальном давлении. Затем образцы подвергались гомогенизирующему отжигу в течение 2 недель.

Сплавы систем ( $Gd_{1-x}Y_x$ )<sub>0.8</sub>Sm<sub>0.2</sub>Fe<sub>2</sub>, ( $Dy_{1-x}Y_x$ )<sub>0.8</sub>Sm<sub>0.2</sub>Fe<sub>2</sub> и ( $Er_{1-x}Y_x$ )<sub>0.8</sub>Sm<sub>0.2</sub>Fe<sub>2</sub> изготовлены методом высокочастотной индукционной плавки в алундовом тигле в атмосфере особо чистого аргона (содержание влаги менее 0,02 г·м<sup>3</sup>, азота – 0,0005 %, кислорода – 0,001 %), давление которого составляло 1,1 – 1,2 атм. Затем образцы подвергали гомогенизирующему отжигу. Скорость остывания сплавов была достаточно низкой (около 1 – 2 К/с), что способствовало достижению состояния, близкого к равновесному.

Рентгеноструктурный анализ проводился на дифрактометре Panalytical Empyrean в Cu K $\alpha$ -излучении ( $\lambda = 0,1540598$  нм) при комнатной температуре на порошковых образцах в геометрии Брэгга-Брентано (рабочий режим  $I = 40$  мА,  $U = 40$  кВ) в диапазоне углов  $2\theta = 15 - 105^\circ$  с шагом  $0.026^\circ$  с использованием двухкоординатного детектора Pixel3D, системы варьированных щелей, никелевого фильтра. Фаза идентифицировалась по рефлексам (222), (311) и (220). Анализ дифрактограмм проводился с помощью программного обеспечения FullProf. Фазовый состав образца исследовался с помощью Ритвельд-анализа в программе Powred Cell 2.4.

Намагниченность сплавов ( $Tb_{1-x}Y_x$ )<sub>0.8</sub>Sm<sub>0.2</sub>Fe<sub>2</sub> измерялась на вибрационном магнетометре на основе многофункциональной системы измерения физических свойств со сверхпроводящим магнитом (PPMS-14, Quantum Design) при непрерывном изменении магнитного поля до 140 кЭ при  $T = 4.2$  К. Намагниченность сплавов ( $Gd_{1-x}Y_x$ )<sub>0.8</sub>Sm<sub>0.2</sub>Fe<sub>2</sub>, ( $Dy_{1-x}Y_x$ )<sub>0.8</sub>Sm<sub>0.2</sub>Fe<sub>2</sub> и ( $Er_{1-x}Y_x$ )<sub>0.8</sub>Sm<sub>0.2</sub>Fe<sub>2</sub> проводилась в широкой температурной области от 85 до 750 К в стационарных магнитных полях до 15 кЭ.

Измерения магнитострикции сплавов данных систем проведены тензометрическим методом в интервале температур 80 – 300 К в магнитных полях до 12 кЭ.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Нами получены дифрактограммы для всех сплавов исследованных систем. На рисунке 1 представлена дифрактограмма сплава Sm<sub>0.2</sub>Y<sub>0.8</sub>Fe<sub>2</sub>, который является исходным сплавом для всех систем при  $x = 1$ .

Рентгеноструктурный анализ, проведенный нами, показал, что все сплавы систем ( $Gd_{1-x}Y_x$ )<sub>0.8</sub>Sm<sub>0.2</sub>Fe<sub>2</sub>, ( $Dy_{1-x}Y_x$ )<sub>0.8</sub>Sm<sub>0.2</sub>Fe<sub>2</sub> и ( $Er_{1-x}Y_x$ )<sub>0.8</sub>Sm<sub>0.2</sub>Fe<sub>2</sub>, а также крайние составы системы с тербием, Tb<sub>0.8</sub>Sm<sub>0.2</sub>Fe<sub>2</sub>, Sm<sub>0.2</sub>Y<sub>0.8</sub>Fe<sub>2</sub>, являются однофазными. В более сложных составах системы с тербием ( $Tb_{0.8}Y_{0.2}$ )<sub>0.8</sub>Sm<sub>0.2</sub>Fe<sub>2</sub>, ( $Tb_{0.6}Y_{0.4}$ )<sub>0.8</sub>Sm<sub>0.2</sub>Fe<sub>2</sub>, ( $Tb_{0.4}Y_{0.6}$ )<sub>0.8</sub>Sm<sub>0.2</sub>Fe<sub>2</sub>, ( $Tb_{0.2}Y_{0.8}$ )<sub>0.8</sub>Sm<sub>0.2</sub>Fe<sub>2</sub> имело место явление фазового расслоения. В данных образцах содержалась вторая фаза RFe<sub>3</sub>, количество которой варьировалось от 5 до 10 %.

Рентгенодифракционные исследования показали, что все сплавы данных систем обладают кубической структурой фазы Лавеса C15 [11,12]. Элементарная ячейка данного типа можно представить в виде двух подрешеток, образованных соответственно атомами R и Fe, вставленных одна в другую. Атомы Fe располагаются в вершинах тетраэдров, которые соединяются друг с другом своими вершинами, образуя непрерывный каркас. Между такими тетраэдрами образуются пустоты, которые заполняются более крупными атомами R.

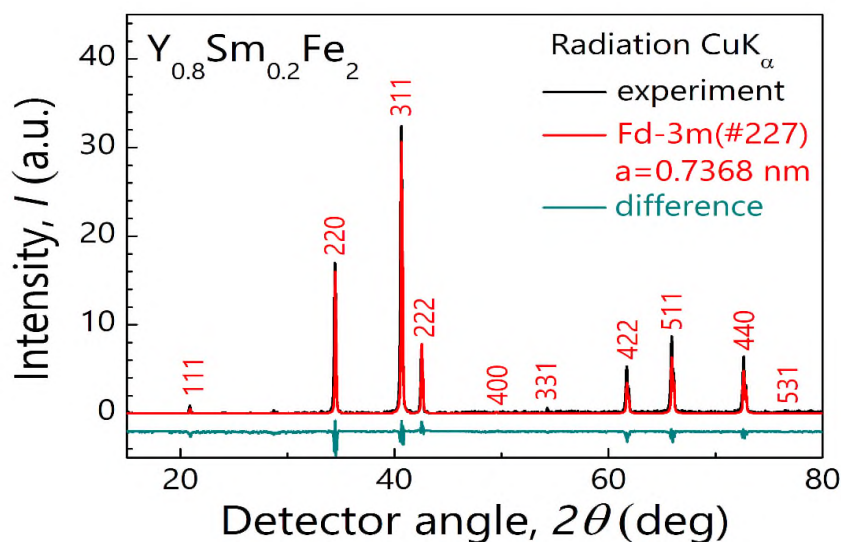
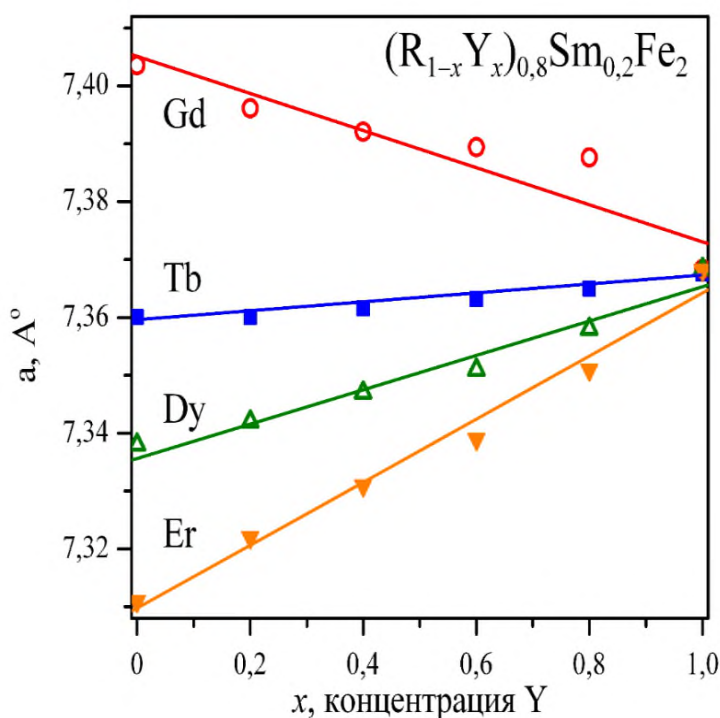


Рис. 1. Дифрактограмма сплава  $Y_{0.8}Sm_{0.2}Fe_2$  при температуре  $T = 300$  К.

Из исследований атомно-кристаллической структуры сплавов систем  $(R_{1-x}Y_x)_{0.8}Sm_{0.2}Fe_2$  (где  $R = Tb, Gd, Dy$  и  $Er$ ), нами определены параметры решетки сплавов для каждой из систем. Полученные результаты представлены на рис. 2.

Из рисунка 2 видно, что параметры решетки изменяются линейно в зависимости от концентрации Y, введенного в РЗМ подрешетку. В сплавах систем  $(Tb_{1-x}Y_x)_{0.8}Sm_{0.2}Fe_2$ ,  $(Dy_{1-x}Y_x)_{0.8}Sm_{0.2}Fe_2$  и  $(Er_{1-x}Y_x)_{0.8}Sm_{0.2}Fe_2$  наблюдается рост параметра решетки  $a(x)$  с ростом концентрации иттрия. Этот рост незначителен в сплавах Tb и достаточно заметен в сплавах с Dy и Er. В системе с Gd, наоборот, наблюдается достаточно значительное уменьшение параметра решетки от значения  $a = 7.4036 \text{ \AA}$  в  $Gd_{0.8}Sm_{0.2}Fe_2$  до  $a = 7,3684 \text{ \AA}$  в  $Y_{0.8}Sm_{0.2}Fe_2$ , соответственно.

Такое поведение при переходе от Gd к Er может быть связано, во-первых, с наличием слабо- (Gd) и сильноанизотропных (Tb, Dy, Er) ионов в соответствующей редкоземельной подрешетке, а также с таким известным явлением, как лантаноидное сжатие в ряду РЗМ с ростом порядкового номера элемента.



**Рис. 2.** Концентрационная зависимость параметров решетки сплавов многокомпонентных систем  $(Tb_{1-x}Y_x)_{0,8}Sm_{0,2}Fe_2$ ,  $(Gd_{1-x}Y_x)_{0,8}Sm_{0,2}Fe_2$ ,  $(Dy_{1-x}Y_x)_{0,8}Sm_{0,2}Fe_2$  и  $(Er_{1-x}Y_x)_{0,8}Sm_{0,2}Fe_2$

Были измерены полевые и температурные зависимости намагниченности соединений при температурах от 4.2 до 300 К в полях до 14 Т. На рисунке 3 представлены кривые намагниченности сплавов системы  $(Tb_{1-x}Y_x)_{0,8}Sm_{0,2}Fe_2$ , полученные нами при температуре 4.2 К. Данные зависимости показывают, что кривые  $M(H)$  для всех сплавов системы достаточно быстро выходят на насыщение в полях до 3 - 4 Т.

Для сплавов указанных систем проведен термомагнитный анализ от 300 до 770 К в поле 5 Э. Из данных измерений определены температуры Кюри образцов. Температура Кюри определялась как проекция на ось абсцисс точки пересечения касательной к графику температурной зависимости намагниченности с асимптотой, проведенной к конечной части графика. Концентрационные зависимости температуры Кюри сплавов систем  $(Tb_{1-x}Y_x)_{0,8}Sm_{0,2}Fe_2$  и  $(Gd_{1-x}Y_x)_{0,8}Sm_{0,2}Fe_2$  представлены на рис. 4.

Из рисунка 4 видно, что в системе  $(Gd_{1-x}Y_x)_{0,8}Sm_{0,2}Fe_2$  температура Кюри линейно падает с ростом концентрации немагнитного иттрия от значения 718 К для ферромагнитного  $Gd_{0,8}Sm_{0,2}Fe_2$  до 541 К для ферромагнитного  $Y_{0,8}Sm_{0,2}Fe_2$ . Аналогичная зависимость  $T_c(x)$  для системы  $(Tb_{1-x}Y_x)_{0,8}Sm_{0,2}Fe_2$  является нелинейной. Обе зависимости расположены достаточно близко друг к другу. Наибольшая разница в значениях температур Кюри наблюдается для крайних составов  $Tb_{0,8}Sm_{0,2}Fe_2$  и  $Gd_{0,8}Sm_{0,2}Fe_2$ , 672 и 718 К, соответственно. Исследование намагниченности сплавов систем  $(R_{1-x}Y_x)_{0,8}Sm_{0,2}Fe_2$  (где  $R = Tb, Gd, Dy$  и  $Er$ ) показало, что сплавы с подобным замещением в редкоземельной подрешетке обладают рядом уникальных свойств в определенных концентрационных областях, обу-

словленные конкурирующими обменными взаимодействиями, как междоузельными, так и внутриподрешеточными.

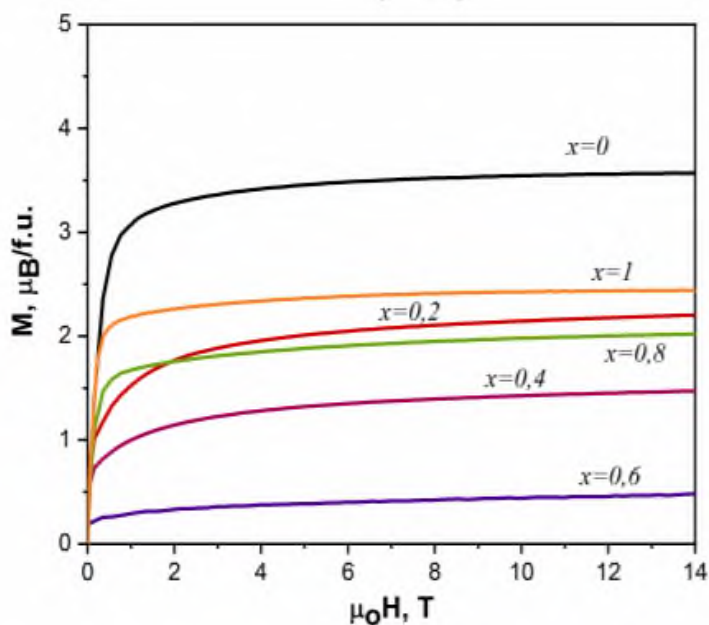


Рис. 3. Полевые намагниченности сплавов системы  $(Tb_{1-x}Y_x)_{0.8}Sm_{0.2}Fe_2$  в магнитных полях до 14 Т при температуре 4.2 К.

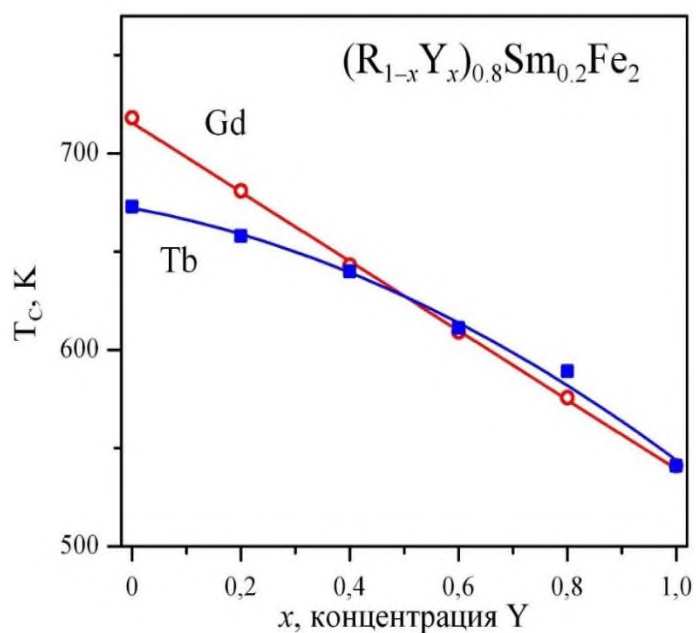


Рис. 4. Зависимость температуры Кюри сплавов систем  $(Tb_{1-x}Y_x)_{0.8}Sm_{0.2}Fe_2$  и  $(Gd_{1-x}Y_x)_{0.8}Sm_{0.2}Fe_2$  от концентрации Y.



Для каждой из изученных систем  $(\text{Tb}_{1-x}\text{Y}_x)_{0.8}\text{Sm}_{0.2}\text{Fe}_2$ ,  $(\text{Gd}_{1-x}\text{Y}_x)_{0.8}\text{Sm}_{0.2}\text{Fe}_2$ ,  $(\text{Dy}_{1-x}\text{Y}_x)_{0.8}\text{Sm}_{0.2}\text{Fe}_2$  и  $(\text{Er}_{1-x}\text{Y}_x)_{0.8}\text{Sm}_{0.2}\text{Fe}_2$  в модели трехподрешеточного ферримагнетика определены концентрации иттрия, в области которой наблюдается взаимная магнитная компенсация редкоземельной и 3d-подрешеток [13]. Иными словами, сумма магнитных моментов R- и Fe-подрешеток (направленных антипараллельно друг другу) компенсируют друг друга.

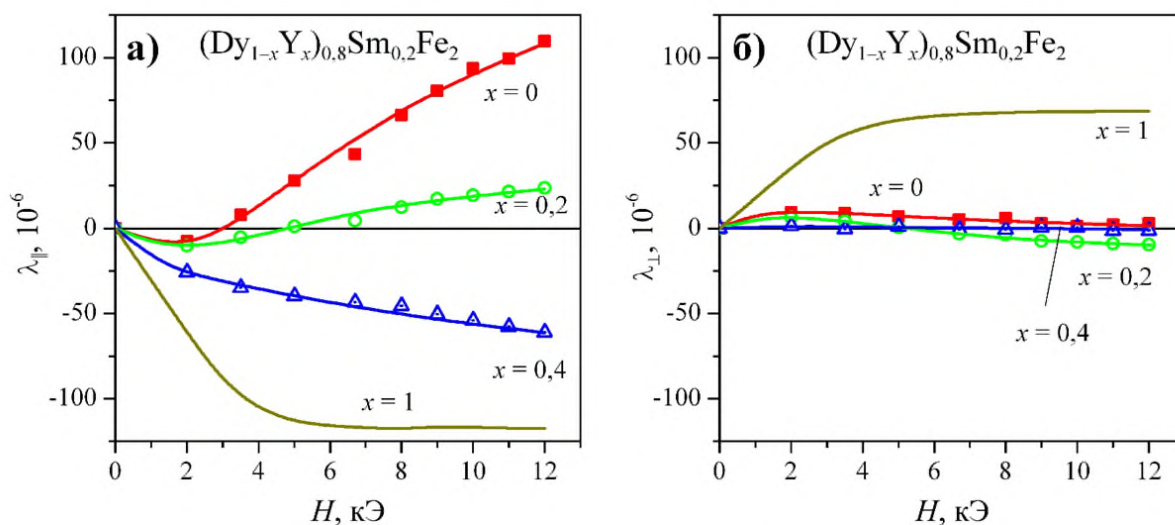
Состав и температура, при которых имеет место эффект компенсации, называют компенсирующим составом  $x_{\text{comp}}$  и температурой компенсации  $T_{\text{comp}}$ , соответственно. Согласно нашим вычислениям, все системы обладают точкой компенсации  $x_{\text{comp}}$ , которая равна 0.46, 0.58, 0.62 и 0.52, соответственно, для систем с Gd, Tb, Dy и Er. При этих значениях концентрации иттрия меняется тип доминирующего междошрешеточного обменного взаимодействия.

Кроме того, использованный в работе тип замещения в редкоземельной подрешетке существенно влияет на природу магнетизма в исследованных сплавах. Установлено, что в сплавах замещения с иттрием преобладает одноионный механизм магнитострикции.

Магнитострикционные деформации, возникающие под действием внешнего магнитного поля, приложенного к образцу, крайне чувствительны к различным магнитным фазовым переходам в магнетиках, в том числе и спин-переориентационном.

Исследования, проведенные нами ранее, показали, что во всех сплавах систем в той или иной мере проявляют себя спин-переориентационные переходы, присущие соединению  $\text{SmFe}_2$  [14].

Эти превращения влияют и на ход кривых теплового расширения [15] и на поведение магнитострикции. На рисунке 5 представлены кривые зависимости продольной  $\lambda_{\parallel}$  и поперечной  $\lambda_{\perp}$  магнитострикции от внешнего поля системы  $(\text{Dy}_{1-x}\text{Y}_x)_{0.8}\text{Sm}_{0.2}\text{Fe}_2$  для сплавов с параметром замещения  $x = 0, 0.2, 0.4$  и 1.0.



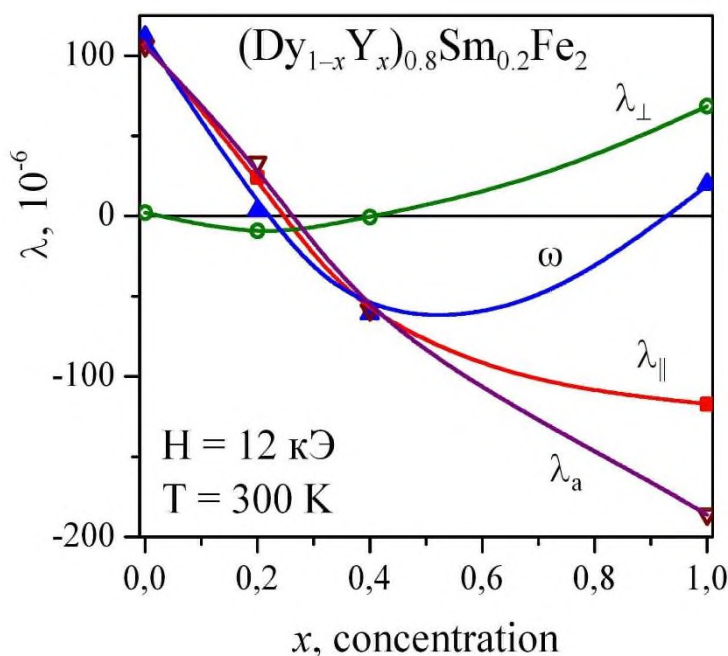
**Рис. 5.** Зависимость продольной (а) и поперечной (б) магнитострикции сплавов системы  $(\text{Dy}_{1-x}\text{Y}_x)_{0.8}\text{Sm}_{0.2}\text{Fe}_2$  от магнитного поля.

Из рис. 5 видно, продольная магнитострикция  $\lambda_{\parallel}$  в области слабых полей отрицательна, а поперечная  $\lambda_{\perp}$  – положительна. С ростом поля на всех кривых  $\lambda_{\parallel}(x)$  и  $\lambda_{\perp}(x)$  появляются составляющие противоположных знаков. Дальнейший рост поля приводит к инверсии знака констант магнитострикции. Сама величина магнитострикционных деформаций при комнатной температуре не превышает значений  $100 \cdot 10^{-6}$ .

Это явление более наглядно видно на концентрационных зависимостях продольной, поперечной, анизотропной и объемной магнитострикции сплавов системы  $(\text{Dy}_{1-x}\text{Y}_x)_{0.8}\text{Sm}_{0.2}\text{Fe}_2$ , полученных при комнатной температуре и в магнитном поле 12 кЭ.

На рисунке 6 видно, что в сплавах многокомпонентных  $(\text{Dy}_{1-x}\text{Y}_x)_{0.8}\text{Sm}_{0.2}\text{Fe}_2$  продольная магнитострикция  $\lambda_{\parallel}$  сплавов и анизотропная магнитострикция  $\lambda_a$  меняют знак с ростом параметра  $x$  с положительного на отрицательный.

Поперечная магнитострикция  $\lambda_{\perp}$  с ростом параметра замещения  $x$  практически с нулевого значения становится отрицательной, затем меняет знак на положительный. Объемная магнитострикция  $\omega$  также меняет знак дважды, сначала с положительного значения на отрицательное, затем, наоборот, с отрицательного на положительное. В данной системе константы магнитострикции ведут себя достаточно сложно, и чтобы объяснить более подробно такое их поведение необходимы дополнительные исследования. Что же касается самого явления инверсии знака констант магнитострикции, то оно наблюдалось авторами в системе  $\text{Tb}_{1-x}\text{Zr}_x\text{Fe}_2$  [16] и для сплавов системы  $(\text{Tb}_{1-x}\text{Y}_x)_{0.8}\text{Sm}_{0.2}\text{Fe}_2$  [17].



**Рис. 6.** Концентрационные зависимости продольной  $\lambda_{\parallel}$ , поперечной  $\lambda_{\perp}$ , анизотропной  $\lambda_a$  и объемной  $\omega$  магнитострикции сплавов системы  $(\text{Dy}_{1-x}\text{Y}_x)_{0.8}\text{Sm}_{0.2}\text{Fe}_2$  при  $T = 300 \text{ K}$  и в магнитном поле 12 кЭ.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные результаты показывают, что выбранный тип замещения в РЗМ-подрешетке является достаточно эффективным инструментом для влияния на величину обменных взаимодействий в случае многокомпонентных сплавов стехиометрии  $RM_2$ . Расчеты концентраций иттрия, при которых происходит взаимная компенсация намагниченностей R- и 3d – подрешеток в многокомпонентной системе, проведенные в рамках модели коллинеарных магнитных моментов показали, что системы  $(R_{1-x}Y_x)_{0.8}Sm_{0.2}Fe_2$  имеют компенсационный состав при  $x_{comp} = 0.46, 0.58, 0.62$  и  $0.52$  в случае, когда  $R = Gd, Tb, Dy$  и  $Er$ , соответственно.

Экспериментальное исследование намагниченности указанных систем в зависимости от концентрации Y и приложенного поля подтвердили наши расчеты.

Инверсия знака констант магнитострикции, аномалии на кривых теплового расширения всех сплавов, позволяют утверждать, что совместное влияние концентрации компонент, температуры и приложенных полей позволяют целенаправленно влиять на величину и тип обменных взаимодействий для прогнозирования и формирования в магнитоупорядоченных сплавах наиболее оптимальных физико-химических характеристик.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-22-00313, <https://rscf.ru/project/22-22-00313/>

## ЛИТЕРАТУРА

1. Cullity B. D., Graham C. D. Introduction to Magnetic Materials [Text] / B. D. Cullity, C. D. Graham. - New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2008. - 146 P.
2. Белов К.П. Магнитострикционные явления и их технические приложения [Текст] / К.П. Белов. - Москва: Наука, 1987. - 159 с.
3. Илюшин А. С. Основы структурной физики редкоземельных интерметаллических соединений [Текст] / А. С. Илюшин. - Москва: МГУ, 2005. - 174 С.
4. Stein F., Palm M., Sauthoff G. Structure and stability of Laves phases Intermetallics [Text] / F. Stein, M. Palm, G. Sauthoff // Physika F. - 2004. - V. 12. - P. 713 – 720.
5. Тейлор К. Интерметаллические соединения редкоземельных металлов [Текст] / К. Тейлор. - Москва: Мир, 1974. - 221 С.
6. Engdahl G. Handbook of giant magnetostrictive materials [Text] / G. Engdahl. - London: Academic Press, 2000. - 386 P.
7. Теслюк М. Ю. Металлические соединения со структурами фаз Лавеса [Текст] / М. Ю. Теслюк. - Москва: Наука, 1969. - 136 С.
8. Илюшин А. С. Введение в структурную физику интерметаллических соединений [Текст] / А. С. Илюшин. - Москва: МГУ, 1984. - 99 С.
9. Гшнайдер К., Айринг Л. Физика и химия редкоземельных элементов [Текст] / К. Гшнайдер, Л. Айринг. - Москва: Металлургия, 1982. - 336 С.
10. Чжан В. Б. Исследование структуры и магнитокалорических свойств гадолиния, тербия, диспрозия после гидрирования и редкоземельных фаз Лавеса [Текст] / Москва: ИМЕТ им. Байкова А.А, 2017. - 145 С.
11. Umkhaeva Z. S., Tereshina I. S., Pankratov N.Y u., Aliev I. M. The phenomenon of magnetic compensation in the multicomponent (Sm, Gd, Y)Fe<sub>2</sub> compounds [Text] / Z. S. Umkhaeva, I. S. Tereshina, N. Yu. Pankratov, I. M. Aliev // Abstracts of VIII Euro-Asian Symposi-

um «Trends in MAGnetism» EASTMAG-2022. Kazan. Russia. 22-26 August 2022. P. 322 – 324.

12. Умхаева З. С., Терёшина И. С., Панкратов Н. Ю., Алиев И. М., Гацаев З. Ш., Саид-Ахматова Ф. С-А. Исследование атомно-кристаллической структуры и морфологии поверхности сплавов многокомпонентной системы  $(Gd_{1-x}Y_x)_{0.8}Sm_{0.2}Fe_2$  [Текст] / З. С. Умхаева, И. С. Терёшина, Н. Ю. Панкратов, И. М. Алиев, З. Ш. Гацаев, Ф. С-А. Саид-Ахматова // Материалы Всероссийской научно-практической конференции «Вузовское образование и наука». Магас. Россия. 22 - 24 июня 2022. С. 305 – 311.

13. Умхаева З. С., Терёшина И. С., Панкратов Н. Ю., Алиев И. М., Саид-Ахматова Ф. С-А. Теоретическое моделирование многокомпонентных систем на основе тяжелых редкоземельных элементов [Текст] / З. С. Умхаева, И. С. Терёшина, Н. Ю. Панкратов, И. М. Алиев, Ф. С-А. Саид-Ахматова // Известия ЧГУ. - 2022. - № 2(26). - С. 07 – 13.

14. Pankratov N. Yu., Tereshina I. S., Politova G. A., Aleroeva T. A., Filimonov A. V. et.al. Features of magnetostriction behavior of the intermetallic compound  $Sm_{0.2}Y_{0.8}Fe_2$  near the spin reorientation transitions [Text] / aN. Yu. Pankratov, I. S. Tereshina, G. A. Politova, T. A. Aleroeva, A.V. Filimonov et.al // JMMM. - 2021. - V. 527. - Art. № 167728.

15. Umkhaeva Z. S., Tereshina I. S., Pankratov N. Yu., Aliev I. M. Features of thermal expansion in substitution alloys based on heavy rare-earth metals  $R^{I}_{1-x}R^{II}_xFe_2$  [Text] / Z. S. Umkhaeva, I. S. Tereshina, N. Yu. Pankratov, I. M. Aliev // Abstracts of VIII Euro-Asian Symposium «Trends in MAGnetism» EASTMAG-2022. Kazan. Russia. 22-26 August 2022. - P. 492 – 493.

16. Umkhaeva Z. S., Ilyushin A. S., Nikitin S. A., Aleroeva T. A., Pankratov N. Yu., Tereshina I. S. Magnetic and magnetoelastic properties of rare earth intermetallics based on  $TbFe_2$  [Text] / Z. S. Umkhaeva, A. S. Ilyushin, S. A. Nikitin, T. A. Aleroeva, N. Yu. Pankratov, I. S. Tereshina // IOP: Conference Series. - 2020. – V. 905. - Art. № 12071.

17. Umkhaeva Z. S., Ilyushin A. S., Aleroeva T. A., Tereshina I. S., Pankratov N. Yu. Yttrium influence in exchange interactions in Laves phases  $(Tb_{1-x}Y_x)_{0.8}Sm_{0.2}Fe_2$  [Text] / Z. S. Umkhaeva, A. S. Ilyushin, T. A. Aleroeva, I. S. Tereshina, N. Yu. Pankratov // AER-Advances in Engineering Research. - 2018. - V. 177. - P. 167 – 172.

## REFERENCES

1. Cullity B. D., Graham C. D. Introduction to Magnetic Materials [Text] / B. D. Cullity, C. D. Graham. - New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2008. - 146 P.

2. Belov K. P. Magnetostrictive phenomena and their technical applications [Text] / K. P. Belov. - Moscow: Nauka, 1987. - 159 c.

3. Ilyushin A. S. Fundamentals of structural physics of rare-earth intermetallic compounds. S. Fundamentals of structural physics of rare-earth intermetallic compounds [Text] / A. S. Ilyushin. - Moscow: Moscow State University, 2005. - 174 C.

4. Stein F., Palm M., Sauthoff G. Structure and stability of Laves phases Intermetallics [Text] / F. Stein, M. Palm, G. Sauthoff // Physika F. - 2004. - V. 12. - P. 713 – 720.

5. Taylor K. Intermetallic compounds of rare earth metals [Text] / K. Taylor. - Moscow: Mir, 1974. - 221 P.

6. Engdahl G. Handbook of giant magnetostrictive materials [Text] / G. Engdahl. - London: Academic Press, 2000. - 386 P.

7. Teslyuk M. Yu. Metallic compounds with Laves phase structures [Text] / M. Yu. Teslyuk. - Moscow: Nauka, 1969. - 136 P.
8. Ilyushin A. C. Introduction to structural physics of intermetallic compounds [Text] / A. S. Ilyushin. - Moscow: Moscow State University, 1984. - 99 P.
9. Gschneider K., Eyring L. Physics and chemistry of rare earth elements [Text] / K. Gschneider, L. Eyring. - Moscow: Metallurgy, 1982. - 336 P.
10. Zhang W.B. Study of structure and magnetocaloric properties of gadolinium, terbium, dysprosium after hydrogenation and rare-earth phases of Laves [Text] / Moscow: IMET named after Baikov A.A., 2017. - 145 P.
11. Umkhaeva Z. S., Tereshina I. S., Pankratov N.Y u., Aliev I. M. The phenomenon of magnetic compensation in the multicomponent (Sm, Gd, Y)Fe<sub>2</sub> compounds [Text] / Z. S. Umkhaeva, I. S. Tereshina, N. Yu. Pankratov, I. M. Aliev // Abstracts of VIII Euro-Asian Symposium «Trends in MAGnetism» EASTMAG-2022. Kazan. Russia. 22-26 August 2022. P. 322 – 324.
12. Umkhaeva Z. S., Tereshina I. S., Pankratov N. Yu. M., Gatsaev Z. Sh., Said-Akhmatova F. S-A. Investigation of atomic crystal structure and surface morphology of alloys of multicomponent system (Gd<sub>1-x</sub>Y<sub>x</sub>)<sub>0.8</sub>Sm<sub>0.2</sub>Fe<sub>2</sub> [Text] / Z. S. Umkhaeva, I. S. Tereshina, N. Y. Pankratov, I. M. Aliev, Z. S. Gatsaev, F. S-A. Said-Akhmatova // Materials of the All-Russian Scientific and Practical Conference "University Education and Science". Magas. Russia. 22 - 24 June 2022. P. 305 - 311.
13. Umkhaeva Z. S., Tereshina I. S., Pankratov N. Yu. M., Said-Akhmatova F. S-A. Theoretical modelling of multicomponent systems based on heavy rare-earth elements [Text] / Z. S. Umkhaeva, I. S. Tereshina, N. Y. Pankratov, I. M. Aliev, F. S-A. Said-Akhmatova // Izvestiya CHGU. - 2022. - № 2(26). - С. 07 - 13.
14. Pankratov N. Yu., Tereshina I. S., Politova G. A., Aleroeva T. A., Filimonov A. V. et.al. Features of magnetostriction behavior of the intermetallic compound Sm<sub>0.2</sub>Y<sub>0.8</sub>Fe<sub>2</sub> near the spin reorientation transitions [Text] / aN. Yu. Pankratov, I. S. Tereshina, G. A. Politova, T. A. Aleroeva, A.V. Filimonov et.al // JMMM. - 2021. - V. 527. - Art. № 167728.
15. Umkhaeva Z. S., Tereshina I. S., Pankratov N. Yu., Aliev I. M. Features of thermal expansion in substitution alloys based on heavy rare-earth metals R<sup>I</sup><sub>1-x</sub>R<sup>II</sup><sub>x</sub>Fe<sub>2</sub> [Text] / Z. S. Umkhaeva, I. S. Tereshina, N. Yu. Pankratov, I. M. Aliev // Abstracts of VIII Euro-Asian Symposium «Trends in MAGnetism» EASTMAG-2022. Kazan. Russia. 22-26 August 2022. - P. 492 – 493.
16. Umkhaeva Z. S., Ilyushin A. S., Nikitin S. A., Aleroeva T. A., Pankratov N. Yu., Tereshina I. S. Magnetic and magnetoelastic properties of rare earth intermetallics based on TbFe<sub>2</sub> [Text] / Z. S. Umkhaeva, A. S. Ilyushin, S. A. Nikitin, T. A. Aleroeva, N. Yu. Pankratov, I. S. Tereshina // IOP: Conference Series. - 2020. – V. 905. - Art. № 12071.
17. Umkhaeva Z. S., Ilyushin A. S., Aleroeva T. A., Tereshina I. S., Pankratov N. Yu. Yttrium influence in exchange interactions in Laves phases (Tb<sub>1-x</sub>Y<sub>x</sub>)<sub>0.8</sub>Sm<sub>0.2</sub>Fe<sub>2</sub> [Text] / Z. S. Umkhaeva, A. S. Ilyushin, T. A. Aleroeva, I. S. Tereshina, N. Yu. Pankratov // AER-Advances in Engineering Research. - 2018. - V. 177. - P. 167 – 172.