

**ЭФФЕКТ МЕССБАУЭРА В МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ СПЛАВАХ СИСТЕМЫ  
( $\text{HO}_{1-x}\text{Y}_x$ ) $_{0.8}\text{Sm}_{0.2}\text{Fe}_2$**

**Умхаева Зарган Сайпудиновна (а), Русаков Вячеслав Серафимович (б), Губайдулина Татьяна Валиевна (с), Карпенков Алексей Юрьевич (д), Терёшина Ирина Семеновна (е), Панкратов Николай Юрьевич (ф), Алиев Ислам Магомедович (г)**

- (а) Комплексный научно-исследовательский институт им. Х.И. Ибрагимова РАН, отдел материаловедения, заведующая отделом, доктор физико-математических наук, [zargan.umhaeva@yandex.ru](mailto:zargan.umhaeva@yandex.ru), г. Грозный
- (б) Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, кафедра общей физики, проф., доктор физико-математических наук, [rusakov@phys.msu.ru](mailto:rusakov@phys.msu.ru), г. Москва.
- (с) Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, кафедра общей физики, старший преподаватель, кандидат физико-математических наук, [tgubaidulina@yandex.ru](mailto:tgubaidulina@yandex.ru), г. Москва.
- (д) Тверской государственный университет, кафедра физики конденсированного состояния, заведующий кафедрой, кандидат физико-математических наук, [karpenkov\\_alex@mail.ru](mailto:karpenkov_alex@mail.ru), г. Тверь.
- (е) Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, кафедра физики твердого тела, внс, доктор физико-математических наук, [irina\\_tereshina@mail.ru](mailto:irina_tereshina@mail.ru)
- (ф) Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, кафедра общей физики и магнитоупорядоченного состояния, ст. преподаватель, кандидат физико-математических наук, [pankratov@phys.msu.ru](mailto:pankratov@phys.msu.ru), г. Москва
- (г) Комплексный научно-исследовательский институт им. Х.И. Ибрагимова РАН, отдел материаловедения, снс, кандидат физико-математических наук, [ialiew@mail.ru](mailto:ialiew@mail.ru), Грозный.

**Аннотация.** В работе приведены результаты синтеза и исследования новой многокомпонентной системы ( $\text{HO}_{1-x}\text{Y}_x$ ) $_{0.8}\text{Sm}_{0.2}\text{Fe}_2$ , в которой параметр замещения принимает значения  $x = 0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0$ . Установлено, что все сплавы однофазны и их структура соответствует кубической структуре фазы Лавеса C15. Из результатов исследования намагниченности определены значения намагниченности насыщения  $\sigma_s$ , рассчитаны значения магнитного момента, приходящего на атом железа  $\mu_{\text{Fe}}$ . Проведены исследования эффекта Мессбауэра на ядрах  $^{57}\text{Fe}$  при комнатной температуре. Определены значения сверхтонких параметров мессбауэровских спектров на ядрах  $^{57}\text{Fe}$  в сплавах ( $\text{HO}_{1-x}\text{Y}_x$ ) $_{0.8}\text{Sm}_{0.2}\text{Fe}_2$  и их зависимость от концентрации иттрия.

**Ключевые слова:** редкоземельные интерметаллиды, фазы Лавеса, магнитный момент, эффект Мессбауэра, сверхтонкие поля, изомерный сдвиг, константа квадрупольного взаимодействия.

**MÖSSBAUER EFFECT IN MULTICOMPONENT ALLOYS OF THE SYSTEM  
(Ho<sub>1-x</sub>Y<sub>x</sub>)<sub>0.8</sub>Sm<sub>0.2</sub>Fe<sub>2</sub>**

**Umkhaeva Zargan Saipudinovna (a), Rusakov Vyacheslav Serafimovich (b), Gubaidulina Tatiana Valiyevna (c), Karpenkov Alexei Yurievich (d), Tereshina Irina Semenovna (e), Pankratov Nicolay Yurievich (f), Aliev Islam Movldievich (h)**

- (a) Kh. Ibragimov Complex Institute of Russian Academy of Sciences, Department of Materials Science, Department head, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, [zargan.umhaeva@yandex.ru](mailto:zargan.umhaeva@yandex.ru), Grozny.
- (b) M.V. Lomonosov Moscow State University, Department of General Physics, Professor, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, [rusakov@phys.msu.ru](mailto:rusakov@phys.msu.ru), Moscow.
- (c) M.V. Lomonosov Moscow State University, Department of General Physics, Senior Lecturer, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, [tgubaidulina@yandex.ru](mailto:tgubaidulina@yandex.ru), Moscow.
- (d) Tver State University, Department of Condensed State Physics, Head of Department, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, [karpenkov\\_alex@mail.ru](mailto:karpenkov_alex@mail.ru), Tver.
- (e) M.V. Lomonosov Moscow State University, Department of Solid State Physics, Leading Researcher, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, [irina\\_tereshina@mail.ru](mailto:irina_tereshina@mail.ru), Moscow.
- (f) Lomonosov Moscow State University, Department of General Physics and Magnetically Ordered State, Senior Lecturer, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, [pankratov@phys.msu.ru](mailto:pankratov@phys.msu.ru), Moscow.
- (g) Kh. Ibragimov Complex Institute of Russian Academy of Sciences, Department of Materials Science, Senior Researcher, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, [ialiev@mail.ru](mailto:ialiev@mail.ru), Grozny.

**Annotation.** The paper presents the results of synthesis and investigation of a new multi-component system (Ho<sub>1-x</sub>Y<sub>x</sub>)<sub>0.8</sub>Sm<sub>0.2</sub>Fe<sub>2</sub> in which the substitution parameter takes the values  $x = 0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0$ . It is found that all alloys are single phase and their structure corresponds to the cubic structure of the Laves phase C15. From the results of the magnetization study, the values of the saturation magnetization  $\sigma_s$  were determined, and the values of the magnetic moment incident on the iron atom  $\mu_{Fe}$  were calculated. The Mössbauer effect on <sup>57</sup>Fe nuclei at room temperature has been investigated. The values of superfine parameters of Mössbauer spectra on <sup>57</sup>Fe nuclei in (Ho<sub>1-x</sub>Y<sub>x</sub>)<sub>0.8</sub>Sm<sub>0.2</sub>Fe<sub>2</sub> alloys and their dependence on yttrium concentration have been determined.

**Keywords:** rare-earth intermetallides, Laves phases, magnetic moment, Mössbauer effect, superfine fields, isomeric shift, quadrupole interaction constant.

## ВВЕДЕНИЕ

Многокомпонентные фазы Лавеса на основе редкоземельных металлов (R<sub>1-x</sub>Y<sub>x</sub>)<sub>0.8</sub>Sm<sub>0.2</sub>Fe<sub>2</sub> (где R = Gd, Tb, Dy и Er) стехиометрии RFe<sub>2</sub>, как показали наши исследования [7,8,16,18], являются достаточно интересными объектами исследования. Используя сложный тип замещения в редкоземельной подрешетке, а также изменяя температуру

и значения внешних магнитных полей, оказывается, можно активно влиять на их магнитные, магнитострикционные свойства и сверхтонкие взаимодействия и наблюдать ряд уникальных магнитных фазовых превращений, включая явление магнитной компенсации редкоземельной и 3d-подрешеток, а также спиновую переориентацию.

Поэтому представляло интерес исследовать аналогичную систему сплавов с гольмием, так как все изученные нами ранее системы [7,8,15,17] представляют собой редкоземельные интерметаллиды на основе тяжелых редкоземельных элементов. Гольмий является одним из них. Таким образом, исследование данного класса многокомпонентных сплавов дает возможность проанализировать и предсказать, в том числе и теоретически, области концентрации компонент, в которых можно получать составы с наиболее оптимальными магнитными характеристиками в связи с поиском нового типа магнитных материалов с заданным комплексом физико-химических характеристик.

Для получения новых сплавов использован сложный тип замещения в редкоземельной подрешетке, а именно, в подрешетку гольмия сначала вводятся атомы слабомагнитного Sm. Концентрация атомов самария фиксирована, это 20 at.%, а затем атомы немагнитного Y при значениях параметра замещения  $x = 0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0$ . Как показали наши исследования, такой тип замещения приводит, прежде всего, к конкуренции обменных взаимодействий между магнитоактивными ионами в области их магнитного упорядочения.

Известно, что обменные взаимодействия РЗМ с атомами группы железа могут иметь разные знаки. В результате, по мере роста концентрации одной из компонент сплава может наблюдаться переход от одного типа взаимодействия к другому, например, от ферромагнетизма к ферримагнетизму, или наоборот. Если при этом знаки констант магнитной анизотропии, а также константы магнитострикции у исходных сплавов разные, как в случаях с тяжелыми и легкими РЗМ, то в сплавах такой сложной конфигурации можно наблюдать целый ряд новых явлений, как явление спиновой переориентации, явление магнитной компенсации и инверсия знака констант магнитострикции [7,8,15,17].

Чувствительным параметром к изменению знака и типа обменных взаимодействий являются сверхтонкие взаимодействия, которые изучаются обычно с помощью эффекта Мессбауэра. Сверхтонкие взаимодействия – это взаимодействия магнитного и квадрупольного моментов ядер с магнитными и электрическими полями, создаваемых окружающими электронами. Информация, извлекаемая из мессбауэровских спектров, определяется тремя основными параметрами: изомерным (химическим) сдвигом, квадрупольным расщеплением и магнитным сверхтонким расщеплением.

Поэтому в данной работе поставлена цель - исследование эффекта Мессбауэра, определение основных параметров мессбауэровского спектра, а также установление взаимосвязи между магнитными и сверхтонкими параметрами в системе сплавов  $(\text{Ho}_{1-x}\text{Y}_x)_{0.8}\text{Sm}_{0.2}\text{Fe}_2$  в зависимости от значения параметра замещения  $x$ .

Практическая значимость исследования свойств редкоземельных интерметаллидов со структурой фаз Лавеса обусловлена тем, что они широко применяются в различных областях науки и техники в качестве магнитострикционных элементов, датчиков и сенсоров малых перемещений [1].

#### МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Для достижения поставленной цели нами впервые синтезированы новые многокомпонентные сплавы на основе тяжёлого редкоземельного металла гольмия  $(Ho_{1-x}Y_x)_{0.8}Sm_{0.2}Fe_2$ . Параметр замещения в данных сплавах принимает значения  $x = 0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0$ . Сплавы системы  $(Ho_{1-x}Y_x)_{0.8}Sm_{0.2}Fe_2$  изготовлены методом высокочастотной индукционной плавки в алундовом тигле в атмосфере особо чистого аргона, давление которого составляло 70 кПа. Все образцы отжигались в течение 40 часов при температуре 800°C в кварцевых ампулах, заполненных очищенным аргоном до указанного давления. После отжига ампула с образцами помещалась в воду при температуре около 0°C для последующего закаливания. Более подробно методика синтеза образцов описана в работе [9].

Рентгенофазовый анализ (РФА) проводился для всех образцов на дифрактометре ДРОН-7 в медном  $K\alpha$ -излучении ( $\lambda = 0,1540598$  nm) при комнатной температуре в диапазоне углов  $2\theta = 15-105^\circ$ . Для определения структурных свойств дифрактограммы анализировались с помощью процедуры подгонки спектра. При этом каждая структурная модель была уточнена до сходимости, и наилучшие результаты были выбраны на основе коэффициента согласия и стабильности уточнения. Фазовый состав образцов исследовался с помощью анализа методом Ритвельда.

Намагниченность сплавов измерялась на автоматизированном вибрационном магнетометре в стационарных магнитных полях до 1.5 Т в интервале температур от 300 до 750 К.

Мёссбауэровские спектры получены в геометрии пропускания на спектрометре MS-1104Ем в режиме постоянного ускорения. При проведении эксперимента использовался источник гамма-излучения  $^{57}Co$  в матрице Rh активностью  $\sim 20$  мКи. Спектрометр калиброван при комнатной температуре по эталонному образцу  $\alpha$ -Fe *при комнатной температуре. Спектры обрабатывались с помощью программы SpectrRelax* [13,14].

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

В результате синтеза нами получены многокомпонентные сплавы системы  $(Ho_{1-x}Y_x)_{0.8}Sm_{0.2}Fe_2$ , а именно:  $Ho_{0.8}Sm_{0.2}Fe_2$ ,  $(Ho_{0.8}Y_{0.2})_{0.8}Sm_{0.2}Fe_2$ ,  $(Ho_{0.6}Y_{0.4})_{0.8}Sm_{0.2}Fe_2$ ,  $(Ho_{0.4}Y_{0.6})_{0.8}Sm_{0.2}Fe_2$ ,  $(Ho_{0.2}Y_{0.8})_{0.8}Sm_{0.2}Fe_2$  и  $Sm_{0.2}Y_{0.8}Fe_2$ .

Для указанных сплавов методом термомагнитного анализа нами определены температуры магнитного упорядочения – температура Кюри. Установлено, что она уменьшается от значения  $T_c = 595$  К для сплава  $Ho_{0.8}Sm_{0.2}Fe_2$  ( $x = 0$ ) до  $T_c = 501$  К в  $Y_{0.8}Sm_{0.2}Fe_2$  ( $x = 1$ ). Значения температуры Кюри и параметров решетки  $a(x)$  сплавов системы  $(Ho_{1-x}Y_x)_{0.8}Sm_{0.2}Fe_2$  приведены в таблице 1.

Из экспериментальных измерений намагниченности, полученных при 300 К, с помощью экстраполяции зависимости  $\sigma(1/H)$  в область высоких полей нами определены значения намагниченности насыщения  $\sigma_s$  для каждого состава, магнитные моменты на формульную единицу М и магнитные моменты, приходящиеся на атом Fe в каждом соединении  $\mu_{Fe}$ . Полученные значения также представлены в таблице 1.

Таблица 1. Параметры решетки и основные магнитные характеристики сплавов системы  $(\text{Ho}_{1-x}\text{Y}_x)_{0.8}\text{Sm}_{0.2}\text{Fe}_2$  при 300 К

Состав	a, Å	T <sub>c</sub> , К	σ <sub>s</sub> , emu/g	M, μ <sub>B</sub> /f.u.	μ, μ <sub>B</sub> /at.Fe
Ho <sub>0.8</sub> Sm <sub>0.2</sub> Fe <sub>2</sub>	7.3213	595	40,79	1,99	0,999
Ho <sub>0.64</sub> Y <sub>0.16</sub> Sm <sub>0.2</sub> Fe <sub>2</sub>	7.3321	590	22,58	1,06	0,529
Ho <sub>0.48</sub> Y <sub>0.32</sub> Sm <sub>0.2</sub> Fe <sub>2</sub>	7.3413	579	8,38	0,38	0,187
Ho <sub>0.32</sub> Y <sub>0.48</sub> Sm <sub>0.2</sub> Fe <sub>2</sub>	7.3472	566	17,95	0,77	0,381
Ho <sub>0.16</sub> Y <sub>0.64</sub> Sm <sub>0.2</sub> Fe <sub>2</sub>	7.3571	548	39,17	1,58	0,789
Y <sub>0.8</sub> Sm <sub>0.2</sub> Fe <sub>2</sub>	7.3682	501	59	2,25	1,125

Из таблицы видно, что и в данной системе, как и во всех исследованных нами ранее системах  $(\text{R}_{1-x}\text{Y}_x)_{0.8}\text{Sm}_{0.2}\text{Fe}_2$ , где R-тяжелый редкоземельный элемент Gd, Tb, Dy или Er [7,8,15,16], наблюдается явление взаимной магнитной компенсации РЗМ и 3d – магнитных подрешеток.

По нашим экспериментальным данным, полученным при комнатной температуре, это явление наблюдается в области состава  $x = 0.4$ , т.е. для сплава Ho<sub>0.48</sub>Y<sub>0.32</sub>Sm<sub>0.2</sub>Fe<sub>2</sub>.

Проведенные нами на уровне прогнозирования свойств данных систем теоретические вычисления на основе модели коллинеарных магнитных моментов показали, что компенсационным в этой системе должен быть состав с концентрацией иттрия  $x_{\text{comp}} = 0.62$ .

Действительно, исследования, проведенные в области азотных температур (85 К), подтвердили, что точка магнитной компенсации в системе  $(\text{Ho}_{1-x}\text{Y}_x)_{0.8}\text{Sm}_{0.2}\text{Fe}_2$  приходится на состав с  $x_{\text{comp}} = 0.6$  и компенсационным в области азотных температур является сплав  $(\text{Ho}_{0.4}\text{Y}_{0.6})_{0.8}\text{Sm}_{0.2}\text{Fe}_2$  или, что тоже самое - Ho<sub>0.32</sub>Y<sub>0.48</sub>Sm<sub>0.2</sub>Fe<sub>2</sub>.

Другой особенностью данных систем на основе тяжелых редкоземельных металлов является зависимость магнитного момента на атоме железа  $\mu_{\text{Fe}}$  от концентрации иттрия (см. таблицу 1) Известно, что в соединениях RFe<sub>2</sub> и сплавах замещения на их основе, как правило, принято считать магнитный момент на атоме Fe практически постоянным в пределах ошибки эксперимента и равным  $\mu_{\text{Fe}} = 1.45$  μ<sub>B</sub>, как в ферромагнитном соединении YFe<sub>2</sub> [6]. В исходном соединении Ho<sub>0.8</sub>Sm<sub>0.2</sub>Fe<sub>2</sub> ( $x = 0$ ) экспериментально установленное нами значение  $\mu_{\text{Fe}}$  составляет 0.999 μ<sub>B</sub>. При полном замещении атомов Ho атомами Y (сплав Y<sub>0.8</sub>Sm<sub>0.2</sub>Fe<sub>2</sub>) магнитный момент  $\mu_{\text{Fe}} = 1.125$  μ<sub>B</sub>. Таким образом, расчеты магнитного момента на атоме железа  $\mu_{\text{Fe}}$ , проведенные с использованием значений намагниченности насыщения  $\sigma_s$ , определенных из эксперимента, показали, что  $\mu_{\text{Fe}}$  в данной системе меньше значения в бинарном YFe<sub>2</sub> и зависит от содержания иттрия в РЗМ-подрешетке.

Поэтому нами были проведены исследования эффекта Мёссбауэра и определены значения сверхтонких магнитных полей, которые непосредственно связаны с магнитными моментами атомов Fe [18].

Мессбауэровский спектр представляет собой зависимость интенсивности гамма-излучения, прошедшего через образец, от относительной скорости движения источника



или поглотителя. Полученные нами *мессбауэровские спектры ядер  $^{57}\text{Fe}$  в сплавах системы  $(\text{Ho}_{1-x}\text{Y}_x)_{0.8}\text{Sm}_{0.2}\text{Fe}_2$*  представлены на рис. 1. Анализ спектров произведен в рамках тензорного описания магнитных сверхтонких взаимодействий [3, 4].

Расшифровка спектров, как было сказано выше, проводилась с помощью программы SpectrRelax с использованием модели «Laves», подробно описанной в [2, 5]. Модель состоит из четырех зеемановских секстетов со сверхтонкими параметрами, связи между которыми учитывают локальную магнитную неоднородность позиций атомов Fe в соединениях типа  $\text{RFe}_2$  с коллинеарной магнитной и кубической (пр. гр.  $Fd\bar{3}m$ ) атомной структурами и основаны на соотношениях (19)–(30), приведенных в работе [5].

В результате применения данной модели в процессе минимизации функционала хи-квадрат удается найти оптимальные значения интересующих нас физических величин:

- сдвига спектра  $\delta$ , связанного с плотностью электронов в области расположения ядра;

- константы квадрупольного взаимодействия  $e^2qQ$  ядер с его окружением, создающим неоднородное электрическое поле на ядре;

- изотропного поля  $H_{\text{is}}$ , обусловленного в основном контактным взаимодействием Ферми с локализованными на ядре  $s$ -электронами и поляризованными электронами проводимости;

- анизотропного поля  $H_{\text{ан}}$ , обусловленного магнитным диполь-дипольным взаимодействием с локализованными магнитными моментами атомов решетки и поляризованными электронами проводимости.

На рис. 1 видно, что использование модели «Laves» позволяют хорошо описать полученные спектры ядер  $^{57}\text{Fe}$  в сплавах системы  $(\text{Ho}_{1-x}\text{Y}_x)_{0.8}\text{Sm}_{0.2}\text{Fe}_2$ .

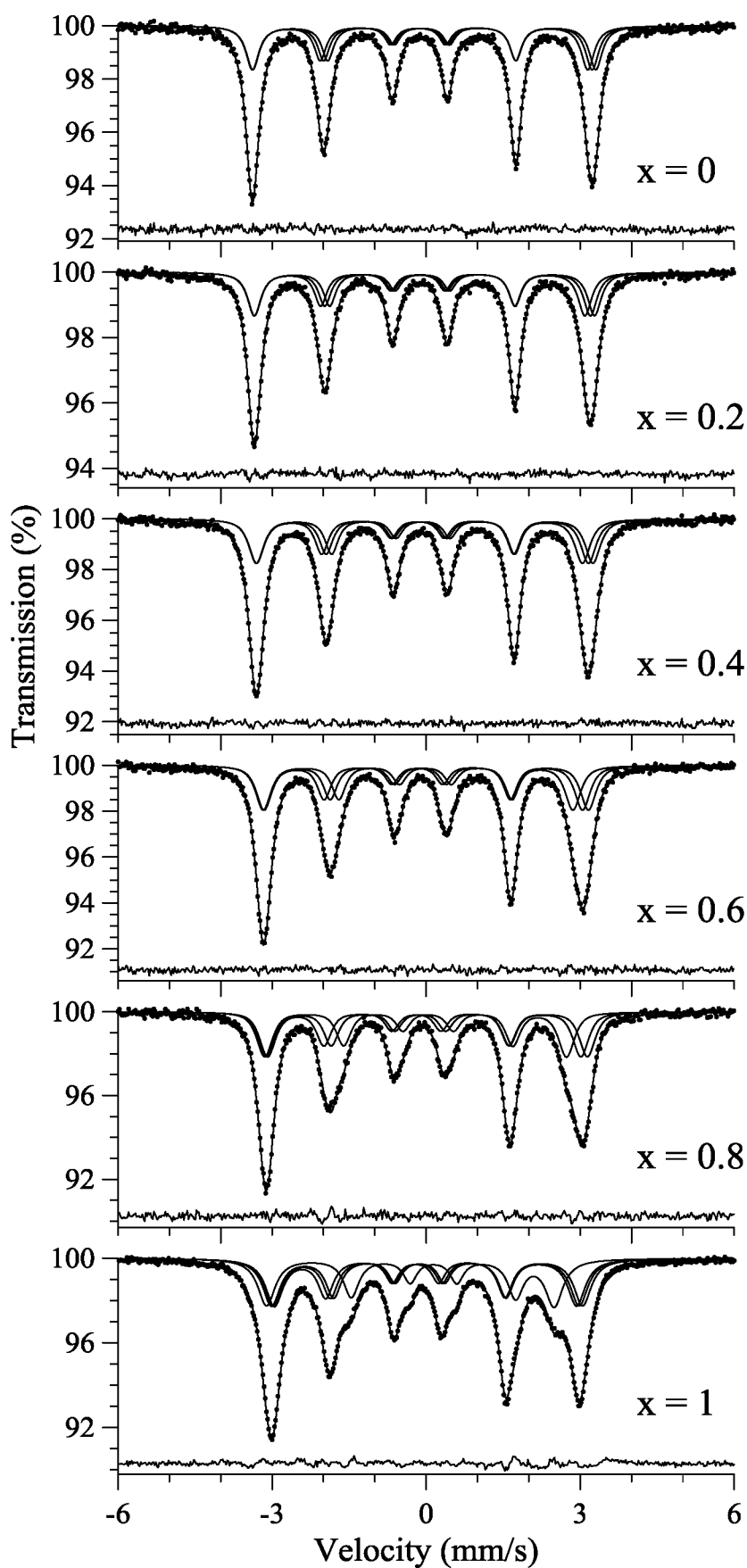


Рис. 1. Результаты модельной расшифровки спектров ядер  $^{57}\text{Fe}$  в сплавах системы  $(\text{Ho}_{1-x}\text{Y}_x)_{0.8}\text{Sm}_{0.2}\text{Fe}_2$ .

Зависимость сдвига спектра  $\delta$  от концентрации атомов Y, полученная в результате модельной расшифровки, представлена на рис. 2. Как видим, сдвиг спектра  $\delta$ , который равен сумме изомерного сдвига, обусловленного плотностью электронов в области расположения ядра, и температурного сдвига, обусловленного динамическими свойствами ядра, практически линейно возрастает с концентрацией Y. Наблюдаемое увеличение сдвига, на 0.023(6) mm/s при полном замещении атомов Ho на атомы Y (рис. 2), связано в первую очередь с увеличением изомерного сдвига из-за уменьшения электронной плотности на ядре при увеличении параметра элементарной ячейки (см. таблицу 1), а значит и расстояния между атомами при замещении атомов Ho на атомы Y.

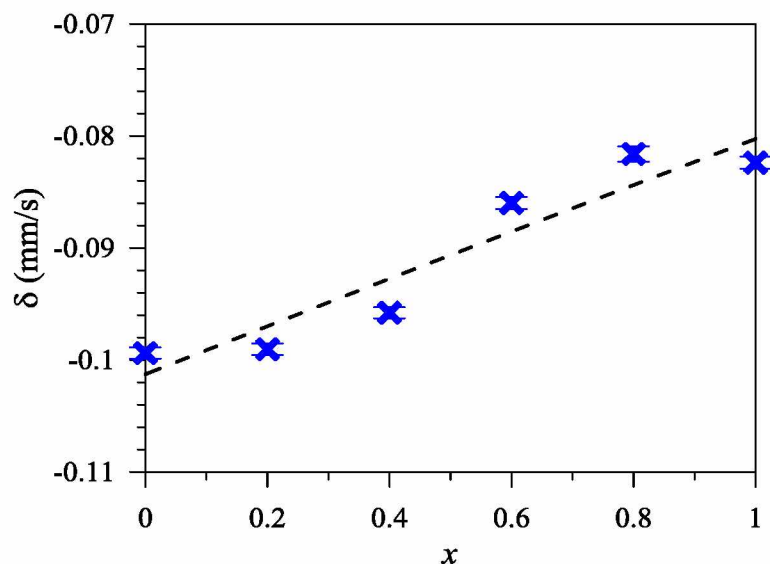
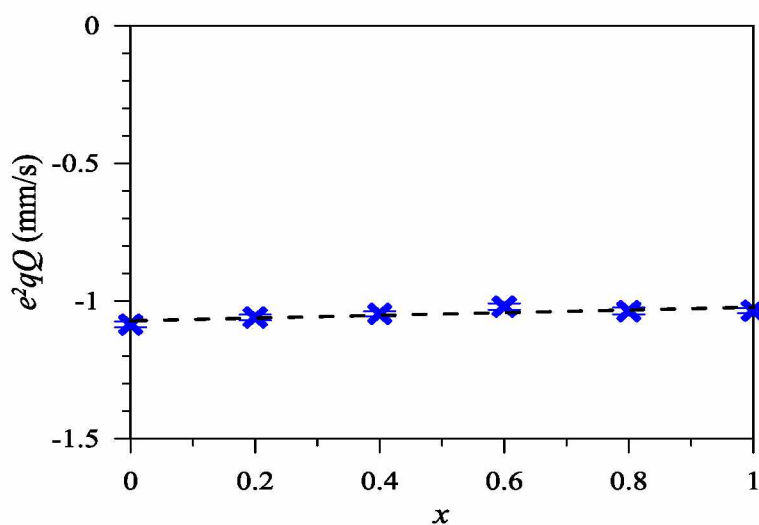


Рис. 2. Сдвиг спектра  $\delta$  ядер  $^{57}\text{Fe}$  в зависимости от концентрации Y в сплавах системы  $(\text{Ho}_{1-x}\text{Y}_x)_{0.8}\text{Sm}_{0.2}\text{Fe}_2$ .

На рисунке 3 представлено поведение константы квадрупольного взаимодействия  $e^2qQ$  в сплавах системы  $(\text{Ho}_{1-x}\text{Y}_x)_{0.8}\text{Sm}_{0.2}\text{Fe}_2$  при замещении атомов Ho на атомы Y в соответствие со значением параметра замещения x.





**Рис. 3. Константа квадрупольного взаимодействия  $e^2qQ$  ядер  $^{57}\text{Fe}$  в зависимости от концентрации  $Y$  в сплавах системы  $(\text{Ho}_{1-x}\text{Y}_x)_{0.8}\text{Sm}_{0.2}\text{Fe}_2$ .**

Из рисунка видно, что в данной системе сплавов величина (модуль) константы квадрупольного взаимодействия остается практически неизменной с небольшими колебаниями внутри интервала (1.0 - 1.1) mm/s.

В сплавах системы  $(\text{Ho}_{1-x}\text{Y}_x)_{0.8}\text{Sm}_{0.2}\text{Fe}_2$  при замещении атомов Ho на атомы Y наблюдается уменьшение на 21.4(4) kOe изотропного магнитного поля в области расположения ядра (рис. 4). Согласно результатам расчета электронной структуры редкоземельных фаз Лавеса  $\text{RFe}_2$  [11,12] 3d-5d гибридизация электронов при ферромагнитном локальном спиновом 4f-5d взаимодействии приводит к увеличению спина (и магнитного момента) иона железа при увеличении спина редкой земли. Такое увеличение спина иона железа в свою очередь приводит к увеличению основного вклада в изотропное поле – фермиевского вклада  $H_{\text{Fermi}}$ . В соответствии с теоретическими расчетами [18] фермиевский вклад в изотропное поле пропорционален величине магнитного момента 3d-оболочки атома железа. Для кристаллических и аморфных сплавов редкая земля – железо обычно используется коэффициент пропорциональности между величиной сверхтонкого магнитного поля и магнитным моментом атома железа равный 145 kOe/ $\mu_B$  [10]. Воспользовавшись данными об изотропном поле, можно оценить величину магнитного момента атома железа в сплавах системы  $(\text{Ho}_{1-x}\text{Y}_x)_{0.8}\text{Sm}_{0.2}\text{Fe}_2$  при комнатной температуре. С этой целью на рис. 4 наряду с осью ординат для изотропного поля проведена ось для магнитного момента атомов Fe. Видно, что значения  $\mu_{\text{Fe}}$ , полученные из значения  $H_{\text{is}}$ , несколько выше значений, полученных магнитометрическими методами, аналогично системе  $(\text{Dy}_{1-x}\text{Y}_x)_{0.8}\text{Sm}_{0.2}\text{Fe}_2$  [8].

Для анизотропного сверхтонкого магнитного поля  $H_{\text{an}}$  наблюдается аналогичная случаю изотропного поля  $H_{\text{is}}$  зависимость от концентрации Y: величина (модуль) анизотропного поля уменьшается на 4.9(4) kOe при замещении атомов Ho на атомы Y (рис. 5). Согласно [9,16] вклад в анизотропное поле, обусловленный электронами проводимости из гибридизированной 3d-5d полосы, поляризованными магнитным дипольным полем локализованных магнитных моментов атомов решетки, имеет тот же знак, что и диполь-дипольный вклад.

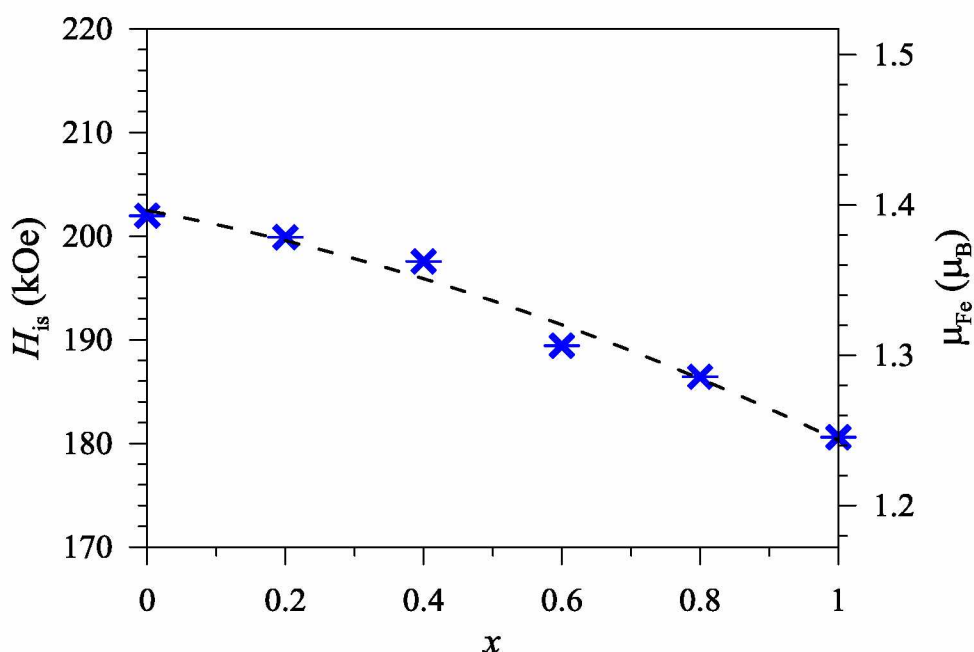


Рис. 4. Изотропное поле  $H_{is}$  на ядрах  $^{57}\text{Fe}$  и магнитный момент  $\mu_{\text{Fe}}$  атома Fe в зависимости от концентрации Y в сплавах системы  $(\text{Ho}_{1-x}\text{Y}_x)_{0.8}\text{Sm}_{0.2}\text{Fe}_2$ .

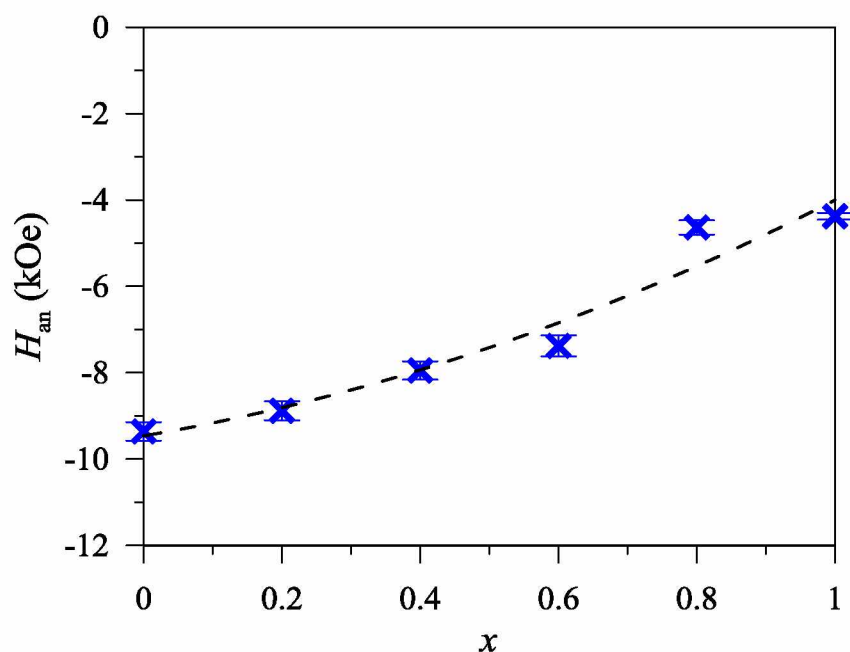


Рис. 5. Анизотропное поле  $H_{an}$  на ядрах  $^{57}\text{Fe}$  в сплавах системы в зависимости от концентрации Y в сплавах системы  $(\text{Ho}_{1-x}\text{Y}_x)_{0.8}\text{Sm}_{0.2}\text{Fe}_2$ .

Оба вклада в анизотропное поле, как диполь-дипольный от локализованных магнитных моментов атомов решетки, так и вклад от электронов проводимости, при замещении атомов Ho атомами Y уменьшаются, поскольку уменьшается средний магнитный момент редкоземельных атомов и увеличивается расстояние между атомами.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные результаты показывают, что иттрий, введенный в редкоземельную подрешетку системы  $(\text{Ho}_{1-x}\text{Y}_x)_{0.8}\text{Sm}_{0.2}\text{Fe}_2$ , достаточно активно влияет на основные магнитные характеристики и сверхтонкие параметры мессбауэровского спектра. Рост параметра замещения  $x$  приводит к увеличению параметра кристаллической решетки, а, следовательно, межатомных расстояний, что сопровождается конкуренцией межподрешеточных обменных взаимодействий в парах Ho-Fe и Sm-Fe. Если учесть ещё, что меняются межатомные расстояния в самой редкоземельной подрешетке, то получаем систему с конкурирующими обменными взаимодействиями, как межподрешеточными, так и внутримолекулярными, что становится причиной всех наблюдаемых явлений, таких как, уменьшение температуры Кюри сплавов (от  $T_c = 587$  К в соединении  $\text{Ho}_{0.8}\text{Sm}_{0.2}\text{Fe}_2$  до  $T_c = 501$  К для  $\text{Y}_{0.8}\text{Sm}_{0.2}\text{Fe}_2$  с ростом концентрации Y).

Расшифровка мессбауэровских спектров сплавов системы  $(\text{Ho}_{1-x}\text{Y}_x)_{0.8}\text{Sm}_{0.2}\text{Fe}_2$  показала, что зависимость сдвига спектра  $\delta$  от концентрации атомов Y, полученная в результате модельной расшифровки, практически линейно возрастает с концентрацией Y. Наблюдаемое увеличение сдвига, на  $0.023(6)$  mm/s при полном замещении атомов Ho на атомы Y, связано в первую очередь с увеличением изомерного сдвига из-за уменьшения электронной плотности на ядре при увеличении параметра элементарной ячейки, а значит и расстояния между атомами (по аналогии с системами с Tb, Dy и Er).

Константа квадрупольного взаимодействия  $e^2qQ$  ядер  $^{57}\text{Fe}$  с неоднородным электрическим полем, создаваемом локализованными зарядами ионных остовов атомов и поляризованными электронами проводимости в сплавах системы  $(\text{Ho}_{1-x}\text{Y}_x)_{0.8}\text{Sm}_{0.2}\text{Fe}_2$ , практически не меняется при атомном замещении Er на Y и равна по модулю  $1.05(4)$  mm/s.

В сплавах системы  $(\text{Ho}_{1-x}\text{Y}_x)_{0.8}\text{Sm}_{0.2}\text{Fe}_2$  при замещении атомов Ho на атомы Y наблюдается уменьшение на  $21.4(4)$  изотропного магнитного поля  $H_{is}$  в области расположения ядра и аналогичная случаю изотропного поля  $H_{is}$  зависимость от концентрации Y анизотропного поля:  $H_{an}$  уменьшается по модулю на  $4.9(4)$  kOe при замещении атомов Ho на атомы Y.

Данное исследование будет способствовать созданию новых многокомпонентных сплавов с оптимальными физико-химическими параметрами для различных прикладных задач.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарят Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова за обновление оборудования для научных исследований, использованного при выполнении работы и лабораторию магнитных материалов Центра коллективного пользования научной аппаратурой и оборудованием Тверского государственного университета за помощь в проведении синтеза и аттестации сплавов данной системы.

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

## Конфликт интересов

Авторы подтверждают, что у них нет конфликта интересов.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Белов К. П. Магнитострикционные явления и их технические приложения [Текст] / К. П. Белов. - Москва: Наука, 1987. - 159 с.
2. Мацнев, М. Е., Русаков, В. С. Создание сложных многокомпонентных моделей мёссбауэровских спектров на примере исследования сверхтонких взаимодействий в квазибинарных сплавах со структурой фаз Лавеса [Текст] / М. Е. Мацнев, В. С. Русаков // ФММ. - 2023. - № 3. - С. 292-297.
3. Николаев В. И., Русаков В. С., Солодченкова Т. Б. Кинетика спиновой переориентации при наличии анизотропии сверхтонких взаимодействий [Текст] / В. И. Николаев, В. С. Русаков, Т. Б. Солодченкова // Изв. АН СССР. Сер. Физическая. - 1990. - Т. 54. - № 9. - С. 1681 – 1685.
4. Русаков В. С. Мёссбауэровская спектроскопия локально неоднородных систем [Текст] / В. С. Русаков. - Алматы: ИЯФ НЯЦ РК, 2000. - 431 с.
5. Русаков В. С., Покатилов В. С., Губайдулина Т. В., Мацнев М. Е. Сверхтонкие магнитные поля на ядрах  $^{57}\text{Fe}$  в интерметаллической системе  $\text{Zr}_{1-x}\text{Sc}_x\text{Fe}_2$  [Текст] / В. С. Русаков, В. С. Покатилов, Т. В. Губайдулина, М. Е. Мацнев // ФММ. - 2019. - Т. 120. - № 4. - С. 366 – 371.
6. Тейлор К. Интерметаллические соединения редкоземельных металлов [Текст] / К. Тейлор. - Москва: Мир, 1974. - 221 с.
7. Умхаева З. С., Терёшина И. С., Панкратов Н. Ю., Алиев И. М., Хоменко М. Р., Карпенков А. Ю. Структура и основные магнитные характеристики многокомпонентных сплавов  $(\text{R}_{1-x}\text{Y}_x)_{0.8}\text{Sm}_{0.2}\text{Fe}_2$  (R - тяжелые редкоземельные металлы) [Текст] / З. С. Умхаева, И. С. Терёшина, Н. Ю. Панкратов, И. М. Алиев, М. Р. Хоменко, А. Ю. Карпенков // Кристаллография. - 2023. - Т. 68. - № 3. - С. 448 - 454.
8. Умхаева З. С., Русаков В. С., Губайдулина Т. В., Карпенков А. Ю., Терёшина И. С., Панкратов Н. Ю., Алиев И. М. Влияние иттрия на магнитные свойства и сверхтонкие взаимодействия в многокомпонентных сплавах замещения  $(\text{Dy}_{1-x}\text{Y}_x)_{0.8}\text{Sm}_{0.2}\text{Fe}_2$  [Текст] / З. С. Умхаева, В. С. Русаков, Т. В. Губайдулина, А. Ю. Карпенков, И. С. Терёшина, Н. Ю. Панкратов, И. М. Алиев // ФТТ. - 2024. - Том 66. - Вып. 1. - С. 94 – 102.
9. Atzmony U., Dariel M. P. Magnetic anisotropy and hyperfine interactions in  $\text{CeFe}_2$ ,  $\text{GdFe}_2$  and  $\text{LuFe}_2$  [Text] / U. Atzmony, M. P. Dariel // Phys. Rev. B. - 1973. - V.10. - № 5. - P. 2060 - 2067.
10. Buschow K. H. J., Van der Kraan A. M. Magnetic properties of amorphous rare-earth-iron alloys. [Text] / K. H. J. Buschow, A. M. Van der Kraan // J. Magn. Magn. Mater. - 1981. - V. 22. - P. 220 - 226.
11. Brooks M. S. S., Eriksson O., Johansson B. 3d-5d band magnetism in the rare earth - transition metal intermetallics:  $\text{LuFe}_2$  [Text] / M. S. S. Brooks, O. Eriksson, B. Johansson // J. Phys.: Cond. Matter. - 1989. - V. 1. - P. 5861 - 5874.
12. Brooks M. S. S., Nordstrom L., Johansson B. Magnetism of  $\text{RFe}_2$  compounds [Text] / M. S. S. Brooks, L. Nordstrom, B. Johansson // J. Appl. Phys. - 1991. - V. 69(8). - P. 5683 - 5684.

13. Matsnev M. E., Rusakov V. S. SpectrRelax: an application for Mössbauer spectra modelling and fitting [Text] / M. E. Matsnev, V. S. Rusakov // AIP Conference Proceedings. - 2012. - V. 1489. - P. 178 – 185.
14. Matsnev M. E., Rusakov V. S. Study of spatial spin-modulated structures by Mössbauer spectroscopy using SpectrRelax [Text] / M. E. Matsnev, V. S. Rusakov // AIP Conference Proceedings. - 2014. - V. 1622. - P. 40 – 49.
15. Ilyushin A. S., Tereshina I. S., Aleroeva T. A., Pankratov N. Yu., Umkhaeva Z. S., etc. Phenomenon of magnetic compensation in the multicomponent system (Tb,Y,Sm)Fe<sub>2</sub> and their hydrides [Text] / A. S. Ilyushin, I. S. Tereshina, T. A. Aleroeva, N. Yu. Pankratov, Z. S. Umkhaeva, etc. // J. Alloys and Compounds. - 2020. - V. 847. - Art. № 155976.
16. Ray P., Kulshreshtha S. K. Magnetically induced quadrupole interactions and anisotropic hyperfine fields at Fe-sites in RFe<sub>2</sub>-compounds [Text] / P. Ray, S. K. Kulshreshtha // J. Physique. - 1980. - V. 41. - № 12. - P.1487 - 1494.
17. Umkhaeva Z. S., Ilyushin A. S., Aleroeva T. A., Kiseleva T. Yu., Tereshina I. S. Mossbauer effect in alloys of variable composition (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, T. Yu. Kiseleva, I. S. Tereshina // Journal of Physics: Conference Series. - 2021. - V. 1753. - Art. № 012079.
18. Watson R. E., Freeman A. J. Origin of effective fields in magnetic materials [Text] / R. E. Watson, A. J. Freeman // Phys. Rev. - 1961. - V. 123. - № 6. - P. 2027 - 2047.

#### REFERENCES

1. Belov K. P. Magnetostrictive phenomena and their technical applications [Text] / K. P. Belov. - Moscow: Nauka, 1987. - 159 c.
2. Matsnev M. E., Rusakov V. S. Creation of complex multicomponent models of Mössbauer spectra on the example of the study of superfine interactions in quasi-binary alloys with the structure of Laves phases [Text] / M.E. Matsnev, V.S. Rusakov // PhMM. - 2023. - V. 124. - № 3. - P. 292 - 297.
3. Nikolaev V. I., Rusakov V. S., Solodchenkova T. B. Kinetics of spin reorientation in the presence of anisotropy of superfine interactions [Text] / V. I. Nikolaev, V. S. Rusakov, T. B. Solodchenkova // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. - 1990. - V. 54. - № 9. - P. 1681 -1685.
4. Rusakov V. S. Mössbauer spectroscopy of locally inhomogeneous systems [Text] / V. S. Rusakov. – Almaty: NNC RK, 2000. - 431 p.
5. Rusakov V. S., Pokatilov V. S., Gubaidulina T. V., Matsnev M. E. Ultrafine magnetic fields on <sup>57</sup>Fe nuclei in the intermetallic system Zr<sub>1-x</sub>Sc<sub>x</sub>Fe<sub>2</sub> [Text] / V. S. Rusakov, V. S. Pokatilov, T. V. Gubaidulina, M. E. Matsnev // PhMM. - 2019. - V. 120. - № 4. - P. 366 - 371.
6. Taylor K. Intermetallic compounds of rare earth metals [Text] / K. Taylor. - Moscow: Mir, 1974. - 221 p.
7. Umkhaeva Z. S., Tereshina I. S., Pankratov N. Yu., Aliev I. M., Khomenko M. R. and Karpenkov A.Yu. Structure and Main Magnetic Characteristics of Multicomponent Alloys (R<sub>1-x</sub>Y<sub>x</sub>)<sub>0.8</sub>Sm<sub>0.2</sub>Fe<sub>2</sub> (R are Rare-Earth Metals) [Text] / Z. S. Umkhaeva, I. S. Tereshina, N. Yu. Pankratov, I. M. Aliev, M. R. Khomenko and A.Yu. Karpenkov // Crystallography Reports. - 2023. - V. 68. - № 3. - P. 446 - 452.

8. Umkhaeva Z. S., Rusakov V. S., Gubaidulina T. V., Karpenkov A. Yu., Tereshina I. S., Pankratov N. Yu., Aliev I. M. Influence of yttrium on magnetic properties and super-fine interactions in multicomponent substitution alloys  $(Dy_{1-x}Y_x)_{0.8}Sm_{0.2}Fe_2$  [Text] / Z. S. Umkhaeva, V. S. Rusakov, T. V. Gubaidulina, A. Yu. Karpenkov, I. S. Tereshina, N. Yu. Pankratov, I. M. Aliev // *Physics of the Solid State*. - 2024. - V. 66.- № 1. - P. 94 - 102.
9. Atzmony U., Dariel M. P. Magnetic anisotropy and hyperfine interactions in  $CeFe_2$ ,  $GdFe_2$  and  $LuFe_2$  [Text] / U. Atzmony, M. P. Dariel // *Phys. Rev. B*. - 1973. - V.10. - № 5. - P. 2060 - 2067.
10. Buschow K. H. J., Van der Kraan A. M. Magnetic properties of amorphous rare-earth-iron alloys. [Text] / K. H. J. Buschow, A. M. Van der Kraan // *J. Magn. Magn. Mater.* - 1981. - V. 22. - P. 220 - 226.
11. Brooks M. S. S., Eriksson O., Johansson B. 3d-5d band magnetism in the rare earth - transition metal intermetallics:  $LuFe_2$  [Text] / M. S. S. Brooks, O. Eriksson, B. Johansson // *J. Phys.: Cond. Matter*. - 1989. - V. 1. - P. 5861 - 5874.
12. Brooks M. S. S., Nordstrom L., Johansson B. Magnetism of  $RFe_2$  compounds [Text] / M. S. S. Brooks, L. Nordstrom, B. Johansson // *J. Appl. Phys.* - 1991. - V. 69(8). - P. 5683 - 5684.
13. Matsnev M. E., Rusakov V. S. SpectrRelax: an application for Mössbauer spectra modelling and fitting [Text] / M. E. Matsnev, V. S. Rusakov // *AIP Conference Proceedings*. - 2012. - V. 1489. - P. 178 – 185.
14. Matsnev M. E., Rusakov V. S. Study of spatial spin-modulated structures by Mössbauer spectroscopy using SpectrRelax [Text] / M. E. Matsnev, V. S. Rusakov // *AIP Conference Proceedings*. - 2014. - V. 1622. - P. 40 – 49.
15. Ilyushin A. S., Tereshina I. S., Aleroeva T. A., Pankratov N. Yu., Umkhaeva Z. S., etc. Phenomenon of magnetic compensation in the multicomponent system  $(Tb, Y, Sm)Fe_2$  and their hydrides [Text] / A. S. Ilyushin, I. S. Tereshina, T. A. Aleroeva, N. Yu. Pankratov, Z. S. Umkhaeva, etc. // *J. Alloys and Compounds*. - 2020. - V. 847. - Art. № 155976.
16. Ray P., Kulshreshtha S. K. Magnetically induced quadrupole interactions and anisotropic hyperfine fields at Fe-sites in  $RFe_2$ -compounds [Text] / P. Ray, S. K. Kulshreshtha // *J. Physique*. - 1980. - V. 41. - № 12. - P.1487 - 1494.
17. Umkhaeva Z. S., Ilyushin A. S., Aleroeva T. A., Kiseleva T. Yu., Tereshina I. S. Mossbauer effect in alloys of variable composition  $(Tb_{1-x}Y_x)_{0.8}Sm_{0.2}Fe_2$  [Text] / Z. S. Umkhaeva, A. S. Ilyushin, T. A. Aleroeva, T. Yu. Kiseleva, I. S. Tereshina // *Journal of Physics: Conference Series*. - 2021. - V. 1753. - Art. № 012079.
18. Watson R. E., Freeman A. J. Origin of effective fields in magnetic materials [Text] / R. E. Watson, A. J. Freeman // *Phys. Rev.* - 1961. - V. 123. - № 6. - P. 2027 - 2047.