

**САМАРҚАНД ДАВЛАТ УНИВЕРСИТЕТИ ҲУЗУРИДАГИ
ФАЛСАФА ДОКТОРИ ИЛМИЙ ДАРАЖАСИНИ БЕРУВЧИ
PhD.29.08.2017. FM.02.04 РАҚАМЛИ ИЛМИЙ КЕНГАШ**

САМАРҚАНД ДАВЛАТ УНИВЕРСИТЕТИ

АМОНОВ БАХТИЁР УМРЗОКОВИЧ

**НОДИР ЕР ВА ЎТУВЧИ ЭЛЕМЕНТЛАР БОРАТЛАРИНИНГ ЮҚОРИ
ҲАРОРАТЛАРДАГИ МАГНИТ ХОССАЛАРИ**

01.04.09 – Магнит ҳодисалари физикаси

**ФИЗИКА-МАТЕМАТИКА ФАНЛАРИ БЎЙИЧА ФАЛСАФА ДОКТОРИ (PhD)
ДИССЕРТАЦИЯСИ АВТОРЕФЕРАТИ**

Самарқанд– 2018

**Физика-математика фанлари бўйича фалсафа доктори (PhD)
диссертацияси автореферати мундарижаси**

**Оглавление автореферата диссертации
доктора философии (PhD) по физико-математическим наукам**

**Contents of dissertation abstract of doctor of philosophy (PhD) on
physicalmathematical sciences**

**Амонов Бахтиёр Умрзоқович
Нодир ер ва ўтувчи элементлар боратларининг юқори хароратлардаги
магнит хоссалари. 3**

**Амонов Бахтиёр Умрзоқович
Магнитные свойства боратов редкоземельных и переходных элементов
при высоких температурах. 21**

**Amonov Bakhtiyor Umrzokovich
Magnetic properties of borates of rare-earth and transition elements at high
temperatures. 39**

**Эълон қилинган ишлар рўйхати
Список опубликованных работ
List of published works. 43**

**САМАРҚАНД ДАВЛАТ УНИВЕРСИТЕТИ ҲУЗУРИДАГИ
ФАЛСАФА ДОКТОРИ ИЛМИЙ ДАРАЖАСИНИ БЕРУВЧИ
PhD.29.08.2017. FM.02.04 РАҚАМЛИ ИЛМИЙ КЕНГАШ**

САМАРҚАНД ДАВЛАТ УНИВЕРСИТЕТИ

АМОНОВ БАХТИЁР УМРЗОКОВИЧ

**НОДИР ЕР ВА ЎТУВЧИ ЭЛЕМЕНТЛАР БОРАТЛАРИНИНГ ЮҚОРИ
ҲАРОРАТЛАРДАГИ МАГНИТ ХОССАЛАРИ**

01.04.09 – Магнит ҳодисалари физикаси

**ФИЗИКА-МАТЕМАТИКА ФАНЛАРИ БЎЙИЧА ФАЛСАФА ДОКТОРИ (PhD)
ДИССЕРТАЦИЯСИ АВТОРЕФЕРАТИ**

Самарқанд – 2018

Физика-математика фанлари бўйича фалсафа доктори (PhD) диссертацияси мавзуси Ўзбекистон Республикаси Вазирлар Маҳкамаси ҳузуридаги Олий аттестация комиссиясида ВМ2017.2.PhD/FM73 рақам билан рўйхатга олинган.

Диссертация Самарқанд давлат университетида бажарилган.

Диссертация автореферати уч тилда (ўзбек, рус, инглиз (резюме)) Илмий кенгаш веб-саҳифасида (www.samdu.uz) ва «Ziyonet» ахборот таълим порталида (www.ziyonet.uz) жойлаштирилган.

Илмий раҳбар:

Кувандиков Облокул Кувандикович
физика-математика фанлари доктори, профессор

Расмий оппонентлар:

Нормуродов Муродулло Тоғаевич
физика-математика фанлари доктори, профессор

Рамазанов Асрор Хамроевич
физика-математика фанлари номзоди, доцент

Етакчи ташкилот:

Бухоро давлат университети

Диссертация ҳимояси Самарқанд давлат университети ҳузуридаги PhD.29.08.2017.FM02.04 рақамли Илмий кенгашнинг 2018 йил «___» _____ соат ___даги мажлисида бўлиб ўтади. (**Манзил:** 140104, Самарқанд шаҳри, Университет хиёбони, 15 уй. **Тел.:** (99866) 239-13-87, 239-11-40; **факс:** (99866) 239-11-40; **e-mail:** rektor@samdu.uz Самарқанд давлат университети Физика факультети, 1-қават, 63-хона).

Диссертация билан Самарқанд давлат университетининг Ахборот-ресурс марказида танишиш мумкин (___рақам билан рўйхатга олинган). **Манзил:** 140104, Самарқанд шаҳри, Университет хиёбони, 15 уй. **Тел.:** (99866) 239-13-87, 239-11-40; **факс:** (99866) 239-11-40.

Диссертация автореферати 2018 йил «___» _____ да тарқатилди.
(2018 йил «___» _____ даги _____ рақамли реестр баённомаси).

М. Х. Ашуров

Илмий даражалар берувчи илмий
кенгаш раиси, ф.-м.ф.д., академик

Р.М.Ражабов

Илмий даражалар берувчи илмий кенгаш
илмий котиби, ф.-м.ф.н., доцент

Д.И.Семенов

Илмий даражалар берувчи илмий кенгаш
ҳузуридаги илмий семинар раиси, ф.-м.ф.д.

КИРИШ (фалсафа доктори (PhD) диссертацияси аннотацияси)

Диссертация мавзусининг долзарблиги ва зарурати. Жахонда замонавий фан ва техниканинг жадал суратлар билан ривожланиши уникал физико-химиявий хоссаларга эга бўлган янги истиқболли магнит материаллар яратиш билан бевосита боғлиқ. Ҳозирги вақтда материалшуносликда таркибида $3d$ - ва $4f$ - элементлар бўлган бирикмалар: кристалл структурасининг тузилиши жиҳатдан табиий хантит минералининг кристалл структурасига ўхшаш бўлган мультиферроиклар деб аталувчи нодир ер элементли ферро- $RFe_3(BO_3)_4$ ва алюмино - $RAI_3(BO_3)_4$ боратлар қўлланилиш соҳасига қараб илмий ва амалий жиҳатдан ўта истиқболли материаллар ҳисобланади. Бундай материалларга бўлган қизиқиш нафақат мазкур материалларнинг турли хил масалан, магнит, магнитооптик, резонанс ва бошқа физик хоссаларга¹ эга эканлиги, балки, амалий аҳамияти билан ҳам боғлиқ бўлиб, улар лазер қурилмалари ва ҳисоблаш техникалари, амалий магнитооптика, турли микроэлектроника асбобсозлик техникалари, магнитоакустика ва бошқа соҳаларнинг асосий ишчи магнит материаллари сифатида фойдаланилмоқда.

Ҳозирги кунда дунёда фундаментал нуқтаи назардан, нодир ер элементлари асосидаги магнит материалларининг, яъни мультиферроикларнинг магнит хоссаларини ўрганиш долзарб масалаларидан бири ҳисобланади. Бунинг асосий сабаби, бошқа магнит материалларга нисбатан мультиферроикларда индуцирланган магнит майдонида фазавий ўтишлар жараёнидаги кескин аномал ўзгаришлар кузатилиши, олиниш технологиясининг мукаммаллигидир. Шу нуқтаи назардан нодир ер элементлари асосидаги ферро- ва алюминоборатларда парамагнит тартибни ҳосил қилиш, электр ва магнит хоссаларини ўрганиш ва уларнинг магнит ўзаро таъсир механизмларини аниқлаш материалшуносликнинг муҳим вазифаларидан бири бўлиб ҳисобланади.

Мамлакатимизда фундаментал фанларнинг амалий татбиққа эга бўлган долзарб йўналишларига эътибор кучайтирилди. Ўзбекистон Республикасини янада ривожлантиришнинг Ҳаракатлар стратегиясида, илмий ютуқларни амалиётга жорий этишнинг самарали механизмларини яратиш масалаларига алоҳида эътибор қаратилган. Жумладан, янги магнит материаллар олиш технологиясини яратиш, уларнинг электр, магнит, гальваномагнит ҳамда оптик хоссаларини тадқиқ қилишга ва амалиётда қўллашга катта эътибор қаратилмоқда. Магнит материалларда кечаётган физик жараёнлар асосида ишлайдиган асбобларнинг янги авлодини яратиш ва уларни амалиётга татбиқ этиш натижасида, мавжудларидан тубдан фарқ қилувчи, арзон ва тежамкор технологияларни яратиш орқали магнитооптик, ҳисоблаш техникаси саноати маҳсулотларининг рақобатбардошлиги ва самарадорлигини ошириш муҳим аҳамиятга эга.

¹ канд.дисс. Волков Д. В. Магнитные и магнитоупругие свойства редкоземельных ферроборатов $RFe_3(BO_3)_4$, R = Nd, Tb, Dy. Москва.- 2007

Ўзбекистон Республикаси Президентининг 2017 йил 13 февралдаги ПҚ-2772-сон “2017-2021 йилларда электротехника саноатини ривожлантиришнинг устивор йўналишлари тўғрисида”ги Қарори ва 2017 йил 17 февралдаги ПҚ-2789-сон “Фанлар академияси фаолияти, илмий тадқиқот ишларини ташкил этиш, бошқариш ва молиялаштириш янада такомиллаштириш чоратадбирлари тўғрисида”ги Қарори, 2017 йил 7 февралдаги ПФ-4947-сонли “Ўзбекистон Республикасини янада ривожлантириш бўйича Ҳаракатлар стратегияси тўғрисида”ги Фармони ҳамда мазкур фаолиятга тегишли бошқа меъерий – ҳуқуқий ҳужжатларда белгиланган вазифаларни амалга оширишга ушбу диссертация тадқиқоти муайян даражада хизмат қилади.

Тадқиқотнинг республика фан ва технологиялари ривожланиши устувор йўналишларига боғлиқлиги. Мазкур тадқиқот республика фан ва технологиялар ривожланишининг II. «Физика, астрономия, энергетика ва машинасозлик» устувор йўналишига мувофиқ бажарилди.

Муаммонинг ўрганилганлик даражаси. Бугунги кунда илмий нашрларда $RM_3(BO_3)_4$ умумий формулани (бунда R – лантаноидлар; M – Fe ёки Al) боратлар янги магнит материаллар – мультиферроиклар деб аталиб, уларда, янги турдаги магнитоэлектрик ўзаро таъсир туфайли бир вақтда юз берадиган ва катта амалий аҳамиятга эга бўлган, магнитоэлектрик эффектлар – ферромагнит ва ферроэлектрик тартибланиш ҳодисаларини кузатиш мумкин. Бундай материалларнинг магнит хоссаларини юқори температураларда ўрганиш магнит ҳодисалари физикаси учун ҳам, улардан амалда фойдаланиш имкониятларини ўрганиш нуқтаи назардан ҳам муҳим аҳамиятга эгадир. Нодир ер ва ўтувчи элементлар боратларининг физик хоссаларини ҳам назарий ҳам тажрибавий жиҳатдан ўрганиш бўйича кўплаб илмий ишлар қилинган, жумладан P. Fischer (АҚШ), С. Ritter, (Франция), X. Chen (Хитой), Y. Hinatsu (Япония), Н. И. Леонюк, А.Н. Васильев, Л. Белоконева, Л.И. Альшинская, М.А. Симонов, С. А. Климин, Д. В. Волков, А. А. Демидов, А. К. Звездин (Россия), R Szymczak (Польша), Flaviu R. V. Turcu, Ago Samoson, ‡Diana L. Trandafir, Simion Simon (Руминия) ва Maria Maier (Эстония) лар томонидан ўрганилган.

Шуни алоҳида таъкидлаш керакки, бу соҳанинг ривожланишига Ўзбекистонлик олимлардан профессор ф.-м.ф.д., О. Қ. Қувондиқов, ф.-м.ф.н., доц. Х. О. Шакаров, ф.-м.ф.н., доц. З. М. Шодиевлар ҳам катта ҳисса қўшганлар.

Охирги йиллардаги ўтказилган экспериментал ва назарий тадқиқотлар таҳлили шуни кўрсатадики, нодир ер ва ўтувчи элементлар боратлари [$GdFe_3(BO_3)_4$, $ErFe_3(BO_3)_4$, $DyFe_3(BO_3)_4$, $YFe_3(BO_3)_4$, $NdFe_3(BO_3)_4$, $NdAl_3(BO_3)_4$, $Nd_{0.65}Y_{0.35}Al_3(BO_3)_4$, $GdAl_3(BO_3)_4$, $Gd_{0.2}Y_{0.8}Al_3(BO_3)_4$, $TbAl_3(BO_3)_4$, $ErAl_3(BO_3)_4$ ва $HoAl_3(BO_3)_4$] нинг магнит хоссалари ва электрон тузилиши паст температураларда яхши ўрганилган бўлиб, уй температурасидан юқори температураларда жуда кам ўрганилган.

Тадқиқотнинг диссертация бажарилган олий таълим муассасасининг илмий – тадқиқот ишлари режалари билан боғлиқлиги.

Диссертация иши Самарқанд давлат университети илмий-тадқиқот ишларининг бош мавзулари доирасида бажарилган.

Тадқиқотнинг мақсади нодир ер ва ўтувчи элементлар боратлари [$\text{GdFe}_3(\text{BO}_3)_4$, $\text{ErFe}_3(\text{BO}_3)_4$, $\text{DyFe}_3(\text{BO}_3)_4$, $\text{YFe}_3(\text{BO}_3)_4$, $\text{NdFe}_3(\text{BO}_3)_4$, $\text{NdAl}_3(\text{BO}_3)_4$, $\text{Nd}_{0.65}\text{Y}_{0.35}\text{Al}_3(\text{BO}_3)_4$, $\text{GdAl}_3(\text{BO}_3)_4$, $\text{Gd}_{0.2}\text{Y}_{0.8}\text{Al}_3(\text{BO}_3)_4$, $\text{TbAl}_3(\text{BO}_3)_4$, $\text{ErAl}_3(\text{BO}_3)_4$ ва $\text{HoAl}_3(\text{BO}_3)_4$] магнит қабул қилувчанлигининг ҳароратга боғланишини $[\chi(T)]$ уй ҳароратидан юқори ҳароратларда аниқлашдан иборат.

Тадқиқотнинг вазифалари:

$\text{GdFe}_3(\text{BO}_3)_4$, $\text{ErFe}_3(\text{BO}_3)_4$, $\text{DyFe}_3(\text{BO}_3)_4$, $\text{YFe}_3(\text{BO}_3)_4$ ва $\text{NdFe}_3(\text{BO}_3)_4$ нодир ер элементлари асосидаги ферроборатларнинг $\chi(T)$ боғланишларини 293-1123 К температуралар оралиғида тажрибада ўлчаш;

$\text{NdAl}_3(\text{BO}_3)_4$, $\text{Nd}_{0.65}\text{Y}_{0.35}\text{Al}_3(\text{BO}_3)_4$, $\text{GdAl}_3(\text{BO}_3)_4$, $\text{Gd}_{0.2}\text{Y}_{0.8}\text{Al}_3(\text{BO}_3)_4$, $\text{TbAl}_3(\text{BO}_3)_4$, $\text{ErAl}_3(\text{BO}_3)_4$ и $\text{HoAl}_3(\text{BO}_3)_4$ нодир ер элементлари асосидаги алюминоборатларнинг $\chi(T)$ боғланишларини 293-1223 К температуралар оралиғида аниқлаш;

ўрганилган намуналарнинг тажрибавий $\chi^{-1}(T)$ боғланишларидан фойдаланиб, уларнинг асосий магнит характеристикалари: парамагнит Кюри температураси Θ_p , Кюри–Вейсс доимийси–С, намуналарнинг кимёвий формула бирлигига тўғри келувчи магнит моменти $-\mu_{\text{фop}}$ ларни ҳисоблаш;

ўлчаш ва ҳисоблаш натижаларини замонавий магнетизм моделлари ва назариялари асосида таҳлил қилиш ва тегишли хулосалар чиқариш.

Тадқиқотнинг объекти сифатида нодир ер ва ўтувчи элементларнинг боратлари [$\text{GdFe}_3(\text{BO}_3)_4$, $\text{ErFe}_3(\text{BO}_3)_4$, $\text{DyFe}_3(\text{BO}_3)_4$, $\text{YFe}_3(\text{BO}_3)_4$, $\text{NdFe}_3(\text{BO}_3)_4$, $\text{NdAl}_3(\text{BO}_3)_4$, $\text{Nd}_{0.65}\text{Y}_{0.35}\text{Al}_3(\text{BO}_3)_4$, $\text{GdAl}_3(\text{BO}_3)_4$, $\text{Gd}_{0.2}\text{Y}_{0.8}\text{Al}_3(\text{BO}_3)_4$, $\text{TbAl}_3(\text{BO}_3)_4$, $\text{ErAl}_3(\text{BO}_3)_4$ ва $\text{HoAl}_3(\text{BO}_3)_4$] олинган.

Тадқиқотнинг предмети температура ва ташқи магнит майдон таъсири натижасида нодир ер элементлари асосидаги ферро ва алюминоборатларда вужудга келадиган полиморф (структурвий) фазавий ўтиш жараёнларидан иборат.

Тадқиқотнинг усуллари. Нодир ер ва ўтувчи элементлар боратлари [$\text{GdFe}_3(\text{BO}_3)_4$, $\text{ErFe}_3(\text{BO}_3)_4$, $\text{DyFe}_3(\text{BO}_3)_4$, $\text{YFe}_3(\text{BO}_3)_4$, $\text{NdFe}_3(\text{BO}_3)_4$, $\text{NdAl}_3(\text{BO}_3)_4$, $\text{Nd}_{0.65}\text{Y}_{0.35}\text{Al}_3(\text{BO}_3)_4$, $\text{GdAl}_3(\text{BO}_3)_4$, $\text{Gd}_{0.2}\text{Y}_{0.8}\text{Al}_3(\text{BO}_3)_4$, $\text{TbAl}_3(\text{BO}_3)_4$, $\text{ErAl}_3(\text{BO}_3)_4$ ва $\text{HoAl}_3(\text{BO}_3)_4$] нинг юқори температураларда магнит қабул қилувчанлигини маятниксимон магнит тарози ёрдамида ўлчашнинг Фарадей усулидан фойдаланилган.

Тадқиқотнинг илмий янгилиги куйидагилардан иборат:

нодир ер элементлари асосидаги ферро- ва алюминоборатларининг парамагнит ҳолатдаги магнит қабул қилувчанлиги юқори 293-1123 К ҳарорат оралиғида илк бор экспериментал аниқланган;

текширилган боратларнинг экспериментал $\chi^{-1}(T)$ қийматларидан фойдаланиб, Кюри-Вейсс доимийси (С), парамагнит Кюри ҳарорати (Θ_p); кимёвий формула бирлигига тўғри келувчи магнит моменти ($\mu_{\text{ф}}$) ва намунада битта магнитофаол элемент атомига тўғри келадиган эффектив магнит

моментини ($\mu_{\text{эфф}}$) ҳисоблаш орқали, боратларда алмашинув ўзаро таъсир магнитфаол ионлар томонидан амалга ошиши аниқланган;

нодир ер элементли ферро- ва алюминоборатларнинг паст ҳароратларда магнитоэлектрик хоссага ва юқори ҳароратларда полиморф (структуравий) ўтишларга эга бўлиши экспериментал аниқланган;

$\text{NdAl}_3(\text{BO}_3)_4$ ва $\text{GdAl}_3(\text{BO}_3)_4$ бирикмаларидаги Nd ва Gd элементларининг атом улушларининг иттрий атомлари билан ($\text{Nd}_{0.65}\text{Y}_{0.35}$) ва ($\text{Gd}_{0.2}\text{Y}_{0.8}$) стехиометрик нисбатда ўзгартирилиши, шу бирикмаларнинг ҳар бир полиморф фазасида магнит моментларининг камайишига олиб келиши илк бор аниқланган.

Тадқиқотнинг амалий натижаси шундан иборатки, нодир ер элементлари асосидаги ферро- ва алюминоборатларида кузатилган (полиморф) структуравий ўтишлар намуналарнинг магнит хоссасига боғлиқлиги назарий ҳисоблашлар орқали кўрсатилган;

нодир ер элементлари асосидаги ферро- ва алюминоборатларида ташқи магнит майдонни, температуранинг ва намуналар таркибида 3d- ва 4f- элемент ионларининг нисбий улушларини ўзгартириш ёрдамида магнит хоссасини эффектив бошқариш мумкинлиги кўрсатилган;

Тадқиқот натижаларининг ишончлиги тадқиқотда ўрганилган намуналарнинг магнит хоссасини тадқиқ қилишда илмий тадқиқотларда кенг қўлланиладиган ишончли тажрибавий текширув усуллари ва қурилманинг қўлланилганлиги; диссертацияда олинган натижаларнинг назарий ва тажрибавий қийматларининг ўзаро яхши мос келганлиги; ўлчаш хатоликларининг батафсил таҳлил қилинганлиги; олинган натижаларнинг мавжуд физик тасаввурлар ҳамда илмий адабиётларда келтирилган маълумотларга зид келмаслиги билан тасдиқланган.

Тадқиқот натижаларининг илмий ва амалий аҳамияти. Тадқиқот натижаларининг илмий аҳамияти шундан иборатки, диссертация ишида магнетизмнинг замонавий назариялари бўйича таҳлил қилиб олинган натижалар нодир ер элементлари асосидаги ферро- ва алюминоборатлар магнетизми ҳақидаги физик тасаввурларни, назарияларни янада ривожлантириш учун хизмат қилади. Шунингдек, диссертацияда олинган натижалар нодир ер элементлари асосидаги ферро- ва алюминоборатлар магнит хоссаларини ўзига хос томонларини ягона яқинлаштириш асосида тушунтириш имкониятини беради.

Тадқиқот натижаларининг амалий аҳамияти 3d- ва 4f- ўтrockлашган электронларга бир вақтда эга бўлган мураккаб бирикмаларнинг физик хоссаларини ташқи магнит майдони, температура ва бирикмада 3d- ва 4f- элемент ионларининг нисбий улушларини ўзгартириш ёрдамида эффектив бошқариш мумкинлиги билан бевосита боғлиқ. Бу ўз навбатида олдиндан башорат қилинган физик хоссали янги магнит материалларини яратиш муаммосининг ижобий ечимини топиш учун зарурдир.

Тадқиқот натижаларининг амалиётга жорий қилиниши. Нодир ер элементлари асосидаги ферро- ва алюминоборат $\{\text{RM}_3(\text{BO}_3)_4$ (бу ерда $\text{R}=\text{Dy}$,

Gd, Er, Nd, Y, M=Fe или Al)} кристалларининг парамагнит ҳолатида магнит хоссасини ўрганиш бўйича олинган натижалар асосида:

Нодир ер элементлари асосидаги ферро- ва алюминоборатларнинг парамагнит ҳолатда магнит қабул қилувчанлигининг температурага боғлиқлиги натижалари 12-05-00912 рақамли «Новые микроразмерные минералы редкоземельных боратов как прототипы синтетических монокристаллов», 13-05-90450 рақамли «Синтез и исследование механизмов взаимодействия центров люминесценции в кристаллах боратов», 18-05-01085 рақамли «Синтез и изучение структурных и морфологических особенностей редкоземельных боратов как структурных аналогов природных минералов» лойиҳаларида полиморф фазавий ўтишларни таҳлил қилишда қўлланилган (Москва давлат университети, 2018 йил 19 апрелдаги 115-18/107-03-сон маълумотномаси). Илмий натижаларнинг қўлланилиши, боратларнинг кристалл ва магнит тузилишини тушунтириш имконини берган;

нодир ер ферро- ва алюминоборатларининг парамагнит қабул қилувчанлигининг температурага боғлиқлиги ҳамда нодир ер ферро- ва алюминоборатларининг парамагнит хоссалари ЁФ-2-1 рақамли “Ориентациявий ўзаро таъсирни инобатга олган ҳолда феррит-гранатлардаги фазавий ўтишлар ва магнитооптик хусусиятларни тадқиқ этиш” мавзудаги лойиҳада феррит-гранат кристаллардаги магнитооптик эффектларнинг ҳароратга боғлиқлигини таҳлил қилишда қўлланилган (Ўзбекистон Республикаси Олий ва ўрта махсус таълим вазирлигининг 2018 йил 10 майдаги 89-03-1784-сон маълумотномаси). Илмий натижаларнинг қўлланилиши кучсиз ферромагнетикларда фото сезгирлик модели масалаларини тушунтириш имконини берган.

Тадқиқот натижаларининг апробацияси. Мазкур тадқиқотнинг асосий натижалари 4 та халқаро ва 9 та республика миқёсидаги илмий-амалий конференцияларида маърузалар қилиниб тегишли муҳокамалардан ўтказилган.

Тадқиқот натижаларининг эълон қилинганлиги. Диссертация ишининг асосий мазмуни асосан 13 та илмий ишларда чоп қилинган бўлиб, улардан 7 тасини халқаро ва республика миқёсидаги илмий – амалий анжуман тезислари, 6 тасини эса Ўзбекистон Республикаси Олий аттестация комиссиясининг фалсафа доктори (PhD) диссертацияларининг асосий илмий натижаларини чоп этишга тавсия этган илмий нашрларда чоп этилган мақолалар ташкил қилади.

Диссертациянинг тузилиши ва ҳажми. Диссертация кириш, тўртта боб, хулоса, фойдаланилган адабиётлар рўйхатидан иборат. Диссертациянинг ҳажми 115 бетни ташкил этган.

ДИССЕРТАЦИЯНИНГ АСОСИЙ МАЗМУНИ

Диссертациянинг “**Кириш**” қисмида мавзунинг долзарблиги ва зарурати, республика фан ва технологиялар ривожланишининг асосий устувор йўналишлари билан мослиги, тадқиқотнинг диссертация бажарилган олий таълим муассасасининг илмий – тадқиқот ишлари режалари билан боғлиқлиги, диссертация мавзуси бўйича халқаро илмий тадқиқотлар шарҳи, муаммонинг ўрганилганлик даражаси, тадқиқотнинг мақсади ва вазифалари, тадқиқотнинг предмети, тадқиқотнинг усуллари, тадқиқотнинг илмий янгилиги ва амалий натижаси, тадқиқот натижаларининг ишончлилиги, тадқиқот натижаларининг илмий ва амалий аҳамияти, тадқиқот натижаларининг амалиётга жорий қилиниши, тадқиқот натижаларининг эълон қилинганлиги. Диссертациянинг тузилиши ва ҳажми бўйича маълумотлар келтирилган.

Диссертациянинг “**Нодир ер элементли ферро- ва алюминоборатларнинг магнит хоссаси ҳақида назарий ва экспериментал ишлар бўйича адабиётлар шарҳи**” деб аталган биринчи бобда нодир ер металлларининг электрон структураси, иккита магнит тизимли $RM_3(BO_3)_4$ (бу ерда $R = Dy, Gd, Er, Nd, Y, Tb, Ho$; $M = Fe$ ёки Al) нодир ер ферро- ва алюминоборатларининг магнит хоссалари; паст температураларда нодир ер ферро- ва алюминоборатларининг магнит қабул қилувчанлигининг температурадан боғлиқлиги ва уларнинг парамагнит хоссасини ўрганиш бўйича асосий тажриба натижалари ҳақида қисқача маълумотлар келтирилган. Олинган натижалар парамагнетизм учун Ван-Флек назариясини янада такомиллаштиришга, локаллашган 4f-электронларнинг ўтроклашиши ва мусбат уч зарядли нодир ер ионлари моделини тушунтиришда муҳим ҳисобланади.

Биринчи бобда баён қилинган адабиётлар шарҳидан келиб чиқиб қуйидаги мақсад ва вазифалар қўйилди:

$GdFe_3(BO_3)_4$, $ErFe_3(BO_3)_4$, $DyFe_3(BO_3)_4$, $YFe_3(BO_3)_4$ ва $NdFe_3(BO_3)_4$ нодир ер элементли ферроборатларнинг $\chi(T)$ боғланишларини 293-1123 К температуралар оралиғида тажрибада ўлчаш;

$NdAl_3(BO_3)_4$, $Nd_{0.65}Y_{0.35}Al_3(BO_3)_4$, $GdAl_3(BO_3)_4$, $Gd_{0.2}Y_{0.8}Al_3(BO_3)_4$, $TbAl_3(BO_3)_4$, $ErAl_3(BO_3)_4$ и $HoAl_3(BO_3)_4$ нодир ер элементли алюминоборатларнинг $\chi(T)$ боғланишларини 293-1223 К температуралар оралиғида ўрганиш;

Ўрганилган намуналарнинг тажрибавий $\chi^{-1}(T)$ боғланишларидан фойдаланиб, уларнинг асосий магнит характеристикалари: парамагнит Кюри температураси θ_p , Кюри–Вейсс доимийси–С, намуналарнинг кимёвий формула бирлигига тўғри келувчи магнит моменти $-\mu_{фор}$ ларни ҳисоблаш;

Ўлчаш ва ҳисоблаш натижаларини замонавий магнетизм моделлари ва назариялари асосида таҳлил қилиш ва тегишли хулосалар чиқариш.

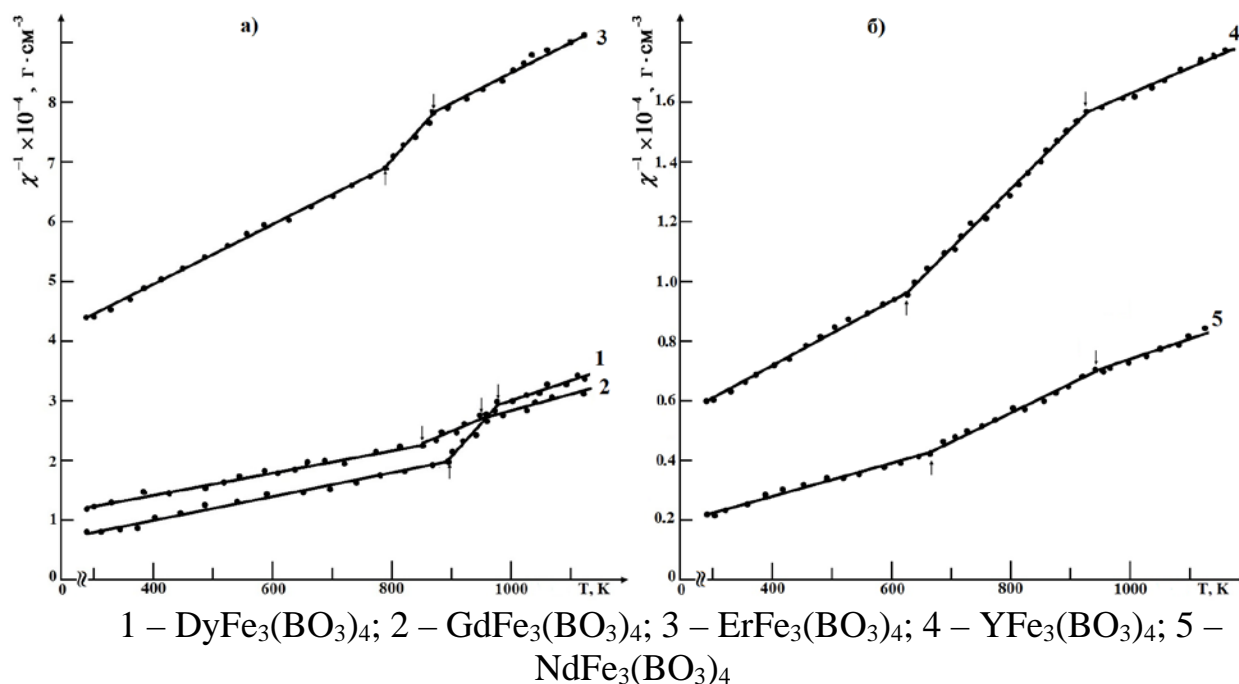
Диссертациянинг “**Нодир ер элементли ферро- ва алюминоборатларнинг юқори температураларда магнит қабул**

қилувчанлигини ўлчаш усули ва техникаси” деб номланган иккинчи бобида намуналарни олиниш усуллари, тажриба тадқиқотлари қурилмасининг баёни келтирилган. Батафсил таҳлиллар кўрсатдики, ушбу қурилмада магнит қабул қилувчанликни ўлчашдаги максимал хатолик 3% дан ошмайди.

Нодир ер ва ўтувчи элементлар боратлар $\{GdFe_3(BO_3)_4, ErFe_3(BO_3)_4, DyFe_3(BO_3)_4, YFe_3(BO_3)_4, NdFe_3(BO_3)_4, NdAl_3(BO_3)_4, Nd_{0.65}Y_{0.35}Al_3(BO_3)_4, GdAl_3(BO_3)_4, Gd_{0.2}Y_{0.8}Al_3(BO_3)_4, TbAl_3(BO_3)_4, ErAl_3(BO_3)_4, HoAl_3(BO_3)_4\}$ ни тайёрлаш ва уларнинг структуравий таҳлили Москва давлат университети геология факультети кристаллография ва кристаллохимия кафедрасида бажарилган.

Диссертациянинг учинчи боби **“Нодир ер элементли ферроборатларининг юқори ҳароратлардаги магнит хоссалари”** деб аталиб, унда темир оксиди ва $RM_3(BO_3)_4$ нодир ер ферроборатларининг кристалл ва магнит структураси, нодир ер ферроборат $RFe_3(BO_3)_4$ ($R=Dy, Gd, Er, Nd, Y$) ларининг 293-1123 К температуралар оралиғидаги магнит қабул қилувчанлиги ҳамда магнит характеристикалари тадқиқоти натижалари баён қилинган.

Ўрганилган нодир ер ферроборатларининг тажрибавий $\chi^{-1}(T)$ боғланиши мос равишда 1 а) ва б) расмларда тасвирланган.



1- расм. Нодир ер элементли ферроборатларининг магнит қабул қилувчанлиги тескари қийматининг температурадан боғлиқлиги.

Нодир ер ферроборатларининг $\chi^{-1}(T)$ - боғланишини (1-расм) таҳлил қилиш шуни кўрсатадики, $GdFe_3(BO_3)_4$ учун 853 К ва 943 К ларда, $DyFe_3(BO_3)_4$ учун 903 К ва 973 К ларда, $ErFe_3(BO_3)_4$ учун 793 ва 873 К ларда, $YFe_3(BO_3)_4$ учун 623 К ва 923 К ларда, $NdFe_3(BO_3)_4$ учун эса 273 К ва 943 К ларда икки марта синадиган, чизиқли табиатга эга. Шуни таъкидлаш керакки,

биринчи синишгача бўлган соҳада $\chi^{-1}(T)$ боғланишларнинг тиклиги ошиб боради, иккинчи синишдан кейинги соҳада эса тиклик нисбатан камаяди.

Ўрганилган намуналар учун $\chi^{-1}(T)$ боғланишнинг чизиқли табиати шундан далолат берадики, $\text{GdFe}_3(\text{BO}_3)_4$ учун 293-1123 К, 853-943 К, 943-1123 К, $\text{DyFe}_3(\text{BO}_3)_4$ учун 293-903 К, 903-973 К, 973-1123 К, $\text{ErFe}_3(\text{BO}_3)_4$ учун 293-793 К, 793-873 К, 873-1123 К, $\text{YFe}_3(\text{BO}_3)_4$ учун 293-623 К, 623-923 К, 923-1123 К, $\text{NdFe}_3(\text{BO}_3)_4$ учун 293-673 К, 673-943 К, 943-1123 К температуралар оралиғида $\chi = C/(T - \theta_p)$ (бу ерда С-Кюри – Вейсс доимийси, θ_p - парамагнит Кюри температураси) чизиқли Кюри – Вейсс қонунига бўйсинади.

Ўрганилган нодир ер ферроборатларининг $\chi^{-1}(T)$ боғланишларидаги синишларни қуйидагича тушунтириш мумкин. $\text{RFe}_3(\text{BO}_3)_4$ оиласига мансуб барча кристаллар R32 фазовий симметрия гуруҳига мансуб бўлиб, тригонал структурани намоён қилади. Катта радиусли ионга эга бўлган (R=Nd) барча бирикмалар структураси жуда паст температураларгача ўзгармас қолади². Бирикмалардаги ионларнинг радиуси камайиши билан кристалланиш температураси ошади (R=Y ($R_{ion}=0.89\text{Å}$) учун кристалланиш температураси $T_S=445\text{K}$)³. Бу эса кичик радиусли ионлари мавжуд бўлган бирикмалар (R=Gd, Dy, Er) да структуравий фазавий ўтиш рўй беришини кўрсатади. Нодир ер ферроборатларида R32→P3₁21 структуравий фазавий ўтиш натижасида баъзи фазовий трансляцияларнинг йўқолиши, фазовий симметрия груҳларининг ҳамда элементар кристалл панжара ҳажми ва шаклининг (ромбоэдрик кристалл панжара учун $T>T_S$ ва гексагонал структурага эга панжара учун эса $T<T_S$) ўзгариши А. М. Кадомцева, Ҳ. Нинатсу ларнинг илмий ишларида ўз аксини топган. Бундан ташқари А. М. Кадомцева нодир ер ферроборатларида структуравий фазавий ўтишларни термик кенгайиш коэффициентини ёрдамида кузатган.

Ўрганилган нодир ер ферроборатларининг $\chi^{-1}(T)$ боғланишларидаги синишлар магнит фазавий ўтишлар билан боғлиқ дейиш ҳақиқатдан йироқдир. Уларни фақат полиморф (структуравий) ўтишлар билангина тушунтириш мумкин. Ўрганилган боратларнинг кучли магнит хоссасини уларнинг таркибидаги 3d– металл – Fe ва 4f– нодир ер металлари – Gd, Er, Dy ва Nd ҳосил қилади, $(\text{BO}_3)_4$ – радикал кучсиз парамагнит хоссага эга.

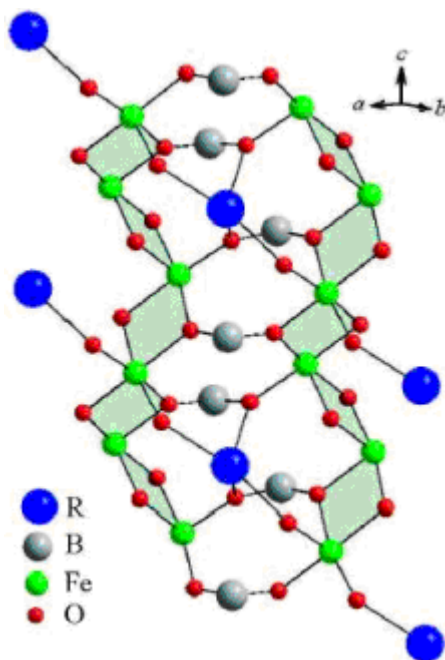
Шундай қилиб, ўрганилган нодир ер ферроборатларининг $\chi^{-1}(T)$ боғланишларидаги кузатилган синишларни температура таъсирида уларнинг кристалл панжарасида структуравий фазовий ўтиш билан тушунтириш мумкин.

$\text{RFe}_3(\text{BO}_3)_4$ боратлар кристалл панжарасининг элементар ячейкаси, тузилиши жиҳатидан, табиий $\text{CaMg}_3(\text{CO}_3)_4$ - хантит минерали кристалл панжарасининг элементар ячейкаси билан бир хилдир (2-расм). Бу ячейка R32 ($D_{3/2}^7$) тригонал фазовий груҳга мансуб бўлиб, учта формула

² А. М. Кадомцева и др. Письма в ЖЭТФ, 87(45), 2008

³ А. М. Kadomtseva, et all. Low temperature Physics, 36(6):511-521, 2010; Ҳ. Нинатсу, et all. Journal of solid state chemistry, 172:438, 2003

бирлигидан ташкил топган: RO_6 (учларида кислород ва марказида R жойлашган призма), FeO_6 (учларида кислород ва марказида Fe иони жойлашган октаэдр) ва BO_3 (учларида кислород ва марказида B жойлашган учбурчак). Уч ўлчовли кристалл фазосида FeO_6 октаэдрлари кирралари билан ўзаро кучсиз боғланиб кристаллнинг C_3 ўқи бўйлаб чўзилган бир ўлчамли винтсимон занжир ҳосил қилади. Юқорида айтилганлардан келиб чиқиб, FeO_6 октаэдр кристаллнинг шу занжири параметрлари температура ортиши билан ўзгариши натижасида иккита структуравий ўтишлар юз беради.



2 - расм. $RFe_3(BO_3)_4$ – ферроборатнинг кристалл структураси.

Демак, ўрганилган нодир ер ферроборатларининг $\chi^{-1}(T)$ боғланишларидаги синишлар, уларга мос температураларда, кристалл панжарада юз берадиган структуравий фазовий ўтишлар билан бевосита боғлиқ.

Ферроборатларнинг $\chi(T)$ тажрибавий боғланишларини назарий жиҳатдан қуйидагича ёзиш мумкин. Уларнинг кристалл панжарасини иккита магнит тизимли, яъни нодир ер метали (R) ҳамда темир (Fe) ионларидан иборат панжарачаларга бўламиз.

Бу иккита магнит системалар нодир ер ферроборатларининг магнит қабул қилувчанлигига ўз улушларини қўшади:

$$\chi = \chi^R + \chi^{Fe} \quad (1)$$

Парамагнит соҳада ($T > \theta_p$), яъни нодир ер ва темир гуруҳи металлларидан иборат системалари орасидаги ўзаро таъсир ҳисобга олинмайдиган даража кичик соҳа учун ҳар бир магнит тизим ионлари (χ^R ва χ^{Fe}) учун магнит қабул қилувчанлигини Ван-Флек формуласи орқали ёзиш мумкин:

$$\chi = g_J^2 \mu_B^2 \frac{1}{Z} \sum_n e^{-\frac{E_n}{k_B T}} \left(\frac{\langle n | \hat{M}_z | n \rangle^2}{k_B T} + 2 \sum_{m \neq n} \frac{\langle n | \hat{M}_z | m \rangle^2}{E_n - E_m} \right), \quad (2)$$

Бу ерда g_J - Ланде фактори; Z – статик йиғинди; \hat{M}_z - z ўқи бўйича магнит моменти ўртача қиймати оператори; $\langle n | \hat{M}_z | m \rangle^2$ - \hat{M}_z операторининг матрица элементи; $\Delta E = E_n - E_m - 4f$ (ёки $3d$) – электронларининг асосий ва уйғонган ҳолати ўртасидаги энергиялар фарқи; k_B - Больцман доимийси; μ_B - Бор магнетони; T – абсолют температура. (2) ифодадаги биринчи ва иккинчи ҳадлар мос равишда магнит қабул қилувчанликнинг ориентацион (температурадан боғлиқ) ва ванфлек қутбланиши (температурадан боғлиқ бўлмаган) ҳадлари.

Ўрганилган нодир ер ферроборатлари $\chi^{-1}(T)$ тажрибавий боғланишининг чизиқли характери (1-расм) шундан далолат берадики, улар учун (2) ифоданинг иккинчи ҳади ҳисобга олмас даража кичик қийматга эга.

Нодир ер элементи эркин ионлари ($\Delta E \gg k_B T$ кенг мультиплетликка эга ҳол) системаси учун (2) ифода қуйидаги кўринишга эга бўлади:

$$\chi^R = \frac{N_A}{M} \cdot \frac{g_J^2 \mu_B^2 J(J+1)}{3k_B T} = \frac{N_A}{M} \cdot \frac{\mu_{\text{эфф}}^2}{3k_B T}, \quad (3)$$

Бу ерда $\mu_{\text{эфф}}^2(R^{3+}) = g_{R^{3+}}^2 J(J+1) \mu_B^2$ - битта нодир ер элементи ионига тўғри келувчи эффектив магнит момент; N_A – Авогадро сони; M – нодир ер элементининг атомар массаси.

Темир эркин ионлари ($\Delta E \approx k_B T$ -тор мультиплетликка эга ҳол) системаси учун парамагнит қабул қилувчанликнинг температурадан боғлиқлиги (2) ифода ($3d$ -электронларининг “музлатилган” орбитал моментларини ҳисобга олган ҳол) учун қуйидаги кўрнишга келади:

$$\chi^{Fe} = \frac{N_A}{M} \cdot \frac{g_S^2 \mu_B^2 S(S+1)}{3k_B T} = \frac{N_A}{M} \cdot \frac{\mu_{\text{эфф}}^2}{3k_B T}, \quad (3^*)$$

Бу $\mu_{\text{эфф}}^2(Fe^{3+}) = g_{Fe^{3+}}^2 S(S+1) \mu_B^2$ - темир ионга тўғри келувчи эффектив магнит момент, J – нодир ер ионининг тўла механик моменти, $g_{R^{3+}}$ - Ланде фактори. R^{3+} ва Fe^{3+} ионларига тўғри келувчи тўла эффектив магнит моменти қуйидагича аниқланади: $\mu_{\text{эфф}}^2 = \mu_{\text{эфф}}^2(R^{3+}) + 3\mu_{\text{эфф}}^2(Fe^{3+})$.

Кристалл ҳолатда R (ёки Fe) ионлари орасидаги магнит ўзаро таъсир бу ўзаро таъсир энергиясига пропорционал бўлган θ_p параметр орқали ҳисобланади. Агар (2) ва (3) формуладаги T ни $T - \theta_p$ га алмаштирсак, бу

ўзаро таъсир ҳисобга олинади ва $C = \frac{N_A}{A} \frac{\mu_{\text{эфф}}^2}{3k_B}$ белгилаш киритсак, Кюри-Вейснинг эмпирик қонунига эга бўламиз:

$$\chi = \frac{C}{T - \theta_p}, \quad (4)$$

Нодир ер элементли ферроборатларининг тажрибавий $\chi^{-1}(T)$ боғланишларига [(4) дан $\chi^{-1} = (T - \theta_p)/C$], информаион ахборот технологиялардан фойдаланган ҳолда, (4) ифодага энг кичик квадратлар усулини қўллаб, уларнинг асосий магнит характеристикалари θ_p - парамагнит Кюри температураси, C – Кюри-Вейсс доимийси, ҳамда Кюри-Вейсс доимийсининг қийматидан фойдаланиб, ўрганилган ферроборатлар кимёвий формула бирлигига тўғри келадиган магнит момент куйидаги ифода бўйича ҳисоблаб топилди:

$$\mu_\phi = 2,83\sqrt{CM} \mu_B, \quad (5)$$

Бу ерда M – нодир ер ферроборатининг моляр массаси.

Ўрганилган намуналар учун парамагнит Кюри температураси, Кюри–Вейсс доимийси, R^{3+} ва Fe^{3+} ионларига тўғри келувчи эффектив магнит моментларининг ҳисоблаш натижалари 1-жадвалда келтирилган.

1- жадвал.

Нодир ер ферроборатларининг асосий магнит характеристикалари

Намуналар	Темпер. оралиғи, К	θ_p , К	$C, 10^{-2} \text{ см}^3 \cdot \text{К} \cdot \text{Г}^{-1}$	μ_ϕ, μ_B	S		L		J		g		$\mu_{\text{эфф}}, \mu_B$
					R	Fe	R	Fe	R	Fe	R	Fe	
DyFe ₃ (BO ₃) ₄	293-903	-157	5.16	15.30	5/2	5/2	5	0	15/2	5/2	1.33	2	14,75
	903-973												
	973-1123	707	8.17	19.22									
GdFe ₃ (BO ₃) ₄	293-853	- 897	3.78	13.05	7/2	5/2	0	0	7/2	5/2	2	2	12,95
	853-943												
	943-1123	- 77	8.45	19.46									
ErFe ₃ (BO ₃) ₄	293-793	- 677	2.09	9.78	3/2	5/2	6	0	9/2	5/2	1.14	2	13,69
	793-873												
	873-1123	-737	2.04	9.65									
NdFe ₃ (BO ₃) ₄	293-673	-207	19.23	9.17	3/2	5/2	6	0	15/2	5/2	0.57	2	10,62
	673-943	183	10.99	6.93									
	943-1123	-607	20.71	9.52									
YFe ₃ (BO ₃) ₄	293-623	153	9.3	18.86		5/2		0		5/2		2	
	623-923	-627	4.85	13.82									
	923-1173	-1372	12.92	22.55									

Жадвални таҳлил қилиш шуни кўрсатадики, θ_p , C ва μ_ϕ бўйича умумий қонуният кузатилмайди. θ_p - нинг манфий қийматга эга бўлиши ўрганилган боратларнинг паст температураларда антиферромагнит тартибланган ҳолатга эга бўлишидан далолат беради.

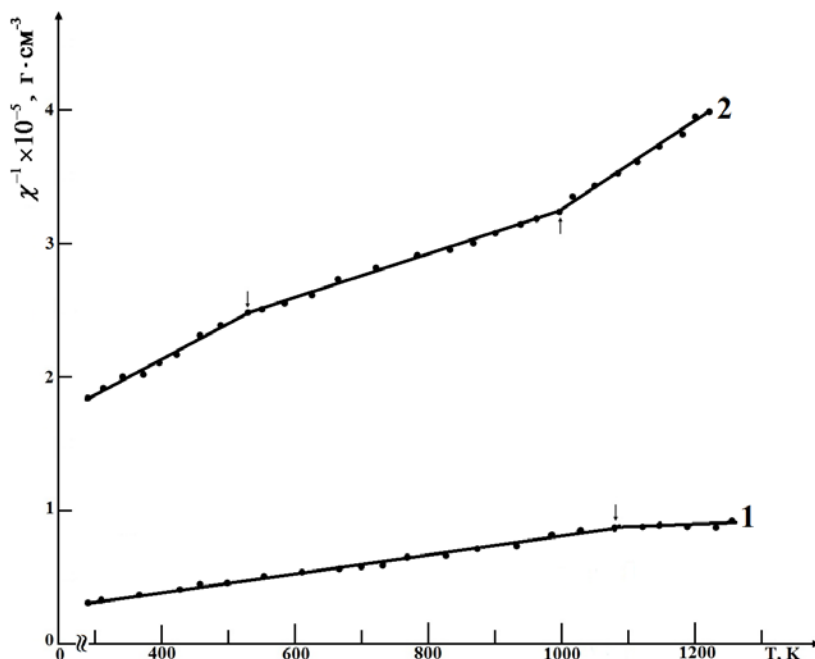
Тажриба натижаларига кўра, нодир ер металлларининг магнит моментлари деярли ўзгармай қолади. Бу шундан далолат берадики, ўрганилган нодир ер ферроборатларида уларнинг магнитофаол атоми квант ҳолатида бўлади. θ_p - алмашинув ўзаро таъсир энергиясини ифодалаганлиги сабабли, магнит тартибланганлик ҳосил бўлганда нодир ер металлари

ионлари 4f- қобикдаги электронлари ҳамда темир ионлари 3d – қобикдаги электронлари ўртасидаги магнит алмашиш ўзаро таъсири ошади.

Диссертациянинг тўртинчи боби “**Нодир ер элементли алюминоборатларининг юқори ҳароратлардаги магнит хоссалари**” деб аталиб, унда нодир ер элементли алюминоборатининг кристалл структураси ва нодир ер алюминоборат $\text{RAl}_3(\text{BO}_3)_4$ ($\text{R}=\text{Nd}, \text{Gd}, \text{Tb}, \text{Ho}, \text{Er}$) и ($\text{Gd}_{0.2}\text{Y}_{0.8}\text{Al}_3(\text{BO}_3)_4$, $\text{Nd}_{0.65}\text{Y}_{0.35}\text{Al}_3(\text{BO}_3)_4$) ларининг хона температурасидан то 1173 К температуралар оралиғидаги магнит қабул қилувчанлиги ҳамда магнит характеристикалари тадқиқоти натижалари баён қилинган.

Нодир ер алюминоборатларининг тажрибавий $\chi^{-1}(T)$ боғланиши мос равишда 3-5 – расмларда берилган. 3-5 расмлардан кўриниб турибдики, $\text{GdAl}_3(\text{BO}_3)_4$ намунасида 1073 К температурада битта синадиган, қолган ҳамма ўрганилган намуналар: $\text{NdAl}_3(\text{BO}_3)_4$ учун 533 ва 1003 К ларда, $\text{TbAl}_3(\text{BO}_3)_4$ учун 643 ва 813 К ларда, $\text{HoAl}_3(\text{BO}_3)_4$ учун 603 ва 733 К ларда, $\text{ErAl}_3(\text{BO}_3)_4$ учун 683 ва 813 К ларда, $\text{Gd}_{0.2}\text{Y}_{0.8}\text{Al}_3(\text{BO}_3)_4$ учун 523 ва 913 К ларда икки марта синадиган чизиқли табиатга эга.

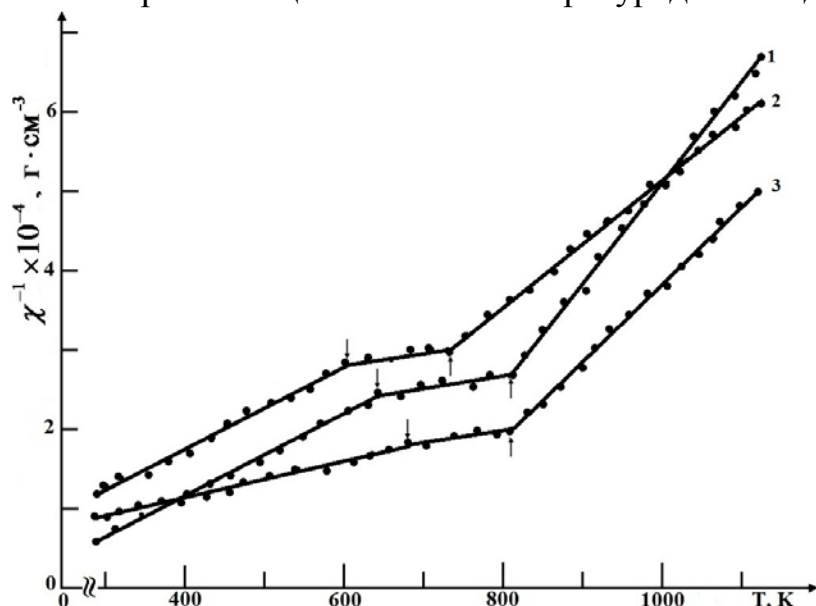
Ўрганилган намуналар учун $\chi^{-1}(T)$ боғланишнинг чизиқли табиати шундан далолат берадики, $\text{NdAl}_3(\text{BO}_3)_4$ учун 293-533 К, 533-1003 К, 1003-1223 К, $\text{GdAl}_3(\text{BO}_3)_4$ учун 293-1083 К, 1083-1223 К, $\text{TbAl}_3(\text{BO}_3)_4$ учун 293-643 К, 643-823 К, 823-1123 К, $\text{HoAl}_3(\text{BO}_3)_4$ учун 293-613 К, 613-733 К, 733-1123 К, $\text{ErAl}_3(\text{BO}_3)_4$ учун 293-693 К, 693-823 К, 823-1123 К, $\text{Gd}_{0.2}\text{Y}_{0.8}\text{ErAl}_3(\text{BO}_3)_4$ учун 293-523 К, 523-913 К, 913-1123 К, $\text{Nd}_{0.65}\text{Y}_{0.35}\text{ErAl}_3(\text{BO}_3)_4$ учун 293-523 К, 523-873 К, 873-1123 К температуралар оралиғида $\chi = C/(T - \theta_p)$ кўринишдаги чизиқли Кюри – Вейсс қонунига бўйсинади.



1– $\text{GdAl}_3[\text{BO}_3]_4$ ва 2– $\text{NdAl}_3(\text{BO}_3)_4$ (χ^{-1} нинг графикдаги қийматига 0.8 кўшилади)

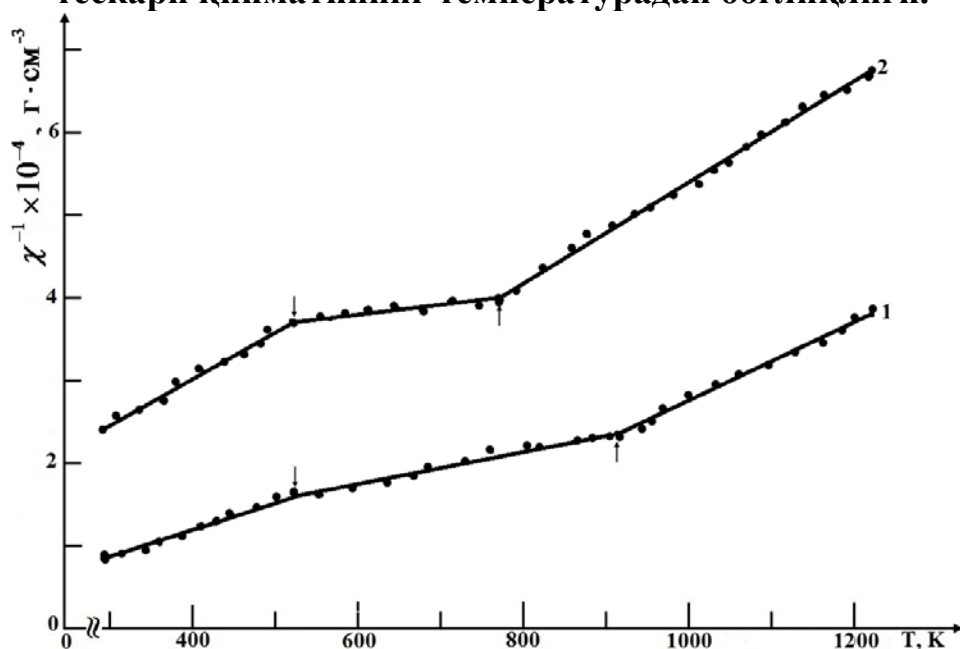
3 - расм. Нодир ер алюминоборатларининг магнит қабул қилувчанлиги тескари қийматининг температурадан боғлиқлиги.

Ўрганилган нодир ер алюминоборатларининг $\chi^{-1}(T)$ боғланишларидаги синишларни қуйидагича тушунтириш мумкин. Маълумки, нодир ер алюминоборатларида магнитоактив компонент нодир ер металлари атомлари ҳисобланади, чунки улардаги магнит хосса 4f – электронларининг улушига тўғри келади. Бу электронлар нодир ер алюминоборатларининг кристалл панжараси тугунларида локаллашган ҳолда бўлади. Бошқа томондан бу металлларда магнит тартиблан ҳолат 25 °С температурадан пастда.



1– $TbAl_3[BO_3]_4$, 2– $HoAl_3(BO_3)_4$ ва 3– $ErAl_3[BO_3]_4$.

4 – расм. Нодир ер алюминоборатларининг магнит қабул қилувчанлиги тескари қийматининг температурадан боғлиқлиги.



1– $(Gd_{0.2}Y_{0.8})Al_3[BO_3]_4$ ва 2– $(Nd_{0.65}Y_{0.35})Al_3[BO_3]_4$.

5 - расм. Нодир ер алюминоборатларининг магнит қабул қилувчанлиги тескари қийматининг температурадан боғлиқлиги.

Бу ҳолда ҳам, учинчи бобдагидек намуналар иккита магнит системадан ташкил топган деб қаралди. Бу иккита магнит системалар нодир ер алюминоборатларининг магнит қабул қилувчанлигига ўз улушларини кўшади:

$$\chi = \chi^R + \chi^{Al} \quad (6)$$

Шуни алоҳида таъкидлаш керакки, нодир ер алюминоборатлари учун ёзилган бу ифодадаги иккинчи ҳад нолга тенг бўлади.

Бугунги кунда нодир ер алюминоборатлари устида олиб борилган тадқиқотлар бу намуналар паст температураларда антиферромагнит ҳолатда бўлишлигини кўрсатди. Барча нодир ер алюминоборатлари учун Кюри температураси $R^{3+}-R^{3+}$ системаларда алмашиш ўзаро таъсирни характерлашда муҳим роль ўйнайди.

Нодир ер элементли алюминоборатларнинг тажрибавий $\chi^{-1}(T)$ боғланишларидан фойдаланиб, уларнинг асосий магнит характеристикалари – парамагнит Кюри температураси (θ_p), Кюри-Вейсс доимийси – (C), ўрганилган намуналарнинг кимёвий формула бирлигига тўғри келувчи магнит моментлари - (μ_ϕ) ва эффектив магнит моментлари – ($\mu_{эфф}$) ҳисоблаш натижалари 2 – жадвалда келтирилган.

2- жадвал.

Нодир ер алюминоборатларининг асосий магнит характеристикалари

Намуналар	Темп. оралиғи, К	θ_p , К	$C \cdot 10^{-4}$, $\text{см}^3 \cdot \text{К} \cdot \text{г}^{-1}$	μ_ϕ , μ_B	S	L	J	gR	$\mu_{эфф}$, μ_B
NdAl ₃ (BO ₃) ₄	293-533	43	27.75	3,25	3/2	6	9/2	0.57	2.83
	533-1003	-1117	92.19	5,80					
	1003-1223	163	36.32	3,70					
Nd _{0.65} Y _{0.35} Al ₃ (BO ₃) ₄	293-523	63	11.74	2.30	3/2	6	9/2	0.57	1.83
	523-873	-2707	85.6	5.55					
	873-1223	313	13.66	2.25					
GdAl ₃ (BO ₃) ₄	293-1083	123	123.6	7.55	7/2	0	7/2	2	7.93
	1083-1253	-907	286.1	10.95					
Gd _{0.2} Y _{0.8} Al ₃ (BO ₃) ₄	293-523	13	32.82	3.40	7/2	0	7/2	2	7.93
	523-913	-627	73.85	4.95					
	913-1223	473	20.89	2.65					
ErAl ₃ (BO ₃) ₄	293 – 683	– 177	508	14	3/2	6	15/ 2	1.14	9.1
	683 – 813	– 83	368.5	12					
	813 – 1123	598	107.6	6.5					
HoAl ₃ (BO ₃) ₄	293 – 603	– 83	200	8.78	2	5	8	1.33	11.28
	603 – 733	– 457	500	13.9					
	733 – 1123	388	120	6.8					
TbAl ₃ (BO ₃) ₄	293 – 643	– 93	275.18	10.2	3	3	6	1.5	9.72
	643 – 813	– 357	432	12.82					
	813 – 1123	613	75.64	5.36					

Жадвални таҳлил қилиш шуни кўрсатадики, θ_p , C ва μ_{ϕ} бўйича умумий қонуният кузатилмайди. θ_p - нинг манфий қийматга эга бўлиши ўрганилган алюминоборатларнинг паст температураларда антиферромагнит тартибланган ҳолатга эга бўлишидан гувоҳлик беради.

2 жадвалдаги маълумотларга қараганда $\text{NdAl}_3(\text{BO}_3)_4$ ва $\text{GdAl}_3(\text{BO}_3)_4$ бирикмаларига иттрий атомининг қўшилиши уларда ҳар бир фазада магнит моментнинг камайишига олиб келди. $\text{NdAl}_3(\text{BO}_3)_4$ учун парамагнит Кюри температураси ошди, $\text{GdAl}_3(\text{BO}_3)_4$ камайди. Бизнинг фикримизча Nd (ёки Gd) кристалл панжараси тугунларидаги 4f – электронларга иттрий атомининг таъсирлашиши билан боғлиқдир.

ХУЛОСА

Нодир ер ва ўтувчи элементлар боратларининг юқори ҳароратлардаги магнит хоссаларини тадқиқ қилиш натижалари асосида қуйидаги хулосалар қилинди:

1. Биринчи марта нодир ер элементли ферро- ва алюминоборатларнинг $\text{RM}_3(\text{BO}_3)_4$ (R=Tb, Er, Ho, Nd, Gd; M=Fe, Al) парамагнит ҳолатида уларнинг $\chi(T)$ боғланишлари 293-1123 K температуралар оралиғида ўрганилди. Ўрганилган барча боратларнинг $\chi^{-1}(T)$ - боғланишларида иккитадан синишлар кузатилди. Синишлар орасидаги $\chi^{-1}(T)$ боғланишлар Кюри – Вейсс қонунига бўйсиниши аниқланди.
2. Ўрганилаётган намуналарнинг $\chi^{-1}(T)$ боғланишлардаги аниқ температураларда аномал ўзгаришлар (синишлар) шу температураларда юз берадиган структуравий (полиморф) фазавий ўтишлар билан боғлаб тушунтирилди.
3. Ўрганилаётган боратларни тажрибавий $\chi(T)$ боғланишлари Ван-Флекнинг парамагнетизм назарияси орқали тушунтирилади. Боратларни $\chi^{-1}(T)$ боғланишларига энг кичик квадратлар усулини қўллаб, ЭХМ ёрдамида уларнинг асосий магнит характеристикалари парамагнит Кюри температураси (θ_p), Кюри – Вейсс доимийси (C), ва намуналарининг кимёвий формуласига тўғри келувчи магнит моментлари ($\mu_{\text{фор.}}$) ва эффектив магнит моментлари ($\mu_{\text{эфф.}}$) ҳисобланди.
4. $\text{NdAl}_3(\text{BO}_3)_4$ ва $\text{GdAl}_3(\text{BO}_3)_4$ бирикмаларидаги Nd ва Gd элементларининг атом улушларининг иттрий атомлари билан ($\text{Nd}_{0.65}\text{Y}_{0.35}$) ва ($\text{Gd}_{0.2}\text{Y}_{0.8}$) стехиометрик нисбатда ўзгартирилиши шу бирикмаларнинг ҳар бир полиморф фазасида магнит моменларининг камайишига олиб келиши аниқланди; $\text{NdAl}_3(\text{BO}_3)_4$ учун парамагнит Кюри температурасининг абсолют қиймати ошди, $\text{GdAl}_3(\text{BO}_3)_4$ учун эса камайди. Бу, Nd (ёки Gd) панжаралар тугунида 4f – электронларни локаллаштириш даражасига иттрий атомларининг таъсири билан боғлаб тушунтирилди.

5. Ферро- ва алюминоборатлар магнит хоссаларининг улардаги полиморф (структуравий) ўтишларда ва улардаги алмашинув ўзаро таъсирини амалга ошишида магнитофаол ионлар (Dy, Nd, Gd, Tb, Ho, Er, Y, Fe) асосий роль ўйнаши кўрсатилди.

**НАУЧНЫЙ СОВЕТ PhD.29.08.2017. FM.02.04 ПО ПРИСУЖДЕНИЮ
УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ ДОКТОРА ФИЛОСОФИИ
ПРИ САМАРКАНДСКОМ ГОСУДАРСТВЕННОМ УНИВЕРСИТЕТЕ
САМАРКАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ**

АМОНОВ БАХТИЁР УМРЗОКОВИЧ

**МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА БОРАТОВ РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫХ И
ПЕРЕХОДНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ПРИ ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ**

01.04.09 – Физика магнитных явлений

**А В Т О Р Е Ф Е Р А Т
ДИССЕРТАЦИИ ДОКТОРА ФИЛОСОФИИ (PhD)
ПО ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИМ НАУКАМ**

Самарканд – 2018

Тема диссертации доктора философии (PhD) по физико-математическим наукам зарегистрирована в Высшей аттестационной комиссии при Кабинете Министров Республики Узбекистан за № ВМ2017.2.PhD/FM73.

Диссертация выполнена в Самаркандском государственном университете.

Автореферат диссертации на трех языках (узбекский, русский, английский (резюме)) размещен на веб-странице Научного совета (www.samdu.uz) и на информационно-образовательном портале «Ziyonet» (www.ziyonet.uz).

Научный руководитель:	Кувандиков Облокул Кувандикович доктор физико-математических наук, профессор
Официальные оппоненты:	Нормуродов Муродулло Тогаевич доктор физико-математических наук, профессор Рамазанов Асрор Хамроевич кандидат физико-математических наук, доцент
Ведущая организация:	Бухарский государственный университет

Защита диссертации состоится «___» _____ 2018 г. в _____ часов на заседании ученого совета PhD.29.08.2017.FM02.04 при Самаркандском государственном университете. (**Адрес:** 140104, г. Самарканд, Университетский проспект, 15. **Тел.:** (99866) 239-13-87, 239-11-40; **факс:** (99866) 239-11-40; **e-mail:** rektor@samdu.uz Самаркандский государственный университет Физический факультет, 1-этаж, 63-аудитория).

С диссертацией можно ознакомиться в Информационно-ресурсном центре Самаркандского государственного университета (зарегистрирована под №___). **Адрес:** 140104, г. Самарканд, Университетский проспект, 15. **Тел.:** (99866) 239-13-87, 239-11-40; **факс:** (99866) 239-11-40.

Автореферат диссертации разослан «__» _____ 2018 г.
(протокол рассылки №_____ от «__» _____ 2018 г.)

М.Х.Ашуров

Председатель научного совета по присуждению
ученых степеней, д.ф.-м.н., академик

Р.М. Ражабов

Ученый секретарь научного совета по присуждению
ученых степеней, к.ф.-м.н., доцент

Д.И.Семенов

Председатель научного семинара при научном
совете по присуждению ученых степеней, д.ф.-м.н.

ВВЕДЕНИЕ (аннотация диссертации доктора философии (PhD))

Актуальность и востребованность темы диссертации. Быстрое развитие современной науки и техники непосредственно связано с созданием новых прогрессирующих магнитных материалов с уникальными физико-химическими свойствами. В настоящее время соединения, содержащие 3d- и 4f- элементы, так называемые мультиферроики, кристаллическая структура которых схожи с естественной структурой минерала хантита, редкоземельные ферро- $RFe_3(BO_3)_4$ и алюмино - $RAI_3(BO_3)_4$ бораты считаются весьма перспективными для практического применения с научной и практической точки зрения. Интерес к этим материалам возрастает не только тем, что они обладают большим разнообразием магнитных, магнитооптических, резонансных и других физических свойств¹, но и в практическом плане они используются в качестве рабочих материалов в лазерной и вычислительной технике, прикладной магнитооптике, в различных устройствах микроэлектроники, магнитоакустики и т.д.

Одной из актуальных задач современной физики магнитных явлений с фундаментальной точки зрения является исследование свойств редкоземельных (РЗ) магнитных материалов, т.е. изучение магнитных свойств мультиферроиков. Такие материалы характеризуются яркими магнитными свойствами и их аномалиями при индуцированных магнитным полем фазовых переходах и совершенной технологией получения. С этой точки зрения, образование парамагнитного порядка, изучение электрических и магнитных свойств, и механизма магнитного взаимного влияния ферро- и алюмоборатов с различными редкоземельными металлами является одним из важных задач материаловедения.

В нашей стране усилено внимание на внедрение актуальных практических достижений фундаментальных наук. В Стратегии действий по дальнейшему развитию Республики Узбекистан, уделено особое внимание на разработку эффективных механизмов внедрения достижений научных исследований. В частности, большое внимание уделяется созданию технологии получения новых магнитных материалов, исследованию их электрических, магнитных, гальваномагнитных, а также оптических свойств этих материалов и применения их на практике. Имеет важное значение создание приборов нового поколения, работающих на основе физических процессов, протекающих в магнитных материалах и применение их на практике, создание дешевых, экономичных и принципиально отличающихся от существующих технологий, и повышение конкурентоспособности и эффективности продуктов промышленности магнитооптических вычислительных техник.

Данное диссертационное исследование в определенной степени служит выполнению задач, предусмотренных в Указе Президента № УП-4947 «О

¹ канд.дисс. Волков Д. В. Магнитные и магнитоупругие свойства редкоземельных ферроборатов $RFe_3(BO_3)_4$, R = Nd, Tb, Dy. Москва.- 2007

Стратегии действий по дальнейшему развитию Республики Узбекистан» от 7 февраля 2017 года и в Постановлениях Президента № ПП-2772 «О мерах по дальнейшему совершенствованию управления, ускоренному развитию и диверсификации электротехнической промышленности на 2017 – 2021 гг.» от 13 февраля 2017 года и № ПП-2789 «О мерах по дальнейшему совершенствованию деятельности Академии наук, организации, управления и финансирования научно-исследовательской деятельности» от 17 февраля 2017 года, а также в других нормативно-правовых документах, принятых в данной сфере.

Соответствие исследования с приоритетными направлениями развития науки и технологий республики. Исследование выполнено в соответствии с приоритетным направлением развития науки и технологий Республики Узбекистан: ПФИ-2 - «Физика, астрономия, энергетика и машиностроение».

Степень изученности проблемы. В публикациях за последнее время имеются сведения о новых магнитных материалах – мультиферроиках ($RM_3(BO_3)_4$, где $R = Dy, Nd, Gd, Tb, Ho, Er, Y$; $M = Fe$ или Al). В этих материалах наблюдается новый тип магнитоэлектрического взаимодействия, где одновременно проявляются магнитоэлектрические эффекты, имеющие большое практическое значение – явления ферромагнитного и ферроэлектрического упорядочения. Изучаемые образцы в настоящее время применяются в спинтронике и устройствах лазерной техники, а также используются для магнитной записи информации и в качестве элементов магнитной памяти. Изучение магнитных свойств этих материалов при высоких температурах, а также использования их с практической точки зрения имеют очень важное значение.

Изучению физических свойств боратов на основе редкоземельных и переходных элементов, как с экспериментальной, так и с теоретической точки зрения посвящено множество работ, таких как P. Fischer (США), С. Ritter, (Франция), X. Chen (Китай), Y. Hinatsu (Япония), Н.И. Леонюк, А.Н. Васильев, Л. Белоконева, Л.И. Альшинская, М.А. Симонов, С.А. Климин, Д.В. Волков, А.А. Демидов, А.К. Звездин (Россия), R. Szymczak (Польша), Flaviu R. V. Turcu, Ago Samoson, Diana L. Trandafir, Simion Simon (Румыния) и Maria Maier (Эстония).

Следует отдельно отметить, что в развитии этой области ведут плодотворную работу и узбекские ученые, такие как д.ф.-м.н., проф. О.К. Кувандигов, к.ф.-м.н., доц. Х.О. Шакаров, к.ф.-м.н., доц. З.М. Шодиев.

Анализ экспериментальных и теоретических результатов, полученных за последние годы, показывает, что электронная и магнитная структура боратов на основе редкоземельных и переходных металлов $\{GdFe_3(BO_3)_4, ErFe_3(BO_3)_4, DyFe_3(BO_3)_4, YFe_3(BO_3)_4, NdFe_3(BO_3)_4, NdAl_3(BO_3)_4, Nd_{0.65}Y_{0.35}Al_3(BO_3)_4, GdAl_3(BO_3)_4, Gd_{0.2}Y_{0.8}Al_3(BO_3)_4, TbAl_3(BO_3)_4, ErAl_3(BO_3)_4$ и $HoAl_3(BO_3)_4\}$ при низких температурах изучены подробно, но при высоких температурах от комнатной почти не изучены.

Связь диссертационного исследования с планами научно-исследовательских работ высшего учебного заведения, где выполнена диссертационная работа. Диссертационное исследование выполнено в рамках главных тем научно-исследовательских работ Самаркандского государственного университета.

Целью исследования является изучение связи магнитной восприимчивости от температуры $[\chi(T)]$ в интервале температур от комнатной до высоких редкоземельных ферро- и алюминоборатов $\{GdFe_3(BO_3)_4, ErFe_3(BO_3)_4, DyFe_3(BO_3)_4, YFe_3(BO_3)_4, NdFe_3(BO_3)_4, NdAl_3(BO_3)_4, Nd_{0.65}Y_{0.35}Al_3(BO_3)_4, GdAl_3(BO_3)_4, Gd_{0.2}Y_{0.8}Al_3(BO_3)_4, TbAl_3(BO_3)_4, ErAl_3(BO_3)_4 \text{ и } HoAl_3(BO_3)_4\}$.

Задачи исследования:

экспериментальное изучение температурной зависимости магнитной восприимчивости $[\chi(T)]$ ферроборатов на основе редкоземельных элементов и переходных металлов $GdFe_3(BO_3)_4, ErFe_3(BO_3)_4, DyFe_3(BO_3)_4, YFe_3(BO_3)_4$ и $NdFe_3(BO_3)_4$ в интервале температур 293-1123 К;

определение температурной зависимости магнитной восприимчивости $[\chi(T)]$ алюминоборатов на основе редкоземельных элементов и переходных металлов $NdAl_3(BO_3)_4, Nd_{0.65}Y_{0.35}Al_3(BO_3)_4, GdAl_3(BO_3)_4, Gd_{0.2}Y_{0.8}Al_3(BO_3)_4, TbAl_3(BO_3)_4, ErAl_3(BO_3)_4$ и $HoAl_3(BO_3)_4$ в интервале температур 293-1123 К;

на основе связи $\chi^{-1}(T)$, вычисление основных парамагнитных характеристик изучаемых образцов: парамагнитная температура Кюри (θ_p), константа Кюри-Вейсса (С), магнитный момент, приходящийся на их химическую формулу $\mu_{фор.}$ и эффективный магнитный момент $\mu_{эфф.}$;

анализ применимости современных моделей и теорий магнетизма к описанию полученных экспериментальных результатов и формулировка соответствующих выводов.

Объектом исследования являются бораты редкоземельных и переходных металлов $\{GdFe_3(BO_3)_4, ErFe_3(BO_3)_4, DyFe_3(BO_3)_4, YFe_3(BO_3)_4, NdFe_3(BO_3)_4, NdAl_3(BO_3)_4, Nd_{0.65}Y_{0.35}Al_3(BO_3)_4, GdAl_3(BO_3)_4, Gd_{0.2}Y_{0.8}Al_3(BO_3)_4, TbAl_3(BO_3)_4, ErAl_3(BO_3)_4 \text{ и } HoAl_3(BO_3)_4\}$

Предметом исследования является возникающий полиморфный (структурный) фазовый переход в редкоземельных ферро- и алюминоборатах под воздействием температуры и внешнего магнитного поля.

Методы исследования. В качестве основного метода исследования магнитной восприимчивости при высоких температурах боратов редкоземельных и переходных элементов $[GdFe_3(BO_3)_4, ErFe_3(BO_3)_4, DyFe_3(BO_3)_4, YFe_3(BO_3)_4, NdFe_3(BO_3)_4, NdAl_3(BO_3)_4, Nd_{0.65}Y_{0.35}Al_3(BO_3)_4, GdAl_3(BO_3)_4, Gd_{0.2}Y_{0.8}Al_3(BO_3)_4, TbAl_3(BO_3)_4, ErAl_3(BO_3)_4 \text{ и } HoAl_3(BO_3)_4]$ использовался относительный метод Фарадея с применением маятниковых весов.

Научная новизна исследования заключается в следующем:

впервые экспериментально определена температурная зависимость магнитной восприимчивости ферро- и алюминоборатов на основе редкоземельных элементов в парамагнитной области при интервале температур 293-1123 К;

по экспериментальным зависимостям $\chi^{-1}(T)$ изученных боратов определены их основные парамагнитные характеристики: C – постоянная Кюри-Вейсса, θ_p – парамагнитная температура Кюри, μ_ϕ – магнитный момент приходящийся на химическую формулу и путем расчета $\mu_{\text{эфф}}$ – эффективного магнитного момента, приходящийся на один магнитоактивный ион соединения определено обменное взаимодействие магнитоактивных ионов в боратах;

экспериментально обнаружено существование высокотемпературного полиморфного (структурного) перехода при высоких температурах и магнитоэлектрические свойства при низких температурах ферро- и алюминоборатов на основе редкоземельных элементов;

впервые обнаружено изменение доли атомов элементов Nd и Gd с атомами иттрия в $(\text{Nd}_{0.65}\text{Y}_{0.35})$ и $(\text{Gd}_{0.2}\text{Y}_{0.8})$ стехиометрических соотношениях соединений $\text{NdAl}_3(\text{BO}_3)_4$ и $\text{GdAl}_3(\text{BO}_3)_4$ уменьша_т их магнитный момент в каждой полиморфной фазе.

Практическая ценность результатов исследования заключается в том, что в ферро – и алюминоборатах на основе редкоземельных элементов показано с помощью теоретических расчетов зависимость магнитных свойств образцов от (полиморфных) структурных переходов;

показана возможность эффективного управления магнитными свойствами путем изменения внешнего магнитного поля, температуры и относительной доли ионов 3d- и 4f-элементов в составе исследуемых образцы ферро- и алюминоборатов на основе редкоземельных элементов.

Достоверность результатов исследований обеспечивается достоверностью исследованием магнитных свойств изучаемых образцов широким использованием экспериментальных исследовательских методов научного исследования и прибора; хорошим соответствием теоретических и экспериментальных значений полученных результатов в диссертационной работе; подробным анализом ошибок измерений; непротиворечивостью полученных результатов с физическими представлениями и сведениями, существующими в мировой научной литературе.

Научная и практическая значимость результатов исследования. Полученные в диссертационной работе результаты на основе анализа современных теорий магнетизма, вносят определенный вклад в развитие физических представлений и теорий магнетизма редкоземельных ферро- и алюминоборатов. А также, полученные в диссертационной работе результаты, позволяют возможность объяснить магнитные свойства ферро- и алюминоборатов на основе редких земель и переходных металлов в первом приближении.

Практическая ценность полученных результатов непосредственно связана с возможностью эффективного управления физическими свойствами сложных соединений при воздействии внешнего магнитного поля, температуры и изменения относительного вклада ионов 3d-4f элементов. Это в свою очередь дает возможность прогнозировать физические свойства для решения проблемы создания новых магнитных материалов.

Внедрение результатов исследования. На основе полученных в работе результатов при исследовании магнитных свойств кристаллов на основе редкоземельных элементов ферро- и алюмоборатов $\{RM_3(BO_3)_4$ (здесь $R=Dy, Gd, Er, Nd, Y, M=Fe$ или Al) $\}$ кристаллов в парамагнитном состоянии:

результаты измерений температурной зависимости магнитной восприимчивости редкоземельных ферро- и алюмоборатов в парамагнитной области использованы в исследованиях по проектам 12-05-00912 «Новые микроразмерные минералы редкоземельных боратов как прототипы синтетических монокристаллов»; 13-05-90450 «Синтез и исследование механизмов взаимодействия центров люминесценции в кристаллах боратов»; 18-05-01085 «Синтез и изучение структурных и морфологических особенностей редкоземельных боратов как структурных аналогов природных минералов» для анализа полиморфных фазовых переходов. (Московский государственный университет, Россия, справка от 19 апреля 2018 года, №115-18/107-03). Применение этих научных результатов исследований позволяет объяснить кристаллическую и магнитную структуру боратов;

температурная зависимость парамагнитной восприимчивости редкоземельных ферро- и алюмоборатов, а также, парамагнитные свойства алюмоборатов применены при выполнении фундаментального гранта ЁФ-2-1 «Исследование фазовых переходов с учетом ориентационного взаимодействия и магнитооптических свойств в ферритах-гранатах» для анализа зависимости магнитооптических эффектов от температуры ферритов-гранатов (Министерство высшего и среднего специального образования Республики Узбекистана, справка от 10 мая 2018 года, №89-03-1784). Использование научных результатов позволило объяснить задачи моделирования фоточувствительности в слабых ферромагнетиках.

Апробация результатов исследования. Основные результаты диссертационной работы доложены и обсуждены на 4 международных и 9 республиканских научно-практических конференциях.

Публикации результатов исследования. По теме исследования опубликовано 13 научных работ, в том числе 7 тезисов, 6 статей (9 в республиканских и 4 в международных журналах) в научных изданиях, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией Республики Узбекистан для публикации основных научных результатов диссертационных работ.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка использованной литературы. Текст диссертации изложен на 115 страницах.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обоснованы актуальность и востребованность темы диссертации, определена связь исследований с основными приоритетными направлениями развития науки и технологий в республике, приведен обзор международных научных исследований по теме диссертации, степень изученности проблемы, сформулированы цель и задачи, выявлены объект, предмет и методы исследования, изложена научная новизна исследования, обоснована достоверность полученных результатов, раскрыта их теоретическая и практическая значимость, приведены краткие сведения о внедрении результатов и апробации работы, а также об объеме и структуре диссертации.

В первой главе диссертации **«Литературный обзор теоретических и экспериментальных работ по магнитным свойствам редкоземельных ферро- и алюминоборатов»** приводится обзор литературы, посвященной электронной структуре редкоземельных металлов, редкоземельные бораты с двумя магнитными подсистемами, редкоземельные ферробораты замещенных составов с конкурирующим R-Fe обменом, магнитные свойства редкоземельных боратов $RM_3(BO_3)_4$ (где R=Dy, Gd, Er, Nd, Y, Tb, Ho; M=Fe или Al), температурная зависимости магнитной восприимчивости редкоземельных ферро- и алюминоборатов при низких температурах, излагаются основные экспериментальные результаты по изучению парамагнитных свойств редкоземельных ферро- и алюминоборатов. Полученные результаты успешно объясняют с помощью модели трехзарядных положительных ионов РЗМ, основанной на приближении локализованных 4f-электронов и теории парамагнетизма Ван-Флека.

На основе обзора сделанного в первой главе были поставлены следующие цели и задачи:

экспериментальное измерение температурные зависимости магнитной восприимчивости $\chi(T)$ редкоземельных ферроборатов $GdFe_3(BO_3)_4$, $ErFe_3(BO_3)_4$, $DyFe_3(BO_3)_4$, $YFe_3(BO_3)_4$ и $NdFe_3(BO_3)_4$ в интервале температур 293-1223 К;

изучение зависимости $\chi(T)$ редкоземельных алюминоборатов $NdAl_3(BO_3)_4$, $Nd_{0.65}Y_{0.35}Al_3(BO_3)_4$, $GdAl_3(BO_3)_4$, $Gd_{0.2}Y_{0.8}Al_3(BO_3)_4$, $TbAl_3(BO_3)_4$, $ErAl_3(BO_3)_4$ и $HoAl_3(BO_3)_4$ в интервале температур 293-1223 К;

на основе изученных ферро- и алюминоборатов рассчитаны их основные парамагнитные характеристики: парамагнитная температура Кюри (θ_p), константа Кюри-Вейсса (C) и магнитный момент, приходящийся на их химическую формулу $\mu_{фор}$.

анализ применимости современных моделей и теорий магнетизма к описанию полученных экспериментальных результатов.

Во второй главе **«Техника и методика измерение магнитной восприимчивости редкоземельных ферро- и алюминоборатов при высоких температурах»** приводятся методы приготовления образцов и описание

экспериментальной установки. Подробный анализ показал, что суммарная ошибка измерения магнитной восприимчивости на описанной установке не превышала 3%.

Приготовление и структурный анализ редкоземельных ферро- и алюминиборатов $\{\text{GdFe}_3(\text{BO}_3)_4, \text{ErFe}_3(\text{BO}_3)_4, \text{DyFe}_3(\text{BO}_3)_4, \text{YFe}_3(\text{BO}_3)_4, \text{NdFe}_3(\text{BO}_3)_4, \text{NdAl}_3(\text{BO}_3)_4, \text{Nd}_{0.65}\text{Y}_{0.35}\text{Al}_3(\text{BO}_3)_4, \text{GdAl}_3(\text{BO}_3)_4, \text{Gd}_{0.2}\text{Y}_{0.8}\text{Al}_3(\text{BO}_3)_4, \text{TbAl}_3(\text{BO}_3)_4, \text{ErAl}_3(\text{BO}_3)_4 \text{ и } \text{HoAl}_3(\text{BO}_3)_4\}$ выполнены на кафедре кристаллографии и кристаллохимии факультета геологии Московского государственного.

В третьей главе диссертации «**Исследование магнитных свойств редкоземельных ферроборатов при высоких температурах**» приводятся кристаллическая и магнитная структура оксида железа и редкоземельных ферроборатов $\text{RM}_3(\text{BO}_3)_4$, результаты по исследованию магнитной восприимчивости, а также, магнитных характеристик редкоземельных ферроборатов $\text{RFe}_3(\text{BO}_3)_4$ ($\text{R}=\text{Dy}, \text{Gd}, \text{Er}, \text{Nd}, \text{Y}$) в интервале температур 293-1123 К.

Экспериментальные зависимости $\chi^{-1}(T)$ изученных редкоземельных ферроборатов, соответственно представлены на рис.1 а) и б).

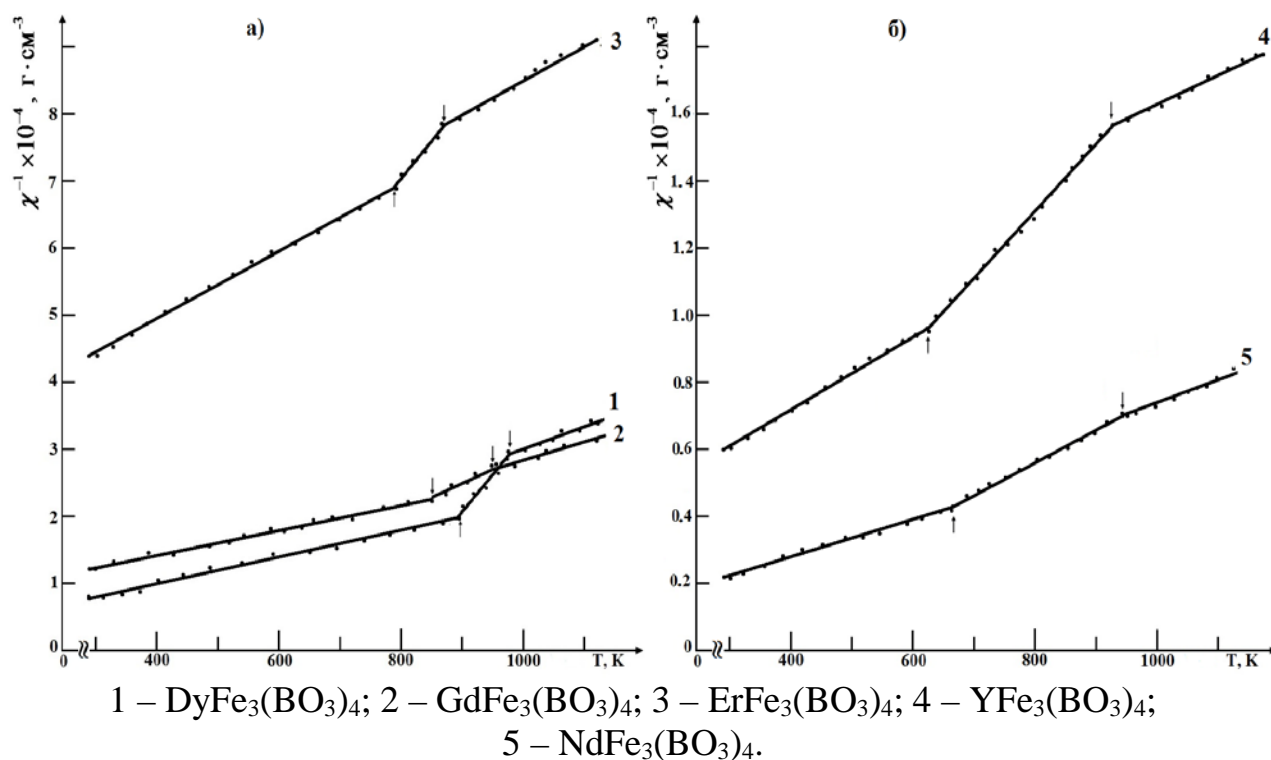


Рис.1. Температурная зависимость обратной магнитной восприимчивости редкоземельных ферроборатов

Все зависимости $\chi^{-1}(T)$ имеют три линейные участки и два излома (рис.1), которые наблюдаются для $\text{GdFe}_3(\text{BO}_3)_4$ при 853 К и 943 К, для $\text{DyFe}_3(\text{BO}_3)_4$ при 903 К и 973 К, для $\text{ErFe}_3(\text{BO}_3)_4$ при 793 и 873 К, для $\text{YFe}_3(\text{BO}_3)_4$ при 623 и 923 К, а для $\text{NdFe}_3(\text{BO}_3)_4$ при 673 К и 943 К. Следует

отметить, что после первого излома наклон зависимости $\chi^{-1}(T)$ увеличивается, а после второго – уменьшается.

Зависимости $\chi^{-1}(T)$ между изломами имеют линейный характер. Линейный характер зависимости $\chi^{-1}(T)$ свидетельствует о том, что зависимости $\chi(T)$ изученных редкоземельных ферроборатов в интервалах температур 293-1123 К, 853-943 К, 943-1123 К, для $\text{GdFe}_3(\text{BO}_3)_4$, 293-903 К, 903-973 К, 973-1123 К для $\text{DyFe}_3(\text{BO}_3)_4$, 293-793 К, 793-873 К, 873-1123 К для $\text{ErFe}_3(\text{BO}_3)_4$, 293-623 К, 623-923 К, 923-1123 К для $\text{YFe}_3(\text{BO}_3)_4$ и 293-673 К, 673-943 К, 943-1123 К для $\text{NdFe}_3(\text{BO}_3)_4$ подчиняются линейному закону Кюри-Вейсса: $\chi = C/(T - \theta_p)$, (где C – постоянная Кюри – Вейсса, θ_p – парамагнитная температура Кюри).

Изломы на зависимости $\chi^{-1}(T)$ изученных редкоземельных ферроборатов можно объяснить следующим образом. При высоких температурах все кристаллы семейства $\text{RFe}_3(\text{BO}_3)_4$ обладают тригональной структурой, имеющей пространственную группу симметрии $R\bar{3}2$. В соединениях с большим ионным радиусом (с $\text{R}=\text{Nd}$) эта структура не изменяется до самых низких температурах², тогда как в соединениях с меньшим ионным радиусом $\text{R}=\text{Gd}$, Dy , Er) происходит структурный фазовый переход, причем его температура T_S растет с уменьшением ионного радиуса: при $\text{R}=\text{Y}$ ($R_{ion}=0.89 \text{ \AA}$) – уже $T_S=445 \text{ K}$ ³. Следствием структурного фазового перехода являются: изменение группы пространственной симметрии $R\bar{3}2 \rightarrow R\bar{3}121$ без изменения кристаллографической группы, потеря некоторых пространственных трансляций, изменение объема элементарной кристаллической ячейки, и формы элементарной ячейки (ромбоэдрическая при $T > T_S$ и гексагональная при $T < T_S$) отражены в работах А. М. Кадомцевой, Y. Hinatsu. Кроме этого А. М. Кадомцева наблюдала структурный фазовый переход в редкоземельных ферроборатах коэффициентом термического расширения.

Изломы зависимости $\chi^{-1}(T)$ в изученных редкоземельных ферроборатах не правдоподобно связывать с магнитными фазовыми переходами. Их можно объяснить только полиморфными (структурными) переходами. Сильные магнитные свойства в изученных боратах обеспечивают входящие в состав 3d- металл (Fe) и 4f - редкоземельные элементы (Gd, Er, Dy и Nd), $(\text{BO}_3)_4$ – радикал, проявляет слабые парамагнитные свойства.

Таким образом, обнаруженные изломы на температурных зависимостях $\chi^{-1}(T)$ в изученных редкоземельных ферроборатах можно объяснить структурными фазовыми переходами в их кристаллических решетках.

Элементарная ячейка кристаллической решетки $\text{RFe}_3(\text{BO}_3)_4$ боратов по структуре одинаковы с кристаллической решеткой $\text{CaMg}_3(\text{CO}_3)_4$ минерала хантита (рис.2). Эта ячейка соответствует тригональной пространственной

² А. М. Кадомцева и др. Письма в ЖЭТФ, 87(45), 2008

³ А. М. Kadomtseva, et all. Low temperature Physics, 36(6):511-521, 2010; Y. Hinatsu, et all. Journal of solid state chemistry, 172:438, 2003

группе $R32 (D_{3/2}^7)$ и состоит из трех химических формул: RO_6 (призма, состоящая из кислорода на вершине грани и R в центре призмы), FeO_6 (октаэдр, состоящая из кислорода на грани вершины и Fe в центре октаэдра) и BO_3 (треугольника, состоящего из кислорода на грани вершины и B в центре треугольника). Трехмерный кристалл образует в пространстве винтообразную цепь, распространенной в одном C_3 размере кристалла, состоящего из слабо связанных октаэдров FeO_6 на вершинах. Исходя из вышеизложенного, с ростом температуры, параметр решетки кристалла FeO_6 октаэдра цепочки проявляет два структурных перехода.

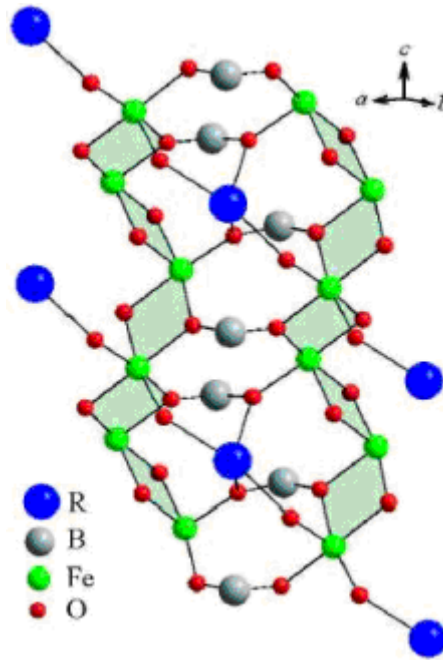


Рис.2. Кристаллическая структура $RFe_3(BO_3)_4$ – ферробората.

Следовательно, изломы зависимости $\chi^{-1}(T)$ редкоземельных ферроборатов указывают на то, что при соответствующих температурах в их кристаллических решетках происходят непосредственные структурные фазовые переходы.

Экспериментальные зависимости $\chi(T)$ изученных редкоземельных ферроборатов можно теоретически описать следующим образом. Их кристаллическую решетку можно разбить на две подрешетки R и Fe.

Обе магнитные подсистемы дают вклад в магнитную восприимчивость ферроборатов:

$$\chi = \chi^R + \chi^{Fe} \quad (1)$$

В парамагнитной области ($T > \theta_p$), где взаимодействием между R и Fe подсистем можно пренебречь, магнитная восприимчивость каждой подсистемы ионов (χ^R и χ^{Fe}) описывается хорошо известной формулой Ван-Флека:

$$\chi = g_J^2 \mu_B^2 \frac{1}{Z} \sum_n e^{-\frac{E_n}{k_B T}} \left(\frac{\langle n | \hat{M}_z | n \rangle^2}{k_B T} + 2 \sum_{m \neq n} \frac{\langle n | \hat{M}_z | m \rangle^2}{E_n - E_m} \right), \quad (2)$$

где через g_J обозначен фактор Ланде; Z – статическая сумма; \hat{M}_z – оператор среднего значения магнитного момента вдоль оси z ; $\langle n | \hat{M}_z | m \rangle^2$ – матричный элемент оператора \hat{M}_z ; $\Delta E = E_n - E_m$ – разность между энергиями возбужденных и основных состояний $4f$ (или $3d$) – электронов; k_B – постоянная Больцмана; μ_B – магнетон Бора; T – абсолютная температура. Первое и второе слагаемые в (2) соответственно отражают ориентационное (температурно – зависимое) и ванфлековское поляризационное (температурно-независимое) слагаемые восприимчивости.

Линейный характер экспериментальных зависимостей $\chi^{-1}(T)$ изученных редкоземельных ферроборатов (рис.1 а) и б)) свидетельствует о том, что для них второе слагаемое в выражении (2) имеет пренебрежимо малое значение.

Учитывая это, для редкоземельных (РЗ) – подсистем (ионов) (случай широких мультиплетов $\Delta E \gg k_B T$) уравнение (2) принимает вид

$$\chi^R = \frac{N_A}{M} \cdot \frac{g_J^2 \mu_B^2 J(J+1)}{3k_B T} = \frac{N_A}{M} \cdot \frac{\mu_{\text{эфф}}^2}{3k_B T}, \quad (3)$$

где $\mu_{\text{эфф}} = g_J \sqrt{J(J+1)} \mu_B$ – эффективные числа магнитных моментов, приходящихся на один РЗ ион; N_A – число Авогадро; M – атомная масса РЗМ.

Для температурной зависимости парамагнитной восприимчивости железной подсистемы (ионов) (случай узких мультиплетов $\Delta E \approx k_B T$) уравнение (2) имеет следующий вид (с учетом явления «замораживания» орбитальных моментов $3d$ – электронов):

$$\chi^{Fe} = \frac{N_A}{M} \cdot \frac{g_S^2 \mu_B^2 S(S+1)}{3k_B T} = \frac{N_A}{M} \cdot \frac{\mu_{\text{эфф}}^2}{3k_B T}, \quad (3^*)$$

где $\mu_{\text{эфф}}^2(Fe^{3+}) = g_{Fe^{3+}}^2 S(S+1) \mu_B^2$ – эффективные числа магнитных моментов, приходящихся на ион железа, J – полный механический момент РЗ иона, g_R^{3+} – фактор Ланде. Эффективные числа магнитных моментов ионов R^{3+} и Fe^{3+} можно определить следующим образом: $\mu_{\text{эфф}}^2 = \mu_{\text{эфф}}^2(R^{3+}) + 3\mu_{\text{эфф}}^2(Fe^{3+})$.

Магнитное взаимодействие между ионами R (или Fe) учитывается через параметр θ_p , пропорциональный энергии этого взаимодействия. После этого в формулах (2) и (3) можно осуществить замену T на $T - \theta_p$, если

учитывает взаимодействие и внести $C = \frac{N_A}{A} \frac{\mu_{\text{эфф}}^2}{3k_B}$, в результате чего из них

получается эмпирический закон Кюри-Вейсса:

$$\chi = \frac{C}{T - \theta_p}, \quad (4)$$

Обработкой методом наименьших квадратов экспериментальных зависимостей $\chi^{-1}(T)$ изученных редкоземельных ферроборатов с помощью информационные технологии были определены их основные магнитные характеристики: парамагнитная температура Кюри (θ_p), постоянная Кюри-Вейсса (С), а затем по значению С были рассчитаны магнитные моменты, приходящиеся на их химическую формульную единицу редкоземельных ферроборатов по формуле:

$$\mu_\phi = 2,83\sqrt{CM}\mu_B, \quad (5)$$

где М – молярная масса редкоземельного ферробората. Результаты расчетов парамагнитная температура Кюри, постоянная Кюри-Вейсса, магнитные моменты, приходящиеся R^{3+} и Fe^{3+} ионы образца приведены в таблице 1.

табл.1.

Основные магнитные характеристики редкоземельных ферроборатов

Образцы	Интервал Темпер., К	θ_p , К	С, 10^{-2} см ³ ·К·г ⁻¹	μ_ϕ , μ_B	S		L		J		g		$\mu_{эфф}$, μ_B
					R	Fe	R	Fe	R	Fe	R	Fe	
DyFe ₃ (BO ₃) ₄	293-903	-157	5.16	15.30	5/2	5/2	5	0	15/2	5/2	1.33	2	14,75
	903-973												
	973-1123	707	8.17	19.22									
GdFe ₃ (BO ₃) ₄	293-853	- 897	3.78	13.05	7/2	5/2	0	0	7/2	5/2	2	2	12,95
	853-943												
	943-1123	- 77	8.45	19.46									
ErFe ₃ (BO ₃) ₄	293-793	- 677	2.09	9.78	3/2	5/2	6	0	9/2	5/2	1.14	2	13,69
	793-873												
	873-1123	-737	2.04	9.65									
NdFe ₃ (BO ₃) ₄	293-673	-207	19.23	9.17	3/2	5/2	6	0	15/2	5/2	0.57	2	10,62
	673-943	183	10.99	6.93									
	943-1123	-607	20.71	9.52									
YFe ₃ (BO ₃) ₄	293-623	153	9.3	18.86		5/2		0		5/2		2	
	623-923	-627	4.85	13.82									
	923-1173	-1372	12.92	22.55									

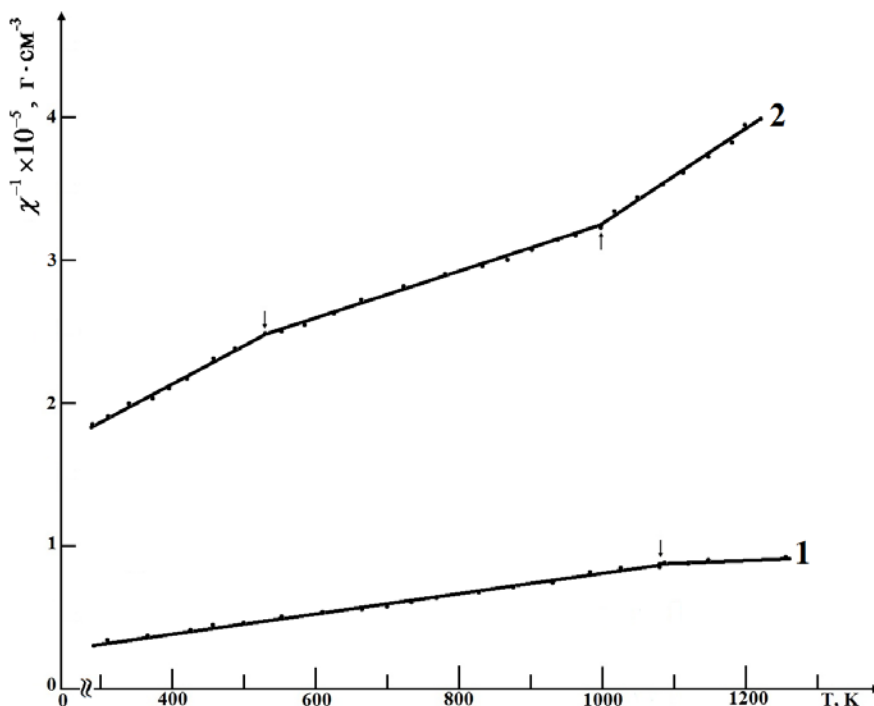
Анализ таблицы показывает, что по значениям θ_p , С и μ_ϕ не наблюдается общей закономерности. Отрицательное значение θ_p свидетельствует о том, что в изученных редкоземельных ферроборатах имеется антиферромагнитное упорядочение.

Согласно экспериментальным данным, магнитный момент атомов РЗМ остается приблизительно постоянным. Это свидетельствует о том, что магнитоактивный атом в изученных редкоземельных ферроборатах находится в квантовом состоянии. Поскольку θ_p является энергетической мерой обменного взаимодействия. Благодаря именно этой причине увеличивается магнитное обменное взаимодействие электронов 4f- и 3d – оболочки ионов РЗМ и железа, ответственные за возникновение магнитного упорядочения изученных редкоземельных ферроборатов.

В четвертой главе диссертации «Исследование магнитных свойств редкоземельных алюминиборатов при высоких температурах» приводятся кристаллическая структура редкоземельных алюминиборатов и результаты исследования магнитной восприимчивости этих образцов, а также теоретические расчеты по определению магнитных характеристик редкоземельных алюминиборатов $RAI_3(BO_3)_4$ ($R=Nd, Gd, Tb, Ho, Er$) и $(Gd_{0.2}Y_{0.8}Al_3(BO_3)_4, Nd_{0.65}Y_{0.35}Al_3(BO_3)_4)$ при интервале температур от комнатной до 1173 К.

Экспериментальные зависимости $\chi^{-1}(T)$ изученных редкоземельных алюминиборатов, соответственно, представлены на рис. 3-5. Из рис 3-5 видно, что на зависимости $\chi^{-1}(T)$ бората $GdAl_3(BO_3)_4$ наблюдается один излом при 1073 К, а у остальных – по два: у $NdAl_3(BO_3)_4$ при 533 и 1003 К, у $TbAl_3(BO_3)_4$ при 643 и 813 К, у $HoAl_3(BO_3)_4$ при 603 и 733 К, у $ErAl_3(BO_3)_4$ при 683 и 813 К, у $Gd_{0.2}Y_{0.8}Al_3(BO_3)_4$ при 523 и 913 К, а у $Nd_{0.65}Y_{0.35}Al_3(BO_3)_4$ при 523 и 873 К.

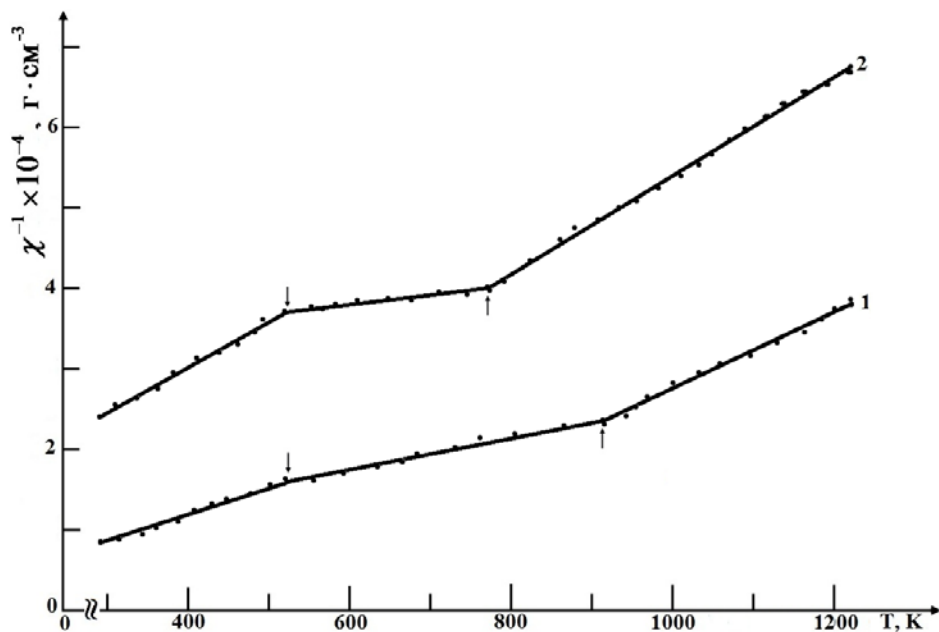
Линейный характер зависимости $\chi^{-1}(T)$ свидетельствует о том, что зависимости изученных редкоземельных алюминиборатов в интервалах температур 293-533 К, 533-1003 К, 1003-1223 К для $NdAl_3(BO_3)_4$, 293-1083 К, 1083-1223 К для $GdAl_3(BO_3)_4$, 293-653 К, 653-823 К, 823-1123 К для $TbAl_3(BO_3)_4$, 293-613 К, 613-743 К, 743-1123 К для $HoAl_3(BO_3)_4$, 293-693 К, 693-843 К, 843-1123 К для $ErAl_3(BO_3)_4$, 293-523 К, 523-913 К, 913-1123 К для $Gd_{0.2}Y_{0.8}ErAl_3(BO_3)_4$ и 293-523 К, 523-873 К, 873-1123 К для $Nd_{0.65}Y_{0.35}ErAl_3(BO_3)_4$ подчиняются линейному закону Кюри-Вейсса: $\chi = C/(T - \theta_p)$, где C – постоянная Кюри-Вейсса, θ_p – парамагнитная температура Кюри.



1– $GdAl_3[BO_3]_4$. 2– $NdAl_3(BO_3)_4$ (истинные значения вычитанием на 0.8).

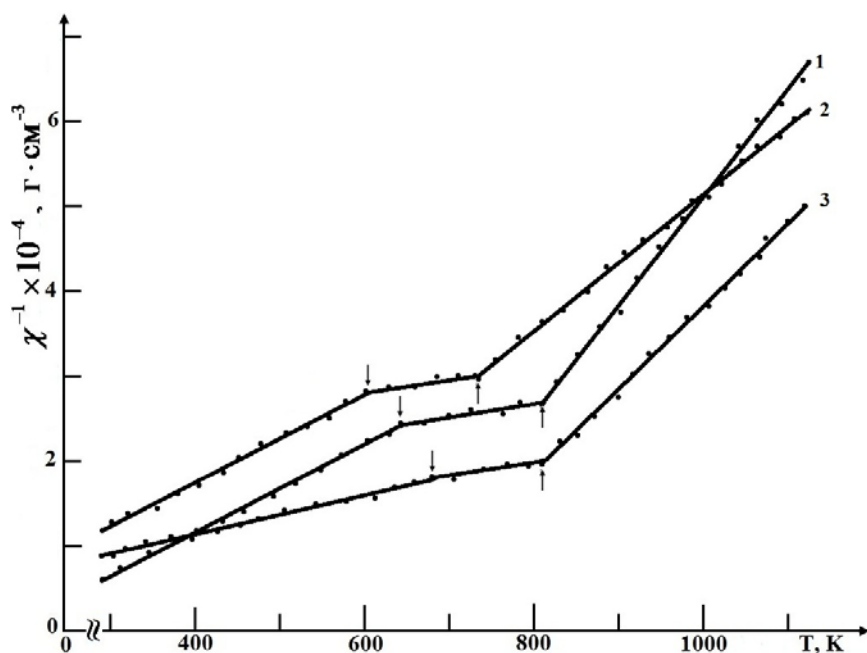
Рис. 3. Температурная зависимость обратной магнитной восприимчивости редкоземельных алюминиборатов.

Изломы на зависимости $\chi^{-1}(T)$ изученных редкоземельных алюминиборатов можно объяснить следующим образом. Известно, что магнитоактивными компонентами в изученных соединениях являются редкоземельные атомы, магнитные свойства которых определяются 4f – электронами. Эти электроны в металлах локализованы в узлах их кристаллической решетки. С другой стороны, магнитоупорядоченные состояния этих металлов ниже 298 К.



1–(Gd_{0.2}Y_{0.8})Al₃[BO₃]₄; 2–(Nd_{0.65}Y_{0.35})Al₃[BO₃]₄.

Рис. 5. Температурная зависимость обратной магнитной восприимчивости редкоземельных алюминиборатов



1– TbAl₃[BO₃]₄; 2– HoAl₃(BO₃)₄; 3– ErAl₃[BO₃]₄.

Рис 4. Температурная зависимость обратной магнитной восприимчивости редкоземельных алюминиборатов.

В этом случае, как и в третьей главе считают, что образцы состоят из двух магнитных систем. Данные две магнитные системы дают вклад в магнитную восприимчивость алюминоборатов:

$$\chi = \chi^R + \chi^{Al} \quad (6)$$

Следует отметить, что для редкоземельных алюминоборатов второе слагаемое в данном выражение равно нулю.

Все проведенные к настоящему времени исследования редкоземельных алюминоборатов показывают, что образцы при низких температурах переходят в антиферромагнитное состояние. Температура Кюри во всех алюминоборатах в частности указывают на ведущую роль обменных взаимодействий в системе $R^{3+}-R^{3+}$.

Обработкой полученных экспериментальных зависимостей $\chi^{-1}(T)$ изученных редкоземельных алюминоборатов были определены их основные магнитные характеристики: θ_p , C , μ_Φ и $\mu_{\Phi op}$. Результаты расчетов приведены в таблице 2.

Табл. 2.

Основные магнитные характеристики алюминоборатов

Образцы	Интервал темпер., °C	θ_p , К	$C \cdot 10^{-4}$, см ³ ·К·г ⁻¹	μ_Φ , μ_B	S	L	J	g _R	$\mu_{эфф}$, μ_B
NdAl ₃ (BO ₃) ₄	293-533	43	27.75	3,25	3/2	6	9/2	0.57	2.83
	533-1003	-1117	92.19	5,80					
	1003-1223	163	36.32	3,70					
Nd _{0.65} Y _{0.35} Al ₃ (BO ₃) ₄	293-523	63	11.74	2.30	3/2	6	9/2	0.57	1.83
	523-873	-2707	85.6	5.55					
	873-1223	313	13.66	2.25					
GdAl ₃ (BO ₃) ₄	293-1083	123	123.6	7.55	7/2	0	7/2	2	7.93
	1083-1253	-907	286.1	10.95					
Gd _{0.2} Y _{0.8} Al ₃ (BO ₃) ₄	293-523	13	32.82	3.40	7/2	0	7/2	2	7.93
	523-913	-627	73.85	4.95					
	913-1223	473	20.89	2.65					
ErAl ₃ (BO ₃) ₄	293 – 683	– 177	508	14	3/2	6	15/ 2	1.14	9.1
	683 – 813	– 83	368.5	12					
	813 – 1123	598	107.6	6.5					
HoAl ₃ (BO ₃) ₄	293 – 603	– 83	200	8.78	2	5	8	1.33	11.28
	603 – 733	– 457	500	13.9					
	733 – 1123	388	120	6.8					
TbAl ₃ (BO ₃) ₄	293 – 643	– 93	275.18	10.2	3	3	6	1.5	9.72
	643 – 813	– 357	432	12.82					
	813 – 1123	613	75.64	5.36					

Анализ таблицы показывает, что по значениям θ_p , C и $\mu_{\Phi op}$ для не наблюдается общей закономерности. Отрицательное значение θ_p при низких температурах указывает на антиферромагнитное упорядочение изученных алюминоборатов.

Из данных таблицы 2 видно, что добавление атомов иттрия в соединения NdAl₃(BO₃)₄ и GdAl₃(BO₃)₄ уменьшает их магнитный момент в каждой фазе.

В то же время абсолютное значение парамагнитной температуры Кюри увеличивается в $\text{NdAl}_3(\text{BO}_3)_4$ и уменьшается в $\text{GdAl}_3(\text{BO}_3)_4$. Это, повидимому, связано с влиянием атомов иттрия на степень локализованности 4f – электронов в узлах подрешетки Nd (или Gd).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе проведённых исследований магнитных свойств боратов редкоземельных и переходных элементов при высоких температурах можно сделать следующие выводы:

1. Впервые измерены температурные зависимости парамагнитной восприимчивости $\chi(T)$ редкоземельных ферро- и алюминоборатов $\text{RM}_3(\text{BO}_3)_4$ (R=Tb, Er, Ho, Nd, Gd; M=Fe, Al) в парамагнитном состоянии в интервале температур 293-1223 К. На зависимости $\chi^{-1}(T)$ изученных боратов обнаружены два излома. Установлено, что зависимости $\chi^{-1}(T)$ между изломами подчиняются закону Кюри-Вейсса.

2. Установлено, что аномальные изменения (изломы) на зависимостях $\chi^{-1}(T)$ изученных образцов происходят из-за структурных (полиморфных) фазовых переходов, происходящих в них при определенных температурах.

3. Экспериментальные зависимости $\chi(T)$ изученных боратов объясняются с помощью теории парамагнетизма Ван-Флека. Обработкой зависимости $\chi^{-1}(T)$ изученных боратов методом наименьших квадратов с помощью ЭВМ рассчитаны парамагнитная температура Кюри (θ_p), константа Кюри-Вейсса (C), магнитный момент, приходящийся на их химическую формулу ($\mu_{\text{фор.}}$) и эффективный магнитный момент ($\mu_{\text{эфф.}}$).

4. Изменение доли атомов элементов Nd и Gd с атомами иттрия в $(\text{Nd}_{0.65}\text{Y}_{0.35})$ и $(\text{Gd}_{0.2}\text{Y}_{0.8})$ стехиометрических соотношениях соединений $\text{NdAl}_3(\text{BO}_3)_4$ и $\text{GdAl}_3(\text{BO}_3)_4$ уменьшает их магнитный момент в каждой фазе; в то же время абсолютное значение парамагнитной температуры Кюри увеличивается в $\text{NdAl}_3(\text{BO}_3)_4$ и уменьшается в $\text{GdAl}_3(\text{BO}_3)_4$. Это, объясняется связью влияния атомов иттрия на степень локализованности 4f – электронов в узлах подрешетки Nd (или Gd).

5. Показана основная роль магнитоактивных ионов (Dy, Nd, Gd, Tb, Ho, Er, Y, Fe) магнитных свойств полиморфных (структурных) переходов ферро- и алюминоборатов, а также при осуществлении их обменных взаимодействий.

**SCIENTIFIC COUNCIL ON AWARD OF THE SCIENTIFIC DEGREE
DOCTOR OF PHILOSOPHY PhD.29.08.2017. FM.02.04
SAMARKAND STATE UNIVERSITY**

SAMARKAND STATE UNIVERSITY

AMONOV BAKHTIYOR UMRZOKOVICH

**MAGNETIC PROPERTIES OF BORATES OF RARE-EARTH AND
TRANSITION ELEMENTS AT HIGH TEMPERATURES**

01.04.09 – Physics of magnet phenomena

**ABSTRACT OF DISSERTATION OF THE DOCTOR OF PHILOSOPHY (PhD) ON
PHYSICAL AND MATHEMATICAL SCIENCES**

Samarkand – 2018

The theme of dissertation of doctor of philosophy (PhD) on physical and mathematical sciences was registered at the Supreme Attestation Commission at the Cabinet of Ministers of the Republic of Uzbekistan under number BM2017.2.PhD/FM73.

Dissertation has been prepared at the Samarkand State University.

The abstract of the dissertation is posted in three languages (uzbek, russian, english (resume)) on the website (www.samdu.uz) and the "Ziyonet" information and educational portal (www.ziyonet.uz).

Scientific supervisor: **Kuvandikov Oblokul Kuvandikovich**
Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor

Official opponents: **Normurodov Murodullo Tagaevich**
Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor
Ramazanov Asror Khamroevich
Candidate of Physical and Mathematical Sciences, docent

Leading organization: **Bukhara state university**

Dissertation defense will be held on «____» _____2018 at _____ at the meeting of Scientific Council number PhD.29.08.2017.FM.02.04 at Samarkand State University. (**Address:** University Boulevard 15, Samarkand, 140104, Uzbekistan, **Ph.:** (99866) 239-13-87, 239-11-40; **fax:** (99866) 239-11-40; **e-mail:** rektor@samdu.uz. cabinet 63, ground floor, the department of Physics, Samarkand State University).

Dissertation is possible to review in Information Resource Centre at Samarkand State University (is registered №____) (**Address:** University Boulevard 15, Samarkand, 140104, Uzbekistan, **Ph.:** (99866) 239-13-87, 239-11-40; **fax:** (99866) 239-11-40).

Abstract of dissertation sent out on «____» _____2018 year
(Mailing report № _____ on «____» _____2018 year)

M.Kh.Ashurov
Chairman of scientific council
on award of scientific degrees,
DSc in physics and mathematics, academician

R.M.Radjabov
Scientific secretary of scientific council
on award of scientific degrees,
CSc in physics and mathematics, docent

D.I.Semenov
Chairman of scientific seminar under scientific
council on award of scientific degrees,
DSc in physics and mathematics

INTRODUCTION (abstract of PhD thesis)

The aim of the scientific research work is to study the magnetic properties of rare-earth ferro- and aluminoborates {GdFe₃(BO₃)₄, ErFe₃(BO₃)₄, DyFe₃(BO₃)₄, YFe₃(BO₃)₄, NdFe₃(BO₃)₄, NdAl₃(BO₃)₄, Nd_{0.65}Y_{0.35}Al₃(BO₃)₄, GdAl₃(BO₃)₄, Gd_{0.2}Y_{0.8}Al₃(BO₃)₄, TbAl₃(BO₃)₄, ErAl₃(BO₃)₄ и HoAl₃(BO₃)₄} at high temperatures (20-900 ° C), and obtaining additional information on the nature of magnetic interactions in these systems.

The objects of the scientific research work

are rare-earth ferro- and aluminoborates {GdFe₃(BO₃)₄, ErFe₃(BO₃)₄, DyFe₃(BO₃)₄, YFe₃(BO₃)₄, NdFe₃(BO₃)₄, NdAl₃(BO₃)₄, Nd_{0.65}Y_{0.35}Al₃(BO₃)₄, GdAl₃(BO₃)₄, Gd_{0.2}Y_{0.8}Al₃(BO₃)₄, TbAl₃(BO₃)₄, ErAl₃(BO₃)₄ и HoAl₃(BO₃)₄}

Scientific novelty of the research work is as follows:

for the first time the temperature dependence of the magnetic susceptibility of ferro- and aluminoborates on the basis of rare-earth elements in the paramagnetic region was determined at the 293-1123 K temperature interval;

in accordance with the experimental dependences of the studied borates the C - paramagnetic Curie-Weiss constant, the θ_p - paramagnetic Curie temperature, the μ_ϕ - magnetic moment attributable to the chemical formula, and by calculating the $\mu_{\rightarrow\phi\phi}$ - effective magnetic moment per one magnetoactive ion of the compound, the exchange interaction of magnetoactive ions is determined;

The existence of a high-temperature polymorphic (structural) transition at high temperatures and magnetoelectric properties at low temperatures of ferro- and aluminoborates based on rare-earth elements have been experimentally discovered;

At the first time the change in the fraction of atoms of the Nd and Gd elements with yttrium atoms in (Nd_{0.65}Y_{0.35}) and (Gd_{0.2}Y_{0.8}), the stoichiometric ratios of the NdAl₃(BO₃)₄ and GdAl₃(BO₃)₄ compounds decrease their magnetic moment in each polymorphic phase.

Implementation of the scientific research results.

On the basis of the results obtained in the study of the magnetic properties of crystals based on rare-earth elements of ferro- and aluminoborates {RM₃(BO₃)₄ (here R = Dy, Gd, Er, Nd, Y, M = Fe or Al)} in the paramagnetic state:

the results of measurements of the temperature dependence of the paramagnetic susceptibility of rare-earth ferro- and aluminoborates were used in studies on projects No. 12-05-00912 “New micro-dimensional minerals of rare-earth borates as prototypes of synthetic monocrystals”; 13-05-90450 “Synthesis and study of the mechanisms of interaction of luminescence centers in borate crystals”; 18-05-01085 “Synthesis and study of structural and morphological features of rare-earth borates as structural analogues of natural minerals” for the analysis of polymorphic phase transitions. (Moscow State University, Russia, certificate of April 19, 2018, No. 115-18/107-03). The application of these scientific research results allows to explain the crystal and magnetic structure of borates;

temperature dependence of the paramagnetic susceptibility of rare-earth ferro- and aluminoborates, and also the paramagnetic properties of aluminoborates were applied in the implementation of the fundamental grant ЁФ-2-1 “Investigation of phase transitions with allowance for the orientational interaction and magneto-optical properties in ferrite garnets” for the analysis of the dependence of magneto-optical effects on the temperature of ferrite-garnets (Ministry of Higher and Secondary Special Education of the Republic of Uzbekistan, certificate of May 10, 2018, No. 89-03-1784). The use of scientific results allows to explain the problems of modeling photosensitivity in weak ferromagnets.

The structure and volume of the dissertation. The dissertation consists of an introduction, four chapters, conclusions, a list of references. The text of the dissertation consists of 115 pages.

ЭЪЛОН ҚИЛИНГАН ИШЛАР РЎЙХАТИ
СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ
LIST OF PUBLISHED WORKS

I бўлим (I часть; I part)

1. Қувондиқов Қ. О., Шақаров Х. О., Шодиев З. М., Амонов Б. У. / Лантаноидли ферроборатларнинг магнит хоссасини юқори ҳароратларда ўрганиш // СамДУ илмий тадқиқотлар ахборотномаси. 2008, №5, 26-28 б. [01.00.00 №2]
2. Қувандиқов О. К., Шақаров Х. О., Леоньук Н. И., Шодиев З. М., Нуримов У. Э., Амонов Б. У., Сулаймонов О. А. /Магнитные свойства редкоземельных ферро- и алюминоборатов $RFe_3(BO_3)_4$ ($M=Fe, Al$; $R=Y, Gd, Dy$). // Журнал. Известия ВУЗов. Физика. Россия (г.Томск): 2013 г., №12, С.70-74. [01.00.00 №2]
3. Kuvandikov O. K., Leonyuk N. I., Shakarov H. O., Shodiyev Z. M., Amonov B. U., Nurimov U. E., Sulaimonov O. A. / Magnetic properties of rare-earth ferro- and aluminoborates $RM_3(BO_3)_4$ ($M=Fe$ or Al and $R=Y, Gd, Er$, or Dy). // Russian Physics Journal, 2014, Vol.56, Issue 12, -P.1398-1402. [№11, Springer, IF=0.667]
4. Қувандиқов О. К., Шақаров Х. О., Леоньук Н. И., Шодиев З. М., Амонов Б. У. / Магнитные свойства редкоземельных ферроборатов $RFe_3(BO_3)_4$ ($R=Gd, Er, Dy$) при высоких температурах. // Журнал. Узбекский физический журнал. Ташкент: 2013 г., №3-4. - С.192-196. [01.00.00, №5]
5. Қувандиқов О. К., Шақаров Х. О., Ражабов Р. М., Шодиев З. М., Амонов Б. У. / Магнитные свойства редкоземельных ферроборатов $RFe_3(BO_3)_4$ ($R=Nd, Y$). // Журнал. Научно-технический и производственный журнал, Горный вестник Узбекистана. Навои: 2016 г., №66, июл-сентябр, -С.88-90. [01.00.00, №5]
6. Kuvandikov O. K., Leonyuk N. I., Shakarov Kh. O., Shodiev Z. M., Amonov B. U. / Magnetic properties of rare-earth aluminoborates $RAI_3(BO_3)_4$ ($R=Tb, Er, Ho$) at high temperatures. // Russian Physics Journal, 2016, Vol.58, Issue, №9, -P.1233-1236. [№11, Springer, IF=0.667]

II бўлим (II часть; II part)

7. Kuvandikov O. K., Leonyuk N. I., Shakarov X. O., Shodiev Z. M., Amonov B. U. /Magnetic properties of rare-earth ferroborates $RFe_3(BO_3)_4$ ($R=Gd, Er, Dy$) at high temperatures // IV Euro-Asian Symposium “Trends in Magnetism”: Nanospintronics. – 2010. 28 June – 2 July. Ekaterinburg. - P.125
8. Қувандиқов О. К., Шақаров Х. О., Леоньук Н. И., Шодиев З. М., Амонов Б. У., Нуримов У. Э., Сулаймонов О. А. / Магнитные свойства редкоземельных ферроборатов $RM_3(BO_3)_4$ ($M=Fe$), ($R=Y, Nd$) при

- высоких температурах. // «Фундаментальные и прикладные – вопросы физики» Труды международной конференции посвященной 70 – летию физика технического института НПО «Физика - сольце». – 2013. 14-15 ноябрь. Ташкент. – С. 162-164.
9. Кувандиков О. К., Шакаров Х. О., Шодиев З. М., Амонов Б. У. / Магнитные свойства мультиферроиков. // В сборнике тезисов докладов республиканской коференции, посвященной 100-летию академика С.А. Азимова ”Фундаментальные и прикладные вопросы физики”. – 2014. 6-7 ноябрь. Ташкент. – с. 89-90.
10. Кувандиков О. К., Шакаров Х. О., Шодиев З. М., Нуримов У. Э., Амонов Б. У./Магнитные свойства соединений боратов на основе редкоземельных металлов при высоких температурах. // “Физика фанининг ривожиди истеъдодли ёшларнинг ўрни” мавзуда академик Р.Б.Бекжонов таваллудининг 85-йиллиги муносабати билан ўтказилган республика илмий-амалий конференцияси. –2015. 24-25 апрель. Тошкент. -С.27-30.
11. Кувандиков О. К., Шакаров Х. О., Шодиев З. М., Амонов Б. У., Ҳайдаров Б. / Магнитные свойства редкоземельных алюиноборатов при высоких температурах. // Тезисы докладов республиканской конференции “Современные проблемы физики конденсированного состояния”. Бухара. 2016. - С.64-65
12. Амонов Б. У., Турсунқулова Г. Қ., Ҳасанов Х. Б. / $YFe_3(BO_3)_4$ ва $NdFe_3(BO_3)_4$ боратларининг юқори температураларда магнит хоссалари. // Ёш олимлар республика илмий-амалий материаллари. Термиз. 2016. 29-30 январь.- 582-584 б.
13. Кувандиков О. К., Шакаров Х. О., Шодиев З. М., Амонов Б. У. / Изучение магнитные свойства редкоземельных ферроборатов $[RFe_3(BO_3)_4$ (R=Gd,Dy)при высоких температурах. // “Замонавий физиканинг долзарб муаммолари”. VII Республика илмий назарий анжуман материаллари. Термиз. 2017. 19-20 май. 61-62 б.

Автореферат СамДУ «Илмий ахборотнома» журнали таҳририятида таҳрирдан ўтказилиб, ўзбек, рус ва инглиз тилларидаги матнлари ўзаро мувофиқлаштирилди.

2008 yil 19-iyun 68-buyruq
2018 yil 5 – oktyabrda noshirlik bo‘limiga qabul qilindi.
2018 yil 8 – oktyabrda original-maketdan bosishga ruxsat etildi.
Bichimi 60x84/1,16. “Times New Roman” garniturasini.
Offset qog‘ozi. Shatrlili bosma tabog‘i 3.
Nashriyot hisob tabo‘i 2.5. Adadi 100 nusxa. 96 - buyurtma.

SamDU bosmaxonasida chop etildi.
140104, Samarqand sh., Universitet xiyoboni, 15.

