

**YADRO FIZIKASI INSTITUTI HUZURIDAGI ILMIY DARAJALAR  
BERUVCHI DSC.02/30.12.2019.FM/T.33.01 RAQAMLI ILMIY KENGASH**

---

**YADRO FIZIKASI INSTITUTI**

**HAYITOV ISMOIL AXATQUL O'G'LI**

**Lu<sub>3</sub>Al<sub>5</sub>O<sub>12</sub>:Pr MONOKRISTALLARIDA O'STIRISH VA RADIATSIYAVIY  
NUQSONLARI NOBARQARORLIGINING REKOMBINATSIYA  
KINETIKASIGA TA'SIRI**

**01.04.07 – Kondensirlangan holat fizikasi**

**fizika-matematika fanlari bo'yicha falsafa doktori (PhD) dissertatsiyasi  
AVTOREFERATI**

**Toshkent – 2025**

**Fizika-matematika fanlari bo‘yicha falsafa doktori (PhD) dissertatsiyasi  
avtoreferati mundarijasi**

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

**Content of the dissertation abstract of the doctor of philosophy (PhD)  
on physical and mathematical sciences**

**Hayitov Ismoil Ahatqul o‘g‘li**

Lu<sub>3</sub>Al<sub>5</sub>O<sub>12</sub>:Pr monokristallarida o‘stirish va radiatsiyaviy nuqsonlar  
nobarqarorligining rekombinatsiya kinetikasiga ta’siri ..... 3

**Хайитов Исмоил Ахаткул угли**

Влияние нестабильности ростовых и радиационных дефектов  
монокристаллов Lu<sub>3</sub>Al<sub>5</sub>O<sub>12</sub>:Pr на кинетику рекомбинации..... 24

**Khayitov Ismoil**

Influence of the instability of growth and radiation defects of Lu<sub>3</sub>Al<sub>5</sub>O<sub>12</sub>:Pr  
single crystals on the recombination kinetics..... 46

**E‘lon qilingan ishlar ro‘yxati**

Список опубликованных работ

List of publications..... 51

**Fizika-matematika fanlari bo'yicha falsafa doktori (PhD) dissertatsiyasi mavzusi O'zbekiston Respublikasi Oliy ta'lim, fan va innovatsiyalar vazirligi huzuridagi Oliy attestatsiya komissiyasida № B2024.2. PhD/FM1116 raqam bilan ro'yxatga olingan.**

Dissertatsiya O'zbekiston Respublikasi Fanlar Akademiyasi Yadro fizikasi institutida bajarilgan.

Dissertatsiya avtoreferati uch tilda (o'zbek, rus, ingliz (rezyume)) Ilmiy kengash veb-sahifasida ([www.inp.uz](http://www.inp.uz)) va "Ziyonet" axborot-ta'lim tarmog'ida ([www.ziyonet.uz](http://www.ziyonet.uz)) joylashtirilgan.

**Ilmiy rahbar:**

**Ibragimova Elvira Memetovna**

fizika-matematika fanlari doktori, professor

**Rasmiy opponentlar:**

**Radjabov Sali Ashirovich**

fizika-matematika fanlari doktori, katta ilmiy xodim

**Boyboboyeva Sohiba Turamirzayevna**

fizika-matematika fanlari bo'yicha falsafa doktori (PhD),  
katta ilmiy xodim

**Yetakchi tashkilot:**

**Mirzo Ulug'bek nomidagi**

**O'zbekiston Milliy Universiteti**

Dissertatsiya himoyasi Yadro fizikasi instituti huzuridagi DSc.02/30.12.2019.FM/T.33.01 raqamli Ilmiy kengashning 2025-yil \_\_\_\_\_ soat \_\_\_\_\_ dagi majlisida bo'lib o'tadi (Manzil: 100214, Toshkent shahri, Ulug'bek qo'rg'oni, Yadro fizikasi instituti. Tel.: (+99871) 289-31-41; faks: (+99871) 289-36-65; e-mail: [info@inp.uz](mailto:info@inp.uz)).

Dissertatsiya bilan Yadro fizikasi institutining Axborot-resurs markazida tanishish mumkin (\_\_\_\_\_ raqami bilan ro'yxatga olingan). Manzil: 100214, Toshkent shahri, Ulug'bek qo'rg'oni, Yadro fizikasi instituti. Tel.: (+99871) 289-31-19.

Dissertatsiya avtoreferati 2025-yil "\_\_\_\_" \_\_\_\_\_ da tarqatildi.  
(2025-yil "\_\_\_\_" \_\_\_\_\_ dagi \_\_\_\_\_ raqamli reyestr bayonnomasi).

**M.Yu.Tashmetov**

Ilmiy darajalar beruvchi Ilmiy kengash  
raisi f.-m.f.d., professor

**O.R.Tojiboyev**

Ilmiy darajalar beruvchi Ilmiy kengash  
ilmiy kotibi, f.-m.f. PhD, katta ilmiy xodim

**S.B.Igamov**

Ilmiy darajalar beruvchi Ilmiy kengash qoshidagi  
ilmiy seminar raisi, f.-m.f.d., katta ilmiy xodim

## KIRISH (falsafa doktori (PhD) dissertatsiyasi annotatsiyasi)

**Dissertatsiya mavzusining dolzarbligi va zarurati.** Hozirgi vaqtda dunyoda ekstremal sharoitlarda, masalan, yadroviy nurlanishning radiatsion maydonlarida barqaror ishlaydigan noorganik lyuminessent materiallarning yangi turlarini izlash ishlari olib borilmoqda. Bu texnikaning rivojlanish darajasiga qo'yiladigan zamonaviy talablar, shu jumladan yadroviy tibbiyot diagnostikasi (pozitron emissiya tomografiyasi (PET), bir fotonli emissiya kompyuter tomografiyasi (OFEKT) va kompyuter tomografiyasi), yangi zarrachalarni aniqlash uchun yuqori energiya fizikasi, shuningdek, tibbiy buyumlar va oziq-ovqat mahsulotlarini sterilizatsiya qilish va atom stansiyalari uskunalarda, ishlatilgan yoqilg'i va radioaktiv chiqindilar omborlarida radiatsiya holatini nazorat qilish uchun termolyuminessent dozimetrlar bilan bog'liq.

Yangi lyuminessent va ssintillyator optik materiallarni maqsadli ishlab chiqish o'stirish va radiatsiyaviy nuqsonlarni tajribalarda o'rganish va ularning optikaviy shaffoflik va lyuminessensiyaning o'zgarishiga ta'sirini o'z ichiga olgan aniq fizik jarayonlarni tushunishga asoslangan. Shu jihatdan, granat murakkab tuzilishli oksid birikmalar sinfiga mansub bo'lgan monokristall alyumin-lyutetsiyli granat  $\text{Lu}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$  (LuAG) hozirgi vaqtda kuchsiz va intensiv ionlovchi nurlarni aniqlash uchun istiqbolli materiallardan biri hisoblanadi. Buning sababi shundaki, LuAG monokristallari yuqori zichlikka ( $6.7 \text{ g/cm}^3$ ) ega va prazeodim  $\text{Pr}^{3+}$  ionlari bilan legirlangan LuAG ssintillyatsiya tezligini ( $\sim 20 \text{ ns}$ ) va yuqori yorug'lik chiqishini ( $\sim 22\ 000 \text{ fot/MeV}$ ) ta'minlaydi, bu yorug'lik chiqishi uch baravar va an'anaviy ishlatilayotgan vismut germanat  $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$  (BGO) monokristallari tezligidan besh baravar yuqoridir.

Mamlakatimiz ilm-fanini rivojlantirish va amaliyotga tatbiq etishda muhim ahamiyatga ega bo'lgan ushbu fundamental tadqiqot va ishlanmalarning yo'nalishlari 2022 - 2026-yillarda O'zbekiston Respublikasini yanada rivojlantirish bo'yicha harakatlar strategiyasida o'z aksini topgan<sup>1</sup>.

O'zbekiston Respublikasi Prezidentining 2022-yil 28-yanvardagi PF-60-sonli "2022-2026-yillarga mo'ljallangan Yangi O'zbekistonni rivojlantirish strategiyasi to'g'risida", 2013-yil 1-martdagi PF-4512-sonli "Muqobil energiya manbalarini yanada rivojlantirish chora-tadbirlari to'g'risida"gi farmonlari, 2019-yil 21-noyabrdagi PQ-4556-sonli "O'zbekiston Respublikasi Fanlar akademiyasi Yadro fizikasi institutining ilmiy-tadqiqot faoliyatini qo'llab-quvvatlash chora-tadbirlari to'g'risida"gi qarori hamda mazkur faoliyatga tegishli boshqa me'yoriy-huquqiy hujjatlarda belgilangan vazifalarni amalga oshirishda ushbu dissertatsiya tadqiqoti muayyan darajada xizmat qiladi.

**Tadqiqotlarning respublika fan va texnologiyalari rivojlanishining ustuvor yo'nalishlariga mosligi.** Dissertatsiya tadqiqoti respublika fan va texnologiyalarni rivojlantirishning II-ustuvor yo'nalishi - «Energetika, energiya tejash va muqobil energiya manbalari»ga muvofiq ravishda bajarilgan.

---

<sup>1</sup> O'zbekiston Respublikasi Prezidentining 2022-yil 28-yanvardagi "2022-2026-yillarga mo'ljallangan yangi O'zbekistonning taraqqiyot strategiyasi to'g'risida"gi PF-60-son Farmoni.

**Muammoning o'rganilganlik darajasi.** Yadroviy tibbiy diagnostika uchun LuAG:Pr monokristallarining ssintillyatsiya va optik xususiyatlarini o'rganish bir qator jahon ilmiy markazlarida, masalan, Yaponiya (A.Yoshikawa, K Kamada), Xitoy (Y. Shen, X. Feng), Belorussiya (M. V. Korjik, A. A. Fedorov), Ukraina (Yu. V. Zorenko, V. I. Gorbenko), Chexiya (M. Nikl, V. Babin, V. V. Laguta), Shveysariya (E. Auffray, P. Lesuq) va boshqa mutaxassislar tomonidan olib borilgan.

Ushbu tadqiqotlar natijasida yadroviy nurlanishlarni qayd qilish uchun yaroqli bo'lgan ssintillyatsiya xarakteristikalarini olingan; optik va lyuminessent xarakteristikalar asosida taqiqlangan zona kengligi aniqlangan, optik yutilish polosalari, aktivator markazining foto-rentgen lyuminessensiyasi aniqlangan.

XX asrning 60-yillaridan boshlab O'zR FAda keng zonali kislorodli kristallar, lazer va optik kristallar, shu jumladan, nominal toza va turli ionlar bilan aktivlashtirilgan nodir yer elementlari ( $TR^{3+}$ ) alyumo-ittriyl granatlar  $Y_3Al_5O_{12}:TR$ , shuningdek, ba'zi  $TR_3Al_5O_{12}$  ( $TR = Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb$ ) larda radiatsiyaviy ta'sir hodisalarini o'rganish bo'yicha ilmiy-tadqiqot ishlari olib borilmoqda. Taqiqlangan zona kengligi va uning hosilaviy xarakteristikalarining  $TR^{3+}$  ion radiusi va kristall panjara zichligiga to'g'ridan to'g'ri bog'liqligi ko'rsatilgan.

YAG kristalida Y ni Lu (YAG ni LuAG) almashtirilishi kristallni yuqori haroratga barqarorlikni, tezligi va energiya ajrata olish qobiliyatining yaxshilangani ko'rsatildi.

Bundan tashqari, hali ham o'z yechimini topmagan muammo mavjud: LuAG:Pr ni qo'llaniluvchi sohalari yadroviy tibbiyot diagnostika vizualizatsiyasi sifatini yomonlashtiradigan va sintillyator radiatsiyaviy barqarorligini pasaytiradigan (yuqori energiya fizikasi), qoldiq lyuminessensiyani bartaraf etish yoki hech bo'lmaganda kamaytirish muammosi saqlanib qolinmoqda. Radiatsiya ta'sirida hosil bo'lgan defektlar mexanizmi va gamma nurlantirishda kuzatilgan yutilish chiziqlari yetarlicha o'rganilmagan; Har xil turdagi nurlanishlar ta'sirida optik xossalarning o'zgarishining doza va energiya bo'yicha bog'liqliklarini tizimli o'rganish talab etiladi. Qo'shimcha istiqbolli yo'nalish bo'lib  $Lu_3Al_5O_{12}:Pr$  ni termolyuminisentsiyali dozimetriya sohasida ishlatish imkonini tekshirish qolmoqda.

**Dissertatsiya tadqiqotning dissertatsiya bajarilgan ilmiy-tadqiqot muassasasining ilmiy-tadqiqot ishlari bilan bog'liqligi.** Dissertatsiya tadqiqoti O'zbekiston Respublikasi Fanlar akademiyasi Yadro fizikasi instituti ilmiy-tadqiqot ishlari rejasi doirasida, OT-F2-09 loyihasi "Ko'p komponentli oksid kristallarining spektral xususiyatlariga optik va ionlashtiruvchi nurlanishlarning ta'sir mexanizmlarining fizik asoslari" (2017–2020) bo'yicha amalga oshirilgan. Shuningdek, Prezidentning 2019-yil 21-noyabrdagi PQ-4526-son qarori bilan tasdiqlangan "Shisha va kristall matritsalarda nanohajmli qo'shimchalarning modifikatsiyasi va radiatsion-induksiyalangan sintezi" mavzusidagi ilmiy-tadqiqot dasturi (2020–2024) doirasida bajarilgan.

**Tadqiqotning maqsadi** granat strukturali  $Lu_3Al_5O_{12}:Pr$  alyumin-lyutetsiyli sintillyator monokristalida Pr ionlarining rekombinatsiyaviy lyuminessensiya jarayoniga o'stirish va radiatsiya bilan hosil qilingan nobarqaror va barqaror nuqsonli ranglanish markazlarining ta'sirini tadqiq qilishdan iborat.

### **Tadqiqotning vazifalari:**

nominal toza va aktivlashtirilgan namunalarda gamma-kvantlar bilan nurlantirilgandan keyin ranglanish va lyuminessensiya markazlarining lokal atom tuzilishini aniqlash va o‘stirish jarayonida hosil bo‘lgan nuqsonlarni ajratish;

( $10^2 \div 10^6$ ) Gr doza oralig‘ida gamma kvantlari bilan nurlantirilgandan so‘ng beqaror markazlarning relaksatsiyasi va barqaror rang markazlarining to‘planishi kinetikasini o‘rganish;

gamma-kvantlar ta’siri jarayonida  $\text{Pr}^{3+}$  ionlarining lyuminessensiya kinetikasini o‘rganish, ssintillyatorning doza chegarasini aniqlash;

tez neytronlar bilan nurlantirilgandan so‘ng rang va lyuminessensiya markazlarining lokal atom tuzilishini aniqlash va radiatsiyaviy nuqsonlarni ajratish;

tez neytronlar bilan hosil qilingan rang markazlarining  $\text{Pr}^{3+}$  lyuminessensiyasiga ta’sirini o‘rganish va ssintillyator uchun tez neytronlarning chegaraviy flyuensini aniqlash;

tez neytronlar bilan nurlantirilgan ssintillyatsion  $\text{Lu}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}:\text{Pr}$  monokristalini yuqori dozali termolyuminessent gamma-dozimetriya sohasida qo‘llash imkonlarini tadqiq qilish.

$\text{Lu}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}:\text{Pr}$  ning optik, lyuminessent va ssintillyator xarakteristikalarini ishlatish sharoiti bo‘yicha tavsiyalar ishlab chiqish.

**Tadqiqotning obyekti** sifatida kristall matritsasi sifatida aktivlashtirilmagan (nominal toza)  $\text{Lu}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$  va sintilyator sifatida maxsus  $\text{Pr}^{3+}$  ionlari bilan aktivlashtirilgan  $\text{Lu}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}:\text{Pr}$  monokristallari olingan.

**Tadqiqotning predmeti** zaryad tashuvchilar va nuqsonlar generatsiyasi, migratsiyasi va lokalizatsiyasining radiatsiya bilan stimullashtirilgan jarayonlari, ularning aktivator  $\text{Pr}^{3+}$  ionlarining lyuminessensiyasi chiqishiga ta’siri hisoblanadi.

**Tadqiqotning usullari:** gamma-kvantlar va tez ( $>0.1$  MeV) neytronlar bilan nurlantirish, optik yutilish, gamma- lyuminessensiya, fotolyuminessensiya va termolyuminessensiya spektrlari (300÷620 K harorat oralig‘ida).

**Tadqiqotning ilmiy yangiligi** quyidagilardan iborat:

nominal toza LuAG va aktivlashtirilgan LuAG:Pr monokristallarida xususiy zaryadlangan anion vakansiyalari  $F^+$  va nazorat qilinmaydigan  $\text{Cr}^{3+}$  kirishma markazlari aniqlangan, ularning kelib chiqishi kristallarni o‘stirish texnologiyasi va aralashmaning kirishma tarkibi bilan bog‘liq. Gamma-nurlanishdan keyin optik spektrlarda ularning yanada aniqroq namoyon bo‘lishi oldindan bo‘lgan kislorod vakansiyalarining zaryadlanishi  $F^+$  va  $\text{Cr}^{3+} \rightarrow \text{Cr}^{4+}$  kirishma ionlarining valent holatining o‘zgarishi bilan bog‘liq ekanligi ko‘rsatilgan;

LuAG:Pr 310 K haroratda  $10^3$  Gr dozada gamma-nurlantirishidan so‘ng va xona haroratida ushlab turish vaqtining 24 soatgacha ortishi bilan 340 K haroratdagi termolyuminessensiya pikining va xususiy  $F^+$  va kirishma  $\text{Cr}^{4+}$  rang markazlari o‘rtasida korrelyatsion beqarorlik, zaryad tashuvchilarning kichik sathlardan ozod bo‘lish mexanizmlari (310 K haroratda termik faollashuv), ularning migratsiyasi va rekombinatsiyaviy lyuminessensiyasi bilan bog‘liqligi aniqlangan. Bu tuzoqlarni tez ssintillyatsiyalardan keyin uzoq vaqtli qoldiq lyuminessensiyani paydo bo‘lishiga sababchi bo‘lishi ko‘rsatilgan;

gamma-kvantlar ta'sir qilish vaqtining  $1.4 \cdot 10^3$  Gr dozagacha oshishi bilan aktivator lyuminessensiyasining chiqish intensivligining  $\sim 9\%$  ga kamayishi LuAG:Pr kristall panjarasidagi xususiy ( $F$  va  $F^+$ ) va kirishma ( $Cr^{4+}$ ) nuqson markazlari bilan bog'liqligi va ularning zaryad tashuvchilarni qamrab olishda aktivator  $Pr^{4+}$  markazlariga raqobat bo'lish mexanizmi ko'rsatilgan;

tez neytronlar bilan  $>10^{15} \text{ cm}^{-2}$  flyuyensgacha nurlantirilgandan so'ng aktivator  $Pr^{3+}$  - markazning gamma- lyuminessensiya (GL) polosalar intensivligining pasayishi ushbu  $V_O(C_{dop})/F_2^+$ -markazlarning yutilish polosasida termik yoki foto rangsizlanishi - bir tomondan, neytronlar flyuyensining oshishi bilan miqdori ortib boradigan (300÷400) nm spektral sohada ranglanish (elektron  $F^+$  va teshikli  $O_i^-$ ) markazlari tomonidan aktivator lyuminessensiyasining reabsorbsiyasi; - boshqa tomondan, neytron bilan hosil qilingan  $V_O(C_{dop})/F_2^+$  -markazdan elektronlarning kovakli  $Pr^{4+}$  markazlariga o'tishi lyuminessensiya chiqarib  $Pr^{3+}$  ioniga o'tishi mexanizmlari bilan izohlangan;

ssintillyatsion xarakteristikalar (LuAG:Pr da 20 ns tez fluoressensiya) uchun mas'ul bo'lgan markazlarning rekombinatsiya juftlari faqat reaktorning radiatsiyasida hosil bo'lgan nuqsonlarning elektron tuzilishini qayta shakillantirishi orqali 440 K haroratdagi termolyuminessensiya pikining sekin fosforessensiyasi uchun ma'sul bo'lgan boshqa termolyuminessent rekombinatsiya juftlariga aylanishi ko'rsatilgan.

**Tadqiqotning amaliy natijalari** quyidagilardan iborat:

xona haroratida gamma ta'sirida hosil qilingan ranglanish markazlarining va 340 K haroratdagi termolyuminessensiya pikining nobarqarorligi tibbiy tasvirlash qurilmalarida yani PET, YaFEKT va kompyuter tomografiyalari uchun keraksiz qoldiq lyuminessensiyani paydo bo'lishiga sababchi bo'lishi mumkinligi ko'rsatilgan;

aktivlashtirilgan  $Lu_3Al_5O_{12}:Pr$  ssintillyator kristalini gamma va tez neytronlar bilan nurlantirishning optimal sharoiti aniqlangan, bunda gamma nurlantirish dozasi  $1.4 \cdot 10^3$  Gr bo'lganda aktivator lyuminessensiya intensivligi  $\sim 9\%$  ga kamayadi; tez neytronlar ta'siri  $10^{15} \text{ cm}^{-2}$  flyuyensgacha barqaror va  $10^{17} \text{ cm}^{-2}$  flyuyensda  $\sim 70\%$  ga kamayadi;

detektorning ruxsat etilgan resursini ishlatib bo'lingan LuAG:Pr ssintillyator monokristallarini neytronda nurlantirilib va termik ishlov berish yo'li bilan kengaytirilgan (13÷70.4)Gr dozalar oralig'ida  $^{60}Co$  yutilgan gamma-dozaning termolyuminessent dozimetrlarida qo'llash imkoniyati ko'rsatilgan; Olingan tadqiqot natijalari LuAG:Pr kristallarini qo'llash bilan shug'ullanuvchi mutaxassislar tomonidan radiatsiya detektorlari uchun materiallarning radiatsiyaga barqarorligi va radiatsiya sezgirligini maqsadli boshqarish uchun yadro tibbiyoti, yuqori energiya fizikasi va termolyuminessent dozimetrlar sohalari uchun ishlatilishi mumkin.

**Tadqiqot natijalarining ishonchliligi** bir-birini to'ldiruvchi absorbsion, lyuminessent, termo- va foto-rangsizlantiruvchi tadqiqot usullari majmuasidan foydalanilganligi, ko'p statistika va o'lchovlarning yaxshi takrorlanuvchanligi; natijalar va xulosalarning mantiqiyliigi va umumiy fizik tasavvurlarga zid emasligi; ularning fizik qonuniyatlar va modellar bilan taqqoslanishi bilan asoslanadi.

**Tadqiqot natijalarining ilmiy va amaliy ahamiyati.** Tadqiqot natijalarining ilmiy ahamiyati LuAG:Pr ssintillyatsiya monokristallarida radiatsiya bilan

nurlantirilganda xususiy va kirishmali nuqson rang markazlarini, qoldiq lyuminessensiyaning paydo bo'lish tabiatini hamda ionlashtiruvchi va yadroviy nurlar ta'sirida aktivator lyuminessensiyasining kamayishi fizik mexanizmlarini aniqlash ssintillyatsion materiallarga radiatsiyaning ta'siri haqidagi tasavvurlarni kengaytiradi.

Tadqiqot natijalarining amaliy ahamiyati o'z ichiga tibbiyot diagnostikasida (PET va YaFEKT) ishlatiluvchi sintilyatorlarni radiatsiyaga chidamliligini oshirish uchun o'ranatilgan qonuniyatlarni ishlatish imkoniyati va ularni barqaror ishlovchi dozaviy chegarasini baholashlarni oladi. LuAG:Pr sintilyator sifatida ishlatilib bo'lingan kristallarni radiatsion texnologik uslubda termolyuminisensiyon dozimetriyada  $^{60}\text{Co}$   $\gamma$ -dozasida ishlatish taklif etildi. Natijalar yadroviy tibbiyot va yuqori energiyalar fizikasi sohasida nurlanish detektor materiallarini optimallashtirish va ularni ishlab chiqishda foydalanilishi mumkin.

**Tadqiqot natijalarining joriy qilinishi.** Radiatsiya ta'sirida hosil bo'ladigan rang markazlari va ularning rekombinatsiya jarayonida aktivator nurlanishi chiqishiga ta'sirini o'rganish asosida quyidagilar aniqlangan:

nominal toza LuAG va maxsus aktivlashtirilgan LuAG:Pr monokristallarida ichki zaryadlangan anion bo'shliqlari  $\text{F}^+$  va nazorat qilinmagan kiritma aralashma  $\text{Cr}^{3+}$  markazlarining kelib chiqishi;

LuAG:Pr kristallari 310 K haroratda  $10^3$  Gr gamma-nurlanishi bilan nurlantirilgandan so'ng 340 K dagi termoyorqinlik piki bilan ichki  $\text{F}^+$  va aralashma  $\text{Cr}^{4+}$  rang markazlari o'rtasidagi korrelyatsion bog'liqlik;

LuAG kristallarini gamma-kvantlar bilan nurlantirish davomiyligi oshirilganda doza  $1,4 \cdot 10^3$  Gr ga yetganda aktivator nurlanishi intensivligining taxminan 9% ga kamayish sababi; tez neytronlar bilan nurlantirishdan so'ng va undan keyingi termik rangsizlanish yoki fotoyoritish jarayonida aktivator  $\text{Pr}^{3+}$  markazining gamma-luminessensiya (GL) chiziqlari intensivligining pasayish mexanizmlari;

LuAG:Pr kristallaridagi 20 ns davomli tez sintillyatsion flyuoresansiyani sekin fosforessensiyaga mas'ul bo'lgan termolyuminestsent rekombinatsion juftlarga aylantirish usuli Buxoro davlat tibbiyot instituti "Biotibbiyot muhandisligi, biofizika va informatika" kafedrasi tomonidan bakalavriatning "Biotibbiyot muhandisligi" va "Tibbiy biologiya" yo'nalishlari bo'yicha o'quv jarayonida ("Tibbiy elektronika" darsligi, S.X. Umarov – Buxoro: Durdon, 2024) (Buxoro davlat tibbiyot instituti xati №04/1055, 04.02.2025) hamda xorijiy tadqiqotchilar tomonidan (Physics of the Solid State, Vol.61, №5, pp.735–741, 2019; Vacuum, Vol.197, 110819, 2022; Japan Journal of Applied Physics, Vol.62, 010613, 2023) foydalanilgan. Natijalardan foydalanish talabalarning detektorlar yorug'lik chiqishining kamayish sabablari, o'sish jarayonidagi nuqsonlar tufayli vizualizatsiya yomonlashuvi, shuningdek sintillyatsion detektorlarni tibbiy buyumlarni to'liq sterilizatsiya qilish uchun mo'ljallangan termolyuminestsent gamma-dozimetrlarga aylantirish tamoyillari bo'yicha tasavvurlarini kengaytirishga imkon bergan. Bundan tashqari, u LuAG:Pr kristallarida optik to'lqin o'tkazuvchi tuzilmalar shakllanishini tushuntirib beradi, bu esa ularning ixcham va yuqori samarali lazerlar, kuchaytirgichlar hamda

termoyadroviy plazmadagi yadro nurlanishi detektorlari yaratishdagi qo'llanilish imkoniyatlarini ochib beradi.

**Tadqiqot natijalarining aprobatsiyasi.** Dissertatsiya ishining asosiy natijalari 5 ta xalqaro va respublika ilmiy-amaliy anjumanlarida ma'ruza qilingan.

**Tadqiqot natijalarining e'lon qilinganligi.** Dissertatsiya mavzusi bo'yicha jami 9 ta ilmiy ish chop etilgan, shulardan O'zbekiston Respublikasi Oliy attestatsiya komissiyasining falsafa doktori (PhD) dissertatsiyalari asosiy ilmiy natijalarini chop etishga tavsiya etilgan ilmiy nashrlarda 4 ta maqola, jumladan, 3 tasi xorijiy va 1 tasi respublika jurnallarida nashr etilgan.

**Dissertatsiyaning tuzilishi va hajmi.** Dissertatsiya tarkibi kirish, beshta bob, xulosa va foydalanilgan adabiyotlar ro'yxatidan iborat. Dissertatsiyaning hajmi 105 betni tashkil etadi.

## DISSERTATSIYANING ASOSIY MAZMUNI

Dissertatsiyaning asosiy mazmuni kirish qismida o'tkazilgan tadqiqotlarning dolzarbligi va zarurati asoslangan, tadqiqotning maqsadi va vazifalari, obyekt va predmetlari tavsiflangan, respublika fan va texnologiyalari rivojlanishining ustuvor yo'nalishlariga mosligi ko'rsatilgan, tadqiqotning ilmiy yangiligi va amaliy natijalari bayon qilingan, olingan natijalarning ilmiy va amaliy ahamiyati ochib berilgan, tadqiqot natijalarini amaliyotga joriy qilish, nashr etilgan ishlar va dissertatsiya tuzilishi bo'yicha ma'lumotlar keltirilgan.

Dissertatsiyaning **"Radiatsiya ta'sirida alyumin-lyutetsiyli granatning strukturaviy, ssintillyatsion va absorbsion xususiyatlari"** deb nomlangan birinchi bobida strukturaviy, fizik va ssintillyatsion xususiyatlari bo'yicha adabiyot ma'lumotlari tahlil qilingan. Alyumin-lyutetsli granat monokristali va boshqa oksid monokristallari o'rtasida ssintillyatsiya va optik xususiyatlarning qiyosiy tahlili o'tkazilgan. Shuningdek, turli xil nurlanishlarning alyumin-lyutetsli granat monokristalining optik xususiyatlariga ta'siri bo'yicha tahlillar o'tkazilgan. Hal etilmagan muammolar aniqlandi, ular asosida ushbu ishning maqsadi va vazifalari shakllantirilgan.

Dissertatsiyaning **"Tadqiqot obyektlari<sup>2</sup> va eksperimental usullari"** deb nomlangan ikkinchi bobida tadqiqot obyektlarini tanlash, aktivator prazeodim (Pr) ionining 0.22 mol % miqdori, shuningdek, LuAG:Pr ssintillyator kristallarini olish usuli asoslangan. Radiatsiyaning optik xususiyatlariga ta'sirini o'rganish uchun kristallar <sup>60</sup>Co manbainig 1.17 va 1.33 MeV energiyali gamma-kvantlari bilan 310 K haroratida ikkita 0.80 va 1.1 Gr/s quvvatlarda katta  $10^2 \div 10^6$  Gr dozalar oralig'ida, kichik 6.4  $\div$  70.4 Gr dozalar bo'lganda esa mos ravishda 0.064 Gr/s kichik quvvatlarda nurlantirildi. O'zR FA YAFIda quvvati 10 MVt bo'lgan VVR-SM reaktorida aralash neytron-gamma oqimlari bilan nurlantirish uchun namunalar alyuminiy folgaga o'raldi va devorlarining qalinligi 1 mm bo'lgan kadmiy stakanga joylashtirildi. Kadmiy stakani < 0.1 MeV energiyali issiq va rezonans neytronlarini yutib qoladi va

---

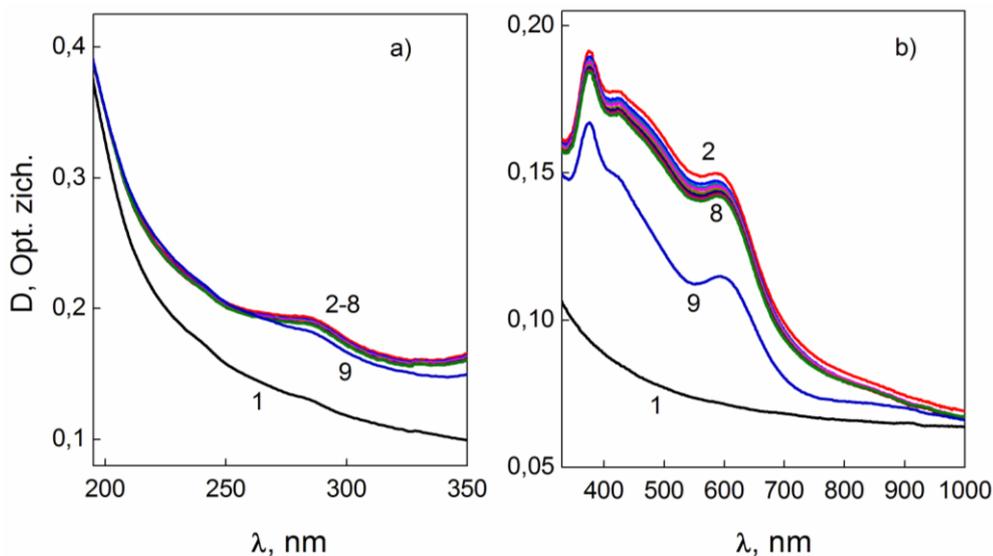
<sup>2</sup> Namunalar Scintillation Materials Research Center, Department of Materials Science and Engineering, University of Tennessee, Knoxville, USA (A.F.Rakov va K.Kamada) hamkasblari tomonidan taqdim etilgan.

faqat  $3 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-2}$  sek (gamma-komponent 37 Gr/s) oqim bilan  $> 0.1 \text{ MeV}$  energiyali tez neytronlarni o'tkazadi. Namunalar solingan to'rtta konteyner  $10^{15}$ ,  $10^{16}$ ,  $5 \cdot 10^{16}$  va  $10^{17} \text{ cm}^{-2}$  tez neytronlar flyuyenslari bilan nurlantirildi. Vazifalarni bajarish va tadqiqot maqsadiga erishish uchun zarur bo'lgan gamma-dozalari va tez neytronlarning flyuyenslari, shuningdek, eksperimental optik usullarni tanlash asoslangan.

Optik spektral asboblari: optik yutilish, foto va gamma lyuminessensiya spektrlarining xatoligi 1-3% dan oshmaydi. Namunalar bo'yicha statistika - 5%.

Dissertatsiyaning **“Aktivlashtirilmagan va aktivlashtirilgan  $\text{Lu}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}:\text{Pr}$  kristallarining gamma-kvantlar bilan nurlantirishdan oldin va keyingi optikaviy spektral xarakteristikalari”** deb nomlangan uchinchi bobida nominal toza (NT) va prazeodim (Pr) aralashmasi bilan LuAG da  $^{60}\text{Co}$   $\gamma$ -kvantlar bilan nurlantirishdan oldin va keyin monokristallarning optik xarakteristikalari bo'yicha tajriba tadqiqot natijalari keltirilgan.

Nurlantirilmagan NT LuAG namunalarining optik yutilish (OYu) spektrlarida 240 va 285 nm atrofida juda zaif yutilish polosalari kuzatiladi (1a-rasm, 1-egri chiziq).  $10^3 \text{ Gr}$  dozada  $^{60}\text{Co}$  gamma-nurlantirishdan so'ng, 240 nm OYu polosasidan tashqari, 285 nm polosada optik zichlikning oshishi kuzatiladi, bu rang markazlar miqdorining oshishini ko'rsatadi (1-rasm, a, 2-egri chiziq). Spektrning ko'rinadigan sohasida OYu 375, 467 va 600 nm polosalar paydo bo'ladi (1b-rasm, 2-egri chiziq).

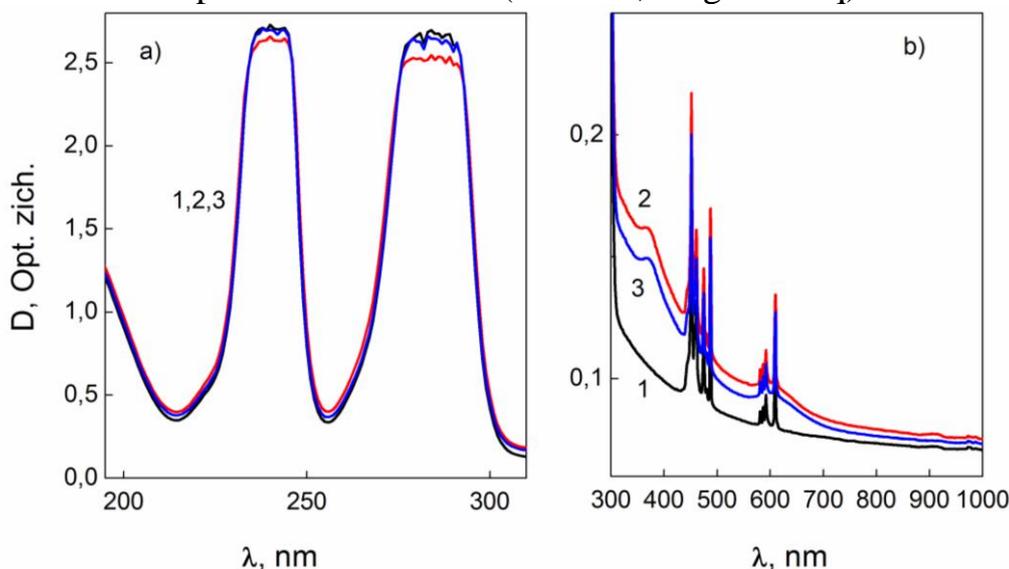


**1-rasm. LuAG kristallarining (qalinligi -1 mm) UB (a) va ko'rinadigan sohada (b) yutilish spektrlari: dastlabki (1), 305 K da  $10^3 \text{ Gr}$  doza bilan nurlantirilgandan so'ng 3 daqiqadan keyin o'lchangan (2); keyin har 10 daqiqada (3-7), so'ngra 20 daqiqa (8) va 24 soatdan keyin (9).**

NT namunalardan farqli o'laroq, LuAG:Pr aktivatori ishtirokida OYu spektrida ma'lum  $\text{Pr}^{3+}$  ionining 240 va 285 nm ( $4f \rightarrow 5d$ ) yutilish polosalari va ( $4f \rightarrow 4f$ ) o'tishlari bilan bog'liq (450÷500) nm va (580÷620) nm atrofida multiplet yutilish chiziqlari kuzatiladi (2a-rasm, 1-egri chiziq).  $10^3 \text{ Gr}$  dozada  $\gamma$ -nurlantirishdan so'ng,  $\text{Pr}^{3+}$

aktivatorining ( $4f \rightarrow 5d$ ) o'tishlari bilan bog'liq 240 va 285 nm polosalar intensivligining aniqroq o'zgarish kuzatilmadi (2a-rasm, 2-egri chiziq).

Spektrning ko'rinadigan sohasida  $\text{Pr}^{3+}$  ning 500 va 600 nm atrofidagi multiplet yutilish chiziqlaridan tashqari, LuAG NT namunasidagi (1-rasm, b, 2-egri chiziq) kabi 375 va 600 nm li polosalar kuzatiladi (2b-rasm, 2-egri chiziq).

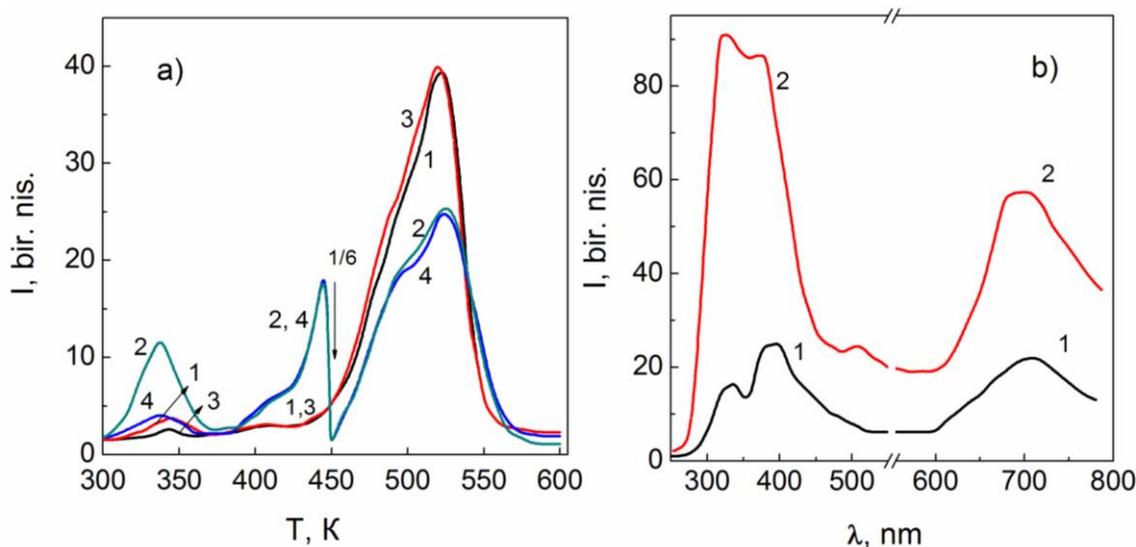


**2-rasm. LuAG:Pr kristallarining (qalinligi -1 mm) UB (a) va ko'rinadigan sohada (b) yutilish spektrlari: dastlabki (1),  $10^3$  Gr doza bilan nurlantirishdan 3 daqiqa o'tgach (2) va 24 soatdan keyin o'lchangan (3)**

Ushbu ma'lumotlar shuni ko'rsatadiki, ikkala namunada ham  $\text{Pr}^{3+}$  aktivatorning mavjudligidan qat'i nazar, kristallarni inert muhitda o'stirish jarayonida hosil bo'ladigan xususiy yoki krishma nuqsonlar mavjud.  $10^3$  Gr dozadan so'ng LuAG da OYu 285, 375, 467 va 600 nm polosalari (1a, b-rasm, 2-egri chiziq) va LuAG:Pr da 375, 470 va 600 nm polosalari (2b-rasm, 2-egri chiziq) intensivligining o'sishi, aftidan, xususiy nuqsonlarning zaryadlanishi va kirishmaviy nuqsonlarning elektron holati (valentligi) ning o'zgarishi bilan bog'liq. LuAG va LuAG:Pr monokristallarini o'stirish texnologiyasi jarayonida  $\text{Al}_2\text{O}_3$  xom ashyosini metallardan, masalan, xrom, temir yoki titan aralashmalaridan butunlay tozalash imkoni bulmasligidandur. Bundan tashqari, kristallarni  $2000^\circ\text{C}$  dan boshlab inert muhitda sekin sovutish orqali o'stirishda kristallda termodinamik muvozanatli zaryadlanmagan tugunlarga qarashli anion vakansiyli nuqsonlar hosil bo'lishi muqarrar. Kichik  $10^3$  Gr doza bilan nurlantirilganda, hatto NT LuAG kristallida ham 240 nm OYu polosasi ega  $F^-$  markazlar (1-rasm, a egri chiziq), 375 nm  $F^+$  -markazlar, shuningdek,  $\text{Cr}^{4+}$  - krishma markazi bilan bog'liq 285, 467 va 600 nm polosalarning namoyon bo'lishini shu bilan izohlash mumkin (1b-rasm, 2-egri chiziq). Bundan tashqari, olingan natijalar NT va aktivlashtirilgan LuAG:Pr kristallarida 700 nm atrofida Cr kirishmasi bilan bog'langan ma'lum R lyuminessensiya polosasi kuzatildi, natijalar quyida keltirilgan (4a-rasm, 1 va 2-egri chiziq).

Keyinchalik, LuAG va LuAG:Pr namunalarining  $\gamma$ -nurlantirish  $10^3$  Gr dozasi dan keyin rang markazlarining vaqt bo'yicha relaksatsiya kinetikasi o'rganildi.

Ushlab turish vaqti 70 daqiqagacha oshishi bilan (2-8 egri chiziqlar) 240 nm polosa intensivligi 24 soatdan keyin ham o'zgarmadi (9-egri chiziq), 285 nm polosa intensivligi esa 24 soatdan keyin biroz kamayadi (1a-rasm, 9-egri chiziq). Shu bilan birga, spektorning ko'rinadigan sohasida 375 nm OYu polosalari intensivligining 30% ga, 467 va 595 nm polosalari intensivligining 45% ga kamayishini kuzatamiz (1-rasm, b, 3-8, 9-egri chiziqlar). Xuddi shunday relaksatsiya kinetikasi OYu 375 va 595 nm polosalari uchun aktivlashtirilgan LuAG:Pr namunalarida ham kuzatiladi (3.2-rasm, b, 3-egri chiziq). Bunda  $Pr^{3+}$  ioniga tegishli 240 va 285 nm ( $4f \rightarrow 5d$ ) hamda (450÷500) nm (580÷620) nm ( $4f \rightarrow 4f$ ) yutilish polosalarining intensivliklari va strukturasi o'zgarmaydi (2a,b-rasm, 3-egri chiziq). Kuzatilayotgan hodisalar, aftidan, termik faollashtirilgan tutqichlardan ozod bo'lgan zaryad tashuvchilarning lyuminessensiya markazlariga migratsiyasi va keyinchalik rekombinatsiyasi bilan bog'liq. Buni LuAG (1,3-egri chiziqlar) va LuAG:Pr (2,4-egri chiziqlar) namunalarini  $10^3$  Gr gamma-nurlantirishdan keyin 5 daqiqa (1 va 2-egri chiziqlar) va 24 soat (3 va 4-egri chiziqlar) o'tgach o'lchangan 300 dan 650 K gacha bo'lgan harorat oralig'ida termolyuminessensiya (TL) egri chiziqlar natijalari tasdiqlaydi (3a-rasm). Ko'rinib turibdiki, 310 K haroratda  $10^3$  Gr dozada  $\gamma$ -nurlantirishdan keyin 24 soatgacha ushlab turish vaqtining oshishi bilan ikkala namunadagi 340 K TL pikining intensivligi sezilarli darajada kamayadi (3a-rasm, 2 va 4-egri chiziqlar).



**3-rasm. (a) qalinligi -1 mm bo'lgan LuAG (1, 3) va LuAG:Pr (2, 4) kristallarida  $10^3$  Gr doza bilan nurlantirilgandan keyin 5 daqiqa (1, 2) va 24 soat (3, 4) o'tgach o'lchangan termolyuminessensiya piklari; (b) LuAG (1) va LuAG:Pr (2) kristallarining lyuminessensiya spektri**

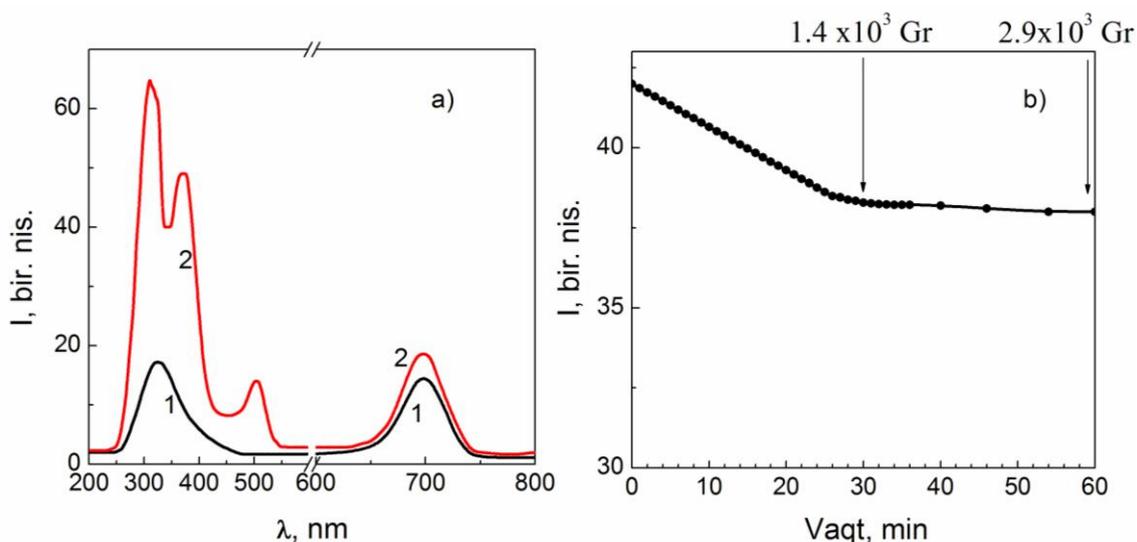
Bu vaqtda, 24 soat davomida 375, 467 va 595 nm OYu polosalari intensivligining pasayishi ham kuzatiladi (1b-rasm va 2b-rasm), bu zaryad tashuvchilarning kichik bulgan qamrash sathlaridan ozod bo'lishi (300 K bilan termik faollashuv), ularning ko'chishi va lyuminessensiya markazlari bilan rekombinatsiya lyuminessensiyasi bilan bog'liq. Shu bilan birga, 24 soat davomida yuqori haroratdagi TL 410, 490÷500 va 530 K piklarining intensivligi deyarli o'zgarmadi

(3a-rasm, 2 va 4-egri chiziqlar), ya'ni ular xona haroratida (305 K) rang markazlarining relaksatsiyasi jarayonida ishtirok etmaydi. 3b-rasmda LuAG (1-egri chiziq) va LuAG:Pr (2-egri chiziq) namunalari (250÷550) va (550÷800) nm spektr sohasida lyuminessensiyaniing spektrol tarkiblari aniqlandi. Bizning fikrimizcha, Lu<sup>3+</sup> ionining kattaligi (0.091 nm) tufayli Al<sup>3+</sup> ioni (0.051 nm) o'rnini egallaganda, qo'shni panjarada joyidan kislorodni siljitadi va oktaedrda kislorod bo'shlig'ini qoldiradi, bunda anti-tugunli nuqson kompleksi hosil bo'ladi (Lu<sub>Al</sub><sup>3+</sup>-V<sub>o</sub> o'rinli) va 335 nm sohasidagi lyuminessensiya uchun javobgardir. NT LuAG kristallarida 395 nm da lyuminessensiya polosasi bizga ma'lum (Babin V., Laguta V. V., *et. al.*, Phys. Stat. Sol. 2011. 239) asosga ko'ra F<sup>+</sup> markazga (anion bo'shligida, bitta elektron qamralgan) tegishli. LuAG:Pr namunasida 310 va 370 nm lyuminessensiya polosalari 5d→4f o'tishlar bilan bog'liq va 520 nm sohada Pr<sup>3+</sup> aktivatorining 4f→4f o'tishlari bilan bog'liq. LuAG kristalida Pr<sup>3+</sup> ioni mavjudligidan qat'iy nazar (3b-rasm, 1 va 2-egri chiziqlar), kuzatilayotgan 700 nm qo'shimcha lyuminessensiy polosa Cr<sup>4+</sup> - kritma markazlari bilan bog'liq.

Shunday qilib, har ikkala LuAG va LuAG:Pr namunalari tegishli OYu 375 nm polosa xususiy F<sup>+</sup> - markaz va 285, 467 va 595 nm da OYular Cr<sup>4+</sup> kirishma markazlariga, paydo bo'lishi o'stirish jarayoni va hom ashyoning tozaligi bilan bog'liq. Ularning 10<sup>3</sup> Gr kichik γ- dozadan keyin aniqroq namoyon bo'lishi xususiy nuqsonlarning zaryadlanishi va kirishma nuqsonlarining elektron holatining (valentligining) o'zgarishi bilan bog'liq. Ko'rinadigan sohadadagi ranglanish markazlarining va 340 K haroratdagi TL piki beqarorligi PET va kompyuter tomografiyasi uchun xona haroratida uzoq muddatli qoldiq lyuminessensiyaniing davomiyligi tibbiy tasvirlashni PET da yomonlashtirishiga olib kelishi mumkin.

Keyinchalik, LuAG:Pr ga 310 K da <sup>60</sup>Co γ- kvantlar ta'siri davomida Pr<sup>3+</sup> ionlarining d→f o'tishlari bilan bog'liq bo'lgan aktivator lyuminessensiya intensivligining o'zgarish kinetikasi o'rganildi.

Daslab Nominal toza kristallarida 310 K da va aktivlashtirilga LuAG:Pr da GL spektrolari qayd etildi (4a-rasm, 1 va 2 egri chiziqlar). Ko'rinib turibdiki, LuAG kristallda 310 K da γ-kvant ta'sirida 335 nm GL polosa kuzatiladi, bu Lu<sub>Al</sub><sup>3+</sup> - anti-tugunli markazga tegishli va 700 nm - Cr<sup>3+</sup> - markaz bilan bog'liq (1-egri chiziq). LuAG:Pr kristalida Cr<sup>3+</sup> -markaz bilan bog'langan 700 nm GL polosidan tashqari Pr<sup>3+</sup> aktivatorining 5d→4f o'tishlar bilan bog'langan 310, 375 nm intensiv GL va Pr<sup>3+</sup> 4f→4f o'tishlari bilan bog'langan 510 nm sohada kuchsizroq GL polosalari kuzatiladi (2-egri chiziq). 4.b-rasmda 2.9·10<sup>3</sup> Gr (60 min) gacha bo'lgan doza oraligida 310 nm Pr<sup>3+</sup> GL maksimum polosasining dozaga bog'liqligi keltirilgan. Pr<sup>3+</sup> va Cr<sup>3+</sup> ionlarida kovakning qamralishi, elektronlarning esa boshqa tuzoqlarga o'tishi 1.4·10<sup>3</sup> Gr dozagacha ~ 9-10% ga sekin chiziqli kamaytiradi yuqori dozalarda to'yinishi esa elektronlar va kovaklar generatsiyasi tezligi Pr<sup>3+</sup> da rekombinatsiyaviy lyuminessensiya o'rtasidagi muvozanat bilan bog'liq.



**4-rasm. a) LuAG (1) va LuAG:Pr (2) kristallarida 310 K da GL spektrlari b)  $\text{Pr}^{3+}$  310 nm polosa maksimumida  $2.9 \cdot 10^3$  Gr (60 min) gacha bo'lgan doza oraliqlarida GLning dozaga bog'liqligi**

Olingan natijalar 238 ( $F$ -markazlar), 375 ( $F^+$ -markazlar), 288 (2), 467 (4) va 601 nm ( $\text{Cr}^{4+}$  ionlari) xarakterli yutilish polosalariga ega bo'lgan rang markazlarining to'planish kinetikasining, 310 nm  $5d \rightarrow 4f$   $\text{Pr}^{3+}$  GL polosa kinetikasining o'zgarishi (4b-rasm)  $\gamma$ -nurlantirish dozasining oshishiga antisimbatik bog'liqligini ko'rsatadi. Shunday qilib, LuAG:Pr, kristallarida 310 nm GL polosa chiqishining 9-10% ga kamayishi  $\text{Pr}^{3+}$  markazlarida rekombinatsiya lyuminessensiyasi bilan zaryad tashuvchilarni tutib qolishda raqobatlashuvchi xususiy ( $F^+$ -markaz) va kirishma ( $\text{Cr}^{4+}$ ) nuqsonlar bilan bog'liq. 340 K da TL piki va 300 K da LuAG:Pr da 375 ( $F^+$ -markazlar) va 601 nm ( $\text{Cr}^{4+}$  ionlari) rang markazlarining aniqlangan korrelyatsiyaviy beqarorligi, ehtimol, PET va kompyuter tomografiyasi uchun muhim bo'lgan tibbiy vizualizatsiyaning buzilishini qoldiq lyuminessensiya keltirib chiqarishi mumkin.

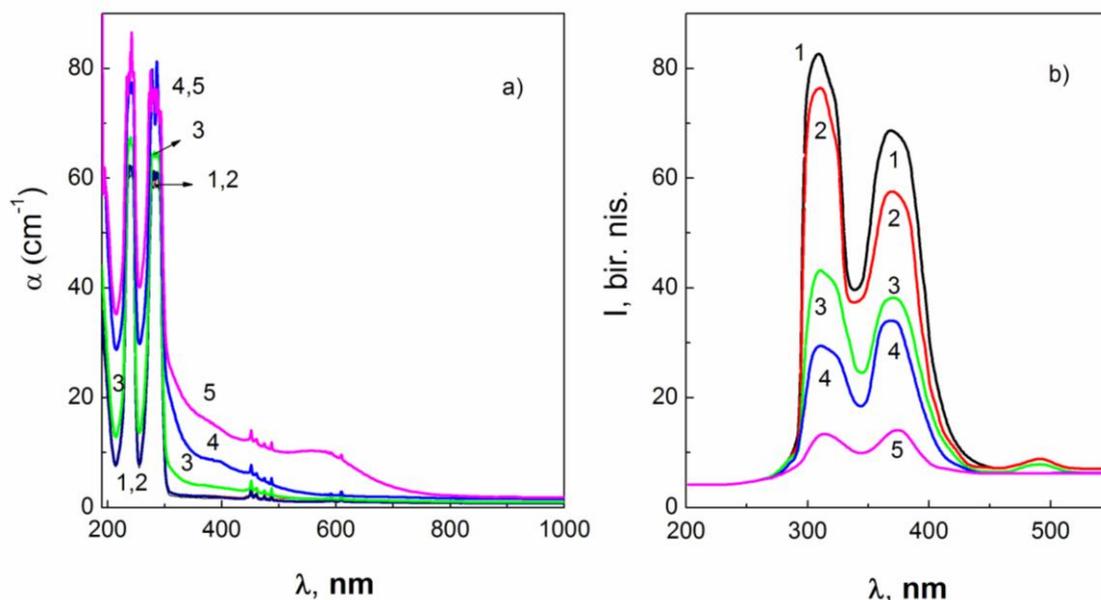
Rang markazlarining to'planishi va aktivator lyuminessensiyasining o'zgarishi kinetikasi (4b-rasm) natijalari shuni ko'rsatdiki, gamma-kvanti ta'sirida yuzaga kelgan ranglanish markazlarining soni ( $10^3 \div 10^6$ ) Gr  $\gamma$ -doza oraliqlarida to'yinishga yetishi radiatsiyadan oldingi (o'strish jarayonida) nuqsonlar bilan bog'liq. Bundan farqli o'laroq, neytron oqimlari panjara atomlari bilan kuchli elastik ta'siri tufayli panjara tugunida atom siljishlarini keltirib chiqarishi mumkin. Bu esa panjara tugunlarida ko'p sonli nuqsonlarini keltirib chiqaradi. Shunday qilib, neytron+gamma (reaktorda) radisiyaning optik shaffoflik va aktivator lyuminessensiyasiga ta'sirini o'rganish yuqori energiyali eksperimental fizikada muhim ahamiyatga ega.

Shu munosabat bilan dissertatsiyaning **“Neytronlar bilan hosil qilingan ranglanish va rekombinatsiya markazlari va ularning nominal toza va aktivlashtirilgan  $\text{Lu}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}:\text{Pr}$  monokristallarida aktivator lyuminessensiyasiga ta'siri”** deb nomlangan to'rtinchi bobida tez neytronlar bilan nurlantirishning  $\text{Lu}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$  va  $\text{Lu}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}:\text{Pr}$  optik xarakteristikalariga ta'sirini o'rganish natijalari keltirilgan.

Tez neytronlarni  $10^{16} \text{ cm}^{-2}$  flyuyens bilan nurlantirilgandan so'ng, LuAG namunalari 250 va 298 nm UB sohada yutilish polosalari va spektrning ko'rinadigan sohasida 350 dan 600 nm gacha bo'lgan kuchsiz keng polosa kuzatildi. Flyuensning  $10^{17} \text{ cm}^{-2}$  gacha ortishi bilan  $10^{16} \text{ cm}^{-2}$  flyuensga nisbatan OYu 250, 298 nm, keng (350÷600) nm polosalarning tezroq o'sishi ranglanish markazlarining hosil bo'lishi va ularning miqdorlarining ortishini ko'rsatdi. Gaussinyaning tarkibiy qismlariga ajratilgandan so'ng, 387, 458 va 573 nm da maksimumlarga ega bo'lgan uchta polosa ajralib chiqdi. Kislorod panjarasi alyuminiy panjarasiga qaraganda ancha zich,  $O$  atomi esa  $Al$  atomiga qaraganda yengil bo'lgani uchun kislorod nuqsonlari ustunlik qiladi. Shunday qilib, OYu ning 250 nm tez neytron ta'sirida hosil bo'lgan  $F^-$  markaz bilan, 298 nm esa  $O_i^-$  kavak markazi bilan, 375 nm esa  $F^+$  markaz bilan izohlanadi. OYu 573 nm polosasi  $Al$  kationini almashtiruvchi aralashma (metall) kation tuguni yonidagi kislorod vakansiyali elektron markaz bilan bog'liq bo'lishi mumkin yoki panjaradagi ko'p miqdordagi  $F$  va  $F^+$  -markazlardan biring diffuziyasi jarayonida ushbu  $F+F^+ \rightarrow F_2^+$  agregatlarini hosil qilishi mumkin (ya'ni uchta elektron qamrab olgan kislorod bivakansiyasi), keyinchalik ularni qulaylik uchun  $V_O (C_{dop})/F_2^+$  deb belgilaymiz. Bu nuqsonlar  $\gamma$ - kvantlar energiyasi yetarli emasligi sababli yuqori  $10^7 \text{ Gr}$  dozagacha nurlantirilganda kuzatilmadi (III bob, 1b-rasmga qarang).

Neytron ta'sirida hosil qilingan nuqsonlar generatsiya kinetikasini va ularning aktivator markazlariga ta'sirini batafsil aniqlash uchun biz LuAG:Pr da tez neytronlar flyuenslari bilan nurlantirmasdan oldin va nurlantirilgandan keyin optik xususiyatlarni taqqoslash uchun NT LuAG ga o'xshash sharoitlarda tadqiqotlar olib borildi.

5a-rasmda aktivatorli LuAG:Pr namunalarining nurlantirishdan oldingi va keyingi OYu spektrlari keltirilgan. Flyuensning  $10^{16}$  dan (3-egri chiziq)  $5 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-2}$  gacha (5-egri chiziq) ortishi bilan  $Pr^{3+}$  tegishli 240 va 285 nm polosalar ortdi. Bu o'sish, aftidan, Nominal toza LuAG da kuzatiladigan 250 va 298 nm OYu polosalari bilan sezilarli darajada qoplanish bilan bog'liq bo'lib, ularning intensivligi neytronlar flyuensining o'shishi yoki aktivator valentligining ya'ni  $Pr^{3+} \rightarrow Pr^{4+}$  o'zgarishi bilan sezilarli darajada oshadi. Spektrning ko'rinadigan sohasida multiplet yutilish chiziqlaridan tashqari, 385, 570 nm polosalari ham kuzatildi (5a-rasm, 3,4 va 5-egri chiziqlar). Ko'rinadigan sohaning spektrlarini Gauss komponentalarini taqqoslash ularning nominal toza LuAG kristalli bilan o'xshashligini ko'rsatdi va aktivator bilan bog'liq bo'lmagan panjaralaridagi  $V_O (C_{dop})/F_2^+$  xususiy nuqsonlarga tegishlilikini tasdiqlaydi.



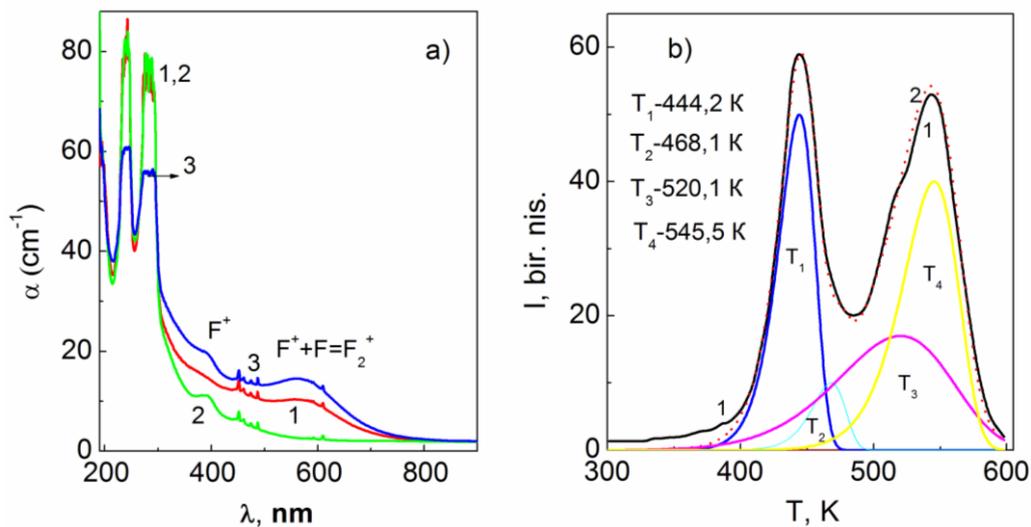
**5-rasm. LuAG:Pr kristallarining  $^{60}\text{Co}$   $\gamma$  -manba (b) bilan indutsirlangan yutilish (a) va lyuminessensiya spektrlari: dastlabki (1),  $10^{15}$  (2),  $10^{16}$  (3),  $5 \cdot 10^{16}$  (4) va  $10^{17} \text{cm}^{-2}$  (5) tez neytronlar flyuyenslari bilan nurlantirilgandan so‘ng**

Nominal toza va LuAG:Pr kristallardan olingan tajriba ma’lumotlaridan shuni ta’kidlash mumkinki, LuAG kristalida  $\text{Pr}^{3+}$  ioni mavjudligidan qat’iy nazar,  $>10^{15} \text{cm}^{-2}$  flyuyensli tez neytronda nurlantirish 387 nm  $F^+$ - va 573 nm  $V_O$  ( $C_{\text{dop}}$ )/ $F_2^+$  markazlarning OYu polosalarini paydo bo‘lishiga olib keladi, ya’ni ular haqiqatan ham kislorodga tegishli xususiy nuqsonlari bilan bog‘liqdir. Bundan kelib chiqadiki, tez neytronlar bilan hosil qilingan bu ranglanish markazlar o‘tkazuvchanlik zonasidan elektronlarni qamrab olishi va  $\text{Pr}^{4+}$ -holatni barqarorlashtirishi mumkin. Ammo bunday holda rekombinatsiya jarayonida aktivator lyuminessensiya intensivligi kamayishi kerak.

Dastlab LuAG:Pr namunasiga 310 K da  $^{60}\text{Co}$   $\gamma$  -kvantlari ta’sir ettirilganda, GL spektrida  $\text{Pr}^{3+}$  aktivatorining 310, 325 va 375 nm lyuminessensiya polosalari kuzatildi (5b-rasm, 1-egri chiziq). Ko‘rinib turibdiki, tez neytronlar  $\geq 10^{16} \text{cm}^{-2}$  flyuenslarida GL ning 310, 325 va 375 nm aktivator lyuminessensiya polosalarining intensivligi kuchli kamayadi (3-5 egri chiziqlar). Bu kristallning asosiga (matritsasiga) yutilgan energiyaning aktivator markaziga uzatilishida buzilishi bilan bog‘liq bo‘lishi mumkin. Ushbu jarayonning kechishini aniqlash uchun bir qator quyidagi tajribalar o‘tkazildi:

OYu spektrlarini o‘lchash (6a-rasm) ketma-ket yani, neytronlar flyuensi  $10^{17} \text{cm}^{-2}$  (1), uni 605 K gacha qizdirish (tutqichdan zaryad tashuvchilarni issiqlik energiyasi bilan bo‘shatilishi) va  $10^3$  Gr dozali  $\gamma$  -nurlantirish (3) (tutqichlarni zaryadlar bilan to‘ldirish) bilan amalga oshirildi. Shu bilan birga,  $10^{17} \text{cm}^{-2}$  flyuyens bilan nurlantirilgan namunani 605 K gacha qizdirilgandan so‘ng va tutqichni to‘ldirish uchun  $10^3$  Gr dozada  $\gamma$ - nurlantirishdan so‘ng, 445, 515 va 545 K da integral TL egri chiziqda nominal toza LuAG TL piklariga mos keladigan piklar kuzatiladi (6b-rasm). Keyinchalik, eksperimental TL egri chizig‘i (6b-rasm, 1-egri chiziq) birinchi tartibli kinetika modelidan [Kitis, G., et.al., Jour. of Phys. 1998. 2636] va GlowFit dasturiy ta’minotidan [Puchalska, M., et.al., Rad. Measur. 2006. 659]

foydalanildi. Shunga asosan, tajriba TL egri chizig'ini tashkil etuvchilarga ajratilgandan so'ng 444.2, 468.1, 520.1 va 545.5 K da piklarning intensivligi va joylashish maksimumi ( $T_m$ ), hamda tutqichlarning chuqurligi (aktivatsiya energiyasi  $E_t$ ) aniqlandi. Tenglamadagi ma'lum  $T_m$  va  $E_t$  qiymatlaridan foydalanib [Kitis, G., et.al., Jour. of Phys.1998. 2636],  $s$  ( $s^{-1}$ ) chastota faktorlar hisoblandi. Bu natijalar shuni ko'rsatadiki, neytron ta'sirida hosil qilingan ranglanish markazlari LuAG:Pr kristalining taqiqlangan zonasida lokal energetik sathlarni hosil qiladi, ularda elektroneytrallik sharoiti uchun zaryad tashuvchilarni qamrab oladi va ularni issiqlik energiyasini uzatishda ozod bo'lishi va LuAG:Pr da ko'chishi  $Pr^{4+}$  aktivatorida rekombinatsiyaviy lyuminessensiyasini olib keladi (6b-rasm, 1-egri chiziq).

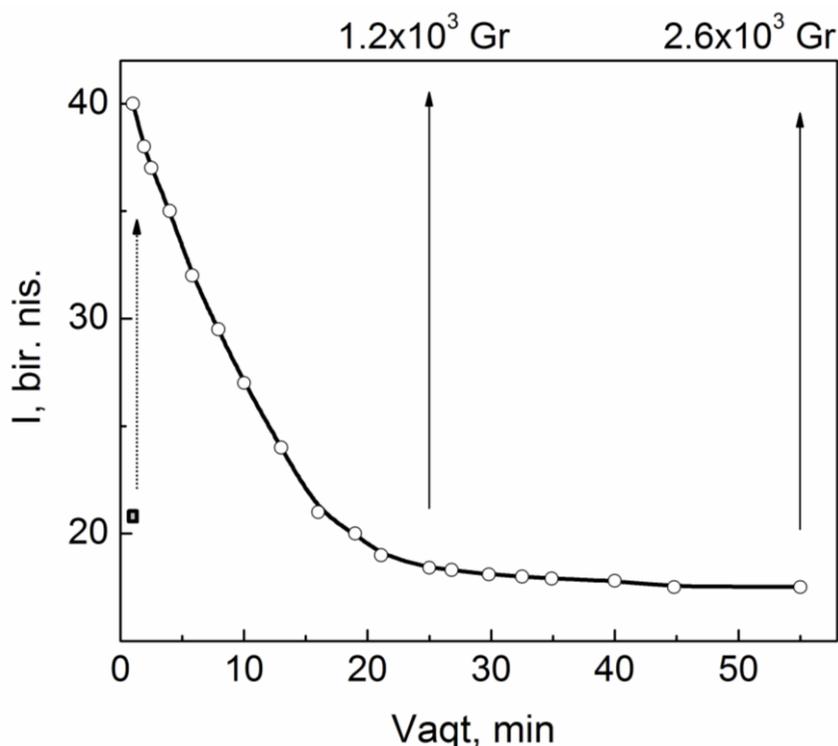


**6-rasm. LuAG:Pr kristallarining yutilish spektrlari (a):  $10^{17} \text{ cm}^{-2}$  neytron flyuyensi (1) uni termik ishlov berish (2) va  $10^3 \text{ Gr}$  dozada  $\gamma$ -nurlantirish (3). LuAG:Pr TL egri chiziqlari (b):  $10^{17} \text{ cm}^{-2}$  neytronlar flyuyensi bilan nurlantirilgan uni termik ishlov berish va  $10^3 \text{ Gr}$  doza bilan gamma nurlantirishdan so'ng (uzluksiz egri chiziq-1), uning T1, T2, T3 va T4 tashkil etuvchilari va ularning yig'indisi (punktir-2)**

Keyinchalik,  $10^{17} \text{ cm}^{-2}$  neytronlar bilan nurlantirilgan va tuzoqlardan zaryad tashuvchilarni issiqlik energiyasi berish bilan bo'shatish uchun termik ishlov berilgan LuAG:Pr namunada erkin elektronlar va kovaklarning  $2.6 \cdot 10^3 \text{ Gr}$  dozasigacha gamma-generatsiyasi jarayonida  $Pr^{3+}$  dagi  $5d \rightarrow 4f$  o'tishlar bilan bog'liq 310 nm dagi polosaning maksimumida gamma-lyuminessensiyasi (GL) o'lchandi.

Olingan natijalar 7-rasmda keltirilgan. 16 daqiqa davomida ( $1.2 \cdot 10^3 \text{ Gr}$  doza olgunga qadar) 310 nm polosa lyuminessensiya intensivligining chiqishi  $\sim 50\%$  gacha tez chiziqli kamayishi kuzatiladi,  $\gamma$  nurlantirish vaqti 55 daqiqagacha uzaytirilganda ( $2.6 \cdot 10^3 \text{ Gr}$  doza olgunga qadar) kinetikasi to'yinish darajasiga chiqadi. Shu bilan birga, 385 nm ( $F$ -markaz) va 570 nm ( $F_2^+$ -markaz) OYu polosalari koeffitsiyentlari ortadi (6a-rasm, 3-egri chiziqqa qarang). Shuni ta'kidlash kerakki, issiqlik energiyasi berilgan namunada 310 nm GL polosasining intensivligi, faqat  $10^{17} \text{ cm}^{-2}$  flyuens bilan nurlantirilgan (7-rasmda chapda ko'rsatilgan nuqta) namunaga qaraganda  $\sim 2$  baravar yuqori bo'ldi.

Tez neytron bilan hosil qilingan ranglanish markazlarining optik rangsizlanishini o'rganish shuni ko'rsatdiki 580 nm to'liq uzunligidagi foto rangsizlanish faqat tez neytron hosil qilgan agregat  $F_2^+$  markazli tuzoqlardan elektronlarni ozod qiladi. Demak, 440 K TL pikining intensivligi foto-yoritishdan oldingi holatga nisbatan ~50% ga, 520 va 545 K TL piklarining intensivligi esa 22% ga kamayadi. Ushbu natija  $F_2^+$  markazlar  $Pr^{4+}$  kovak markazi bilan TL rekombinatsiya jarayonida elektron tuzoqlari sifatida ishtirok etishini ko'rsatadi.



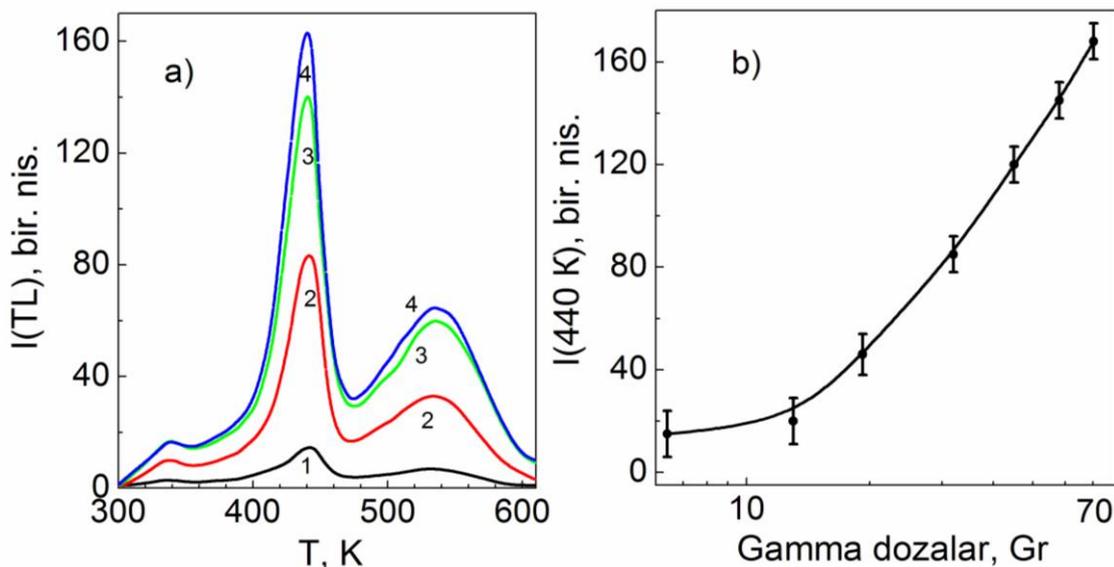
**6-rasm. Tez neytronlarning  $10^{17}$  flyuensida nurlantirilgan hamda termik qayta ishlangan LuAG:Pr na'munasini  $2.6 \cdot 10^3$  Gr dozagacha nurlantirishdagi Pr ning gamma lyuminisensiya 310 nm polosani 310 K haroratdagi  $\gamma$ -dozaga bog'liqligi. Chap tarafdagi pastgi nuqta faqatgina tez neytronlarning  $10^{17}$  flyuensida nurlantirilgan na'mundan olingan gamma lyuminessensiya intensivligi**

Shunday qilib,  $>10^{15}$   $sm^{-2}$  da tez neytronlar flyuyenslari bilan nurlantirish  $Pr^{3+}$  ionlari bilan aktivlashtirilgan  $Lu_3Al_5O_{12}$  monokristallarida  $^{60}Co$  gamma-kvant ta'sirida 310, 325 va 370 nm polosalardagi lyuminessensiya chiqishini sezilarli darajada pasayishiga olib keldi (5b-rasm, 2-5 egri chiziq'larga qarang), chunki OYu 387 va 570 nm polosalariga ega ranglanish markazlari bilan bog'liq neytronlar bilan hosil qilingan nuqsonlar ( $F^+$  va  $F_2^+$  elektronlari) miqdori oshadi (5a-rasm, 3-5 egri chiziq'lar). Ushbu natijalar tez neytronlarning  $>10^{15}$   $cm^{-2}$  flyuyenslari ssintillyator resursini cheklashiga sabab bo'ladi. Ushbu yuqori miqdordagi nuqsonlar ssintillyator materialiga termolyuminessent dozimetr (TLD) xususiyatlarni keltirib chiqarishi mumkin.

Shu munosabat bilan, dissertatsiyaning “**Ssintillyatsiya detektor resursini ishlatib bo‘lgan LuAG:Pr kristallaridan yuqori dozali gamma-dozimetri yaratish imkoniyati**” deb nomlangan beshinchi bobida tadqiqot natijalari, LuAG:Pr asosidagi ssintillyatsiya detektorlarni radiatsiya va termik ishlov berish orqali TLDga aylantirish imkoniyati keltirilgan. Buning uchun LuAG:Pr namunalari  $10^{17} \text{ sm}^{-2}$  tez neytronlar flyuyensi bilan nurlantirilgandan so‘ng havoda termik ishlov berildi, so‘ngra 310 K haroratda (6.4÷70.4) Gr doza oraliqlarida 0.064 Gr/s kichik quvvatda  $^{60}\text{Co}$   $\gamma$ -kvantlari bilan nurlantirildi.

Nuqson markazlarga termolyuminessensiya usuli ( $\sim 10^{14} \text{ sm}^{-3}$ ) optik yutilish usuliga ( $\sim 10^{16} \text{ sm}^{-3}$ ) qaraganda sezgirlik darajasi past miqdorga ega Shuni hisobga olgan holda, 0.064 Gr/s da har bir qo‘shimch  $\gamma$ -dozalardan so‘ng 300 dan 605 K gacha bo‘lgan harorat oraliqlarida TL qayd etildi, ular 8a-rasmda ko‘rsatilgan.

Kuzatilgan TL piklari 340, 440, 515 va 545 K, 6.4 Gr (1-egri chiziq), 32 Gr (2-egri chiziq), 58 Gr (3-egri chiziq) va 70.4 Gr (4-egri chiziq) dozalarning ortishi bilan ularning harorat maksimumlari o‘zgarmaydi, intensivliklari qamralgan zaryad tashuvchilarning miqdoriga mos ravishda ortadi va maksimumi 440 K ega bo‘lgan izolyatsiyalangan TL pikning o‘shishi eng tez bo‘ldi (8a-rasm). 8b-rasmda TL maksimumi 440 K pikining 6.4 dan 70.4 Gr dozasi gacha nurlantirilgan nuqtalar bo‘yicha  $\gamma$ -dozaga bog‘liqligi ko‘rsatilgan. Doza oshishi bilan TL piklarning harorat maksimumining holati o‘zgarmasligi (8a-rasm, 1-4 egri chiziqlar) va 440 K dagi TL pikining gammaning 13 dan 70 Gr gacha doza oraliqlarida chiziqli o‘shishi bu materialdan TLD sifatida foydalanish nuqtayi nazaridan maquldir.



**8-rasm. LuAG:Pr ssintillyator monokristalining TL (a): ketma-ket ta’sirlar:  $10^{17} \text{ cm}^{-2}$  neytronlar flyuyensi bilan nurlantirish, termik ishlov berish va 0.064 Gr/s quvvatda gamma-nurlantirish 6.4 (1), 32 (2), 58 (3) va 70.4 Gr (4)  $\gamma$ -dozalar, (b): 440 K pikining  $\gamma$ -dozaga bog‘liqligi**

LiF:Mg,Cu,P kristalli uchun termolyuminessensiya piki dozaviy bog‘liqligining shunday chiziqli xarakterdagi misollar (Horowitz Y. S., *et.al.* Radia. Protec. Dosim.,

1990, 279.) ko'rsatilgan. Biroq  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>:C va LiF:Mg,Cu,P kristallarining (10÷20) Gr dozalar oralig'ida TLD-500 K ning asosiy dozimetrik piki uchun mas'ul bo'lgan zariyad tashuvchilarni qamrovchilar soni cheklanganligi sababli to'yinishga o'tagan. Ular bilan taqqoslaganda, LuAG:Pr hatto 70 Gr dozacha ham 440 K TL pikining to'yinishiga chiqmadi (8b-rasm), shuning uchun uning doza resursi standart dozimetrlarga qaraganda yuqori.

Keyinchalik, TL 340, 440, 515 va 545 K piklarining so'nish kinetikasini o'lchash orqali xona haroratida (qorong'uda saqlash) bir xil dozada nurlantirilgandan so'ng turli vaqtlarda ushlab turish bilan zaryadli markazlarning barqarorligi aniqlandi, bu TLD ning zaruriy texnik parametri hisoblanadi. Bir xil 50 Gr dozada nurlantirilgandan va 30 daqiqa, 1, 3 va 5 soat davomida 305 K haroratda ushlab turilgandan so'ng TL egri chiziqlari o'lchandi. Ma'lum bo'ldiki, 440, 515 va 545 K TL piklar intensivliklarining 10% oralig'idagi o'zgarishlari, ya'ni tegishli tuzoqlarning zaryad barqarorligini ko'rsatdi.

TL 440 K piki uchun zaryad tashuvchilarni qamrab olgan markazning biz aniqlagan qiymatlaridan parametridan, ya'ni aktivasiya energiyasi ( $E \approx 1.21$  eV) va chastota faktori ( $s \approx 1.6 \cdot 10^{11}$ ) hamda (Gartia R. K., et.al., Nucl. Instrum. Meth. 2011, 30) (1) formulasidan foydalanib 440 K dagi TL pikning vaqt bo'yicha barqarorligi baholandi.

$$t = s^{-1} \exp\left(\frac{E}{kT}\right) \quad (1)$$

bunda  $\tau$ - yashash vaqti; E - tutqich chuqurligi; s - chastota faktori; T - absolyut shkaladagi saqlash harorati, k - Bolsman doimiysi. TL cho'qqisi 440 K uchun T=300 K da  $\tau=38.2$  yil bo'ldi.

Yashash vaqtini hisoblash va gamma-nurlantirishdan keyin 5 soatgacha ushlab turilgandagi o'lchangan barqarorligiga asoslanib, LuAG:Pr dagi TL ning 440 K piki TLD sifatida dozimetrik maqsadlar uchun potensial nomzod bo'lishi mumkin, deb hisoblashimiz mumkin. Bundan tashqari, LuAG:Pr mexanik mustahkamligi bo'yicha  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>:C dan qolishmaydi, sezilarsiz fon signaliga ega, uning yuzasi atrofdagi atmosfera bilan reaksiyaga kirishmaydi, bu esa tibbiy buyumlar va oziq-ovqat mahsulotlarini sterilizatsiya qilish, shuningdek, atom elektr stansiyalari uskunalarini, radiatsiya nazorati omborlarini va ishlatilgan yadroviy yoqilg'ini dozimetrik nazorat qilish uchun <sup>60</sup>Co gamma-nurlanishning yutilgan 70 Gr dozasigacha bo'lgan TLD ga oldindan neytronlar bilan nurlantirilgan va issiqlik bilan ishlov berilgan LuAG:Pr ssintillyator monokristallarini qo'llash bo'yicha keyingi tadqiqotlarni maqsadga muvofiq qiladi.

## XULOSA

“Lu<sub>3</sub>Al<sub>5</sub>O<sub>12</sub>:Pr monokristallari o'stirish va radiatsiya nuqsonlari barqarorligining rekombinatsiya kinetikasiga ta'siri” mavzusidagi fizika-matematika fanlari bo'yicha falsafa doktori (PhD) dissertatsiyasi bo'yicha olib borilgan tadqiqotlar asosida quyidagi xulosalar taqdim etildi:

1. Ikkala LuAG va LuAG:Pr namunalari xarakterli yutilish polosasi 375 nm bo'lgan xususiy F<sup>+</sup> -markazlari va 285, 465 va 595 nm da yutiladigan Cr<sup>4+</sup> kirishma

markazlarining kelib chiqishi texnologik jarayon va hom ashyoning tozaligi bilan bog'liqligi va ularning gamma-nurlanishdan keyin aniqroq namoyon bo'lishi xususiy nuqsonlarning zaryadlanishi va kirishma nuqsonlarining elektron holati (valentligi) ning o'zgarishi bilan bog'liqligi ko'rsatildi.

2. 310 K da  $10^3$  Gr dozada gamma-nurlantirishdan so'ng xona haroratida 24 soatgacha ushlab turish vaqtining ortishi bilan 340 K termo-lyuminessensiya (TL) pikini va 375, 467 va 595 nm optik yutilish (OYu) polosalari intensivliklarining pasayishi zaryad tashuvchilarning kichik energiyali qamrash sathlaridan ozod bo'lishi (310 K bilan termik faollashtirish), ko'chishi va lyuminessensiya markazlarda rekombinatsiyaviy lyuminessensiya chiqishi bilan bog'liq.

3. Gamma oqimining ta'sir vaqti  $1.4 \cdot 10^3$  Gr dozagacha oshishi bilan LuAG:Pr da 310 nm aktivator gamma-lyuminessensiya (GL) chiqish intensivligining ~9% ga kamayishi  $\text{Pr}^{3+}$  markazlarida rekombinatsiyaviy lyuminessensiyasi bilan zaryad tashuvchilarni qamrashda raqobatlashuvchi xususiy ( $F$  va  $F^+$  -markazlar) va kirishma ( $\text{Cr}^{4+}$ ) nuqsonlar bilan bog'liqligi ko'rsatilgan.

4. LuAG:Pr monokristalida gamma kvanti bilan stimullashtirilgan elektron va kovaklar generatsiyasi, migratsiya, fluoressensiya va aktivatorlarda erkin kovaklarni tutib qolish, elektronlarning bir qismini tuzoqlarga tutib qolish va ularni fosforessensiya bilan termik ozod qilishni o'z ichiga olgan energetik zonalar, sathlar va o'tishlarning taklif etilgan sxemasini hisobga olgan holda tez neytronlar flyuyensining  $> 10^{15} \text{ sm}^{-2}$  ortishi bilan aktivator  $\text{Pr}^{3+}$  -markazining GL polosalari intensivligining kamayishini quyidagicha tushuntirish mumkin: - bir tomondan,  $\text{Pr}^{3+}$  lyuminessensiyasining optik spektral (300÷400) nm sohadagi ranglanish markazlari (elektron  $F^+$  va kovak  $\text{O}^-$ ) tomonidan reabsorbsiyalanishi mumkin, ularning miqdori neytronlar flyuyensining ortishi bilan ortadi; - boshqa tomondan, tez neytron bilan nurlantirilgan namunaga termik ishlov berilgandan so'ng  $^{60}\text{Co}$  gamma kvantlari bilan qo'shimcha nurlantirish bo'yicha natijalar  $\text{Pr}^{3+}$  - markaz tomonidan kovak  $\text{Pr}^{4+}$  - markazi hosil bo'lishi haqidagi taxminga olib keladi, buning natijasida  $\text{Pr}^{3+}$  - markazlar miqdori kamayadi va elektron  $F^+$  - va  $V_{\text{O}} (\text{C}_{\text{dop}}) / F_2^+$  markazlar miqdori esa ortadi.

5. 580 nm to'lqin uzunligida fotonurlantirishdan so'ng, 573 nm OYu polosasi intensivligining kamayishi, 440, 520 va 545 K TL piklari va 240 va 285 nm OYu polosalari intensivligining ortishi,  $V_{\text{O}} (\text{C}_{\text{dop}}) / F_2^+$  -markazidan ozod bo'lgan elektronlarning bir qismini  $\text{Pr}^{4+}$  -markaz bilan rekombinatsiyalanishi natijasida  $\text{Pr}^{3+}$  hosil bo'lishi bilan bog'lash mumkin. Ya'ni, neytron stimullashtirgan elektron markaz, bir tomondan, elektronlarni qamrab olishda lyuminessensiya  $\text{Pr}^{4+}$  -markazga raqobatchi bo'lsa, ikkinchi tomondan, rekombinatsiya jarayonida ssintillyatorning aktivator lyuminessensiya chiqishini kamaytirish uchun ham mas'ul bo'lgan  $\text{Pr}^{4+}$  - markazning barqarorligiga olib keladi.

6. Ssintillyator LuAG:Pr monokristalining optik shaffoflik (ssintillyatorning lyuminessensiya sohasida) va rekombinatsiyaviy lyuminessensiya markazlari tez neytronlar ta'sirining  $10^{15} \text{ n/cm}^{-2}$  flyuyensgacha radiatsiyaga barqaror ekanligi ko'rsatildi.

7. Ilk bor tez neytronlar bilan nurlantirilganda ssintillyatsiya xususiyatini yo‘qotgan LuAG:Pr ssintillyator monokristallarini yutilgan  $^{60}\text{Co}$  gamma-dozaning termolyuminessent dozimetri kengaytirilgan doza oralig‘ida ( $13 \div 70.4$ ) Gr (standart TLD bilan solishtirganda) qo‘llash imkoniyati oldindan neytronlar bilan nurlantirilgan kristallarni termik ishlov berish yo‘li bilan ko‘rsatildi.

**НАУЧНЫЙ СОВЕТ DSC.02/30.12.2019.FM/Т.33.01 ПО ПРИСУЖДЕНИЮ  
УЧЕНЫХ СТЕПЕНЕЙ ПРИ ИНСТИТУТЕ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ**

---

**ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ**

**ХАЙИТОВ ИСМОИЛ АХАТКУЛ УГЛИ**

**ВЛИЯНИЕ НЕСТАБИЛЬНОСТИ РОСТОВЫХ И РАДИАЦИОННЫХ  
ДЕФЕКТОВ МОНОКРИСТАЛЛОВ  $\text{Lu}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}:\text{Pr}$  НА КИНЕТИКУ  
РЕКОМБИНАЦИИ**

**01.04.07 – Физика конденсированного состояния**

**АВТОРЕФЕРАТ**

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

**Ташкент – 2025**

**Тема диссертации доктора философии (PhD) по физико-математическим наукам зарегистрирована в Высшей аттестационной комиссии при Министерстве высшего образования, науки и инноваций Республики Узбекистан за номером № В2024.2. PhD/FM1116**

Диссертация выполнена в Институте ядерной физики Академии наук Республики Узбекистан.

Автореферат диссертации на трех языках (узбекский, русский, английский (резюме)) размещен на веб-странице Научного совета ([www.inp.uz](http://www.inp.uz)) и информационно-образовательном портале «ZiyoNet» ([www.ziynet.uz](http://www.ziynet.uz)).

**Научный руководитель:**

**Ибрагимова Эльвира Меметовна**

доктор физико-математических наук, профессор

**Официальные оппоненты:**

**Раджапов Сали Аширович**

доктор физико-математических наук  
старший научный сотрудник

**Бойбобоева Сохиба Турамирзаевна**

доктор философии (PhD) по физико-математическим наукам, старший научный сотрудник

**Ведущая организация:**

**Национальный университет Узбекистана  
имени Мирза Улугбека**

Защита диссертации состоится « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2025 года в \_\_\_\_ часов на заседании Научного совета DSc.02/30.12.2019.FM/T.33.01 при Институте ядерной физики (Адрес: 100214, г. Ташкент, пос. Улугбек, Институт ядерной физики. Тел.: (+99871) 289-31-41; факс: (+99871)289-36-65; e-mail: [info@inp.uz](mailto:info@inp.uz)).

С диссертацией можно ознакомиться в Информационно-ресурсном центре Института ядерной физики (регистрационный номер \_\_\_\_\_) (Адрес: 100214, г. Ташкент, пос. Улугбек, Институт ядерной физики. Тел. (+99871) 289-31-19).

Автореферат диссертации разослан « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2025 г.  
(протокол рассылки № \_\_\_\_\_ от « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2025 г.).

**М. Ю. Ташметов**

председатель Научного совета по присуждению  
ученых степеней, д.ф.-м.н., профессор

**О.Р. Тожибоев**

ученый секретарь Научного совета  
по присуждению ученых степеней, PhD ф.-м.н.,  
старший научный сотрудник

**С.Б. Игамов**

председатель научного семинара  
при Научном совете по присуждению  
ученых степеней, д.ф.-м.н.,  
старший научный сотрудник

## ВВЕДЕНИЕ (аннотация диссертации доктора философии (PhD))

**Актуальность и востребованность темы диссертации.** В настоящее время в мире ведутся поиски новых классов неорганических люминесцентных материалов, устойчиво работающих в экстремальных условиях, например, в радиационных полях ядерных излучений. Это продиктовано современными требованиями к уровню развития техники, включая ядерную медицинскую диагностику (позитронная эмиссионная томография (ПЭТ), однофотонная эмиссионная компьютерная томография (ОФЭКТ) и компьютерная томография), физику высоких энергий для обнаружения новых частиц, а также термолюминесцентные дозиметры для стерилизации изделий медицинского назначения и пищевых продуктов и контроля радиационной обстановки на оборудовании атомных станций, в хранилищах отработавшего топлива и радиоактивных отходов.

Целенаправленная разработка новых люминесцентных и сцинтилляционных оптических материалов основывается на понимании конкретных физических процессов, включающих в себя экспериментальное изучение ростовых и радиационно-индуцированных дефектов и их влияние на изменение оптической прозрачности и люминесценции. В этом отношении монокристаллический алюмо-лютециевый гранат  $\text{Lu}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$  (LuAG), относящийся к классу сложных оксидных соединений со структурой граната, является в настоящее время одним из перспективных материалов для детектирования слабых и интенсивных ионизирующих излучений. Это обусловлено тем, что монокристаллы LuAG имеют высокую плотность ( $6.7 \text{ г/см}^3$ ), а легирование ионами празеодима  $\text{Pr}^{3+}$  LuAG обеспечивает быстрое действие сцинтилляций ( $\sim 20 \text{ нс}$ ) и высокий световой выход ( $\sim 22 \text{ 000 фот/МэВ}$ ), превышающий в три раза световой выход и в пять раз быстрое действие традиционно используемых монокристаллов германата висмута  $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$  (BGO).

В Республике большое внимание уделяется разработке фундаментальных основ получения люминесцентных материалов для создания детекторов ионизирующих и ядерных излучений на мировом уровне. Направления этих фундаментальных исследований и разработок, имеющих большое значение для развития науки нашей страны и их практического применения, отражены в Стратегии<sup>3</sup> действий по дальнейшему развитию Республики Узбекистан на 2022 – 2026 годы.

Исследования, проведенные в данной диссертационной работе, соответствуют задачам, предусмотренным в Указе Президента Республики Узбекистан № УП–4512 от 1 марта 2013 года «О мерах по дальнейшему развитию альтернативных источников энергии», Постановлении Президента Республики Узбекистан № ПП–4526 от 21 ноября 2019 года «О мерах по поддержке научно-исследовательской деятельности Института ядерной физики

---

<sup>3</sup> Указ Президента Республики Узбекистан № УП-60 «О Стратегии развития нового Узбекистана на 2022–2026 гг.» от 28 января 2022 г.

Академии наук Республики Узбекистан», а также других нормативно-правовых документах, принятых в данной сфере.

**Соответствие исследования приоритетным направлениям развития науки и технологий республики.** Диссертационное исследование проведено в соответствии с приоритетным направлением развития науки и технологий республики – II. «Энергетика, энергосбережение и альтернативные источники энергии».

**Степень изученности проблемы.** Исследования сцинтилляционных и оптических характеристик монокристаллов LuAG:Pr для ядерной медицинской диагностики проводились учеными в ряде мировых научных центров, например, японскими (А. Yoshikawa, К. Kamada), китайскими (Y. Shen, X. Feng), белорусскими (М.В. Коржик, А.А. Федоров), украинскими (Ю.В. Зоренко, В.И. Горбенко), чешскими (М. Nikl, V. Vabin, V.V. Laguta), швейцарскими (E. Auffray, P. Lescq), узбекистанскими (Э.М. Ибрагимова, А.Ф. Раков) и другими специалистами. В результате этих исследований получены оптимальные сцинтилляционные характеристики для детектирования ядерных излучений; определены ширина запрещенной зоны, полосы оптического поглощения, фото- и рентгено-люминесценции активаторного центра.

В Узбекистане исследования радиационно-стимулированных явлений в оксидных кристаллах, включая гранаты  $Y_3Al_5O_{12}:TR^{3+}$  и  $Lu_3Al_5O_{12}:Pr$ , ведутся с 1960-х годов. Установлена зависимость ширины запрещенной зоны от ионного радиуса  $TR^{3+}$  и плотности кристаллической решетки, изучены спектры люминесценции и времена жизни экситонов, а также влияние гамма-, нейтронного и электронного облучений на оптические и сцинтилляционные свойства материалов, определяющие их радиационную стабильность. Показано, что замена иттрия на лютеций (LuAG вместо YAG) повышает плотность, световыход и быстродействие сцинтиллятора.

Тем не менее остаются нерешенные задачи: необходимо устранить или ослабить послесвечение, ограничивающее применение LuAG:Pr в ядерной медицинской визуализации и физике высоких энергий. Недостаточно изучены механизмы радиационно-индуцированных дефектов и природа гамма-наведенных полос поглощения; требуется систематическое исследование дозовых и энергетических зависимостей изменения оптических свойств под действием различных видов излучений. Дополнительно перспективным направлением остаётся проверка возможностей применения  $Lu_3Al_5O_{12}:Pr$  в термолюминесцентной дозиметрии.

**Связь темы диссертации с научно-исследовательскими работами научно-исследовательского учреждения, где выполнена диссертация.** Диссертационное исследование выполнено в рамках плана научно-исследовательских работ Института ядерной физики Академии наук Республики Узбекистан по проекту ОТ-Ф2-09 «Физические основы механизмов влияния оптических и ионизирующих излучений на спектральные характеристики многокомпонентных оксидных кристаллов» (2017–2020), а также утвержденной Постановлением Президента № ПП-4526 от 21 ноября

2019 года программы научно-исследовательских работ по теме: “Модификация и радиационно-индуцированный синтез наноразмерных включений в стеклянных и кристаллических матрицах” (2020-2024).

**Целью исследования** является установление характера влияния нестабильных и стабильных ростовых и радиационно-индуцированных дефектных центров окраски на процессы рекомбинационного свечения ионов  $\text{Pr}^{3+}$  в сцинтиляторных алюмо-лютециевых монокристаллах гранатной структуры  $\text{Lu}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}:\text{Pr}$ .

**Задачи исследования:**

определить локальную атомную структуру центров окраски и свечения после гамма-облучения в интервале доз в номинально чистых и активированных образцах и выделить ростовые дефекты;

изучить кинетики релаксации нестабильных центров и накопления стабильных центров окраски после облучения гамма квантами в интервале доз ( $10^2 \div 10^6$ ) Гр;

изучить кинетики свечения ионов  $\text{Pr}^{3+}$  в процессе воздействия гамма квантов, определить дозовый предел сцинтилятора;

определить локальную атомную структуру центров окраски и свечения после облучения быстрыми нейтронами в интервале флюенсов и выделить радиационно-наведенные дефекты;

изучить влияние нейтронно-наведенных центров окраски на свечение  $\text{Pr}^{3+}$  и выяснить предельный флюенс быстрых нейтронов для сцинтилятора;

исследовать возможности использования нейтрон-облученного сцинтиляционного монокристалла  $\text{Lu}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}:\text{Pr}$  в термолюминесцентной высокодозной гамма-дозиметрии;

выработать рекомендации по улучшению оптических, люминесцентных и сцинтиляторных характеристик  $\text{Lu}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}:\text{Pr}$  и условиям их эксплуатации.

**Объектами исследования** являются монокристаллы неактивированного (номинально чистого)  $\text{Lu}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ , как кристаллической матрицы, и специально активированного ионами  $\text{Pr}^{3+}$ , как сцинтилятора.

**Предметом исследования** являются радиационно-индуцированные процессы генерации, миграции, рекомбинации и локализации носителей заряда и дефектов, их влияние на световых выход активаторного свечения ионов  $\text{Pr}^{3+}$ .

**Методы исследования:** дозированные облучения гамма-квантами и быстрыми ( $>0.1$  МэВ) нейтронами, спектры оптического поглощения, гаммалюминесценции, фотолюминесценции и термолюминесценции (в интервале температур  $(300 \div 620)$  К).

**Научная новизна исследования заключается в следующем:**

определены собственные заряженные анионные вакансии  $F^+$  и неконтролируемые примесные  $\text{Cr}^{3+}$  центры в монокристаллах номинально чистых LuAG и специально активированных LuAG:Pr, происхождение и изменение которых при гамма-облучении обусловлено технологией роста кристаллов, составом шихты и процессами зарядки кислородных вакансий ( $\text{Cr}^{3+} \rightarrow \text{Cr}^{4+}$ );

установлена корреляция между пиком термовысвечивания при 340 К и собственными  $F^+$  и примесными  $\text{Cr}^{4+}$  центрами окраски после гамма-облучения  $\text{LuAG:Pr}$  дозой  $10^3$  Гр при 310 К и с ростом времени выдержки до 24 час, связанная с механизмами термического освобождения носителей заряда из мелких уровней захвата при 310 К и их миграции к центрам излучательной рекомбинации, эти ловушки являются причиной длительного послесвечения после быстрых рекомбинационных сцинтилляций;

показано, что уменьшение интенсивности выхода активаторного свечения на  $\sim 9\%$  с ростом гамма- дозы до  $1.4 \cdot 10^3$  Гр обусловлено механизмом конкуренции дефектных центров ( $F$ ,  $F^+$  и  $\text{Cr}^{4+}$ ) в кристаллической решетке  $\text{LuAG}$  в захвате носителей заряда с активаторными  $\text{Pr}^{4+}$  центрами, препятствующей их излучательной рекомбинации;

доказано, что уменьшение интенсивности полос гаммалюминесценции (ГЛ) активаторного  $\text{Pr}^{3+}$  -центра после облучения быстрыми нейтронами до флюенса  $\geq 10^{16}$   $\text{см}^{-2}$  и последующего термического обесцвечивания или фотоподсветки обусловлено совокупным действием двух механизмов: (1) реабсорбцией активаторного свечения  $\text{Pr}^{3+}$  в спектральной области 300÷400 нм электронными  $F^+$  и дырочными  $\text{O}_i^-$  центрами окраски, концентрация которых увеличивается с ростом флюенса нейтронов, и (2) переносом электрона от нейтронно-наведенного  $V_{\text{O}}(\text{C}_{\text{доп}})/F_2^+$  -центра к дырочному  $\text{Pr}^{4+}$  центру с излучательным переходом в  $\text{Pr}^{3+}$  ионе;

установлено, что рекомбинационные пары центров, ответственные за сцинтилляционные характеристики - быструю флуоресценцию 20 нс в  $\text{LuAG:Pr}$ , преобразуются в другие термолюминесцентные рекомбинационные пары, ответственные за медленную фосфоресценцию пика термовысвечивания 440 К, путем перестройки электронной структуры только реакторных радиационно-наведенных дефектов.

#### **Практические результаты исследования заключаются в следующем:**

обнаружены нестабильности гамма-наведенных центров окраски и пика термовысвечивания при  $\sim 340$  К, проявляющиеся уже при комнатной температуре, которые могут быть причиной нежелательного послесвечения, ограничивающего применение материала в качестве быстрого сцинтиллятора - ключевого элемента устройств медицинской визуализации, таких как ПЭТ, ОФЭКТ и компьютерная томография;

определены оптимальные условия облучения кристаллов активированного граната  $\text{Lu}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}:\text{Pr}$  гамма-квантами и быстрыми нейтронами, при которых выход активаторного свечения уменьшается на  $\sim 9\%$  при  $\gamma$ -облучении дозой  $1.4 \cdot 10^3$  Гр: кристалл остается стабильным к воздействию быстрых нейтронов до флюенса  $10^{15}$   $\text{см}^{-2}$  и снижение интенсивности свечения до  $\sim 70\%$  наблюдается при флюенсе  $10^{17}$   $\text{см}^{-2}$ ;

показана возможность преобразования монокристаллов  $\text{LuAG:Pr}$ , отработавших допустимый ресурс в составе сцинтилляционных детекторов в медицинских томографах, в чувствительные термолюминесцентные дозиметры

поглощенной  $^{60}\text{Co}$  гамма-дозы в значительно расширенном интервале доз 13-70.4 Гр за счет термической обработки нейтронно-облученных детекторов.

**Достоверность результатов исследования** обоснована использованием комплекса взаимодополняющих абсорбционных, люминесцентных, термо- и фотообесцвечивающих методов исследования, большой статистикой и хорошей воспроизводимостью измерений; логичностью и непротиворечивостью результатов и научных выводов общим физическим представлениям о взаимодействии ядерных излучений с веществом в области физики конденсированного состояния.

#### **Научная и практическая значимость результатов исследования.**

Научная значимость заключается в установлении природы радиационно-наведенных дефектов и примесных центров в монокристаллах  $\text{LuAG:Pr}$ , а также в выявлении механизмов, определяющих послесвечение и снижение интенсивности активаторного свечения под действием  $\gamma$ -квантов и быстрых нейтронов. Полученные результаты расширяют представления о радиационных процессах в сцинтилляционных материалах и их влиянии на эффективность сцинтилляции.

Практическая значимость состоит в возможности использования установленных закономерностей для повышения радиационной стойкости сцинтилляторов, применяемых в медицинских системах визуализации (ПЭТ, ОФЭКТ), и оценки предельных доз их стабильности. Предложен радиационно-технологический способ преобразования отработавших сцинтилляционных кристаллов  $\text{LuAG:Pr}$  в термолюминесцентные дозиметры  $\gamma$ -дозы  $^{60}\text{Co}$ . Результаты могут быть использованы при разработке и оптимизации материалов детекторов излучения в ядерной медицине и физике высоких энергий.

**Внедрение результатов исследования.** На основе исследования радиационно-индуцированных центров окраски и их влияния на выход активаторного свечения в рекомбинационном процессе:

происхождение собственных заряженных анионных вакансий  $F^+$  и неконтролируемых примесных  $\text{Cr}^{3+}$  центров в монокристаллах номинально чистых  $\text{LuAG}$  и специально активированных  $\text{LuAG:Pr}$ ;

корреляционная связь между пиками термовысвечивания при 340 К и собственными  $F^+$  и примесными  $\text{Cr}^{4+}$  центрами окраски после гамма-облучения  $\text{LuAG:Pr}$  дозой  $10^3$  Гр при 310 К;

причина снижения интенсивности активаторного свечения на  $\sim 9\%$  при увеличении времени облучения гамма-квантами до дозы  $1.4 \cdot 10^3$  Гр  $\text{LuAG}$ ;

механизмы уменьшения интенсивности полос гаммалюминесценции (ГЛ) активаторного  $\text{Pr}^{3+}$ -центра после облучения быстрыми нейтронами и последующего термического обесцвечивания или фотоподсветки;

способ преобразования сцинтилляционной быстрой флуоресценции 20 нс в  $\text{LuAG:Pr}$  в термолюминесцентные рекомбинационные пары, ответственные за медленную фосфоресценцию

использованы кафедрой «Биомедицинская инженерия, биофизика и информатика» Бухарского государственного медицинского института в учебном процессе в рамках программы бакалавриата по курсу «Биомедицинская инженерия» и «Медицинская биология» (учебник «Медицинская электроника», С.Х. Умаров. – Бухоро: Дурдона, 2024.) (письмо Бухарского государственного медицинского института №04/1055 от 04.02. 2025), а также зарубежными исследователями (ссылки в международных научных журналах *Physics of the Solid State*, Vol.61, №5, pp.735-741, 2019; *Vacuum*, Vol. 197, 110819, 2022; *Japan Jour. of Appl. Physics*, Vol.62, 010613, 2023). Использование результатов позволило расширить представления студентов о причинах снижения световыхода детекторов и ухудшения визуализации из-за ростовых дефектов, а также принципы преобразования сцинтилляционных детекторов в термолюминесцентные  $\gamma$ -дозиметры для полной стерилизации медицинских изделий, а также объяснить формирование оптических волноводных структур в кристалле LuAG:Pr, что открывает возможность их применения для создания компактных и высокопроизводительных лазеров и усилителей и детекторов ядерных излучений в термоядерной плазме.

**Апробация работы.** Основные результаты диссертационной работы докладывались на 5 международных и республиканских научно-практических конференциях.

**Опубликованность результатов исследований.** По теме диссертации опубликовано 9 научных работ, в том числе 4 статьи в научных изданиях, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией для публикации основных научных результатов диссертаций, из них 3 в зарубежных научных журналах.

**Структура и объем диссертационной работы.** Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка использованной литературы. Объем диссертации составляет 105 страниц.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

**Во введении** обоснована актуальность и востребованность темы диссертации, сформулированы цель и задачи, определены объект, предмет и методы исследования. Показана связь исследований с основными приоритетными направлениями развития науки и технологий республики. Изложена научная новизна исследования, обоснована достоверность полученных результатов, раскрыта их научная и практическая значимость, приведены краткие сведения о внедрении результатов и апробации работы, а также о структуре диссертации.

В первой главе диссертации «**О структурных, сцинтилляционных и абсорбционных характеристиках алюмо-лютециевого граната при радиационных воздействиях**» проводится анализ литературных сведений о структурных, физических и сцинтилляционных свойствах. Проведено

сравнение сцинтилляционных и оптических характеристик монокристалла алюмо-лютециевого граната (LuAG) с редкоземельными активаторами с другими оксидными монокристаллами, а также анализы о влиянии разных видов радиации на его оптические свойства. Определены нерешенные проблемы, на основе которых сформулированы цель и задачи данной работы.

Во второй главе диссертации **«Объекты<sup>4</sup> и экспериментальные методы исследований»** обоснован выбор объектов исследования, активаторного иона празеодима  $\text{Pr}^{3+}$  с концентрацией 0.22 мол % и способа получения сцинтилляторных кристаллов LuAG:Pr. Для изучения влияния проникающей радиации на их оптические свойства кристаллы облучали гамма-квантами источника  $^{60}\text{Co}$  с энергиями 1.17 и 1.33 МэВ при температуре образца 310 К в широком интервале доз ( $10^2$  -  $10^6$  Гр) при двух мощностях дозы 0.80 и 1.1 Гр/с. В области малых доз (6.4 - 70.4 Гр) облучение проводилось при мощности 0.064 Гр/с. Для облучения смешанными нейтрон-гамма потоками в реакторе ВВР-СМ мощностью 10 МВт образцы заворачивались в алюминиевую фольгу и помещались в кадмиевый стакан с толщиной стенок 1 мм, который поглощает тепловые и резонансные нейтроны и пропускает только быстрые нейтроны с энергией  $> 0.1$  МэВ при потоке  $3 \cdot 10^{13}$  см<sup>-2</sup> сек (гамма-компонента 37 Гр/с). Четыре контейнера с образцами облучались флюенсами быстрых нейтронов  $10^{15}$ ,  $10^{16}$ ,  $5 \cdot 10^{16}$  и  $10^{17}$  см<sup>-2</sup>. Обоснован выбор гамма-доз, флюенсов быстрых нейтронов и комплекса экспериментальных оптических методов, необходимых для выполнения задач и достижения цели исследований.

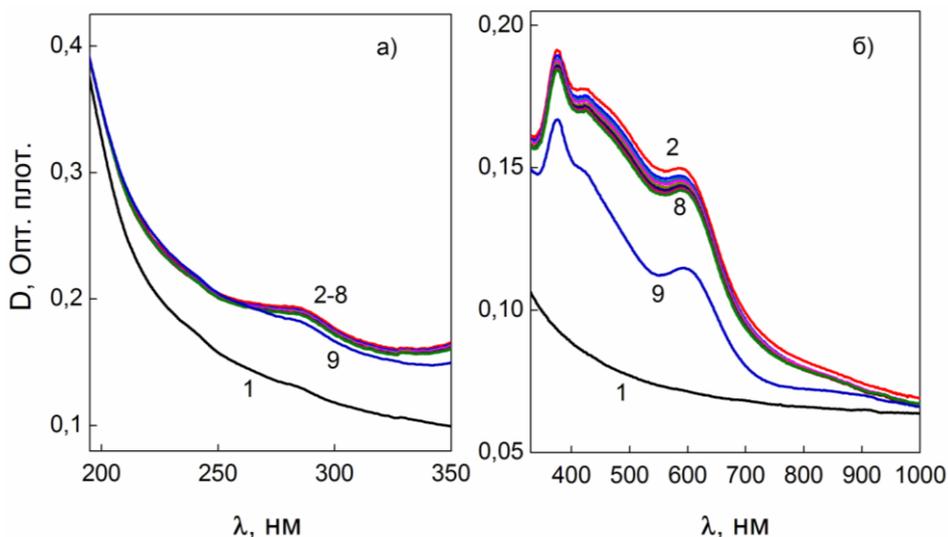
Погрешность оптических спектральных измерений – спектров оптического поглощения, фото- и гаммалюминесценции не превышала 1-3%. Статистическая погрешность по образцам составляла около 5 %. Образцы имели стандартные промышленные размеры и качество обработки поверхности, поэтому разброс (статистика) по составу и дефектам роста определялся только неоднородностью исходной були.

В третьей главе диссертации **«Оптические спектральные характеристики неактивированных и активированных кристаллов  $\text{Lu}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}:\text{Pr}$  до и после облучений гамма квантами»** представлены экспериментальные результаты исследования оптических характеристик монокристаллов номинально чистых (НЧ) и преднамеренно активированных примесью празеодима (Pr) в LuAG до и после облучения гамма-квантами  $^{60}\text{Co}$ .

В спектрах оптического поглощения (ОП) необлученных образцов НЧ LuAG наблюдаются очень слабые полосы поглощения в области около 240 и 285 нм (рис.1а, кривая 1). После гамма-облучения источником  $^{60}\text{Co}$  дозой  $10^3$  Гр кроме полосы ОП при 240 нм, наблюдается увеличение оптической плотности в полосе 285 нм, что свидетельствует о росте концентрации центров окраски (рис. 1, а, кривая 2). В видимой области спектра появляются полосы ОП при 375, 467 и 600 нм (рис.1б, кривая 2).

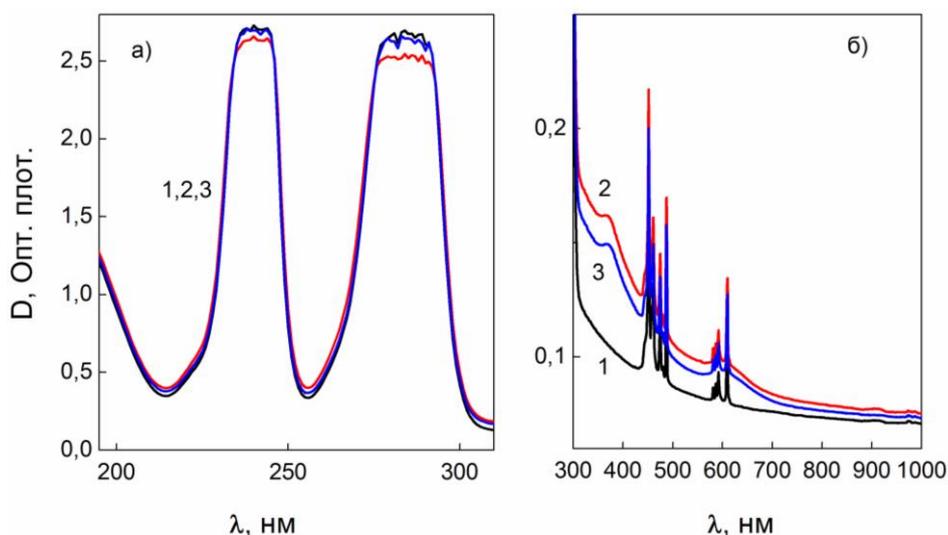
---

<sup>4</sup> Образцы представлены коллегами из Scintillation Materials Research Center, Department of Materials Science and Engineering, University of Tennessee, Knoxville, USA (А.Ф.Паков и К. Камада)



**Рис.1. Спектры поглощения кристаллов LuAG (с толщиной -1 мм) в УФ (а) и видимой области (б): исходный (1), измеренные через 3 мин при 305 К после облучения дозой  $10^3$  Гр (2); далее через каждые 10 мин (3–7), затем через 20 мин (8) и 24 час (9).**

В отличие от НЧ образцов, в присутствии активатора LuAG:Pr в спектре ОП наблюдаются известные полосы поглощения при 240 и 285 нм ( $4f \rightarrow 5d$ ) и мультиплетные линии поглощения около (450÷500)нм и (580÷620) нм, связанные с ( $4f \rightarrow 4f$ ) переходами иона  $Pr^{3+}$  (рис. 2а, кривая 1). После гамма-облучения дозой  $10^3$  Гр интенсивности полос 240 и 285 нм, связанных с ( $4f \rightarrow 5d$ ) переходами активатора  $Pr^{3+}$ , заметных изменений не обнаруживают (рис.2а, кривая 2).



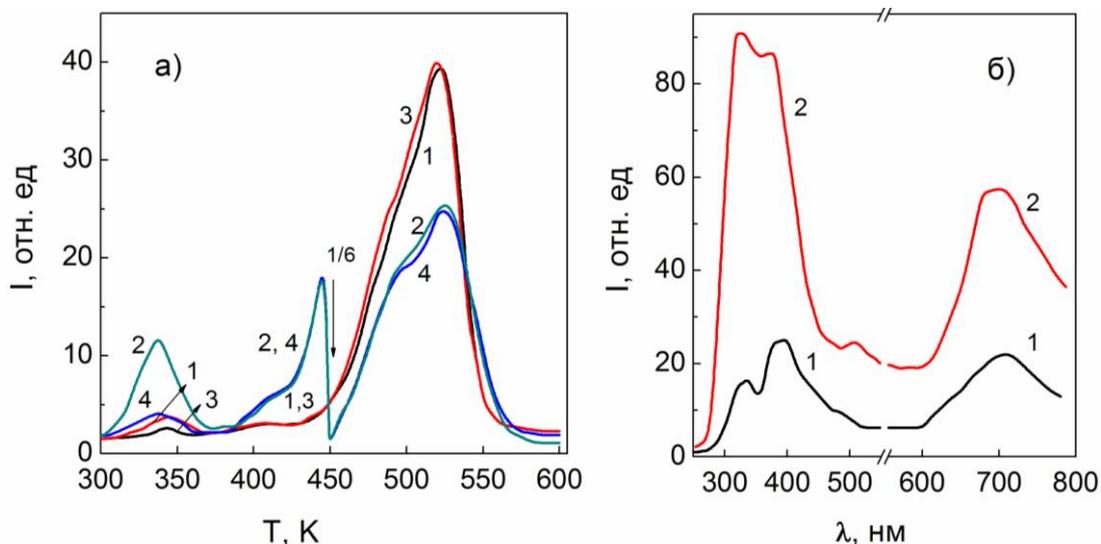
**Рис.2. Спектры поглощения кристаллов LuAG:Pr (с толщиной -1 мм) в УФ (а) и видимой области (б): исходный (1), измеренные через 3 мин после облучения дозой  $10^3$  Гр (2) и через 24 час (3)**

В видимой области спектра кроме мультиплетных линий поглощения  $\text{Pr}^{3+}$  около 500 и 600 нм наблюдаются такие же наведенные полосы при 375 и 600 нм (рис.2б, кривая 2), как и в образце НЧ LuAG (рис.1, б, кривая 2). Эти данные свидетельствует о том, что независимо от присутствия активатора  $\text{Pr}^{3+}$  в обоих образцах существуют дефекты, собственные или примесные, которые образуются в процессе выращивания кристаллов в инертной среде. После гамма-облучения дозой  $10^3$  Гр рост интенсивности полос ОП при 285, 375, 467 и 600 нм в LuAG (рис.1а, б, кривая 2) и полос при 375, 470 и 600 нм в LuAG:Pr (рис.2б, кривая 2), по-видимому, связаны с зарядкой собственных дефектов и изменением электронного состояния (валентности) примесных дефектов.

При технологическом процессе выращивания монокристаллов LuAG и LuAG:Pr невозможно полностью очистить исходное сырьё  $\text{Al}_2\text{O}_3$  от примесей переходных металлов, таких как хром, железо или титан. Кроме того, при выращивании кристаллов методом медленного охлаждения от  $2000^\circ\text{C}$  в инертной среде неизбежно образование в кристалле термодинамических равновесных незаряженных вакансий анионов и антиузельных дефектов. Этим можно объяснить проявление при облучении малой дозой  $10^3$  Гр даже в НЧ кристалле LuAG  $F^-$ -центров с характерной полосой ОП при 240 нм (рис.1 а, кривая 1),  $F^+$ -центров с полосой 375 нм, а также полос 285, 467 и 600 нм, обусловленных присутствием примесных  $\text{Cr}^{4+}$ -центров (рис.1б, кривая 2). Об этом также свидетельствуют полученные спектры гаммалюминесценции (ГЛ) в НЧ и активированном LuAG:Pr в кристаллах, где наблюдается характерная R-полоса люминесценции около 700 нм, связанная с примесью Cr. Результаты представлены ниже (см.рис.5а, кривые 1 и 2).

Далее изучалась кинетика временной релаксации центров окраски по спектрам ОП образцов LuAG и LuAG:Pr после гамма-облучения дозой  $10^3$  Гр для выявления их стабильности при 300 К. При увеличении времени выдержки до 70 мин (кривые 2-8) интенсивность полосы при 240 нм не изменяется даже спустя 24 часа (кривая 9), тогда как интенсивность полосы 285 нм незначительно уменьшается через 24 час (см. рис.1а, кривая 9). В тоже время в видимой области спектра наблюдается уменьшение интенсивности полос ОП: при 375 нм на 30%, при 467 и 595 нм на 45% (рис.1, б, кривые 3–8, 9). Аналогичная кинетика релаксации полос ОП 375 и 595 нм наблюдается и в активированных образцах LuAG:Pr (рис. 3.2, б, кривая 3). При этом интенсивности полос поглощения 240 и 285 нм ( $4f \rightarrow 5d$ ) и структура линий  $\text{Pr}^{3+}$  в областях (450÷500) нм и (580÷620) нм ( $4f \rightarrow 4f$ ) остаются неизменными (рис.2а,б, кривая 3). Наблюдаемое явление, по-видимому, связано с миграцией носителей заряда, освобожденных из термически активированных ловушек, к центрам свечения и последующей рекомбинацией. Это подтверждается результатами измерений интегральных кривых теровысвечивания (КТВ) в области температур от 300 до 650 К, зарегистрированных через 5 мин (кривые 1 и 2) и через 24 часа (кривые 3 и 4) после гамма-облучения дозой  $10^3$  Гр образцов LuAG (кривые 1, 3) и LuAG:Pr (кривые 2, 4) (Рис.3а). Видно, что с увеличением времени выдержки до 24 часов при 300 К после гамма-облучения

дозой  $10^3$  Гр интенсивность пика КТВ около 340 К в обоих образцах заметно уменьшается (рис.3а, кривые 2 и 4). Одновременно в течение 24 час наблюдается уменьшение интенсивности полос ОП 375, 467 и 595 нм (рис.1б и рис.2б). Эти изменения обусловлены термическим освобождением носителей заряда из мелких уровней захвата (с активацией при  $\sim 310$  К), их миграцией и последующей излучательной рекомбинацией с центрами свечения.



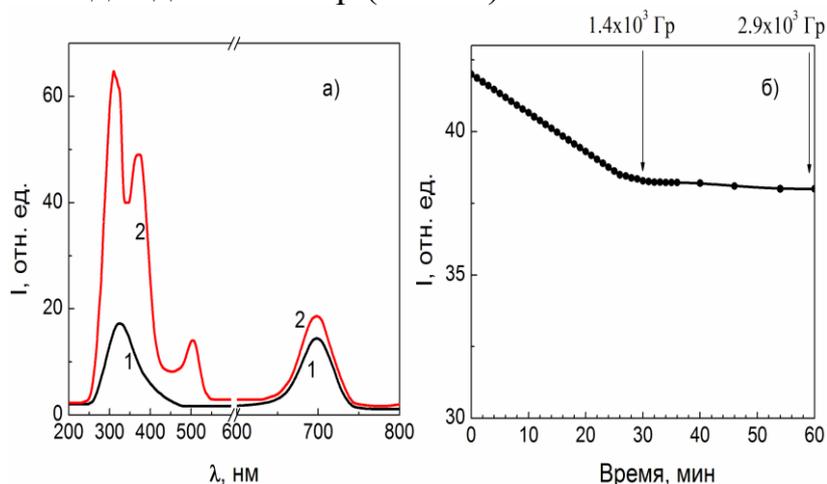
**Рис.3. (а) Кривые термовысвечивания в кристаллах LuAG (1, 3) и LuAG:Pr (2, 4) с толщинами -1 мм, измеренные через 5 мин (1, 2) и 24 час (3, 4) после облучения дозой  $10^3$  Гр; (б) спектр свечения кристаллов LuAG (1) и LuAG:Pr (2)**

При этом интенсивности высокотемпературных пиков КТВ около 410, 490÷500 и 530 К за 24 часа выдержки практически не меняются (рис.3а, кривые 2 и 4), т. е. они не участвуют в процессе релаксации центров окраски при комнатной температуре (305 К). На рис.3б представлены спектральные составы свечения в двух областях (250÷550) и (550÷800) нм для образцов LuAG (кривая 1) и LuAG:Pr (кривая 2). По нашему мнению, вследствие большего ионного радиуса  $\text{Lu}^{3+}$  (0.091 нм), который в процессе роста замещает ион  $\text{Al}^{3+}$  (0.051 нм), происходит смещение кислорода из соседнего узла решётки и образование кислородной вакансии в октаэдре. В результате формируется антиузельный дефектный комплекс  $\text{Lu}_{\text{Al}}^{3+}-V_o$  (изовалентное замещение  $\text{Al}^{3+}$  ионом  $\text{Lu}^{3+}$ ), ответственный за люминесценцию в области 335 нм. Полоса свечения около 395 нм хорошо известна как переход в  $F^+$ -центре (анионная вакансия, захватившая один электрон) в ненасыщенных (НЧ) кристаллах LuAG (Babin V., Laguta V.V. et al., Phys. Stat. Sol., 2011, 239). В образце LuAG:Pr полосы свечения при 310 и 370 нм связаны с переходами  $5d \rightarrow 4f$ , а слабая полоса в области около 520 нм — с  $4f \rightarrow 4f$  переходами активатора  $\text{Pr}^{3+}$ . Независимо от присутствия иона  $\text{Pr}^{3+}$  в кристалле LuAG (рис. 3б, кривые 1 и 2) дополнительная полоса около 700 нм обусловлена примесными  $\text{Cr}^{3+}$ -центрами.

Таким образом, происхождение собственных  $F^+$ -центров с характерной полосой поглощения 375 нм и примесных  $Cr^{4+}$  центров, поглощающих при 285, 467 и 595 нм, в обоих образцах LuAG и LuAG:Pr определяется как технологическим процессом выращивания кристаллов, так и чистотой исходной шихты. Их более отчетливое проявление после облучения малой гамма-дозой  $10^3$  Гр связано с зарядовым состоянием собственных дефектов и изменением валентности примесных центров. Нестабильности видимой окраски и широкого пика КТВ при 340 К, возможно ответственны за усиление интенсивности длительного послесвечения, которое ухудшает качество медицинской визуализации при комнатной температуре, как для ПЭТ так и компьютерной томографии.

Далее изучена кинетика изменения интенсивности активаторного свечения, связанного с  $d \rightarrow f$  переходами ионов  $Pr^{3+}$  в процессе воздействия гамма-квантов  $^{60}Co$  на LuAG:Pr при 310 К.

Сначала были зарегистрированы спектры ГЛ при 310 К в неактивированных (НЧ) и активированных LuAG:Pr кристаллах (рис.4а, кривые 1 и 2). Видно, что при возбуждении гамма-квантами при 310 К в НЧ кристалле наблюдается полоса свечения 335 нм, связанная с антиузельным центром  $LuAl^{3+}$ , а также свечение на 700 нм, обусловленное  $Cr^{3+}$ -центром (кривая 1). В кристалле LuAG:Pr, помимо полосы ГЛ 700 нм, связанной с  $Cr^{3+}$ -центром, наблюдаются интенсивные активаторные полосы ГЛ при 310 и 375 нм, обусловленные переходами  $5d \rightarrow 4f$ , а также более слабая полоса в области 510 нм, связанная с переходами  $4f \rightarrow 4f$  активатора  $Pr^{3+}$  (кривая 2). На рис. 4б приведена дозовая зависимость интенсивности ГЛ в максимуме полосы  $Pr^{3+}$  при 310 нм в диапазоне доз до  $2.9 \cdot 10^3$  Гр (60 мин).



**Рис.4. а) Спектры ГЛ при 310 К в кристаллах LuAG (1) и LuAG:Pr (2) б) Дозовая зависимость ГЛ при максимуме полосы  $Pr^{3+}$  при 310 нм в диапазоне доз до  $2.9 \cdot 10^3$  Гр (60 мин), при 310 К**

Наблюдается медленное линейное уменьшение интенсивности примерно на 9–10% до дозы  $1.4 \cdot 10^3$  Гр, что связано с захватом дырок ионом  $Cr^{3+}$ , тогда как электроны захватываются другими ловушками. При более высоких дозах

наблюдается насыщение, что обусловлено установлением равновесия между скоростями генерации электронно-дырочных пар и излучательной рекомбинацией на центрах  $\text{Pr}^{3+}$ .

Полученные результаты свидетельствуют о противоположных зависимостях кинетики накопления центров окраски с характерными полосами поглощения 238 ( $F$ -центры), 375 ( $F^+$ -центры), 288 (2), 467 (4) и 601 нм (ионы  $\text{Cr}^{4+}$ ), а также об изменении кинетики полосы ГЛ 310 нм (переход  $5d \rightarrow 4f$   $\text{Pr}^{3+}$ ) (Рис.4б) с ростом дозы гамма-облучения. Уменьшение выхода полосы ГЛ 310 нм на 9-10% в кристаллах  $\text{LuAG:Pr}$ , обусловлено влиянием собственных ( $F^+$ -центры) и примесных ( $\text{Cr}^{4+}$ ) дефектов, которые конкурируют в захвате носителей заряда с излучательной рекомбинацией на центрах  $\text{Pr}^{3+}$ . Обнаруженные корреляционные нестабильности пика КТВ при 340 К и центров окраски 375 ( $F^+$ -центры) и 601 нм (ионы  $\text{Cr}^{4+}$ ) в  $\text{LuAG:Pr}$  при 300 К, возможно, приводят к возникновению нежелательного длительного послесвечения, что критично для ключевых узлов медицинских систем визуализации — как ПЭТ, так и компьютерной томографии.

Как показали результаты кинетики накопления центров окраски и изменения выхода активаторного свечения (Рис.4б), количество центров окраски, наводимых гамма-излучением, достигает насыщения в интервале  $\gamma$ -доз ( $10^3 \div 10^6$ ) Гр и связано с дорадиационными (ростовыми) дефектами. В отличие от этого потоки нейтронов из-за упругого взаимодействия с атомами решетки смещают атомы из узлов решетки и тем самым создают дефекты кристаллической структуры. Так что изучение влияния нейтронно-гамма-облучения (реакторного облучения) на оптическую прозрачность и активаторное свечение важно в экспериментальной физике высоких энергий.

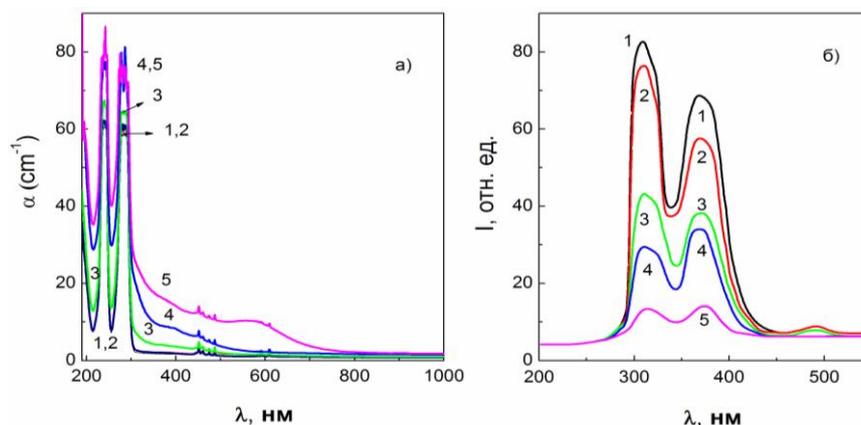
В четвертой главе диссертации «**Нейтронно-индуцированные центры окраски и рекомбинации и их влияние на активаторное свечение в номинально чистых и активированных монокристаллах  $\text{Lu}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}:\text{Pr}$** » приведены результаты исследования эффектов облучения быстрыми нейтронами на оптические характеристики в  $\text{Lu}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$  и  $\text{Lu}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}:\text{Pr}$ .

После облучения флюенсом  $10^{16} \text{ см}^{-2}$  быстрых нейтронов в НЧ образцах  $\text{LuAG}$  наблюдались полосы поглощения в УФ области 250 и 298 нм и слабые широкие полосы в видимой области спектра от 350 до 600 нм. С ростом флюенса до  $10^{17} \text{ см}^{-2}$  происходит более быстрый рост полос ОП 250, 298 нм и появляются широкие полосы (350÷600) нм по сравнению с эффектами при флюенсе  $10^{16} \text{ см}^{-2}$ , что свидетельствовало об образовании центров окраски и росте их концентрации. После разложения широких полос (350÷600) нм на гауссианы были выделены три компонента с максимумами при 387, 458 и 573 нм. Поскольку кислородная подрешетка в кристалле значительно плотнее алюминиевой, а атом кислорода легче атома Al, в облученных нейтронами образцах преобладают кислородные дефекты. Поэтому нейтронно-индуцированная полоса оптического поглощения около 250 нм связана с  $F$ -центрами, полоса 298 нм — с дырочным  $\text{O}_i^-$ -центром, а полоса 375 нм — с  $F^+$ -центром.

Полоса оптического поглощения 573 нм может быть обусловлена электронным центром, связанным с кислородной вакансией, расположенной рядом с катионным узлом примесного металла, замещающего катион Al. Кроме того, образующиеся при нейтронном облучении в большой концентрации F- и F<sup>+</sup>-центры в процессе их диффузии по решётке могут агрегировать по реакции  $F^+ + F^+ \rightarrow F_2^+$ , то есть формировать бивакансию кислорода с тремя захваченными электронами. Далее для удобства обозначим такие центры как  $V_O(C_{dop})/F_2^+$ . Отметим, что данные центры не наблюдаются при гамма-облучении высокой дозой 10<sup>7</sup> Гр, поскольку энергия гамма-квантов <sup>60</sup>Со недостаточна для эффективного образования подобных дефектов (см. Главу III, рис. 1б).

Чтобы детально установить кинетику генерации нейтронно-индуцированных дефектов и их влияние на активаторные центры, нами исследованы оптические свойства кристаллов LuAG:Pr до и после облучения флюенсами быстрых нейтронов в условиях, аналогичных тем, которые использовались для НЧ LuAG, с целью корректного сравнения.

На рис. 5а приведены спектры ОП активированных образцов LuAG:Pr до и после нейтронного облучения. С увеличением флюенса от 10<sup>16</sup> (кривая 3) до 5·10<sup>17</sup> см<sup>-2</sup> (кривая 5) наблюдается рост интенсивностей полос 240 и 285 нм. Такое увеличение, по-видимому, связано с существенным перекрытием с полосами ОП 250 и 298 нм, выявленными в НЧ LuAG, интенсивности которых резко возрастают при повышении флюенса нейтронов, а также с возможным изменением валентности активатора, т.е. переходом Pr<sup>3+</sup>→Pr<sup>4+</sup>.



**Рис.5. Спектры поглощения (а) и люминесценции, индуцированные <sup>60</sup>Со γ - облучением (б) кристаллов LuAG:Pr: исходный (1), после облучения флюенсами быстрых нейтронов 10<sup>15</sup> (2), 10<sup>16</sup> (3), 5 10<sup>16</sup> (4) и 10<sup>17</sup>см<sup>-2</sup> (5)**

В видимой области спектра, помимо мультиплетных линий поглощения Pr<sup>3+</sup>, появляются наведённые полосы 385 и 570 нм (рис. 5а, кривые 3–5), аналогичные тем, что наблюдаются в НЧ LuAG после нейтронного облучения. Сравнение результатов гауссового разложения видимой части спектров показало их совпадение со спектрами НЧ LuAG и подтверждает, что данные

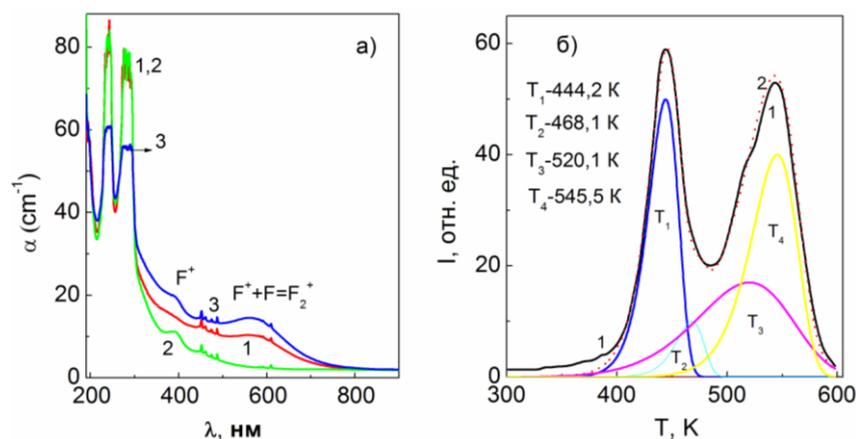
полосы принадлежат собственным радиационным дефектам в кислородной и алюминиевой подрешётках и не связаны с активатором.

Из полученных данных по кристаллам НЧ и LuAG:Pr отмечаем, что независимо от присутствия иона  $\text{Pr}^{3+}$  в кристалле LuAG после облучения флюенсами быстрых нейтронов  $\geq 10^{16} \text{ см}^{-2}$  появляются полосы ОП 387 нм  $F^+$ -центра и 573 нм  $V_{\text{O}}(C_{\text{dop}})/F_2^+$ , т.е. действительно они обусловлены структурными дефектами смещения в подрешетках кислорода. Из этого следует, что эти центры, наведенные нейтронами, могут захватывать электроны из зоны проводимости и стабилизируют  $\text{Pr}^{4+}$ -состояние. Но в таком случае должно уменьшиться активаторное свечение  $\text{Pr}^{3+}$  при рекомбинационном процессе.

При воздействии  $\gamma$ -квантами  $^{60}\text{Co}$  на исходный образец LuAG:Pr при 310 К в спектре ГЛ наблюдаются полосы свечения активатора  $\text{Pr}^{3+}$  310, 325 и 375 нм (рис.5б, кривая 1). Видно, что при флюенсах быстрых нейтронов  $\geq 10^{16} \text{ см}^{-2}$  интенсивности активаторных полос ГЛ 310, 325 и 375 нм при 310 К сильно уменьшаются (кривые 3–5). Это возможно связано с нарушением передачи возбуждения от матрицы к активатору. Для подтверждения именно этого процесса проведены следующие эксперименты.

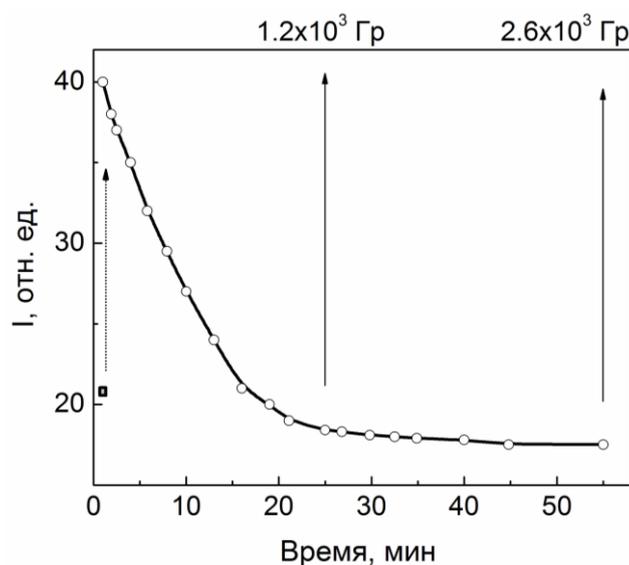
Измерены спектры ОП (рис.6а) последовательно после: (1) воздействия флюенсом нейтронов  $10^{17} \text{ см}^{-2}$ , (2) нагрева до 605 К (тепловое опустошение носителей заряда из ловушек), (3)  $\gamma$ -облучения дозой  $10^3 \text{ Гр}$  (заполнение ловушек). При этом на интегральной кривой ТВ LuAG:Pr в образце, облученном флюенсом  $10^{17} \text{ см}^{-2}$ , после нагрева до 605 К и гамма облучения дозой  $10^3 \text{ Гр}$  для заполнения ловушки, наблюдаются пики при 445, 515 и 545 К (рис. 6б), которые совпали с пиками НЧ LuAG. Далее экспериментальная кривая ТВ (рис.6б, кривая 1) анализировалась с использованием модели кинетики первого порядка уравнения в [Kitis, G., et.al., Jour. Of Phys.1998. 2636] и с помощью программного обеспечения GlowFit [Puchalska, M., et.al.,Rad.Measur. 2006. 659]. На основе этого после разложения на гауссианы экспериментальной кривой ТВ определены интенсивности и положения пиков ( $T_m$ ) при 444.2, 468.1, 520.1 и 545.5 К, и глубины ловушек (энергии активации  $E_t$ ). Используя значения  $T_m$  и  $E_t$  в известном уравнении в [Kitis, G., et.al., Jour. of Phys.1998. 2636], вычислены частотные факторы для гауссианов  $s(s^{-1})$ .

Эти результаты свидетельствуют, что нейтронно-индуцированные центры окраски образуют в запрещенной зоне кристалла LuAG:Pr локальные энергетические уровни, на которых захватываются носители зарядов на условиях электронейтральности, а их освобождение при передаче матрице тепловой энергии и миграция носителей к активаторным центрам с последующей рекомбинацией приведет к активаторному свечению  $\text{Pr}^{3+}$  в LuAG:Pr (Рис.6б, кривая 1).



**Рис.6. Спектры поглощения кристаллов LuAG:Pr (а): после последовательных воздействий флюенсом нейтронов  $10^{17} \text{ см}^{-2}$  (1), термической обработки (2),  $\gamma$ -облучения дозой  $10^3$  Гр (3). Кривые ГЛ LuAG:Pr (б): образца, облученного флюенсом нейтронов  $10^{17} \text{ см}^{-2}$ , после термической обработки и гамма облучения дозой  $10^3$  Гр (сплошная кривая- 1), его составляющие T1, T2, T3 и T4 и их сумма (пунктирная-2).**

Далее при 310 К были измерены спектры ГЛ в максимуме полосы 310 нм, связанной с переходами  $5d \rightarrow 4f$  в  $\text{Pr}^{3+}$ , до гамма-дозы  $2.6 \cdot 10^3$  Гр для образца LuAG:Pr, предварительно облучённого быстрыми нейтронами с флюенсом  $10^{17} \text{ см}^{-2}$  и затем термически обработанного для опустошения ловушек, влияющих на световыход  $\text{Pr}^{3+}$  в процессе гамма-индуцированной генерации горячих электронов и дырок. Полученные результаты приведены на рис. 7.



**Рис.7. Дозовая зависимость полосы ГЛ в максимуме 310 нм  $\text{Pr}^{3+}$  до дозы  $2.6 \cdot 10^3$  Гр, при 310 К облученного нейтронами  $10^{17} \text{ см}^{-2}$  и термически обработанного образца LuAG:Pr. Точка слева внизу ■ показывает интенсивность ГЛ через  $t=2$  мин для образца, только облученного в реакторе и не подвергнутого термической обработке**

Отмечается быстрое линейное уменьшение выхода свечения в полосе 310 нм примерно на ~50% в течение первых 16 мин (до набора дозы  $1.2 \cdot 10^3$  Гр). При увеличении времени облучения до 55 мин (доза  $2.6 \cdot 10^3$  Гр) кинетика достигает уровня насыщения. Одновременно увеличиваются коэффициенты оптического поглощения полос 385 нм (F-центр) и 570 нм ( $F_2^+$ -центр) (см. рис. 6а, кривая 3).

Следует отметить, что интенсивность полосы ГЛ 310 нм в термообработанном образце оказалась примерно в два раза выше, чем в образце, облучённом флюенсом нейтронов  $10^{17}$  см<sup>-2</sup> и не подвергавшемся термообработке. Интенсивность этого необработанного образца показана чёрным квадратиком в левом нижнем углу рисунка 7.

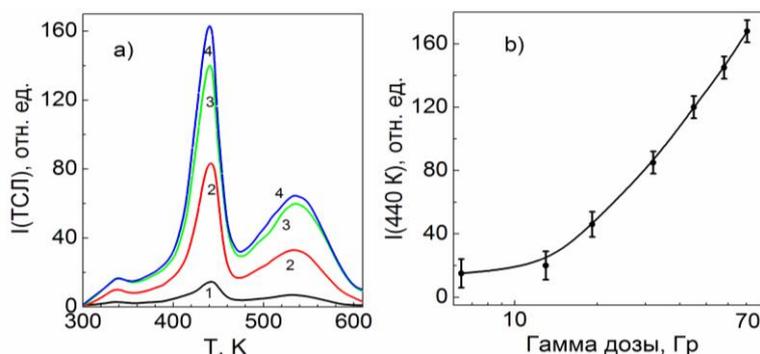
Изучение оптического обесцвечивания нейтронно-наведенных центров окраски показало, что фотообесцвечивание на длине волны 580 нм освобождает электроны преимущественно из ловушек, связанных с нейтронно-индуцированными агрегатными  $F_2^+$ -центрами. В результате наблюдается снижение интенсивности пика КТВ при 440 К на ~50%, а пиков при 520 и 545 К — на ~22% по сравнению с исходным состоянием. Эти данные подтверждают участие  $F_2^+$ -центров в качестве ловушек электронов в рекомбинационном процессе термовысвечивания с дырочными центрами  $Pr^{4+}$ .

Таким образом, облучение флюенсами быстрых нейтронов выше  $10^{15}$  см<sup>-2</sup> приводит к значительному снижению световыхода ГЛ при возбуждении источником <sup>60</sup>Со в полосах 310, 325 и 370 нм при 310 К в монокристаллах LuAG:Pr<sup>3+</sup> (см. рис.5б, кривые 2-5). Это связано с ростом концентрации нейтронно-индуцированных дефектов (электронных центров окраски  $F^+$  и  $F_2^+$ ), проявляющихся в характерных полосах ОП 387 и 570 нм (рис.5а, кривые 3-5). Возрастание этих дефектов ограничивает эксплуатационный ресурс сцинтилляторов при флюенсах быстрых нейтронов  $>10^{15}$  см<sup>-2</sup> и может при высокой концентрации и глубине проникновения придавать материалу новые свойства, полезные для термолюминесцентного дозиметра (ТЛД).

В пятой главе диссертации **«Возможность создания высокодозного гамма-дозиметра из кристаллов LuAG:Pr, обработавших ресурс сцинтилляционных детекторов»** представлены результаты исследования, возможности преобразования сцинтилляторных детекторов на основе LuAG:Pr, в ТЛД путем радиационной и термической обработки. Для этого образцы LuAG:Pr после облучения флюенсом быстрых нейтронов  $10^{17}$  см<sup>-2</sup> подвергали термообработке на воздухе, затем облучали  $\gamma$ -квантами источника <sup>60</sup>Со при температуре 310 К в интервале доз (6.4÷70.4) Гр при малой мощности 0.064 Гр/с.

Термолюминесцентный метод имеет более низкий концентрационный порог чувствительности к наведенным дефектным центрам ( $\sim 10^{14}$  см<sup>-3</sup>), чем метод оптического поглощения ( $\sim 10^{16}$  см<sup>-3</sup>). Учитывая это, после каждой добавленной гамма-дозы при 0.064 Гр/с были зарегистрированы КТВ в интервале температур от 300 до 605 К, которые представлены на Рисунке 8а. Наблюдаемые пики КТВ 340, 440, 515 и 545 К, с ростом  $\gamma$ -дозы 6.4 Гр (кривая 1), 32 Гр (кривая 2), 58 Гр (кривая 3) и 70.4 Гр (кривая 4), их температурные

максимумы не изменяются, интенсивность увеличивается в соответствии с концентрацией локализованных носителей зарядов, а у изолированного пика с максимумом при 440 К рост самый быстрый (Рис. 8а). На рисунке 8б построены дозные зависимости пика КТВ с максимумом при 440 К по точкам после каждой дозы облучения от 6.4 до 70.4 Гр. С ростом дозы температурные положения максимумов пиков КТВ не изменяются (Рис.8а, кривые 1-4), что является необходимым требованием с точки зрения использования материала в качестве ТЛД. Примеры такого линейного характера дозовой зависимости выхода термостимулированной люминесценции показаны для промышленного дозиметрического кристалла LiF:Mg,Cu,P (Horowitz Y. S., *et.al.*, Radia. Protec. Dosim., 1990, 279.).



**Рис.8. КТВ сцинтилляторного монокристалла LuAG:Pr (а): последовательные воздействия: облучение флюенсом нейтронов  $10^{17} \text{ см}^{-2}$ , термическая обработка, гамма-облучение при мощности 0.064 Гр/с  $\gamma$ -дозами 6.4 (1), 32 (2), 58 (3) и 70.4 Гр (4), (б): дозная зависимость пика 440 К**

Однако из-за ограниченного количества ловушек, ответственных за основной дозиметрический пик ТЛД при 500 К в кристаллах  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3\text{:C}$  и LiF:Mg,Cu,P, насыщение в интервале доз (10÷20) Гр наступает быстро. В отличие от них, у LuAG:Pr пик при 440 К не достигает насыщения даже при дозе 70 Гр (рис. 8б), что свидетельствует о более высоком дозовом ресурсе по сравнению со стандартными дозиметрами на основе лёгких элементов.

Далее были измерены кинетики затухания пиков КТВ 340, 440, 515 и 545 К для оценки зарядовой стабильности центров захвата при разных временах выдержки при комнатной температуре (хранение в темноте) после  $\gamma$ -облучения одинаковой дозой, что является необходимым техническим параметром ТЛД. Кривые ТВ после выдержки при 305 К в течение 30 мин, 1, 3 и 5 часов, после  $\gamma$ -облучения одинаковой дозой 50 Гр при 310 К, показали, что пики КТВ 440, 515 и 545 К обнаруживают вариации интенсивности в пределах 10 %, то есть обладают зарядовой стабильностью соответствующих ловушек.

Используя определенные нами значения двух параметров захвата носителей, а именно энергии активации ( $E \approx 1.21 \text{ эВ}$ ) и частотного фактора ( $s \approx 1.6 \cdot 10^{11} \text{ с}^{-1}$ ) для пика КТВ 440 К (см. Главу IV), и формулу (1) для определения времени жизни электронов в ловушках при 300 К из (Gartia R. K., *at.al.*, Nucl.

Instrum. And Meth. 2011, 30), оценена временная стабильность пика КТВ 440 К при 305 К.

$$\tau = s^{-1} \exp\left(\frac{E}{kT}\right) \quad (1)$$

где  $\tau$  - время жизни;  $E$  - глубина ловушки;  $s$  - частотный фактор;  $T$  - температура хранения в абсолютной шкале,  $k$  - постоянная Больцмана. Расчетное значение  $\tau=38.2$  года хранения при  $T=300$  К для дозиметрического пика КТВ 440 К.

На основании расчета времени жизни и измеренной стабильности показаний при выдержке до 5 часов после гамма облучения можно считать, что нейтронно-наведенный пик КТВ 440 К в LuAG:Pr может быть потенциальным кандидатом для дозиметрических целей как ТЛД. Кроме того LuAG:Pr не уступает  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>:С в механической прочности, имеет незначительный фоновый сигнал, его поверхность не реагирует с окружающей атмосферой, что делает целесообразными дальнейшие исследования применимости предварительно нейтронно-облученных и термообработанных сцинтилляторных монокристаллов LuAG:Pr к индивидуальной ТЛД поглощенной дозы <sup>60</sup>Со гамма-излучения до 70 Гр для стерилизации изделий пищевых продуктов, а также для дозиметрического контроля оборудования атомных станций, радиационного контроля хранилищ отработавшего ядерного топлива.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе проведенных исследований по диссертации на соискание ученой степени доктора философии (PhD) по физико-математическим наукам на тему «Влияние стабильности ростовых и радиационных дефектов монокристаллов Lu<sub>3</sub>Al<sub>5</sub>O<sub>12</sub>:Pr на кинетику рекомбинации» сделаны следующие выводы:

1. Показано, что происхождение собственных  $F^+$  -центров с характерной полосой поглощения 375 нм и примесных Cr<sup>4+</sup> центров, поглощающих в областях 285, 465 и 595 нм, в образцах LuAG и LuAG:Pr обусловлено как технологическим процессом выращивания кристаллов, так и чистотой исходной шихты. Более отчетливое проявление этих центров после гамма-облучения связано с зарядкой собственных дефектов и изменением электронного состояния (валентности) примесных дефектов.

2. Показано, что при выдержке облученных  $\gamma$ -квантами (доза 10<sup>3</sup> Гр,  $T = 310$  К) образцов в течение 24 часов при комнатной температуре уменьшение интенсивности пика термовысвечивания (КТВ) при 340 К и полос оптического поглощения (ОП) при 375, 467 и 595 нм связано с освобождением носителей заряда из мелких ловушек (их термической активацией при 310 К), их последующей миграцией и излучательной рекомбинацией с центрами свечения.

3. Показано, что с ростом времени воздействия гамма-потока до дозы 1.4·10<sup>3</sup> Гр уменьшение интенсивности выхода активаторной полосы ГЛ 310 нм ~9% в LuAG:Pr, обусловлено собственными ( $F$  и  $F^+$  -центрами), и примесным (Cr<sup>4+</sup>) дефектами, конкурирующими в захвате носителей заряда с излучательной рекомбинацией на центрах Pr<sup>3+</sup>.

4. Уменьшение интенсивности полос ГЛ активаторного  $\text{Pr}^{3+}$  -центра с ростом флюенса быстрых нейтронов  $> 10^{15} \text{ см}^{-2}$  с учетом предложенной схемы энергетических зон, уровней и переходов в монокристалле  $\text{LuAG:Pr}$ , включающей гамма-индуцированную генерацию электронов и дырок, миграцию, флуоресценцию и захват свободных дырок на активаторе, захват части электронов на ловушки и их термическое освобождение с фосфоресценцией, можно объяснить следующим образом: - с одной стороны, возможна реабсорбция свечения  $\text{Pr}^{3+}$  в спектральной области (300÷400) нм центрами окраски (электронными  $F^+$  и дырочными  $O^-$ ), концентрация которых растет с ростом флюенса нейтронов; - с другой стороны, данные по дополнительному облучению  $\gamma$  -квантами  $^{60}\text{Co}$  после термической обработки нейтронно-облученного образца приводят к предположению о захвате дырки  $\text{Pr}^{3+}$ - центром с образованием дырочного  $\text{Pr}^{4+}$ -центра, вследствие чего снижается концентрация  $\text{Pr}^{3+}$ -центров и увеличивается концентрация электронных  $F^+$ - и  $V_O(C_{\text{dop}})/F_2^+$  центров.

5. После фотоподсветки на длине волны 580 нм уменьшение интенсивности полосы ОП 573 нм, пиков КТВ 440, 520 и 545 К и увеличение интенсивности полос ОП 240 и 285 нм  $\text{Pr}^{3+}$  -центра можно приписать к рекомбинации части освобожденных из  $V_O(C_{\text{dop}})/F_2^+$  -центра электронов с  $\text{Pr}^{4+}$ -центром с образованием  $\text{Pr}^{3+}$ . То есть нейтронно-индуцированный электронный центр, с одной стороны, становится конкурентом люминесцентному  $\text{Pr}^{4+}$ -центру в захвате электронов, а с другой стороны, приводит к стабильности  $\text{Pr}^{4+}$  -центра, также отвечающей за снижение выхода активаторного свечения сцинтиллятора в рекомбинационном процессе.

6. Показано, что сцинтиллятор на основе монокристалла  $\text{LuAG:Pr}$  с оптической прозрачностью в области сцинтиляционного свечения и центров рекомбинационной люминесценции, является радиационно-стабильным к воздействию быстрых нейтронов до флюенса  $10^{15} \text{ н/см}^2$ .

7. Впервые показана возможность использования сцинтилляторных монокристаллов  $\text{LuAG:Pr}$ , которые отработали допустимый ресурс детекторов быстрых нейтронов в медицинских томографах, в термолюминесцентные дозиметры поглощенной  $^{60}\text{Co}$  гамма-дозы в значительно расширенном интервале доз (13÷70.4) Гр (по сравнению со стандартными ТЛД) путем термической обработки предварительно нейтронно-облученных кристаллов.

**SCIENTIFIC COUNCIL DSc.02/30.12.2019.FM/T.33.01 ON AWARD OF  
SCIENTIFIC DEGREES AT THE INSTITUTE OF NUCLEAR PHYSICS**

---

**INSTITUTE OF NUCLEAR PHYSICS**

**KHAYITOV ISMOIL AKHATKUL O'G'LI**

**INFLUENCE OF THE STABILITY OF GROWTH AND RADIATION  
DEFECTS OF  $\text{Lu}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}:\text{Pr}$  SINGLE CRYSTALS ON THE KINETICS OF  
RECOMBINATION**

**01.04.07 – Physics of condensed matters**

**DISSERTATION ABSTRACT**  
**of the Doctor of Philosophy (PhD) on Physical and Mathematical Sciences**

**Tashkent – 2025**

**The topic of the dissertation for Doctor of Philosophy (PhD) in physical and mathematical sciences is registered with the Higher Attestation Commission under the Ministry of Higher Education, Science and Innovation of the Republic of Uzbekistan under number B2024.2. PhD/FM1116**

The doctoral (PhD) dissertation research was carried out at the Institute of Nuclear Physics of the Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan.

The abstract of the dissertation was posted in three (Uzbek, Russian, English (resume)) languages on the website of the Scientific Council at [www.inp.uz](http://www.inp.uz) and on the website of “ZiyoNet” information and educational portal at [www.ziyo.net](http://www.ziyo.net).

**Scientific supervisor:** **Ibragimova Elvira Memetovna**  
doctor of Physical and Mathematical Sciences, professor

**Official opponents:** **Radjapov Sali Ashirovich**  
Doctor of Physical and Mathematical Sciences,  
Senior Researcher

**Boyboboeva Sokhiba Turamirzaevna**  
Doctor of Philosophy (PhD) in Physical and Mathematical  
Sciences, Senior Researcher

**Leading organization:** **National University of Uzbekistan named after  
Mirzo Ulugbek**

The defense of the dissertation will be held on “\_\_\_” \_\_\_\_\_ 2025 at \_\_\_ at the meeting of the Scientific Council DSc.02/30.12.2019.FM/T.33.01 at the Institute of Nuclear Physics (Address: 100214, Tashkent, Ulugbek settlement, Institute of Nuclear Physics. Tel.: (+99871) 289-31-41; fax: (+99871)289-36-65; e-mail: [info@inp.uz](mailto:info@inp.uz)).

The doctoral (PhD) dissertation can be looked through at the Information Resource Center of the Institute of Nuclear Physics (registration number \_\_\_\_\_) Address: Institute of Nuclear Physics, Ulugbek settlement, 100214, Tashkent city, tel. (+99871) 289-31-19.

The abstract of dissertation was distributed on “\_\_\_” \_\_\_\_\_ 2025.  
(Registry record No. \_\_\_\_\_ dated “\_\_\_” \_\_\_\_\_ 2025).

**M. Yu. Tashmetov**  
Chairman of the Scientific Council  
on Award of Scientific Degrees,  
D. Ph.-M.S., Professor

**O.R. Todjiboev**  
Scientific Secretary of the Scientific  
Council on Award of Scientific Degrees,  
PhD Ph.-M.S., Senior Researcher

**S.B.Igamov**  
Chairman of the Scientific Seminar  
at the Scientific Council on Award  
of Scientific Degrees, D. Ph.-M.S.,  
Senior Researcher

## INTRODUCTION (PhD thesis annotation)

**The aim of the research work** is to study the influence of unstable and stable growth and radiation-induced defect color centers on the process of recombination luminescence of  $\text{Pr}^{3+}$  ions in scintillator aluminum-lutetium single crystals with the garnet structure  $\text{Lu}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}:\text{Pr}$ .

### **The tasks of the research work:**

to determine the local atomic structure of color and luminescence centers in nominally pure and activated samples after gamma irradiation in a dose range and to identify growth defects;

to study the kinetics of relaxation of unstable centers and accumulation of stable color centers after irradiation with gamma quanta in the dose range of  $(10^2 \div 10^6)$  Gy;

to study the kinetics of  $\text{Pr}^{3+}$  ion luminescence during exposure to gamma quanta, and to determine the dose limit of the scintillator;

to determine the local atomic structure of color and luminescence centers after irradiation with fast neutrons in the fluency range and to identify radiation-induced defects;

to study the influence of neutron-induced color centers on the luminescence of  $\text{Pr}^{3+}$  and to determine the limiting fluency of fast neutrons for the scintillator;

to investigate the possibilities of using neutron-irradiated scintillation single crystal  $\text{Lu}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}:\text{Pr}$  in thermoluminescent high-dose gamma dosimetry;

to develop recommendations for improving the optical, luminescent and scintillator characteristics of  $\text{Lu}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}:\text{Pr}$  and the conditions of their performance.

**The objects of the research work** are single crystals of non-activated (nominal pure)  $\text{Lu}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$  as a crystalline matrix and specially activated with  $\text{Pr}^{3+}$  ions as a scintillator.

**The subject of the research work** are radiation-induced processes of generation, migration and localization of charge carriers and defects, their influence on the light-yield of activator luminescence of  $\text{Pr}^{3+}$  ions.

### **Scientific novelty of the research work:**

intrinsic charged anion vacancies  $F^+$  and uncontrolled impurity  $\text{Cr}^{3+}$  centers were determined in single crystals of nominally pure LuAG and specially activated LuAG:Pr, the origin and change of which under gamma-irradiation is caused by the crystal growth technology and the impurity composition of the batch, and also due to the charging of oxygen vacancies ( $\text{Cr}^{3+} \rightarrow \text{Cr}^{4+}$ );

the correlation of instability was found between the thermal emission peak at 340 K and the intrinsic  $F^+$  and impurity  $\text{Cr}^{4+}$  color centers after gamma irradiation of LuAG:Pr to the dose of  $10^3$  Gy at 310 K and the holding time increase to 24 hours, which is associated with the mechanisms of charge carrier release from shallow capture levels at 310 K and their migration to the radiative recombination centers; these traps are the cause of a long-term afterglow after fast scintillations;

it has been shown that a decrease in the intensity of the activator luminescence yield by ~9% with an increase in the gamma dose to  $1.4 \cdot 10^3$  Gy, is due to the mechanism of competition of defect centers ( $F$ ,  $F^+$  and  $\text{Cr}^{4+}$ ) in the LuAG crystal

lattice in the capture of charge carriers with activator  $\text{Pr}^{3+}$  centers, which prevents their radiative recombination;

it is proved that the decrease in the intensity of the gamma luminescence bands of the activator  $\text{Pr}^{3+}$  center after irradiation with fast neutrons to a fluency of  $>10^{15}$   $\text{cm}^{-2}$  followed by their thermal bleaching or photoillumination is explained by the combined two mechanisms: - (1) by the reabsorption of the activator glow of  $\text{Pr}^{3+}$  in the spectral region of 300÷400 nm by electron  $F^+$  and hole  $\text{O}_i^-$  color centers, the concentration of which grows with increasing neutron fluency, and - (2) by the electron transfer from the neutron-induced  $V_{\text{O}}(C_{\text{dop}})/F_2^+$  center to the hole  $\text{Pr}^{4+}$  center with a radiative transition in the  $\text{Pr}^{3+}$  ion;

it is shown that the recombination pairs of centers responsible for the scintillation characteristics (fast fluorescence of 20 ns in LuAG:Pr) are transformed into other thermoluminescent recombination pairs responsible for the slow phosphorescence of the thermoluminescence peak at 440 K, by rearranging the electronic structure of only reactor-radiation-induced defects.

### **Implementation of the research results.**

Basing on the study of the radiation-induced color centers and their influence on the yield of activator luminescence in the recombination process:

the origin of intrinsic charged anionic vacancies  $F^+$  and uncontrolled impurity  $\text{Cr}^{4+}$  centers in nominally pure LuAG and specially doped LuAG:Pr single crystals;

the correlation between the thermoluminescence peak at 340 K and intrinsic  $F^+$  and impurity  $\text{Cr}^{4+}$  color centers after gamma-irradiation on LuAG:Pr to the dose of  $10^3$  Gy at 310 K;

the reason for decreasing the Pr activator luminescence intensity in ~9% after a higher gamma dose irradiation to  $1.4 \times 10^3$  Gy;

the mechanisms of the Pr gamma-luminescence decreasing after the fast neutron irradiation followed by thermal or photo- bleaching;

the method of transformation of LuAG:Pr scintillation fast fluorescence of 20 ns) into thermoluminescent recombination pairs responsible for the slow phosphorescence

are used by the Department of Biomedical Engineering, Biophysics and Informatics of the Bukhara State Medical Institute in the educational process within the framework of the bachelor's degree program in the course "Biomedical Engineering" and "Medical Biology" (textbook "Medical Electronics" (S.Kh. Umarov. - Bukhoro: Durdona, 2024.), recommended for students of universities, technical universities (Malumotnoma No. 1-A/562 dated 06.07.2024) (letter from the Bukhara State Medical Institute No. 04/1055 dated 04.02. 2025) , and also by foreign researchers (references in international scientific journals: Physics of the Solid State, Vol.61, No.5, pp.735-741, (2019); Vacuum, Vol. 197, 110819, (2022), Japan Jour. of Appl. Physics, Vol.62, 010613, (2023).

The use of these results allowed students to expand their understanding of the causes of visualization deterioration and reducing light output of nuclear medical diagnostic detectors, associated with uncontrolled technological growth defects that capture charge carriers when exposed to gamma quanta; the conversion of

scintillation detectors into thermoluminescent gamma dosimeters for comprehensive sterilization of medical devices. These new results were used to explain the formation of nonlinear optical waveguide structures in the LuAG:Pr crystal using fs laser or stable luminescence of Pr in complex ceramics and glasses, which opens up the possibility of their use for the creation of compact and high-performance lasers and amplifiers, materials for the diagnostics of thermonuclear plasma.

**Structure and volume of the dissertation.** The dissertation consists of an introduction, five chapters, a conclusion and a list of references. The volume of the dissertation is 105 pages.

**ELON QILINGAN ILMIY ISHLAR RO'YXATI**  
**СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ**  
**OF PUBLISHED WORKS**

**I bo'lim (I часть, part I)**

1. Islamov A.Kh., Ibragimova E.M., Khaitov I.A., Vil'danov R.R., and Amonov M.Z. Color and Luminescence Centers in LuAG and Pr:LuAG Crystals Before and After  $^{60}\text{Co}$   $\gamma$ -Irradiation // Optics and Spectroscopy. – Maik Nauka Publishing/Springer SBM, 2018. – Vol. 125. No. 1. – pp. 49–53. (№1. Web of Science; IF=0.7).
2. Islamov A.Kh., Ibragimova E.M., Khaitov I.A., Vil'danov R.R., Kudratov Kh.N. Effect of gamma-quanta and fast neutrons on color and emission centers in LuAG and LuAG:Pr crystals // Optical Materials. – Elsevier, 2019. – Vol. 96. – id. 109344. (№1. Web of Science; IF=3,8, Q1)
3. Islamov A.Kh., Ibragimova E.M., Khaitov I.A., and Vil'danov R.R. Charge Transfer between Neutron-Induced and Activator Centers in LuAG:Pr Single Crystal // Optics and Spectroscopy. – Maik Nauka Publishing/Springer SBM, 2022. – Vol. 130. No. 3. – pp. 180-187. (№1. Web of Science; IF=0,7)
4. Ибрагимова Э., Хайитов И., Исламов А. Кинетика накопления носителей заряда при гамма- облучении в отработанных сцинтилляционных кристаллах LuAG:Pr // Узбекский физический журнал. – Ташкент: Институт ионно-плазменных и лазерных технологий АН РУз, 2024. – №2 (26). – С. 58-65 (01.00.00. № 5)

**II bo'lim ( II часть, part II)**

5. Исламов А.Х., Ибрагимова Э.М., Хайитов И.А., Вильданов Р.Р., Кудратов Х.Н. Гамма-индуцированные центры окраски и свечения в монокристаллах чистых  $\text{Lu}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$  и активированных  $\text{Lu}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}:\text{Pr}$  // II Международный научный форум «Ядерная наука и технологии» 24-27 июня 2019. – Алматы (Казахстан), 2019. – С.87-88.
6. Исламов А., Ибрагимова Э., Хайитов И., Вильданов Р., Насиров А. Влияние нейтронно-индуцированных центров окраски на активаторные центры в монокристалле LuAG:Pr // Международная конференция «Фундаментальные и прикладные вопросы физики» 22-23 сентября 2020. – Ташкент: ФТИ АН РУз, 2020. – С.88-92.
7. Ibragimova E.M., Khayitov I.A. Suppression of the activator luminescence of  $\text{Lu}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}:\text{Pr}$  scintillator crystals by initial defects charged by gamma-irradiation // International Conference «Nuclear Medicine» dedicated to the 80<sup>th</sup> anniversary of the Academy of Sciences of Uzbekistan, 3-5 October, 2023. – Bukhara (Uzbekistan), 2023. – pp. 29.

8. Ибрагимова Э.М., Хайитов И.А. Кинетика накопления носителей заряда при гамма-облучении в нейтронно-облученных легированных кристаллах LuAG:Pr // “Фундаментальные и прикладные проблемы современной физики”: Труды Международной конференции, 19-21 октября 2023. – Ташкент: Физико-технический институт и Институт материаловедения АН РУз, 2023. – С.14-15.
9. Ибрагимова Е.М., Хайитов И.А. Влияние нейтронного облучения на собственное свечение в номинально чистых кристаллах LuAG // Fundamental and Applied Research in Physics: Proceedings of International Conference, May 24-25, 2024. – Tashkent: National University of Uzbekistan, 2024. – pp. 39.