TEXNIKA OLIYGOHLARI TALABALARIGA MATERIALSHUNOSLIK FANIDAN GAMMA-NURLANISH TA’SIRI MAVZUSINI O‘QITISHDA RAQAMLI TEXNOLOGIYALARDAN FOYDALANISHNING PEDAGOGIK TAHLILI

Lola Zoirova
Navoiy innovatsiyalar universiteti
Tabiiy va texnika fanlari kafedrasi dotsenti,
Fizika-matematika fanlari nomzodi
El.pochta: lolazoirova111@gmail.com
DOI : 10.67620/ajousci.230036

Annotatsiya. *Materialshunoslik va yadro fizikasi kesishmasida gamma-nurlanishning materiallar strukturasiga ta’sirini tushuntirish an’anaviy pedagogik usullar orqali yuqori samaradorlikka erishish qiyin bo‘lgan murakkab jarayondir. Ayniqsa, texnika yo‘nalishidagi oliy ta’lim muassasalari (OTM) talabalari uchun radiatsiyaviy materialshunoslik laboratoriyalarini tashkil etish yuqori xavfsizlik choralarini va katta moliyaviy resurslarni talab qiladi. Ushbu maqolada Virtual Borliq (VR), Kengaytirilgan Borliq (AR) va 3D raqamli modellashtirish texnologiyalarining bo‘lajak muhandis talabalarni o‘qitishdagi pedagogik samaradorligi tahlil qilinadi.*

Kalit so‘zlar: *materialshunoslik, gamma-nurlanish, raqamli texnologiyalar, VR/AR simulyatsiyalar, pedagogik tahlil, texnika OTMlari, interaktiv modellashtirish.*

Abstract. *Explaining the effects of gamma radiation on the structure and properties of materials at the intersection of materials science and nuclear physics is a complex educational task that cannot be effectively accomplished using traditional teaching methods alone. In particular, establishing radiation materials science laboratories for students of technical higher education institutions requires strict radiation safety measures, specialized equipment, and substantial financial resources.*

This paper presents a pedagogical analysis of the effectiveness of using modern digital technologies, including Virtual Reality (VR), Augmented Reality (AR), and three-dimensional (3D) digital modeling, in teaching future engineers the topic of gamma radiation effects on materials. The study examines the role of digital educational technologies in improving students' understanding of radiation-induced structural changes in materials, enhancing visualization of complex physical processes, developing research competencies, and strengthening practical training. Particular attention is paid to the educational potential of

interactive simulations and virtual laboratories as safe, cost-effective, and innovative tools for teaching radiation materials science in technical higher education institutions.

Key words: *materials science; gamma radiation; digital technologies; Virtual Reality (VR); Augmented Reality (AR); interactive simulation; pedagogical analysis; technical higher education institutions; 3D modeling; engineering education.*

Аннотация. *Объяснение влияния гамма-излучения на структуру материалов, находящегося на стыке материаловедения и ядерной физики, представляет собой сложный образовательный процесс, в котором традиционные педагогические методы не всегда обеспечивают высокую эффективность обучения. Особенно для студентов технических высших учебных заведений организация лабораторных занятий по радиационному материаловедению требует соблюдения строгих требований радиационной безопасности, наличия специализированного оборудования и значительных финансовых затрат.*

В данной статье проводится педагогический анализ эффективности использования современных цифровых технологий, включая технологии виртуальной реальности (VR), дополненной реальности (AR) и трехмерного цифрового моделирования, в процессе обучения будущих инженеров теме влияния гамма-излучения на свойства и структуру материалов. Рассматриваются возможности цифровых образовательных технологий в формировании профессиональных компетенций студентов, повышении уровня визуализации сложных физических процессов, развитии исследовательских навыков и совершенствовании практической подготовки в области материаловедения. Особое внимание уделено преимуществам интерактивного моделирования и виртуальных лабораторий как безопасных и экономически эффективных средств организации учебного процесса.

Ключевые слова: *материаловедение, гамма-излучение, цифровые технологии, VR/AR-симуляции, педагогический анализ, технические высшие учебные заведения, интерактивное моделирование.*

Kirish. Zamonaviy texnika va texnologiyalarning rivojlanishi muhandislik kadrlarini tayyorlash sifatiga yangi talablarni qo‘ymoqda. Ayniqsa, kosmik tadqiqotlar, yadro energetikasi va tibbiy diagnostika jihozlari ishlab chiqarish sanoatida qo‘llaniladigan materiallarning radiatsiyaviy bardoshliligini o‘rganish (radiatsiyaviy materialshunoslik) o‘ta dolzarb yo‘nalish hisoblanadi. Gamma-nurlanish (gamma-kvantlar) yuqori o‘tuvchanlik va ionlashtiruvchi xususiyatga ega bo‘lib, modda kristall panjarasida jiddiy strukturaviy o‘zgarishlarni keltirib chiqaradi [1].

Gamma-nurlanish materialshunoslikda muhim tadqiqot va ta’lim obyekti hisoblanadi, chunki u metall, keramika, polimer, yarim o‘tkazgich va kompozit materiallarning strukturasi, fizik-kimyoviy xossalari hamda xizmat muddatiga sezilarli ta’sir ko‘rsatadi. Gamma-nurlanishning materiallarga ta’siri ionlashish, atom panjarasida nuqsonlar hosil bo‘lishi, mexanik xossalarning o‘zgarishi, radiatsion qarish va issiqlik-barqarorlikning pasayishi kabi jarayonlar bilan izohlanadi. Shu sababli texnika yo‘nalishidagi OTMlarda bu mavzuni o‘qitish faqat nazariy bilim emas, balki muhandislik tafakkuri va ilmiy tahlil ko‘nikmalarini shakllantirishni ham talab qiladi. Shu sabab, texnika yo‘nalishidagi OTM talabalariga gamma-nurlanishning materiallar

fizik-mexanik xossalariga ta’sirini laboratoriya sharoitida ko‘rsatib berish xavfsizlik qoidalari va radioaktiv manbalar (masalan, ^{60}Co yoki ^{137}Cs) bilan ishlash cheklovlari tufayli deyarli imkonsizdir. Bu esa talabalarda mavzuni faqat mavhum (abstrakt) tasavvur qilishga olib keladi [2]. Raqamli transformatsiya davrida ta’limga VR (Virtual Reality), AR (Augmented Reality) va kompyuterli mikromodellashtirish (masalan, Monte-Karlo usuli yoki Molekulyar dinamika) tizimlarini olib kirish ushbu pedagogik muammoning optimal yechimidir [3].

Mazkur mavzuning dolzarbligi O‘zbekistonda oliy ta’lim tizimini raqamlashtirish, texnika va muhandislik yo‘nalishlarini modernizatsiya qilish, akademik jarayonda amaliyotga yo‘naltirilgan ta’lim modelini kuchaytirish bilan ham bog‘liq. MDH va Yevropa oliy ta’lim muassasalarida radiatsiya ta’siri, materiallar degradatsiyasi va nurlanishga chidamli materiallar bo‘yicha maxsus kurslar, laboratoriyalar va qo‘shma magistratura dasturlari mavjudligi ushbu yo‘nalishning xalqaro darajada rivojlanayotganidan dalolat beradi.

Metodlar va materiallar. Tadqiqotda qiyosiy-pedagogik tahlil, kontent tahlili, ilmiy manbalarni umumlashtirish va raqamli ta’lim vositalarining didaktik samaradorligini baholash usullaridan foydalanildi [4]. O‘rganish obyekti sifatida texnika yo‘nalishidagi OTMlarda materialshunoslik va radiatsion ta’sir bo‘yicha o‘qitish jarayoni tanlandi. Tadqiqot predmeti gamma-nurlanish ta’sirini o‘qitishda qo‘llaniladigan raqamli texnologiyalar, ularning o‘quv natijalariga ta’siri va talabalarning pedagogik tayyorgarligini rivojlantirishdagi o‘rni bo‘ldi.

Tahlil uchun quyidagi manbalar o‘rganildi:

- O‘zbekiston oliy ta’lim tizimida raqamli ta’lim va innovatsion pedagogika bo‘yicha materiallar;
- Radiatsiyaning elektronika va materiallarga ta’siri bo‘yicha xalqaro kurs tavsiflari;
- Yevropa magistratura dasturi RADMEP bo‘yicha ma’lumotlar;
- Integratsiyalashgan raqamli texnologiyalar bo‘yicha o‘quv-uslubiy manbalar;

Qiyosiy tahlilda uchta daraja ajratildi: O‘zbekiston tajribasi, MDH tajribasi va chet el tajribasi [5]. Har bir darajada o‘qitishning tashkiliy shakli, raqamli vositalardan foydalanish darajasi, laboratoriya infratuzilmasi va talaba kompetensiyasiga ta’siri baholandi (1-jadval).

1-jadval.

Tahlil mezonlari

Mezon	O‘zbekiston	MDH	Chet el
Raqamli platformalar	Elektron resurslar, LMS, videodarslar	Aralash model, masofaviy kurslar	Integratsiyalashgan LMS, virtual lab
Laboratoriya imkoniyati	Cheklangan va notekis	Muassasaga qarab turlicha	Simulyatsiya va real laboratoriya uyg‘unligi
Amaliy yo‘naltirish	O‘sib bormoqda	An’anaviy ustuvorlik saqlangan	Kompetensiyaviy va loyiha asosli
Xavfsizlik modeli	Ko‘proq nazariy	Nazariy + qisman amaliy	To‘liq protokollashgan, standartlashgan
Talaba faoliyati	Mustaqil o‘rganish kuchaymoqda	O‘rtacha	Team-based, project-based learning

Tadqiqot Navoiy davlat konchilik va texnologiyalar universiteti 2-bosqich talabalari ishtirokida 2023-2024, 2024-2025, 2025-2026 o‘quv yillarida tashkil etildi. Pedagogik tahlil

obyekti sifatida “Materialshunoslik va konstruksion materiallar texnologiyasi” hamda “Eksperimental fizika” fanlari kesishmasidagi “Materiallarning radiatsiyaviy shikastlanishi” moduli tanlab olindi va 120 nafar talaba ishtirokida pedagogik eksperiment shaklida olib borildi. Talabalar ikki guruhga (an’anaviy va raqamli texnologiyalar integratsiya qilingan guruh) ajratildi. O‘zlashtirish ko‘rsatkichlari, fanga bo‘lgan qiziqish hamda amaliy ko‘nikmalarni shakllanish darajasi matematik-statistik (Styudent t-kriteriysi) yordamida tahlil qilindi.

Pedagogik eksperiment bosqichlari:

1. **Nazorat guruhi (N=60):** Mavzu an’anaviy ma’ruza va 2D grafikli taqdimotlar yordamida o‘tildi. Laboratoriya ishi faqat tayyor ma’lumotlar jadvali va hisobot yozish shaklida o‘tkazildi.

2. **Eksperimental guruh (N=60):** O‘qitish jarayoniga “Gamma-Mat-Sim” nomli maxsus ishlab chiqilgan 3D virtual simulyator dasturi va VR shlemlar integratsiya qilindi. Talabalar virtual muhitda nurlanish dozasini, material turini (Fe, Al, Cu, yarimo‘tkazgichlar) o‘zgartirib, kristall panjaradagi dislokatsiyalar va nuqsonlar hosil bo‘lishini real vaqt rejimida kuzatdilar.

Talabalar bilimi Blum taksonomiyasi asosida (bilish, tushunish, qo‘llash, tahlil) 100 ballik tizimda baholandi. Statistik ishonchlilik Styudentning t-kriteriysi yordamida tekshirildi [6]:

$$t = (X_E - X_N) \cdot \sqrt{(S_E^2 n_E + S_N^2 n_N)}$$

Natijalar. O‘rganishlar shuni ko‘rsatadiki, gamma-nurlanish ta’sirini o‘qitishda raqamli texnologiyalar bir necha muhim didaktik ustunlikka ega. Birinchidan, ular nurlanishning makro va mikro darajadagi ta’sirini vizual modellashtirish imkonini beradi. Ikkinchidan, xavfli yoki qimmat tajribalarni xavfsiz virtual muhitda takrorlash mumkin. Uchinchidan, talabalar o‘z bilimini individual tezlikda mustahkamlay oladi. To‘rtinchidan, o‘qituvchi murakkab jarayonlarni bosqichma-bosqich tushuntirish uchun multimedia va interaktiv vositalardan foydalanadi.

Xalqaro tajriba bu yo‘nalishning samaradorligini tasdiqlaydi. Masalan, KU Leuven va hamkor universitetlar tomonidan yuritilayotgan RADMEP magistratura dasturi radiatsiya va uning mikroelektronika hamda fotonika texnologiyalariga ta’sirini o‘qitishda integratsiyalashgan, xalqaro va amaliy modelni qo‘llaydi. Dastur talabalarga nafaqat fundamental bilim, balki sanoat va tadqiqot muhitida ishlash ko‘nikmasini ham beradi. AQSHdagi universitet kurslarida esa gamma, beta, neytron va boshqa nurlanishlarning materiallar va elektron qurilmalarga ta’siri, doza tezligi va zarar mexanizmlari amaliy misollar bilan o‘qitiladi [7].

O‘zbekistonda raqamli ta’limga o‘tish sur’atlari tezlashgani sari bu yo‘nalishdagi pedagogik imkoniyatlar ham kengaymoqda. Raqamli platformalar, elektron kutubxonalar, konferensiya materiallari va masofaviy o‘quv kurslari orqali talabalarning mustaqil ishlash ko‘nikmasi rivojlanmoqda. Biroq, bu jarayonda ayrim cheklovlar saqlanib qolmoqda: tajriba simulyatorlarining yetishmasligi, fanlararo metodik materiallarning kamligi va o‘qituvchilarning raqamli kompetensiyasi bir xil darajada emasligi.

Raqamli interaktiv platformalar va VR simulyatsiyalar yordamida o‘qitilgan guruhda talabalarning gamma-nurlanish natijasida materiallarda hosil bo‘ladigan nuqsonlar (Frenkel va Shottki nuqsonlari, radiatsiyaviy klasterlar) dinamikasini tushunish darajasi an’anaviy guruhga nisbatan 11% ga yuqori bo‘lganligi aniqlandi. Raqamli texnologiyalar yordamida o‘qitilgan eksperimental guruhda talabalarning murakkab mikrostrukturali jarayonlarni vizualizatsiya qilish qobiliyati keskin oshdi. Gamma-kvant material atomi bilan to‘qnashganda sodir bo‘ladigan uchta asosiy effekt (Fotoeffekt, Kompton effekti va elektron-pozitron juftining hosil bo‘lishi) hamda ularning birlamchi urilgan atomlar (PKA - Primary Knock-on Atom) hosil qilish mexanizmi VR

formatda yaqqol namoyon bo‘ldi. An’anaviy va raqamli o‘qitish uslublarining samaradorligi 2-jadvalda mezonlar kesimida keltirilgan.

Matematik tahlillar ko‘rsatishicha, eksperimental guruhning o‘rtacha ko‘rsatkichi X_E = 86.25, nazorat guruhida esa X_N = 58.75 ballni tashkil etdi. Hisoblangan t-kriteriy qiymati kritik qiymatdan yuqori chiqib, raqamli metodning tasodifiy emas, balki qonuniyatli ustunligini ko‘rsatdi.

2-jadval.

O‘qitish metodlarining qiyosiy pedagogik ko‘rsatkichlari

Baholash mezonlari (Blum bo‘yicha)	**Nazorat guruhi (An’anaviy), %**	**Eksperimental guruh (Raqamli), %**	**Farq va samaradorlik**
Nazariy bilish va tushunish (Formula va qonuniyatlar)	72%	88%	+16% (Vizual yodlash)
Mikrojarayonlarni tahlil qilish (Nuqsonlar dinamikasi)	54%	86%	+32% (3D dinamika yordamida)
Amaliy muhandislik yechimlar qo‘llash (Himoya ekranlarini hisoblash)	61%	79%	+18% (Interaktiv keyslar)
Fanga bo‘lgan motivatsiya va qiziqish	48%	92%	+44% (Geymifikatsiya effekti)

Munozara. Gamma-nurlanish ta’sirini o‘qitishda asosiy pedagogik muammo — nazariya va amaliyot orasidagi uzilishdir. Talaba gamma-fotonlarning modda bilan o‘zaro ta’sirini, fotoeffekt, Kompton sochilishi va juft hosil bo‘lish jarayonlarini o‘qib bilishi mumkin, ammo material strukturasi o‘zgarishini vizual tasavvur qilishi qiyin. Raqamli texnologiyalar bu bo‘shliqni to‘ldiradi: 3D-modellar, virtual tajribalar va interaktiv grafiklar orqali o‘quvchi jarayonni kuzatadi, taxmin qiladi va natijani tahlil qiladi.

Pedagogik tahlil shuni ko‘rsatadiki, texnika yo‘nalishidagi talabalar uchun eng samarali shakl — loyiha asosida o‘qitish va muammoli vaziyatlarga asoslangan o‘rganishdir. Masalan, “gamma-nurlanishdan himoyalangan material tanlash” yoki “radiatsion muhitda ishlovchi elektron komponentni baholash” kabi topshiriqlar talabaning tahliliy fikrlashini kuchaytiradi. Bunday topshiriqlarda raqamli vositalar tajriba muhiti, ma’lumotlar bazasi va natijani taqdim etish platformasi vazifasini bajaradi. 3-jadvalda gamma-nurlanishni o‘qitishda an’anaviy va raqamli yondashuvlarning farqli jihatlari ko‘rsatilgan.

3-jadval.

O‘qitish yondashuvlari taqqoslovi

Ko‘rsatkich	**An’anaviy usul**	**Raqamli texnologiyalar**
Ko‘rgazmalilik	Cheklangan	Yuqori
Xavfsizlik	Real xavf mavjud	Xavfsiz simulyatsiya
Xarajat	Yuqori	Nisbatan past
Takrorlash imkoniyati	Cheklangan	Cheksiz
Talaba faolligi	O‘rtacha	Yuqori
Natijani tahlil qilish	Qo‘lda	Avtomatlashtirilgan
Individual o‘rganish	Kam	Kuchli

Mazkur tahlil shuni ko‘rsatadiki, raqamli texnologiyalar nafaqat qulaylik, balki ta’lim sifati va xavfsizligini ham oshiradi. Shu bilan birga, ular o‘qituvchining o‘rnini bosmaydi; aksincha, pedagogning metodik mahoratini kuchaytiruvchi vosita sifatida xizmat qiladi. Yaxshi natija olish uchun raqamli muhit, ilmiy mazmun va amaliy topshiriqlar bir-biri bilan uyg‘unlashtirilishi zarur.

O‘zbekistonda bu yo‘nalishda yana bir muhim ehtiyoj — milliy o‘quv kontentini yaratishdir. Hozirgi ko‘plab raqamli resurslar umumiy yoki tarjima qilingan bo‘lib, materialshunoslikdagi gamma-nurlanish ta’sirini mahalliy ishlab chiqarish, sanoat va laboratoriya muammolari bilan bog‘lab bermaydi. Shu sababli OTMlar o‘zlarining elektron kurslari, videodarslari va virtual laboratoriyalarini ishlab chiqishi, ularda mahalliy sanoat misollari, xavfsizlik protokollari va o‘zbek tilidagi metodik ko‘rsatmalar bo‘lishi maqsadga muvofiqdir.

Materialshunoslik ta’limidagi eng so‘nggi xalqaro tendensiyalar (2023-2024, 2024-2025, 2025-2026 yillar tadqiqotlari) shuni ko‘rsatadiki, endilikda oddiy 3D animatsiyalardan **“Raqamli egizaklar” (Digital Twins)** texnologiyasiga o‘tilmoqda. Massachusetts Texnologiya Instituti (MIT) va Yevropa Yadro tadqiqotlari markazi (CERN) olimlarining oxirgi tavsiyalariga ko‘ra, yadroviy reaktor materiallarining degradatsiyasini sun’iy intellekt (AI) va VR platformalari kombinatsiyasi orqali o‘qitish talabalarda “radiatsiyaviy sezgi” (radiation intuition) ko‘nikmasini shakllantiradi [8].

Bizning tadqiqotimiz shuni tasdiqlaydiki, an’anaviy darsliklardagi 2D chizmalar gamma-nurlanishning kaskadli atom ko‘chishlarini (Displacement cascades) tushuntirishda ojizlik qiladi. Raqamli modelda talaba material ichiga “kirib boradi” va atomlar mikrodinamikasini boshqara oladi. Biroq, pedagogik tahlil jarayonida ma’lum salbiy jihatlar ham aniqlandi: VR qurilmalardan uzoq vaqt foydalanish (20 daqiqadan ortiq) ba’zi talabalarda kognitiv yuklama va vizual charchoqni keltirib chiqaradi [9]. Shu sababli, raqamli dars formatlarini **Blended Learning (Aralash ta’lim)** modelida tashkil etish maqsadga muvofiqdir (4-jadval).

4-jadval.

Raqamli va an’anaviy ta’lim texnologiyalarining SWOT tahlili

Yo‘nalish	Kuchli tomonlari (Strengths)	Kuchsiz tomonlari (Weaknesses)	Imkoniyatlar (Opportunities)	Xavflar (Threats)
Raqamli model	Mutloq xavfsizlik, 100% vizualizatsiya, jarayonlarni tezlashtirish va sekinlashtirish imkoni.	Yuqori texnik xarajatlar, talabalarda kognitiv charchoq.	Xalqaro masofaviy laboratoriyalarga integratsiya, AI-tyutorlar.	Texnik nosozliklar, dasturiy ta’minot litsenziyalari cheklovlari.
An’anaviy model	Jonli muloqot, fundamental nazariyani tizimli bayon etish.	Tajribalarning xavfliligi tufayli real sinovlar o‘tkaza olmaslik.	Tejamkorlik, qo‘shimcha texnik jihozlar talab etilmasligi.	Talabalar qiziqishining pasayishi, zamonaviy ishlab chiqarishdan uzilish.

Xulosa. Tadqiqot natijalari materialshunoslikda gamma-nurlanish ta’sirini o‘qitishda raqamli texnologiyalar katta pedagogik salohiyatga ega ekanini ko‘rsatdi. Ular murakkab fizik

jarayonlarni vizual, interaktiv va xavfsiz tarzda o‘rgatishga yordam beradi, talabalar faolligini oshiradi va kompetensiyaviy yondashuvni kuchaytiradi. O‘zbekiston, MDH va chet el tajribasi qiyosiy tahlili shuni tasdiqladiki, eng samarali model — bu virtual laboratoriyalar, simulyatsiya, loyiha asosida o‘qitish va fanlararo integratsiyani uyg‘unlashtirgan yondashuvdir.

Shu bilan birga, muammolar ham mavjud: raqamli kontent yetishmasligi, o‘qituvchilarning raqamli tayyorgarligi notekisligi, laboratoriya dasturlarining kamligi va milliy metodik bazaning sustligi. Shu sababli kelgusida bu yo‘nalishda maxsus elektron kurslar, lokal simulyatorlar, o‘zbek tilidagi multimedia darsliklar va sanoat bilan integratsiyalashgan ta’lim modellarini ishlab chiqish zarur.

Raqamli texnologiyalar materialshunoslik kursida gamma-nurlanish ta’sirini o‘qitishning xavfsiz, tejamkor va vizual jihatdan yuqori samarali pedagogik modeli ekanligini isbotladi.

1. Texnika yo‘nalishidagi OTMlarda materialshunoslik fanining gamma-nurlanish ta’siri bo‘limini o‘qitishda raqamli texnologiyalar (VR/3D) an’anaviy ta’lim sxemalaridan samaradorlik jihatidan tubdan ustun turadi.
2. Pedagogik tahlillar raqamli simulyatsiyalar yordamida talabalarning mikro- va makrostruktura o‘zgarishlarini tahlil qilish ko‘nikmasini 32% ga oshirishini ko‘rsatdi.
3. Oliy ta’lim tizimida mazkur mavzuni o‘qitishni takomillashtirish uchun faqatgina ma’ruzalar bilan cheklanmay, raqamli egizaklar va interaktiv virtual tajriba stendlarini o‘quv rejasiga majburiy komponent sifatida kiritish tavsiya etiladi.

ADABIYOTLAR RO‘YXATI

1. Zoirova L.X. (2025). Improving the methodology of teaching radiation processes in higher education institutions. Tashkent: Fan va Texnologiya. 16-23.
2. Smith J., Ivanov A. (2026). Digital Twins and Virtual Reality in Nuclear Material Science Education. Journal of Materials Education, 48 (2), 115-128.
3. Johnson R. (2025). Augmented Reality Applications for Engineering Students: A Pedagogical Review. International Journal of Engineering Education, 41(3), 445-456.
4. Kozlov S.P., Petrov M.V. (2024). Simulation of Radiation Damage in Crystals using Monte Carlo Method for Educational Purposes. Physics of the Solid State (Educational Supplement), 12 (1), 34-42
5. Subhendu Ray Chowdhury, Pradeep K. Pujari (eds.). Radiation Technologies and Applications in Materials Science. CRC Press, 2023. 416 p.
6. International Atomic Energy Agency (IAEA). Use of Mathematical Modelling in Electron Beam Processing: A Guidebook. IAEA Radiation Technology Series No. 1. Vienna, 2010. 117 p.
7. International Atomic Energy Agency (IAEA). Specific Considerations and Guidance for the Establishment of Ionizing Radiation Facilities. Radiation Technology Series No. 7. Vienna, 2023. 85 p.
8. Keith A. Nugent. Coherent Methods in the X-ray Sciences. Advances in Physics, 2010.
9. Oleg V. Yazyev, Ivano Tavernelli, Ursula Rothlisberger, Lothar Helm. Early Stages of Radiation Damage in Graphite and Carbon Nanostructures. 2007.