

**UGLEROD KVANT NUQTACHALARI VA NOYOB YER ELEMENTLARI
BILAN FUNKSIYONALLASHTIRILGAN KO'P FUNKSIYALI AQLLI
NANOKOMPOZITLAR ASOSIDA YUQORI INTENSIV YORUG'LIK
CHIQUARUVCHI ANTIBAKTERIAL VA O'Z-O'ZINI TIKLOVCHI
INNOVATSION BO'YOQLAR YARATISH**

Bo'riyeva Muhabbat Mamayusuf qizi
Termiz davlat universiteti talabasi
E-mail: mustafo89984@gmail.com

Annotatsiya: Ushbu ishda uglerod kvant nuqtachalari (Carbon Quantum Dots – CQD) va noyob yer elementlari bilan funkcionallashtirilgan ko'p funktsiyali aqlli nanokompozitlar asosida yuqori intensiv yorug'lik chiqaruvchi, antibakterial va o'z-o'zini tiklovchi innovatsion bo'yoqlarni yaratish konsepsiyasi ko'rib chiqiladi. Tadqiqotda CQDlarning fotoluminessent xususiyatlari hamda lantanid ionlarining (Eu^{3+} , Tb^{3+} va boshqalar) optik faolligi o'rtasidagi sinergetik ta'sir tahlil qilinadi. Shuningdek, nanokompozitlarning antibakterial faolligi, ularning mikroorganizmlarga ta'sir mexanizmlari va polimer matritsalar asosida o'z-o'zini tiklovchi tizimlar bilan integratsiyasi yoritiladi. Natijada, nafaqat estetik, balki funktsional jihatdan yuqori samarali, ekologik xavfsiz va uzoq muddat barqaror aqlli qoplamalar yaratish imkoniyati asoslab beriladi. Ushbu yo'nalish tibbiyot, sanoat va yuqori texnologiyali qoplamalar sohasida istiqbolli hisoblanadi.

Kalit so'zlar: uglerod kvant nuqtachalari, CQD, noyob yer elementlari, lantanidlar, nanokompozitlar, aqlli qoplamalar, fotoluminessensiya, antibakterial materiallar, o'z-o'zini tiklovchi bo'yoqlar, self-healing materiallar, yuqori intensiv yorug'lik, funktsional nanomateriallar, polimer nanokompozitlar.

Annotation: This study explores the development of innovative smart coatings based on multifunctional nanocomposites functionalized with carbon quantum dots (CQDs) and rare earth elements. The research focuses on the synergistic optical properties of CQDs and lanthanide ions (such as Eu^{3+} and Tb^{3+}), which enable high-intensity light emission. In addition, the antibacterial activity of the nanocomposites and their interaction mechanisms with microorganisms are analyzed. The integration of self-healing polymer systems is also discussed, highlighting their ability to restore structural integrity after mechanical damage. The results demonstrate the potential of these advanced materials to form eco-friendly, durable, and highly functional coatings suitable for biomedical, industrial, and high-tech applications.

Keywords: carbon quantum dots, CQDs, rare earth elements, lanthanides, nanocomposites, smart coatings, photoluminescence, antibacterial materials, self-healing coatings, advanced functional materials, high-intensity light emission, polymer nanocomposites.

Аннотация: В данной работе рассматривается разработка инновационных «умных» покрытий на основе многофункциональных нанокомпозитов, функционализированных углеродными квантовыми точками (CQDs) и редкоземельными элементами. Основное внимание уделяется синергетическим оптическим свойствам CQDs и ионов лантаноидов (таких как Eu^{3+} и Tb^{3+}), обеспечивающих высокоинтенсивное свечение. Также анализируются антибактериальные свойства нанокомпозитов и механизмы их взаимодействия с микроорганизмами. Отдельно рассматривается интеграция самовосстанавливающихся полимерных систем, способных восстанавливать структуру после механических повреждений. Полученные результаты демонстрируют перспективность данных материалов для создания экологически безопасных, долговечных и функционально активных покрытий, применимых в биомедицине, промышленности и высокотехнологичных областях.

Ключевые слова: углеродные квантовые точки, CQDs, редкоземельные элементы, лантаноиды, нанокомпозиты, умные покрытия, фотолюминесценция, антибактериальные материалы, самовосстанавливающиеся покрытия, функциональные наноматериалы, высокоинтенсивное свечение, полимерные нанокомпозиты.

Kirish: Zamonaviy ilm-fan taraqqiyoti insoniyat oldiga ilgari tasavvur qilib bo'lmaydigan yangi imkoniyatlarni ochib bermoqda. Ayniqsa, materialshunoslik va nanotexnologiyalar sohasidagi jadal rivojlanish natijasida an'anaviy materiallardan tubdan farq qiluvchi, yuqori darajada funksional xususiyatlarga ega yangi avlod nanomateriallar yaratilmoqda. Ushbu materiallar nafaqat mexanik yoki kimyoviy barqarorlik bilan cheklanib qolmay, balki optik, biologik va adaptiv xususiyatlarni ham o'zida mujassam etmoqda. Shu bois ko'p funksiyali aqlli nanokompozitlar bugungi kunda ilmiy tadqiqotlarning eng istiqbolli yo'nalishlaridan biri sifatida alohida ahamiyat kasb etadi. Nanokompozit tizimlar orasida uglerod kvant nuqtachalari (Carbon Quantum Dots – CQDs) o'zining noyob fizik-kimyoviy xususiyatlari bilan alohida o'rin egallaydi. Ular nanoo'lchamli uglerod asosli zarrachalar bo'lib, yuqori fotolyuminessent faollik, ekologik xavfsizlik, kimyoviy barqarorlik va oson funksionallashtirish imkoniyati bilan ajralib turadi. CQDlar tashqi nurlanish yoki energiya ta'sirida yorug'lik chiqarish qobiliyatiga ega bo'lib, bu ularni optoelektronika, bioimaging, sensor tizimlari va yorug'lik chiqaruvchi materiallar

yaratishda muhim komponentga aylantiradi. Shu bilan birga, noyob yer elementlari, xususan lantanid ionlari (Eu^{3+} , Tb^{3+} , Dy^{3+} va boshqalar) yuqori darajadagi spektral aniqlik va kuchli luminescent xususiyatlari bilan ajralib turadi. Ushbu ionlar keng energiya sathlariga ega bo'lib, yorug'lik chiqarish jarayonida barqaror va aniq rangli emissiya hosil qiladi. CQDlar bilan birgalikda qo'llanganda esa energiya uzatish mexanizmlari orqali yorug'lik intensivligi va samaradorligi sezilarli darajada oshadi, natijada yangi optik funktsionallikka ega materiallar hosil bo'ladi. So'nggi yillarda antibakterial xususiyatlarga ega materiallar yaratish masalasi ham dolzarb ahamiyat kasb etmoqda. Mikroorganizmlarning turli muhitlarga moslashuvchanligi va antibiotiklarga nisbatan chidamliligining ortib borishi an'anaviy dezinfeksiya usullarining samaradorligini kamaytirmoqda. Shu nuqtai nazardan, nanokompozitlar asosida ishlab chiqilgan antibakterial qoplamalar yangi avlod himoya tizimi sifatida katta qiziqish uyg'otmoqda. CQDlar va ayrim noyob yer ionlari bakteriya hujayra membranasiga ta'sir ko'rsatib, ularning metabolik jarayonlarini buzish orqali mikroorganizmlar rivojlanishini cheklashi mumkin. Bundan tashqari, zamonaviy materialshunoslikda o'z-o'zini tiklovchi (self-healing) tizimlar alohida ilmiy yo'nalish sifatida shakllanmoqda. Bunday materiallar tashqi mexanik ta'sirlar natijasida yuzaga kelgan mikroshekastlanishlarni mustaqil ravishda bartaraf etish qobiliyatiga ega bo'lib, ularning xizmat muddatini sezilarli darajada uzaytiradi. Polimer matritsalar asosida yaratilgan self-healing tizimlar nanokompozitlar bilan uyg'unlashtirilganda materialning nafaqat mustahkamligi, balki funktsional barqarorligi ham ta'minlanadi. Mazkur tadqiqotning asosiy yo'nalishi uglerod kvant nuqtachalari va noyob yer elementlari bilan funktsionallashtirilgan ko'p funktsiyali nanokompozitlar asosida yuqori intensiv yorug'lik chiqaruvchi, antibakterial va o'z-o'zini tiklovchi innovatsion bo'yoqlar yaratish imkoniyatlarini ilmiy jihatdan asoslashga qaratilgan. Bunday yondashuv an'anaviy qoplama materiallarining funktsional chegaralarini kengaytirib, ularni yuqori darajadagi "aqlli materiallar" sinfiga olib chiqadi. Mazkur sohadagi izlanishlar materiallarning optik, biologik va mexanik xususiyatlarini bir tizimda integratsiya qilish, ularni boshqarish hamda sanoat va tibbiyot uchun yuqori samarali innovatsion yechimlar ishlab chiqish imkoniyatini kengaytiradi.

Asosiy qism: Zamonaviy nanofunktsional materiallar orasida uglerod kvant nuqtachalari (CQDs) va noyob yer elementlari asosida shakllantirilgan tizimlar alohida ilmiy ahamiyatga ega bo'lib, ular yuqori darajadagi optik, biologik va mexanik xususiyatlarni birlashtirgan kompleks materiallar sinfini tashkil etadi. Ushbu materiallarning asosiy ustunligi shundaki, ular bir vaqtning o'zida bir nechta funktsiyani bajaruvchi "ko'p vazifali tizim" sifatida ishlaydi: yorug'lik chiqarish, mikroorganizmlarga qarshi kurashish va mexanik shikastlanishdan so'ng o'z

tuzilishini tiklash kabi xususiyatlarni namoyon qiladi. Uglerod kvant nuqtachalari nanometr o'lchamdagi uglerod asosli zarrachalar bo'lib, ularning elektron tuzilishi kvant cheklanish effekti bilan tavsiflanadi. Aynan shu xususiyat ularning yuqori fotoluminessent faolligini belgilaydi. CQDlar tashqi nurlanish (UV, ko'k yoki rentgen nurlari) ta'sirida turli to'lqin uzunliklarida yorug'lik chiqarish qobiliyatiga ega bo'lib, bu ularni optik materiallar va yorug'lik manbalarida istiqbolli komponentga aylantiradi. Bundan tashqari, CQDlar yuzasining kimyoviy faol guruhlalar bilan boyitilishi ularning boshqa nanostrukturalar, xususan noyob yer ionlari bilan samarali integratsiyasini ta'minlaydi. Noyob yer elementlari, ayniqsa lantanid ionlari (Eu^{3+} , Tb^{3+} , Dy^{3+} va boshqalar), o'ziga xos 4f elektron qobig'i tufayli tor emissiya chiziqlari va yuqori rang tozaligiga ega bo'lgan optik markazlar sifatida namoyon bo'ladi. Ushbu ionlar CQDlar bilan birlashtirilganda energiya uzatish mexanizmi yuzaga keladi, natijada luminessent signal kuchayadi va yorug'lik chiqarish samaradorligi sezilarli darajada ortadi. Bu sinergetik effekt nanokompozit bo'yoqlarning optik sifatini yangi bosqichga olib chiqadi. Antibakterial xususiyatlar esa ushbu tizimning biologik funksionalligini belgilaydi. CQDlar yuqori sirt energiyasi va reaktiv kislorod turlarini (ROS) hosil qilish xususiyati orqali bakterial hujayra membranasiga zarar yetkazadi. Noyob yer ionlari esa fermentativ jarayonlarni buzish va hujayra ichki ion balansini o'zgartirish orqali mikroorganizmlarning rivojlanishini sekinlashtiradi yoki to'xtatadi. Shu tariqa, nanokompozit tizim keng spektrli antibakterial faollik namoyon qiladi. O'z-o'zini tiklovchi xususiyatlar polimer matritsa ichiga integratsiya qilingan dinamik kimyoviy bog'lanishlar yoki mikrokapsula tizimlari orqali ta'minlanadi. Mexanik ta'sir natijasida yuzaga kelgan mikro yoriqlar ichidagi tiklovchi modda faollashib, material strukturasini qayta tiklaydi. Bu jarayon materialning xizmat muddatini uzaytirish bilan birga, uning funksional barqarorligini ham saqlab qoladi. Mazkur uchta asosiy komponent — CQDlar, noyob yer elementlari va self-healing polimer tizimlar — birlashtirilganda, yuqori darajada integratsiyalashgan aqlli nanokompozit hosil bo'ladi. Bu material nafaqat passiv qoplama, balki faol funksional tizim sifatida ham ishlaydi. Shu sababli, bunday bo'yoqlar kelajakda faqat dekorativ yoki himoya vositasi emas, balki texnologik va biologik funksiyalarni bajaruvchi intellektual material sifatida qaraladi.

Tadqiqot metodologiyasi: Mazkur tadqiqotda uglerod kvant nuqtachalari va noyob yer elementlari asosida funksionallashtirilgan ko'p funksiyali nanokompozit bo'yoqlarni yaratish va ularning fizik-kimyoviy hamda biologik xususiyatlarini o'rganish uchun kompleks ilmiy yondashuv qo'llaniladi. Tadqiqot metodologiyasi bir necha bosqichli tizim asosida tashkil etilgan bo'lib, har bir bosqich materialning shakllanishi, tuzilishi va funksional xususiyatlarini chuqur tahlil qilishga

yo'naltirilgan. Birinchi bosqichda uglerod kvant nuqtachalari sintezi amalga oshiriladi. CQDlar odatda gidrotermal yoki mikrotolqinli sintez usullari orqali uglerodga boy organik prekursorlardan olinadi. Ushbu jarayonda harorat, vaqt va pH qiymati kabi parametrlar aniq nazorat qilinadi, chunki ular nanostrukturaning o'lchami va optik xususiyatlariga bevosita ta'sir ko'rsatadi. Ikkinchi bosqichda CQDlar yuzasi funkcionallashtiriladi. Bunda karboksil, gidroksil va amin guruhlar bilan boyitish orqali ularning dispersiyasi va boshqa ionlar bilan bog'lanish qobiliyati oshiriladi. Shu orqali CQDlar noyob yer ionlari bilan samarali kompleks hosil qilish imkoniyatiga ega bo'ladi. Uchinchi bosqichda lantanid ionlari (Eu^{3+} , Tb^{3+} va boshqalar) nanokompozit tizimga kiritiladi. Bu jarayon sol-gel, kopretsipitatsiya yoki ion almashinish usullari orqali amalga oshiriladi. Natijada CQD–lantanid komplekslari hosil bo'lib, ular orasida energiya uzatish mexanizmi shakllanadi. To'rtinchi bosqichda nanokompozit polimer matritsaga integratsiya qilinadi. Epoksi, poliuretan yoki akril asosidagi polimer tizimlar tanlanadi, chunki ular yuqori mexanik mustahkamlik va kimyoviy barqarorlikka ega. Shu bosqichda self-healing komponentlar — mikrokapsulalar yoki dinamik bog'lanishli monomerlar ham tizimga qo'shiladi. Beshinchi bosqichda olingan nanokompozit bo'yoqlarning fizik-kimyoviy xususiyatlari tahlil qilinadi. Bunda UV-Vis spektroskopiya, fotolyuminessensiya spektroskopiyasi, FTIR va XRD tahlil usullari qo'llaniladi. Ushbu metodlar materialning optik faolligi, kristall tuzilishi va kimyoviy bog'lanishlarini aniqlash imkonini beradi. Oltinchi bosqichda antibakterial faollik sinovdan o'tkaziladi. Bunda Gram-musbat va Gram-manfiy bakteriyalar ustida disk diffuziya usuli yoki minimal inhibitiv konsentratsiya (MIC) usuli qo'llaniladi. Natijalar orqali nanokompozitning mikroorganizmlarga ta'sir darajasi baholanadi. Yakuniy bosqichda esa o'z-o'zini tiklash xususiyati mexanik testlar yordamida o'rganiladi. Materialga sun'iy yoriqlar kiritilib, ularning vaqt o'tishi bilan tiklanish darajasi mikroskopik va mexanik o'lchovlar orqali tahlil qilinadi. Ushbu metodologik yondashuv nanokompozit bo'yoqlarning kompleks xususiyatlarini chuqur o'rganish va ularning amaliy qo'llanilish imkoniyatlarini ilmiy asosda baholashga xizmat qiladi.

Muammo va uning tahlili: So'nggi yillarda materialshunoslik va nanotexnologiyalar sohasida sezilarli yutuqlarga erishilgan bo'lsa-da, zamonaviy qoplama materiallar oldida hanuzgacha bir qator dolzarb ilmiy-texnik muammolar saqlanib qolmoqda. An'anaviy bo'yoq va qoplamalar asosan dekorativ va himoya funksiyasini bajaradi, biroq ular ko'p funkcionallik nuqtai nazaridan cheklangan hisoblanadi. Ular tashqi muhit ta'sirida tez degradatsiyaga uchrashi, mikroorganizmlarga nisbatan zaifligi hamda mexanik shikastlanishlardan so'ng o'zini tiklay olmasligi kabi kamchiliklarga ega. Eng muhim muammolardan biri — funktsional

integratsiyaning yetishmasligi hisoblanadi. Ya'ni, bir materialda bir vaqtning o'zida yorug'lik chiqarish, antibakterial himoya va o'z-o'zini tiklash xususiyatlarini barqaror tarzda birlashtirish hozirgi kungacha to'liq hal etilmagan ilmiy vazifa bo'lib qolmoqda. Ko'pchilik mavjud tizimlar faqat bitta yoki ikkita funksiyani bajaradi, bu esa ularning amaliy qo'llanilish doirasini cheklaydi. Yana bir muhim muammo — optik samaradorlikning pastligi va barqaror bo'lmagan luminessent xususiyatlardir. Kvant nuqtachalar va noyob yer ionlari alohida qo'llanilganda ma'lum darajada yorug'lik chiqarish xususiyatiga ega bo'lsa-da, ularning sinergetik ta'siri to'liq optimallashtirilmagan hollarda energiya yo'qotishlari kuzatiladi. Bu esa yorug'lik intensivligi va kvant samaradorligini pasaytiradi. Shuningdek, antibakterial materiallarda uzoq muddatli barqarorlik masalasi ham dolzarbdir. Ko'plab mavjud qoplamalarda antibakterial effekt vaqt o'tishi bilan kamayadi yoki faqat yuzaki ta'sir bilan cheklanadi. Mikroorganizmlarning moslashuvchanligi esa bunday materiallarning samaradorligini yanada pasaytiradi. O'z-o'zini tiklovchi tizimlar sohasida ham bir qator cheklovlar mavjud. Ko'plab self-healing materiallar faqat ma'lum sharoitlarda (harorat, bosim yoki yorug'lik ta'sirida) ishlaydi va ularning tiklanish tezligi hamda samaradorligi yetarli darajada emas. Bundan tashqari, self-healing mexanizmlar ko'pincha materialning boshqa funksional xususiyatlarini susaytirib yuboradi. Ushbu muammolarni kompleks hal qilish uchun uglerod kvant nuqtachalari va noyob yer elementlari asosidagi ko'p funksiyali nanokompozit tizimlar ishlab chiqish zarurati yuzaga keladi. Bu yondashuv bir vaqtning o'zida optik, biologik va mexanik xususiyatlarni integratsiya qilish imkonini beradi.

Tadqiqot natijalari va muhokama: O'tkazilgan tadqiqot natijalari uglerod kvant nuqtachalari va noyob yer elementlari bilan funkcionallashtirilgan nanokompozit tizimlar yuqori darajadagi ko'p funkcionallikka ega ekanligini ko'rsatdi. Sintez qilingan CQD–lantamid komplekslari kuchli fotolyuminessent xususiyat namoyon qilib, an'anaviy qoplama materiallariga nisbatan sezilarli darajada yuqori yorug'lik intensivligi berdi. Spektroskopik tahlillar natijasida CQD va $\text{Eu}^{3+}/\text{Tb}^{3+}$ ionlari o'rtasida samarali energiya uzatish mexanizmi mavjudligi aniqlandi. Bu jarayon emissiya intensivligini oshirib, spektral barqarorlikni yaxshiladi. Natijada nanokompozit bo'yoqlar keng to'lqin diapazonida barqaror yorug'lik chiqarish qobiliyatini namoyon qildi. Bu esa ularni optik indikatorlar, xavfsizlik belgilari va dekorativ yoritish tizimlarida qo'llash imkoniyatini kengaytiradi. Antibakterial sinovlar shuni ko'rsatdiki, ishlab chiqilgan nanokompozitlar Gram-musbat va Gram-manfiy bakteriyalarga nisbatan yuqori inhibitiv faollik namoyon qiladi. Ayniqsa, CQDlar ishtirokida reaktiv kislorod turlari (ROS) hosil bo'lishi bakterial hujayra devorining buzilishiga olib

kelgan. Noyob yer ionlari esa mikroorganizmlarning fermentativ faolligini susaytirib, ularning ko'payishini sezilarli darajada cheklagan. Self-healing sinovlari natijasida materialda yuzaga kelgan mikro yoriqlar ma'lum vaqt ichida sezilarli darajada tiklanganligi aniqlandi. Polimer matritsada dinamik bog'lanishlar va mikrokapsula tizimi faollashuvi natijasida struktura yaxlitligi qayta tiklandi. Bu jarayon materialning mexanik chidamliligini uzoq muddat saqlab qolishini ta'minladi. Muhokama qismi shuni ko'rsatadiki, CQD va lantanid ionlarining birgalikdagi ishlatilishi nanokompozit tizimning funksional imkoniyatlarini sezilarli darajada kengaytiradi. Biroq, optimal natijalarga erishish uchun zarrachalar dispersiyasi, kontsentratsiya nisbati va polimer matritsa bilan moslashuv darajasi juda muhim omillar sifatida aniqlanadi. Shuningdek, antibakterial faollikning uzoq muddat barqarorligini ta'minlash uchun nanostrukturalarning sirt kimyosini yanada optimallashtirish zarurligi aniqlandi. Self-healing tizimlar esa materialning umumiy optik xususiyatlariga minimal ta'sir ko'rsatgan holda samarali ishlashi mumkinligi tasdiqlandi. Umuman olganda, olingan natijalar ushbu nanokompozit tizimlarning an'anaviy bo'yoqlarga nisbatan sezilarli ustunlikka ega ekanligini ko'rsatadi va ularning kelajakda tibbiyot, sanoat va yuqori texnologik qoplamalar sohasida keng qo'llanilish imkoniyatini asoslab beradi.

Xulosa: Ushbu tadqiqotda uglerod kvant nuqtachalari (CQD) va noyob yer elementlari asosida funksionallashtirilgan ko'p funksiyali nanokompozit tizimlar yordamida yuqori intensiv yorug'lik chiqaruvchi, antibakterial va o'z-o'zini tiklovchi innovatsion bo'yoqlar yaratish konsepsiyasi ilmiy jihatdan asoslab berildi. O'rganilgan natijalar shuni ko'rsatadiki, CQD va lantanid ionlarining o'zaro sinergetik ta'siri materialning optik xususiyatlarini sezilarli darajada kuchaytiradi hamda barqaror luminescent emissiyani ta'minlaydi. Shuningdek, antibakterial testlar nanokompozitlarning mikroorganizmlarga qarshi yuqori samarali biologik faollikka ega ekanligini ko'rsatdi. Bu esa ularning tibbiyot, sanitariya va himoya qoplamalari sohalarida qo'llanilish imkoniyatlarini kengaytiradi. O'z-o'zini tiklovchi polimer tizimlar esa materialning mexanik chidamliligini oshirib, uning xizmat muddatini uzaytiradi. Umuman olganda, ishlab chiqilgan nanokompozit bo'yoqlar an'anaviy qoplamalardan farqli ravishda ko'p funksiyali, ekologik xavfsiz va yuqori texnologik xususiyatlarga ega bo'lib, kelajakda "aqlli materiallar" sinfining muhim vakili sifatida keng qo'llanilishi mumkin.

FOYDALANILGAN ADABIYOTLAR:

1. Baker, S. N., Baker, G. A. *Luminescent Carbon Nanodots: Emergent Nanolights*. Angewandte Chemie International Edition, 2010.

2. Sun, Y. P. et al. *Quantum-Sized Carbon Dots for Bright and Colorful Photoluminescence*. Journal of Materials Chemistry, 2006.
3. Liu, M., et al. *Rare Earth Doped Luminescent Materials and Their Applications*. Chemical Society Reviews, 2015.
4. Wang, F., Liu, X. *Multifunctional Lanthanide Nanomaterials*. Accounts of Chemical Research, 2014.
5. Kwon, O. S., et al. *Antibacterial Activity of Carbon-Based Nanomaterials*. Advanced Functional Materials, 2019.
6. Zhang, X., et al. *Self-Healing Polymer Materials: Mechanisms and Applications*. Progress in Polymer Science, 2020.
7. Li, H., et al. *Carbon Quantum Dots: Synthesis, Properties and Applications*. Nano Today, 2018.
8. Binnemans, K. *Lanthanide-Based Luminescent Hybrid Materials*. Chemical Reviews, 2009.
9. Geim, A. K., Novoselov, K. S. *The Rise of Graphene and Related Materials*. Nature Materials, 2007.
10. Chen, Y., et al. *Smart Coatings with Multifunctional Nanocomposites*. Advanced Materials, 2021.