



DOI: 10.5281/zenodo.7328877

UDC: 620.3+613/614

NANOMATERIALELE PRIN PRISMA SĂNĂTĂȚII UMANE

NANOMATERIALS THROUGH THE PRISM OF HUMAN HEALTH

Iurie Pînzaru^{1,3}, Kristina Stîncă^{1,3}, Roman Corețchi¹, Olga Irimca¹, Eugen Aramă¹, Elena Bucata¹, Svetlana Gherciu-Tutuescu¹, Vladimir Bernic²

¹ Secția Sănătatea ocupațională, siguranță chimică și toxicologie, Direcția Protecția Sănătății Publice, Agenția Națională pentru Sănătate Publică, Chișinău, Republica Moldova

² Laborator științific pericole chimice și toxicologie, Direcția cercetare și inovare în domeniul sănătății publice, Agenția Națională pentru Sănătate Publică, Chișinău, Republica Moldova

³ Universitatea de Stat de Medicină și Farmacie „Nicolae Testemițanu”, Chișinău, Republica Moldova

Rezumat

Obiective. Nanomaterialele, prezente într-o gamă largă de produse, au devenit o parte integrantă a vieții noastre de zi cu zi. Scopul prezentei lucrări constă în elucidarea principalelor aspecte ale aplicabilității și impactului nanomaterialelor prin prisma sănătății umane.

Materiale și metode. A fost efectuată o sinteză a lucrărilor științifice, inclusiv a capitolelor din cărți de specialitate, ghiduri practice, recomandări metodice, privind diversitatea nanomaterialelor și posibilul impact asupra sănătății umane, folosind bazele de date Pubmed, Pubchem, Google Scholar, Medline. Au fost utilizate datele de pe pagina web a WHO, CDC.

Rezultate. Nanotehnologia a câștigat un mare interes public datorită nevoilor și aplicațiilor nanomaterialelor aproape în fiecare domeniu al activității umane (biotehnologie, agricultură, industria auto, construcții, energie, medicină, electronică, textile, cosmetică, tehnologii informaționale), astfel, poate apărea o expunere neintenționată și/sau intenționată, ceea ce poate duce la un risc mai mare pentru sănătatea umană.

Concluzii. Gestionarea pe scară largă a nanomaterialelor și proceselor deschide posibilități creative, iar beneficiile oferite vor avea un impact substanțial asupra tuturor industriilor, științei, agriculturii, medicinei, etc. Înțelegerea efectelor expunerii umane la nanomateriale este foarte limitată, prin urmare, expunerea multilaterală la nanomateriale reprezintă o preocupare multidisciplinară.

Cuvinte cheie: nanotehnologie, nanomateriale, toxicitate, impact asupra sănătății

Summary

Objectives. Nanomaterials, present in a wide range of products, have become an integral part of our everyday life. The purpose of this paper is to elucidate the main aspects of the applicability and impact of nanomaterials from the perspective of human health.

Materials and methods. A synthesis of scientific publications, including chapters from specialist books, practical guides, methodical recommendations, on the diversity of nanomaterials and the possible impact on human health, using Pubmed, Pubchem, Google Scholar, Medline databases, was performed. Data from the WHO, CDC website was used.

Results. Nanotechnology has gained great public interest due to the needs and applications of nanomaterials in almost every field of human activity (biotechnology, agriculture, automotive industry, construction, energy, medicine, electronics, textiles, cosmetics, information technologies), thus, unintentional and/or intentional exposure may occur, which may result in a greater risk to human health.

Conclusions. Large-scale management of nanomaterials and processes opens up creative possibilities, and the benefits provided will have a substantial impact on all industries, science, agriculture, medicine, etc. Understanding of the effects of human exposure to nanomaterials is very limited, therefore multi-faceted exposure to nanomaterials is a multidisciplinary concern.

Keywords: nanotechnology, nanomaterials, toxicity, health impact

Introducere

Ideea de a putea manipula materiale și particule la nivel molecular sună ca intriga unui film, cu toate acestea, în ultimii 25 de ani, a devenit ferm parte a științei și a unui domeniu științific independent: *nanotehnologia* [1].

"Ași dori să discut despre un domeniu puțin studiat al fizicii, care pare a fi foarte important, promițător și poate găsi multe aplicații tehnice valoroase. Este vorba despre problema controlului și gestionării structurii materiei în gama de dimensiuni foarte mici. Dedesubt sau în interiorul spațiului, este o lume uimitor de complexă a formelor mici, iar într-o zi (de exemplu, în anul 2000) oamenii vor fi surprinși că, înainte

de 1960 nimeni nu a luat în serios studiul acestei direcții" [2]. Cu aceste cuvinte, în ajunul anului 1960, la cina de Crăciun a Societății Americane de Fizică, celebrul fizician teoretician american, unul dintre fondatorii electrodinamicii cuantice, Richard Feynman și-a început prelegerea. În discursul său au fost menționate pentru prima dată metodele, care mai târziu aveau să fie numite nanotehnologie.

Nanoparticulele (NP) sunt elemente structurale ale căror dimensiuni geometrice nu depășesc 100 nm în cel puțin o dimensiune și au proprietăți, caracteristici funcționale și operaționale calitativ noi [3]. Nanomaterialele (NM) sunt o clasă de materiale, care aparțin unui domeniu nou, mai

larg, de cunoaștere, care a primit o dezvoltare semnificativă în secolul XXI și numită "nanotehnologie", care constituie domeniul interdisciplinar al științei și tehnologiei fundamentale și aplicative, care se ocupă cu o combinație de justificare teoretică, metode practice de cercetare, analiză și sinteză, precum și metode de producere și utilizare a produselor cu o structură atomică dată prin manipularea controlată de atomi și molecule. Bazele nanotehnologiei, după cum consideră mai mulți experți în domeniu, au fost stabilite de Laureatul Premiului Nobel, R. Freinman, în 1959 [2], iar în 1974 japonezul Noryo Taniguti a propus termenul de nanotehnologie pentru a descrie procesul de construire de noi obiecte și materiale prin manipularea atomilor.

În 1981, angajații IBM, G. Bining și G. Rohrer au creat un microscop cu scanare tunel (STM), care permite obținerea unei imagini cu o rezoluție la nivelul dimensiunii atomilor, ceea ce a reprezentat o realizare științifică extrem de importantă, întrucât cercetătorii pentru prima dată au avut ocazia să observe și să studieze în mod direct lumea de dimensiunea unui nanometru, la scară atomică [4, 5].

Proiectul "Genomului uman", care a fost realizat în decurs de 10 ani (1990-2000) și a devenit o descoperire de succes în biologie și medicină, a permis oamenilor de știință să citească informațiile genetice asociate cu corpul uman, ceea ce a dus ulterior la crearea de noi medicamente, care să acționeze pe principii noi și pe o bază genomică. Următorul pas firesc a fost dezvoltarea de noi ramuri ale industriei farmaceutice și crearea noilor procese și capacități de producție, precum și extinderea domeniului de aplicare a tuturor activităților de afaceri din această industrie importantă.

În domeniul medicinei, ne putem gândi deja la realizarea celor mai de neconcepute fantezii (lupta împotriva bătrâneții, tratamentul tuturor bolilor, victoria asupra cancerului). Nanotehnologia ar trebui să devină baza pentru implementare practică a mai multor aspirații ale omului. În anul 2000, nanotehnologia a făcut primii pași și începe să se dezvolte rapid, dar până la jumătatea secolului ne putem aștepta deja la o descoperire semnificativă în multe domenii, inclusiv tehnologia informației, biologie, medicină etc. [2].

Scopul prezentei lucrări constă în elucidarea principalelor aspecte ale aplicabilității și impactului nanomaterialelor prin prisma sănătății umane.

Materiale și metode

A fost efectuată o sinteză a lucrărilor științifice publicate în mediul online privind diversitatea nanomaterialelor și posibilul impact asupra sănătății umane, folosind bazele de date Pubmed, Pubchem, Google Scholar, Medline. Au fost utilizate datele de pe pagina web a WHO, CDC. Au fost selectate și analizate articole, reviuuri, precum și capitolele din cărți de specialitate, recomandări metodice, scrisori informative, ghiduri practice.

Rezultate și discuții

Înțelegerea și utilizarea mecanismelor de interacțiune la nivel molecular sunt importante nu numai pentru biologie și medicină, dar, totodată, formează și baza nanoștiinței în general. Până în prezent, în lume, nu există un standard, care

ar descrie ce este nanotehnologia, ce sunt nanoprodusele. Spre exemplu, conform "Conceptului pentru dezvoltarea lucrărilor în domeniul nanotehnologiilor în Federația Rusă pentru perioada până în 2010" (2004), nanotehnologia este definită ca un set de metode și tehnici, care oferă capacitatea de a crea și modifica obiecte într-o modalitate controlată, incluzând componente cu dimensiuni mai mici de 100 nm în cel puțin o măsurătoare. Drept urmare, obiectele capătă calități fundamentale noi, care le permit să fie integrate în sisteme pe deplin funcționale la scară largă.

Prin urmare, cercetarea fundamentală a secolului XXI în domeniul nanotehnologiilor trebuie să vizeze în mod necesar tocmai studierea mecanismelor proceselor la nivel molecular. Aceasta este o paradigmă, care indică faptul că valoarea inițială ar trebui redusă de un miliard de ori, adică împărțită la unu cu nouă zerouri – 1.000.000.000. De exemplu, 1 nanometru este o miliardime din metru ($1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$). Pentru a ne imagina cât de mic este 1 nm, să realizăm următorul experiment de gândire (Figura 1). Dacă reducem diametrul planetei Pământ ($12.750 \text{ km} = 12,75 \times 10^6 \text{ m} \approx 10^7 \text{ m}$) de 100 de milioane (10^8) de ori, vom obținem aproximativ 10^{-1} m . Aceasta este o dimensiune aproximativ egală cu diametrul unei mingi de fotbal (diametrul standard al unei mingi de fotbal constituie 22 cm, dar la scara noastră această diferență este nesemnificativă, pentru noi ($2,2 \times 10^{-1} \text{ m} \approx 10^{-1} \text{ m}$)). Dacă reducem diametrul unei mingi de fotbal de aceleași 100 de milioane (10^8) de ori, atunci vom obține dimensiunea nanoparticulelor de 1 nm (aproximativ diametrul unei molecule de carbon de fulerenă C_{60} , similară, ca formă, cu cea a unei mingi de fotbal).

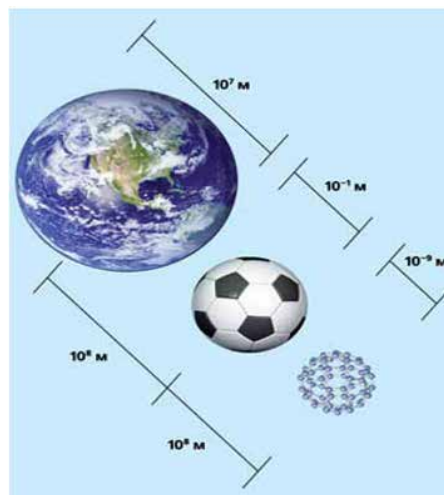


Figura 1. Raportul dintre diametrele Pământului ($\approx 10^7 \text{ m}$), mingii de fotbal ($\approx 10^{-1} \text{ m}$) și moleculei C_{60} ($\approx 10^{-9} \text{ m} = 1 \text{ nm}$). Imagine: «Экология и жизнь»

Domeniile de aplicare a nanomaterialelor

Nanomaterialele au devenit o parte integrantă a vieții noastre de zi cu zi, toți oamenii fiind expuși la acțiunea substanțelor chimice cu efecte nefaste, deoarece nanoparticulele în doze mici sunt prezente într-o gamă largă de produse. Există mai mult de 3000 de aplicații pe bază de nanoparticule [6, 7]. Pe lângă descoperirea principiilor fundamentale și avansarea cunoștințelor în nanoștiință, nanomaterialele au un spectru larg de aplicații în societate. Nanomaterialele – materiale

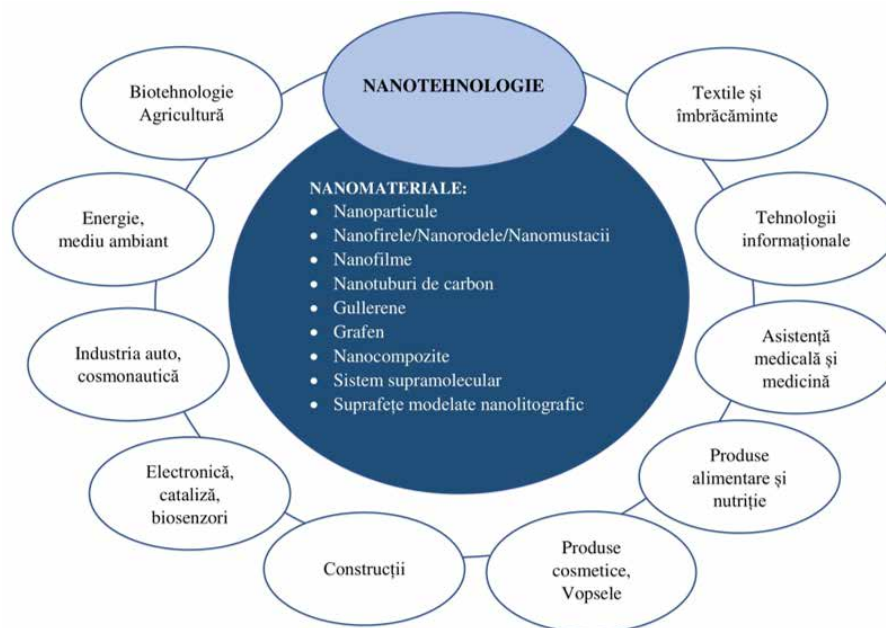


Figura 2. Domeniile de aplicare a nanotehnologiei și a nanomaterialelor

alcătuite din unități care sunt fiecare în parte de mii de ori mai mici decât grosimea firului de păr uman, au fost descoperite, ca fiind utile pentru combaterea amenințărilor la adresa bunăstării planetei noastre [8].

Nanotehnologia a câștigat un mare interes public datorită nevoilor și aplicațiilor nanomaterialelor în mai multe domenii: biotehnologie, agricultură, industria auto, construcții, energie, medicină, electronică, textile, cosmetică, tehnologii informaționale, etc. (figura 2).

Pe măsură ce utilizarea nanomaterialelor continuă să crească exponențial, cu aplicații din lumea reală aproape în fiecare domeniu al activității umane (îngrijirea sănătății, alimentație și nutriție, purificarea apei, producție și inginerie, etc.), poate apărea o expunere neintenționată și/sau intenționată, ceea ce poate duce la un risc mai mare pentru sănătatea umană. Utilizatorii produsului final, subiecții expuși profesional și publicul larg pot fi expuși riscului prin efectele adverse [1, 9, 10].

Ca răspuns la acest domeniu în plină dezvoltare, guvernele și organismele de reglementare au încercat să echilibreze promovarea nanotehnologiei (de exemplu, Inițiativa Națională pentru Nanotehnologie din Statele Unite și Grupul de Lucru Interagenții pentru Nanotehnologie) cu evaluarea și reglementarea riscurilor (de exemplu, Clusterul UE pentru NanoSiguranță și proiecte precum NANoREG).

Studiul toxicității materialelor la scară nanometrică, a avansat în conformitate cu nanotehnologia în ceea ce privește editarea și spectrul literaturii publicate. Spre deosebire de ceea ce a fost publicat referitor la substanțele toxice, nanotoxicologia funcționează mai mult în paralel cu evoluțiile din nanotehnologie [1].

Impactul NM asupra organismului în raport cu particularitățile toxico-igenice

Proprietățile fizico-chimice ale nanoparticulelor influențează modul în care acestea interacționează cu celulele și, prin urmare, toxicitatea lor potențială generală.

Înțelegerea acestor proprietăți poate duce la dezvoltarea unor nanoparticule mai sigure. Studiile recente au identificat diverse proprietăți, care fac unele nanoparticulele mai toxice decât altele. Caracteristicile nanoparticulelor, care influențează toxicitatea și sunt relevante pentru efectele asupra sănătății sunt: dimensiunea, care, pe lângă faptul că sunt capabile să traverseze membranele celulare, pot să ajungă în sânge și în diferite organe datorită dimensiunilor foarte mici. Nanoparticulele din orice material au un raport suprafață-volum mult mai mare decât particulele mai mari din același material. Prin urmare, relativ mai multe molecule ale substanței chimice sunt prezente la suprafață. Acesta poate fi unul dintre motivele pentru care nanoparticulele sunt în general mai toxice decât particulele mai mari din aceeași compoziție; *compoziția chimică și caracteristicile suprafeței* – toxicitatea nanoparticulelor depinde de compoziția lor chimică, dar și de compoziția oricăror substanțe chimice adsorbite pe suprafețele lor. Cu toate acestea, suprafețele nanoparticulelor pot fi modificate pentru a le face mai puțin dăunătoare sănătății; *forma* – deși există puține dovezi definitive, efectele asupra sănătății ale nanoparticulelor sunt probabil dependente și de forma lor [10, 11, 13].

Una dintre cele mai importante probleme, care trebuie abordate în viitorul apropiat, înainte de producerea în masă a nanomaterialelor, este toxicitatea acestora pentru sănătatea umană și impactul asupra mediului [6]. În cazul evaluării siguranței nanomaterialelor, mai întâi de toate ar trebui să se țină cont de impactul acestora asupra unor caracteristici biologice importante precum permeabilitatea biomembranelor, genotoxicitatea, activitatea proceselor de peroxidare a lipidelor, biotransformarea și eliminarea din organism. Metodologia de evaluare a riscurilor legate de nanomateriale constă în disponibilitatea unor metode extrem de sensibile pentru detectarea, recunoașterea și detectarea calitativă a nanomaterialelor în obiectele de mediu, mediile biologice și produsele alimentare.

Momentul definitoriu în evaluarea riscului constă

în stabilirea toxicității nanomaterialelor. În prezent, un număr mic de studii în acest domeniu indică la toxicitatea nanomaterialelor. Atunci când se evaluează riscul, ar trebui luate în considerare și trei caracteristici importante ale nanomaterialelor. În primul rând, majoritatea studiilor indică faptul că, dezvoltarea stresului oxidativ și deteriorarea ADN-ului constituie factorul determinant în toxicitatea nanomaterialelor, care poate duce la apoptoză, necroză celulară și un răspuns inflamator. În al doilea rând, o caracteristică fundamentală este insolubilitatea lor în apă și medii biologice. O altă caracteristică importantă a nanoparticulelor este raportul dintre lungimea particulelor și dimensiunea lor liniară minimă.

Următorul pas important este evaluarea aportului, distribuției și excreției nanomaterialelor din organism.

În prezent, există patru modalități principale de introducere a nanomaterialelor în corpul uman: pe cale orală, intravenoasă, prin inhalare și prin piele (figura 3). Problema posibililor căi de intrare a nanoparticulelor de natură variată în organism, trecerea lor prin bariere biologice, distribuția și acumularea în diferite organe și țesuturi, este în prezent studiată intens [14].

Cercetările realizate de comitetul științific privind riscurile emergente și nou identificate (*Scientific Committee on Emerging and Newly Identified Health Risks* (SCENIHR)), au demonstrat că, unele nanomateriale pot fi absorbite în plămâni, provocând inflamații și leziuni tisulare, fibroză și generare de tumori. Particulele mai mari sunt de obicei depuse în regiunea nazofaringiană (5–30 μm) prin mecanismul de impact inerțial, în timp ce particulele mai mici (1–5 μm), care nu reușesc să fie capturate în regiunea nazofaringiană sunt depuse în regiunea traheobronșică, în principal prin sedimentare. În cele din urmă, particulele submicronice

rămase (< 1 μm) și nanoparticulele (< 100nm) cu cea mai mică distribuție a dimensiunii pătrund adânc în regiunea alveolară. Cu cât particulele sunt depuse mai adânc, cu atât este nevoie de mai mult timp pentru a le elimina din plămân și cu atât este mai mare probabilitatea de efecte adverse asupra sănătății datorate țesutului particulelor și interacțiunilor particule-celulă. Odată depuse, aceste particule foarte mici sunt capabile să traverseze bariera sânge-aer-țesut și să intre în fluxul sanguin, unde pot ajunge cu ușurință la alte organe țintă. În plus, particulele insolubile pot rămâne în plămâni pe termen nelimitat, ce poate duce la leziuni și răspunsuri biologice [15].

Nanomaterialele sunt neurotoxice prin trecerea barierei hemato-encefalice, provocând stres oxidativ în celulele creierului, fiind posibil ca particulele ultrafine inhalate, în virtutea dimensiunii lor extrem de mici, să se depună în mucoasa olfactivă și apoi să se transloce în sistemul nervos central (SNC), care, la rândul său, ar putea provoca neurotoxicitate. Studii recente demonstrează că SNC poate fi o țintă crucială pentru inhalarea de nanoparticule. Expunerea la nanoparticule este asociată cu o serie de efecte acute și cronice, de la inflamație, exacerbarea astmului, boli pulmonare inflamatorii cronice și carcinogeneză. Diverse studii au demonstrat că nanoparticulele inhalate sau injectate pot intra în circulația sistemică și pot migra în diferite organe și țesuturi. Unele tipuri de nanotuburi de carbon pot duce la efecte asemănătoare azbestului. Într-adevăr, nanomaterialele pot provoca toxicitate în celulele umane. Pe lângă plămâni, s-a descoperit că, nanomaterialele în funcție de tipul acestora (tabelul 1), ajung și se acumulează la alte organe și țesuturi, inclusiv ficat, rinichi, inimă, creier, splină, schelet și țesuturile moi [15, 16, 17].

Tabelul 1

Riscurile posibile asupra sănătății în funcție de tipul acestora

Tipul nanomaterialelor	Riscuri posibile
Nanomateriale de carbon, nanoparticule de siliciu	Inflamație pulmonară, granuloame și fibroză
Nanomateriale de carbon, argint și aur	Distribuție în alte organe, inclusiv în sistemul nervos central
Puncte cuantice, carbon și nanoparticule de TiO_2	Pătrund prin traversarea barierei cutanate
MnO_2 și nanoparticule de carbon	Pătrund în creier prin neuronii olfactivi ai epitelului nazal
TiO_2 , Al_2O_3 , funingine, nanoparticule de Co și Ni	Pot fi mai toxice decât particulele de dimensiunea micronului

Mai multe studii de specialitate evidențiază hepatotoxicitatea nanomaterialelor. Sângele purtător de substanțe toxice este filtrat de ficat înainte de a fi distribuit în alte părți ale corpului. Nivelurile ridicate de expunere și activitate metabolică ridicată fac din ficat un organ țintă major al substanțelor toxice. La fel, se constată că nanoparticulele prinse de sistemul reticuloendotelial contribuie ca ficatul și splina să fie principalele organe țintă [18]. Cardiotoxicitatea și hepatotoxicitatea nanomaterialelor sunt determinate de dezvoltarea stresului oxidativ și a răspunsului inflamator, care duce la necroză celulară și apoptoză. De asemenea, se știe că nanoparticulele pot afecta negativ sistemul de coagulare a sângelui [14, 20]. La fel, a fost demonstrat că

nanoparticulele prezintă un potențial nefrototoxic important, atât la nivel tubular (adică, degenerarea celulei epiteliale tubulare, fragmente celulare și lichid proteic din lumenul tubului, fibroză interstițială renală), cât și la nivel glomerular (adică glomeruli umflați, modificări în spațiul lui Bowman și proliferarea celulelor mezangiale) [19]. Pielea, cel mai mare organ al corpului, servește ca o cale principală de expunere umană în mediu și/sau profesională, la substanțe chimice. Nanomaterialele au capacitatea de a crește solubilitatea, transparența și culoarea produselor cosmetice. Prin urmare, sunt folosite de industria cosmetică, în produsele farmaceutice. Sunt utilizate ca intervenții medicale pentru prevenirea, diagnosticarea și tratamentul bolilor de piele.

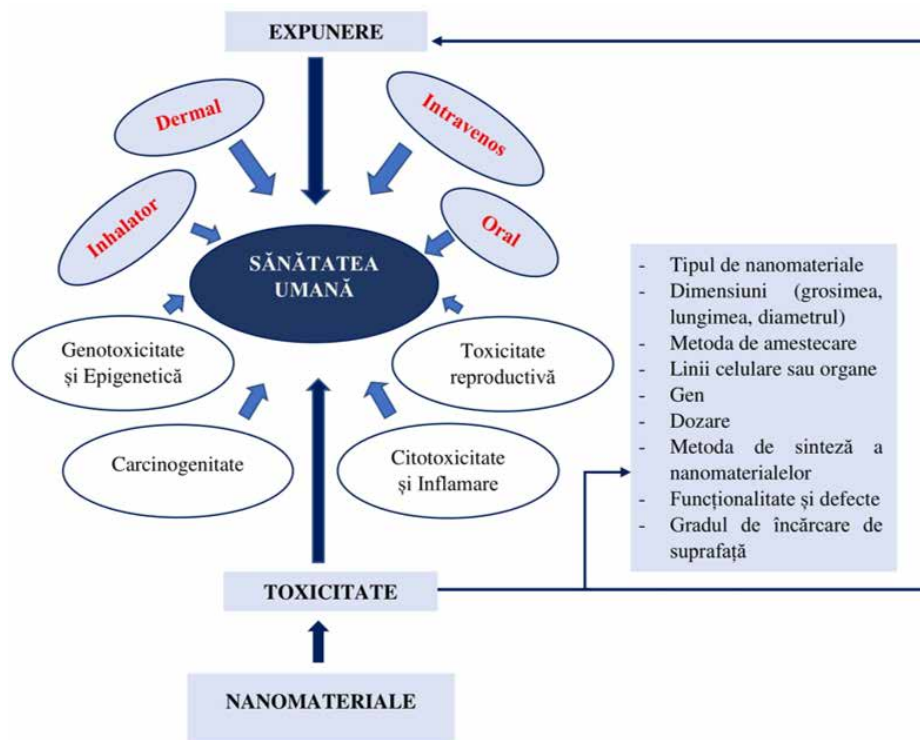


Figura 3. Impactul nanomaterialelor asupra sănătății umane

Astfel, prin piele nanomaterialele sunt potențial toxice pentru organismul uman. În plus, rezultatele mai multor cercetări privind imunotoxicitatea nanomaterialelor sugerează că, anumite nanomateriale pot avea potențialul de a provoca imunotoxicitate [18, 20].

Evaluarea siguranței nanomaterialelor ar trebui să includă mai multe direcții principale [14]:

✓ metode pentru determinarea cantitativă, detectarea și identificarea nanomaterialelor în obiecte de mediu, medii biologice și produse alimentare, care permit distingerea nanomaterialelor de analogii lor sub formă macrodispersă;

✓ studiul efectului nanomaterialelor asupra proteinelor, lipidelor, acizilor nucleici (ARN, ADN, membrane celulare, ribozomi, enzime);

✓ studiul căilor de pătrundere a nanomaterialelor prin biomembrane, interacțiunea cu receptorii membranari;

✓ studiul modificărilor proprietăților nanoparticulelor în compoziția sistemelor model care reproduc diverse medii ale unui organism viu (conținut intestinal și gastric, limfa, sânge, urină, bilă, etc.)

✓ determinarea parametrilor de toxicitate acută și cronică, toxicitatea organelor interne (neurotoxicitate, hepatotoxicitate, cardiotoxicitate, imunotoxicitate, etc.) și efecte pe termen lung (mutagenitate, embriotoxicitate, teratogenitate, carcinogenitate), precum și distribuția nanomaterialelor în organe și țesuturi;

✓ determinarea parametrilor fazelor I și II ale metabolismului xenobiotic și a sistemului de apărare antioxidantă;

✓ studiul efectelor nanomaterialelor asupra apoptozei, genotoxicității și exprimării genelor;

✓ studiul supraviețuirii microorganismelor probiotice ale microflorei normale a tractului gastrointestinal în prezența nanomaterialelor, determinarea impactului nanomaterialelor asupra microbiocenozei tractului gastrointestinal.

Prin urmare, un sistem complet de evaluare a riscului nanomaterialelor include un complex extins de teste fizico-chimice, biochimice, biologice moleculare, toxicologice și studii speciale, care permit evaluarea impactului acestora asupra obiectelor biologice [14].

Concluzii

1. În prezent, nanotehnologia este o știință aplicată, care contribuie la dezvoltarea rapidă a industriei și generează o gamă diversă de materiale și procese la scară nanometrică.

2. Gestionarea pe scară largă a materialelor și proceselor deschide de posibilități creative, iar beneficiile oferite vor avea un impact substanțial asupra tuturor industriilor, științei, agriculturii, medicinei, etc.

3. Descoperirea și evidențierea proprietăților specifice ale suprafeței particulelor, care le fac pe unele să fie mai toxice decât altele necesită un studiu sistematic bazat pe nanoparticule similare ca compoziție (dimensiune și morfologie).

4. Comunitatea medicală a făcut progrese considerabile în descifrarea și impactul nanotoxicității asupra sănătății umane. Înțelegerea efectelor expunerii umane la nanomateriale este foarte limitată, prin urmare, expunerea multilaterală la nanomateriale reprezintă o preocupare multidisciplinară.

Bibliografie

1. Stone V, Miller MR, Clift MJD, et al. Nanomaterials Versus Ambient Ultrafine Particles: An Opportunity to Exchange Toxicology Knowledge. *Environ Health Perspect.* 2017;125(10):106002. Published 2017 Oct 10. doi:10.1289/EHP424.
2. Feinman R. There's plenty of room at the bottom: An invitation to enter a new field of physics. New York, USA: Reinhold; 1961.
3. Янушич АН, Старостина ЕА, Макарова АМ и др. Влияние наночастиц на окружающую среду и здоровье человека. *Молодой ученый.* 2018;17:126-128 (In Russ.) [Janushchik AN, Starostina EA, Makarova AM et al. Vliianie nanochastits na okruzhaiushchuiu srediu i zdorov'e cheloveka. *Molodoi uchenyi.* 2018;17:126-128 (In Russ.)].
4. Оуэнс Ф, Пул Ч. Нанотехнологии. Перевод с английского. Москва: „Техносфера”; 2007. (In Russ.) [Ouens F, Pul Ch. Nanotekhnologii. Pervod s angliiskogo. Moskva: „Tekhnosfera”; 2007. (In Russ.)].
5. Ternes M, Lutz CP, Hirjibehedin CF, Giessibl FJ, Heinrich AJ. The force needed to move an atom on a surface. *Science.* 2008;319(5866):1066-1069. doi:10.1126/science.1150288.
6. Ray PC, Yu H, Fu PP. Toxicity and environmental risks of nanomaterials: challenges and future needs. *J Environ Sci Health C Environ Carcinog Ecotoxicol Rev.* 2009;27(1):1-35. doi:10.1080/10590500802708267;
7. Highsmith J. Global Markets: A BCC Research Report. BCC Research; Wellesley, MA, USA: 2014. Nanoparticles in Biotechnology, Drug Development and Drug Delivery.
8. SmarterNext.com. Nanomaterialele ar putea combate schimbările climatice și poluarea. <https://smarternext.com/ro/nanomaterialele-ar-putea-combate-schimbarile-climatice-si-poluarea/>. Accessed September 30, 2022.
9. Leso V, Fontana L, Mauriello M, Iavicoli I. Occupational Risk Assessment of Engineered Nanomaterials: Limits, Challenges and Opportunities. *Current Nanoscience.* 2016;13(1):55-78. doi:10.2174/1573413712666161017114934.
10. Huang YW, Cambre M, Lee HJ. The Toxicity of Nanoparticles Depends on Multiple Molecular and Physicochemical Mechanisms. *Int J Mol Sci.* 2017;18(12):2702. Published 2017 Dec 13. doi:10.3390/ijms18122702
11. European Commission. Scientific Committee on Emerging and Newly Identified Health Risks (SCENHIR) modified Opinion (after public consultation) on The appropriateness of existing methodologies to assess the potential risks associated with engineered and adventitious products of nanotechnologies. https://ec.europa.eu/health/ph_risk/committees/04_scenihir/docs/scenihir_o_003b.pdf. Published March 10, 2006. Accessed October 15, 2022.
12. Ganguly P, Breen A, Pillai SC. Toxicity of Nanomaterials: Exposure, Pathways, Assessment, and Recent Advances. *ACS Biomaterials Science & Engineering.* 2018;4(7):2237-2275. doi:10.1021/acsbomaterials.8b00068.
13. ВОЗ. Нанотехнологии и здоровье населения: научные данные и управление рисками Отчет о совещании экспертов ВОЗ 10-11 декабря 2012 г., Бонн, Германия. <https://apps.who.int/iris/handle/10665/350546?show=full>. Доступ Сентябрь 30, 2022. (In Russ.) [VOZ. Nanotekhnologii i zdorov'e naseleniia: nauchnye dannye i upravlenie riskami Otchet o soveshchani i ekspertov VOZ 10-11 dekabria 2012 g., Bonn, Germaniia. <https://apps.who.int/iris/handle/10665/350546?show=full>. Dostup Sentjabr' 30, 2022. (In Russ.)].
14. Рахманин ЮА, Новиков СМ, Шашина ТА, и др. Руководство по оценке риска для здоровья населения при воздействии химических веществ, загрязняющих окружающую среду (Р 2.1.10.1920-04). Федеральный центр Россанэпиднадзора Минздрава России; 2004. (In Russ.) [Rahmanin luA, Novikov SM, Shashina TA, i dr. Rukovodstvo po otsenke riska dlia zdorov'ia naseleniia pri vozdeistvii khimicheskikh veshchestv, zagriazniaiushchikh okruzhaiushchuiu srediu (R 2.1.10.1920-04). Federal'nyi tsentr Rossanepidemnadzora Minzdrava Rossii; 2004. (In Russ.)].
15. Gupta R, Xie H. Nanoparticles in Daily Life: Applications, Toxicity and Regulations. *J Environ Pathol Toxicol Oncol.* 2018;37(3):209-230. doi:10.1615/JEnvironPat holToxicolOncol.2018026009
16. The Health and Safety Authority. Nanomaterials. https://www.hsa.ie/eng/your_industry/chemicals/legislation_enforcement/nanomaterials/. Accessed October 11, 2022.
17. Asmatulu E, Andalib MN, Subeshan B, et al. Impact of nanomaterials on human health: a review. *Environmental Chemistry Letters.* 2022;20(4):2509-2529. doi:10.1007/s10311-022-01430-z
18. Sahu SC, Hayes AW. Toxicity of nanomaterials found in human environment: A literature review. *Toxicology Research and Application.* 2017;1. doi:10.1177/2397847317726352.
19. Iavicoli I, Fontana L, Nordberg G. The effects of nanoparticles on the renal system. *Crit Rev Toxicol.* 2016;46(6):490-560. doi:10.1080/10408444.2016.1181047
20. Cheng Y, Chen Z, Yang S, et al. Nanomaterials-induced toxicity on cardiac myocytes and tissues, and emerging toxicity assessment techniques. *Science of The Total Environment.* 2021;800:149584. doi:10.1016/j.scitotenv.2021.149584.

Recepționat – 02.11.2022, acceptat pentru publicare – 13.11.2022

Declarația de conflict de interes: Autorii declară lipsa conflictului de interes.

Declarația de finanțare: Autorii declară lipsa de finanțare.

Citare: Pinzaru Iu, Stincă K, Corețchi R, Irimca O, Aramă E, Bucata E, Gherciu-Tutuescu S, Bernic V. Nanomaterialele prin prisma sănătății umane [Nanomaterials through the prism of human health]. *Arta Medica.* 2022;85(4):91-96.