

## NANOČASTICE – EKOTOXICKÉ ÚČINKY NA ŽIVOTNÉ PROSTREDIE

**PAULA BRANDEBUROVÁ, ANNA GREŇČÍKOVÁ  
a TOMÁŠ MACKUEAK**

*Oddelenie environmentálneho inžinierstva, Ústav chemického a environmentálneho inžinierstva, Fakulta chemickej a potravinárskej technológie STU, Radlinského 9, 812 37 Bratislava*

*brandeburova.paula@gmail.com*

Došlo 20.2.18, prijaté 18.5.18.

---

**Kľúčové slová:** nanočastice, nanoekotoxicita, potravinový reťazec, životné prostredie

---

### Obsah

1. Úvod
2. Prienik a možná kumulácia nanočastíc v životnom prostredí
3. Od ekotoxikológie k nanoekotoxikológii
  - 3.1. Ekotoxicita rôznych typov nanomateriálov
4. Mechanizmy toxicity nanomateriálov
5. Záver

### 1. Úvod

Výroba a následné použitie rôznych druhov nanomateriálov sa stala v posledných rokoch veľmi intenzívne študovanou problematikou<sup>1</sup>. Častice v nanorozmeroch sú na Zemi prítomné po dobu miliónov rokov a niektoré z nich sú využívané ľudstvom už tisíce rokov<sup>2</sup>. Napríklad sadze, ktoré sú produktom neúplného spaľovania fosílnych palív či vegetácie, majú veľkosti častíc v rozmedzí od nanometrov až do mikrometrov a mali už od staroveku rôzne využitia<sup>3</sup>. V dnešnej dobe materiály v nanorozmeroch nachádzajú svoje využitie v rôznych odvetviach ako je elektronika, biomedicína, farmaceutické produkty, kozmetické produkty, energetika, environmentálne technológie, katalýza či materiálové inžinierstvo. Podobne ako pri aplikácii pesticídov v 50. a 60. rokoch 20. storočia, je možné v dnešnej dobe pozorovať aplikáciu v tomto prípade nových typov nanočastíc v rôznych odvetviach techniky či environmentálnych technológií, aj keď častokrát nie je dostupných dostatok vedomostí o ich možných toxických účinkoch na zdravie ľudí a ekotoxicite<sup>4</sup>. Zatiaľ čo toxicita ako taká sa zameriava na ľudí a jej cieľom je zabezpečiť ochranu ľudského zdravia, ekotoxicita je zamera-

ná na organizmy na rôznych trofických úrovniach a jej cieľom je ochrana populácií organizmov a ekosystémov. Ekotoxicita zahŕňa mechanizmy prirodzeného vychytávania a vplyv faktorov životného prostredia na biologickú dostupnosť (a tým aj na toxicitu)<sup>5</sup>. Merania ekotoxicity sa vykonávajú najčastejšie na mikroorganizmoch, rastlinách, bezstavovcoch a drobných stavovcoch<sup>5,6</sup>. Okrem ekotoxicity nanomateriálov je však nevyhnutné zaoberať sa aj ich možnou akumuláciou v samotnom prostredí.

Nanočastice môžu pochádzať z prírodných zdrojov (biogénnych, geogénnych, atmosférických, pyrogénnych) a antropogénnych zdrojov<sup>6</sup>. Prírodné procesy, pri ktorých dochádza k tvorbe nanočastíc sú napríklad piesočné búrky, sopečné erupcie či lesné požiare<sup>7</sup>. Nanočastice z prírodných zdrojov môžu obsahovať humínové a fulvínové kyseliny, organické kyseliny a môžu sa vyskytovať aj vo forme uhlíka (uhlíkové nanotrubičky, fullerény) a kovov (oxidy zlata, striebra či železa)<sup>6,8</sup>.

Nanočastice pochádzajúce z antropogénnych zdrojov, s ktorými sa v súčasnosti stretávame, môžu byť pripravované z rôznych druhov materiálov. Najčastejšie je to uhlík alebo rôzne oxidy kovov, či polyméry<sup>9</sup>. V súčasnosti už existuje dostatok štúdií, ktoré skúmajú možné využitie alotropov nanomateriálov na báze uhlíka, ako sú napr. uhlíkové nanorúrky<sup>10</sup>, grafén a jeho deriváty<sup>11</sup> či fullerény<sup>12</sup>. V environmentálnych technológiách je najväčšia pozornosť venovaná využitiu nanomateriálov, akým je napr. biochár na remediáciu či úpravu pôdy a rôznych druhov vôd, a to najmä vďaka jeho dobrým sorpčným vlastnostiam<sup>13,14</sup>. Materiály na báze oxidov kovov a polokovov, ku ktorým patria najmä oxid kremičitý (SiO<sub>2</sub>), oxid titaničitý (TiO<sub>2</sub>) či oxid zinočnatý (ZnO) sú používané už vyše 20 rokov v kozmetických produktoch, ako sú opaľovacie krémy či zubné pasty<sup>15</sup>. K nanočasticiam antropogénneho pôvodu však patria aj častice pochádzajúce zo spaľovania fosílnych palív v motorových vozidlách, ktoré sú vo veľkej koncentrácii uvoľňované najmä v mestách s rušnou premávkou a môžu mať vážny dopad na zdravie a prostredie<sup>16</sup>. Doteraz však existuje málo štúdií, ktoré sa zaoberali možným toxickým vplyvom týchto nanomateriálov na zdravie človeka a životné prostredie z dlhodobého hľadiska<sup>1,17</sup>.

Táto štúdia preto sumarizuje možnú ekotoxicitu vybraných druhov nanomateriálov, pričom teoreticky spracováva doteraz publikované poznatky. K základným zisteniam patrí najmä fakt, že nanočastice rôznych druhov materiálov majú v nanoškále iné vlastnosti. Toto môže naznačovať ich možnú nanoekotoxicitu na prokaryotické a eukaryotické bunky. Taktiež je intenzívne skúmaná aj ich akumulácia v životnom prostredí a teda následne aj v organizmoch, čo môže predstavovať potenciálny problém pri ich budúcich aplikáciách v medicíne či environ-

mentálnych technológiách. Doteraz publikované práce v tejto oblasti sa venovali najmä spôsobom prípravy nanočastíc, cytotoxicite a ich využitiu v medicíne a toxicite nanočastíc najmä na ľudské zdravie<sup>18–24</sup>. Oproti doteraz publikovaným štúdiám v tejto problematike, táto štúdia prináša aktuálny všeobecný pohľad (z hľadiska rôznych typov študovaných nanomateriálov) na ich schopnosť akumulácie sa v životnom prostredí, ich možnú ekotoxicitu a najmä na potenciálne mechanizmy ich toxického pôsobenia.

## 2. Prienik a možná kumulácia nanočastíc v životnom prostredí

Výskum v oblasti využiteľnosti nanočastíc patrí k prioritám dnešnej doby, nakoľko nanomateriály okrem negatívnych vlastností, majú značný potenciál najmä v liečbe nie len nádorových ochorení<sup>25</sup>.

Práve kvôli narastajúcemu potenciálu rôznych nanočastíc bol zaznamenaný celosvetový nárast vo výskume a vývoji nanotechnológií<sup>26</sup>. V súčasnej dobe je odhadovaná produkcia rôznych druhov nanočastíc na približne 58 000 ton ročne<sup>8</sup>. Práve ich zvyšujúca sa produkcia vedie k ich potenciálnej kumulácii sa v životnom prostredí a v živých organizmoch. Touto cestou sa potom nanočastice môžu dostať až do ľudského tela<sup>27</sup>. Nanočastice sa môžu do životného prostredia dostávať viacerými spôsobmi. Môžu byť emitované ľudskou činnosťou buď z bodových zdrojov, akým sú najmä továrne, čistiarne odpadových vôd či skládky komunálnych odpadov alebo z nebodových zdrojov, ktoré obsahujú materiály, v ktorých sa nachádzajú nanočastice<sup>28</sup>. Často sa do prostredia implementujú aj úmyselne, napr. ako súčasť sanačnej technológie. Príkladom je využitie nanoželeza pri odstraňovaní chlórovaných zlúčenín<sup>29</sup>, či ťažkých kovov z vôd<sup>30</sup>. V životnom prostredí sa tieto emitované nanočastice následne zhromažďujú do väčších agregátov, ktoré sa následne dostávajú až do spodných vôd, pôdy a sedimentov. Ľudia, rastliny a živočíchy môžu byť následne exponovaní buď priamo vzduchom, či vodou alebo nepriamo cez potravinový a potravinový reťazec, v ktorom môžu byť nanočastice naakumulované<sup>8</sup>. V životnom prostredí teda môže dochádzať k bioakumulácii nanočastíc. Týmto environmentálne závažným problémom sa doposiaľ zaoberalo viacero štúdií<sup>31–33</sup>. Štúdia Clevelanda a spol. testovala schopnosť bioakumulácie strieborných nanočastíc v krevetách, slimáčkoch a rastlinách. Z výsledkov štúdie vyplýva, že k najväčšej akumulácii došlo v prípade slimákov, čo môže byť odôvodnené vyšším faktorom trofického prenosu. Faktor trofického prenosu je pomer koncentrácie danej látky v organizme a koncentrácie látky nachádzajúcej sa v potrave daného organizmu<sup>34</sup>. Podobná bioakumulácia strieborných nanočastíc bola preukázaná aj na planktóne *Daphnia magna*, na ktorom sa testovali čisté Ag nanočastice a ich kompozit Ag-NO<sub>3</sub>. Oba testované typy nanočastíc preukázali podobnú schopnosť akumulovania sa v testovanom organizme<sup>35</sup>. Akumulácia v organizmoch bola

študovaná aj v prípade nanočastíc TiO<sub>2</sub>. V štúdiu Yeo a Nama sa zistilo, že častice TiO<sub>2</sub> a tiež aj uhlíkové nanorúrky sa nachádzajú v telách hlíst a slimákov, pričom sa tam dostávajú najčastejšie cez potravinový reťazec<sup>36</sup>. V súčasnosti je každoročne opublikovaných viacero štúdií, ktoré sa zaoberajú akumuláciou nanočastíc do živých organizmov<sup>28,37</sup>. Väčšina štúdií potvrdzuje skutočnosť, že nanočastice sa akumulujú oveľa rýchlejšie a vo väčšom množstve cestou cez potravinový reťazec ako cez vodu samotnú<sup>34</sup>.

## 3. Od ekotoxikológie k nanoeekotoxikológii

Ekotoxikológia patrí k relatívne novým vedným odborom a zaoberá sa kontaminantmi hlavne v biosfére a ich účinkami na jej jednotlivé zložky (rastliny, živočíchy a ľudia)<sup>38</sup>. Nárast vývoja a produkcie nanotechnológií a nanomateriálov viedol k vytvoreniu nového vedného odboru, ktorý skúma ich potenciálne toxické účinky na životné prostredie a zdravie ľudí – nanoeekotoxikológii. Výskum v tejto oblasti sa začal na začiatku 90. rokov 20. storočia, kedy boli publikované prvé vedecké práce zaoberajúce sa prioritne toxicitou nanočastíc<sup>39</sup>. Je však nutné zdôrazniť, že niektoré typy nanočastíc sa vyskytujú v životnom prostredí prirodzene od vzniku našej planéty (napr. oxidy kovov)<sup>6,7</sup>, avšak pre novoprodukované syntetické nanočastice je nutné zaoberať sa vyhodnotením ich možných škodlivých účinkov na ekosystém<sup>40</sup>.

### 3.1. Ekotoxicita rôznych typov nanomateriálov

Na ekotoxicitu nanočastíc vplýva viacero faktorov, akým je napr. množstvo a veľkosť nanočastíc, ich koncentrácia, špecifický povrch, náboj, tvar, štruktúra, reaktivita, či rozpustnosť<sup>41</sup>, a preto pri analýze nanočastíc treba brať do úvahy ich fyzikálne a chemické vlastnosti. Ekotoxicita nanomateriálov je pomerne zložitá skúmať, pretože nanočastice sa v rôznom prostredí správajú často odlišne, menia svoju štruktúru aj zloženie<sup>42</sup>. Ekotoxicita nanomateriálov sa najčastejšie testuje na mikroorganizmoch, ako sú baktérie<sup>43</sup> či vlákňité huby<sup>44</sup>, tiež aj na vybraných druhoch rastlín<sup>45,46</sup> a vodných organizmoch<sup>47,48</sup>. Avšak v prípade testovania ekotoxicity nanočastíc môžu nastať rozdiely vo výsledkoch testov jednotlivých štúdií. Je to spôsobené najmä použitými testovacími médiami (sladkovodné organizmy, morské organizmy, baktérie či tkanivové kultúry) a spôsobom expozície (cez vodu, sedimenty či potravu). To má za následok rozdielny vplyv nanočastíc, ich agregáciu, interakcie s činidlami, vytváranie rôznych enzýmov či rozpúšťanie testovaných častíc na ióny<sup>49</sup>.

Množstvo štúdií sa v súčasnosti zameriava aj na výskum toxicity a ekotoxicity rôznych druhov nanomateriálov najmä na uhlíkovej báze a oxidov kovov<sup>1,46–50</sup>. Výsledky sa však často líšia, keďže výroba nanočastíc je založená na rôznych chemických a technologických postupoch, a teda môže dochádzať ku kontaminácii s rôznymi prímiesami, ktoré taktiež môžu vykazovať značné toxické

účinky<sup>51</sup>. Keď že je predpoklad, že bude narastať záujem o aplikácie širokej škály nanočastíc v rôznych technologických odvetviach, je nutné sa zaoberať aj ich toxicitou či všeobecne vplyvom na jednotlivé zložky životného prostredia<sup>17</sup>.

#### 4. Mechanizmy toxicity nanomateriálov

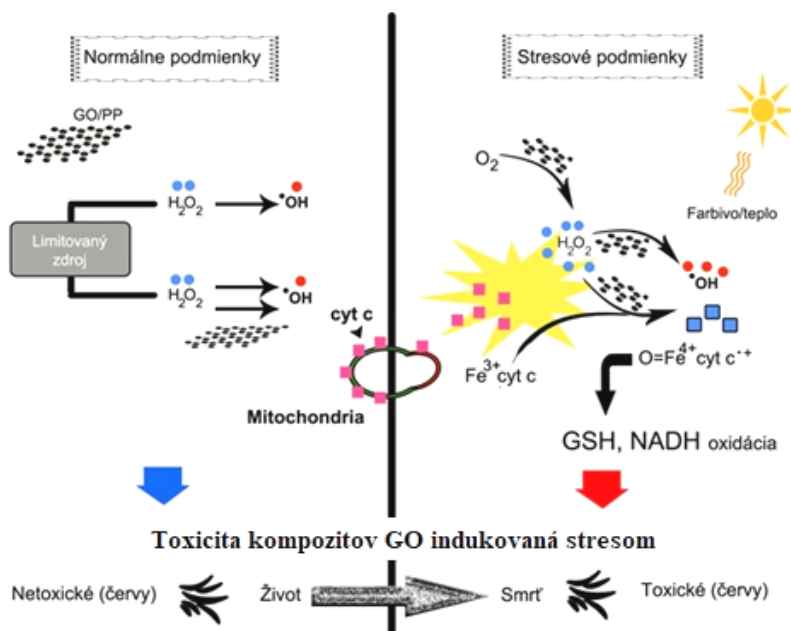
V oblasti nanotechnológií boli vyvinuté rôzne postupy na meranie koncentrácie nanočastíc v prostredí. Intenzívne sa študujú procesy ich prieniku do organizmu, bioakumulácia v rôznych orgánoch ľudského tela, prienik do rastlín, či iných živých organizmov. Je však nutné skúmať presné mechanizmy ich toxického účinku, ešte tesne predtým, ako sa začnú rôzne druhy nanočastíc vo väčších množstvách aplikovať<sup>52</sup>.

Problematika mechanizmov toxického pôsobenia nanomateriálov je značne rozsiahla a pomerne nová. Neustále pribúdajú nové štúdie zaoberajúce sa potenciálnymi mechanizmami toxicity, a preto zaradenie všetkých možných mechanizmov by presahovalo rámec tejto práce.

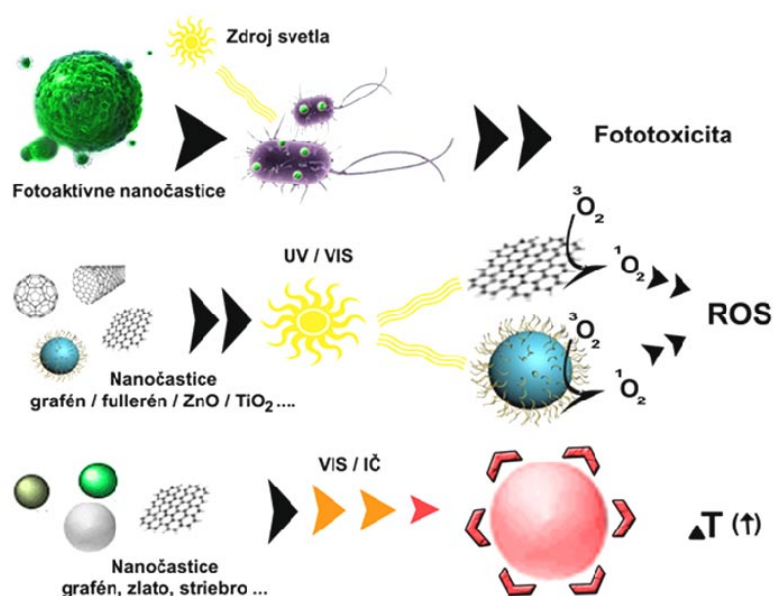
Interakcie nanomateriálov na báze uhlíka s bunkami, proteínmi a inými biomolekulami sú ovplyvnené najmä ich fyzikálno-chemickými vlastnosťami<sup>41</sup>. Hlavný mechanizmus toxicity grafénu a jemu príbuzných nanomateriálov je spojený s generovaním intracelulárnych reaktívnych druhov kyslíka, ktoré následne spôsobujú v organizme poškodenie proteínov a DNA, čo vedie k bunkovej smrti prostredníctvom apoptických alebo nekrotických dráh<sup>53</sup>. Nanomateriály tohto typu sa môžu do buniek integrovať

pasívnou internalizáciou (endocytóza) alebo aktívnou internalizáciou (energeticky závislá endocytóza sprostredkovaná klatrínom)<sup>54</sup>. Vo väčšine štúdií sú v súčasnosti popísané dva možné mechanizmy poškodenia buniek uhlíkovými nanomateriálmi cez generovanie reaktívnych foriem kyslíka (ROS). Prvým možným mechanizmom je bunková internalizácia, kedy nanomateriál zasiahne do systému prenosu elektrónov, čo vedie k nadprodukcii  $H_2O_2$  a hydroxylových radikálov. To následne vedie k oxidácii 1,3-bis(sn-3'-fosfatidyl)-sn-glycerolu, t.j. kardiolipínu (esenciálny fosfolipid biogenézy a funkcie mitochondrií) a uvoľneniu hemoproteínu z vnútornej mitochondriálnej membrány do cytoplazmy. Tento dej spustí uvoľnenie komplexu 3-[8,13-bis[1-[2-amino-3-(metylamo)-3-oxopropyl]sulfonyletyl]-18-(2-karboxyetyl)-3,7,12,17-tetrametylporfyrin-21,24-diid-2-yl]propanová kyselina; Fe(2+), t.j. cytochrómu c (cyt c), ktorý následne uvoľňuje vápnik z endoplazmatického retikula a aktivuje kaspázu 9, ktorá následne spôsobí aktiváciu kaspáz 3 a 7, ktoré vedú k bunkovej smrti (obr. 1)<sup>48,55</sup>. Ďalším z možných mechanizmov toxicity nanomateriálov na báze uhlíka je aktivácia MAPK (mitogénom aktivovaná proteínová kináza, JNK, ERK, p38) a TGF- $\beta$ , ktoré signalizujú cesty vedúce k aktivácii Bcl-2 (BIM) a tie následne aktivujú apoptózu vyvolanú v mitochondriách<sup>53</sup>.

V prípade fotoaktívnych nanomateriálov na vyvolanie určitej odozvy vo fyzikálnych, chemických a biologických systémoch je nutný zdroj žiarenia o rôznych vlnových dĺžkach<sup>56</sup>. Fotoaktívne nanomateriály sa všeobecne vyznačujú schopnosťou adsorpcie svetla vo viacerých oblastiach spektra, ako je UV (290–400 nm), Vis (400–750 nm) či IČ



Obr. 1. Schéma možného mechanizmu toxického účinku modelového nanokompozitu (GO/PP) vyvolaná stresovou reakciou<sup>48</sup>

Obr. 2. Schéma dvoch hlavných mechanizmov fototoxicity fotoaktívnych nanomateriálov<sup>57</sup>

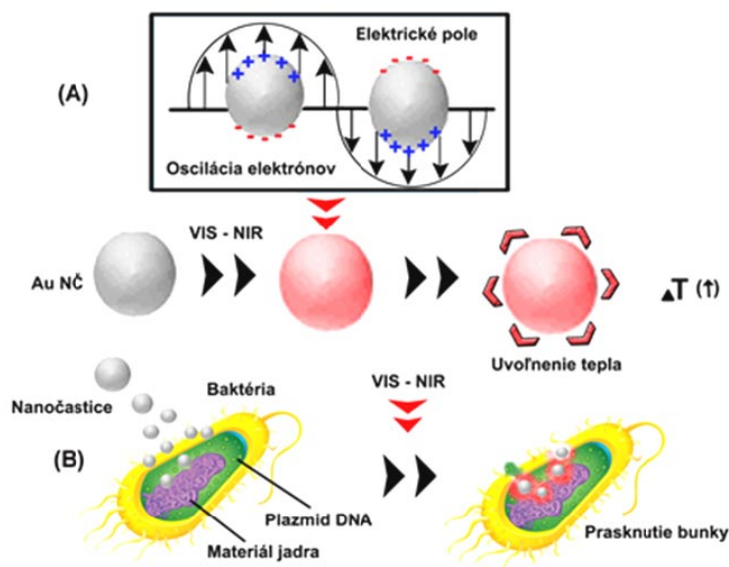
(750–900 nm)<sup>57</sup>. Fotofyzikálne a fotochemické vlastnosti nanomateriálov sa môžu líšiť v závislosti od druhu nanomateriálu. Avšak napriek tejto variabilite je možné fotoaktívne nanomateriály napr. rozdeliť do dvoch hlavných skupín na základe mechanizmu pôsobenia v biologických systémoch (obr. 2). Prvá skupina má schopnosť vďaka svojmu fotoaktívnemu jadrú generovať ROS, ktoré spôsobujú napr. cytotoxicitu. K týmto nanomateriálom sa zaraďujú napr. uhlíkové nanorúrky<sup>58</sup>, fullerény, grafén a jeho deriváty<sup>59</sup> či oxidy kovov ako TiO<sub>2</sub> alebo ZnO (cit.<sup>60</sup>) a tiež aj kvantové bodky<sup>61</sup>. Aktivácia fotoaktívnych jadier týchto nanomateriálov však vyžaduje ožarovanie svetlom v UV/Vis oblasti spektra (360–600 nm)<sup>62</sup>. Druhá skupina fotoaktívnych nanomateriálov je schopná plazmónovej fototermejnej aktivácie, ktorá následne generuje teplo, čo následne spôsobuje až smrť bunky. Týmto mechanizmom sa vyznačujú predovšetkým nanočastice zlata, aj keď účinnosť tohto nanomateriálu je ovplyvnená najmä jeho tvarom (nanočastice zlata v tvare tyčínok majú vyššiu účinnosť ako tie, ktoré sú v tvare gule)<sup>63</sup>. Fotoaktivácia tejto skupiny nanomateriálov nastáva pôsobením žiarenia vo VIS oblasti, až v oblasti blízkej infračervenej oblasti spektra (500–800 nm)<sup>64</sup>. Tento mechanizmus je typický pre nanoštruktúry zlata a striebra, ktorých povrch umožňuje povrchové plazmónové rezonancie ich elektrónov pôsobením svetla (obr. 3)<sup>57,65</sup>.

Nanomateriály na báze ušľachtilých kovov, ako je zlato, striebro či platina, sú v súčasnosti využívané v rôznych spotrebných výrobkoch najmä v kozmetike<sup>66,67</sup>, a nemej dôležitý je ich výskum v oblasti medicíny, najmä v liečbe nádorových ochorení, či v oblasti distribúcie

liečiv<sup>68–70</sup>. Používajú sa najmä ako prísady s antibakteriálnymi účinkami (nanostriebro) či ako prísady v kozmetike alebo výživových doplnkoch (nanostriebro, nanozlato)<sup>7</sup>. V prípade využitia nanočastíc tohto typu v medicíne, konkrétne v diagnostike a liečbe nádorov, je významným dôležitým faktorom ich tvar. Tvar nanočastice zohráva inštrumentálnu úlohu pri určovaní jej *in vivo* osudu. Bolo preskúmané, že tvar nanočastice ovplyvňuje jej schopnosť uniknúť imunitnému vycytávaniu, prietoku krvi a následne sa viazať na cieľ s vysokou afinitou<sup>71</sup>. Najviac preskúmané v tomto smere sú nanočastice v guľovom tvare, avšak v poslednej dobe pribúdajú zistenia, že častice iných tvarov (tyčinky, disky, polgule, elipsoidy) sa dokážu ešte účinnejšie zameriť na nádory ako guľovité častice<sup>71</sup>. Do ekosystému sa následne tieto častice dostávajú prostredníctvom niekoľkých ciest, vrátane priameho kontaktu organizmu s časticami (vdychovanie, požitie)<sup>28</sup>. Vo viacerých štúdiách bolo preukázané, že tieto typy nanomateriálov majú schopnosť inhibovať bunky cicavcov či baktérii po ich ožarení<sup>67,72</sup>.

## 5. Záver

Možnosti aplikácií nanomateriálov a ich modifikácií v rôznych technologických odvetviach, v environmentálnych oblastiach a v medicíne pútajú v posledných rokoch veľkú pozornosť vedeckých skupín. Viaceré typy nanomateriálov disponujú rôznymi pozitívnymi vlastnosťami, ktoré sa líšia vzhľadom ku konkrétnemu typu nanočastice. Avšak je potrebné skúmať aj ich potenciálne toxic-

Obr. 3. Schematický náčrt mechanizmu toxicity fototermlnou plazmónovou aktiváciou<sup>57</sup>

ké vlastnosti, ich možnosť akumulácie sa v životnom prostredí, či ich možné škodlivé účinky na ľudské zdravie. Táto komplexná štúdia má za úlohu sumarizovať možné škodlivé účinky vybraných typov nanomateriálov. Pojednáva tak o ich schopnosti akumulovať sa v životnom prostredí, či v živých organizmoch a tiež aj o ich možnej toxicite na bakteriálne, živočíšne alebo rastlinné bunky. Venuje sa taktiež najpravdepodobnejším mechanizmom, ktoré sú zodpovedné za ich toxické účinky. Súčasný poznatky však poukazujú aj na značný potenciál využitia nanomateriálov v oblasti liečby ochorení, akým sú civilizačné choroby či tumorové ochorenia. Keďže je predpoklad, že aj v blízkej budúcnosti budú najmä pre nanomedicínske účely intenzívne vyvíjané nové typy nanomateriálov, je potrebné dôkladne popísať aj ich toxicitu. Tento aspekt môže byť veľkou výzvou do ďalších výskumov v oblasti nanotoxicity.

*Táto práca vznikla vďaka grantovej schéme na podporu excelentných tímov mladých výskumníkov v podmienkach STU v Bratislave: „Mikropolutanty a rezistentné kmene baktérií ich monitoring a možnosti použitia inovatívnych postupov na ich odstránenie – nanomateriály a železany“ a Slovenskej agentúry pre výskum a vývoj v rámci zmluvy č. APVV-16-0124 a APVV-16-0171. Tento článok vznikol s podporou OP Výskum a vývoj pre projekt Centrum excelentnosti integrovanej protipovodňovej ochrany územia, ITMS 26240120004 spolufinancovaného zo zdrojov Európskeho fondu regionálneho rozvoja.*

#### Použité skratky

Bcl-2 (BIM)	proteín, ktorý funguje ako anti alebo proapoptotický regulátor
ERK	extracelulárne signálom regulované kinázy
JNK-c-Jun N	terminálna kináza
MAPK	mitogénom aktivovaná proteínová kináza
p38	trieda mitogénom aktivovaných proteínových kináz, ktorá je zodpovedná za stresové stimuly ako je ultrafialové žiarenie, teplotný šok a iné
ROS	reaktívne formy kyslíka
TGF-β	mimobunkové homodimerné proteíny, pracujúce ako cytokíny a látky regulujúce deelenie

#### LITERATÚRA

1. Brandeburová P., Bírošová L., Vojs M., Kromka A., Gál M., Tichý J., Híveš J., Mackuľak T.: *Monatsh. Chem.* 148, 525 (2017).
2. Colvin V. L.: *Nat. Biotechnol.* 21, 1166 (2003).
3. Schrand A. M., Huang H., Carlson C., Schlager J. J., Ōsawa E., Hussain S. M., Dai L.: *J. Phys. Chem. B* 111, 2 (2007).
4. Mahaye N., Thwala M., Cowan D. A., Musee N.: *Mutat. Res.* 773, 134 (2017).
5. Rana S., Kalaichelvan P. T.: *ISRN Toxicol.* 2013, 11.
6. Renzi M., Guerranti C.: *J. Environ. Anal. Chem.* 2, 149 (2015).
7. Buzea C., Pacheco I. I., Robbie K.: *Biointerphases* 2, MR17 (2007).

8. Nowack B., Bucheli T. D.: *Environ. Pollut.* **150**, 5 (2007).
9. Hasanzadeh M., Shadjou N., Lin Y., de la Guardia M.: *Trends Anal. Chem.* **86**, 185 (2017).
10. Sarkar B., Mandal S., Tsang Y. F., Kumar P., Kim K.-H., Ok Y. S.: *Sci. Total Environ.* **612**, 561 (2018).
11. Santhosh C., Velmurugan V., Jacob G., Jeong S. K., Grace A. N., Bhatnagar A.: *Chem. Eng. J.* **306**, 1116 (2016).
12. Yi H., Zeng G., Lai C., Huang D., Tang L., Gong J., Chen M., Xu P., Wang H., Cheng M., Zhang C., Xiong W.: *Chem. Eng. J.* **330**, 134 (2017).
13. Onorevoli B., da Silva Maciel G. P., Machado M. E., Corbelini V., Caramão E. B., Jacques R. A.: *J. Environ. Chem. Eng.* **6**, 1279 (2018).
14. Zhang P., Sun H., Ren C., Min L., Zhang H.: *Environ. Pollut.* **234**, 812 (2018).
15. Fan X., Wang C., Wang P., Hu B., Wang X.: *J. Hazard. Mater.* **342**, 41 (2018).
16. Kumar P., Morawska L., Birmili W., Paasonen P., Hu M., Kulmala M., Harrison R. M., Norford L., Britter R.: *Environ. Int.* **66**, 1 (2014).
17. Majerová M., Chorvátová A. M., Kromka A., Mackuřák T.: *Toxicol. Lett.* **280**, S213 (2017).
18. Cyrusova T., Podlipna R., Vaněk T.: *Chem. Listy* **109** (2015).
19. Dohnalová L., Dohnal V.: *Chem. Listy* **109**, 444 (2015).
20. Kučirková L., Královec K., Havelek R., Bručková L., Sedlák M.: *Chem. Listy* **109**, 693 (2015).
21. Kvittek O., Slepicka P., Lyutakov O., Svorcik V.: *Chem. Listy* **110**, 922 (2016).
22. Šebasta M., Kolenčík M., Matúš P., Kořenková L.: *Chem. Listy* **111**, 322 (2017).
23. Siegel J., Staszek M. V.: *Chem. Listy* **108**, 1102 (2014).
24. Žáková P., Kasálková P., Slepíčková N.: *Chem. Listy* **111**, 223 (2017).
25. Grenčíková A., Brandeburová P., Belišová N., Mackuřák T., Kromka A., Barbieriková Z., v: *Book of Abstracts 5th European Conference on Environmental Applications of Advanced Oxidation Processes*, str. 443, University of Chemistry and Technology Prague, Czech Republic, 2017.
26. Dunphy Guzmán K. A., Taylor M. R., Banfield J. F.: *Environ. Sci. Technol.* **40**, 1401 (2006).
27. Maynard A. D.: *Nanotechnology* (2006), [http://tinhoahoc.com/Nanotechnology/RiskRelatedResearch\\_Maynard\\_7-06-Final.pdf](http://tinhoahoc.com/Nanotechnology/RiskRelatedResearch_Maynard_7-06-Final.pdf), stiahnuté 15.1.2018.
28. Freixa A., Acuña V., Sanchis J., Farré M., Barceló D., Sabater S.: *Sci. Total Environ.* **619-620**, 328 (2018).
29. Yan W., Lien H.-L., Koel B. E., Zhang W.-X.: *Environ. Sci. Proc. Impacts* **15**, 63 (2013).
30. Kang Y.-G., Yoon H., Lee W., Kim E.-J., Chang Y.-S.: *Chem. Eng. J.* **334**, 2511 (2018).
31. Lopez-Chaves C., Soto-Alvaredo J., Montes-Bayon M., Bettmer J., Lopus J., Sanchez-Gonzalez C.: *Nanomedicine: Nanotechnol. Biol. Med.* **14**, 1 (2018).
32. Lv X., Yang Y., Tao Y., Jiang Y., Chen B., Zhu X., Cai Z., Li B.: *Environ. Pollut.* **234**, 953 (2018).
33. Vittori Antisari L., Carbone S., Bosi S., Gatti A., Dinelli G.: *Appl. Soil Ecol.* **123**, 551 (2018).
34. Cleveland D., Long S. E., Pennington P. L., Cooper E., Fulton M. H., Scott G. I., Brewer T., Davis J., Petersen E. J., Wood L.: *Sci. Total Environ.* **421-422**, 267 (2012).
35. McTeer J., Dean A. P., White K. N., Pittman J. K.: *Nanotoxicology* **8**, 305 (2014).
36. Yeo M. K., Nam D. H.: *Environ. Pollut.* **178**, 166 (2013).
37. Rajput V. D., Minkina T. M., Behal A., Sushkova S. N., Mandzhiyeva S., Singh R., Gorovtsov A., Tsitsuashvili V. S., Purvis W. O., Ghazaryan K. A., Movsesyan H. S.: *Environ. Nanotechnol. Monitor. Man.* **9**, 76 (2018).
38. Campana O., Wlodkovic D.: *Sens. Actuators, B* **257**, 692 (2018).
39. Kahru A., Dubourguier H.-C.: *Toxicology* **269**, 105 (2010).
40. Tripathi D. K., Shweta, Singh S., Singh S., Pandey R., Singh V. P., Sharma N. C., Prasad S. M., Dubey N. K., Chauhan D. K.: *Plant Physiol. Biochem.* **110**, 2 (2017).
41. Dusinska M., Tulinska J., El Yamani N., Kuricova M., Liskova A., Rollerova E., Rundén-Pran E., Smolkova B.: *Food Chem. Toxicol.* **109**, 797 (2017).
42. Esimbekova E. N., Nemtseva E. V., Bezrukikh A. E., Jukova G. V., Lisitsa A. E., Lonshakova-Mukina V. I., Rimatskaya N. V., Sutormin O. S., Kratasyuk V. A.: *Toxicol. In Vitro* **45**, 128 (2017).
43. Ji H., Sun H., Qu X.: *Adv. Drug Delivery Rev.* **105**, 176 (2016).
44. Wang X., Liu X., Chen J., Han H., Yuan Z.: *Carbon* **68**, 798 (2014).
45. Reddy P. V. L., Hernandez-Viezcas J. A., Peralta-Videa J. R., Gardea-Torresdey J. L.: *Sci. Total Environ.* **568**, 470 (2016).
46. Joško I., Oleszczuk P., Skwarek E.: *J. Hazard. Mater.* **331**, 200 (2017).
47. Cimbaluk G. V., Ramsdorf W. A., Perussolo M. C., Santos H. K. F., Da Silva De Assis H. C., Schnitzler M. C., Schnitzler D. C., Carneiro P. G., Cestari M. M.: *Ecotoxicol. Environ. Saf.* **150**, 215 (2018).
48. Cambier S., Røgeberg M., Georgantzopoulou A., Serchi T., Karlsson C., Verhaegen S., Iversen T.-G., Guignard C., Kruszewski M., Hoffmann L., Audinat J.-N., Ropstad E., Gutleb A. C.: *Sci. Total Environ.* **610-611**, 972 (2018).
49. Crisponi G., Nurchi V. M., Lachowicz J. I., Peana M., Medici S., Zoroddu M. A., v knihe: *Antimicrobial Nanoarchitectonics*, str. 511, Elsevier, Amsterdam 2017.
50. Akter M., Sikder M. T., Rahman M. M., Ullah A. K. M. A., Hossain K. F. B., Banik S., Hosokawa T., Saito T., Kurasaki M.: *J. Adv. Res.* **9**, 1 (2018).

51. Lalwani G., D'Agati M., Khan A. M., Sitharaman B.: *Adv. Drug Delivery Rev.* 105, 109 (2016).
52. Nohavica D.: *Czech J. Phys.* 3-4, 220 (2011).
53. Li Y., Liu Y., Fu Y., Wei T., Le Guyader L., Gao G., Liu R. S., Chang Y. Z., Chen C.: *Biomaterials* 33, 402 (2012).
54. Huang J., Zong C., Shen H., Liu M., Chen B., Ren B., Zhang Z.: *Small* 8, 2577 (2012).
55. Zhang W., Wang C., Li Z., Lu Z., Li Y., Yin J.-J., Zhou Y.-T., Gao X., Fang Y., Nie G., Zhao Y.: *Adv. Mater.* 24, 5391 (2012).
56. Chen G., Qiu H., Prasad P. N., Chen X.: *Chem. Rev.* 114, 5161 (2014).
57. Wang J., Chen R., Xiang L., Komarneni S.: *Ceram. Int.* 43, 1870 (2018).
58. Eder D.: *Chem. Rev.* 110, 1348 (2010).
59. Zhou L., Zhou L., Wei S., Ge X., Zhou J., Jiang H., Li F., Shen J.: *J. Photochem. Photobiol., B* 135, 7 (2014).
60. Hong H., Wang F., Zhang Y., Graves S. A., Eddine S. B. Z., Yang Y., Theuer C. P., Nickles R. J., Wang X., Cai W.: *ACS Appl. Mater. Interfaces* 7, 3373 (2015).
61. Zhou J., Yang Y., Zhang C.-Y.: *Chem. Rev.* 115, 11669 (2015).
62. Pathakoti K., Morrow S., Han C., Pelaez M., He X., Dionysiou D. D., Hwang H.-M.: *Environ. Sci. Technol.* 47, 9988 (2013).
63. Abadeer N. S., Murphy C. J.: *J. Phys. Chem. C* 120, 4691 (2016).
64. Choi S. K.: *NanoImpact* 3-4, 81 (2016).
65. Qin Z., Bischof J. C.: *Chem. Soc. Rev.* 41, 1191 (2012).
66. Vance M. E., Kuiken T., Vejerano E. P., McGinnis S. P., Hochella Jr M. F., Rejeski D., Hull M. S.: *Beilstein J. Nanotechnol.* 6, 1769 (2015).
67. Choi R., Yang J., Choi J., Lim E.-K., Kim E., Suh J.-S., Huh Y.-M., Haam S.: *Langmuir* 26, 17520 (2010).
68. Khatri A., Punjabi N., Ghosh D., Maji S. K., Mukherji S.: *Sens. Actuators, B* 255, 692 (2018).
69. Beitollahi H., Ivvari S. G., Torkzadeh-Mahani M.: *Biosens. Bioelectronics* 110, 97 (2018).
70. Huang S., Chen Y.: *Nano Lett.* 8, 2829 (2008).
71. Toy R., Peiris P. M., Ghaghada K. B., Karathanasis E.: *Nanomedicine* 9, 121 (2014).
72. Kuo W.-S., Chang C.-N., Chang Y.-T., Yeh C.-S.: *Chem. Commun.* 2009, 4853.

**P. Brandeburová, A. Grenčíková, and T. Mackuľák**  
*(Department of Environmental Engineering, Institute of Chemical and Environmental Engineering, Faculty of Chemical and Food Technology, Slovak University of Technology in Bratislava, Bratislava, Slovakia):* **Nanoparticles and their Ecotoxic Effects on the Environment**

Nowadays, various products of nanotechnologies belong to intensively investigated materials due to their unique properties and many potential applications, for example in electronics, medicine or in imaging methods. However, along with the research of their useful properties, there is a growing necessity of the research and evaluation of their impact on the environment and of possible harmful effects for organisms. This review summarizes possible toxic effects of developed nanomaterials on environment and living organisms. It deals also with their possible bioaccumulation in organisms, toxicity and mechanisms of toxic impacts.

Keywords: nanoparticles, nanoecotoxicity, food chain, environment