



# Nanośmieci, czyli zagrożenia związane z obecnością nanocząstek w środowisku – wpływ na wybrane organizmy żywe

Damian Makowski | Uniwersytet Gdański  
<https://orcid.org/0000-0001-8118-016X>

Daria Łada | Uniwersytet Gdański  
<https://orcid.org/0000-0002-4380-0636>

Mateusz A. Baluk | Uniwersytet Gdański  
<https://orcid.org/0000-0003-1174-5182>

## Streszczenie

**Słowa kluczowe:**  
nanocząstki,  
środowisko,  
toksyczność, rośliny,  
zwierzęta

Nanocząstki są to materiały, które charakteryzują się bardzo małymi rozmiarami (poniżej 100 nm, przynajmniej w jednym wymiarze), specyficznymi właściwościami optycznymi, chemicznymi oraz elektrycznymi. Wiele nanocząstek metalicznych wykazuje toksyczność w stosunku do patogenów (bakterie, wirusy, grzyby). Obecnie materiały te są szeroko wykorzystywane w katalizowaniu reakcji chemicznych, w kosmetyce jako środki antybakteryjne i w medycynie m.in. jako transportery leków. Ze względu na bardzo mały rozmiar nanocząstek mogą one z łatwością przedostawać się do środowiska, powodując ich bioakumulację w roślinach oraz organizmach żywych. W pracy przedstawiono problematykę toksyczności i negatywnych skutków obecności nanocząstek w środowisku i ich wpływu na rośliny i zwierzęta (kręgowce).

## Nanowaste, or risks associated with the presence of nanoparticles in the environment – effects on selected living organisms (Summary)

**Keywords:**  
nanoparticles,  
environment,  
toxicity, plants,  
animals

Nanoparticles are materials characterized by their tiny size (less than 100 nm, at least in one dimension), and distinctive optical, chemical and electrical properties. Many metallic nanoparticles exhibit toxicity to pathogens (bacteria, viruses, fungi). Nowadays, these materials are widely used in catalyzing chemical reactions, cosmetics as antibacterial agents, and medicine as drug transporters. Due to the very small size of nanoparticles, they can easily get into the environment causing bioaccumulation in plants and living organisms. The paper presents the problem of toxicity and adverse effects of nanoparticles in the environment and their impact on plants and animals (vertebrates).

## Wstęp

Obecnie jednym z największych zagrożeń idących w parze z intensywnym rozwojem gospodarczym jest niekontrolowana emisja coraz to większych ilości zanieczyszczeń do środowiska naturalnego. Największymi emitentami zanieczyszczeń są takie gałęzie przemysłu, jak transport, rolnictwo, przemysł energetyczny oraz elektroniczny. Brak odpowiedniego nadzoru oraz świadomości ekologicznej sprawia, że duża część zanieczyszczeń w sposób niekontrolowany oraz nadmierny trafia do środowiska. Bariery stosowania rozwiązań o mniejszym wpływie na środowisko jest również często kwestia finansowa bądź brak alternatywnych technologii. Najpowszechniej trafiającymi do środowiska naturalnego szkodliwymi substancjami są metale ciężkie, różnego rodzaju leki, nawozy, tlenki siarki, tlenki azotu, fenole, dwutlenek węgla, metan, lotne związki organiczne (LZO) oraz substancje promieniotwórcze. Pomimo wieloletniej świadomości emisji zanieczyszczeń do środowiska oraz ich negatywnego wpływu nadal niewiele wiadomo o ich faktycznych mechanizmach oddziaływania na ekosystemy, do których trafiają. Jednym z najmniej poznanych rodzajów zanieczyszczeń są nanocząstki, których wpływ na środowisko, sposób rozprzodzenia przedostawania się do organizmów żywych oraz tego skutki są bardzo słabo poznane. Ze względu na charakterystyczne właściwości, wynikające z efektów kwantowych, rozwiniętej powierzchni właściwej oraz zdolności do samoorganizacji (tworzenia większych ugrupowań), nanocząstki odnalazły szerokie zastosowanie w różnych dziedzinach przemysłu, jak np.: przemysł farbiarski, kosmetyczny, gumowy czy nawet hodowlany i spożywczy. Ich rozmiar, kształt, powierzchnia właściwa i reaktywność stanowią czynniki decydujące często o ich przewadze nad innymi materiałami, ale mogą być też źródłem potencjalnej toksyczności (Li i in. 2016). Toksyczność nanocząstek wynika między innymi z ich zdolności do agregacji, oddziaływania z enzymami oraz białkami. Powodują powstawanie szkodliwych rodników, a w sprzyjających warunkach nanocząstki mogą być źródłem jonów metali, które przedostając się do środowiska, są również często toksyczne (Khan i in. 2019). Zmienność efektów biologicznych utrudnia ocenę ryzyka wpływu nanocząstek na organizmy żywe, ponieważ w dużym stopniu zależne są od wielkości dawki, czasu ekspozycji, gatunków i szczepów organizmów, które miały kontakt z nanocząstkami, a także warunków środowiskowych. Z uwagi na niewielki rozmiar i zwiększoną aktywność powierzchniową są w stanie z łatwością przenikać do systemów biologicznych przez błony biologiczne, a także ściany komórkowe, przez co mogą zaburzać naturalną homeostazę organizmów, prowadząc często do zaburzeń oraz powikłań ze skutkiem śmiertelnym lub znacząco wpływających na funkcjonowanie organizmów (Corredor i in. 2009).

## Wpływ na roślinność

Nanocząstki zaczęto stosować w rolnictwie w celu poprawy fizjologii, wydajności produkcji oraz wartości odżywczych roślin uprawnych (Fraceto i in. 2016). Mimo licznych sukcesów w tym zakresie w niektórych przypadkach odnotowano również efekty toksyczne ich działania. Zdarza się jednak, że nanocząstki nie wywołują żadnych zmian fizjologicznych i ich obecność zdaje się nie oddziaływać na organizm roślinny (Ahmad i in. 2022).

Do najczęściej stosowanych w przemyśle należą nanocząstki metali i tlenków metali, wśród których możemy wymienić ditlenek tytanu, tlenek cynku, srebro i tlenki miedzi (Khan i in. 2021; Ahmad i in. 2022). Mogą przedostawać się one do gleby drogą bezpośrednią bądź pośrednią. Najważniejszymi bezpośrednimi źródłami nanocząstek są nawozy oraz pestycydy i fungicydy zawierające w swoim składzie dodatki w skali nano. Ważny pośredni szlak dostarczania nanocząstek do środowiska naturalnego stanowią osady ściekowe, niekiedy stosowane do kondycjonowania gleby lub jako nawóz. Znajdujące się w nich nanocząstki pochodzą z degradacji matryc produktów, w których pierwotnie się znajdowały (Chen 2018). Po przeniknięciu do gleby nanocząstki mogą ulegać licznym bio- i geotransformacjom, co ma wpływ na ich ostateczną biodostępność, a także toksyczność. Istnieje wiele czynników determinujących sposób interakcji pomiędzy nanocząstkami a komórkami oraz strukturami komórek. Takie cechy, jak rozmiar, kształt, ładunek, obecność grup funkcyjnych oraz hydrofobowość bądź hydrofilowość mogą wpływać na ich mechanizm wchłaniania. Główne drogi wychwytu nanocząstek angażują procesy endocytozy, fagocytozy i mikropinoocytozy (Augustine i in. 2020). Po absorpcji przez korzenie nanocząstki przemieszczają się do części nadziemnych roślin, gdzie najczęściej ulegają bioakumulacji (Rajput i in. 2020). W celu oceny wpływu nanocząstek na fizjologię roślin obserwacji poddaje się takie zmienne, jak kiełkowanie nasion, morfologia korzeni oraz pędów, zawartość chlorofilu i wydajność fotosyntezy (Chen 2018).

Nanocząstki dwutlenku tytanu ( $\text{TiO}_2$  NPs) należą obecnie do jednych z najczęściej stosowanych nanocząstek. Wykorzystywane są na przykład w procesach oczyszczania powietrza, farmacji, przemyśle spożywczym oraz kosmetycznym i dość łatwo mogą przenikać do środowiska naturalnego (Rashid i in. 2021). Badania nad fitotoksycznym działaniem nanocząstek ditlenku tytanu przeprowadzone na koprze włoskim (*Foeniculum vulgare* Mill) wykazały, iż stężenie powyżej 40 ppm utrudnia kiełkowanie nasion i zmniejsza biomasę pędów nawet do 50% w odniesieniu do próby kontrolnej (Feizi i in. 2013). W przypadku nasion pomidora (*Solanum lycopersicum* L.) stężenie w zakresie do 750 mg/kg nie miało wpływu na proces kiełkowania, jednak procent kiełkujących nasion spadł do poziomu około 70% po zwiększeniu dawki nanocząstek do 1000 mg/kg. Dolistne dostarczanie  $\text{TiO}_2$  NPs, w dawce do 250 mg/kg, skutkowało istotnym zmniejszeniem długości korzeni, przy jednoczesnym stymulowaniu

wysokości pędu (Raliya i in. 2015). Widoczne są więc wyraźne zmiany morfologiczne w przypadku upraw mających bezpośredni kontakt z  $\text{TiO}_2$  NPs.

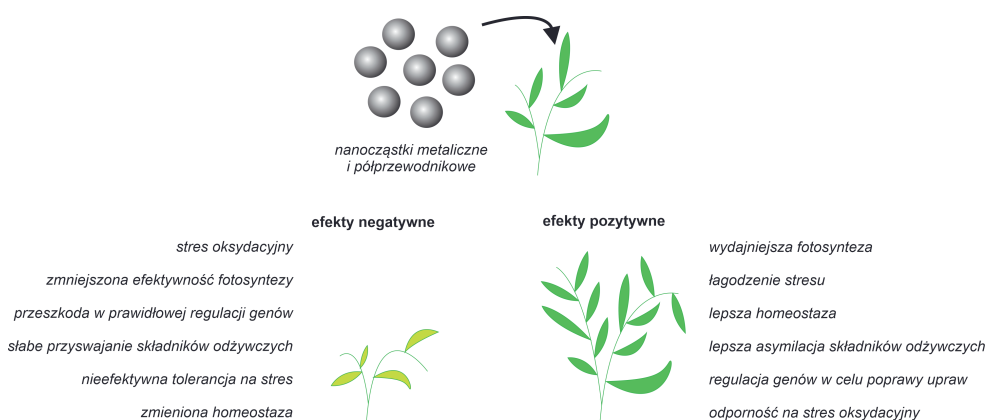
Nanocząstki tlenku cynku (ZnO NPs) stosowane są w kosmetyce, absorbentach chemicznych, dodatkach polimerowych i katalizatorach. Wykazują również, budzące duże zainteresowanie, potencjalne działanie przeciwbakteryjne. Główny mechanizm powiązany z tą aktywnością polega na indukcji wewnątrzkomórkowego wytwarzania reaktywnych form tlenu. Dodatkowo uwalnianie kationów cynkowych i ich adhezja na błonie komórkowej bakterii doprowadzają do jej mechanicznych uszkodzeń. Przejawiają też istotny wpływ na hamowanie transportu aktywnego i zaburzenia metabolizmu aminokwasów. Z zastosowaniem potencjalnego działania przeciwbakteryjnego ZnO NPs wiązane są duże nadzieje (Sirelkhatim i in. 2015). W wyższych stężeniach wykazują jednak toksyczność wobec licznych gatunków roślin uprawnych. W przypadku sadzonek pomidorów (*Solanum lycopersicum* L.) poziom nanocząstek sięgający wartości 50 mg/l doprowadza do zwiększenia produkcji enzymów antyoksydacyjnych, co wpływa na redukcję zawartości chlorofilu, spadek intensywności fotosyntezy i zmniejszenie plonów (Li i in. 2016). Badania wykorzystujące zielony groszek (*Pisum sativum* L.) jako roślinę modelową, przy ekspozycji odpowiednio na 250 i 1000 mg/kg, wskazały na zahamowanie procesu wzrostu korzenia i zwiększoną peroksydację lipidów, która prowadzi do uszkodzeń błon biologicznych i zmian ich przepuszczalności (Mukherjee i in. 2016).

Nanocząstki srebra (Ag NPs) również mają wpływ na procesy fizjologiczne roślin. Jak dowiedziono, może on różnić się w zależności od gatunku wykorzystanego w badaniu, a także charakterystyki stosowanych nanocząstek (Ahmad i in. 2022). W przypadku badań nad pędami rącznika pospolitego (*Ricinus communis* L.) stężenia Ag NPs nie miały wyraźnego wpływu na proces kiełkowania nasion. Również wzrost siewek pozostał niezakłócony, nawet przy zastosowaniu stężenia na poziomie 4000 mg/l (Yasur, Rani 2013). Odmienne wyniki przyniosły badania na takich gatunkach, jak kukurydza (*Zea mays*), cukinia (*Cucurbita pepo* var. *giromontiina*) i arbuz (*Citrullus lanatus*). Pozytywny wpływ nanocząstek srebra na procent i szybkość kiełkowania nasion odnotowano w przypadku nasion arbuza i cukinii. Dla nasion kukurydzy stwierdzono jedynie wystąpienie przyspieszonego kiełkowania (Almutairi, Alharbi 2015). Pojawiają się także przypadki negatywnego wpływu Ag NPs na przykład na uprawy rzepaku (*Brassica campestris*), ryżu (*Oryza sativa*) i fasoli mung (*Vigna radiata*). Różnice pomiędzy uprawą kontrolną a badawczą widoczne były w obszarze kiełkowania nasion, wzrostu korzeni oraz rozwoju pędów. Inkubacja w stężeniu na poziomie 1000  $\mu\text{g/ml}$  powodowała pierwsze widoczne zahamowania we wzroście siewek (Mazumdar, Ahmed 2011).

Jednym z istotnych dla roślin mikroelementów jest miedź, wchodząca w skład określonych metaloenzymów (Wang i in. 2019). Jednak większość publikowanych badań prezentuje niekorzystny wpływ nanocząstek tlenku miedzi ( $\text{CuO}$  NPs) na kiełkowanie nasion. Wykazano na przykład ich hamujący wpływ na kiełkowanie soi (*Glycine max* L.)

i ciecierzycy (*Cicer arietinum* L.). Wraz ze wzrostem stężenia nanocząstek powyżej 500 ppm następuje wyraźne obniżenie wydłużania korzenia, a nawet dochodzi do jego martwicy (Khodakovskaya i in. 2009). Analizom poddano również rozwój roślin strączkowych, takich jak bób (*Vicia faba*), fasola zwyczajna (*Phaseolus vulgaris*) oraz lucerna (*Medicago sativa*). Stężenie na poziomie poniżej 40 mg/l sprzyjało kiełkowaniu nasion, wzrostowi siewek i zawartości chlorofilu w roślinach. Dowiedziono jednak, że przy wyższych stężeniach występuje wysokie potencjalnie toksyczne działanie nanocząstek. W przypadku upraw badawczych odnotowano redukcję liczby nasion, które wykiełkowały, oraz spadek tempa rozwoju siewek, w porównaniu z uprawami kontrolnymi (Hamuda 2015).

Nanocząstki uwolnione do środowiska, które uległy wychwytowi i bioakumulacji w organizmach roślinnych, w zależności od struktury troficznej ekosystemu, mogą przedostać się do łańcucha pokarmowego i zostać włączone w procesy związane z naturalnym obiegiem materii w przyrodzie. Pod wpływem czynników środowiskowych podlegają procesom, takim jak przemiany chemiczne, agregacja i dezagregacja. Dodatkowo niektóre nanocząstki podatne są na uwalnianie jonów ze swojej powierzchni, przez co organizmy glebowe i wodne narażone są na wpływ ich zwiększonego stężenia. Z uwagi na ograniczoną pojemność asymilacyjną środowiska naturalnego i występującą w pewnych granicach jego zdolność do samoregulacji wzrastające stężenie nanocząstek może spowodować długoterminowe skutki, których nie jesteśmy w stanie przewidzieć, kierując się obecnym stanem wiedzy (Bundschuh i in. 2018). Dostępne wyniki dowodzą różnorodnego wpływu nanocząstek na organizmy roślinne. Podstawowe pozytywne i negatywne efekty oddziaływania nanocząstek metalicznych i półprzewodnikowych na roślinność omówione w tej części artykułu zostały przedstawione na rysunku 1.



**Rysunek 1. Negatywne i pozytywne efekty fizjologiczne wpływu nanocząstek na organizmy roślinne**

Źródło: Opracowanie własne.

## Wpływ na organizmy (kręgowce)

Ze względu na łatwe przemieszczanie się odpadów w środowisku wodnym oraz poprzez spływy gleb organizmy zasiedlające takie ekosystemy są szczególnie narażone na ekspozycję na zanieczyszczenia również w bardzo wczesnych fazach rozwoju.

Najczęściej stosowanym organizmem modelowym wykorzystywanym do badania wpływu różnorodnych zanieczyszczeń na rozwój embrionalny w środowisku wodnym jest danio pręgowany (*Danio rerio*). Są to ryby łatwe w hodowli, a ich wykorzystanie pozwala na bardzo dokładne śledzenie wpływu zanieczyszczeń, jak i obserwacje długofalowych skutków ekspozycji na daną substancję, w małej skali, którą z powodzeniem można przyrównać do bardziej skomplikowanych układów. Ryby te wykazują bardzo duże podobieństwo pod względem fizjologii, struktury komórkowej oraz anatomii do kręgowców wyższego rzędu, nawet ludzi (Den Hertog 2005; Scholz i in. 2008). Danio pręgowany jest również powszechnie stosowany w badaniach wpływu toksyczności nanocząstek (Johnston i in. 2018; Jia i in. 2019).

Jednym z badanych rodzajów nanoodpadów są nanocząstki złota, powszechnie stosowane w medycynie, przy obrazowaniu czy znakowaniu molekularnym. Badania ich wpływu na rozwój embrionalny kręgowców jasno wskazują na toksyczność tych materiałów. Stężenia powyżej 16 ppb mogą powodować obumieranie embrionów danio pręgowanego oraz powstawanie wad w późniejszych stadiach rozwoju. Upośledzenia dotyczyły głównie rozwoju oczu, płetw, skrzelii czy szczęk (Harper i in. 2011). Niebagatelny wpływ na toksyczność nanocząstek złota ma rodzaj grup funkcyjnych, za pomocą których modyfikuje się powierzchnie nanocząstek. Dowiedziono, że modyfikacje kationowe, takie jak TMTAT (Tosylan tetrametyloamoni), wykazują dużo wyższą toksyczność niż anionowe czy obojętne modyfikacje, które wykazują bardzo mały wpływ na rozwój embrionalny (Harper i in. 2011; Kim i in. 2013). Rozmiar nanocząstek jest istotnym czynnikiem ich toksyczności. Obiekty o rozmiarach ~1,5 nm cechują się dużo wyższą toksycznością niż nanocząstki o wymiarach 14, 15 nm oraz poniżej 1 nm. Związane jest to z ich zdolnością przenikania przez błony biologiczne oraz aglomeracji w tkankach (Harper i in. 2011; Senut i in. 2016).

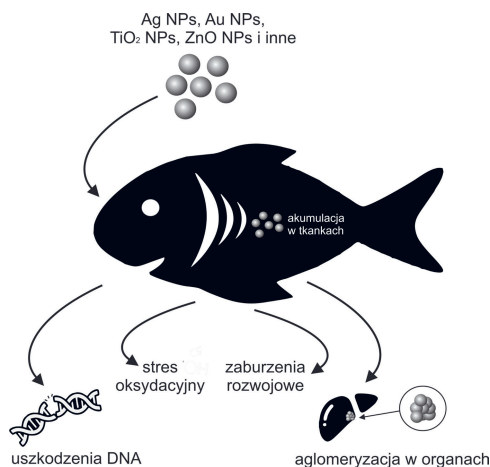
Innym rodzajem nanocząstek metalicznych, które stanowią coraz to większe zagrożenie jako nanoodpady w środowisku, są Ag NPs (*silver nanoparticles*), szeroko stosowane w medycynie, przemyśle kosmetycznym czy farmaceutycznym. Wpływ na embriony dania pręgowanego jest bardzo podobny jak w przypadku nanocząstek złota. Największy wpływ na upośledzenia mają wyższe stężenia oraz mniejsze wielkości nanocząstek, jednakże Ag NPs są bardzo toksyczne już przy mniejszych stężeniach (Bar-Ilan i in. 2009). Jednak mimo dużej toksyczności w stosunku do rybich embrionów nanocząstki srebra wykazują bardzo niską przenikalność przez błony płodowe ssaków. Badania przeprowadzone na ciężarnych myszach wykazały, że jedynie bardzo niewielkie części aplikowanych ciężarnym myszom przez żyłę ogonową nanocząstek przenikały do płodu, nie powodując problemów z jego rozwojem. Większość Ag NPs



akumulowało się w woreczku żółciowym, najprawdopodobniej przez wzgląd na dużą ilość protein obecnych w tym organie, mających zdolność do wiązania metali (Austin i in. 2012). Dowiedziono również, że nanocząstki srebra o rozmiarach pomiędzy 2 a 35 nm obecne w paszy używanej do karmienia drobiu mogą powodować u tych zwierząt osłabienie, zmniejszanie masy, brak apetytu, spadek odporności, a nawet śmierć. Nanocząstki w paszy powodowały również uszkodzenia wątroby, a efekt był tym większy, im większe było stężenie Ag NPs. Większość negatywnych skutków przypisuje się antybakteryjnym właściwościom nanocząstek srebra, które to wprowadzane do organizmu wraz z pokarmem powodują zaburzenia we florze bakteryjnej (Gangadoo i in. 2016).

Jednym z rodzajów materiałów powodujących zagrożenie u kręgowców są nanocząstki półprzewodników, takich jak  $\text{TiO}_2$ , które ze względu na szerokie zastosowanie w przemyśle przedostają się w dużych ilościach do środowiska. W przypadku nanocząstek ditlenku tytanu szczególnie niebezpieczne jest ich osadzanie w akwenach wodnych oraz akumulacja w organizmach wodnych. Szczególnie podatne na działanie nanocząstek są początkowe stadia rozwojowe ryb, gdzie podobnie jak w przypadku nanocząstek srebra czy złota  $\text{TiO}_2$  NPs (*titanium dioxide nanoparticles*) powoduje uszkodzenia embrionów ryb. Istnieją doniesienia łączące obecność zakumulowanych  $\text{TiO}_2$  NPs w organizmach ze zwiększonym stężeniem reaktywnych form tlenu, powodującym stres oksydacyjny, szczególnie w przypadkach ekspozycji na promieniowanie UV. Wówczas dochodzi do wzbudzenia nanocząstek ditlenku tytanu, w wyniku czego powstają reaktywne pary elektron – dziura, a w wyniku zachodzących reakcji redukcji oraz utlenienia powstają reaktywne formy tlenu, takie jak rodniki hydroksylowe czy aniony ponadtlenkowe. Kolejnym zagrożeniem, jakie powodują  $\text{TiO}_2$  NPs, szczególnie w środowisku wodnym, jest osadzanie się ich na organach oddechowych zwierząt, powodujące ich zapychanie czy nawet uszkodzenia mechaniczne. Nie jest znany wpływ zmiennych warunków środowiskowych na zdolność do aglomeracji, osadzania czy penetracji błon biologicznych, przez co nie jest możliwe z całą pewnością przewidzenie wpływu obecności tych materiałów w środowisku naturalnym na organizmy żywe (Clemente i in. 2014). Nanocząstki ditlenku tytanu, obecne w spożywanej wodzie czy przyjmowane wraz z pokarmem, mogą dostawać się do krwioobiegu, a wraz z nim pokonywać barierę krew-mózg, zwiększając ryzyko udaru, a przy długotrwałej ekspozycji osadzają się w organach, powodując upośledzenie ich pracy. Obecne w powietrzu  $\text{TiO}_2$  NPs przy wdychaniu powodują zaburzenia mikrocyrkulacji, przedostają się również do krwioobiegu. W przypadku dostawania się nanocząstek  $\text{TiO}_2$  do embrionów ssaków mogą one powodować deformacje kończyn, głowy czy spadek przyrostu masy (Luo i in. 2020). Istotny wpływ na toksyczność nano- $\text{TiO}_2$  w przypadku osadzania się ich w organach ma rozmiar (Jia i in. 2017). Innym materiałem półprzewodnikowym będącym często nanoodpadem są nanocząstki tlenku cynku (ZnO NPs). Substancja ta jest szeroko wykorzystywana na skalę przemysłową w procesach wulkanizacji opon, jako wypełniacz oraz pigment w kosmetykach oraz farbach, a także substancja absorbująca

promieniowanie UV w kremach przeciwsłonecznych z filtrem. W przypadku człowieka główną drogą dostawiania się nanocząstek tlenku cynku do organizmu są płuca, są one z tego powodu głównym organem narażonym na ich szkodliwe działanie. ZnO NPs powodują wówczas silny kaszel, gorączkę oraz dreszcze (Gautam i in. 2021). Po wnikięciu do płuc nanocząstki tlenku cynku mogą penetrować w głąb organizmu, przedostając się wraz z krwią do narządów wewnętrznych, powodując stany zapalne. Największe zagrożenie jednak powodują, gdy przedostaną się do nerek, które to w głównej mierze odpowiadają za oczyszczanie krwi w organizmie z produktów przemian metabolicznych, takich jak mocznik czy amoniak. Nanocząstki tlenku cynku, przedostając się do komórek nerek, w środowisku wewnątrzkomórkowym łatwo wytwarzają jony  $Zn^{2+}$ . Powstają również reaktywne formy tlenu, zwiększa się stres oksydacyjny, na który w szczególności narażone są mitochondria. Dowiedziono, że część nanocząstek tlenku cynku może penetrować do jąder komórkowych i uszkadzać cząsteczki DNA (V.G.i in. 2017). W środowisku wodnym ZnO NPs są tym bardziej toksyczne im są mniejsze. Toksyczność nanocząstek tlenku cynku w środowisku wodnym jest związana z wytwarzaniem się jonów  $Zn^{2+}$ , podobnie jak ma to miejsce w przypadku ich działania w środowisku wewnątrzkomórkowym, jednak kationy cynkowe wytwarzają się w środowisku wodnym dużo łatwiej niż ZnO NPs penetrują przez błony komórkowe, gdzie dochodzi do wytwarzania reaktywnych form tlenu, które odpowiadają za zwiększenie stresu oksydacyjnego oraz upośledzenie funkcjonowania mitochondriów. W ekstremalnych przypadkach, gdy wszelkie sposoby usuwania reaktywnych form tlenu w komórce zawodzą, dochodzi nawet do lizy mitochondriów, co prowadzi do dalszych procesów rozkładowych wewnątrz komórek (Hou i in. 2018). Na rysunku 2 przedstawiono negatywne skutki, jakie opisywane materiały powodują w kontakcie z organizmami wodnymi.



**Rysunek 2. Negatywny wpływ nanocząstek na kręgowce wodne**

Źródło: Opracowanie własne.



## Podsumowanie

Wszechobecne stosowanie nanocząstek powoduje coraz ich większą zawartość we wszelkiego rodzaju ściekach i zanieczyszczeniach. Negatywny wpływ różnego rodzaju nanocząstek na jakość funkcjonowania ekosystemów nie ulega wątpliwości. Obecne w środowisku nanocząstki często w nieprzewidywalny i nie do końca poznany sposób rozprzestrzeniają się oraz oddziałują z organizmami żywymi. Ich wpływ dotyczy każdego z poziomów troficznych. Dostając się do wnętrza organizmów, nanoodpady mogą się akumulować, powodować zaburzenia szlaków metabolicznych, upośledzenia rozwojowe czy często niebezpieczny wzrost stresu oksydacyjnego. Szczególnie narażone są ekosystemy wodne, gdzie nanośmieciami z łatwością się rozprzestrzeniają oraz ulegają często niebezpiecznym reakcjom wtórnym. Nanoodpady nie są również obojętne dla zdrowia człowieka. Wchłanianie wielu z nich powoduje stany zapalne oraz akumulację w organizmie. Wiele ze skutków nadmiernej ekspozycji na nanośmieciami tak skomplikowanego organizmu jak ludzki jest bardzo trudnych do przewidzenia. Z pomocą przychodzą badania na organizmach modelowych, takich jak *Danio rerio*, jednak wciąż nie pozwala to na precyzyjne określenie wszystkich zagrożeń.

Nanośmieciami są tylko jednym z niewielu nowo pojawiających się zanieczyszczeń środowiska, stanowiących coraz to większy problem. Brak jest odpowiednich rozwiązań legislacyjnych dotyczących gospodarowania nanoodpadami, a także ich dopuszczalnych zawartości w środowisku. Niezbędne jest również ciągłe uświadamianie społeczeństwa o zagrożeniach, jakie płyną z nadmiernego, niezrównoważonego rozwoju gospodarczego, będącego źródłem szkodliwych substancji w środowisku. Niezbędne jest również opracowanie oraz jak najszybsze wdrożenie technologii, które pozwolą zmniejszyć szkodliwe emisje oraz ograniczyć ilości, a także rozprzestrzenianie się nowo pojawiających się zanieczyszczeń.

Badania zostały wykonane w ramach projektu studencko-doktoranckiego „Projekt NKCh UG: KLIMATYCZNI” Naukowego Koła Chemików Uniwersytetu Gdańskiego.

## Bibliografia

- Ahmad A., Hashmi S.S., Palma J.M., Corpas F.J., 2022, *Influence of metallic, metallic oxide, and organic nanoparticles on plant physiology*, „Chemosphere”, Vol. 290, doi: 10.1016/J.CHEMOSPHERE.2021.133329.
- Almutairi Z., Alharbi A., 2015, *Effect of Silver Nanoparticles on Seed Germination of Crop Plants*, „Journal of Advances in Agriculture”, Vol. 4, No. 1, doi: 10.24297/JAA.V4I1.4295.
- Augustine R., Hasan A., Primavera R., Wilson R.J., Thakor A.S., Kevadiya B.D., 2020, *Cellular uptake and retention of nanoparticles: Insights on particle properties and interaction with cellular components*, „Materials Today Communications”, Vol. 25, doi: 10.1016/J.MTCOMM.2020.101692.

- Austin C.A., Umbreit T.H., Brown K.M., Barber D.S., Dair B.J., Francke-Carrol S., Feswick A., Saint-Luis M.A., Hikawa H., Siebein K.N., Goering P.L., 2012, *Distribution of silver nanoparticles in pregnant mice and developing embryos*, „Nanotoxicology”, Vol. 6, No. 8, doi: 10.3109/17435390.2011.626539.
- Bar-Ilan O., Albrecht R.M., Fako V.E., Furgeson D.Y., 2009, *Toxicity assessments of multisized gold and silver nanoparticles in zebrafish embryos*, „Small (Weinheim an der Bergstrasse, Germany)”, Vol. 5, No.16, doi: 10.1002/SMLL.200801716.
- Bundschuh M., Filser J., Lüderwald S., McKee M., Metreveli G., Schaumann G.E., Schulz R., Wagner S., 2018, *Nanoparticles in the environment: where do we come from, where do we go to?*, „Environmental Sciences Europe”, Vol. 30, No.1, doi: 10.1186/S12302-018-0132-6.
- Chen, H., 2018, *Metal based nanoparticles in agricultural system: behavior, transport, and interaction with plants*, „Chemical Speciation & Bioavailability”, Vol. 30, No. 1, doi: 10.1080/09542299.2018.1520050.
- Clemente Z., Castro V.L.S.S., Moura M.A.M., Jonsson C.M., Fraceto L.F., 2014, *Toxicity assessment of TiO<sub>2</sub> nanoparticles in zebrafish embryos under different exposure conditions*, „Aquatic Toxicology”, Vol. 147, doi: 10.1016/J.AQUATOX.2013.12.024.
- Corredor E., Testillano P.S., Coronado M.J., González-Melendi P., Fernández-Pacheco R., Marquina C., Ibarra M.R., de la Fuente J.M., Rubilae D., Pérez-de-Luque A., Risueño M.C., 2009, *Nanoparticle penetration and transport in living pumpkin plants: In situ subcellular identification*, „BMC Plant Biology”, Vol. 9, No. 1, doi: 10.1186/1471-2229-9-45/FIGURES/9.
- Feizi H., Kamali M., Jafari L., Moghaddam P.R., 2013, *Phytotoxicity and stimulatory impacts of nano-sized and bulk titanium dioxide on fennel (Foeniculum vulgare Mill)*, „Chemosphere”, Vol. 91, No. 4, doi: 10.1016/J.CHEMOSPHERE.2012.12.012.
- Fraceto L.F., Grillo R., de Medeiros G.A., Scognamiglio V., Rea G., Bartolucci C., 2016, *Nanotechnology in agriculture: Which innovation potential does it have?*, „Frontiers in Environmental Science”, Vol. 4, doi: 10.3389/FENVS.2016.00020/ABSTRACT.
- Gangadoo S., Stanley D., Hughes R.J., Moore R.J., Chapman J., 2016, *Nanoparticles in feed: Progress and prospects in poultry research*, „Trends in Food Science & Technology”, Vol. 58, doi: 10.1016/J.TIFS.2016.10.013.
- Gautam R., Yang S.J., Maharjan A., Jo J.H., Acharya M., Heo Y., Kim C.Y., 2021, *Prediction of Skin Sensitization Potential of Silver and Zinc Oxide Nanoparticles Through the Human Cell Line Activation Test*, „Frontiers in Toxicology”, Vol. 3, doi: 10.3389/FTOX.2021.649666.
- Hosam E.A.F., Hamuda H., 2015, *Influence of Engineered Metal Oxide Nanoparticles on Seed Germination, Seedling Development and Chlorophyll Content*, „Óbuda University e-Bulletin”, Vol. 5 No. 1.
- Harper S.L., Carriere J.L., Miller J.M., Hutchison J.E., Maddux B.L.S., Tanguay R.L., 2011, *Systematic Evaluation of Nanomaterial Toxicity: Utility of Standardized Materials and Rapid Assays*, „ACS Nano”, Vol. 5, No. 6, doi: 10.1021/NN200546K.
- Den Hertog J., 2005, *Chemical genetics: Drug screens in Zebrafish*, „Bioscience reports”, Vol. 25, No. 5–6, doi: 10.1007/S10540-005-2891-8.
- Hou J., Wu Y., Li X., Wei B., Li S., Wang X., 2018, *Toxic effects of different types of zinc oxide nanoparticles on algae, plants, invertebrates, vertebrates and microorganisms*, „Chemosphere”, Vol. 193, doi: 10.1016/J.CHEMOSPHERE.2017.11.077.
- Jia H.R., Zhu Y.X., Duan Q.Y., Chen Z., Wu F.G., 2019, *Nanomaterials meet zebrafish: Toxicity evaluation and drug delivery applications*, „Journal of Controlled Release”, Vol. 311–312, doi: 10.1016/J.JCONREL.2019.08.022.
- Jia X., Wang S., Zhou L., Sun L., 2017, *The Potential Liver, Brain, and Embryo Toxicity of Titanium Dioxide Nanoparticles on Mice*, „Nanoscale Research Letters”, Vol. 12, doi: 10.1186/S11671-017-2242-2.

Johnston H.J., Verdon R., Gillies S., Brown D.M., Fernandes T.F., Henry T.B., Rossi A.G., Tran L., Tucker C., Tyler C.R., Stone V., 2018, *Adoption of in vitro systems and zebrafish embryos as alternative models for reducing rodent use in assessments of immunological and oxidative stress responses to nanomaterials*, „Critical Reviews in Toxicology”, Vol. 48, No. 3, doi: 10.1080/10408444.2017.1404965.

Khan I., Saeed K., Khan I., 2019, *Nanoparticles: Properties, applications and toxicities*, „Arabian Journal of Chemistry”, Vol. 12, No. 7, doi: 10.1016/j.arabjc.2017.05.011.

Khan M., Khan M.S.A., Borah K.K., Goswami Y., Hakeem K.R., Chakrabarty I., 2021, *The potential exposure and hazards of metal-based nanoparticles on plants and environment, with special emphasis on ZnO NPs, TiO<sub>2</sub> NPs, and AgNPs: A review*, „Environmental Advances”, Vol. 6, doi: 10.1016/J.ENVADV.2021.100128.

Khodakovskaya M., Dervishi E., Mahmood M., Xu Y., Li Z., Watanabe F., Biris A.S., 2009, *Carbon Nanotubes Are Able To Penetrate Plant Seed Coat and Dramatically Affect Seed Germination and Plant Growth*, „ACS Nano”, Vol. 3, No. 10, doi: 10.1021/NN900887M.

Kim K.T., Zaikova T., Hutchison J.E., Tanguay R.L., 2013, *Gold nanoparticles disrupt zebrafish eye development and pigmentation*, „Toxicological Sciences: an Official Journal of the Society of Toxicology”, Vol. 133, No. 2, doi: 10.1093/TOXSCI/KFT081.

Li M., Ahammed G.J., Li C., Bao X., Yu J., Huang C., Yin H., Zhou J., 2016, *Brassinosteroid Ameliorates Zinc Oxide Nanoparticles-Induced Oxidative Stress by Improving Antioxidant Potential and Redox Homeostasis in Tomato Seedling*, „Frontiers in Plant Science”, Vol. 7, doi: 10.3389/FPLS.2016.00615/BIBTEX.

Luo Z., Li Z., Xie Z., Sokolova I. M., Song L., Peijnenburg W.J.G.M., Hu M., Wang Y., 2020, *Rethinking Nano-TiO<sub>2</sub> Safety: Overview of Toxic Effects in Humans and Aquatic Animals*, „Small”, Vol. 16, No. 36, doi: 10.1002/SMLL.202002019.

Mazumdar H., Ahmed G.U., 2011, *Synthesis of silver nanoparticles and its adverse effect on seed germinations in Oryza sativa, Vigna radiate and Brassica campestris*, „International Journal of Advanced Biotechnology and Research”, Vol. 2.

Mukherjee A., Sun Y., Morelius E., Tamez C., Bonydopadhyay S., Niu G., White J.C., Peralta-Videa J.C., Gareda-Torres J.L., 2016, *Differential toxicity of bare and hybrid ZnO nanoparticles in Green pea (Pisum sativum L.): A life cycle study*, „Frontiers in Plant Science”, Vol. 6, doi: 10.3389/FPLS.2015.01242.

Rajput V., Minkina T., Mazarji M., Shende S., Sushkova S., Mandzhieva S., Burachevskaya M., Chaplygin V., Singh A., Jatav H., 2020, *Accumulation of nanoparticles in the soil-plant systems and their effects on human health*, „Annals of Agricultural Sciences”, Vol. 65, No. 2, doi: 10.1016/J.AOAS.2020.08.001.

Raliya R., Nair R., Chavalmane S., Wang W.N., Biswas P., *Mechanistic evaluation of translocation and physiological impact of titanium dioxide and zinc oxide nanoparticles on the tomato (Solanum lycopersicum L.) plant*, „Metallomics: Integrated Biometal Science”, Vol. 7, No. 12, doi: 10.1039/C5MT00168D.

Rashid M.M., Tavčer P.F., Tomšič B., 2021, *Influence of Titanium Dioxide Nanoparticles on Human Health and the Environment*, „Nanomaterials”, Vol. 11, No. 9(2354), doi: 10.3390/NANO11092354.

Scholz S., Fisher S., Gündel U., Küster E., Luckenbach T., Voelker D., 2008, *The zebrafish embryo model in environmental risk assessment—applications beyond acute toxicity testing*, „Environmental Science and Pollution Research International”, Vol. 15, No. 5, doi: 10.1007/S11356-008-0018-Z.

Senut M.C., Zhang Y., Liu F., Sen A., Ruden D.M., Mao G., 2016, *Size-dependent Toxicity of Gold Nanoparticles on Human Embryonic Stem Cells and Their Neural Derivatives*, „Small”, Vol. 12, No. 5, doi: 10.1002/SMLL.201502346.

Sirelkhatim A., Mahmud S., Seeni A., Kaus N.H.M., Ann L.C., Bakhori S.K.M., Hasan H., Mohamad D., 2015, *Review on Zinc Oxide Nanoparticles: Antibacterial Activity and Toxicity Mechanism*, „Nano-micro letters”, Vol. 7, No. 3, doi: 10.1007/S40820-015-0040-X.

Reshma V.G., Mohanan P.V., 2017, *Cellular interactions of zinc oxide nanoparticles with human embryonic kidney (HEK 293) cells*, „Colloids and Surfaces B: Biointerfaces”, doi: 10.1016/J.COLSURFB.2017.05.069.

Wang W., Paschalidis K., Feng J.C., Song J., Liu J. H., 2019 *Polyamine catabolism in plants: A universal process with diverse functions*, „Frontiers in Plant Science”, Vol. 10, doi: 10.3389/FPLS.2019.00561.

Yasur J., Rani P.U., 2013, *Environmental effects of nanosilver: Impact on castor seed germination, seedling growth, and plant physiology*, „Environmental Science and Pollution Research”, Vol. 20, No. 12, doi: 10.1007/S11356-013-1798-3.

## Biogramy

**Damian Makowski** – student kierunku chemia o specjalności analityka i diagnostyka chemiczna na Wydziale Chemii Uniwersytetu Gdańskiego. Członek Naukowego Koła Chemików Uniwersytetu Gdańskiego i przewodniczący Rady Samorządu Studentów Wydziału Chemii Uniwersytetu Gdańskiego w roku akademickim 2020/2021 i 2021/2022. Zainteresowania naukowe: nanotechnologia.

**Daria Łada** – studentka kierunku chemia o specjalności chemia biomedyczna na Wydziale Chemii Uniwersytetu Gdańskiego. Wiceprezes Naukowego Koła Chemików Uniwersytetu Gdańskiego w roku akademickim 2019/2020, 2020/2021 i 2021/2022. Zainteresowania naukowe: aktywność związków biologicznie czynnych.

**Mateusz Adam Baluk** – doktorant w Szkole Doktorskiej Nauk Ścisłych i Przyrodniczych Uniwersytetu Gdańskiego. Członek wspierający Naukowego Koła Chemików Uniwersytetu Gdańskiego, inicjator i koordynator projektu studencko-doktoranckiego „Projekt NKCh UG: KLIMATYCZNI”. Wieloletni radny w Samorządzie Studentów Wydziału Chemii UG oraz obecnie przewodniczący Rady Doktorantów Nauk Ścisłych i Przyrodniczych Uniwersytetu Gdańskiego. Zainteresowania naukowe: nanotechnologia, ekologia i ochrona środowiska.

**Damian Makowski** – a student of chemistry with a specialization in analytics and chemical diagnostics at the Faculty of Chemistry, University of Gdańsk. A member of the Scientific Circle of Chemists of the University of Gdańsk and the President of the Student Government Council of the Faculty of Chemistry of the University of Gdańsk in the academic years 2020/2021 and 2021/2022. Interests related to nanotechnology.

**Daria Łada** – a student of chemistry with a specialization in biomedical chemistry at the Faculty of Chemistry, University of Gdańsk. Vice President of the Scientific Circle of Chemists of the University of Gdansk in the academic years 2019/2020, 2020/2021 and 2021/2022. Interests related to the activity of biologically active compounds.

**Mateusz Adam Baluk** – PhD student at the Doctoral School of Science and Natural Sciences, University of Gdansk. Supporting member of the Scientific Circle of Chemists of the University of Gdansk, initiator and coordinator of the student-doctoral project „Projekt NKCh UG: KLIMATYCZNI”. For many years a councillor in the Students' Government of the Faculty of Chemistry UG. Currently the chairman of the Council of Doctoral Students of the Natural and Scientific Sciences, University of Gdańsk. Interests in nanotechnology, ecology and environmental protection.