

# TOKSYCZNOŚĆ MIKROPLASTIKÓW DLA ZWIERZĄT I LUDZI W KONTEKŚCIE POWIĄZAŃ TYCH ZWIĄZKÓW Z METALAMI CIĘŻKIMI I CZYNNIKAMI ZAKAŹNYMI

CELEM ARTYKUŁU JEST PRZEDSTAWIENIE PROBLEMU WYSTĘPOWANIA W ŚRODOWISKU MIKROPLASTIKÓW W KONTEKŚCIE ICH WIĄZANIA SIĘ Z METALAMI CIĘŻKIMI I Z DROBNOUSTROJAMI CHOROBOTWÓRCZYMI ORAZ ZWIĄZANEGO Z TYM ZAGROŻENIA DLA ZDROWIA ZWIERZĄT I LUDZI. OMÓWIONO TAKŻE WYNIKI BADAŃ ANKIETOWYCH DOTYCZĄCYCH ŚWIADOMOŚCI LUDZI NA TEMAT ZAGROŻEŃ ZWIĄZANYCH Z MIKROPLASTIKAMI. WSZECHOBECNOŚĆ TYCH ZWIĄZKÓW W ŚRODOWISKU I ICH WPŁYW NA ORGANIZMY ŻYWE STANOWI WYZWANIE TAKŻE DLA MEDYCYN WETERYNARYJNEJ. ZROZUMIENIE WPŁYWU MIKROPLASTIKÓW NA FUNKCJONOWANIE ORGANIZMÓW ŻYWYCH JEST KLUCZOWE DLA PODEJMOWANIA DZIAŁAŃ ZMIERZAJĄCYCH DO ZMNIEJSZENIA EMISJI TWORZYW SZTUCZNYCH. JEST RÓWNIEŻ NIEZBĘDNE DO OCHRONY ZDROWIA ZWIERZĄT I LUDZI PRZED SZKODLIWYM DZIAŁANIEM TYCH ZWIĄZKÓW.

**Julia Ziarnik<sup>1</sup>, Eliza Anna Niemczycka<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Studentka V roku Wydziału Medycyny Weterynaryjnej Uniwersytetu Rolniczego w Krakowie,

Studenckie Koło Naukowe Praktyczna Toksykologia Zwierząt

<sup>2</sup> Katedra Toksykologii Wydziału Medycyny Weterynaryjnej Uniwersytetu Rolniczego w Krakowie

O lbrzymia ilość plastiku w środowisku, w którym żyją zwierzęta i jego potencjalne skutki, które wykraczają poza szkodliwość samego plastiku, czynią ten temat dużym i zdaje się, że niedocenionym jeszcze wyzwaniem dla medycyny weterynaryjnej. Problem negatywnego wpływu metali ciężkich na zdrowie i życie zwierząt od dawna jest jednym z ważniejszych kie-

runków badań toksykologii weterynaryjnej. Powiązanie tych substancji z mikroplastikami, dodatkowo poszerza kontekst ich toksycznego oddziaływania. Wpływ drobnoustrojów patogennych na organizmy zwierzęce, poprzez powiązanie ich z mikroplastikami, choć pozostaje głównie domeną mikrobiologii i epizootiologii, również zaczyna wiązać ten temat z toksykologią weterynaryjną. Dzisiejszy stan wiedzy nie pozwala jeszcze określić

w jak dużym stopniu mikroplastiki, poprzez ich łączenie się z metalami ciężkimi i drobnoustrojami chorobotwórczymi, wpływają na zdrowie zwierząt, z którymi na co dzień stykają się lekarze weterynarii w swojej praktyce zawodowej. Potwierdzony negatywny wpływ mikroplastików na zdrowie zwierząt wodnych, a także na cykl biologiczny roślin, pozwala jednak przypuszczać, że związki te mogą również w znaczącym stopniu wpły-



wać negatywnie na zwierzęta w otoczeniu człowieka. Co więcej, poprzez wchodzenie w łańcuch pokarmowy, stanowią mogą zagrożenie dla zdrowia ludzi.

W ostatnich latach problem zanieczyszczenia plastikami, w tym mikroplastikami, stał się jednym z najpoważniejszych wyzwań dla zdrowia ekosystemów wodnych oraz ich mieszkańców. Mikroplastiki to efekt ogromnej produkcji tworzyw sztucznych i nieodpowiedniego ich utylizowania. W oceanach, morzach, lasach czy na łąkach można znaleźć duże ilości plastiku, który degenerując, przyczynia się do powstawania mikroplastików. Wśród mechanizmów negatywnego wpływu mikroplastików na organizmy żyjące jest zjawisko gromadzenia się na ich powierzchni drobnoustrojów oraz substancji toksycznych, a w ten sposób potęgowane jest ich szkodliwe działanie. W niniejszej pracy zarysowano zjawisko powstawania mikroplastików oraz omówiono wyniki badań ankietowych analizujących świadomość ludzi na temat ich szkodliwości. Następnie przedstawiono substancje, które mogą gromadzić się na powierzchni mikroplastików oraz ich realny wpływ na zdrowie zwierząt oraz ludzi. Zarysowano także problem odkładania się niektórych bakterii i wirusów na powierzchni drobinek plastiku i ryzyka ich przeniesienia na duże odległości oraz zakażenia nowych gatunków w róż-

nych ekosystemach. Zrozumienie wpływu mikroplastików na fizjologię zwierząt i ludzi oraz poznanie powodów ich szkodliwości jest kluczowe dla podejmowania działań mających na celu zmniejszenie emisji tworzyw sztucznych oraz ochronę ekosystemów przed dalszym zanieczyszczeniem.

#### **Czym są mikroplastiki**

Mikroplastiki to stałe, nierozpuszczalne w wodzie cząstki plastiku o średnicy równej lub mniejszej niż 5 mm. Duże mikroplastiki mają od 1 mm do 5 mm, natomiast średnie od 1  $\mu\text{m}$  do 1 mm. Drobinki plastiku mogą przyjmować różne kształty – od kulek do włókien (26). Możemy je podzielić na pierwotne i wtórne. Mikroplastiki pierwotne to tzw. pył plastikowy, czyli niewielkie lub mikroskopijne drobiny produkowane w takiej formie w określonym celu np. jako drobinki peelingujące w branży kosmetycznej lub koraliki w branży modowej, natomiast wtórne mikroplastiki są efektem degradacji pozostałości tworzyw sztucznych w środowisku poprzez biofilm, ekspozycję na słońce, mechaniczne rozdrobnienie i utlenianie termiczne (28). Mikroplastiki mogą także ulegać ponownym degradacjom, przyczyniając się do powstawania mikroskopijnych nanoplastików o średnicy poniżej 1 mikrome-

tra (26). Tworzywa sztuczne ze względu na swoje właściwości mogą kumulować się w środowisku. Mikroplastiki powstają w wyniku polimeryzacji addycyjnej lub kondensacyjnej różnych substancji i dodania do nich substancji pomocniczych, takich jak pigmenty, przeciwutleniacze i stabilizatory. Ponadto tworzywa sztuczne mogą być termoplastyczne – łatwe w recyklingu lub termoutwardzalne – trudne w recyklingu (26). Tworzywa sztuczne mogą także zawierać wiele substancji, które oddziałują na zdrowie zwierząt i ludzi. Niektóre z nich, takie jak ftalany, polibromowane difenyloetery, kwas perfluorooktanowy czy barwniki zawierające ołów i kadm zostały już zakazane w Unii Europejskiej i są klasyfikowane jako niebezpieczne (30). Niestety, w dalszym ciągu są produkowane i używane w niektórych częściach świata, doprowadzając do wielkich szkód w ekosystemie.

#### **Źródła mikroplastiku w otoczeniu zwierząt**

Mikroplastik dostaje się do środowiska zanieczyszczając wodę, glebę i powietrze. Głównymi źródłami mikroplastiku w środowisku są ścieki powstające w wyniku prania odzieży zawierającej włókna syntetyczne (np. poliestrowe), ścieki pochodzące z domów mieszkalnych



i gospodarstw zawierające kosmetyki i środki czyszczące, pył powstający podczas ścierania opon, plastikowe siatki i opakowania, butelki z tworzyw sztucznych, sieci rybackie i katastrofy naturalne. Uważa się, że w środowisku domowym uwalniana jest do środowiska szczególnie duża ilość mikroplastiku. Pochodzić może on między innymi z tekstyliów, starzejących się farb, urządzeń elektronicznych, butelek, misek, desek do krojenia czy sprzętu AGD. Na terenach wiejskich mikroplastik pochodzić może między innymi z przydomowych oczyszczalni ścieków, kompostu, miejsc składowania odpadów, zaśmieciania tworzywami sztucznymi czy powszechnie stosowanego plastiku, na przykład w folii rolniczej. (15)

#### **Badania ankietowe dotyczące świadomości ludzi na temat szkodliwości mikroplastików**

Na potrzeby niniejszej publikacji przeprowadzona została ankieta mająca na celu określenie świadomości ludzi

na temat zanieczyszczenia mikroplastikami, ich wpływu na fizjologię zwierząt udomowionych, dzikich i ludzi oraz czynników, przez które drobiny plastiku wpływają negatywnie na organizmy. Ankieta przeprowadzona online za pomocą Google Forms. Wzięło w niej udział 77 osób, z czego 58,4 % było związanych zawodowo z naukami medycznymi lub o środowisku. Ankieta zawierała 22 pytania jednokrotnego i wielokrotnego wyboru. Wszyscy ankietowani (100 %) zdawali sobie sprawę ze szkodliwości mikroplastików dla człowieka oraz zwierząt, co pokazuje dużą świadomość społeczeństwa dotyczącą negatywnego wpływu plastiku. 94,8 % ankietowanych wskazało ryby jako zwierzęta narażone na mikroplastiki, 70,1 % ankietowanych wskazało ptaki i ssaki wodne, 54,5 % – stawonogi wodne, a 50,6 % – mięczaki wodne. Tylko 18,2 % ankietowanych wskazało na zwierzęta udomowione jako zwierzęta narażone. Przeważająca część ankietowanych (96,1 %) wskazała na istotność badań nad szkodliwością mikroplastików wśród zwierząt oraz ludzi.

Większość osób oceniło swoją wiedzę na temat mikroplastików na poziomie dość niskim (45,5 %) lub średnim (40,2 %). Tylko 37,6 % osób określiło mikroplastiki jako mogące przenosić czynniki zakaźne, a 50,6 % osób określiło jako mogące przenosić substancje toksyczne. Pokazuje to konieczność edukacji i rozwijania świadomości w tej dziedzinie, zwłaszcza w zakresie czynników przyczyniających się do toksyczności oraz narażenia na mikroplastiki.

#### **Akumulacja metali ciężkich w mikroplastikach**

Udowodniono, iż metale ciężkie mogą wchłaniać się i gromadzić w mikroplastikach w wodach słonych i słodkich. W cząstkach polietylenu pochodzących z południowo-zachodniej Anglii znaleziono aluminium, żelazo, mangan, miedź, cynk, ołów oraz srebro, które zostały zaabsorbowane z wody morskiej (4). W roku 2016 przeprowadzono badanie dotyczące wchłaniania metali ciężkich przez cząstki plastiku. Odkryto, że poli-



SHUTTERSTOCK

chlorek winylu oraz polistyren mogą wchłaniać znaczne ilości metali ciężkich, ponieważ zawierały wysokie stężenia cynku oraz miedzi (9).

Metale ciężkie dostają się do środowiska na wiele różnych sposobów. Te występujące naturalnie są wynikiem procesów zachodzących samoistnie w naturze. Ich zawartość w środowisku jest śladowa i rzadko mają one efekt toksyczny. Większe ilości metali ciężkich dostają się do środowiska sporadycznie w wyniku zjawisk przyrodniczych, takich jak wybuchy wulkanów czy spadanie meteorytów (5). Metale ciężkie pochodzenia przemysłowego dostają się do środowiska w wyniku wydobycia zasobów naturalnych, stosowania środków agrochemicznych oraz nawozów zwierzęcych na polach, obróbki metali w rafineriach, spalania paliw w elektrowniach oraz w wyniku nieprawidłowego zarządzania odpadami przemysłowymi w zakładach przetwórstwa papieru, drewna, mikroelektroniki, tworzyw sztucznych oraz tekstyliów. Do dużego zanieczyszczenia metalami ciężkimi przyczynia się także ruch samo-

chodowy, ponieważ znajdują się one w wielu elementach pojazdów, a także materiałach przeznaczonych do budowy dróg. Spaliny samochodowe emitują duże ilości metali, takich jak chrom, ołów, cynk, kadm, żelazo i miedź, przyczyniając się do okolicznego zanieczyszczenia gleby i roślin (5).

#### **Mikroplastiki a zawartość metali ciężkich w pokarmie ludzi i zwierząt**

Zwiększenie biodostępności metali ułatwia wchłanianie cząsteczek tych pierwiastków przez układ pokarmowy zwierząt oraz tkanki roślin (9, 1). Badania przeprowadzone na gatunku algi słodkowodnej *Chlorella pyrenoidosa* wystawionej na obecność poliakrylonitrylu z miedzią odkryły spadek zawartości chlorofilu a i b w tym glonie (19). Badania wskazują, że mikroplastiki w połączeniu z metalami ciężkimi mają także negatywny wpływ na wzrost alg, transport substancji odżywczych w wyce bobie (*Vicia faba*) oraz wzrost vegetatywny pszenicy (13, 24). Istnieją dowody

również na to, że mikroplastiki mogą wpływać negatywnie na długość korzeni, żywotność komórek korzeniowych oraz szybkość kiełkowania roślin naczyniowych (16, 8). Jest to temat, któremu należy się szczególnie przyjrzeć w kontekście wpływu mikroplastików na pokarm spożywany przez ludzi i zwierzęta.

#### **Wpływ akumulacji metali w cząstkach plastiku na organizmy zwierząt**

Przeprowadzono szereg badań związanych z wpływem akumulacji metali w cząstkach plastiku na organizmy zwierząt. Wykazano między innymi, że cząsteczki polietylenu zwiększają biodostępność chromu, kadmu, miedzi, cynku oraz rtęci, przyczyniając się do hamowania aktywności acetylocholinoesterazy, a w związku z tym zmian w zachowaniu i funkcjonowaniu organizmów morskich (9, 3, 17, 11). Podwyższona wchłanianalność tych pierwiastków może prowadzić do przewlekłego zatrucia, którego objawy wykazano u wielu morskich oraz słodkowodnych organizmów (33, 3, 11).

Większa ilość badań skupiona jest na drobnych zwierzętach morskich, ponieważ symptomy zatruc u małych zwierząt są silniej wyrażone i doprowadzają do poważniejszych zaburzeń, a także szybciej następuje kumulacja ze względu na mały rozmiar zwierzęcia. W badaniach przeprowadzonych na rozwiłtce wielkiej gatunku *D. magna* wykazano znaczące zmiany w rozrodczości. Spożywanie przez te stonogi mikroplastików z metalami ciężkimi, takimi jak nikiel, cynk czy ołów, przyczyniło się do zmniejszenia ilości i wielkości oraz wystąpienia malformacji u 68 % młodych osobników (7). Mikroplastiki znaleziono także w dużej ilości w organizmach morskich i oceanicznych, zwłaszcza rybach, skorupiakach oraz małżach. Zauważono u nich objawy zatrucia przewlekłego metalami ciężkimi, takie jak letarg, zaburzenia ruchu i orientacji, brak apetytu oraz zmiany behawioralne dotyczące rozrodu (3, 11, 25). Istnieje wiele publikacji naukowych dotyczących zaburzeń wywołanych wysokim stężeniem metali ciężkich w mikroplastikach u ryb (33, 3, 6). W badaniu z roku 2018 potwierdzono, że niektóre mikroplastiki zwiększają biodostępność rtęci, powodując kumulację w narządach okonia morskiego *Dicentrarchus labrax*. Największe stężenie rtęci wykazano w mózgu oraz mięśniach ryby. Nasilona inhibicja acetylocholinoesterazy przez bardoż przyswajalną rtęć spowodowała wystąpienie neurotoksyczności oraz stresu oksydacyjnego (3). U ryb żyjących w wodach północno-wschodniego Atlantyku znaleziono liczne cząstki bisfenolu A z aluminium, który odłożony został w wątrobie i mięśniach ryb gatunków *Scomber colias*, *Trachurus trachurus* oraz *Dicentrarchus labrax* (6).

Zmiany spowodowane obecnością metali ciężkich oraz plastików wykryto także u wyższych kręgowców. Niestety zwierzęta takie jak ptaki czy ssaki są znacznie mniej przebadane (14). U pingwinów na Antarktydzie stwierdzono w próbkach kału obecność licznych mikroplastików, powodujących zaburzenia układu pokarmowego i rzekome odczucie sytości. Znaleziono także liczne metale ciężkie, które odkładały się w piórach ptaków. U nahuira górskiego (*Pseudois nayaur*) również znaleziono liczne cząstki plastiku, a także metali ciężkich. Niezbędne są natomiast dalsze badania określające oddziaływania na siebie tych substancji w przewodzie pokarmowym tych zwierząt (23, 10).

### Mikroplastiki a czynniki zakaźne

Plastik występujący w środowisku jest siedliskiem wielu mikroorganizmów, takich jak bakterie, wirusy czy pierwot-



niaki. Coraz częściej używa się pojęcia „plastisfery”, opisując skolonizowany przez mikroby mikroplastik (31). Drobinny tworzyw sztucznych są wytrzymałe i mogą być transportowane na duże odległości, stanowiąc idealne środowisko do rozwoju biofilmu. Niestety optymalne warunki do wzrostu powodują osiedlanie się na plastiku potencjalnych patogenów (2). Odkryto, że mikroplastiki mogą przenosić pasożytnicze pierwotniaki oraz szkodliwe bakterie i wirusy, przyczyniając się do transmisji chorób i zakażenia organizmów w nowych ekosystemach (31). Na cząstkach plastiku odkryto bakterie z rodzaju *Vibrio*, *Campylobacteraceae* oraz gatunki *Aeromonas salmonicida* czy *Arcobacter* (31). Ponadto, bakterie *Vibrio* są jednymi z pierwszych kolonizatorów mikroplastiku. Są one także głównym patogenem ryb i skorupiaków, zwłaszcza hodowlanych, a niektóre gatunki są patogenne również dla innych zwierząt, jak i ludzi. Budzi to obawy dotyczące bezpieczeństwa mikrobiologicznego wody oraz żywności pozyskiwanej z wód słonych i słodkich (2).

W ciągu ostatnich 45 lat w związku z rosnącą temperaturą wód oraz coraz większym zanieczyszczeniem plastikiem zanotowano zwiększające się liczby gatunków *Vibrio* i infekcji spowodowanych kąpielami w oceanie (22). Co więcej, mikroplastiki powodują uszkodzenie błony

śluzowej przewodu pokarmowego zwierząt, co stanowi drogę wejścia dla patogenów znajdujących się na plastisferach, przyczyniając się do zwiększenia inwazyjności tych bakterii (12, 22). Biofilm znajdujący się na drobinach tworzyw sztucznych ma także negatywny wpływ na mikrobiotę jelitową, ponieważ zmienia jej skład i może potencjalnie prowadzić do zaburzeń pokarmowych (12, 18).

Mikroplastiki mogą być jednak wektorem nie tylko dla patogennych bakterii, ale również dla wirusów oraz pierwotniaków. Na plastisferach wykryto m.in. SARS-CoV-2 czy wirus grypy (27, 21). Co więcej, cząstki plastiku mogą przenosić wirusy na duże odległości. Mikroplastik ze względu na swoje małe rozmiary jest łatwo połykany przez zwierzęta i stanowi dla wirusów drogę wejścia do organizmu, co powoduje zwiększenie ich infekcyjności i wirulencji (29). Udowodniono, że mikroplastiki mogą wydłużać przeżywalność wirusów, zapewniając ochronę przed czynnikami środowiskowymi (29, 20). Podczas trwania pandemii COVID-19, mikroplastiki pochodzące z masek mogły wspomagać czas przeżycia wirusa SARS-CoV-2, przedłużając narażenie człowieka (27). Wirusy wchłonięte przez mikroplastiki miały także zwiększoną stabilność i zdolność do wywoływania efektów biotoksycznych (20). Większość badań naukowych zwią-

zanych z tematem oddziaływania wirusów znajdujących się na mikroplastikach odnosi się do chorób ludzkich. Niestety, istnieje niewiele prac naukowych na temat przenoszonych przez mikroplastiki wirusów zwierzęcych i ich efektów, co pokazuje konieczność dalszych badań. Natomiast można wywnioskować, że niektóre będą miały podobne właściwości ze względu na podobną budowę np. wirus grypy ludzkiej i wirus grypy psów czy bydła (29, 20, 21).

Drobiny tworzyw sztucznych mogą także przyczynić się do przenoszenia patogennych pierwotniaków. Dowiedziono, że pasożyty takie jak *Giardia enterica*, *Toxoplasma gondii* oraz *Cryptosporidium parvum* mogą wiązać się z mikroplastikiem, co pozwala im chronić się przed szkodliwymi czynnikami środowiska oraz pokonywać duże odległości, natomiast cięższe cząstki plastiku, które toną, mogą powodować gromadzenie się patogenów na dnie mórz i oceanów, przyczyniając się do zwiększonego ryzyka zarażenia żyjących tam ryb i bezkręgowców [33]. Infekcje *T. gondii* zostały udokumentowane u wielu ssaków wodnych i prowadziły do śmierci lub poważnych zaburzeń rozrodczych u wydr, delfinów i fok (32). Niezbędne są jednak dalsze badania obrazujące występowanie ewentualnych zależności między powiązaniem z plastikiem i infekcyjnością wyżej wymienionych pierwotniaków, a zakażeniami u ssaków wodnych polykających plastik (32).

Na mikroplastikach przenoszone mogą być również inne, toksyczne substancje, jak antybiotyki, pestycydy, polichlorowane bifenyle (PCB) i inne substancje o potwierdzonym szkodliwym działaniu (15).

## Podsumowanie

Podsumowując, badania wskazują na liczne zależności między mikroplastikiem, a metalami ciężkimi oraz bakteriami, wirusami i pierwotniakami. Kontynuowanie badań w tym zakresie jest kluczowe, aby stwierdzić, czy te powiązania mogą mieć realny wpływ na ekosystem, zdrowie zwierząt wodnych, jak i lądowych oraz ludzi. Ze względu na dość niski poziom wiedzy w społeczeństwie należy rozpowszechnić wiedzę o mikroplastikach i ich właściwościach. Konieczne jest również przeciwdziałanie dalszemu zanieczyszczeniu plastikiem i wdrożenie odpowiednich czynności mających na celu ochronę środowiska oraz zdrowia zwierząt i ludzi. Niezbędne jest także podjęcie działań dążących do usunięcia istniejącego już zanieczyszczenia plastikiem, aby mikroplastiki przestały stanowić zagrożenie dla świata przyrody. ●

## Piśmiennictwo

- Alimi O. S., Farmer Budarz J., Hernandez L. M., Tufenkji N.: Microplastics and nanoplastics in aquatic environments: aggregation, deposition, and enhanced contaminant transport. „Environ. Sci. Technol.”, 2018, 52, 1704–1724.
- Amaral-Zettler L. A., Zettler E. R., Mincer, T. J.: Ecology of the plastisphere. „Nat Rev Microbiol”, 2020, 18 (3), 139–15, DOI: 10.1038/s41579-019-0308-0.
- Antao Barboza L. G., Russo Vieira L., Branco V., Figueiredo N., Carvalho F., Carvalho C., Guilhermino L.: Microplastics cause neurotoxicity, oxidative damage and energy-related changes and interact with the bioaccumulation of mercury in the European seabass, *Dicentrarchus labrax* (Linnaeus, 1758). „Aquatic Toxicology”, 2018, 195, 49–57, DOI: 10.1016/j.aquatox.2017.12.008.
- Ashton, K., Holmes, L., Turner, A.: Association of metals with plastic production pellets in the marine environment. „Mar Pollut Bull.”, 2010, 60 (11), 2050–5, DOI: 10.1016/j.marpolbul.2010.07.014.
- Ayangbenro A. S., Babalola O. O.: A New Strategy for Heavy Metal Polluted Environments: A Review of Microbial Biosorbents. „Int J Environ Res Public Health.”, 2017, 19, 14 (1): 94, DOI: 10.3390/ijerph14010094.
- Barboza L. G. A., Cunha S. C., Monteiro C., Fernandes J. O., Guilhermino L.: Bisphenol A and its analogs in muscle and liver of fish from the North East Atlantic Ocean in relation to microplastic contamination. Exposure and risk to human consumers. „J. Hazard. Mater.”, 2020, 5, 393, 122419, DOI: 10.1016/j.jhazmat.2020.122419.
- Besseling, E., Wang, B., Lu’rling, M., Koelmans, A. A.: Nanoplastic affects growth of *S. obliquus* and reproduction of *D. magna*. „Environ. Sci. Technol.”, 2014, 48, 12336–12343.
- Bosker, T., Bouwman, L. J., Brun N. R., Behrens P., Vijver M. G.: Microplastics accumulate on pores in seed capsule and delay germination and root growth of the terrestrial vascular plant *Lepidium sativum*. „Chemosphere”, 2019, 226, 774–781.
- Brennecke D., Duarte B., Paiva F., Caçador I., Canning-Clode J.: Microplastics as vector for heavy metal contamination from the marine environment. „Estuarine, Coastal and Shelf Science”, 2016, 178, 189–195, DOI: 10.1016/j.ecss. 2015.12.003.
- Cui S., Yu W., Han X., Hu T., Yu M., Liang Y., Guo S., Ma J., Teng L., Liu Z.: Factors influencing the distribution, risk, and transport of microplastics and heavy metals for wildlife and habitats in „island” landscapes: From source to sink. „Journal of Hazardous Materials”, 2024, 476, 134938, DOI: 10.1016/j.jhazmat. 2024.134938.
- Hodson M. E., Duffus-Hodson C. A., Clark A., Prendergast-Miller M. T., Thorpe K. L.: Plastic bag derived-microplastics as a vector for metal exposure in terrestrial invertebrates. „Environ. Sci. Technol.”, 2017, 51, 4714–4721.
- Jeong J., Choi J.: Adverse outcome pathways potentially related to hazard identification of microplastics based on toxicity mechanisms. „Chemosphere.”, 2019, 231, 249–255, DOI: 10.1016/j.chemosphere. 2019.05.003.
- Jiang X., Chen H., Liao Y., Ye Z., Li M., Klobucar G.: Ecotoxicity and genotoxicity of polystyrene microplastics on higher plant *Vicia faba*. „Environ. Pollut.”, 2019, 250, 831–838.
- Jiang X., Li M.: Interaction of Microplastics and Heavy Metals: Toxicity, Mechanisms, and Environmental Implications. „Microplastics in Terrestrial Environments” w: The Handbook of Environmental Chemistry, 2020, 95, 185–195, DOI: 10.1007/978-2020-460
- Jutrzenka Trzebiatowska P., Kadac-Czapska K., Grembecka M.: Mikroplastik – Źródła, techniki separacji i identyfikacji. „Wiadomości chemiczne”, 2023, 77, 3–4, DOI: 10.53584/wiadchem.2023.03.2
- Kalickova G., Gotvcjn A. Z., Kladnik A., Jemec A.: Impact of polyethylene microbeads on the floating freshwater plant duckweed *Lemna minor*. „Environ. Pollut.” 2017, 230, 1108–1115.
- Khan A., Wang J., Li J., Wang X., Chen Z., Alsaedi A., Hayat T., Chen Y., Wang X.: The role of graphene oxide and graphene oxide-based nanomaterials in the removal of pharmaceuticals from aqueous media: a review. „Environ. „Sci. Pollut. Res.”, 2017, 24, 7938–7958.
- Li W., Chen X., Li M., Cai Z., Gong H., Yan M.: Microplastics as an aquatic pollutant affect gut microbiota within aquatic animals. „J of Hazard. Mat.”, 2022, 423, B, 127094, DOI: 10.1016/j.jhazmat.2021.127094.
- Lin W., Su F., Lin M., Jin M., Li Y., Ding K., Chen Q., Qian Q., Sun, X.: Effect of microplastics PAN polymer and/or Cu2+ pollution on the growth of *Chlorella pyrenoidosa*. „Environ. Pollut.”, 2020, 265, 114985.
- Lu J., Yu Z., Ngiam L., Guo J.: Microplastics as potential carriers of viruses could prolong virus survival and infectivity. „Water Res.”, 2022, 225, 119115, DOI: 10.1016/j.watres.2022.119115.
- Moresco V., Oliver D. M., Weidmann M., Matallana-Surget S., Quilliam R. S.: Survival of human enteric and respiratory viruses on plastics in soil, freshwater, and marine environments. „Environmental Research”, 2021, 199, 113367, DOI: 10.1016/j.envres.2021.113367.
- Prata J. C., da Costa J. P., Lopes I., Andray A. L., Duarte A. C., Rocha-Santos T.: A One Health perspective of the impacts of microplastics on animal, human and environmental health. „Sci Total Environ.”, 2021, 10, 777, 146094, DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.146094.
- Puasa N. A., Zulkharnain A., Verasundarapandian G., Wong C.-Y., Zahri K. N. M., Merican F., Shaharuddin N. A., Gomez-Fuentes C., Ahmad S. A.: Effects of Diesel, Heavy Metals and Plastics Pollution on Penguins in Antarctica: A Review. „Animals (Basel)”, 2021, 26, 11 (9), 2505, DOI: 10.3390/ani11092505.
- Qi Y., Yang X., Pelaez A. M., Lwanga E. H., Beriot N., Gertsen H., Garbeva P., Geissen V.: Macro- and micro-plastics in soil-plant system: effects of plastic mulch film residues on wheat (*Triticum aestivum*) growth. „Sci. Total Environ.”, 2018, 645, 1048–1056.
- Revel M., Châtel A., Perrein-Ettajani H., Bruneau M., Akcha F., Sussarellu R., Rouxel J., Costil K., Decottignies P., Cognie B., Lagarde F., Mouneyrac C.: Realistic environmental exposure to microplastics does not induce biological effects in the Pacific oyster *Crassostrea gigas*. „Mar. Pollut. Bull.”, 2020, 150, 110627, DOI: 10.1016/j.marpolbul.2019.110627.
- Samsonowska K., Kaszuba A.: Microplastic. „Polimery”, 2022, 67 (1), 28–33, DOI: 10.14314/polimery.2022.1.4
- Shukla S., Khan R., Saxena A., Sekar S.: Microplastics from face masks: a potential hazard post COVID-19 pandemic. „Chemosphere”, 2022, 302, 134805, DOI: 10.1016/j.chemosphere.2022.134805
- Tirkey A., Upadhyay L. S. B.: Microplastics: An overview on separation, identification and characterization of microplastics. „Mar Pollut Bull.”, 2021, 170, 112604, DOI: 10.1016/j.marpolbul.2021.112604.
- Wang X., Zheng K., Wang Y., Hou X., He Y., Wang Z., Zhang J., Chen X., Liu X.: Microplastics and viruses in the aquatic environment: a mini review. „Front. Microbiol.”, 2024, 15, 1433724, DOI: 10.3389/fmicb.2024.1433724.
- World Health Organization: Microplastics in drinking-water. WHO, 2019. Dostępny w Internecie: <https://www.who.int/publications/item/9789241516198>, Data dostępu: 14.09.2025, godz. 19.27.
- Zettler E. R., Mincer T. J., Amaral-Zettler L. A.: Life in the „plastisphere”: microbial communities on plastic marine debris. „Environ. Sci. Technol.”, 2013, 47, 7137–7146.
- Zhang E., Kim M., Rueda L., Rochman C., VanWormer E., Moore J., Shapiro K.: Association of zoonotic protozoan parasites with microplastics in seawater and implications for human and wildlife health. „Sci Rep”, 2022, 12, 6532, DOI: 10.1038/s41598-022-10485-5.
- Zhao H., Xu J., Yan Z., Ren H., Zhang Y.: Microplastics enhance the developmental toxicity of synthetic phenolic antioxidants by disturbing the thyroid function and metabolism in developing zebrafish. „Environ. Int.”, 2020, 140, 105750.

Eliza Niemczycka,

e-mail: eliza.niemczycka@uj.edu.pl