

Agnieszka DĄBROWSKA
Uniwersytet Warszawski, Wydział Chemii, Pracownia Fizykochemii Nanomateriałów
ul. Pasteura 1, 02-093, Warszawa
e-mail: adabrowska@chem.uw.edu.pl

MIKROPLASTIK W ŚRODOWISKU MORSKIM – INTERDYSCYPLINARNE SPOJRZENIE NA PROBLEM

Streszczenie: XX i XXI wiek, wraz z postępem w dziedzinie inżynierii materiałowej i rosnącą liczbą produktów z tworzyw sztucznych, przyniósł znaczną liczbę odpadów. Większość z nich, wraz z wodami powierzchniowymi lub bezpośrednio wyrzucona za burtę, przenosi się do morskich ekosystemów (docierając nawet do bentosu). Ze względu na specyficzne warunki środowiska (duże zasolenie, ruch wody morskiej, promieniowanie UV) łatwo ulegają rozdrobnieniu i są przenoszone na duże odległości w formie mikrocząstek. O ich wpływie na morską faunę, mechanizmach transportu, akumulacji, skutkach długotrwałego oddziaływania itp. wiadomo dalej zbyt mało. Przy rocznej produkcji tworzyw sztucznych >300 mln ton, z których >50% stanowią produkty jednorazowego użytku, omawiane zagadnienie jest istotnym i złożonym problemem wymagającym interdyscyplinarnych badań podstawowych.

Słowa kluczowe: mikroplastik, fragmenty odpadowych tworzyw sztucznych, zanieczyszczenia środowisk morskich

MICROPLASTIC DEBRIS IN THE MARITIME ENVIRONMENT - THE INTERDISCIPLINARY APPROACH TO THE PROBLEM

Abstract: The microplastic debris in the environment is currently an increasing and still poorly investigated problem. The majority of plastic rubbishes ends in the oceans via fluvial transport, storm water discharges or directly from ships and due to the salinity, waving, UV radiation the material is easily fragmented. Although microplastics are ubiquitous in the maritime systems (even at the sea-bed), the knowledge about their transport, accumulation, chemistry, physics and ecotoxicology is not sufficient. As the global annual production exceeds 300 millions of tones and more than a halve of it is disposable the interdisciplinary approach and a complex research strategy is needed to address and resolve this serious problem.

Keywords: microplastic debris, maritime environment pollution

1. WPROWADZENIE

Odpadowe cząstki tworzyw sztucznych, których zawartość w morzach i oceanach świata zwiększa się systematycznie z roku na rok, stanowią rosnące i nie do końca zbadane zagrożenie dla środowiska naturalnego¹. Zgodnie z przyjętą definicją mikroplastikiem nazwano te z nich,

których rozmiar nie przekracza 5 mm (czasami <1 mm). W niektórych opracowaniach dokonuje się dodatkowo podziału na duże (L-MPP 1–5 mm, ang. *large microplastic particles*) i małe cząstki mikroplastiku (S-MPP nie większe niż 1 mm, ang. *small microplastic particles*). Czasami stosuje się bardziej szczegółowy podział z wyodrębnieniem mezo- i makroplastiku (o rozmiarach odpowiednio do i ponad 20 mm). W odróżnieniu od problemu odpadów na plażach i w strefach brzegowych, ze względu na znaczne rozdrobnienie MPP, aż do przełomu XX i XXI wieku niedostrzegano skali zjawiska i powszechnego

¹ W 2014 roku oszacowano (Ericson i in.) całkowitą liczbę cząstek mikroplastiku na ponad 5 bilionów o łącznej masie prawie 270 tysięcy ton. Mimo koniecznych przybliżeń liczby te pokazują skalę opisywanego zjawiska.

zanieczyszczenia mórz mikroplastikiem², którego obecność wykryto nawet w morskich głębinach [1] i wysokich szerokościach geograficznych (79N i 68S [2, 3]). W związku z trwałością tworzyw sztucznych przewiduje się, iż problem ich obecności w oceanach, gdzie docelowo trafiają po wyrzuceniu, oraz wynikające z tego konsekwencje dla ekosystemu, będzie nabierał znaczenia i nie powinien być dłużej ignorowany. Chociaż tego typu zanieczyszczenie dotyczy całej kuli ziemskiej (w tym rzek, jezior [4], gór wysokich [5]), to zasadne wydaje się skoncentrowanie na środowiskach morskich³ [7].

2. OGÓLNA ANALIZA PROBLEMU I PRZEGLĄD WYNIKÓW BADAŃ

Odpadowe tworzywa sztuczne docierają do oceanu kilkoma drogami (związanymi z naturalnym obiegiem wody w przyrodzie lub za sprawą czynników antropogenicznych): wraz z nurtem rzek, wodami powierzchniowymi i głębinowymi przy ich wezbraniach, w czasie kataklizmów zabierających mienie⁴, bezpośrednio

ze statków⁵, fragmentów sieci rybackich, platform wiertniczych oraz innych obiektów znajdujących się na morzu (np. elektrownie wiatrowe, akwakultury), a częściowo również z atmosfery⁶. Ze względu na swoją trwałość i odporność ulegającą stopniowej, często bardzo wolnej, ale następującej przed rozkładem chemicznym, fragmentacji do cząstek wielkości kilku milimetrów, a nawet mikrometrów⁷. 2.46 mm to średni wymiar cząstek dla Północno-wschodniego Atlantyku. Zjawisku temu sprzyja specyfika środowiska morskiego: duże zasolenie, falowanie (w tym tarcie o skały i piasek w strefach przybrzeżnych), promieniowanie UV oraz dostępność tlenu. Istotnym źródłem mikroplastiku są także produkty kosmetyczne (szczególnie żele pod prysznic, pasty do zębów, maseczki, kremy z mikrodrobinami⁸) i chemia gospodarcza (np. proszki z dodatkami o średnicy kilku mikrometrów) oraz nitki z upranej odzieży z tworzyw sztucznych, w których cząstki są już rozdrobnione z chwilą wyrzucenia odpadów i przed dotarciem do morza. W dalszej kolejności cząstki są transportowane na znaczne odległości, m.in. zgodnie z prądami i globalną cyrkulacją wód łącznie ze strefami konwergencji, a także za sprawą falowania, różnic zasolenia, prądów pływowych i zjawisk lokalnych⁹. Mechanizmy transportu decydują o strefach akumulacji cząstek, z których spora część dociera do umiarkowanych szerokości geograficznych. Istotny

² Mimo pierwszych doniesień o jego obecności w brzuchach morskich ptaków wędrownych (lata 60-te XX wieku) oraz w pelagialu (lata 70-te XX wieku; prace następujących autorów: Smith i Carpenter, Morris i Hamilton, Wong i in.).

³ Według niektórych oszacowań liczba kawałków mikroplastiku pływających w toni wodnej waha się od 1–10 na km² średnio w skali globu, osiągając znacznie większe wartości dla niektórych regionów: ponad 100 na km² w Kanale La Manche, 4 na m² (!) w Indonezji; przybliżone dane dla dna morskiego to odpowiednio: ~100 000 na km² w Europie i prawie 700 000 na km² w Indonezji; liczby te obciążone są dużą dozą niepewności [6]. Inne szczególnie zanieczyszczone i często wymieniane w opracowaniach obszary to: Morze Karaibskie, Północny Atlantyk, Morze Śródziemne (północno-zachodnia część, Morze Liguryjskie, Sycylia), wybrzeża Brazylii, Zatoka Meksykańska, Zachodnia Australia. Na początku wieku średnia dla Pacyfiku 30–40°N wyniosła 334.271 obiektów na km² (według badań Moorea i in.).

⁴ Według oszacowań GESAMP (*The United Nations Joint Group of Experts on the Scientific Aspects of Marine Pollution*) ponad 80% mikroplastiku w morzach pochodzi z łądów, a nie statków lub innej działalności na morzach.

⁵ Szczególnym problemem są fragmenty i związki zawarte w farbach antyporostowych pokrywających kadłuby statków.

⁶ Przenoszone z wiatrem, np. w czasie huraganów, trąb powietrznych.

⁷ Nie istnieje dolna granica, zatem teoretycznie możliwe są również nanocząstki; nie stwierdzono eksperymentalnie ich obecności, zatem rozważania czy wcześniej następuje chemiczny rozkład materiału czy submikronowa fragmentacja są na tym etapie jedynie spekulacją. Więcej światła na problem mogą rzucić badania sztucznego starzenia sieci prowadzone w warunkach laboratoryjnych.

⁸ W wielu kosmetykach złączające właściwości pumeksu i innych naturalnych składników zastąpiono drobinami tworzyw sztucznych.

⁹ Oddzielnie rozpatrywane są cząstki w pelagialu (pływające swobodnie w toni morskiej), osadach dennych i na brzegach mórz (np. wyrzucone na plaże).

jest również ruch pionowy [8]. Przemieszczanie się mikroplastiku na różne głębokości związane jest z pływalnością najczęściej występujących fragmentów polietylenu i polipropylenu¹⁰, które osiadają na dnie dopiero pod wpływem nagromadzenia się materiału (biologicznego lub nieorganicznego) na ich powierzchni. Sprzyjają temu oddziaływania hydrofobowe, a niekorzystnymi konsekwencjami może być np. zagęszczenie czynników chorobotwórczych (wirusy, film bakteryjny) lub toksycznych (głównie halogenowych pochodnych związków organicznych czasami określanymi akronimem POPs, ang. *persistent organic pollutants*) oraz przeniesienie gatunków inwazyjnych do innych nisz ekologicznych (gdzie często zaburzają równowagę lokalnego ekosystemu). Zaobserwowano ponadto negatywny wpływ na rafy koralowe¹¹ i śmiertelne skutki przyłowy za sprawą zużytego, wyrzuczonego, zostawionego lub zgubionego sprzętu rybackiego¹². Mikroplastik oddziałuje również z organizmami zwierząt mając bezpośredni wpływ na co najmniej 267 gatunków stworzeń morskich [6]. Są wśród nich zarówno bezkręgowce m.in. pąkle, wieloszczety, mszywioty, stułbiopławy, mięczaki [9], jak i kręgowce, w tym zagrożone gatunki żółwi morskich, walenie, foki, ptaki wędrownie, ryby. Oprócz powodowania urazów mechanicznych w wyniku zaplątania, a w krytycznych przypadkach śmierci przez uduszenie, cząstki tworzyw dostają się do organizmów najczęściej przez układ trawienny (w wyniku przypadkowego połknięcia) [10]. Mikroplastik może również przenosić się na wyższe szczeble łańcucha troficznego [11] (z ofiar na drapieżców), a także z organizmów dorosłych na młodociane (np. w czasie regurgitacji).

Na podstawie przeglądu literatury oraz ekspertyz środowiskowych można zauważyć, iż bada się głównie:

¹⁰ Do tonących w wodzie morskiej pod wpływem własnego ciężaru należą m.in. poliamidy, PVC, ABS, PS (nie w postaci styropianu).

¹¹ Zarówno przez zmianę biotopu jak i uszkodzenia mechaniczne.

¹² Fenomen określany terminem ang. *ghost fishing* został szerzej omówiony w [19]

- mikroplastik obecny w próbkach planktonu i toni wodnej oraz globalne rozmieszczenie i strefy akumulacji zanieczyszczeń,
- osady (pod kątem stężenia i mechanizmu transportu cząstek),
- organizmy kręgowców i bezkręgowców (narażone na bezpośredni lub pośredni kontakt z mikroplastikiem),
- oddziaływanie cząstek z innymi zanieczyszczeniami i substancjami chemicznymi,
- mechanizmy rozkładu tworzyw sztucznych w warunkach laboratoryjnych (symulacja starzenia materiałów).

Te istotne kierunki badawcze, uzupełnione modelowaniem teoretycznym [12], dostarczają cennych informacji, ale na tym etapie nie pozwalają na pełny opis problemu mikroplastiku. Przeszkodą jest brak ujednoczonych metod badawczych, m.in. różne sposoby poboru próbek i oszacowania liczby cząstek na danym obszarze [13–18], brak uniwersalnych organizmów wskaźnikowych (charakterystycznych dla przynajmniej kilku obszarów).

3. FIZYKOCHEMIA ZJAWISKA

Spośród 311 milionów ton tworzyw sztucznych wyprodukowanych¹³ w 2014 roku ponad 70 milionów ton stanowił polietylen, ponad 50 milionów ton zarówno polipropylen jak i PET (poli(tereftalan etylenu)), ok. 35 milionów PVC (polichlorek winylu). Zauważalne ilości odnotowano również w przypadku produkcji polistyrenu i poliuretanów. Z roku na rok przybywa również tworzyw modyfikowanych nanocząstkami (nanokompozyty) oraz nowych polimerów (głównie kopolimerów już znanych monomerów). Jeśli aktualne trendy pozostaną bez zmian do 2050 roku produkcja roczna może przekroczyć 2 miliardy ton. Wśród cząstek mikroplastiku odłowionych z oceanów obserwuje się podobny skład. Najczęściej spotyka się (>90%): polietylen, polipropylen, polistyren, poli(chlorek winylu), poli(tereftalan etylenu). Liczne są także: polia-

¹³ Największą produkcję zanotowano w Chinach, pozostałej części Azji, Europie i Ameryce Północnej.

midy, poliestry, poliakrylonitryl, ABS (kopolimer akrylonitryl-butadien-styren), poliuretany. Próbkę zbierane są głównie za pomocą sit (często o średnicy oczek 300 μm) i siatek różnej wielkości (najlepiej sprawdzają się nestonowe o rozmiarze oczek 0.33 mm mesh) i oczyszczane rozmaitymi metodami [20] m.in. chemicznie w 30% H_2O_2 przy podwyższonej temperaturze do jego odparowania (55–65°C) lub w roztworze NaCl. Wyizolowane cząstki bada się pod mikroskopem optycznym m.in. w świetle spolaryzowanym, a coraz częściej innymi metodami fizykochemicznymi: SEM, EDS, ATR, FT-IR, spektroskopia Ramana, HPLC (pomocna przy rozdzielaniu materiału), ESI-MS. Umożliwiają one zarówno identyfikację jakościową tworzyw (EDS, FT-IR) jak i zbadanie morfologii powierzchni (SEM). Wciąż jednak za mało badań dotyczy sorpcji i zjawisk powierzchniowych, a wiele instytutów morskich ogranicza się do obserwacji mikroplastiku pod mikroskopem optycznym.

Zagrożeniem są nie tylko ulegające fragmentacji tworzywa, ale również toksyczne produkty ich częściowego rozkładu (niektóre monomery, związki zmniejszające palność, inne dodatki) [21]. Istotnym problemem dla środowiska są m.in. powszechnie stosowane opóźniacze palenia (związki bromoorganiczne) oraz inne modyfikatory¹⁴ właściwości tworzyw zawierające fenole i ftalany (składniki lakierów, farb, klejów, laminatów).

Oddzielnym problemem jest zagażenie hydrofobowych związków chemicznych, które gromadzą się na powierzchni mikroplastiku. W ten sposób ulegają akumulacji i zwiększa się ich toksyczny wpływ na organizmy żywe (połykające je wraz z odfiltrowanymi z wody fragmentami polimerów i przenoszące na wyższe szczeble łańcucha troficznego). Do tej pory udowodniono działanie cząstek mikroplastiku na tkanki i organy ponad dwustu stworzeń, a ponad sześćset jest pośrednio lub bezpośrednio narażonych na przenoszone przez nie zanieczyszczenia. Problem dotyczy głównie POPs (ang. *Persistent Organic Pollutants*). Są to: PCBs (polichlorowane bifeny-

le), PAHs (aromatyczne węglowodory), pestycydy, polibromowane bifenyle, fenole, bisfenol A, oktylofenol i inne związki chemiczne dodawane na etapie produkcji materiałów.

4. EKOTOKSYKOLOGIA

Mimo wielu doniesień cząstkowych o oddziaływaniu mikroplastiku na morskie organizmy, wciąż brak jednoznacznych wniosków dotyczących m.in. jego toksyczności, sposobów interakcji z tkankami wewnątrz organizmu, istotnych zagrożeń wynikających z postulowanej akumulacji¹⁵ zanieczyszczeń, cząstek metali i patogenów [22], naturalnych metod eliminacji szkodliwego działania. Do tej pory udokumentowano liczne przypadki negatywnych konsekwencji oddziaływania mechanicznego makro- i mikroplastiku na organizmy żywe (przyłów, uduszenie, zapłatanie, rany i obrażenia, zwiększenie wydatków energetycznych spowodowane dodatkowym obciążeniem) oraz połknięcia cząstek tworzyw wraz z pokarmem (uszkodzenia mechaniczne przewodu pokarmowego, zagłodzenie na skutek fałszywego uczucia sytości). Mikroplastik znajdowany jest w brzuchach morskich ptaków od lat 60-tych XX wieku. Badając martwe osobniki z gatunku *Fulmarus glacialis* dokonano identyfikacji jakościowej polimerów, a także oszacowano zróżnicowanie liczebności mikroplastiku na obszarze występowania tych ptaków (Morze Północne, Arktyka) [23].

Jest to jeden z lepszych wskaźników umożliwiających długotrwały monitoring zmian w środowisku. Inne badane organizmy wskaźnikowe to na przykład: *Mytilus edulis*, *Calanus helgolandicus*, *Fulmaris glacialis*, *Cetorhinus maximus*, *Balaenoptera physalus* [24], *Euphausia krohnii*. Coraz liczniejsze badania pokazują możliwość przedostawania się mikroplastiku wraz z kancerogennymi i neurotoksycznymi zanieczyszczeniami do tkanek (mięśnie) i narządów (gruczoły trawienne, skrzela, jelita) zwierząt

¹⁴ DBP, DEP, DEHP, HBCD, PBDEs.

¹⁵ Hipotezę potwierdza m.in. większe stężenie PBDEs w tkankach ptaków niż ich ofiar (ryb pelagicznych) oraz obecność pirenu w gruczołach trawiennych małży.

oraz wywołane tym skutki niepożądane jak np. zmniejszenie aktywności enzymatycznej acetylocholinoesterazy. Szacuje się, że zagrożenie mikroplastikiem dotyczy bezpośrednio ponad 85% morskich żółwi, 36% ptaków morskich, 23% gatunków morskich ssaków.

Jedną z poważniejszych, chociaż rzadko wymienianych, konsekwencji obecności mikroplastiku na dnie jest utrudnianie wymiany gazów między osadami a warstwami wody przydennej powodujące rozszerzanie się stref beztlenowych zabójczych dla życia.

5. PODSUMOWANIE I PRZYSZŁE PERSPEKTYWY

Na podstawie przeglądu doniesień literaturowych i własnych badań rozpoznawczych można wnioskować, iż konieczne do rozwiązania problemu jest ujednolicenie metod badawczych i pomiarowych, w tym metodyki pobierania próbek [25] oraz określania ich cech fizykochemicznych i toksyczności. W ten sposób stanie się możliwe porównywanie wyników badań niezależnych grup naukowych, a także stworzenie bazy danych ilościowych dotyczących globalnego rozmieszczenia mikroplastiku oraz spójnego modelu i map szlaków transportu wraz z miejscami akumulacji cząstek¹⁶.

W dalszym ciągu zbyt mało wiadomo o szczegółach mechanizmów rozkładu w przypadku konkretnych materiałów. Konieczne są bardziej szczegółowe badania laboratoryjne i modelowe. Ich efektem mogłaby być próba zaproponowania materiału o kontrolowanym procesie starzenia. Współpraca fizykochemików z oceanologami i biologami morza [26] w wielu przypadkach może pomóc w opisie oddziaływań powierzchni mikroplastiku z organizmami żywymi i toksycznymi związkami organicznymi.

Zweryfikowane badania podstawowe powinny służyć uaktualnieniu regulacji prawnych¹⁷

¹⁶ W tym opis „wirów zanieczyszczeń” dla południowych i północnych części Atlantyku.

¹⁷ Aneks V do konwencji MARPOL wszedł w życie w 1988 roku.

i przepisów dotyczących ochrony środowiska¹⁸. Mogą również pomóc w opracowaniu najskuteczniejszej strategii oczyszczania plaż, stref przybrzeżnych oraz zapobiegania przedostawaniu się odpadów do wód¹⁹ [27]. Ich popularyzacja ma szansę zwiększyć świadomość społeczną i zmienić zachowanie konsumentów²⁰.

Na zakończenie, warto zauważyć, iż porównaniu z mikroplastikiem nanomateriały [28, 29] mogą stanowić potencjalnie większe zagrożenie dla środowiska naturalnego ze względu na:

- 10^4 – 10^6 razy mniejsze wymiary liniowe, a tym samym łatwiejsze przenoszenie na znaczne odległości oraz silniejsze oddziaływanie na organizmy żywe,
- rozwiniętą powierzchnię właściwą, co czyni je skuteczniejszą „platformą” przenoszenia hydrofobowych szkodliwych związków chemicznych,
- trudniejszą analizę próbek, do której wymagana jest zaawansowana aparatura,
- brak jednoznacznych danych odnośnie toksyczności (utrudnione wprowadzanie norm i brak niektórych regulacji prawnych),
- stale zwiększaną produkcję (przejście od skali laboratoryjnej do przemysłowej w przypadku m.in. grafenu, nanorurek, nanosrebra, itp.).

¹⁸ Warto odnotowania są coraz liczniej podejmowane inicjatywy zwiększające świadomość społeczną i popularyzujące wyniki badań naukowych; działalność taką prowadzi m.in. Plymouth Marine Laboratory, a wiele szczegółów można znaleźć m.in. w materiałach Greenpeace, UNEP Year Book.

¹⁹ Dobrym przykładem skoordynowanych działań zmierzających do oczyszczenia środowiska z odpadów są na przykład: projekt AWARE, światowy dzień środowiska 6-tego czerwca, *International Coastal Cleanup*, *Blue Flag*, sprzątanie świata, *GhostNets Australia* (jeden z przykładów działań na rzecz eliminacji zużytego sprzętu rybackiego; GGGI *Global Ghost Gear initiative*), *Surfers Against Sewage*, założenia dokumentu *European Strategy on Plastic Waste in the Environment*. The National Oceanic and Atmospheric Administration w USA stosuje dane satelitarne do lokalizacji miejsc zanieczyszczonych i wysyła w nie statki.

²⁰ Ciekawy pomysłem był rejs z San Francisco do Sydney 18-sto metrowym katamaranem Plastik w całości wykonanym z butelek PET (12,5 tys.).

Do tej pory nie ma jednak istotnych badań im poświęconych. Wymagają one połączonego wysiłku biologów morza, chemików i nanotechnologów. Podobnie jak w przypadku mikroplastiku, konieczna jest interdyscyplinarna strategia na szczeblu regionalnym i globalne ujednoczenie metodyki pomiarów. Część wymienionych tu problemów jest obecnie rozwiązywana w ramach trwających i przyszłych autorskich projektów badawczych²¹.

BIBLIOGRAFIA

1. Van Cauwenberghe L. i in., *Microplastic pollution in deep-sea sediments*, *Environmental Pollution* 182 (2013) 495–499
2. Barnes D.K.A., Milner P., *Drifting plastic and its consequences for sessile organism dispersal in the Atlantic Ocean*, *Marine Biology* 146:815–825 (2005)
3. Barnes D.K.A. i in., *Macroplastics at sea around Antarctica*, *Mar. Environ. Res.* 70(2), 250–252 (2010)
4. Eriksen M i in., *Microplastic pollution in the surface waters of the Laurentian Great Lakes*, *Marine Pollution Bulletin* 77 (2013) 177–182
5. Free C.M. i in., *High-levels of microplastic pollution in a large, remote, mountain lake*, *Marine Pollution Bulletin* 85 (2014) 156–163
6. Allsopp M. i in., *Plastic Debris in the 's Oceans*, Greenpeace review and report, www.oceans.greenpeace.org
7. Ivar do Sul J.A. i in., *The present and future of microplastic pollution in the marine environment*, *Environmental Pollution* 185 (2014) 352–364
8. Kukulka T. i in., *The effect of wind mixing on the vertical distribution of buoyant plastic debris*, *Geophys. Res. Lett.* 39, L07601 (2012)
9. Cole M. i in., *The impact of Polystyrene Microplastics on Feeding, Function and Fecundity in the Marine Copepod Calanus helgolandicus*, *Environ. Sci. Technol.* (2015), 49, 1130–1137
10. Gregory M.R., *Environmental implications of plastic debris in marine settings –entanglement, ingestion, smothering, hangers-on, hitch-hiking and alien invasions*, *Phil. Trans. R. Soc. B* (2009) 364, 2013–2025
11. Farrell P. i in., *Trophic level transfer of microplastic: *Mytilus edulis* (L.) to *Carcinus maenas* (L.)*, *Environmental Pollution* 177 (2013) 1–3
12. Lebreton L.C.-M. i in., *Numerical modeling of floating debris in the world's oceans*, *Mar. Pollut. Bull.* 64(3), 653–661 (2012)
13. Vianello A. i in., *Microplastic particles in sediments of Lagoon of Venice, Italy: First observations on occurrence, spatial patterns and identification*, *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 130 (2013) 54–61
14. Collignon A. i in., *Annual variation in neustonic micro- and meso-plastic particles and zooplankton in the Bay of Calvi (Mediterranean-Corsica)*, *Mar. Pollut. Bull.* 79(1), 293–298 (2014)
15. Collignon A. i in., *Neustonic microplastic and zooplankton in the North Western Mediterranean Sea*, *Marine Pollution Bulletin* 64 (2012) 861–864
16. Lusher A.L. i in., *Microplastic pollution in the Northeast Atlantic Ocean: Validated and opportunistic sampling*, *Marine Pollution Bulletin* 88 (2014) 325–333
17. Mathalon A. i in., *Microplastic fibers in the intertidal ecosystem surrounding Halifax Harbor, Nova Scotia*, *Marine Pollution Bulletin* 81 (2014) 69–79
18. Aliani S. i in., *Floating debris in the Ligurian Sea, north-western Mediterranean*, *Marine Pollution Bulletin* 46:1142–1149
19. Tschernij V., P.-O. Larsson, *Ghost fishing by lost cod gill nets in the Baltic Sea*, *Fisheries Research* 64:1551–162 (2003)
20. Zhu X., *Optimization of elutriation device for filtration of microplastic particles from sediment*, *Marine Pollution Bulletin* (2015)
21. Lithner D. i in., *Environmental and Health hazard ranking and assessment of plastic polymers based on chemical composition*, *Sci. Total. Environ.* 409(18), 3309–3324 (2011)
22. Mato Y. i in., *Plastic resin pellets as a transport medium for toxic chemicals in the marine environment*, *Environ. Sci. Technol.* 35, 318–324 (2001)
23. van Franeker J.A. i in., *“Save the North Sea” Fulmar Study 2002–2004: a regional pilot project for the Fulmar-Litter-EcoQO in the OSPAR area*, (2005) *Altterra-rapport 1162*, Altterra, Wageningen, www.zeevogelgroep.nl

²¹ 120000–501/86-DSM-112 700 do końca 2017 roku, „Mikroplastik w środowisku morskim –opracowanie interdyscyplinarnej strategii badania zagadnienia oraz przeprowadzenie badań rozpoznawczych i modelowych”

24. Fossi M.C. i in., *Large filter feeding marine organisms as indicators of microplastic in the pelagic environment: The case studies of the Mediterranean basking shark (*Cetorhinus maximus*) and fin whale (*Balaenoptera physalus*)*, *Marine Environmental Research* 100 (2014) 17–24
25. Ryan P.G. i in., *Monitoring the abundance of plastic debris in the marine environment*, *Phil. Trans. R. Soc. B* (2009) 364, 1999–2012
26. Wang J. i in., *The behaviors of microplastics in the marine environment*, *Marine Environmental Research* 113: 7–17 (2016)
27. Kershaw P.J. i in., *Marine Plastic Debris and Microplastics. Global lessons and research to inspire action and guide policy change*, United Nations Environment Programme (UNEP), 2016
28. Pierścieniak M. i in., *Nanocząstki. Zagrożenie środowiskowe?*, *Przemysł Chemiczny* 4 (2012)
29. Maliszewska-Mazur M. i in., *Metody analizy jakościowej i ilościowej wybranych nanocząstek w środowisku*, *Przemysł Chemiczny* 6 (2012)
- Data wpłynięcia artykułu do redakcji: 14–03–2017
Data akceptacji publikacji do druku: 28–03–2017