

*Anthropogenic sources of mercury in the Baltic Sea.  
A real security threat and action programs*

## Antropogeniczne źródła rtęci w Morzu Bałtyckim. Realne zagrożenie dla bezpieczeństwa i programy działań

DOI: 10.15199/62.2024.8.4

*A review, with 74 refs., of anthropogenic sources of Hg and its compds. polluting the Baltic Sea. The impact of sunken conventional and chem. weapons, shipwrecks, deposited industrial waste on the release of Hg into water and bottom sediments was discussed. The role of numerous scientific institutions, governmental, EU and international organizations (including HELCOM) in monitoring the state of the Baltic Sea waters and counteracting the accumulation of Hg was presented. Currently, there is no excessive accumulation of Hg in environmental elements, there is no real threat to the safety of people, maritime transport, fisheries, and the entire Baltic ecosystem. However, certain restrictions were recommended on the consumption of some species of Baltic fish.*

Przegląd literaturowy dotyczący antropogenicznych źródeł zanieczyszczenia rtęcią (i jej związkami) Morza Bałtyckiego. Omówiono wpływ zatopionej amunicji konwencjonalnej i chemicznej, wraków statków, zdeponowanych odpadów przemysłowych na uwolnienie rtęci do wody i osadów dennych. Przedstawiono rolę licznych instytucji naukowych, organizacji rządowych, unijnych, międzynarodowych (w tym HELCOM) w monitorowaniu stanu wód Morza Bałtyckiego i przeciwdziałaniu kumulacji rtęci. Omówiono też skutki ratyfikacji przez państwa bałtyckie Konwencji z Minamaty w sprawie rtęci. Obecnie nie obserwuje się nadmiernej akumulacji rtęci w elementach środowiskowych, realnie nie istnieje zagrożenie dla bezpieczeństwa ludzi, transportu morskiego, rybactwa i całego ekosystemu bałtyckiego. Pewne ograniczenia wskazane są natomiast w konsumpcji niektórych gatunków ryb bałtyckich.

**Keywords:** Baltic Sea, mercury, anthropogenic sources, concentration, action programmes

**Słowa kluczowe:** Morze Bałtyckie, rtęć, źródła antropogeniczne, stężenia, program działania

Rtęć występuje naturalnie jako minerał (cynober HgS, kalomel Hg<sub>2</sub>Cl<sub>2</sub>), w skorupie ziemskiej jej zawartość wynosi 1,25 ppm. Rtęć jest jedynym metalem, który w normalnych warunkach występuje w stanie ciekłym i wykazuje dużą lotność, w temp. 20°C w stanie nasycenia znajduje się 14 mg/m<sup>3</sup> rtęci. Jest 13,6 razy cięższa niż woda. Nazywano ją żywym srebrem, była znana już ponad 2000 lat p.n.e. i miała różnorodne zastosowania, w tym także medyczne.

Rtęć w związkach chemicznych występuje w postaci jonów rtęci(II) Hg<sup>2+</sup> oraz rtęci(I) Hg<sub>2</sub><sup>2+</sup>. Tworzy związki

nieorganiczne, takie jak chlorki, azotany(V), siarczany(VI), oraz metaloorganiczne (np. metylortęć, fenylortęć, dimetylortęć), które charakteryzują się różną aktywnością chemiczną. Rtęć rozpuszcza wszystkie metale (z wyjątkiem żelazowców i platynowców), natomiast ze złotem, srebrem i cyną tworzy amalgamaty (nawet w temperaturze pokojowej). Związki rtęcioorganiczne z uwagi na wysoką toksyczność i zdolność bioakumulacji stanowią trwałe zanieczyszczenie środowiska. Najbardziej toksyczna forma rtęci, metylortęć (MeHg), łatwo gromadzi się np. w organi-



Prof. dr hab. inż. Zbigniew DOBRZAŃSKI (ORCID: 0009-0009-7593-1866) w roku 1970 ukończył studia na obecnym Wydziale Biologii i Hodowli Zwierząt Uniwersytetu Przyrodniczego we Wrocławiu. Stopień doktora uzyskał w 1975 r., doktora habilitowanego w 1984 r., a tytuł profesora nauk rolniczych otrzymał w 1991 r. Jest byłym kierownikiem Katedry Higieny Środowiska i Dobrostanu Zwierząt, a obecnie pełni funkcję dyrektora Otwartego Uniwersytetu Trzeciego Wieku UPWr. Specjalność – problematyka zootechniczna (technologie produkcji mięsa, jaj, mleka), ekologiczna (zagospodarowanie odpadów z produkcji zwierzęcej oraz z przetwórstwa ryb, wykorzystanie naturalnych surowców glinokrzemianowych i huminowych w żywieniu zwierząt) oraz ekotoksykologia (chemia pasz, żywności i środowiska, ze szczególną rolą metali toksycznych).



Dr hab. inż. Przemysław CWYNAR, prof. uczelni (ORCID: 0000-0003-0825-3064), w roku 2017 ukończył studia na Uniwersytecie Przyrodniczym we Wrocławiu. W 2011 r. uzyskał stopień doktora nauk weterynaryjnych na Uniwersytecie Warmińsko-Mazurskim w Olsztynie, a w 2024 r. stopień doktora habilitowanego w dyscyplinie zootechniki i rybactwo na UPWr. Od 2024 r. jest zatrudniony na stanowisku profesora macierzystej uczelni. Jest ekspertem i przedstawicielem Polski w Sekcji ds. Zdrowia i Dobrostanu Zwierząt Europejskiego Urzędu ds. Bezpieczeństwa Żywności (AHAW – EFSA). Specjalność – biologia zwierząt dzikich oraz wybrane zagrożenia epizootyczne, jak również wpływ środowiska na organizmy żywe.

zmach morskich, a także u ludzi, dostając się do organizmu poprzez układ oddechowy i pokarmowy<sup>1, 2)</sup>.

W klasyfikacji WHO (World Health Organization) rtęć jest jedną z 10 substancji najbardziej szkodliwych dla zdrowia człowieka<sup>3)</sup>. Rtęć jest trzecim najbardziej toksycznym pierwiastkiem na Ziemi, który nieustannie przedostaje się do środowiska. W tym rankingu wyprzedzają ją tylko arsen (As) i ołów (Pb). Należy dodać, że rtęć i jej nieorganiczne związki wg klasyfikacji IARC (International Agency for Research on Cancer) podległej WHO, figurują w 3. grupie rakotwórczości, a więc o nieudowodnionej kancerogenności, ale MeHg należy już do grupy 2B, a więc o prawdopodobnym działaniu rakotwórczym<sup>4)</sup>.

Naturalny globalny cykl biogeochemiczny rtęci obejmuje uwalnianie tego pierwiastka z gleb i wód powierzchniowych (parowanie), emisje z wulkanów, pożary lasów, uwalnianie hydrotermalne i geogeniczne, a następnie transport atmosferyczny, reakcje z ozonem, osadzanie się rtęci z powrotem w wodach lądowych i powierzchniowych oraz sorpcję rtęci i jej związków w glebie, osadach morskich lub rzecznych<sup>5)</sup>. Procesy te stwarzają trudności w śledzeniu ruchu rtęci od jej źródeł, tym bardziej, że ulega ona przemianom, głównie pod wpływem bakterii metanowych<sup>6, 7)</sup>.

Antropogeniczne źródła emisji rtęci są zdecydowanie bardziej niebezpieczne niż naturalne. Wiąże się przede wszystkim z działalnością człowieka, taką jak spalanie paliw kopalnych, produkcja cementu, hutnictwo, a także wykorzystywanie rtęci w procesach przemysłowych. Paleniska domowe również przyczyniają się do emisji rtęci, podobnie jak działalność związana z wydobyciem złota na małą skalę ASGM (*artisanal and small-scale gold mining*)<sup>6, 8)</sup>. Antropogeniczna emisja rtęci może prowadzić do poważnych skutków zdrowotnych i ekologicznych, dlatego monitorowanie i ograniczanie emisji tego metalu w środowisku jest niezbędne.

Autorzy amerykańscy<sup>9)</sup> oszacowali bilans rtęci antropogenicznej na świecie za ostatnie 500 lat (1510–2010). Totalna emisja THg do powietrza wyniosła 344,9 tys. t, depozycja do lądu/wody 1127,3 tys. t, co daje łączne uwolnienie 1472,2 tys. t. Według UNEP (United Nations Environment Programme)<sup>10)</sup> globalny bilans rtęci (THg) za 2018 r. przedstawiał się następująco: emisja (w tym ze źródeł antropogenicznych) ok. 7000 t/r, depozycja (do lądu/wód słodkich, do oceanu) łącznie 7480 t/r.

W literaturze podawane są różne zawartości rtęci w środowisku, w powietrzu w miastach 6–20 µg/L, w powietrzu nad morzami 1–11 µg/L, ale na terenach uprzemysłowionych stężenie może sięgać nawet 1700 µg/L, a podczas erupcji wulkanicznych nawet 40 000 µg/L<sup>5)</sup>. Stężenie rtęci w glebie waha się w zakresie 0,03–0,1 mg/kg, przy średniej wartości 0,06 mg/kg, jednak na terenach zanieczyszczonych tym metalem jest go wielokrotnie więcej<sup>2)</sup>. W wodach mórz i oceanów świata koncentracja THg wynosi 0,5–27 060 ng/L, najczęściej poniżej 10 ng/L<sup>11)</sup>.

Morze Bałtyckie (MB) jest prawie zamkniętym zbiornikiem wodnym, który rocznie wymienia tylko 3% wody z Morzem Północnym. Źródłem rtęci w MB są dopływy rzeczne, depozycja atmosferyczna, zdeponowana na dnie broń konwencjonalna i bojowe środki chemiczne, wraki statków i odpady przemysłowe<sup>12–14)</sup>. Nowym zagrożeniem może być coraz większa eksploatacja MB, czyli budowa gazociągów, układanie kabli na jego dnie, a także budowa platform wiertniczych (wydobycie gazu i ropy) i farm wiatrowych.

Celem pracy jest przegląd najważniejszych problemów „rtęciowych” spowodowanych przez źródła antropogeniczne, które nie zostały dotychczas dokładnie poznane, oszacowane i rozwiązane, a które decydują o obecnym stanie zanieczyszczenia MB związkami rtęci. Jak wiadomo, wpływają one na akumulację związków rtęci w organizmach morskich, w tym w populacji ryb bałtyckich, a pośrednio także na bezpieczeństwo osób w różny sposób związanych z MB.

## Krótką charakterystyka Morza Bałtyckiego

Morze Bałtyckie jest najmłodszym morzem na naszej planecie, które wyłoniło się z cofających się mas lodu zaledwie ok. 10 000–15 000 lat temu. Bałtyk, w którym panują szczególnie warunki hydrograficzne i klimatyczne, jest jednym z największych zbiorników słonawych wód na świecie. Zwane jest też morzem śródlądowym północnej Europy, ponieważ jest otoczony lądem ze wszystkich stron i jest połączony z Morzem Północnym tylko kilkoma płytkimi cieśninami. Dlatego okres całkowitej wymiany wody w morzu jest długi i wynosi ok. 25–30 lat. Powierzchnia MB wraz z cieśniną Kattegat wynosi



Plk dr hab. Marek BODZIANY, prof. AWL (ORCID: 0000-0001-8030-3383), w roku 1996 ukończył studia w Wyższej Szkole Oficerskiej Wojsk Rakietowych i Artylerii w Toruniu, w 1999 r. na Uniwersytecie im. Adama Mickiewicza w Poznaniu, w 2004 r. w Akademii Obrony Narodowej, a w 2008 r. w Międzynarodowej Wyższej Szkole Logistyki i Transportu we Wrocławiu. W 2009 r. uzyskał stopień doktora na Uniwersytecie Wrocławskim, a w 2019 r. stopień doktora habilitowanego na obecnym Uniwersytecie w Siedlcach. Jest zatrudniony na etacie profesora uczelni w Akademii Wojsk Lądowych im. gen. T. Kościuszki we Wrocławiu, gdzie jest dziekanem Wydziału Zarządzania i Przywództwa. Jest członkiem krajowych i międzynarodowych organizacji i stowarzyszeń zajmujących się społecznymi

obszarami bezpieczeństwa narodowego i międzynarodowego. Specjalność – społeczne problemy współczesnego świata, takie jak nierówności społeczne, globalizacja, konflikty i wojny oraz kryzysy społeczne, a także bezpieczeństwo publiczne.



Prof. dr hab. inż. Tadeusz TRZISZKA (ORCID: 0000-0002-0459-370X) w roku 1973 ukończył studia na obecnym Uniwersytecie Przyrodniczym we Wrocławiu w dyscyplinie technologia żywności i żywienia. Pracuje w Instytucie Inżynierii Rolniczej UPWr. Jest członkiem kilku organizacji i stowarzyszeń naukowych krajowych i zagranicznych, doktorem *honoris causa* Uniwersytetu Medycznego we Wrocławiu (2019 r.). Specjalność – technologia drobiu i jaj, technologie procesowe, w szczególności innowacyjne technologie produkcji suplementów diety, nutraceutyków i żywności funkcjonalnej, zarządzanie jakością i bezpieczeństwem żywności. W ostatnich ośmiu latach szczególną uwagę poświęcił gospodarce obiegu zamkniętego (GOZ) i energii odnawialnej (OZE) na rzecz zrównoważonego rozwoju środowiska naturalnego oraz monitoringu łańcucha żywnościowego „od pola do stołu”.

Table. Anthropogenic sources of mercury in the Baltic Sea

Tabela. Antropogeniczne źródła rtęci w Morzu Bałtyckim

Źródła rtęci (THg)	Dane	Zawartość THg	Literatura
Amunicja: konwencjonalna chemiczna	~300 000 t	~min. 300 t	19
	~50 000 t		21
			27
Miny morskie	~ 16 800–61 000 szt.		13
Wraki statków	~8000–10 000 obiektów (maks. blisko 100 000)	?	14 29
Odpady przemysłowe	20 000–23 000 metalo- wych beczek z HgCl <sub>2</sub>	~9–10 t	35
Wydobycie gazu i ropy, gazociągi i inne instalacje	dno Morza Bałtyckiego	?	36 37
Wprowadzenie rtęci do MB*	cały basen Morza Bał- tyckiego	4,8 t/r	27
			38

\* bezpośrednie źródła punktowe, poprzez rzeki, osadzenie się z powierzchni wód, osadzenie z atmosfery (depozycja)



Fig. 1. Political map of the Baltic Sea (Source: <https://www.nationsonline.org/one-world/map/Baltic-Sea-map.html>)

Rys. 1. Mapa polityczna Morza Bałtyckiego (Źródło: <https://www.nationsonline.org/one-world/map/Baltic-Sea-map.html>)

ok. 415 300 km<sup>2</sup>, przy objętości wód morza 21 721 km<sup>3</sup>, powierzchni zlewniska 1 721 238 km<sup>2</sup>, a linia brzegowa MB ma długość ok. 8100 km. Średnia głębokość wynosi 52,3 m, a maksymalna 459 m (rys. 1). W basenie MB znajduje się 9 krajów (Dania, Estonia, Finlandia, Litwa, Niemcy, Łotwa, Polska, Rosja i Szwecja). Przez cieśninę Skagerrak łączy się z Morzem Północnym i Norwegią. Największymi miastami nadmorskimi są: Sankt Petersburg (~5,3 mln), Sztokholm (~1,5 mln) i Kopenhaga (~1,3 mln mieszkańców), a do największych portów należą: rosyjskie porty w Ust-Ludze, Primorsku i Sankt Petersburgu oraz porty krajów UE w Rydze, Göteborgu, Gdańsku i Gdyni, Tallinie i Kłajpedzie. W rejonie MB mieszka ok. 85 mln ludzi, którzy wykorzystują morze do różnych celów<sup>14, 15</sup>.

Do MB wpływa ok. 250 rzek, z których największe to Newa, Wisła, Odra, Kemi, Niemen, Lule, Gotha, Ångerman i Dźwina. Największy średnioroczny spływ wody, zbliżający się do 2500 m<sup>3</sup>/s, charakteryzuje Newę. Przepływ powyżej 1000 m<sup>3</sup>/s mają również Wisła i Dźwina. Razem wszystkie rzeki dostarczają MB ok. 440 km<sup>3</sup> wody rocznie. Średnie zasolenie wody jest małe i wynosi ok. 7‰. Słone wody z Morza Północnego wlewające się do MB, ze względu na większą gęstość pozostają na dnie i są odizolowane od atmosfery warstwą mniej słonych wód powierzchniowych. Z tego powodu ok. 25% dna MB znajduje się w strefie beztlenowej, gdzie rozwijające się bakterie wydzielają siarkowodor. Głównym problemem ekologicznym, trudnym do praktycznego rozwiązania jest postępująca eutrofizacja wód MB<sup>16, 17</sup>.

## Antropogeniczne źródła rtęci

Istnieje kilka antropogenicznych źródeł rtęci, bezpośrednio i pośrednio wpływających na jej zawartość w ekosystemach MB. Pierwszym problemem jest składowanie dużej ilości broni konwencjonalnej i chemicznej z II wojny swia-



Płk rez. dr hab. inż. Norbert ŚWIĘTOCHOWSKI, prof. AWL (ORCID: 0000-0001-6582-9694), w roku 1994 ukończył studia w Wyższej Szkole Oficerskiej Wojsk Rakietowych i Artylerii w Toruniu, w 2002 r. na Uniwersytecie Mikołaja Kopernika w Toruniu, a w 2007 r. w Akademii Obrony Narodowej. Jest zatrudniony na etacie profesora uczelni w Akademii Wojsk Lądowych im. gen. T. Kościuszki we Wrocławiu, gdzie pełni funkcję prorektora ds. dydaktycznych. Jest członkiem krajowych i międzynarodowych zespołów eksperckich związanych z problematyką połączonego wsparcia ogniowego i bezpieczeństwa militarnego. Specjalność – problematyka bezpieczeństwa państwa, teoria wojny i pokoju, wykorzystanie artylerii w operacjach wojskowych oraz rola broni i środków niemiernocionnych w bezpieczeństwie publicznym.



Dr hab. inż. Alicja KOWALCZYK, prof. uczelni (ORCID: 0000-0003-1908-2942), w roku 2018 ukończyła studia na Uniwersytecie Przyrodniczym we Wrocławiu w dyscyplinie nauki rolnicze. W 2019 r. uzyskała stopień doktora, a w 2023 r. stopień doktora habilitowanego na Wydziale Biologii i Hodowli Zwierząt. Od 2024 r. jest profesorem UPWr. Jest kierownikiem laboratorium badawczego w Małopolskim Centrum Biotechniki w Krasnem. Specjalność – biochemia komórki oraz toksykologia. Ostatnie lata poświęciła badaniom wpływu metali toksycznych na zdrowie organizmu zwierzęcego.

\* Adres do korespondencji:

Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu, ul. Chelmońskiego 38C, 51-630 Wrocław, tel.: (71) 348-41-42, e-mail: [alicja.kowalczyk@upwr.edu.pl](mailto:alicja.kowalczyk@upwr.edu.pl)

towej (II WŚ), odpadów przemysłowych zawierających rtęć i uwalnianie paliwa z licznych wraków statków. Nowym zagrożeniem jest jednak coraz większa eksploatacja MB, czyli budowa gazociągów, układanie kabli na jego dnie, a także budowa platform wiertniczych (wydobycie gazu i ropy) i farm wiatrowych.

### Amunicja konwencjonalna

W MB zalega duża liczba amunicji konwencjonalnej (pociski artyleryjskie, bomby lotnicze, miny, torpedy, granaty), której ok. 300 tys. t zostało zatopione po II WŚ. Ogółem ocenia się, że na dnie MB zalega 385 tys. t amunicji<sup>12)</sup>. Najważniejszymi składowiskami amunicji z okresu II WŚ są: cieśniny Skagerrak i Kattegat, składowisko amunicji Kolberger Heide (rejon Kilonii), Głębia Bornholmska, Głębia Gotlandzka i Zatoka Gdańska<sup>18, 19)</sup>.

Większość amunicji konwencjonalnej zawiera rtęć, zarówno w postaci rtęci elementarnej, jak i związków rtęci, a zatem mogła działać jako specyficzne lokalne źródło rtęci w składowiskach morskich. Jak wiadomo, do produkcji amunicji używano piorunianu rtęci  $Hg(CNO)_2$ . Jest on najwcześniej poznanym inicjującym materiałem wybuchowym, stosowanym w spłonkach i detonatorach. Jego energię wybuchu szacuje się na 1,5 MJ/kg. Produktami rozkładu piorunianu rtęci (MeFu) są m.in. rtęć, azot i tlenek węgla. Jest on silnie trujący, dlatego obecnie zastępuje się go innymi związkami chemicznymi, np. tetrazenem ( $C_2H_6N_{10}$ ) lub trinitrorezorcynianem ołowiu ( $C_6H(NO_2)_3O_2Pb \cdot H_2O$ )<sup>20, 21)</sup>.

Znaczne ilości materiałów wybuchowych zawierają miny morskie, z których wiele nadal znajduje się w MB. Na podstawie obliczeń państw bałtyckich (głównie Szwecji) szacuje się, że w latach 1848–1945 w wodach MB znajdowało się 165–180 tys. min morskich. Obecnie szacuje się, że pozostało ich 16,8–61 tys. Ich podstawowe cechy bojowe zostały znacznie zminimalizowane w wyniku upływu czasu (wyczerpywanie się baterii zasilających w przypadku min niekontaktowych) oraz oddziaływania agresywnego środowiska morskiego (utrata pływalności min dryfujących na skutek korozji lub pokrycia przez organizmy morskie). Nie stanowią one poważnego zagrożenia dla ruchu morskiego, ale mogą mieć negatywny wpływ na środowisko poprzez stopniowe uwalnianie szkodliwych substancji z zawartych w nich materiałów wybuchowych. Jako przykład należy wskazać, że brytyjskie i niemieckie miny denne, często spotykane w MB, zawierają 430–700 kg materiałów wybu-

chowych (m.in. amatołu i heksanu), które łatwo uwalniają się wskutek korozji metalowych kadłubów min<sup>13)</sup>.

Obecna technologia wykrywania amunicji podwodnej zależy od stanu metalowej powłoki tych obiektów. Z czasem korozja eliminuje szansę na odnalezienie i ewentualne usunięcie tych punktowych źródeł zanieczyszczeń, zwłaszcza biorąc pod uwagę, że niektóre rodzaje amunicji zostały wprowadzone ponad 100 lat temu (I WŚ).

### Broń chemiczna

Broń chemiczna BST (bojowe środki trujące) była szeroko stosowana podczas I WŚ, a jej produkcja była kontynuowana po zakończeniu wojny. W czasie II WŚ nie była używana, co oznaczało, że w arsenałach walczących państw pozostawały ogromne ilości BST, szacowane na ok. 300 tys. t, zawierających ok. 65 tys. t substancji toksycznych. Duża część trafiła do wód Bałtyku, szacuje się, że było to 40 tys. t BST, zawierających 15 tys. t substancji chemicznych<sup>13)</sup>. Broń chemiczną rzucano też do Morza Północnego i północnego Atlantyku. Blisko granicy z Norwegią, w cieśninie Skagerrak, zrzucono ok. 45 tys. t BST. Podobnie w Szwecji, poza Måseskär również w Skagerrak zatopiono ok. 20 tys. t BST. Obecnie największym składowiskiem BST pozostaje wschodni rejon duńskiej wyspy Bornholm, gdzie zdeponowano blisko 35 tys. t broni, zawierającej 13 tys. t środków toksycznych. Co najmniej 2 tys. t BST spoczywa w Głębi Gotlandzkiej, również w Małym Bełcie (Jutlandia) znajduje się 69 tys. granatów z tabunem oraz 5 tys. t bomb i pocisków wypełnionych tabunem i fosgenem. Na polskich obszarach morskich WSE (Wyłączna Strefa Ekonomiczna) wytypowano 6 rejonów występowania BST. Ich łączna powierzchnia wynosi ok. 440 km<sup>2</sup> i obejmuje lokalizacje w pobliżu Kołobrzegu, Darłowa i Helu. Szacuje się, że ok. 60 t BST, wypełnionych głównie gazem musztardowym, zalega na dnie morskim zidentyfikowanych obszarów. Zatoka Gdańska kryje w sobie ok. 30 t niebezpiecznych substancji, głównie iperytu siarkowego i arsenku wodoru. Inne BST zawierają również arsynę, tabun, sarin i fosgen. Związki arsenu mogą jednak ulegać bioakumulacji i po rozkładzie w środowisku pozostają nieorganicznymi związkami arsenu, które są mało toksyczne. Gaz musztardowy rozkłada się do substancji chemicznych o właściwościach rakotwórczych, podobnie jak trotyl, stosowany jako materiał wybuchowy<sup>22, 23)</sup>.

Nie wiadomo, czy substancje chemiczne obecne w BST nie wchodzi w interakcje z rtęcią i jej związkami osadzają-



Prof. dr hab. inż. Krzysztof FORMICKI (ORCID: 0000-0003-0068-4011) ukończył studia na obecnym Wydziale Nauk o Żywności i Rybactwa Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego w Szczecinie. W 1984 r. uzyskał stopień doktora, a w 1991 r. stopień doktora habilitowanego z zakresu rybactwa. W 1998 r. otrzymał tytuł profesora. Od 1999 r. jest kierownikiem Katedry Hydrobiologii, Ichtiologii i Biotechnologii Rozrodu ZUT, dziekanem Wydziału Nauk o Żywności i Rybactwa tej uczelni. Specjalność – wpływ czynników środowiskowych, z uwzględnieniem czynników pochodzenia antropogenicznego, na organizmy wodne, a szczególnie na wczesne stadia ontogenezy.



Mirosław ZAWADZKI jest prezesem Stowarzyszenia Producentów Sektora Rolno-Spożywczego „Verus” w Warszawie. Jego zainteresowania naukowe to zarządzanie projektami z zakresu produkcji zwierzęcej (dobrostan zwierząt), żywienia człowieka, ekologii i ochrony środowiska. Jest popularyzatorem nauki, beneficjentem wielu grantów zarówno naukowo-badawczych, edukacyjnych, jak i popularyzatorskich.

cymi się w wodach i osadach dennych. Nie ma informacji, czy BST ich nie zawierają, ale niektóre typy pocisków i bomb lotniczych wypełnionych trującymi substancjami (głównie gazami) mogą mieć MeFu w detonatorach i spłonkach<sup>24, 25</sup>). Najprawdopodobniej amunicja chemiczna została rozbrojona przed zatopieniem, ale wraz z nią zatopiono zapalniki zawierające MeFu, zwykle pakowane w osobne skrzynie. Dopiero badanie osadów na składowiskach BST da odpowiedź na to pytanie<sup>26, 27</sup>).

W najnowszej opinii Komisji Helsińskiej (HELCOM), zatopiona po II WŚ broń chemiczna stopniowo traci swe niebezpieczne właściwości. Skorodowane zasobniki, pociski lub bomby lotnicze powoli opróżniają się, a ich zawartość ulega degradacji, rozpuszczając się w wodzie morskiej. Są też substancje, które bardzo wolno się rozpuszczają, do nich należy m.in. iperyt i fosgen. Leczą właśnie ten powolny proces powoduje, że nie grozi poważniejsza koncentracja groźnych chemikaliów w wodach MB<sup>28</sup>).

### Wraki statków

Źródłem rtęci w wodach MB są również wraki różnych statków (wojennych, pasażerskich, rybackich, towarowych) spoczywających na jego dnie. Najwięcej zarejestrowanych wraków znajduje się w wodach szwedzkich (30 tys. zidentyfikowanych obiektów). Finlandia wskazuje na obecność 5200 wraków w swoich wodach, a Dania 2518 obiektów. Polskie dane wskazują na obecność ponad 20 tys. obiektów na dnie MB w polskiej części WSE<sup>29</sup>). Źródła szwedzkie szacują, że na dnie całego Bałtyku znajduje się ok. 100 tys. różnych wraków statków<sup>14</sup>).

Lokalizacja większości z nich nie została jeszcze zidentyfikowana ani potwierdzona, a co najmniej 100 z nich uznaje się za wraki o wysokim priorytecie, stanowiące potencjalne zagrożenie dla środowiska morskiego. Wraki te stopniowo uwalniają paliwo i/lub inne niebezpieczne dla środowiska substancje chemiczne, w tym zawierające rtęć i jej związki. Jak zauważyli Willa i Szpak<sup>30</sup>), wrak s/s Stuttgart (z czasów II WŚ) spowodował już lokalną katastrofę ekologiczną, a tym samym grozi skorodowany kadłub tankowca t/s Franken, zawierający 6 tys. t paliwa. Średnie stężenie THg w oleju napędowym wynosi 0,185 µg/L. Badania przeprowadzone w rejonie tych dwóch statków zatopionych w Zatoce Gdańskiej wykazały, że stężenia Hg w osadach w pobliżu wraków zawierały do dwóch rzędów wielkości więcej Hg niż osady z obszarów referencyjnych<sup>19</sup>). Istnieją doniesienia, że w osadach wokół tego pierwszego wraku okrętowego oprócz Hg znajduje się również wiele innych śladowych i toksycznych metali ciężkich, takich jak Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Mo, Ni, Pb, V i Zn, których rola jest dobrze poznana<sup>31, 32</sup>).

Należy dodać, że rosnący ruch statków w MB sprzyja wypadkom różnych jednostek pływających (w tym tankowców, chemikaliowców, gazowców). W latach 2004–2020 odnotowano aż 2670 wypadków żeglugowych. Tylko w 2020 r. zarejestrowano flotę ponad 3900 statków towa-

rowych operujących w basenie MB. W tym czasie w rejonie MB miało miejsce łącznie 251 potwierdzonych wypadków morskich, które zostały zgłoszone do państw członkowskich UE<sup>33</sup>). Według Szubrychta<sup>34</sup>) w akwenach MB o największym natężeniu ruchu morskiego operuje ok. 2 tys. statków, ale brak danych na temat ich możliwego wpływu na zanieczyszczenie środowiska rtęcią.

### Odpady przemysłowe

Informacje ze Szwecji są niepokojące. Odkryto ponad 3500 beczek odpadów katalitycznych, legalnie zatopionych w zatoce Sundsvall (Zatoka Botnicka) w latach 50. i 60. przez lokalne papiernie. Beczek tych może być nawet 23 tys., zawierających łącznie 9–10 t rtęci (HgCl<sub>2</sub>). Jak wiadomo chlorek rtęci jest dobrze rozpuszczalny w wodzie i silnie trujący. Badania Szwedzkiej Służby Geologicznej (SGU) wykazały, że niektóre z tych beczek były już skorodowane, natomiast Szwedzka Agencja Ochrony Środowiska (SEPA) potwierdziła, że chlorek rtęci z niektórych beczek dostał się do otaczającej wody. Jeśli przyjmiemy hipotezę uwolnienia rtęci (9–10 t), to w wariacie statycznym (brak wymiany wody z Morzem Północnym) spowoduje zwiększenie stężenia THg w całym basenie MB o 0,4 ng/L (kalkulacja własna). Nie są to duże wartości i trudno oszacować skutki ewentualnego wprowadzenia tej ilości HgCl<sub>2</sub>, gdyż istnieje wiele zmiennych czynników.

Problem odpadów rtęciowych w zatoce Sundsvall nie jest w pełni zidentyfikowany technicznie i naukowo zweryfikowany, niemniej jednak jest to sygnał, którego nie można przeoczyć w bilansie rtęci MB, zwłaszcza jego północnej części<sup>35</sup>).

### Wydobycie gazu i ropy naftowej

Gaz ziemny i ropa naftowa są eksploatowane z dna MB od wielu lat (głównie przez spółkę Lotos Petrobaltic). Według danych amerykańskiej służby geologicznej tzw. depresja Bałtycka, obejmująca przybrzeżną Polskę, Rosję, Litwę, Łotwę, Estonię i Szwecję z połaciami terytorium lądowego, mieści do 1,6 mld baryłek technicznie wydobywalnej ropy<sup>36</sup>). Brak jest wiarygodnych informacji, w jakim stopniu obecnie wydobywana ropa lub ropa możliwa do wydobycia w przyszłości mogą być wtórnym źródłem zanieczyszczenia wód MB związkami rtęci. Wiadomo, że rtęć występuje naturalnie w złożach gazu i ropy naftowej w szerokim zakresie stężeń: do 5 mg/m<sup>3</sup> w gazie ziemnym i do 600 mg/kg w ropie naftowej<sup>37</sup>).

Rtęć zawarta w węglowodorach stwarza wiele problemów technologicznych i środowiskowych, takich jak zanieczyszczenie urządzeń i produktów tym niezwykle toksycznym pierwiastkiem, zatrucie

katalizatorów, a także inicjuje intensywną korozję urządzeń technologicznych, zwiększając tym samym ryzyko awarii i wypadków.

Wiadomo, że na dnie MB zainstalowane są dwa duże systemy przesyłowe gazu ziemnego: Baltic Pipe (Dania–Polska), Nord Stream (Rosja–Niemcy) oraz Balticconnector (Estonia–Finlandia). Warto zauważyć, że we wrześniu 2022 r. doszło do eksplozji gazociągów NS, a w październiku 2023 r. doszło do mechanicznego uszkodzenia BCC. Brak jest oficjalnych informacji nt. skutków ekologicznych tych dwóch awarii.

## Depozycja rtęci w basenie Morza Bałtyckiego

Oszacowanie depozycji rtęci w basenie MB nie jest łatwym zadaniem, ze względu na mnogość źródeł antropogenicznych oraz zmienność form chemicznych tego pierwiastka. Wprowadzanie rtęci do MB ze źródeł punktowych, poprzez rzeki, całkowite depozycje wodne i atmosferyczne wynosiło 4,1–5,5 t/r w latach 2012–2018, ze stałą tendencją, gdyż średnia wartość dla lat 2016–2018 wyniosła 4,8 t/r. Większość THg z rzek dostaje się do wód MB z takich krajów, jak Rosja, Łotwa, Szwecja i Polska. Wydaje się, że w najbliższych latach wartości te nie ulegną znaczącym zmianom<sup>38</sup>.

Symulacje modelowe wskazują, że w latach 1990–2021 ilość rtęci wprowadzanej do MB z atmosfery zmniejszyła się o 41%. Spadek depozycji rtęci do MB w tych latach był niemal równomierny przez cały okres i wynosił ok. 50 kg/r, czyli z 4,25 t do ok. 2,5 t rocznie. Jest to efektem globalnego spadku antropogenicznej emisji w krajach stowarzyszonych w HELCOM (9 państw bałtyckich) o 61% w latach 1990–2021 (z 82 do 31 t/r)<sup>39</sup>.

Nie wiadomo dokładnie, jak depozyt zatopionej amunicji wpływa na stężenie Hg w środowisku MB. Jędruch i współpr.<sup>27</sup> twierdzą, że zalegająca na dnie amunicja zawiera ponad 300 t THg. Gdyby została ona uwolniona, stężenie w wodzie wzrosłoby średnio o 13,8 ng/L (kalkulacja własna), przy założeniu równomiernego rozmieszczenia w całym basenie MB. Teoretycznie mogłoby to podwoić stężenie THg w wodach MB, gdyby procesy uwalniania Hg zachodziły jednocześnie.

Morze Bałtyckie jest jednym z najszybciej ocieplających się mórz na świecie w ostatnich dziesięcioleciach<sup>40</sup>. Dzięki zaawansowanym obliczeniom z wykorzystaniem modeli klimatycznych przewiduje się wzrost średniej rocznej temperatury powietrza o 1,5–4,3°C oraz wzrost temperatury wody o 1,1–3,2°C w obszarze zlewiska MB pod koniec obecnego stulecia<sup>41</sup>. Nie wiadomo, jak te procesy wpłyną na zachowanie się rtęci w MB, ale należy założyć, że nastąpi zwiększenie jej koncentracji, ze względu na szybsze procesy korozyjne zatopionej amunicji, wraków statków i „rtęciowych” pojemników. Są możliwości techniczne ich usunięcia lub zneutralizowania, ale w praktyce istnieje

poważna bariera w postaci ogromnych środków finansowych potrzebnych na ten cel<sup>23</sup>.

## Rtęć w wodach Bałtyku

Rozkład stężenia rtęci w wodach MB (a także innych morzach i oceanach) jest nierównomierny, co wynika z czynników pochodzenia naturalnego i antropogenicznego. Rtęć podlega w tym środowisku złożonym procesom biochemicznym, w tym metylacji, biomagnifikacji i bioakumulacji<sup>42, 43</sup>. Gworek i współpr.<sup>11</sup> podają szeroki zakres zawartości THg dla wód Bałtyku, wynoszący 0,6–630 ng/L (największe wartości były w Zatoce Gdańskiej, a najmniejsze w Zatoce Ryskiej). Rozkład przestrzenny rtęci w wodach MB jest nierównomierny, największe stężenia występują w warstwie dennej.

Według innych źródeł<sup>28</sup> całkowite stężenie Hg w wodach powierzchniowych otwartej części południowego MB wahało się w granicach 0,1–0,8 ng/L i wynosiło średnio ok. 0,3 ng/L. Najbardziej znaczący spadek stężenia Hg w wodach powierzchniowych nastąpił w latach 1993–2001, kiedy to zmniejszyło się ono 7-krotnie, z ponad 17 do 1 ng/L. Jest to konsekwencja zmniejszonej emisji Hg w krajach bałtyckich<sup>39</sup>. Osady denne MB (do 5 cm głębokości) były szeroko badane przez Falandysz i współpr.<sup>44</sup>. Największe stężenia THg, sięgające 341 ng/g, zmierzono w uprzemysłowanej Zatoce Kilońskiej, która była składowiskiem amunicji w czasie i po II WŚ. Wysokie poziomy Hg, wynoszące 228–255 ng/g, odnotowano również w osadach dennych Basenu Arkońskiego, co było wynikiem skumulowanego działania kilku czynników, takich jak osadzanie się bogatego w Hg mułu rzeczno-jezioro- i wód powierzchniowych, sprzyjające warunki hydrodynamiczne i wcześniejsze działania wojenne. Stężenia Hg w zakresie 60–264 ng/g stwierdzono w Zatoce Gdańskiej, regionie o silnej antropopresji i zdominowanym przez osady miękkie. Autorzy przekonują, że pomimo znacznego zmniejszenia dopływu Hg do MB w ostatnich dziesięcioleciach, osady powierzchniowe mogą być ważnym wtórnym źródłem Hg w ekosystemie morskim. Jest to szczególnie niebezpieczne dla zachodniej części basenu MB<sup>45</sup>. Dla porównania na obszarach bezpośrednio dotkniętych wydobywaniem rtęci, takich jak Zatoka Triestejska (Morze Adriatyckie), średnie stężenie tego pierwiastka wynosiło aż 5240 ng/g<sup>46</sup>. Również osady z Zatoki Minamata (Japonia), 30 lat po zabiegach rekultywacyjnych, zawierają średnio 2960 ng/g THg, a więc prawie dwa razy mniej niż w Zatoce Triesteńskiej, do której do 1999 r. odprowadzano wodę z pobliskiej kopalni rtęci Idrija<sup>47, 48</sup>.

Leipe i współpr.<sup>49</sup> oszacowali sedymentację rtęci w MB w naturalnym tle i wpływie antropogenicznym. W pierwszym z nich wskaźnik akumulacji Hg wahał się w zakresie 2,1–5,4  $\mu\text{g}/\text{m}^2/\text{r}$ , a wskaźnik antropogeniczny Hg mieścił się w przedziale 30–300  $\mu\text{g}/\text{m}^2/\text{r}$ . Maksymalne stężenia występują na składowiskach odpadów przemysłowych i wojennych, co potwierdza procesy uwalniania związków chemicznych ze składowanej amunicji.

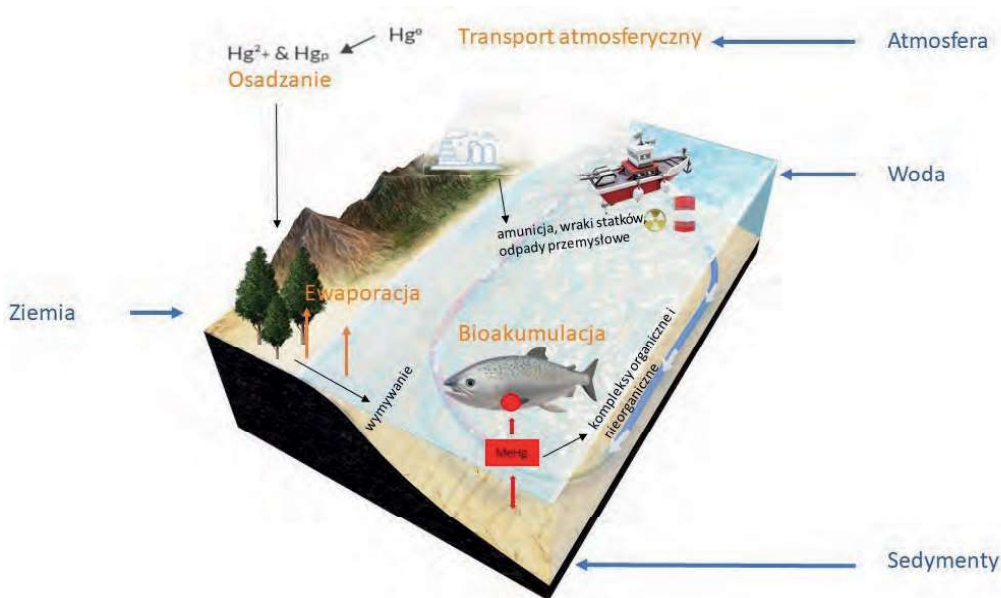


Fig. 2. Biochemical mercury cycle in the Baltic Sea  
Rys. 2. Biochemiczny cykl rtęci w Morzu Bałtyckim

Schemat obiegu rtęci w MB wraz z potencjalnymi źródłami jej emisji i depozycji przedstawiono na rys. 2.

### Rtęć w rybach bałtyckich

Dobrym bioindykatorem zanieczyszczenia wód rtęcią jest jej stężenie w rybach morskich, chociaż jej akumulacja w organizmach morskich nie jest proporcjonalna do zawartości w wodzie, ponieważ zależy od gatunku i wieku ryb oraz zasobności w składniki odżywcze w środowisku<sup>50–52</sup>. MB nie jest zbyt bogate w ryby i owoce morza. Szacuje się, że ich biomasa nie przekracza 3 mln t. Roczne połowy wynoszą nieco ponad 600 tys. t, głównie są to dorsze, śledzie i szproty. W MB operuje prawie 6000 statków rybackich. Estonia (1587) i Finlandia (1469) mają największą flotę rybacką pod względem liczby statków (łodzi i kutrów), podczas gdy floty Litwy (84) i Rosji (53) są najmniejsze<sup>53</sup>.

W krajach bałtyckich od wielu lat prowadzone są badania monitorujące akumulację rtęci u ryb. Badania Polak-Juszczak<sup>54</sup> przeprowadzono dla czterech gatunków ryb, które najczęściej występują w MB, czyli dorsza, węgorza, śledzia i szproty. Ryby zostały złowione w strefie przybrzeżnej Polski (WSE) jesienią i zimą 2016 r. po okresie tarła. Największą zawartość THg stwierdzono w mięśniach węgorza (średnio 232,0 µg/kg św.m.), następnie w dorszu (64,1), śledziu (18,6), a najmniejszą w szprocie (10,0).

Więcej aktualnych danych podają Dietrich i współpracownicy<sup>55</sup>, wskazując, że stężenie THg w rybach bałtyckich nie różni się od stężenia w tych żyjących w innych zbiornikach wodnych. Wspomniani autorzy podają wartości 0,018–0,118 dla ryb w MB (Polska), w Morzu Adriatyckim 0,001–0,52 (Chorwacja), w Morzu Czarnym 0,025–0,084 (Turcja), zaś w Oceanie Atlantyckim (Azory) 0,19–1,44 mg/kg s.m. Stężenie rtęci należy oceniać osobno w różnych klasach

długości tego samego gatunku, ponieważ akumulacja rtęci wzrasta liniowo u większych i starszych ryb. Spożycie ryb małych rozmiarów nie stanowi ryzyka dla zdrowia<sup>56</sup>. Podobne zależności w gatunkach jadalnych z obszaru Morza Tyrreńskiego stwierdzili inni autorzy<sup>47</sup>.

W celu oceny ryzyka spożycia ryb morskich międzynarodowy zespół specjalistów przeprowadził w ramach projektu Bonus BaltHealth obszerne, porównawcze badania zawartości rtęci u 11 gatunków: dorsza atlantyckiego, śledzia atlantyckiego, leszcza, okonia, płoci, sielawy, flądry europejskiej, okonia europejskiego i szczupaka<sup>57</sup>. Autorzy użyli klasyfikacji

opracowanej przez Dillona i współpracowników<sup>58</sup>, polegającej na określeniu kategorii ryzyka (RC) przy określonym stężeniu rtęci w mięśniach ryb (µg/g): brak ryzyka < 0,10 (NRC), małe ryzyko 0,10–0,30 (LRC), średnie ryzyko 0,30–0,50 (MRC), duże ryzyko 0,50–2,0 (HRC) i poważne ryzyko ≥ 2,00 (SRC) (ostateczne wyeliminowanie ze spożycia). W żadnym z badanych gatunków ryb bałtyckich, z wyjątkiem okonia europejskiego, nie znaleziono osobników w dwóch najwyższych klasach RC, czyli HRC i SRC. W Morzu Północnym i w północnej części Atlantyku 40% zasobów ryb miało stężenia HRC. Wyższe poziomy rtęci u ryb w tych dwóch ostatnich morzach, w porównaniu z MB, wskazują na korzystniejsze warunki dla powstawania tam MeHg, czego skutkiem były większe wartości, osiągające poziom HRC. Warto dodać, że rtęć występuje w organizmach wodnych nawet w stężeniach od 10000 do nawet 100000 razy większych niż w otaczającej wodzie<sup>59</sup>. Przykładem jest największy „dramat rtęciowy” na świecie, który miał miejsce w drugiej połowie ubiegłego wieku w Japonii (zatoka morska Minamata). W wyniku odprowadzania do morza ścieków ze związkami rtęci (łącznie 27 t) przez zakład produkujący tworzywa sztuczne (Chisso Corp.) i pomimo małego stężenia tych związków w wodzie, gromadziły się one w rybach i skorupiakach. Pierwsze przypadki choroby (choroba Minamata) pojawiły się w 1956 r., a do 2001 r. całkowita liczba zachorowań (oficjalnie zdiagnozowanych) wyniosła 2955 (z czego 1784 osoby zmarły)<sup>60, 61</sup>.

### Standardy i bezpieczne spożycie ryb

Standardy, czyli maksymalne poziomy (ML) dla rtęci w rybach i owocach morza, wiele razy były zmieniane. Obecnie obowiązuje rozporządzenie Komisji UE w sprawie poziomu rtęci w rybach<sup>62</sup>. Wartości ML zostały zmniejsz-

szzone dla różnych gatunków ryb, głowonogów i ślimaków morskich do 0,50 lub 0,30 mg/kg. Dla ryb drapieżnych, takich jak rekin, miecznik, szczupak, węgorz lub tuńczyk, wartość ML została utrzymana na poziomie 1,0 mg/kg.

Ze względu na zagrożenia dla zdrowia ludzkiego związane z narażeniem na Hg Wspólny Komitet Ekspertów FAO/WHO ds. Dodatków do Żywności (JECFA)<sup>63</sup> ustanowił w 2011 r. wartość tzw. tolerowanego tygodniowego spożycia (PTWI) MeHg na poziomie 1,6 µg/kg m.c./tydz. W 2012 r. agenda UE, Europejski Urząd ds. Bezpieczeństwa Żywności (EFSA)<sup>64</sup> postanowił obniżyć PTWI dla MeHg do 1,3 µg/kg m.c./tydz., ale tylko dla najbardziej wrażliwych grup konsumentów (kobiety w ciąży, karmiące piersią i dzieci). Ogólne spożycie nieorganicznej Hg nie powinno przekraczać 4 µg/kg m.c./tydzień. Na tej podstawie polscy badacze określili dopuszczalne tygodniowe spożycie popularnych ryb bałtyckich, uwzględniając kryterium zawartości rtęci. Dla osoby o wadze 70 kg będą to wartości: szprot 14 kg, śledź 9,3 kg i dorsz 1,4 kg. Wyjątek stanowią grupy wysokiego ryzyka: kobiety w ciąży, matki karmiące i dzieci. Spożycie dorsza powinno być dla nich ograniczone, ale pozostałe gatunki (szprot, śledź) są całkowicie bezpieczne<sup>59</sup>.

W USA długo trwały naukowe dyskusje nad ustaleniem bezpiecznego pobrania rtęci z diety. Amerykańska Agencja ds. Leków i Żywności (US FDA)<sup>65</sup> ustaliła dawkę referencyjną (RfD) dla przewlekłego narażenia doustnego na metylortęć na poziomie 0,1 µg/kg m.c./dzień, ale tylko dla grup wrażliwych: kobiet w ciąży, matek karmiących i dzieci 1–11 lat. Dla kobiety o masie ciała 75 kg oznacza to spożycie ryb i owoców morza w takiej ilości, aby nie przekroczyć dawki 52,5 µg MeHg w ciągu tygodnia. Dobrym wskaźnikiem jest poziom rtęci we krwi człowieka (RfL). W pełnej krwi nie powinno być więcej THg niż 10 ng/mL. Jeśli narażenie jest spowodowane alkiłowymi pochodnymi rtęci (rtęć metaloorganiczna), stężenie może przekraczać 50 ng/mL, natomiast przy ekspozycji spowodowanej Hg<sup>2+</sup> może przekraczać w pełnej krwi 200 ng/mL<sup>66</sup>. Dla porównania u kobiet ciężarnych w rejonie zachodniej Amazonii (Brazylia) stwierdzono następujące poziomy rtęci we krwi: THg 25,3–45,5 ng/mL, MeHg 2,3–10,8 ng/mL, w zależności od rejonu badań, gdzie spożywa się dużo ryb „amazońskich” i wydobywa złoto metodą „rtęciową” (ASGM)<sup>67</sup>.

## Programy działania

Problematykę bałtycką podejmuje wiele uniwersytetów, instytutów naukowych, organizacji rządowych i pozarządowych oraz agencji Unii Europejskiej. Niektóre z nich mają przedstawicieli lub współpracują z organizacjami globalnymi, takimi jak ONZ, FAO/WHO, NATO, zakładają fundacje, finansują projekty naukowe, opracowują lub ratyfikują międzynarodowe konwencje. Poniżej przedstawiono krótki przegląd niektórych z nich.

## Komisja Helsińska (HELCOM)

Komisja Ochrony Środowiska Morskiego Morza Bałtyckiego, znana również jako Komisja Helsińska lub HELCOM, jest to międzynarodowa organizacja proklamowana przez tzw. Konwencję Helsińską w 1974 r. jako jej organ wykonawczy. Sygnatariuszami Konwencji Helsińskiej, a tym samym członkami Komisji Helsińskiej są: Dania, Estonia, Finlandia, Niemcy, Łotwa, Litwa, Polska, Rosja, Szwecja i Unia Europejska. HELCOM działa od 1992 r., a główna siedziba znajduje się w Helsinkach. Jej zadaniem jest monitorowanie i ochrona środowiska naturalnego MB<sup>68</sup>.

W ramach HELCOM działa wiele grup: 5 grup stałych, 3 grupy robocze tymczasowe i 26 grup ekspertów. Praca grup roboczych i ekspertów HELCOM w ostatnich latach skupiła się na aktualizacji Planu Działań Morza Bałtyckiego (BSAP) z 2007 r., którego celem było przywrócenie dobrego stanu środowiska MB do 2021 r. Priorytetowe obszary założone w planie z 2007 r. to: eutrofizacja, substancje niebezpieczne (w tym rtęć), różnorodność biologiczna i ochrona przyrody, działalność morska oraz działania horyzontalne. Jednak ogólny cel BSAP z 2007 r. nie został osiągnięty (z różnych względów), a program jest obecnie aktualizowany. Jego realizacja ma potrwać do 2030 r.<sup>69</sup>.

Komisja Helsińska powołała w 1993 r. tymczasową Grupę Roboczą ds. Zatopionych Materiałów Chemicznych (HELCOM CHEMU). Głównym zadaniem tej grupy było przygotowanie raportu na temat miejsc składowania broni chemicznej i jej wpływu na środowisko morskie. Zadaniem HELCOM MUNI było zaktualizowanie wiedzy na temat zatopionej broni chemicznej i opracowanie zaleceń na podstawie wyników dwóch projektów badawczych finansowanych przez NATO i UE: MERCW (2005–2008) i CHEMSEA (2011–2014). Także grupa ekspertów Komisji Helsińskiej ds. Zagrożeń Środowiskowych Zatopionych Obiektów Niebezpiecznych (HELCOM SUBMERGED), powołana w 2013 r., opracowała szczegółowe mapy miejsc składowania broni chemicznej w Głębi Gotlandzkiej i Głębi Gdańskiej wraz z analizą zagrożeń dla środowiska morskiego i ludzi. Obecnie grupa HELCOM SUBMERGED przygotowuje raport na temat ryzyka dla środowiska morskiego MB w związku z budową i eksploatacją gazociągów oraz planowaną budową farm wiatrowych<sup>23, 28</sup>.

## Międzynarodowa Rada do Badań Morza (ICES)

ICES to regionalne ciało doradcze ds. rybołówstwa i najstarsza międzyrządowa organizacja naukowa *non-profit* na świecie, która promuje zrównoważoną gospodarkę morską i racjonalne zarządzanie infrastrukturą. ICES założona w 1902 r. w Kopenhadze, obecnie łączy 20 krajów członkowskich (17 krajów europejskich oraz Rosję, Kanadę i USA). Zarządza wieloma zestawami danych dotyczących środowiska morskiego (Centrum



Danych ICES), opracowuje coroczne obszerne raporty, wydaje miesięczne czasopismo (*ICES Journal of Marine Science*), organizuje corocznie konferencję naukową, sympozja tematyczne, seminaria internetowe i kursy szkoleniowe.

Działalność ICES opiera się na pracy kilku grup ekspertów i zarządczych. Problem bałtycki jest rozpatrywany przez Grupę Roboczą ds. Zintegrowanej Oceny Morza Bałtyckiego (WGIAB), która działa jako wspólne ciało ICES/HELCOM<sup>70</sup>). ICES współpracuje również z Konferencją Bałtyckich Oceanografów (CBO) oraz Organizacją Bałtyckich Biologów Morskich (BMB).

Z innych organizacji działających na rzecz poprawy środowiska morskiego i racjonalizacji rybołówstwa należy wymienić: Forum Rybołówstwa Morza Bałtyckiego (BALTFISH) z siedzibą w Brukseli, które powstało w 2013 r., Komitet Doradczy ds. Morza Bałtyckiego (BSAC) powstały w 2006 r. w Kopenhadze, Bałtycką Organizację Portów (BPO) założoną w 1991 r., której sekretariat mieści się w Gdyni, oraz Sekretariat Rybołówstwa (FishSec), utworzony w 2003 r., z siedzibą w Sztokholmie.

### Projekty naukowo-badawcze

W ciągu ostatnich dwóch dekad zrealizowano kilkadziesiąt projektów badawczych i aplikacyjnych, których celem było szeroko pojęte „ekologizowanie” basenu Bałtyckiego, czyli dokładna identyfikacja źródeł zanieczyszczeń (w tym rtęci), ich wpływu na środowisko abiotyczne i biotyczne oraz praktyczne metody rozwiązań i strategię naprawcze. Większość z nich została przeprowadzona w ramach międzynarodowych konsorcjów, a finansowane (lub współfinansowane) były przez Unię Europejską, rząd Norwegii lub rządy innych krajów. Realizacja projektów odbywała się w instytutach naukowych i uniwersytetach 10 krajów w regionie basenu MB, którymi były: Baltic Nest Institute (BNI), Uniwersytet w Sztokholmie (SE), Instytut Badań Wybrzeża i Planowania, Uniwersytet w Kłajpedzie (LT), Duński Instytut Badań Rybackich (DIFRES) w Kopenhadze (DK), Estoński Instytut Morski, Uniwersytet w Tartu (EE), Fiński Instytut Środowiska w Helsinkach (FI), Instytut Ekologii Wodnej, Uniwersytet Łotewski (LV), Instytut Oceanologii Polskiej Akademii Nauk (IO PAN) w Sopocie (PL), KTH Królewski Instytut Technologiczny w Sztokholmie (SE), Instytut Badań Morza Bałtyckiego im. Leibniza (IOW) w Rostocku (DE), Instytut Morski w Gdańsku (PL), Morski Instytut Rybacki – Państwowy Instytut Badawczy w Gdyni (PL), Norweski Instytut Badań Wody (NIVA) w Oslo (NO), Norweski Instytut Badawczy Technologii Morskich (MARINTEK) w Trondheim (NO), Międzynarodowe Muzeum Morskie w Hamburgu (DE), Instytut Morski Morza Bałtyckiego w Sankt Petersburgu (RU), Centrum Morza Bałtyckiego Uniwersytetu Sztokholmskiego (SE), i Szwedzki Instytut Środowiska Morskiego (SIME) w Göteborgu (SE). Wyniki ich badań prezentowane są w licznych raportach, materiałach kon-

ferencyjnych, publikacjach naukowych, a także patentach i wdrożeniach.

### Strategia UE w sprawie rtęci

W 2010 r. Komisja Europejska opublikowała ważny dokument pt. „Wspólnotowa strategia dotycząca rtęci”, którego celem jest ograniczenie, a w miarę możliwości całkowite wyeliminowanie globalnego antropogenicznego uwalniania rtęci do atmosfery, wody i gleby w Europejskim Obszarze Gospodarczym (EOG). Do przygotowania tego dokumentu przyczyniły się wcześniejsze instrumenty zawarte w Konwencji bazylejskiej z 1989 r. i Konwencji rotterdamskiej z 1998 r. Dokument (*Mercury Strategy*) zawiera 20 rozdziałów (*Action*) i był podstawą do przyjęcia szczegółowych regulacji prawnych WE i UE. Powstało m.in. rozporządzenie WE<sup>71</sup>), które zakazuje od 10 października 2017 r. produkcji, wprowadzania do obrotu i stosowania pięciu związków fenylortęci, o których wiadomo, że są stosowane, głównie jako katalizatory, w produkcji poliuretanu. Od 1 stycznia 2018 r. zakazane miało być również stosowanie innych katalizatorów zawierających rtęć w produkcji poliuretanu. Produkcja alkoholanów wykorzystujących rtęć jako elektrodę powinna zostać jak najszybciej wycofana i zastąpiona innymi „beztęciowymi” technologiami. Należy określić warunki opłacalnej produkcji nadtlenu lub epoksydu (etanolanu) sodu i potasu bez używania rtęci. Środki mające na celu ograniczenie stosowania rtęci powinny zostać przyjęte najpóźniej do 1 stycznia 2028 r.

Z wyżej wymienionym aktem prawnym zgodne jest rozporządzenie UE<sup>72</sup>), w którym ustanowiono środki i warunki dotyczące stosowania i składowania rtęci, związków rtęci i mieszanin rtęci, a także produkcji, stosowania i handlu produktami z dodatkiem rtęci oraz gospodarowania odpadami rtęciowymi w celu zapewnienia wysokiego poziomu ochrony zdrowia ludzkiego i środowiska przed antropogenicznymi emisjami i uwolnieniami rtęci i związków rtęci na terytorium EOG.

Warto wspomnieć o projekcie unijnym pt. „Strategia Unii Europejskiej dla regionu Morza Bałtyckiego” (*EUSBSR, The EU Strategy for The Baltic Sea Region*), przyjętym przez Komisję Europejską i Radę Europejską w 2009 r. Jego sygnatariuszami są kraje bałtyckie (Niemcy, Dania, Szwecja, Finlandia, Estonia, Łotwa, Litwa i Polska). EUSBSR jest pierwszą z czterech strategii makroregionalnych w Europie, została podzielona na trzy główne cele: ratowanie morza, łączenie regionu i zwiększanie dobrobytu mieszkańców. EUSBSR wyznaczyła dziedziny i obszary polityki dotyczące biogospodarki, kultury, edukacji, energii, zagrożenia, zdrowia, innowacji, żywności, bezpieczeństwa, statków, planowania przestrzennego, turystyki i transportu. Przegląd zrealizowanych celów, wyznaczanie nowych zadań i obszarów działania odbywa się corocznie w ramach spotkań przedstawicieli 8 państw. Tegoroczne Forum EUSBSR odbędzie się w dn. 29–31 października

w Visby (Gotlandia) z udziałem ponad 600 osób pod hasłem „Zrównoważony rozwój, odporność i bezpieczeństwo w regionie Morza Bałtyckiego”.

Należy też wspomnieć o programie Interreg Region Morza Bałtyckiego, który funkcjonuje od 1997 r. i jest współfinansowany ze środków UE. Instytucją zarządzającą jest Bank Inwestycyjny Szleszwik-Holsztyn z siedzibą w Kilonii w Niemczech, a do programu należą bałtyckie państwa członkowskie UE oraz część Norwegii (razem 9 państw). Do 2027 r. realizowane będą 4 priorytety tematyczne: innowacyjne społeczeństwa, społeczeństwa inteligentne pod względem zużycia wody, społeczeństwa neutralne dla klimatu i zarządzanie współpracą. Dostępne środki to 250 mln euro.

Realizacja celów EUSBSR oraz projektów Interreg z pewnością przyczyni się do poprawy stanu wód MB, w tym do zmniejszenia zanieczyszczenia chemicznego.

### Konwencja z Minamaty

Jednym z najważniejszych aktów prawnych jest tzw. Konwencja z Minamaty w sprawie rtęci (MCM, *Minamata Convention on Mercury*), utworzona pod auspicjami ONZ, sporządzona w Kumamoto (Japonia) 10 października 2013 r. Wybór tego miejsca nie był przypadkowy. Jak wspomniano wcześniej, w latach 50. XX w. w wyniku zrzutu 27 t rtęci do Zatoki Minamata doszło do katastrofy ekologicznej, powodującej śmierć blisko 1800 osób, mieszkańców tego obszaru. MCM składa się z 35 artykułów, 5 załączników i ważnego wstępu jako preambuły, w którym uznano, że rtęć jest „substancją chemiczną o globalnym znaczeniu ze względu na jej transport atmosferyczny na dalekie odległości, jej trwałość w środowisku po jej antropogenicznym wprowadzeniu, jej zdolność do bioakumulacji w ekosystemach oraz jej znaczący negatywny wpływ na zdrowie ludzi i środowisko”<sup>73</sup>.

Konwencja ustanawia międzynarodowy zbiór zasad współpracy i środków mających na celu ograniczenie stosowania rtęci i jej związków. Ponadto ma ona na celu kontrolowanie i ograniczanie antropogenicznych emisji rtęci i związków rtęci do atmosfery, wody i gleby, czyli obejmuje cały cykl życia rtęci<sup>73</sup>.

Konwencja została ratyfikowana przez 128 państw i obowiązuje od 16 sierpnia 2017 r. Instytucje unijne również ją przyjęły, obowiązuje we wszystkich krajach UE położonych nad MB, ratyfikowała ją również Rosja. Powinno to ostatecznie doprowadzić do zmniejszenia stężenia tego niebezpiecznego pierwiastka we wszystkich elementach środowiska, żywności i otoczeniu człowieka, także w basenie MB, ale minęło zbyt mało czasu, aby obiektywnie ocenić skutki ratyfikacji MCM<sup>74</sup>.

### Podsumowanie

Na podstawie analizy literatury fachowej i innych materiałów tematycznych należy stwierdzić, że stężenie rtęci

(i jej związków) w basenie MB (woda, osady, powietrze nad powierzchnią) jest podwyższone, co jest wynikiem jej ciągłego napływu z wybrzeży i zlewni. Szacuje się, że ładunek rtęci z bezpośrednich źródeł punktowych, transport z wodami rzecznyymi, depozycja z wody i atmosfery wynosi ok. 5 t/r. Broń konwencjonalna i chemiczna, pojemniki z odpadami rtęciowymi, wraki statków są potencjalnymi źródłami uwolnienia rtęci. Z samej tylko zatopionej broni można uwolnić ponad 300 t rtęci. Ich usunięcie lub neutralizacja są technicznie skomplikowane, a szacunkowe koszty finansowe bardzo wysokie. Stężenie rtęci w rybach bałtyckich jest różne, u ryb drapieżnych (dorsz, węgorz) może być duże, a u ryb roślinożernych (szprot, śledź) na ogół małe. Na przykład duże i częste spożycie dorsza może stwarzać pewne ryzyko dla kobiet w ciąży, matek karmiących i dzieci, podczas gdy inne gatunki (szprot, śledź) są dla tych grup osób całkowicie bezpieczne. Wydaje się, że tendencje w zakresie kumulacji rtęci w wodach MB są jednoznaczne, stężenia powinny się zmniejszać, chociażby ze względu na zakazy i ograniczenia dotyczące stosowania rtęci oraz inne działania związane ze strategią w zakresie rtęci wdrażaną przez UE oraz różne organizacje i instytucje działające na rzecz poprawy środowiska i bezpieczeństwa w basenie MB (HELCOM, ICES, MCM, UNEP).

Otrzymano: 07-06-2024

### LITERATURA

- [1] R.A. Bernhoft, *J. Environ. Public Health* 2012, **2012**, 460508.
- [2] J. Wang, J. Feng, X.C.W. Anderson, Y. Xing, L. Shang, *J. Hazard.* 2012, **221**, 1.
- [3] World Health Organization, *Mercury and human health. Educational course*, Regional Office for Europe, Copenhagen, Denmark, 2021.
- [4] IARC, Int. Agency for Research on Cancer, *Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans*, IARC, Lyon, France, 1993.
- [5] J. Nriagu, C. Becker, *Sci. Total Environ.* 2003, **304**, nr 1–3, 3.
- [6] L.T. Budnik, L. Casteleyn, *Sci. Total Environ.* 2019, **654**, nr 1, 720.
- [7] A. Gallorini, J.-L. Loizeau *J. Limnol.* 2021, **80**, nr 2, 233255827.
- [8] Q. Pang, J. Gu, H. Wang, Y. Zhang, *Science* 2022, **25**, nr 9, 104881.
- [9] D.G. Streets, H.M. Horowitz, Z. Lu, L. Levin, C. Thackray, E.M. Sunderland, *Environ. Res. Lett.* 2019, **14**, nr 8, 084004.
- [10] UNEP, UN Environment Programme, *Global Mercury Assessment*, UNEP, Geneva 2019.
- [11] B. Gworek, O. Bemowska-Katubun, M. Kijeńska, J. Wrzosek-Jakubowska, *Water Air Soil Poll.* 2016, **227**, 371.
- [12] J. Bętdowski, M. Szubska, G. Siedlewicz, E. Korejwo, M. Grabowski, M. Bętdowska, U. Kwasigroch, J. Fabisiak, E. Łońska, M. Szala, J. Pempkowiak, *Sci. Total Environ.* 2019, **67**, 363.
- [13] R. Miętkiewicz, *Mar. Environ. Res.* 2020, **161**, 105057.
- [14] C. Douglas, J. Dahma, *Ghost ships of the Baltic Sea*, Bokförladen Max Strom, Stockholm, Sweden, 2020.
- [15] A. Rosentau, O. Bennike, S. Uscinowicz, G. Miotk-Szpiganowicz, [w:] *Submerged landscapes of the European Continental Shelf. Quaternary paleoenvironments* (red. N.C. Flemming, J. Harff, D. Moura, A. Burgess, G.N. Bailey), John Wiley&Sons, 2017.
- [16] U. Gräwe, K. Klingbeil, J. Kelln, S. Dangendorf, *J. Clim.* 2019, **32**, 3089.
- [17] M. Reckermann, A. Omstedt, T. Soomere i in., *Earth Syst. Dynam.* 2022, **13**, 1, <https://doi.org/10.5194/esd-13-1-2022>.
- [18] U. Kammann, M.O. Aust, M. Siegmund, N. Schmidt, K. Straumer, T. Lang, *Environ. Monit. Assess.* 2021, **193**, 788.
- [19] G. Siedlewicz, E. Korejwo, M. Szubska, M. Grabowski, U. Kwasigroch, J. Bętdowski, *Mar. Environ. Res.* 2020, **162**, 105.
- [20] F. Kurzer, *J. Chem. Educ.* 2000, **77**, nr 7, 851.
- [21] H. Sanders, P. Fauser, M.P. Thomson, *Environ. Sci. Technol.* 2010, **44**, 4389.
- [22] F. Worek, J. Jenner, H. Thiermann (red.), *Chemical warfare toxicology*, The Royal Society of Chemistry, London 2016.
- [23] D. Szacawa, *ICE Commentaries* 2021, **343**, nr 40, 1.
- [24] J. Fabisiak, W. Jurczak, G. Szubrycht, W. Zaremba, *J. KONBIN* 2018, **45**, 27.

- [25] K. J. Gosnell, A. J. Beck, P. Müller, A. Keßler, E. P. Achterberg, *Mar. Pollut.* 2022, **185 A**, 114311.
- [26] J. Bełdowski, Z. Klusek, M. Szubska i in., *Top. Stud. Oceanogr.* 2016, **128**, 85.
- [27] A. Jędruch, L. Falkowska, D. Saniewska i in., *Mar. Pollut.* 2023, **186**, 114426.
- [28] HELCOM, *Thematic assessment on Hazardous Submerged Objects in the Baltic Sea Warfare Materials in Baltic Sea*, Report, HELCOM, Helsinki 2024.
- [29] A. Grządziel, *Remote Sens.* 2022, **14**, nr 20, 5195.
- [30] R. Willa, A. Szpak, *Polish Polit. Sci. Yearbook* 2023, **52**, nr 1, 187.
- [31] J. Rogowska, B. Kudłak, S. Czakowski, W. Simeonow, G. Bajger-Nowak, P. Konieczka, L. Wolska, J. Namieśnik, *Stoch. Environ. Res. Risk. Assess.* 2015, **29**, 1797.
- [32] Z. Dobrzański, B. Buszewski, S. Opaliński, R. Kołacz, J. A. Koziel, *Przem. Chem.* 2017, **96**, nr 1, 76.
- [33] HELCOM, *Report on shipping accidents in the Baltic Sea*, HELCOM, Helsinki 2020.
- [34] T. Szubrycht, *Arch. Transp.* 2020, **54**, nr 2, 125.
- [35] World Wildlife Fund, *Baltic Sea threatened by leaking mercury*, WWF Baltic Ecoregion Programme, Solna, Sweden, 2006.
- [36] V. Katona, *The Baltic Sea. Europe's Forgotten \$80 Billion Oil Play*, Oilprice.com, 2017.
- [37] N. Mashyanov, *E3S Web of Conf. Corros. Oil Gas Ind.* 2021, **225**, nr 1, 01009.
- [38] HELCOM, Helsinki Commission, *Inputs of hazardous substances to the Baltic Sea*, Report nr BSEP 178, HELCOM, Helsinki 2021.
- [39] HELCOM, Helsinki Commission, *Hazardous Substances. Baltic Sea Environment Fact Sheets (BSEFS) on hazardous substances*, HELCOM, Helsinki 2023, <https://helcom.fi/baltic-sea-trends/environment-fact-sheets/hazardous-substances/>.
- [40] C. Dutheil, H. E. M. Meier, M. Gröger, F. Börgel, *Clim. Dyn.* 2022, **22**, 1311.
- [41] H. E. M. Meier, M. Kniebusch, C. Dieterich i in., *Earth Syst. Dyn.* 2022, **13**, 457.
- [42] T. Kawai, T. Sakurai, N. Suzuki, *Environ. Modell. Softw.* 2020, **124**, 104599.
- [43] M. M. Al-Sulaiti, L. Soubra, M. A. Al-Ghouti, *Curr. Pollut. Rep.* 2022, **8**, 249.
- [44] J. Falandysz, B. Skwarzec, J. Włodarczyk, L. Boszke, B. Brudnowska, *Bromatol. Chem. Toksykol.* 1997, **30**, nr 4, 331.
- [45] U. Kwasigroch, M. Bełdowska, A. Jędruch, K. Łukawska-Matuszewska, *Environ. Sci. Pollut. Res.* 2021, **28**, 35690.
- [46] S. Covelli, J. Faganeli, M. Horvat, A. I. Brambati, *Appl. Geochem.* 2001, **16**, 541.
- [47] D. Kocman, M. Horva, J. Kotnik, *J. Environ. Monitor.* 2004, **8**, nr 6, 696.
- [48] A. Matsuyama, S. Yano, A. Hisano, M. Kindaichi, I. Sonoda, A. Tada, H. Akagi, *Mar. Pollut. Bull.* 2016, **109**, nr 1, 378.
- [49] T. Leipe, M. Moros, A. Kotilainen, A. H. Vallius, K. Kabel, M. Endler, *Geochemistry* 2013, **73**, 249.
- [50] C. Barghigiani, T. Ristori, F. Biagi, S. De Ranieri, *Water Air Soil Poll.* 2000, **124**, 169.
- [51] B. Verep, E. S. Bešli, I. Altinok, C. Mutlu, *Pak. J. Biol. Sci.* 2007, **10**, 1098.
- [52] J. J. Willacker, C. A. Eagles-Smith, V. S. Blazer, *Ecotoxicology* 2020, **29**, 459.
- [53] N. Carvalho, M. Keatinge, J. Guillen, *Annual Economic Report on the EU Fishing Fleet (STECF 19-06)*, Publications Office of the EU, Luxembourg 2019.
- [54] L. Polak-Juszczak, *Environ. Sci. Pollut. Res.* 2018, **25**, 34181.
- [55] G. J. Dietrich, M. Florek-Luszczki, M. Wojciechowska, T. Wójcik, J. Bąk-Badowska, B. Wójtowicz, E. Zięba, B. Gworek, J. Chmielewski, *J. Elem.* 2022, **27**, nr 4, 879.
- [56] L. Polak-Juszczak, *Toxicol. Ind. Health* 2017, **33**, 503.
- [57] R. Dietz, J. Fort, Ch. Sonne i in., *Environ. Int.* 2021, **146**, 106178.
- [58] T. Dillon, N. Beckvar, J. Kerns, *Environ. Toxicol. Chem.* 2010, **29**, 2559.
- [59] MIR, Morski Instytut Rybacki – PIB, *Raport w sprawie amunicji chemicznej zatopionej w Morzu Bałtyckim i ryb*, Gdynia 2018.
- [60] M. Harada, *Crit. Rev. Toxicol.* 1995, **25**, nr 1, 1.
- [61] M. S. Bank, *Sci. Total Environ.* 2020, **20**, nr 722, 137832.
- [62] Rozporządzenie Komisji (UE) 2023/915 z dnia 25 kwietnia 2023 r. w sprawie najwyższych dopuszczalnych poziomów niektórych zanieczyszczeń w żywności oraz uchylające rozporządzenie (WE) nr 1881/2006, *Dz.U. UE L* 119/103.
- [63] JECFA, *Safety evaluation of certain contaminants in food*, Series 63, Monografia, nr 8, Joint FAO/WHO Expert Committee on Food Additives, Geneva, Rome, 2011.
- [64] EFSA, European Food Safety Authority, *Statement on the benefits of fish/seafood consumption compared to the risks of methylmercury in fish/seafood*, EFSA, Parma 2015.
- [65] US FDA, US Food and Drugs Administration, *Technical Information on Development of FDA/EPA Advice about Eating Fish for Those Who Might Become or Are Pregnant or Breastfeeding and Children Ages 1–11 Years*, FDA Silver Spring, USA, 2024.
- [66] Mayo Foundation for Medical Education and Research, Mayo Clinic Laboratories, katalog *Mercury Blood*, Rochester, USA, 2024, <https://www.mayocliniclabs.com/test-catalog/overview/8618>.
- [67] V. A. Mendes, D. P. de Carvalho, R. de Almeida i in., *J. Trace Elem. Med. Biol.* 2021, **67**, 126773.
- [68] HELCOM, Helsinki Commission, *Convention on the Protection of the Marine Environment of the Baltic Sea Area*, HELCOM, Helsinki 1974.
- [69] HELCOM, Helsinki Commission, *Baltic Sea Action Plan*, HELCOM, Helsinki 2021.
- [70] J. L. Fuller, H. V. Strehlow, J. O. Schmidt, Ö. Bodin, D. J. Dankel, *ICES J. Mar. Sci.* 2023, **80**, nr 2, 282.
- [71] Rozporządzenie (WE) nr 1907/2006 Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 18 grudnia 2006 r. w sprawie rejestracji, oceny, udzielania zezwoleń i stosowanych ograniczeń w zakresie chemikaliów (REACH) i utworzenia Europejskiej Agencji Chemikaliów, *Dz.U. L* 136 z 29.5.2007 r.
- [72] Rozporządzenie Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2017/852 z dnia 17 maja 2017 r. w sprawie rtęci oraz uchylające rozporządzenie (WE) nr 1102/2008, *Dz.U. UE L* 137/1.
- [73] H. Selin, S. E. Keane, S. Wang, N. E. Selin, D. Bally, *Ambio* 2018, **47**, 198.
- [74] UNEP, United Nations Environment Programme, *Minamata Convention on Mercury*, UNEP, Geneva 2023.