

Poznań, 15.08.2025

Dr hab. Artur Kowalski, prof. UAM
Zakład Analityki Chemicznej i Środowiskowej
Wydział Chemii
Uniwersytet im. Adama Mickiewicza w Poznaniu
Ul. Uniwersytetu Poznańskiego 8
61-614 Poznań

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr Ewy Korejwo
„Mercury accumulation in organisms from polar regions”
(„Akumulacja rtęci w organizmach z rejonów polarnych”)

Niniejszą recenzję sporządziłem na podstawie decyzji Rady Naukowej Instytutu Oceanologii Polskiej Akademii Nauk, która na posiedzeniu w dniu 09.06.2025 r. powołała mnie na recenzenta.

Ogólna charakterystyka rozprawy doktorskiej

Powierzona mi do recenzji rozprawa doktorska Pani mgr Ewy Korejwo została wykonana pod opieką naukową promotora prof. dr hab. Jacka Beldowskiego z Zakładu Chemii i Biochemii Morza, Instytutu Oceanologii Polskiej Akademii Nauk, oraz promotora pomocniczego dr hab. Dominiki Saniewskiej, prof. UG., z Wydziału Oceanografii i Geografii Uniwersytetu Gdańskiego.

Wszystkie publikacje wchodzące w skład rozprawy zostały starannie przygotowane, wysoko ocenione przez recenzentów w trakcie procesu wydawniczego i opublikowane w uznanych czasopismach naukowych o międzynarodowym charakterze. W związku z tym swoją uwagę skupię na analizie formalnej i merytorycznej samej rozprawy doktorskiej.

Ocena formalna

Oceniana dysertacja, w odróżnieniu od klasycznej rozprawy doktorskiej, została przygotowana w formie cyklu trzech spójnych i tematycznie powiązanych publikacji naukowych, opublikowanych w renomowanych czasopismach naukowych o wysokiej pozycji

w międzynarodowych rankingach. Praca powstała w dwóch wersjach językowych: angielskiej i polskiej – co dodatkowo zwiększa jej walor dostępności i międzynarodowej komunikatywności.

Struktura rozprawy jest przejrzysta i logicznie zaplanowana. W spisie treści ujęto streszczenia w dwóch językach, pełne wersje trzech publikacji, materiały uzupełniające oraz wymagane oświadczenia współautorów. Praca liczy 115 stron i kończy się obszernym spisem literatury, w większości obejmującym najnowsze, wysokiej jakości pozycje naukowe, dobrane trafnie i adekwatnie do poruszanej tematyki. Pewnym niedociągnięciem jest brak szczegółowego wykazu stosowanych skrótów, co mogłoby ułatwić lekturę. Na końcu rozprawy zabrakło mi również podsumowania dorobku naukowego Doktorantki oraz wskazania kierunków dalszych badań.

Dysertacja mgr Ewy Korejwo oparta jest na trzech artykułach naukowych w języku angielskim, opublikowanych w latach 2022–2025 w prestiżowych czasopismach z listy Journal Citation Reports: *Journal of Hazardous Materials*, *Science of The Total Environment* oraz *Marine Pollution Bulletin*. Z danych przedstawionych przez Autorkę wynika, że łączny współczynnik wpływu (Impact Factor) tych publikacji wynosi 26,2, a suma punktów ministerialnych (MNiSW) sięga 500. Oba te wskaźniki należy ocenić jako bardzo wysokie, świadczące o znaczącym oddziaływaniu publikacji w środowisku naukowym.

Wszystkie publikacje mają charakter wieloautorski, jednak we wszystkich mgr Ewa Korejwo występuje jako pierwszy autor, co potwierdza Jej wiodącą rolę w realizacji badań. Treść dołączonych oświadczeń współautorów jednoznacznie potwierdza, iż udział Doktorantki w opracowaniu koncepcji badań, ich realizacji, analizie wyników oraz przygotowaniu manuskryptów był decydujący.

Realizacja badań była możliwa dzięki finansowaniu w ramach projektów badawczych: OPUS nr 2019/33/B/ST10/00290, PRELUDIUM nr 2017/27/N/ST10/02230 oraz OPUS nr 2018/29/B/NZ8/02340.

Ocena merytoryczna

Przedstawiona w rozprawie problematyka dotyczy obecności rtęci – pierwiastka o wyjątkowo wysokiej toksyczności – w środowisku wodnym obszarów Antarktyki i Arktyki, ze szczególnym uwzględnieniem migracji jej frakcji oraz metylortęci w wybranych grupach organizmów: mikroplanktonie, zooplanktonie i organizmach bentosowych. Zagadnienie to nabiera szczególnego znaczenia w kontekście środowisk polarnych, w których postępujące zmiany klimatyczne, m.in. topnienie pokrywy lodowej, sprzyjają uwalnianiu z osadów

zanieczyszczeń – w tym rtęci – do ekosystemów wodnych. Rtęć, a zwłaszcza jej formy organiczne, głównie jon metylortęci, należy do najbardziej niebezpiecznych związków chemicznych zdolnych do globalnego transportu w środowisku. Jej obieg jest dynamiczny i złożony, ponieważ pierwiastek ten ulega ciągłym przemianom w różnych komponentach biosfery: atmosferze, glebach, wodach, osadach dennych, roślinach i organizmach zwierzęcych. Szczególne znaczenie mają procesy bioakumulacji i biomagnifikacji rtęci w polarnych sieciach troficznych. Zawartość tego pierwiastka może wzrastać szybko na wyższych poziomach troficznych, obejmując ryby, ptaki morskie i ssaki, a w konsekwencji także populacje ludzkie zamieszkujące regiony polarne. Wysoka toksyczność metylortęci, jej działanie neurotoksyczne oraz zdolność przenikania przez bariery biologiczne sprawiają, że jest to jedno z najpoważniejszych zagrożeń ekotoksykologicznych w skali globalnej. Ze względu na globalny zasięg obiegu rtęci i możliwość jej transportu atmosferycznego na znaczne odległości, problem ten nie ogranicza się wyłącznie do obszarów o lokalnych źródłach emisji. Antarktyka i Arktyka powinny pozostawać w centrum badań i monitoringu, co znajduje odzwierciedlenie w licznych krajowych i międzynarodowych projektach badawczych.

Podjęcie badań nad obiegiem i przemianami rtęci w mikroplanktonie, bentosie oraz zooplanktonie rejonów polarnych świadczy o bardzo dobrej orientacji Doktorantki w aktualnych priorytetach naukowych i wyzwaniach środowiskowych. Jest to obszar wciąż słabo poznany, zwłaszcza w kontekście bioakumulacji i biomagnifikacji poszczególnych form rtęci w organizmach związanych ze środowiskiem dennym. Zrozumienie przemian i obiegu rtęci w organizmach niższych poziomów troficznych – mikroplanktonie, bentosie i zooplanktonie – ma kluczowe znaczenie, gdyż są one podstawowymi ogniwami w sieciach pokarmowych Antarktyki i Arktyki. Organizmy te mogą akumulować rtęć i „przekazywać” ją kolejnym poziomom troficznym, co w ostatecznym efekcie prowadzi do narażenia ryb, ptaków morskich, ssaków i człowieka.

Tematyka rozprawy jest aktualna i naukowo uzasadniona, szczególnie w kontekście identyfikacji dróg przenikania rtęci do organizmu ludzkiego oraz oceny ryzyka dla zdrowia publicznego. Uwzględnienie mikroplanktonu, bentosu i zooplanktonu jako podstawowych obiektów badań pozwala na pełniejsze zrozumienie mechanizmów transportu i przemian rtęci w unikalnych warunkach środowiskowych obszarów polarnych.

Istotnym elementem merytorycznym dysertacji – obok trzech opublikowanych artykułów naukowych – jest obszerne, 21-stronicowe streszczenie przygotowane w dwóch wersjach językowych: angielskiej i polskiej. Stanowi ono zarówno przewodnik po całości pracy, jak i rozbudowany komentarz do zawartych w niej, spójnych tematycznie publikacji.

We wstępie streszczenia Autorka syntetycznie przedstawia kontekst badań, uzasadniając wybór tematu i jego znaczenie w ramach dysertacji. Szczególną uwagę poświęca problemowi ograniczonej wiedzy na temat zawartości, przemian oraz dróg migracji rtęci całkowitej, jej frakcji i metylortęci w organizmach niższych poziomów troficznych w rejonach podbiegunowych obu półkul.

Na podstawie analizy literatury Doktorantka sformułowała trzy hipotezy badawcze:

1. *„Topniejące lodowce stanowią dodatkowe źródło rtęci w ekosystemach polarnych, powodując wzrost jej stężenia w organizmach morskich.*
2. *Pochodzenie materii organicznej determinuje biodostępność związanej z nią rtęci w rejonach polarnych.*
3. *Organizmy zajmujące najniższe poziomy troficzne odgrywają kluczową rolę w transferze rtęci w ramach polarnej sieci troficznej, a międzygatunkowe różnice w poziomie jej akumulacji wynikają z odmiennego zachowania i diety poszczególnych gatunków”.*

Jako główny cel dysertacji mgr Korejwo przyjęła uzupełnienie wiedzy o mechanizmach włączania rtęci do ekosystemów polarnych, jej dystrybucji w organizmach polarnej sieci troficznej oraz wpływie czynników środowiskowych na jej stężenie i formy. Istotnym elementem była również ocena biomagnifikacji tego metalu w polarnych łańcuchach pokarmowych.

W celu weryfikacji hipotez Doktorantka określiła trzy zasadnicze zadania badawcze:

1. *„Identyfikacja stężeń i form rtęci w ekosystemach polarnych (woda, osady, zawiesina, organizmy).*
2. *Określenie czynników wpływających na stężenie i formę rtęci w organizmach z najniższych poziomów troficznych.*
3. *Analiza czynników determinujących włączanie i transfer rtęci u podstawy polarnej sieci troficznej”.*

Przyjęte hipotezy i cele badawcze sformułowano w sposób przejrzysty, logiczny i merytorycznie poprawny. W mojej ocenie takie ujęcie problemu pozwala na rzetelną analizę mechanizmów transferu rtęci w sieciach pokarmowych Arktyki i Antarktyki oraz wnosi istotny wkład do badań nad globalnym obiegiem tego pierwiastka.

W kolejnej części „Streszczenia” Doktorantka przedstawiła syntetyczną charakterystykę obszarów badań – Antarktyki oraz Arktyki. Z rejonu Zatoki Admiralicji, położonej przy Wyspie Króla Jerzego, pobrano próbki wody morskiej, zawiesiny oraz mikroplanktonu.

Zooplankton (*Euphausia superba*, *Thysanoessa macrura*, *Themisto gaudichaudii*) pozyskano w rejonie Półwyspu Antarktycznego. Natomiast w Arktyce, z okolic fiordu Isfjorden, zebrano próbki osadów oraz organizmów bentosowych, obejmujących: makrofitobentos (*Laminaria digitata*), węzowidła (*Ophiopholis aculeata*), rozgwiazdy (*Henricia* sp.), jeżowce (*Strongylocentrotus droebachiensis*) oraz ślimaki (*Buccinum glaciale*).

W celu realizacji postawionych celów badawczych mgr Ewa Korejwo zastosowała zaawansowane techniki analityczne. Do oznaczeń rtęci całkowitej oraz pięciu jej frakcji wykorzystwała atomową spektrometrię absorpcyjną z desorpcją termiczną (AAS) przy użyciu analizatora DMA-80 (Milestone). Z kolei pomiary metylortęci przeprowadziła z zastosowaniem techniki łączonej: chromatografii gazowej połączonej z atomową spektrometrią fluorescencyjną (GC-AFS) na aparacie MERX-M (Brooks Rand).

Istotnym warunkiem rzetelności i wiarygodności uzyskanych wyników była konsekwentna kontrola jakości na każdym etapie prac badawczych. Doktorantka, świadoma wysokiej podatności śladowych analiz rtęci na błędy, zastosowała odpowiednią liczbę certyfikowanych materiałów odniesienia o zróżnicowanej matrycy. Dzięki temu mogła zweryfikować dokładność oznaczeń zarówno dla próbek wody, zawiesiny, osadów dennych, jak i tkanek organizmów mikropłanktonowych, bentosowych oraz zooplanktonowych. Od momentu pozyskania materiału w trudnych warunkach polarnych, poprzez jego transport, przygotowanie i analizę laboratoryjną, zachowano procedury minimalizujące ryzyko wprowadzenia zanieczyszczeń i zapewniające powtarzalność wyników.

W dalszej części streszczenia Doktorantka przedstawiła syntetyczne omówienie wyników badań, szczegółowo opisanych w publikacjach stanowiących zasadniczy trzon rozprawy. Uzyskane rezultaty pozwoliły na realizację założonych celów pracy oraz częściową weryfikację postawionych hipotez. Pomimo dużej liczby danych empirycznych, Autorka z dużą starannością usystematyzowała je i poddała wnikliwej interpretacji. Analiza wyników została przeprowadzona w sposób spójny i logiczny, z uwzględnieniem specyfiki metodyki badawczej oraz kontekstu biologicznego, chemicznego i środowiskowego. Ta część pracy utrzymuje wysoki poziom merytoryczny i jest wartościowa zarówno dla specjalistów, jak i dla czytelników zainteresowanych problematyką wpływu zanieczyszczeń na ekosystemy polarne. Niemniej jednak, lektura tego fragmentu wymagała ode mnie szczególnej uwagi, aby na bieżąco śledzić, które z hipotez badawczych zostały potwierdzone w całości, które częściowo, a które częściowo lub całkowicie odrzucone w poszczególnych publikacjach.

W podsumowaniu swojej pracy Pani mgr Ewa Korejwo wskazała kilka istotnych osiągnięć i nowości naukowych rozprawy:

1. W biomagnifikacji rtęci w ekosystemach polarnych istotną rolę odgrywa frakcja labilna HgF2, a nie wyłącznie metylortęć.
2. Wykazano, że kolonie ptaków i dawne kopalnie węgla stanowią istotniejsze źródła rtęci dla bentosowej sieci troficznej niż wody pochodzące z topniejących lodowców.
3. Udowodniono, że zdolność organizmów do wiązania rtęci w tkankach twardych wpływa na jej dalszy transfer w sieci troficznej.
4. Wykazano, że cechy biologiczne (dieta, wiek, mechanizmy detoksykacyjne) są powiązane z formą i stopniem biomagnifikacji rtęci.
5. Wskazano gatunki polarne mogące pełnić rolę bioindykatorów obecności i form rtęci, co stanowi praktyczne narzędzie w monitoringu środowiska.

W mojej ocenie rozprawa stanowi istotny i oryginalny wkład w badania nad obiegiem rtęci w ekosystemach polarnych, dostarczając unikalnych danych o jej źródłach, formach i mechanizmach transferu w Arktyce i Antarktyce. Na szczególne podkreślenie zasługuje wykazanie, że w procesie biomagnifikacji kluczową rolę odgrywa frakcja labilna HgF2, a nie wyłącznie metylortęć. Równie ważnym ustaleniem jest wskazanie, że kolonie ptaków oraz dawne kopalnie węgla mogą być istotniejszym źródłem rtęci niż wody pochodzące z topniejących lodowców. Autorka trafnie powiązała cechy biologiczne badanych gatunków – dietę, wiek oraz mechanizmy detoksykacyjne – z formą i stopniem akumulacji pierwiastka, wykazując, że zdolność wiązania rtęci w tkankach twardych wpływa na jej dalszy transport w sieci troficznej. Wskazanie gatunków mogących pełnić rolę bioindykatorów to cenne narzędzie w monitoringu środowiska polarnego. Zarówno odpowiedni dobór materiału badawczego, jak i szczegółowa, wnikliwa analiza wyników świadczą o wysokiej wartości merytorycznej pracy, która wnosi wyraźny element nowości w badania nad migracją i bioakumulacją frakcji rtęci w organizmach wodnych rejonów polarnych.

Nie mam większych zastrzeżeń do rozprawy. Pojawiają się jedynie drobne błędy edytorskie i niektóre niefortunne sformułowania szczególnie w polskiej wersji językowej, jednak nie mają one istotnego wpływu na wartość merytoryczną pracy.

W trakcie lektury nasunęło mi się jednak kilka pytań:

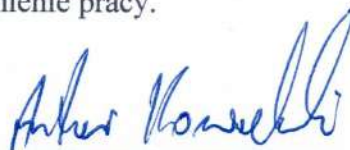
1. W badaniach zastosowano wiele certyfikowanych materiałów odniesienia o odpowiednio dobranej matrycy. Zwróciło moją uwagę użycie mniej typowego materiału – liści herbaty (INCT-TL-1). Co było powodem jego wyboru?
2. Badania prowadzono w Zatoce Admiralicji, w rejonie zachodniego Półwyspu Antarktycznego oraz w Isfjorden na Spitsbergenie. Taki zakres przestrzenny ogranicza możliwość uogólnienia wyników na cały obszar polarny. Czy planowane jest rozszerzenie badań na inne regiony?
3. Czy w przyszłości przewiduje Pani badania prowadzone w różnych porach roku, np. zimą antarktyczną, kiedy zarówno źródła pokarmu, jak i warunki środowiskowe ulegają istotnym zmianom?

Podsumowanie

Rozprawa doktorska mgr Ewy Korejwo nie budzi zastrzeżeń pod względem merytorycznym ani formalnym. Jej tytuł w pełni odpowiada treści i zakresowi przeprowadzonych badań, a język pracy świadczy o bardzo dobrym przygotowaniu Autorki i dogłębnej znajomości problematyki. Nieliczne potknięcia edytorskie nie mają żadnego wpływu na wartość naukową rozprawy. Cele badawcze zostały jasno określone i konsekwentnie zrealizowane, a całość opracowania cechuje się starannością, spójnością i wysokim poziomem metodologicznym. Szczególną wartością pracy jest wniesienie istotnych elementów nowości w zakresie rozpoznania źródeł i mechanizmów obiegu rtęci w ekosystemach polarnych oraz wskazanie nowych perspektyw badawczych.

Po zapoznaniu się z całością rozprawy stwierdzam, że praca mgr Ewy Korejwo spełnia wymagania określone w art. 187 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2018 r. poz. 1688 z późn. zm.) i w związku z tym wnoszę do Rady Naukowej Instytutu Oceanologii Polskiej Akademii Nauk o dopuszczenie Kandydatki do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

Jednocześnie stawiam wniosek o wyróżnienie rozprawy doktorskiej mgr Ewy Korejwo. Praca wyróżnia się oryginalnością, wysokim poziomem merytorycznym i znaczącym wkładem w badania nad obiegiem rtęci w ekosystemach polarnych. Jej nowatorski charakter oraz wysoka jakość publikacji uzasadniają wniosek o wyróżnienie pracy.



dr hab. Artur Kowalski, prof. UAM