

dr hab. Jarosław Tyszka, prof. ING PAN  
Ośrodek Badawczy w Krakowie  
Instytut Nauk Geologicznych PAN  
31-002 Kraków, ul. Senacka 1

## Recenzja

### rozprawy doktorskiej mgr Natalii Szymańskiej

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr Natalii Szymańskiej, pt. *The share of foraminifera derived carbon in sedimentary carbon pool of northern European and Svalbard fjords* [Udział otwornic w puli węgla osadów fiordów Europy północnej i Svalbardu w wersji polskiej] przygotowanej pod kierunkiem Prof. dra hab. Marka Józefa Zajączkowskiego oraz Dr Magdaleny Łąckiej-Wojciechowskiej z Instytutu Oceanologii PAN została opracowana na prośbę Prof. dr. hab. Jacka Piskozuba, Przewodniczącego Rady Naukowej IO PAN.

#### Struktura i język rozprawy

Praca napisana w języku angielskim składa się z serii czterech współautorskich artykułów opublikowanych w latach 2017-2021 oraz zestawionych w postaci zwartego tomu rozprawy doktorskiej, zawierającego obszernie streszczenia w języku angielskim oraz polskim. Do rozprawy dołączono oświadczenia wszystkich współautorów artykułów oraz informację o dofinansowaniu badań przez NCN w postaci 2 projektów. Jeden z projektów był koordynowany przez Kandydatkę do stopnia doktora. Na rozprawę składają się następujące publikacje:

- 1.** **Szymańska N.**, Pawłowska J., Kucharska M., Kujawa A., Łącka M., Zajączkowski M. (2017). Impact of shelf-transformed waters (STW) on foraminiferal assemblages in the outwash and glacial fjords of Adventfjorden and Hornsund, Svalbard. *Oceanologia* 59, 525–540, <http://dx.doi.org/10.1016/j.oceano.2017.04.006> [IF=2,427]
- 2.** Pawłowska J., Łącka M., Kucharska M., **Szymańska N.**, Kozirowska K., Kuliński K., Zajączkowski M. (2017). Benthic foraminifera contribution to fjord modern carbon pools: A seasonal study in Adventfjorden, Spitsbergen. *Geobiology* 15, 704–714, <https://doi.org/10.1111/gbi.12242> [IF=4,407]
- 3.** **Szymańska N.**, Łącka M., Kozirowska K., Kuliński K., Pawłowska J., Kujawa A., Telesiński M. M., Zajączkowski M. (2021). Foraminifera-derived carbon contribution to sedimentary inorganic carbon pool: A case study from three Norwegian fjords. *Geobiology* 19 (6), 631–641, <https://doi.org/10.1111/gbi.12460> [IF=4,407]
- 4.** Kujawa A., Łącka M., **Szymańska N.**, Telesiński M. M., Zajączkowski M. (2021). Could Norwegian fjords serve as an analogue for the future of the Svalbard fjords? State and fate of high latitude fjords in the face of progressive “Atlantification”. *Polar Biology* 44, 2217–2233, <https://doi.org/10.1007/s00300-021-02951-z> [IF=2,310]

Oceniając strukturę oraz język rozprawy, uważam, że praca jest przejrzysta i dobrze zredagowana. Nie zawiera zasadniczych błędów językowych. Terminologia użyta zarówno w języku angielskim jak też w polskim (streszczenie) jest poprawna. Tabele, a także ryciny z mapami lokalizacyjnymi, wykresami oraz ilustracjami badanych otwornic są wykonane

starannie, zawierając niezbędną dokumentację lokalizacji stacji badawczych, danych ilościowych oraz wyników analiz.

### **Ocena indywidualnego wkładu Kandydatki**

Mgr Natalia Szymańska opublikowała swoje prace wchodzące w skład rozprawy we współautorstwie z ósemką naukowców afiliowanych w Instytucie Oceanologii PAN. Jest pierwszą współautorką dwóch z czterech publikacji. We wszystkich publikacjach współtworzyła koncepcje badań, przeprowadzała analizy wyników oraz brała udział w przygotowywaniu manuskryptu. Brała również czynny udział w przeprowadzaniu analiz laboratoryjnych w badaniach opisanych w trzech publikacjach. Zestawiając oświadczenia wszystkich współautorów, stwierdzam znaczący wkład Doktorantki w powstanie tych publikacji, a tym samym indywidualny wkład Kandydatki w powstanie dysertacji uważam za wystarczający. Jestem przekonany, że badania wymagały wsparcia całego zespołu badawczego, bez którego powstanie dysertacji nie byłoby możliwe.

### **Tematyka i cele rozprawy**

Praca dotyczy ważkiej roli otwornic bentonicznych w sekwestracji węgla w osadach współczesnych fiordów. Wcześniejsze badania innych zespołów wykazały, że fiordy są obszarami o zwiększonej efektywności odkładania węgla w osadach, a to wydaje się mieć znaczenie w jego globalnym obiegu. Dotychczas brakowało rzetelnych danych empirycznych na temat ilości węgla wapnia dostarczanego przez otwornice bentoniczne.

Aby to zmienić Doktorantka zdefiniowała następujące cele badawcze:

- (1) Określenie wpływu zmian środowiskowych, w tym szczególnie napływu wód atlantyckich, na liczebność i skład gatunkowy zbiorowisk otwornic w osadach wybranych fiordów północnoeuropejskich;
- (2) Ocena ilościowa udziału węgla organicznego oraz nieorganicznego, pochodzącego ze skorupki otwornic w puli osadów wybranych fiordów;
- (3) Określenie wpływu współczesnych zmian środowiskowych na ilość węgla pochodzącego ze skorupki otwornic w puli węgla osadów fiordów.

W ramach celu (1) i (3) Doktorantka przetestowała hipotezę badawczą zakładającą - wraz z postępującą atlantyfikacją - trend upodabniania się zbiorowisk otwornicowych fiordów Svalbardu do zbiorowisk znanych obecnie z fiordów norweskich.

### **Ocena metodyki badawczej**

Praca doktorska opiera się na analizie krótkich rdzeni najmłodszego osadu morskiego, pochodzących ze stacji pomiarowych zlokalizowanych na dnie dwóch fiordów Spitsbergenu (Szymańska i in., 2017; Pawłowska i in., 2017) oraz trzech fiordów norweskich (Kujawa i in., 2021; Szymańska i in., 2021). Taki dobór stacji badawczych pozwolił na porównanie fiordów o zróżnicowanych warunkach oceanograficznych ze względu na ich lokalizację (np. szerokość geograficzną), ukształtowanie dna (w tym batymetrię), sezonowe zamarzanie, wpływ odmiennych wód oceanicznych, sąsiedztwo lodowców i rzek roztopowych, sezonowo

zasilających fiordy w wodę słodką i zawiesinę. Dobór fiordów do badań porównawczych jest dobrze uzasadniony.

Wykorzystanie rdzeni osadów o miąższości 10 cm osadu okazało się słuszne, ponieważ maksimum występowania niektórych gatunków znajdowało się poniżej czwartego centymetra osadu (Szymańska i in., 2017, 2021). Z drugiej strony zastanawia ograniczenie się do 2 cm osadu w ostatniej pracy (Kujawa i in., 2021). Cenne są natomiast jakościowe oraz ilościowe analizy otwornic bentonicznych. Pierwsza publikacja dysertacji (Szymańska i in., 2017) jest rozpoznaniem zespołów otwornic bentonicznych w badanych fiordach Spitsbergenu, co pozwoliło na dalsze badania potencjału otwornic w puli węgla osadowego. Wartościowe jest to, że analiza dotyczy zarówno otwornic wapiennych, jak też aglutynujących oraz to, iż rozdzielono osobniki żywe od martwych przy wykorzystaniu rózu bengalskiego. Ograniczeniem jest natomiast zastosowanie grubszego sita, które wyeliminowało analizę drobnej frakcji od 63  $\mu\text{m}$  do 100  $\mu\text{m}$ . Co ciekawe, trzecia z prac Kandydatki (Szymańska i in., 2021) wprowadza tę najdrobniejszą frakcję do analiz, co wskazuje na świadomość takiej potrzeby i chęć adaptacji stosowanej metodyki badawczej. Ostatecznie w czwartej pracy (Kujawa i in., 2021) w metodyce zwycięża frakcja powyżej 100  $\mu\text{m}$  ze względu na potrzebę porównania wyników z badaniami Halda i Korsuna (1997, <https://doi.org/10.2113/gsjfr.27.2.101>).

W badaniach ilościowych otwornic słusznie wykorzystano tzw. suchy „mikrospliter” do podziału rezydium osadu bogatego w skorupki. Dzięki temu możliwe było oznaczenie około 300 okazów na próbę oraz odniesienie otrzymanych danych do masy suchego osadu. Dane z analiz dostępne są w tabelach ww. artykułów oraz materiałach uzupełniających online. Oznaczenia ważniejszych gatunków udokumentowano graficznie w postaci dwóch plansz ze zdjęciami optycznymi i elektronowymi (SEM) otwornic. W większości taksonów oznaczono otwornice do gatunku. Praca Szymańskiej i in. (2017, str. 528) niefortunnie powołuje się na monograficzną publikację Loeblich i Tappan z 1987 roku jako wzorca oznaczeń gatunkowych. Kolejne prace korygują to, stwierdzając, że praca ta posłużyła tylko do oznaczeń rodzajów otwornic. Dane ilościowe podlegały analizom statystycznym, m.in. analizie głównych składowych (*Q-mode Principal Component Analysis*), analizie zróżnicowania gatunkowego (*Shannon-Wiener Index*) oraz analizie podobieństw (*Bray-Curtis similarity*).

### Ocena rezultatów pracy

Głównym rezultatem pracy jest określenie ilościowego udziału otwornic w puli węgla nieorganicznego i organicznego osadów fiordowych w strefie arktycznej i subarktycznej. Badania wykazały, że węgiel pochodzący ze skorupki wapiennych otwornic stanowi od 15 do 33% węgla nieorganicznego w fiordach południowej Norwegii, do 38% w osadach fiordów Svalbardu. Relatywna zawartość węgla organicznego pochodzącego z otwornic jest już znacznie mniejsza i może osiągać maksymalnie do 0,35% puli węgla organicznego w osadzie (Pawłowska i in., 2017, Fig. 3). Wartości te zależą od sezonu, liczebności otwornic oraz ich wielkości. Gatunki charakteryzujące się dużymi i masywnymi skorupkami akumulują więcej węgla nieorganicznego oraz są bardziej odporne na rozpuszczanie w wodach porowych. Przykładem takiej otwornicy analizowanej w pracy jest *Nonionellina labradorica*, która jest rekordzistką w sekwestracji węgla nieorganicznego, akumulując w jednym osobniku 6- do 11-krotnie więcej węgla od gatunków *Cassidulina reniforme* czy *Elphidium excavatum*. Badania we fiordach norweskich potwierdzają, iż duże otwornice wapienne – pomimo niższej liczebności –

dostarczają znacznie więcej węgla nieorganicznego (średnio 13%–29%) w porównaniu do małych ale licznych otwornic, które odpowiadają tylko za niecałe 4% węgla nieorganicznego (Szymańska i in., 2021).

Autorka wraz ze Współautorami zwraca uwagę na znikomą rolę otwornic w puli węgla organicznego deponowanego w osadach fiordowych, które charakteryzują się wysoką zawartością tego pierwiastka, pochodzącą z produkcji pierwotnej w morzu oraz ze spływu lądowego. Zauważa również, że otwornice tolerujące deficyt tlenu charakteryzują się wyjątkowo niską zawartością węgla w skorupkach, co wiąże z ich cienkimi ściankami i mniejszymi rozmiarami (Szymańska i in., 2021). W konsekwencji ostrzega, iż postępujący trend tworzenia się niedotlenionych wód dennych może obniżyć potencjał sekwestracji węgla nieorganicznego w skorupkach otwornic. Ta słuszna sugestia wymaga pogłębionej dyskusji i dalszej analizy, co zostało podkreślone we wnioskach jednej z publikacji (Szymańska i in., 2021, str. 9). Kluczowe jest bowiem pytanie, czy postępująca eutrofizacja i niedotlenienie wód nie wpłynie korzystnie na zwiększone pogrzebanie całkowitego węgla organicznego w zbiornikach morskich wyższych szerokości geograficznych? Oszacowanie i zestawienie strat oraz zysków spowodowanych niedotlenieniem takich środowisk wydaje się konieczne do oceny konsekwencji zmian w obiegu węgla.

Ostatnia publikacja w cyklu (Kujawa i in., 2021) obala zaproponowaną przez Autorów hipotezę badawczą, zakładającą, że zespoły otwornic bentonicznych fiordów Svalbardu wraz z postępującą atlantyfikacją upodobnią się do zespołów otwornic występujących we fiordach norweskich. Badania wykazały, że we fiordach norweskich wpływ wód atlantyckich na zespoły otwornic nie jest tak dominujący. Większy jest natomiast wpływ zwiększonej dostawy słodkich wód opadowych oraz antropopresji z eutrofizacją i okresowymi spadkami koncentracji tlenu w wodzie. Tabela 4 (Kujawa i in., 2021, <https://doi.org/10.1007/s00300-021-02951-z>) zestawia podobieństwa i różnice pomiędzy fiordami Svalbardu i Norwegii. Intrygujące jest relatywnie małe podobieństwo zespołów otwornic określone na poziomie 30%.

### **Podsumowanie oceny**

Do pozytywnych stron pracy doktorskiej należą:

1. Ważki temat udziału otwornic bentonicznych w puli węgla strefy borealnej i arktycznej w nawiązaniu do postępującej atlantyfikacji basenów arktycznych i antropopresji;
2. Ciekawa koncepcja pracy, biorąca pod uwagę wielowymiarową złożoność środowisk i systemów depozycyjnych fiordów oraz specyfikę wbudowywania węgla organicznego oraz nieorganicznego przez otwornice;
3. Dobrze dobrany obszar badań, obejmujący kontrastujące fiordy Svalbardu oraz północno-zachodniego i południowego wybrzeża Półwyspu Skandynawskiego. Dobór stacji pozwolił na rzetelne porównanie zróżnicowanych środowisk fiordowych oraz analizę trendów powiązanych z postępującą atlantyfikacją strefy arktycznej;
4. Znaczna część zastosowanej metodyki badawczej, w tym sposobów opróbowania, preparatyki oraz analizy otwornic bentonicznych. Cenne jest szczególnie: (a) rozdzielenie skorupki otwornic żywych od martwych, (b) podział osadu na jednocentymetrowe warstwy,

- (c) dokumentacja wykonanych analiz ilościowych; (d) identyfikacja taksonomiczna otwornic, (e) dokumentacja graficzna dominujących gatunków;
5. Zrealizowanie zasadniczych celów pracy, a w szczególności wykonanie analiz ilościowych udziału węgla organicznego oraz nieorganicznego, pochodzącego ze skorupki otwornic w puli osadów wybranych fiordów oraz określenie wpływu zmian środowiskowych na liczebność, skład gatunkowy oraz ilość wykorzystanego węgla w badanych zbiorowiskach otwornic;
  6. Przeprowadzenie dyskusji wyników odnoszącej otrzymane wyniki do dotychczasowej wiedzy w podjętym temacie;
  7. Publikacja kompletu wyników pracy doktorskiej w prestiżowych czasopismach międzynarodowych.

Do dyskusyjnych lub mniej fortunnych stron pracy należą:

1. Brak ujednoczenia metodyki badawczej we wszystkich publikacjach dysertacji doktorskiej. Zastosowanie różnych frakcji otwornic oraz różnej miąższości analizowanych osadów ogranicza bezpośrednie porównanie wyników;
2. Pominięcie analizy ilościowej węgla organicznego w puli otwornic aglutynujących. Pierwsza z prac (Szymańska i in., 2017) wykazała dominację tych otwornic w niektórych osadach fiordów Svalbardu. Autorka podkreśla konieczność dalszych analiz wkładu otwornic o skorupkach organicznych i aglutynowanych w puli węgla organicznego;
3. Ograniczone odniesienie wpływu otwornic na bezwzględne wartości węgla, ulegającego sekwestracji w osadach fiordów. Znikoma rola otwornic w puli węgla organicznego deponowanego w osadach fiordowych wydaje się być oczywista. Jednak wysoki udział otwornic w puli węgla nieorganicznego w tym środowisku nie musi wiązać się z wysoką (bezwzględną) sekwestracją węgla nieorganicznego, ponieważ osady fiordów są najczęściej osadami ubogimi w węglany. Pomiar całkowitej zawartości węgla nieorganicznego ( $C_{inorg}$ ) w Adventfjorden Spitsbergenu wykazały tylko 0,003 do 0,503% wagowego osadu przy znacznie wyższych zawartościach węgla organicznego ( $C_{org}$ ), oscylujących wokół 2% wagowych osadu (Pawłowska i in. 2017, Tab. 2).

W odniesieniu do ww. punktu pierwszego i trzeciego mam do Doktorantki pytania:

- I. Jaką spójną czyli ujednoczoną metodykę badawczą przyjęłaby Pani, rozpoczynając podobne badania z aktualnym doświadczeniem nabytym podczas pracy nad doktoratem? Pytanie jest o tyle zasadne, iż odpowiedź na nie może stać się metodyczną wartością dodaną pracy doktorskiej. Literatura otwornicowa w tej dziedzinie nie podaje przetestowanych rekomendacji metod badawczych.
- II. Jaki może być szacunkowy wkład badanych otwornic w bezwzględne wartości węgla nieorganicznego w osadzie, biorąc pod uwagę mały procent węglanów w osadzie oraz ograniczoną powierzchnię fiordów w skali globalnej? Jakie znaczenie ma otwornicowa sekwestracja nieorganiczna węgla na obszarze 1 km<sup>2</sup> fiordu w porównaniu do 1 km<sup>2</sup> szelfu w strefie tropikalnej lub subtropikalnej?

## **Wniosek końcowy**

Podsumowując, wszystkie cele rozprawy zostały osiągnięte. Kandydatka do stopnia naukowego doktora bardzo rzetelnie przedstawiła wyniki systematycznych badań, zaproponowała ich interpretacje oraz przedstawiła dyskusję z perspektywami dalszych badań. Nie mam wątpliwości, iż wyniki niniejszej pracy doktorskiej będą stanowić bardzo wartościowy materiał porównawczy do oceny roli otwornic w obiegu węgla oraz szacowania potencjału sekwestracji węgla w obszarach polarnych i subpolarnych. Wiele zagadnień poruszonych w dyskusjach przedłożonych publikacji może inspirować dalsze, pogłębione badania w skali regionalnej i globalnej.

Na podstawie przedstawionej oceny stwierdzam, że praca spełnia warunki i wymagania stawiane rozprawom doktorskim, określone w obecnie obowiązującej ustawie. Recenzowana rozprawa doktorska jest oryginalnym opracowaniem Autorki i wnosi wkład do dziedziny nauk o Ziemi i środowisku. Wnoszę zatem o dopuszczenie Pani mgr Natalii Szymańskiej do dalszych etapów przewodu doktorskiego. Podkreślając ww. pozytywne strony pracy, uważam również, że niniejsza rozprawa doktorska zasługuje na wyróżnienie.



*Jarosław Tyszka*