

dr hab. Witold Szczuciński, prof. UAM
Instytut Geologii,
Uniwersytet im. A. Mickiewicza w Poznaniu

Recenzja pracy doktorskiej

Pani magister inżynier Marleny Szeligowskiej pt.

Dynamika rozmieszczenia planktonu i cząstek w arktycznych wodach przybrzeżnych będących pod wpływem wód roztopowych z lodowców (Zachodni Spitsbergen)

1. Uwagi wstępne

Recenzowana praca doktorska stanowi interesujący wkład w badania dotyczące ekosystemów arktycznych, które w obliczu zmian klimatycznych stają się przedmiotem coraz większego zainteresowania naukowego i społecznego. Współczesne badanie środowisk morskich Arktyki ma znaczenie z wielu powodów, związanych zarówno z naukowym zrozumieniem tego unikalnego regionu, jak i globalnym kontekstem zmian klimatycznych. Arktyka jest bowiem jednym z najszybciej się ocieplających obszarów na Ziemi a zachodzące tam procesy, powiązane szeregiem sprzężeń zwrotnych, mają istotne znaczenie dla klimatu w skali globalnej. Arktyka odgrywa również kluczową rolę w globalnych cyklach biogeochemicznych, takich jak cykl węglowy.

W ten bardzo ważny nurt badań wpisuje się rozprawa doktorska pani magister inżynier Marleny Szeligowskiej, która w oparciu o wyniki badania planktonu i zawiesin mineralnych w wodach fiordów zachodniego Spitsbergenu podjęła ambitną próbę oceny obecnego wpływu zawiesin i innych czynników środowiskowych na ekosystemy fiordów oraz prognozy ich zmian wraz z postępującym ociepleniem klimatu. Autorka pracy doktorskiej skupia się na obszarze zachodniego Spitsbergenu, który jest szczególnie ciekawy ze względu na swoje unikalne cechy geograficzne i klimatyczne. Praca ma interdyscyplinarny charakter, wykorzystywane są dane oceanograficzne, klimatyczne, wyniki pomiarów rozkładu, wielkości i kształtu zawiesin oraz dane taksonomiczne. Dane te użyte są między innymi dla identyfikacji i oszacowania wzajemnych relacji pomiędzy różnymi elementami ekosystemu, które to wyniki były wykorzystane później w przeprowadzonym modelowaniu ekosystemu fiordowego.

2. Opis przedstawionej rozprawy

Przedstawiona rozprawa doktorska ma formę zestawu czterech anglojęzycznych publikacji wieloautorskich (od 4 do 8 współautorów), z których trzy zostały już opublikowane, uzupełnionych o pięciostronicowe streszczenia w języku polskim oraz w języku angielskim, podziękowania oraz oświadczenia współautorskie. Przedstawione artykuły zostały opublikowane w cenionych czasopismach: *Frontiers in Marine Science*, *Science of the Total Environment* oraz *Scientific Reports*, a doktorantka jest pierwszą i korespondencyjną autorką we wszystkich artykułach.

Pierwszy z artykułów to praca: **Szeligowska M.**, Trudnowska E., Boehnke R., Dąbrowska A.M., Wiktor J.M., Sagan S., Błachowiak-Samołyk K., 2020. *Spatial patterns of particles and plankton in the warming Arctic Fjord (Isfjorden, West Spitsbergen) in seven consecutive mid-summerns (2013–2019)*. *Frontiers in Marine Science*, 7, 584. W przejrzystym przedstawionym wkładzie autorskim uwzględniono takie działania jak stworzenie koncepcji badań, przeprowadzenie

badan terenowych, badania laboratoryjne i opracowanie wyników pomiarów, analizy statystyczne, przygotowanie rycin i tabel, przygotowanie pierwszej wersji artykułu oraz udział w rewizji artykułu po recenzjach. W przypadku omawianego artykułu, Doktorantka nie uczestniczyła bezpośrednio w przeprowadzeniu badań. Jej wkład obejmował przygotowanie części rycin i tabel (wraz z E. Trudnowską), przygotowanie pierwotnej wersji artykułu (wraz z Panią promotor i Panią promotor pomocniczą) oraz udział w rewizji artykułu (wraz z wszystkimi współautorami).

Artykuł oparty jest na niezwykle cennej serii pomiarów wykonywanych corocznie przez 7 kolejnych lat wzdłuż tego samego transektu pomiarowego (3 stacje pomiarowe oraz pomiary ciągłe pomiędzy nimi, łącznie ok. 60 km) wyznaczonego w największym fiordzie Spitsbergenu – Isfjorden. Pomiary ciągłe obejmowały pomiary rozmiarów cząstek zawiesiny z wykorzystaniem dwóch urządzeń LISST (Laser In Situ Scattering and Transmissometry) oraz LOPC (Laser Optical Plankton Counter) oraz pomiary właściwości wód (zasolenie, temperatura, gęstość, fluorescencja) w powierzchniowych 70 m kolumny wody. Ponadto z trzech stacji pomiarowych pobrano próbki do standardowych badań planktonu (protisty i zooplankton) i zawartości chlorofilu a. Całość uzyskanych wyników poddano różnym analizom statystycznym.

Jako główny cel badań przedstawiono: „opis rozmieszczenia planktonu w małej skali oraz względnej roli różnych grup planktonu w odniesieniu do struktury hydrograficznej i zmiennego wpływu wód lodowcowych i rzecznych w Isfjorden podczas siedmiu sezonów letnich”. Praca ta ma zatem przede wszystkim charakter dokumentacyjny i monitoringowy. Wśród głównych wniosków pracy znajdują się przede wszystkim uwagi dotyczące przestrzennego zróżnicowania grup zawiesin (podzielonych w zależności od wielkości na frakcje nano, mikro i mezo) w zależności od gradientu hydrograficznego (od wewnętrznych części fiordu o względnie wyższej dostawie zawiesiny i wód słodkich do zewnętrznych części fiordu będących pod wyraźniejszym wpływem relatywnie cieplejszych i bardziej zasolonych wód atlantyckich). Autorzy zwrócili uwagę na utrzymywanie się wspomnianego gradientu hydrograficznego w kolejnych latach i jego rolę w kształtowaniu rozkładu zawiesin (w tym planktonu), przy czym frakcje nano- (3 do 20 mikronów) i mikro (20 – 200 mikronów) były powiązane z powierzchniową warstwą wód, podczas gdy frakcja mezo- miała bardziej nieregularny rozkład. Autorzy zauważyli, że udział drobnych frakcji (nano i mikro) nie zmieniał się istotnie pomiędzy badanymi stacjami w poszczególnych latach (dominuje zmienność międzyzyletnia), niemniej Autorzy uważają, że ich pochodzenie jest różne (fiotplankton w otwartych wodach a drobnoziarniste zawiesiny mineralne w zatoce przylodowcowej), choć ten aspekt nie został ilościowo przedstawiony w artykule. Do istotnych wniosków autorzy zaliczają również obserwację dotyczącą spadku zawartości zawiesin o dużych rozmiarach (frakcja > 200 mikronów) i równoczesny wzrost liczebności zooplanktonu w kierunku ujścia fiordu. W kontekście najbardziej interesujących wniosków dotyczących trendów w zmienności międzyzyletniej, Autorzy zauważają, że obserwowane zmiany są związane raczej z niewielkimi różnicami sezonowymi związanymi z różnymi datami pobrania próbek w kolejnych latach. Autorzy porównali również zakresy stosowalności różnych metod w badaniu planktonu i zawiesin, wnioskując, że tradycyjne badania zooplanktonu w oparciu o próbki pobrane sieciami są zgodne pomiarami optycznymi z użyciem LOPC w obszarach o stosunkowo niewielkim udziale zawiesin mineralnych.

Drugi artykuł to praca: **Szeligowska M.**, Trudnowska E., Boehnke R., Dąbrowska A.M., Dragańska-Deja K., Deja K., Darecki M., Błachowiak-Samołyk K., 2021. **The interplay between plankton and particles in the Isfjorden waters influenced by marine- and land-terminating glaciers.** *Science of the Total Environment*, 780, p.146491. Zgodnie z przedstawionymi oświadczeniami o udziale ośmiorga współautorów, udział Doktorantki nie obejmował badań

terenowych i laboratoryjnych. Doktorantka, wraz z Panią promotor i Panią promotor pomocniczą, była odpowiedzialna za zaprojektowanie badań i przygotowanie manuskryptu. Samodzielnym wkładem Doktorantki były analizy statystyczne uzyskanych wyników oraz przygotowanie wszystkich rycin i tabel. Jej wkład obejmował również udział w rewizji artykułu (wraz z wszystkimi współautorami).

Artykuł oparty jest na pojedynczych seriach pomiarów wykonanych na 14 stacjach badawczych, zlokalizowanych w różnych częściach Isfjorden (dane z trzech z nich były wykorzystane również w artykule [1]). Większość z badanych stacji znajdowała się we wnętrzu fiordu, w odległości kilku km od źródeł dostawy zawiesin mineralnych: czoł lodowców uchodzących do morza bądź ujść rzek lodowcowych. Autorzy skupili się na porównaniu warunków hydrograficznych oraz rozmiarach i rodzajach zawiesin i ich wpływie na organizmy planktoniczne w powierzchniowych 50 m kolumny wody. Pomiary obejmowały właściwości wody (np. zasolenie, temperatura, gęstość, zmętnienie, fluorescencję) i pomiary in situ wielkości zawiesin (z wykorzystaniem LISST i LOPC), ponadto w oparciu o próbki wody oznaczono zawartość całkowitą zawiesin oraz ich typów, koncentrację chlorofilu a oraz skład fito i zooplanktonu. Głównym celem badań było wskazanie różnic w środowisku pelagicznym będącym pod wpływem wód roztopowych z lodowców uchodzących do morza (Billefjorden, Tempelfjorden) oraz kończących się na lądzie (Adventfjorden), a środowiskiem arbitralnie uznanym za niebędące istotnie kształtowane przez wody roztopowe (środkowa część Isfjorden). Autorzy testowali hipotezę zakładającą, że liczebność i skład zooplanktonu oraz protistów, stosunek żyjących organizmów planktonicznych do innych cząstek w zawieszynie oraz zależności między różnymi grupami organizmów zależą od typu lodowca uwalniającego wody roztopowe do fiordu oraz topografii fiordu.

Na podstawie uzyskanych wyników i ich analizy Autorzy wnioskuje o wyraźnej różnicy między środowiskiem charakteryzującym się wodami o niskiej przezroczystości będącej pod wpływem lodowców i rzek, a środowiskiem relatywnie przezroczystych otwartych wód fiordów. Te ostatnie charakteryzują się między innymi niską mętnością, relatywnie dużą głębokością występowania maksimum chlorofilu a oraz dużą różnorodnością i liczebnością organizmów planktonicznych. Z kolei, środowiska w wewnętrznej częściach fiordu charakteryzowały się znaczącym zmętnieniem wód, obecnością maksimum chlorofilu a w wodach powierzchniowych i znacznym udziałem agregatów cząstek w zawieszynie („marine snow aggregates”). Autorzy wnioskuje również, że warunki środowiskowe i zbiorowiska organizmów planktonicznych są różne dla środowisk będących pod wpływem różnych lodowców oraz, że dalsza recesja lodowców spowoduje negatywne skutki dla organizmów planktonicznych, szczególnie w wewnętrznych częściach fiordów – do tych wniosku odniosę się jeszcze w dalszej dyskusji. Autorzy zauważyli również, że latem liczebności okrzemek, wiciowców, mezozooplanktonu i galaretowatego zooplanktonu są statystycznie niższe w wodach o wysokiej koncentracji zawieszyny, jednocześnie jednak nie zaobserwowano statystycznych różnic w liczebności mikrozooplanktonu pomiędzy środowiskami o różnym zmętnieniu wód. Ciekawą obserwacją jest stwierdzenie, że mikсотrofьy, takie jak wiciowce, pomimo że można by się spodziewać, że będą łatwo adaptować się do warunków o mniejszej dostępności światła, są dość wrażliwe na podwyższone koncentracje zawiesin. W podsumowaniu Autorzy podkreślają konieczność rozważenia wielu różnych czynników w badaniach zależności między zawieszynami a planktonem w zatokach lodowcowych i uwzględnienia ich w badaniach modelowych.

Trzeci artykuł składający się na rozprawę doktorską, to praca: **Szeligowska M., Trudnowska E., Boehnke R., Błachowiak-Samołyk K., 2022. Dark plumes of glacial meltwater affect vertical**

distribution of zooplankton in the Arctic. *Scientific Reports*, 12(1), p.17953. Podobnie jak w poprzednich pracach, Doktorantka nie brała udziału w pracach terenowych i analizach laboratoryjnych. Jej samodzielny wkład obejmował wykonanie analiz statystycznych i przygotowanie rycin i tabel, oraz we współpracy z Panią promotor i Panią promotor pomocniczą, na stworzeniu koncepcji badań i napisaniu artykułu. Ponadto wraz z wszystkimi współautorami brała udział w rewizji artykułu po recenzjach.

Artykuł ten skupia się na analizie wpływu środowisk o różnym stopniu zmętnienia wód na rozmieszczenie widłonogów z rodzaju *Calanus* w kolumnie wody, badanych w 25 stacjach pomiarowych w czterech fiordach Spitsbergenu: Kongsfjorden, Isfjorden (7 stacji, z których dane były również w artykule [2]), Hornsundu i zatoki przy lodowcu Torella latem 2019 roku. Badane stacje podzielono na potrzeby dyskusji i analiz statystycznych na trzy kategorie (reżimy), w zależności od głębokości na jakiej dochodzi do spadku stopnia zmętnienia wód poniżej arbitralnie ustalonego poziomu (0,04 FTU). Są to odpowiednio, reżim płytki (spadek zmętnienia w wodach <10 m), przejściowy (zmiana między 10 a 40 m) i głęboki (zmiana poniżej 40 m). Dla każdej ze stacji zbadano koncentrację i rozkład wielkości zawieszin – w tym widłonogów i galaretowatego zooplanktonu, używając LOPC i UVP (Underwater Vision Profiler), wyniki te zweryfikowano poprzez standardowe analizy próbek pobranych sieciami planktonowymi. Ponadto Autorzy zaprezentowali dane środowiskowe obejmujące zasolenie, temperaturę, gęstość i zmętnienie wód, koncentrację zawiesziny, fluorescencję i koncentrację chlorofilu a. Głównym celem artykułu było sprawdzenie hipotezy zakładającej, że grubość powierzchniowej mętnej warstwy wody odpowiada za różne wzorce rozmieszczenia z głębokością widłonogów z rodzaju *Calanus* (stanowiącego ważną podstawę pokarmową dla licznych grup organizmów) oraz organizmów stanowiących ich pożywienie (fitoplankton) i żerujących na nich drapieżników (galaretowaty zooplankton).

Autorzy, po dogłębnej analizie danych doszli do wniosku, że powierzchniowe wody o wysokiej koncentracji zawieszin mogą stanowić ważny czynnik odpowiedzialny za pionową strukturę rozmieszczenia widłonogów z rodzaju *Calanus* podczas arktycznego lata. Potwierdzili również wcześniejsze obserwacje, że wody te wpływają na głębokość i intensywność maksimum chlorofilu a, będącego wskaźnikiem fitoplanktonu, podstawowego pożywienia dla badanych widłonogów. Zaobserwowali również, że pomimo badań wykonanych w środku polarnego lata to znaczna liczba osobników *Calanus* obecna była w głębokich wodach przydennych niezależnie od badanego obszaru, będąc już zapewne w fazie diapauzy. Uzyskane wyniki wskazały również, że pionowe rozmieszczenie w wodach przypowierzchniowych osobników rodzaju *Calanus* było podobne do rozmieszczenia drapieżników należących do galaretowatego zooplanktonu. Autorzy podkreślają również, że przedstawione badania są dobrym przykładem aplikacji LOPC i UVP dla obserwacji rozmieszczenia zooplanktonu w małej skali i badania powiązań jego rozkładu z warunkami środowiskowymi.

Ostatni, czwarty, artykuł składający się na rozprawę doktorską to praca: **Szeligowska M., Benkort D., Przyborska A., Moskalik M., Moreno B., Trudnowska E., Błachowiak-Samołyk K., Blue carbon estimates in Hornsund, an expanding Arctic fjord affected by dark plumes of glacial meltwater**, złożona do czasopisma *Global Change Biology*. Doktorantka (wraz dwojgiem współautorów) jest autorką pomysłu badań i główną autorką manuskryptu, wykonała część prac związanych z opracowaniem danych, modelowaniem i analizą statystyczną. Wykonała wszystkie ryciny i tabele oraz wraz z wszystkim współautorami pracowała nad rewizją artykułu.

Artykuł ten opiera się na dostępnych danych obserwacyjnych, które zostały wykorzystane do symulacji (jednowymiarowego modelu fizyczno-biogeochemicznego GOTM-ECOSMO-E2E-

Polar) warunków w zatokach przylodowcowych ze szczególnym uwzględnieniem roli zawiesin oraz obiegu węgla. Głównym celem artykułu była ocena elementów bilansu obiegu węgla, w szczególności jego wychwytywania i magazynowania przez organizmy planktoniczne oraz pogrzebania w osadach, w warunkach przylodowcowych zatok fiordu Hornsund, które powiększają się na skutek recesji lodowców uchodzących do morza. Na potrzeby modelu oceniono zmiany powierzchni i objętości nowych zatok powstających w wyniku recesji lodowców uchodzących do morza, wykonano to na podstawie istniejących danych uzupełnionych o analizę zdjęć satelitarnych. Wykorzystano istniejące dane o pokrywie lodu morskiego i temperaturze wód powierzchniowych (dane pochodzą z obszaru przyujściowego fiordu), udostępnione dane meteorologiczne (ze stacji polarnej w Hornsundzie) oraz częściowo opublikowane dane na temat zawiesin, tempa sedymentacji i zasolenia w przylodowcowej zatoce Hansbukta. Autorzy wykonali symulacje dla 20 stacji w obrębie Hornsundu. Do głównych wniosków należy dość dyskusyjne stwierdzenie Autorów, że koncentracja zawiesiny w wodach ablacyjnych wzrastała w ostatnich czterech dekadach o $3,7 \text{ g/m}^3$ na dekadę, co wg symulacji pogorszyło dostępność światła w wodach powierzchniowych, opóźniło zakwit i zmniejszyło biomasa fitoplanktonu, zooplanktonu i makrobentosu. Na podstawie wyników symulacji Autorzy dyskutują potencjalny wpływ zmieniających się warunków na pogrzebanie węgla w osadach, które jak sami przyznają jest trudne do oceny z powodu wielości czynników, dostawy węgla petrogenicznego i ograniczeń modelu. Wskazują też na duże ograniczenie możliwości modelowania ekosystemów jakim jest brak długich serii obserwacyjnych, które mogłyby służyć do kalibracji modeli numerycznych.

3. Ocena merytoryczna pracy, uwagi i pytania

Przedstawiona rozprawa doktorska stanowi spójną tematycznie pracę, która dotyczy interesującego i ważnego zagadnienia wpływu zawiesin na środowisko fiordowe w kontekście zmieniających się warunków klimatycznych. Przedstawiona rozprawa jest bardzo starannie przygotowana pod względem edytorskim i graficznym. Warte podkreślenia jest bardzo dobre dobranie problemu badawczego wpisującego się w główne nurty badań nad zmianami środowiska na skutek ocieplenia klimatu. Doktorantka wykazała się bardzo dobrą znajomością tematyki i literatury światowej. Warte szczególnego podkreślenia jest umiejętność przygotowywania doskonałych rycin ilustrujących wieloaspektowe wyniki badań. Wkład Doktorantki wskazuje również na jej bardzo dobrą znajomość aparatu analitycznego (np. metod statystycznych) oraz umiejętność opracowania różnorodnego materiału i przedstawienia go w spójny i dość klarowny sposób oraz opublikowania go w postaci dobrych artykułów naukowych w dobrych i bardzo dobrych czasopismach międzynarodowych. Podjęty problem badawczy wymagał od Doktorantki szerokiej wiedzy wynikającej z połączenia w pracy różnych metod badawczych, a każda z nich ma przecież swoją specyfikę i ograniczenia. Warto również podkreślić, że przedstawione prace prezentują unikalne serie danych, z wykorzystaniem wielu metod dających wgląd zarówno w warunki hydrograficzne, parametry fizyczne jak i biologiczne zawiesin. Wiele wyników pracy potwierdza wcześniejsze obserwacje, często przedstawiając je w wyższej rozdzielczości i bardziej wieloaspektowo. Za najcenniejsze wyniki uważam dane dotyczące wykorzystania nowoczesnych optycznych technik badawczych (np. LISST, LOPC) do jakościowej i ilościowej oceny zawiesin, które w połączeniu ze standardowymi analizami próbek pobranych siecią planktonową dają możliwość wglądu w półilościowy rozkład różnych rodzajów organizmów planktonicznych z głębokością.

Do niedawna dominującym trendem w badaniach zawiesin było ich osobne badanie przez sedymentologów czy geologów morza (głównie pod kątem zawiesin mineralnych) i biologów (pod

kątem planktonu). Za bardzo cenne uważam próbę połączenia tych podejść. Z pewnością ważnym i w pewnym sensie pionierskim krokiem jest próba podjęcia modelowania złożonego ekosystemu zatok lodowcowych. Zagadnienie to z pewnością wymaga rozwinięcia w przyszłości, jednak przedstawiona próba wskazuje na potencjalne możliwości i wyzwania w zastosowaniu podejścia modelowego.

Pomimo generalnie pozytywnej oceny pracy należy jednak zwrócić uwagę na pewne kwestie dyskusyjne, pomniejsze uchybienia jak również nasuwające się pytania. Tych ostatnich jest wiele, co wskazuje na to jak interesujący jest przedmiot badań, poniżej odniosę się jednak jedynie do niektórych.

1) W przedstawionej rozprawie rzetelnie i przejrzysto przedstawione są wkłady poszczególnych autorów w powstanie poszczególnych publikacji. Wynika z nich, że Doktorantka była główną autorką publikacji, napisała większość tekstu, wykonała większość ilustracji i analiz statystycznych. Jednak, praktycznie nie uczestniczyła w pozyskiwaniu danych. Dotyczy to zarówno badań terenowych jak i laboratoryjnych. Uważam to za pewną słabość procesu kształcenia Doktorantki. Rzetelna ocena danych, ich jakości i ograniczeń jest czasem trudna bez samodzielnego wykonania takich badań. Oczywiście współcześnie nie ma właściwie możliwości by doktorantka czy doktorant samodzielnie wykonywał wszystkie badania w tego typu pracach. Niemniej w ocenianym przypadku Doktorantka poza pracami nad modelowaniem zaprezentowanymi w pracy [4], nie była odpowiedzialna za przeprowadzanie żadnych badań. Nie brała też udziału w badaniach terenowych, co zwłaszcza w pracy mającej ambicje kompleksowego podejścia do złożonego środowiska polarnego uważam za pewną niedogodność i częściowo tym tłumaczę pewne niedociągnięcia w dyskusji, doborze stacji do badań terenowych, czy selekcji danych do modelowania.

2) Doktorantka wykazuje się generalnie dobrą znajomością literatury przedmiotu. Brakuje mi jednak w przedstawionych pracach porównania z wcześniejszymi pracami, które pozwoliłoby lepiej ocenić reprezentatywność uzyskanych wyników. Większość przedstawionych wyników to detaliczne ale pojedyncze pomiary wykonane latem. Warto by je skonfrontować (np. pod względem całkowitej zawartości zawiesin) z wcześniejszymi pracami, gdzie koncentracja zawiesin często była badana zarówno w kontekście zmian przestrzennych jak i sezonowych. Takie dane są dostępne zarówno dla Kongsfjorden, Billefjorden, Adventfjorden czy Hornsundu. Do wielu z tych prac Doktorantka odnosi się w artykułach ale w innym kontekście. Takie porównanie pozwoliłoby lepiej ocenić na ile analizowane sytuacje są typowe dla danych środowisk czy pór roku, a co za tym idzie na ile wyselekcjonowane stacje badawcze są reprezentatywne dla badanych zjawisk. Na przykład, maksymalne koncentracje zawiesin, które zmierzono w zatokach przylodowcowych w badanych stanowiskach są $<10 \text{ g/m}^3$ [praca 2], podczas gdy zwykle są one wyższe, rzędu kilkudziesięciu a nawet kilkuset g/m^3 (np. Zajączkowski 2010, Szczuciński i Zajączkowski 2012, Moskalik i in. 2018).

3) W przedstawionych pracach wybór stacji badawczych był zwykle argumentowany dominacją, któregoś z czynników (np. wód ablacyjnych z lodowca bądź rzeki lodowcowej). Jednak bliższa analiza wyboru poszczególnych stacji budzi pewne wątpliwości. Na przykład, w pracy [1] użyteczne by było dodanie jednej stacji w centralnej, bądź przujściowej części fiordu. Warto zaznaczyć, że stacja ISF3 – mająca być w pewnym sensie punktem odniesienia jest w rejonie wpływu zawiesiny dostarczanej z Gipsdalselvy czy Sassenfjorden (widoczne jest to między innymi na zamieszczonym w materiałach uzupełniających zdjęciu satelitarnym). W pracy [1], porównującej dane z wielu lat, nie podano współrzędnych stacji pomiarowych. Na ile były one rzeczywiście w dokładnie tych samych miejscach? Ma to znaczenie szczególnie w kontekście stacji w Adolfsbukcie (Billefjorden), w pobliżu czoła lodowca Nordenskiöld, który podlega recesji a co za tym idzie, przy

stałym położeniu stacji, z roku na rok znajdowała się ona dalej od czoła lodowca - głównego źródła zawiesin. Ten aspekt nie został podjęty w dyskusji.

Z kolei w pracy [2] rozkład stacji w poszczególnych zatokach wydaje się dość przypadkowy. W Adventfjorden są one wzdłuż osi fiordu w dość regularnych odstępach, podczas gdy w porównywanych ze sobą zatokach lodowcowych w wewnętrznych częściach Billefjorden i Tempelfjorden, traktowanych jako przykłady różnych typów lodowców uchodzących do morza, stacje pomiarowe są dość nieregularnie rozmieszczone i co najważniejsze, znajdują się w różnych odległościach od czoł lodowców.

W Billefjorden stacje znajdują się w odległościach 1,9 do 4,7 km od czoła lodowca, przy czym stacja zlokalizowana najbliżej znajduje się zaledwie 1 km od ujścia lateralnej rzeki lodowcowej, której efekt nie jest dyskutowany w artykule (Billefjorden jest traktowany jako „typowy” przypadek lodowca uchodzącego do morza). Co więcej, dane z tej stacji (IB2), na której zanotowano najwyższe koncentracje zawiesin i będącej najbliżej czoła lodowca i ujścia rzeki lodowcowej, zatem będącej najbardziej reprezentatywną dla badanego problemu, została uznana, za odstającą („outlier”) i była wyłączona z analiz statystycznych. Stacja pośrednia jest z kolei zlokalizowana w części zatoki właściwie odciętej od bezpośredniej dostawy z lodowca, którego zasięg w północnej części aktualnie kończy się na lądzie, bądź w bardzo płytkich wodach i trudno ją uznać za typową dla środowiska zatoki lodowcowej o dużej dostawie zawiesin. Z kolei w Tempelfjorden, najbardziej proksymalna stacja znajduje się 4 km od czoła lodowca zaś dwie następne są obok siebie i znajdują się około 7 km od czoła lodowca. Sedymentacja z zawiesin dostarczanych przez lodowce i rzeki lodowcowe generalnie spada wykładniczo z odległością od źródła – ten istotny aspekt nie jest dyskutowany w artykułach a ma duże znaczenie dla zrozumienia ilości i rozmieszczenia zawiesin.

Dotychczasowe badania sedymentacji we fiordach wskazują, że w odległości od kilkuset metrów do kilku km od ujścia rzeki lodowcowej bądź wypływu subglacjalnego z lodowca uchodzącego do morza natężenie sedymentacji spada nawet o kilka rzędów wielkości, co w oczywisty sposób wpływa na charakter i koncentrację zawiesiny. Ten aspekt jest bardzo istotny dla koncentracji zawiesin, ich sedymentacji i musi być uwzględniony przy porównywaniu ze sobą różnych środowisk / zatok. Ma on również bardzo duże znaczenie dla modelowania, gdyż tempo akumulacji ma kluczowe znaczenie np. dla pogrzebienia węgla (wzrost tempa akumulacji zwiększa efektywność tego procesu), jednak w artykule [4], nie znalazłem jednoznacznej informacji czy zostało to w jakikolwiek sposób ujęte w modelu. A przecież, dla modelowanych stacji, zmiana koncentracji zawiesin i tempa akumulacji osadów jest nie tylko funkcją zmian w dostawie zawiesin do fiordu ale też odległości od źródła, która w przypadku niektórych stacji zmieniła się nawet o 10 km dla analizowanego okresu. Z odległością od źródła zmieniają się również rozmiary cząstek zawiesin i generalnie spada ich tempo sedymentacji (opadania). Oczywiście, modelowanie wymaga zastosowania uproszczeń, niemniej uzyskanie wartościowego modelu wymaga krytycznego uwzględnienia aspektów związanych z sedymentacją zawiesin i ich przestrzenną zmiennością.

4) Doktorantka wielokrotnie wspomina o negatywnym wpływie wód roztopowych niosących zawiesiny oraz o ich coraz większym zasięgu i ilości w kontekście ocieplania się klimatu. Jest to dość modny obecnie temat ale zachęcałbym Doktorantkę do podjęcia bardziej krytycznej dyskusji tego zagadnienia. Po pierwsze, wielokrotnie podkreślane jest, że zawiesiny dostarczane z wodami roztopowymi mają negatywny wpływ, nawet na komercyjne połowy ryb (czy takie są prowadzone w zatokach lodowcowych we fiordach?). W artykułach powtarzane są poglądy o negatywnym wpływie, bez uszczegółowienia lub na dużym poziomie ogólności. W przyrodzie każda zmiana powoduje pewne konsekwencje, dla jednych organizmów będą one miały negatywny wpływ dla innych zaś

pozytywny. W przypadku wód roztopowych, które niosą też wiele krytycznych mikroskładników (np. żelazo), często spotyka się również pogląd, że sprzyjają użyźnieniu wód polarnych. Z narracji w kolejnych artykułach można również odnieść wrażenie, że warunki o ograniczonym dostępie światła występujące w bogatych w zawieszinę zatokach lodowcowych są czymś nowym. Warto jednak zaznaczyć, że ten rodzaj środowiska istniał i będzie istniał, dyskusji zaś ewentualnie podlega zasięg występowania typowych dla tego środowiska warunków czy intensywność oddziałujących procesów. Kwestia ewentualnego zwiększenia zasięgu takich warunków nie była poddana pogłębionej dyskusji, a w kontekście zachodzącej powszechnie recesji lodowców wcale nie musi być tak istotnym problemem. Jeżeli spojrzeć na środowiska fiordów Spitsbergenu w szerszej perspektywie czasowej to obserwujemy dla okresów cieplejszych (np. środkowy holocen) znacznie niższe tempa akumulacji osadów wynikające zapewne również z niższej dostawy zawieszin mineralnych.

Niezależnie od subiektywnej oceny dyskutowanej zmiany, warto również pochylić się nad jej istotą: wzrostem koncentracji zawieszin mineralnych w wodach powierzchniowych. Koncepcja ta nie jest zbyt dobrze udokumentowana. Czy taki wzrost istotnie obserwujemy? Czy w dłuższej perspektywie czasowej postulowane zmiany muszą istotnie zachodzić? Recesja lodowców uchodzących do morza powoduje, że oddala się główne źródło zawieszin, zaś recesja lodowców na ląd powoduje, że część niesionego ładunku jest pozostawiona na lądzie oraz przede wszystkim w deltach. Niestety dane monitoringowe dotyczące zawieszin we fiordach polarnych są niezwykle skąpe. W tym kontekście szczególnie szkoda, że nie został wykorzystany potencjał danych w pracy [1], gdzie prezentowane są dane z siedmiu kolejnych lat. Brakuje niestety tam pomiarów całkowitej zawartości zawiesziny, zaś przedstawione pomiary nie są dyskutowane w kontekście międzyletniej zmienności koncentracji zawiesziny mineralnej. Z kolei w pracy [4] przedstawione są dane, częściowo za Moskalikiem i innymi (2018) z sześcioletniego monitoringu zawieszin w Hansbukcie (Hornsund). Warto zwrócić uwagę, że te wartości (Fig. 3) wyraźnie maleją a nie rosną. Autorzy wnioskujeją na podstawie korelacji z danymi meteorologicznymi i hydrologicznymi, że w analizowanym dłuższym okresie czasu zawartość zawieszin mineralnych wzrosła w trakcie ostatnich czterech dekad. Należy jednak zwrócić uwagę na szereg ograniczeń zastosowanego podejścia. Po pierwsze nie wzięto pod uwagę zmian odległości od czoła lodowca (jak wcześniej wspomniałem, szereg prac wskazuje na spadek koncentracji zawieszin z odległością ze względu na procesy sedymentacji). W przypadku lodowca Hansa, recesja czoła była umiarkowana, niemniej mogła wpływać na obserwowany trend malejący. W przypadku innych stacji we wnętrzu fiordu gdzie tempo recesji lodowców jest znacznie szybsze ten czynnik nie jest zaniedbywalny. Aplikacja danych z zatoki Hansbukta ma jeszcze inne ograniczenia, dyskutowane częściowo w artykule Moskalika i in. (2018) a dotyczącą większą ekspozycją tej zatoki na falowanie, a w związku z tym resuspensją osadów – czynnik, zapewne o mniejszym znaczeniu w przypadku bardziej osłoniętych zatok, jak na to wskazują dane z Adolfsbukta w Billefjorden.

5) Aspektem, który jest dość istotny a nie wybrzmiał w pierwszych 3 pracach jest sedymentacja zawieszin. Istotne jest bowiem nie tylko jaka jest wielkość dostarczanej zawiesziny i ich koncentracja ale również jak szybko jest ona usuwana z kolumny wody. W zaprezentowanych pracach dokumentowany jest stan chwilowy zawieszin, jednak zwłaszcza w przypadku zawieszin mineralnych ulegają one stałej sedymentacji (będącej funkcją rozmiaru i różnicy gęstości), która może być zaburzona granicami gęstościowymi, turbulencją (zmienna np. w związku z różnymi fazami pływów) i przyspieszona przez takie procesy jak flokulacja. Te ważne zagadnienia, choć były wspomniane kilkakrotnie jako mające potencjalnie istotne znaczenie ale nie były poddane szerszej

dyskusji. Uzyskane dane mają bardzo duży potencjał aby dać wgląd w aspekt flokulacji i można jedynie liczyć, że w przyszłości ten ważny kierunek badań zostanie podjęty przez Doktorantkę.

4. Uwagi końcowe

Przedstawiona rozprawa doktorska Pani mgr inż. Marleny Szeligowskiej wskazuje na bardzo dobre opanowanie metod analizy danych, umiejętności rozwiązywania problemów badawczych, prowadzenia dyskusji i prezentacji wyników w postaci dobrych artykułów naukowych. Autorka wykazuje również dobrą znajomość literatury przedmiotu, podejmuje krytyczną dyskusję danych i zestawia je z wynikami osiągniętymi przez innych badaczy, a uzyskane wyniki stanowią ciekawy wkład we współcześnie szeroko dyskutowane problemy.

Uważam, że **przedstawiona do recenzji praca spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim**. Stanowi ona istotny, nowy wkład do dotychczasowej wiedzy i dowodzi, że Pani magister inżynier Magdalena Szeligowska opanowała umiejętność prowadzenia samodzielnych badań naukowych. Recenzowana praca spełnia zatem wymagania określone w "Ustawie o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki" z dnia 14 marca 2003 r. (Dz. U. z 2014r. poz.1852 i z późn. zm.). Tym samym wnioskuję o dopuszczenie magister inżynier Marleny Szeligowskiej do dalszych etapów przewodu doktorskiego.



Witold Szczuciński