

Streszczenie

W ciągu ostatnich czterdziestu lat Arktyka ocieplała się około cztery razy szybciej niż średnia światowa, co jest zjawiskiem znanym jako amplifikacja arktyczna lub polarna. Morze Barentsa i archipelag Svalbard są regionalnymi punktami ciepła, co znacząco wpłynęło na ich stan fizyczny i biologiczny. Najbardziej widoczne konsekwencje zmiany klimatu w tym regionie polarnym to zwiększony wpływ ciepłej wody atlantyckiej, zmniejszenie sezonowej pokrywy lodowej i cofanie się lodowców oraz intensyfikacja spływu wód roztopowych. Fiordy na zachodnim wybrzeżu Spitsbergenu, który jest największą wyspą archipelagu Svalbard, są szczególnie dotknięte tymi dynamicznymi procesami, w wyniku czego równoważą reżim atlantycki, arktyczny, słono- i słodkowodny. Obecne przemiany polarnych stref przybrzeżnych mają wpływ na zbiorowiska pelagiczne, w szczególności na strukturę wielkościową i tempo produkcji pierwotniaków i zooplanktonu, które stanowią podstawę morskiej sieci troficznej i odzwierciedlają ilość i jakość pokarmu dostępnego dla wyższych poziomów troficznych. Ma to konsekwencje zarówno dla rybołówstwa komercyjnego, jak i charyzmatycznych gatunków polarnych, a także dla usług ekosystemowych, takich jak sekwestracja dwutlenku węgla.

Procesy zachodzące w polarnych wodach przybrzeżnych mają często przeciwstawny charakter, w szczególności ze względu na zmiany reżimu światła. Podczas gdy zanik lodu morskiego skutkuje lepszą penetracją światła w kolumnie wody i wzrostem produktywności oceanów, zintensyfikowany dopływ wód roztopowych pochodzących z lodowców przenosi więcej materii z lądu, co w efekcie zmniejsza przezroczystość wody morskiej oraz zwiększa tempo sedymentacji, zwłaszcza latem. Chociaż ostateczny zanik sezonowego lodu morskiego spowoduje, że zakwity fitoplanktonu będą ograniczone przez cykl dnia i nocy polarnej, spływ wody roztopowej dostarczającej rozpuszczoną i zawieszoną materię do strefy przybrzeżnej latem zyska większe znaczenie w przyszłości. Ciemne strumienie wód roztopowych będą rozprzestrzeniać się coraz dalej od źródła co oznacza, że wpłyną na znacznie większą niż obecnie część środowiska fiordowego. W związku z tym głównym celem tej pracy doktorskiej składającej się z czterech artykułów było zbadanie wpływu letnich zrzutów wody roztopowej i materii z lądu na rozmieszczenie i funkcjonowanie planktonu [1,2,3] oraz powiązanie ich z losami tej produkcji - zagrzebywaniem węgla w osadach [4]. Dynamikę rozmieszczenia planktonu badano w perspektywie przestrzennej [1,2,3,4], ale także czasowej [1,4]. W pierwszej części pracy uzyskano wysoką rozdzielczość przestrzenną i taksonomiczną dzięki zastosowaniu komplementarnych metod: tradycyjnego próbkowania planktonu [1,2,3], optycznych liczników cząstek [1,2,3] i kamer podwodnych [2,3], natomiast druga część pracy wykraczała poza sezon

letni i skupiła się na zintegrowanym podejściu do badań planktonu przy użyciu sprzężonego modelu fizyczno-biogeochemicznego [4].

W pierwszym artykule przedstawiono badania frakcji nano-, mikro- i mezoplanktonu oraz odpowiadających im frakcji wielkościowych cząstek wzdłuż gradientu hydrograficznego w największym fiordzie Zachodniego Spitsbergenu - Isfjorden - na przestrzeni siedmiu kolejnych lat (2013-2019) [1]. Takie badania monitoringowe są szczególnie ważne w kontekście spodziewanej restrukturyzacji arktycznych zbiorowisk planktonowych w kierunku coraz większego udziału małych osobników. Uzupełniają one luki w wiedzy dotyczącej względnych ról poszczególnych frakcji wielkościowych planktonu i cząstek w odniesieniu do struktury hydrograficznej. Występowanie gradientu środowiskowego, kształtowanego przez adwekcję słonych wód pochodzenia atlantyckiego do centralnej części Isfjorden oraz spływ wody słodkiej z lodowców w zatokach wewnętrznych, było powtarzalne w badanych latach [1]. Zaobserwowano wzrost ilości cząstek największej frakcji od basenu głównego w kierunku wód przylodowcowych, przy jednoczesnym spadku liczebności zooplanktonu, co wskazuje na znaczny udział agregatów morskich w zatoce [1].

W drugim artykule opisano horyzontalne gradienty rozmieszczenia planktonu i cząstek w Isfjorden, gdzie lodowce będące na różnych etapach cofania się, tj. uchodzące do morza oraz znajdujące się całkowicie na lądzie, uwalniają wodę roztopową tworząc strefy o niskiej przezroczystości wody. Zaobserwowano znaczne różnice przestrzenne wzdłuż fiordów arktycznych od wewnętrznych zatok przylodowcowych do głównego basenu pod względem temperatury, zasolenia, stratyfikacji kolumny wody, ilości cząstek zawieszonych, a także ilości oraz składu fitoplanktonu i zooplanktonu latem 2019 roku [2]. To kompleksowe badanie górnej 50-metrowej warstwy wody wykazało wyraźny podział między wodami o niskiej przezroczystości będącej pod wpływem lodowców i rzek, a czystymi, otwartymi wodami fiordów, na które w znacznym stopniu wpływa adwekcja planktonu związanego z wodą atlantycką [2]. Pierwszy typ wód charakteryzował się ograniczonymi głównie do powierzchni pikami chlorofilu *a* oraz wysoką koncentracją agregatów morskich i zawiesiny nieorganicznej, podczas gdy te drugie charakteryzowały się wyższą przezroczystością, głębokimi podpowierzchniowymi pikami chlorofilu *a* oraz wysoką liczebnością i różnorodnością organizmów planktonowych. Wystąpiły statystycznie istotne różnice w liczebności okrzemek, wiciowców, mezozooplanktonu i galaretowatego zooplanktonu między wodami o niskiej przezroczystości a czystymi, ale nie zaobserwowano statystycznych różnic w liczebności mikrozooplanktonu, co sugeruje, że ta frakcja może być lepiej przystosowana [2].

Pogorszenie warunków świetlnych może mieć wpływ nie tylko na horyzontalne, ale i na wertykalne rozmieszczenie zooplanktonu. W związku z tym w trzecim artykule przeanalizowano wpływ różnych reżimów przezroczystości wody na rozmieszczenie widłonogów w kolumnie wody, wraz z ich preferowanym pokarmem oraz podążającymi za nimi drapieżnikami w czterech regionach przybrzeżnych Zachodniego Spitsbergenu latem 2019 roku [3]. Liczne badania pokazały, że podczas arktycznego lata znaczna część zooplanktonu koncentruje się blisko powierzchni wody, aby maksymalnie wykorzystać krótki sezon produkcyjny. Artykuł ten skoncentrował się na widłonogach z rodzaju *Calanus*, który jest definiowany jako głównie roślinożerny, stanowiąc zasadniczą bazę pokarmową dla żebroplawów, ryb, ptaków morskich i ssaków morskich. Jest zatem jednym z najlepszych dostępnych ogniskowych elementów ekosystemu (FEC) do monitorowania struktury zooplanktonu. Widłonogi *Calanus* gromadzą rezerwy lipidów na diapauzę przed sezonowym zejściem do głębszych, bardziej stabilnych warstw wody, aby przetrwać zimę i uniknąć presji ze strony drapieżników. W pracy tej postawiono hipotezę, że w wodzach przylodowcowych o niskiej przezroczystości struktura rozmieszczenia *Calanus* spp. może ulec zmianie ze względu na ograniczoną głębokość strefy eufotycznej, powodującą zmiany w składzie i rozmieszczeniu pierwotniaków. Badania te potwierdziły, że niezależnie od regionu, przezroczystość wody morskiej była istotnym czynnikiem kształtującym pionowe rozmieszczenie nie tylko *Calanus* spp., ale także towarzyszących im drapieżników należących do galaretowatego zooplanktonu [3].

Zaciemnienie wód przybrzeżnych spowodowane dostarczaniem cząstek zawieszonych z lądu było sugerowane jako czynnik zwiększający sukces drapieżników kontaktowych (tactile predators), takich jak galaretowaty zooplankton, w porównaniu z drapieżnikami wizualnymi (visual predators). Niemniej jednak dwie niezależne metody (UVP i kamera cyfrowa) zastosowane w tej pracy wykazały, że galaretowaty zooplankton był mniej liczny w wodach o niskiej przezroczystości, co potwierdza wniosek, że zwierząt tych jest mało w strefie przylodowcowej [2,3]. W obrębie planktonu kontaktowe drapieżniki były najbardziej reaktywne na pogarszające się warunki życia, a ciemne strumienie wód roztopowych mogły wpływać na nie przez zmniejszenie bazy pokarmowej i zatykanie lepkich czułków agregatami morskimi [2,3]. Prace te doprowadziły do wniosku, że warto uwzględnić galaretowaty zooplankton w modelach biogeochemicznych, ponieważ mogą one pełnić funkcję wskaźników warunków życia planktonu.

Pomimo zaobserwowanych w tej pracy różnic między wodami o niskiej przezroczystości i czystymi, zmiany warunków środowiskowych wzdłuż gradientu horyzontalnego nie były liniowe, co wskazuje, że związek między dynamiką topniejących lodowców a dynamiką planktonu

jest pochodną złożonych interakcji i procesów fizycznych zachodzących w różnych skalach czasoprzestrzennych [1,2,3]. Na przykład prądy pływowe spowodowały akumulację planktonu i cząstek w wirach w rejonie wysp Gåsøyane (Isfjorden), co zaobserwowano na zdjęciach satelitarnych, ale także jako lokalne obniżenie powierzchni wody w rozkładzie temperatury i zasolenia oraz w postaci zmierzonej w tym rejonie wysokiej liczebności cząstek i planktonu [1]. Co więcej, wraz ze zwiększoną retencją strumieni z lądu w zamkniętych i płytkich zatokach, takich jak Tempelfjorden, warunki życia planktonu uległy wyraźnemu pogorszeniu i proces ten może postępować, ponieważ ciągle cofanie się lodowców uchodzących do morza powoduje stosunkowo szybkie rozszerzanie się odnóg fiordów oddzielonych od wymiany wody z głównym basenem. [2].

Dopiero niedawno fiordy z uchodzącymi do nich lodowcami zostały uznane za wyjątkowe ekosystemy, które mogą mieć wpływ na globalny obieg węgla. Co ważne, lodowce cofają się w głąb lądu, stopniowo poszerzając powierzchnię wolnych od lodu wód przybrzeżnych, które mogą być natychmiast zasiedlane przez organizmy pelagiczne. Jednak coraz bardziej intensywne dostarczanie nieorganicznej materii zawieszanej wraz z wodą roztopową może znacznie zmniejszyć potencjał tego nowopowstającego siedliska. Tym samym ostatni manuskrypt jest obszerną pracą obejmującą wiele aspektów łączących ocean, ląd i lód w dobrze zbadanym fiordzie Zachodniego Spitsbergenu - Hornsundzie. W szczególności ocenia on potencjalne zyski i straty w pierwotnej i wtórnej produkcji planktonu, a także w zagrzebywaniu węgla w wyniku cofania się lodowców uchodzących do morza i zwiększonego dopływu nieorganicznej materii zawieszanej wraz z wodą roztopową. W tym celu nowe wolne od lodu siedliska morskie zostały zmapowane od 1976 roku na podstawie zdjęć satelitarnych, a dynamikę ekosystemu symulowano za pomocą jednowymiarowego sprzężonego modelu fizyczno-biogeochemicznego [4]. Nowo wdrożony komponent - nieorganiczna materia zawieszona - został sparametryzowany na podstawie danych z 6-letniego monitoringu z Hansbukty. W symulacjach wykazano, że pogorszenie warunków świetlnych wywołane przez tę grupę funkcyjną opóźnia zakwit i zmniejsza biomasę fitoplanktonu, zooplanktonu i makrobentosu. Chociaż pierwotna i wtórna produkcja planktonu oraz zagrzebywanie węgla były zmniejszone przez wprowadzane cząstki nieorganiczne, nowe zatoki lodowcowe nadal znacząco przyczyniały się do wychwytywania i magazynowania węgla przez plankton oraz zagrzebywania go w osadach. Zakładając, że przyszła dynamika ekosystemów i potencjał magazynowania węgla przez fiordy polarne będą konsekwencją długofalowych zmian stanu fizycznego, wyniki symulacji dla lat 2005-2009, czyli okresu o wyjątkowo silnym sygnale ocieplenia, przedstawiono w kontekście wieloletnich zmian w powierzchni fiordów, a także czasu trwania sezonowej pokrywy lodowej i długości sezonu topnienia oraz potencjału topnienia [4].

Przedstawiona praca doktorska jest przykładem multidyscyplinarnych badań wykorzystujących wiele metod, które prowadzone były w przybrzeżnym środowisku morskim europejskiej Arktyki [1,2,3,4]. Zrozumienie wpływu, jaki obecne zmiany wywierają na przyłodowcowy ekosystem morski ułatwiły pomiary z laserowych liczników cząstek i kamer podwodnych [1,2,3]. Charakteryzują się one wysoką rozdzielczością porównywalną z pomiarami parametrów fizycznych i nie ograniczają się do arbitralnie zdefiniowanych warstw wody jak przy pobieraniu próbek m.in. siecią planktonową czy batometrami [1,2,3]. Jednoczesne, interdyscyplinarne badania o wysokiej rozdzielczości z zakresu hydrologii, optyki oraz agregatów morskich i planktonu są kluczowe do opracowania koncepcyjnych modeli złożonych odpowiedzi ekosystemów na zmiany środowiskowe. Jest to szczególnie ważne w przypadku polarnych wód przybrzeżnych, ponieważ spływ wód roztopowych tworzy różne siedliska i gradienty środowiskowe w stosunkowo małych skalach przestrzennych, co prowadzi do nierównomiernego rozmieszczenia planktonu i agregatów morskich. Nowe nieinwazyjne technologie obrazowania mogą być kalibrowane przy użyciu bardziej tradycyjnego próbkowania i są dodatkowo wspomagane przez teledetekcję i modelowanie numeryczne, co prowadzi do większego pokrycia przestrzennego i czasowego, automatyzacji analizy danych oraz zmniejszenia śladu węglowego prowadzenia badań w odległych lokalizacjach, takich jak regiony polarne.

Przedstawione w niniejszej pracy szczegółowe badania dynamiki rozmieszczenia planktonu i cząstek w okresie letnim ukazały złożoność ekosystemu wód przybrzeżnych ze względu na wielowymiarowe interakcje pomiędzy atmosferą, oceanem, lodem i lądem [1,2,3]. Pomimo wysiłków mających na celu rozpoznanie wpływu różnych czynników na te systemy i ich przyszły stan, wiele aspektów transformacji ekosystemów morskich pozostaje niepewnych, a ich efekty netto są z natury trudne do przewidzenia. W Arktyce, lodowce uchodzące do fiordów znajdują się w różnych stadiach recesji i często wykazują zróżnicowane zależności między spływem wód roztopowych a produktywnością, dlatego nie powinno się generalizować skutków zmian klimatycznych na podstawie pojedynczych badań. W związku z tym potrzebne są dane z wieloletniego monitoringu o odpowiedniej rozdzielczości przestrzennej i czasowej [1,4] dla lepszej parametryzacji i walidacji modeli numerycznych oraz dla tworzenia wiarygodnych prognoz. Pomimo pewnych ograniczeń zastosowanych metod, idee przedstawione w niniejszej pracy mogą ukierunkować przyszłe badania, ponieważ istnieje nieunikniona potrzeba wprowadzenia większej liczby elementów do tego już multidyscyplinarnego podejścia. Model wdrożony w ramach tej pracy będzie rozwijany w celu uzyskania bardziej realistycznych symulacji efektów netto transformacji polarnych wód przybrzeżnych i ich roli w globalnym obiegu węgla.

List of research papers:

1. **Szeligowska M.**, Trudnowska E., Boehnke R., Dąbrowska A.M., Wiktor J.M., Sagan S. and Błachowiak-Samołyk K., 2020. Spatial patterns of particles and plankton in the warming Arctic Fjord (Isfjorden, West Spitsbergen) in seven consecutive mid-summers (2013–2019). *Frontiers in Marine Science*, 7, p.584.
2. **Szeligowska M.**, Trudnowska E., Boehnke R., Dąbrowska A.M., Dragańska-Deja K., Deja K., Darecki M. and 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.
3. **Szeligowska M.**, Trudnowska E., Boehnke R. and Błachowiak-Samołyk K., 2022. Dark plumes of glacial meltwater affect vertical distribution of zooplankton in the Arctic. *Scientific Reports*, 12(1), p.17953.
4. **Szeligowska M.**, Benkort D., Przyborska A., Moskalik M., Moreno B., Trudnowska E. and Błachowiak-Samołyk K., Blue carbon estimates in Hornsund, an expanding Arctic fjord affected by dark plumes of glacial meltwater, submitted to *Global Change Biology*