

Cele naukowe rozprawy

Głównym celem pracy było zbadanie charakterystyki cząstek uwalnianych do fiordów przez topniejące lodowce, określenie ich wpływu na proces produkcji pierwotnej oraz weryfikacja hipotezy o postępującym spadku przezroczystości wód w fiordzie Kongsfjord na skutek zwiększonej emisji cząstek z lodowców i zmianach w produkcji pierwotnej, określanym powszechnie w literaturze jako „zaciemnianie wód” (Aksnes et al. 2009; Konik et al. 2021). W warstwie metodycznej pracy opracowano i zastosowano sposób połączenia pomiarów in situ, obserwacji satelitarnych i danych meteorologicznych w celu zdalnego określania koncentracji zawiesin w fiordach Spitsbergenu i oceny tych zmian w skali długoterminowej. Jednocześnie wykorzystanie w pracy technik uczenia maszynowego otworzyło możliwość wykorzystania wszystkich dostępnych danych satelitarnych o wysokiej rozdzielczości w celu dokładniejszego scharakteryzowania przestrzennej i czasowej zmienności koncentracji materii zawieszonych.

W przedstawionej rozprawie wyznaczono i osiągnięto trzy główne cele:

1. Opisanie przestrzennej zmienności cząstek zawieszonych w wodach fiordów Spitsbergenu poprzez scharakteryzowanie składu mineralnego, koncentracji cząstek zawieszonych, proporcji materii organicznej do mineralnej oraz rozkładu wielkości cząstek w bezpośrednim sąsiedztwie źródła zawiesiny jakim są poszczególne lodowce zarówno kończące się na morzu jak i na lądzie.
2. Określenie wpływu wód roztopowych z lodowców na ilość materii organicznej produkowanej w sezonie letnim i ocena tego wpływu na obserwowane zmiany przestrzenne procesu produkcji pierwotnej w fiordach Spitsbergenu zarówno na powierzchni jak i w słupie wody.
3. Opracowanie algorytmu zdalnego monitoringu koncentracji cząstek zawieszonych w fiordach Spitsbergenu oraz modelowania średniej koncentracji cząstek dla każdego dnia sezonu letniego w celu oceny procesu zaciemniania wód w długoterminowej skali czasowej.

Rezultaty

Region Arktyki przechodzi znaczące przemiany środowiskowe spowodowane zmianami klimatycznymi, które mają głęboki wpływ na lodowce i tym samym na ekosystemy morskie. Jednym z efektów tych zmian jest zwiększony dopływ cząstek zawieszonych powodowanych przyspieszającym topnieniem lodowców. Niniejsze podsumowanie

syntetyzuje wyniki trzech artykułów badawczych poświęconych temu zagadnieniu, które składają się na niniejszą rozprawę doktorską.

Publikacja nr 1

Dragańska-Deja, Katarzyna. 2024. “Characterization of Suspended Particles at Different Glacial Bays at Spitsbergen.” *Oceanologia* 66(2):239–49. doi: <https://doi.org/10.1016/j.oceano.2023.12.001>.

Celem pierwszego artykułu było charakteryzowanie zawieszonych cząstek w przybrzeżnych wodach zatok lodowcowych w fiordach zachodniego wybrzeża Spitsbergenu. Wykorzystując laserowy analizator wielkości cząstek (LISST 100X) oraz techniki rentgenowskie (XRD), określono rozkład wielkości cząstek (PSD) i szczegółowy skład mineralogiczny zawiesin występujących w różnych zatokach lodowcowych jak również zmienność przestrzenną koncentracji tych zawiesin. Zbadanych zostało osiem zatok lodowcowych w Hornsundzie i cztery w Kongsfjordzie, co pozwoliło na kompleksowe porównanie zawiesin uwalnianych przez topniejące lodowce a wyniki porównano z danymi geologicznymi dotyczącymi podłoża skalnego występującego w bliskości badanych lodowców.

Wyniki pracy pokazują, że koncentracja materii organicznej (POM) jest znacznie niższa w pobliżu klifów lodowcowych w porównaniu z koncentracją materii nieorganicznej (PIM), która stanowi od 82,5% do 97,9%. W procesie eksportu zawiesiny wykazano zauważalny spadek koncentracji SPM w warstwie powierzchniowej wody w kierunku od źródła wód roztopowych. W kontekście zmian klimatycznych szczególną uwagę należy zwrócić na minerały węglanowe w zawieszynie. CaCO_3 , będący wysoce mobilnym związkiem chemicznym, może odgrywać znaczącą rolę w obiegu gazu cieplarnianego CO_2 . W zatokach Gashamna, oraz w pobliżu Korberbreen i Samarinvagen, analiza XRD wykazała wysoką zawartość minerałów węglanowych, co przypisuje się erozji wczesnoordowickich skał węglanowych przez lodowce. Choć skały węglanowe występują również w pobliżu Paierlbreen, ich analiza mineralogiczna wykazała tylko 8% kalcytu wagowo i mniej niż 2% dolomitu. Skład mineralogiczny badanych zatok lodowcowych znacznie się różni ze względu na różnice w geologii podłoża lodowcowego, wieku i szybkości erozji. W pracy zaobserwowano, że charakterystyki mediany wielkości cząstek w różnych zatokach lodowcowych różnią się w zależności od dominacji odmiennych składów mineralogicznych. Wskazuje to na różnice między osadami lodowcowymi pod względem osiadania cząstek, agregacji i składu cząstek.

Opisywana praca dostarcza cennych informacji na temat zmienności wielkości cząstek oraz dominacji cząstek mineralnych pochodzących z topnienia lodowców. Wyniki te są

kluczowe dla poprawy dokładności modeli optycznych używanych w teledetekcji oraz dla przewidywania ekologicznych skutków zwiększonej koncentracji zawiesiny. Dostarczanie składników odżywczych z topniejących lodowców wpływa także na produktywność pierwotną.

Publikacja nr 2

Dragańska-Deja, Katarzyna, Joanna Stoń-Egiert, Józef Wiktor, and Mirosława Ostrowska. 2024. "Productivity of Spitsbergen Fjords Ecosystems in Summer Spatial Changes of in Situ Primary Production in Kongsfjorden and Hornsund in the Period 1994-2019." *Ecology and Evolution* 14:e11607.

Artykuł poświęcony jest zbadaniu wpływu wód roztopowych z lodowców na produktywność pierwotną w arktycznych fiordach. Określono zmienność produkcji pierwotnej w trzech różnych regionach fiordów: blisko lodowców, w wewnętrznej części oraz w zewnętrznej strefie w arktycznych fiordach Spitsbergenu. Unikalne, wieloletnie dane in situ pozwoliły na kompleksowe opisanie zmienności letniej produkcji pierwotnej w regionie fiordów oraz jej zależności od przestrzennych zmian środowiskowych. Powierzchniowa wartość produkcji pierwotnej na głębokości 0 m ($P_e(0)$) w obu badanych fiordach wykazywała wyższe wartości w rejonach pod wpływem wód lodowcowych, malejąc w kierunku zewnętrznych części fiordów. W Kongsfjorden obserwowano stopniowy spadek średniej wartości $P_e(0)$, z poziomu $2,18 \pm 2,75 \text{ mgC m}^{-3} \text{ h}^{-1}$ w pobliżu lodowców do $1,53 \pm 1,28 \text{ mgC m}^{-3} \text{ h}^{-1}$ w części zewnętrznej fiordu. W Hornsundzie spadek ten wynosił od $6 \pm 5,39$ do $1,77 \pm 0,51 \text{ mgC m}^{-3} \text{ h}^{-1}$, co uwypukla wyraźny gradient produkcji pierwotnej (PP) od lodowca do zewnętrznych stref fiordów. Chociaż zawartość składników odżywczych może być najwyższa w pobliżu lodowców, ze względu na erodowanie podłoża skalnego przez poruszający się lodowiec i uwalnianie ogromnych ilości zawiesin nieorganicznych o różnorodnym składzie mineralnym, dostępność światła jest ograniczona do warstwy powierzchniowej. Analiza przestrzennego rozmieszczenia zintegrowanej wartości produkcji pierwotnej w kolumnie wody (P_i) wskazuje, że obszary przylodowcowe fiordów charakteryzują się najniższą produktywnością. Przy ujściach fiordów zawartość cząstek mineralnych jest niższa, a tym samym zwiększa się dostępność światła, jednakże latem w wodach otwartych brakuje składników odżywczych. Najwyższe średnie wartości P_i w Kongsfjord stwierdzono w strefie zewnętrznej ($769,12 \pm 540,53 \text{ mgC m}^{-2} \text{ dzień}^{-1}$), podczas gdy w Hornsundzie najwyższe wartości odnotowano w strefie wewnętrznej ($1203,02 \pm 604,34 \text{ mgC m}^{-2} \text{ dzień}^{-1}$). Wyniki pracy podkreślają złożone interakcje między czynnikami środowiskowymi – w szczególności koncentracją mineralnych cząstek zawieszonych a produkcją pierwotną w arktycznych

ekosystemach morskich. Badanie to podkreśliło także konieczność pomiarów in situ dla walidacji i kalibracji algorytmów satelitarnych, szczególnie w regionach z dynamicznymi zmianami środowiskowymi, takich jak fiordy Spitsbergenu. Kontynuacja monitoringu i analiz, łączących dane satelitarne i in situ, będzie kluczowa dla pogłębiania zrozumienia złożonych mechanizmów regulujących produkcję pierwotną i ogólny stan ekosystemów w fiordach polarnych.

Podsumowując, praca ta to nie tylko pogłębia nasze zrozumienie dynamiki produkcji pierwotnej w fiordach Spitsbergenu, wyjaśniając wpływ czynników środowiskowych takich jak dostępność światła, koncentracji zawiesin, składników odżywczych czy mas wodnych na produktywność morską w tych arktycznych ekosystemach, ale także podkreśla znaczenie integracji różnorodnych metod badawczych w celu oceny wpływu zmian środowiskowych na ekosystemy polarne.

Publikacja nr 3

Wysłane do redakcji czasopisma Polish Polar Research

Dragaska-Deja, Katarzyna; Urbański, Jacek, Quantifying darkening of Svalbard fjord using Landsat/Sentinel-2 images and in-situ measurements

Trzeci artykuł koncentruje się na ilościowym określeniu zjawiska zmniejszania się przezroczystości wód („zaciemnienia wód”) w Kongsfjordzie z wykorzystaniem wieloletnich danych z satelit Landsat i Sentinel-2, pomiarów in situ oraz danych meteorologicznych. W pracy ustalono empiryczną zależność pomiędzy wielkością refleksyjności zdalnej w trzech kanałach (niebieskim, czerwonym i podczerwonym) a zmierzonymi in situ wartościami koncentracji cząsteczek zawieszonych. Zastosowanie dwóch kanałów w zakresie światła widzialnego było istotne ze względu na zróżnicowaną kolorystykę cząstek zawieszonych wynikającą z odmiennego składu mineralogicznego w poszczególnych zatokach lodowcowych, co wykazano w pierwszym artykule. Opracowano metodę maskowania obszarów fiordu pokrytych różnymi formami gór lodowych przy użyciu technik klasyfikacji wykorzystujących uczenie maszynowe. Analiza zmian koncentracji zawieszonych cząstek (SPM) w okresach 1985-2000 i 2015-2020 wykazała znaczny wzrost SPM, wskazując na postępujące ciemnienie wód fiordu. To ciemnienie jest powiązane ze zmianą klimatu, ponieważ rosnące temperatury powodują, że do fiordu dostają się coraz większe ilości zawiesiny niesione przez wody wypływające z topniejących lodowców. Wyznaczono średnie wartości koncentracji SPM w strefie 6 km od czół lodowców. Stosując metody regresji określono zależność pomiędzy średnimi wartościami SPM a wartością 6-dniową sumą wszystkich dodatnich średnich

temperatur dobowych powyżej zera stopni Celsjusza (ang. 'Positive Degree days' - PDD). Pozwoliło to na modelowanie średnich wartości SPM dla każdego dnia lipca i sierpnia na przestrzeni 35 lat. Porównanie tak wyznaczonych wartości koncentracji SPM wykazało obecność procesu ciemnienia wód. Średni SPM w strefie, obejmującej ponad połowę fiordu, wzrósł o 36% w latach 2015-2020 w porównaniu do lat 1985-2000, co znacząco zmniejszyło przezroczystość wody. Spadek przezroczystości ma istotne implikacje ekologiczne, wpływając na produkcję pierwotną oraz interakcje międzygatunkowe w fiordzie. Wykorzystanie zaawansowanych technik uczenia maszynowego pozwoliło na zwiększenie i poprawę informacji przestrzennej i czasowej, dostarczając kluczowych danych dla przyszłych modeli ekologicznych i aplikacji teledetekcyjnych.

Podsumowując, badania przedstawione w artykułach składających się na niniejszą rozprawę doktorską, dostarczają kompleksowego obrazu wpływu substancji zawieszonych pochodzących z topnienia lodowców na ekosystemy morskie Arktyki. Zwiększone zrzuty wód roztopowych prowadzą do wzrostu koncentracji zawiesiny o różnorodnym składzie mineralogicznym, zmniejszenia przezroczystości wody i znaczących zmian w produktywności pierwotnej. Integracja danych satelitarnych, pomiarów in situ oraz zaawansowanych technik analitycznych pozwala na precyzyjne monitorowanie tych procesów i ich konsekwencji ekologicznych, co jest kluczowe dla zrozumienia oraz prognozowania dynamiki zmian zachodzących w arktycznych ekosystemach morskich.

Osiągnięcia naukowe rozprawy doktorskiej

Problematyka pracy skupiała się na analizie charakterystyki cząstek zawieszonych w wodach fiordów Spitsbergenu, ich roli w kształtowaniu przestrzennej zmienności procesu produkcji pierwotnej oraz na opracowaniu nowatorskich metod zdalnej oceny zmienności koncentracji zawiesin i procesu zaciemnienia wód fiordu. Badania te wprowadzają nowe perspektywy w rozumieniu dynamiki środowiskowej fiordów zachodniego Spitsbergenu i stanowią innowacyjne podejście w tej dziedzinie nauki, wypełniając istotną lukę w dotychczasowej wiedzy.

Głównymi zadaniami zrealizowanymi w prezentowanej pracy doktorskiej są:

- Opis składu mineralogicznego zawiesin pochodzących z lodowców o różnym podłożu skalnym na podstawie danych zebranych in-situ oraz łącznie tej informacji z danymi geologicznymi na badanym terenie

- Określenie zmienności rozkładu wielkości cząstek (PSD) zawieszonych w różnych zatokach lodowcowych w zależności od składu mineralnego zawiesin
- Określenie zmienności koncentracji cząstek zawieszonych oraz proporcji występowania zawiesin mineralnych w stosunku do materii organicznej
- Ustalenie zmienności przestrzennej i czasowej produkcji pierwotnej na podstawie wieloletnich danych in-situ oraz określenie wpływu odległości od lodowca na proces produkcji pierwotnej
- Potwierdzenie znaczenia danych z pomiarów in-situ dla kalibracji i weryfikacji algorytmów zdalnego monitoringu, szczególnie w dynamicznie zmieniających się rejonach takich jak fiordy Spitsbergenu
- Opracowanie algorytmu przy zastosowaniu technik uczenia maszynowego do ilościowej analizy zjawiska zaciemnienia wód fiordu oraz przestrzennej i czasowej oceny koncentracji zawiesiny
- Wskazanie dróg i możliwości wykorzystania otrzymanych rezultatów w modelowaniu procesów związanych z obecnością zawiesiny z użyciem teledetekcji satelitarnej w kontekście współczesnych badań obszarów Arktyki.

Prace badawcze związane z charakterystyką cząstek mineralnych na Spitsbergenie były realizowane w ramach projektu CASUMA na który uzyskałam finansowanie w ramach konkursu PRELUDIUM, w Narodowym Centrum Nauki.