Wprowadzenie

Arktyka doświadcza gwałtownego ocieplenia - około dwu- do czterokrotnie szybszego niż średnia globalna - głównie wskutek mechanizmów sprzężeń zwrotnych, takich jak utrata albedo lodu morskiego i pokrywy śnieżnej, nasilony transport ciepła i wilgoci w kierunku bieguna oraz zmiany zachmurzenia i zawartości pary wodnej w atmosferze (Meredith i in., 2019; Bruhwiler i in., 2021). To przyspieszone ocieplenie prowadzi do cofania się lodowców, kurczenia się zasięgu i zmniejszania grubości lodu morskiego, rozmarzania wieloletniej zmarzliny oraz zmian w cyrkulacji oceanicznej i atmosferycznej (IPCC, 2019; Hugonnet i in., 2021; Dunse i in., 2022; Miner i in., 2022; Rantanen i in., 2022; Thoman i in., 2023). Fiordy arktyczne są półzamkniętymi systemami przybrzeżnymi, które otrzymują z lądu wodę słodką, osady oraz materię organiczną i nieorganiczną. Ten materiał pochodzenia lądowego miesza się z wodami morskimi i ulega przemianom w obrębie fiordu (Svendsen i in., 2002; Bianchi i in., 2020; Hopwood i in., 2020). Wody roztopowe pochodzące ze spływu powierzchniowego lub z ubytku lodu na czołach lodowców, wraz z niesionymi przez nie substancjami rozpuszczonymi, wpływają na hydrografię i biogeochemię wód fiordów, oddziałując na produktywność zarówno w samych fiordach, jak i na przyległym szelfie (Hopwood i in., 2016, 2020).

Fiordy zachodniego Spitsbergenu charakteryzują się wyraźnymi pionowymi gradientami hydrograficznymi oraz sezonową stratyfikacją. Stanowią one drogi przenoszenia ciepła, soli, substancji biogenicznych i rozpuszczonego węgla między wodami pozostającymi pod wpływem lodowców a oceanem przybrzeżnym (Hopwood i in., 2020). Hydrografia tych fiordów jest kształtowana głównie przez dwa kontrastujące ze sobą prądy: Prąd Wschodniospitsbergeński, transportujący zimną wodę arktyczną, oraz Prąd Zachodniospitsbergeński, niosący cieplejszą i bardziej zasoloną wodę atlantycką wraz ze znaczną częścią ciepła, węgla i zasobów planktonu docierających do regionu (Cottier i in., 2005; Menze i in., 2020). Wody te różnią się także składem substancji biogenicznych i węgla; Woda atlantycka ulega postępującemu zubożeniu w biogeny w miarę przemieszczania się na północ (Smoła i in., 2017). Ponadto wzajemne proporcje wód atlantyckich i arktycznych wpływają na dostawę i obieg związków biogenicznych na szelfie i w fiordach (Henley i in., 2020; Santos-Garcia i in., 2022; Tuerena i in., 2022). Stopień, w jakim woda atlantycka wnika do poszczególnych fiordów, zależy od takich czynników jak morfologia fiordu, głębokość progu i cyrkulacja, co prowadzi do powstania gradientu atlantyfikacji wzdłuż zachodniego wybrzeża Spitsbergenu (Oglethorpe i in., 2026). W konsekwencji fiordy tworzą kontinuum od systemów zdominowanych przez wody arktyczne, takich jak Hornsund, po systemy silnie kształtowane przez wody atlantyckie, takie jak Kongsfjorden (Cottier i in., 2005, 2007; Nilsen i in., 2008; Promińska i in., 2018;

Tverberg i in., 2019). W tym kontekście przyspieszające cofanie się lodowców, rozmarzanie wieloletniej zmarzliny oraz zmiany hydrologiczne modyfikują dostawę związków biogenicznych i węgla do wód i osadów fiordów. Zmiany te wpływają na produkcję pierwotną, zagrzebywanie materii organicznej w osadach oraz recykling bentosowy - procesy kluczowe dla funkcjonowania lokalnych ekosystemów i dla arktycznego obiegu węgla w szerszej skali (Rysgaard i in., 1998; Smith i in., 2015; Tverberg i in., 2019; McGovern i in., 2020).

Wzajemne oddziaływanie dopływu materii z lądu, cyrkulacji oceanicznej i procesów zachodzących w osadach sprawia, że fiordy arktyczne są wysoce dynamicznymi systemami biogeochemicznymi. Dostępność związków biogenicznych warunkuje produkcję pierwotną, natomiast produkcja, przemiany i zagrzebywanie materii organicznej regulują magazynowanie i recykling węgla w ekosystemie fiordu. Osady odgrywają w tych procesach kluczową rolę, będąc zarówno rezerwuarem materii organicznej, jak i miejscem intensywnej aktywności mikrobiologicznej, gdzie mineralizacja, regeneracja związków biogenicznych i wymiana bentosowa umożliwiają powrót węgla i związków biogenicznych do toni wodnej (Rysgaard i in., 1998; Glud i in., 2000; Koziorowska i in., 2018; Jørgensen i in., 2021; Szymczycha i in., 2025). Wody porowe zachowują zintegrowany zapis procesów biogeochemicznych zachodzących w osadach i dostarczają cennych informacji o wczesnej diagenezie oraz o sprzężeniu między systemem bentosowym a pelagicznym.

Woda słodka dociera do fiordów kilkoma drogami - jako wody roztopowe lodowców, spływ rzeczny oraz podmorski dopływ wód podziemnych (SGD) - a każda z nich dostarcza do strefy przybrzeżnej wodę i materię organiczną o odmiennym składzie chemicznym, przyczyniając się do wyraźnej przestrzennej heterogeniczności stężeń związków biogenicznych i węgla (McGovern i in., 2020; Santos i in., 2021; Kim i in., 2022; Diak i in., 2023; Szymczycha i in., 2025). Znaczenie tych dróg rośnie, ponieważ rozmarzanie wieloletniej zmarzliny i cofanie się lodowców przekształcają hydrologię podpowierzchniową i otwierają nowe szlaki transportu związków biogenicznych i węgla (Diak i in., 2023; Kleber i in., 2023). Tam, gdzie dopływ wód słodkich zbiega się z ograniczoną cyrkulacją i ograniczonym odnawianiem wód głębokich, biogeny i węgiel mogą gromadzić się w wodach przydennych i porowych; z kolei pobliskie, lepiej wentylowane stanowiska pozostają zwykle stosunkowo zubożone, w wyniku czego wzbogacone „hotspoty" mogą występować w bezpośrednim sąsiedztwie obszarów mniej wzbogaconych w obrębie tego samego fiordu (Skogseth i in., 2005; Inall i Gillibrand, 2010). Pochodzenie węgla gromadzącego się w wodach porowych można określić izotopowo, ponieważ rozpuszczony węgiel nieorganiczny w wodach porowych może pochodzić z remineralizacji materii organicznej, rozpuszczania węglanów lub utleniania metanu, a każdy z tych procesów charakteryzuje się odrębną

sygnaturą trwałych izotopów węgla. Ponadto, ponieważ wody porowe i wody przydenne są ze sobą powiązane poprzez wymianę bentosowo-pelagiczną, ich skład chemiczny może wykazywać przestrzenną współzmienność pomimo znacznych różnic w wartościach bezwzględnych stężeń. Jeżeli taka współzmienność występuje, warunki biogeochemiczne panujące w osadach można by wnioskować, przynajmniej częściowo, wyłącznie na podstawie opróbowania toni wodnej (Kostka i in., 1999; Huettel i in., 2014).

Pomimo rosnącej wiedzy o biogeochemii fiordów arktycznych badania na dużą skalę, integrujące obserwacje z wielu fiordów, wciąż należą do rzadkości, ponieważ większość prac koncentrowała się na pojedynczych systemach (Codispoti i in., 2013; Kim i in., 2022). Po pierwsze, rozmieszczenie związków biogenicznych i węgla w toni wodnej oraz ich związek ze strukturą mas wodnych rzadko charakteryzowano w kilku fiordach jednocześnie przy użyciu spójnej metodyki (Promińska i in., 2017; McGovern i in., 2020). Po drugie, chociaż wymianę związków biogenicznych między osadem a wodą badano w pojedynczych fiordach arktycznych (Hulth i in., 1996; Rysgaard i in., 1998; Kostka i in., 1999; Glud i in., 2000; Koziorowska i in., 2018; Morata i in., 2020; Barrett i in., 2023), analizy porównawcze zmienności strumieni bentosowych między fiordami o różnych reżimach lodowcowych i różnej dostawie materii organicznej są nieliczne. Po trzecie, nadal nie jest jasne, czy skład chemiczny wód powierzchniowych, wód głębokich i wód porowych osadów jest kształtowany przez wspólne czynniki środowiskowe, czy też podlega procesom specyficznym dla poszczególnych warstw (Huettel i in., 2014). Po czwarte, wysładzanie wód porowych powodowane przez SGD stwierdzono w kilku fiordach Svalbardu (Hong i in., 2019; Kim i in., 2022; Diak i in., 2023; Kleber i in., 2023; Szymczycha i in., 2025), lecz jego przestrzenne rozmieszczenie i znaczenie biogeochemiczne pozostają słabo poznane (Saghravani, 2026). Niniejsza rozprawa ma na celu wypełnienie tych luk w fiordach zachodniego Spitsbergenu - Hornsund, Isfjorden, Kongsfjorden i Krossfjorden - które obejmują gradient od warunków arktycznych po atlantyckie, odzwierciedlając zróżnicowany stopień atlantyfikacji i zmian wywołanych zmianą klimatu. Chociaż fiordy te leżą wzdłuż wspólnego gradientu szelfowego, w prezentowanych tu artykułach naukowych rozpatrywane są osobno, z uwzględnieniem ich specyficznych cech i lokalnych procesów.

Cel badań

Głównym celem niniejszej rozprawy jest scharakteryzowanie rozmieszczenia i obiegu węgla oraz substancji biogenicznych w fiordach zachodniego Spitsbergenu - od wód powierzchniowych, poprzez toń wodną, po wody porowe. Rozprawa zmierza do zidentyfikowania procesów fizycznych i biogeochemicznych, które kształtują ich

rozmieszczenie, wymianę i stechiometrię w kontekście postępującej atlantyfikacji i zmian kriosfery. Do kluczowych procesów należą: mieszanie i przekształcanie mas wodnych, stratyfikacja gęstościowa, remineralizacja materii organicznej i wczesna diageneza, dyfuzyjna wymiana bentosowa oraz wysładzanie wód porowych. Badania oparto na hipotezie, że rozkłady związków biogenicznych i węgla są kształtowane przez typ masy wodnej, morfologię basenu i lokalne dopływy środowiskowe, takie jak woda słodka pochodząca z SGD, a nie przez gradienty geograficzne, takie jak odległość od czół lodowców. W konsekwencji oczekuje się, że zmienność biogeochemiczna będzie zorganizowana na poziomie poszczególnych basenów i biogeochemicznych „hotspotów" (obszarów intensywnych procesów), a nie w postaci jednolitych wzorców obejmujących całe fiordy. Badania ustrukturyzowano wokół trzech celów szczegółowych.

Cel szczegółowy 1: Charakterystyka przestrzennej zmienności rozmieszczenia węgla i substancji biogenicznych w toni wodnej fiordów zachodniego Spitsbergenu

Hipoteza: Przestrzenne rozmieszczenie związków biogenicznych i rozpuszczonego węgla w fiordach zachodniego Spitsbergenu jest regulowane przede wszystkim przez procesy mieszania i przekształcania atlantyckich i arktycznych mas wodnych.

Pytania badawcze:

- Jakie są zakresy stężeń kluczowych związków biogenicznych (azotany: NO_3^-; jon amonowy: NH_4^+; fosforany: PO_4^{3-}; krzemionka rozpuszczona: DSi) oraz rozpuszczonych form węgla (rozpuszczony węgiel nieorganiczny: DIC; rozpuszczony węgiel organiczny: DOC) w toni wodnej i wodach porowych osadów badanych fiordów?
- Jak składniki te (NO_3^-, NH_4^+, PO_4^{3-}, DSi, DIC, DOC) różnią się między fiordami oraz między masami wodnymi w obrębie poszczególnych fiordów?
- Czy masy wodne wyodrębnione na podstawie właściwości termohalinowych (temperatura–zasolenie) charakteryzują się statystycznie odrębnymi sygnaturami związków biogenicznych i węgla, zarówno w obrębie poszczególnych fiordów, jak i między nimi?
- Które masy wodne wykazują najbardziej wyróżniający się skład związków biogenicznych i węgla oraz jak wody uformowane i przekształcone lokalnie wypadają na tle wód pochodzenia atlantyckiego i arktycznego?

Podejście badawcze: Przeprowadzenie badań hydrograficznych i biogeochemicznych fiordów w letnim sezonie topnienia 2021 r. Klasyfikacja mas wodnych na podstawie ustalonych kryteriów temperatury i zasolenia dla fiordów Svalbardu oraz analiza przestrzennej zmienności między fiordami i masami wodnymi z zastosowaniem

nieparametrycznych metod statystycznych (test Kruskala–Wallisa). Interpretacja obserwowanych wzorców biogeochemicznych w odniesieniu do struktury hydrograficznej i gradientów środowiskowych.

Cel szczegółowy 2: Ilościowa ocena wymiany między osadem a wodą oraz bentosowego recyklingu związków biogenicznych, a także ocena wpływu SGD

Hipoteza: Skład chemiczny wód porowych osadów jest powiązany ze składem wód przydennych, a dyfuzyjne strumieni powrotnych stanowią istotne źródło zregenerowanych związków biogenicznych dla toni wodnej. Niemniej jednak recykling bentosowy odbiega od kanonicznej stechiometrii Redfielda–Brzezińskiego wskutek zróżnicowanej remineralizacji i retencji azotu, fosforu i krzemu. Ponadto wysładzanie wód porowych wpływa na stężenia związków biogenicznych i węgla, modyfikując zarówno wielkość, jak i stechiometrię wymiany bentosowej.

Pytania badawcze:

- Jakie są wielkości i kierunki strumieni powrotnych DIC, DOC, NO_3^-, NH_4^+, PO_4^{3-} i DSi przez granicę osad–woda?
- Czy stechiometria strumieni odpowiada stosunkowi Redfielda–Brzezińskiego azotu do fosforu i krzemu (N:P:Si = 16:1:15, gdzie Si oznacza krzemionkę rozpuszczoną, DSi), czy też występują systematyczne odchylenia?
- Jak strumieni powrotnych DIC, DOC, NO_3^-, NH_4^+, PO_4^{3-} i DSi oraz ich stosunki różnią się między fiordami o odmiennych warunkach oceanograficznych i lodowcowych?
- Jakie są dominujące źródła DIC w wodach porowych, wnioskowane z zależności między stężeniem DIC a składem trwałych izotopów węgla DIC ($\delta^{13}C_{DIC}$)?
- Gdzie występuje SGD?

Podejście badawcze: Opróbowanie przeprowadzono w 2022 r. podczas rejsu badawczego na Svalbard na pokładzie r/v Oceania, w trakcie którego pobrano 12 rdzeni osadów o długości do około 1,5 m. Oszacowanie strumieni dyfuzyjnych na podstawie gradientów stężeń w wodach porowych z zastosowaniem pierwszego prawa Ficka (Berner, 1980), przy użyciu współczynników dyfuzji skorygowanych o temperaturę i przeliczonych na warunki panujące w osadzie na podstawie zmierzonej porowatości i krętości. Wyznaczenie geochemicznych stref osadów za pomocą hierarchicznej analizy skupień (HCA) i ich rozdzielenie metodą liniowej analizy dyskryminacyjnej (LDA). Śledzenie wysładzania wód porowych i SGD z wykorzystaniem chlorków (Cl^-) jako znacznika konserwatywnego. Określenie źródeł DIC w wodach porowych na podstawie zależności między DIC a $\delta^{13}C_{DIC}$. Wreszcie

porównanie stosunków strumieni z wartościami Redfielda–Brzezińskiego (Redfield, 1963; Brzeziński, 1985).

Cel szczegółowy 3: Rozpoznanie pionowej łączności biogeochemicznej między tonią wodną a wodami porowymi osadów oraz zlokalizowanie miejsc wyraźnego wzbogacenia podpowierzchniowego

Hipoteza: Skład chemiczny toni wodnej i wód porowych osadów jest powiązany poprzez mieszanie hydrodynamiczne, sedymentację i procesy wczesnej diagenezy. Chociaż różnice bezwzględnych stężeń między tonią wodną a wodami porowymi mogą sięgać kilku rzędów wielkości, oczekuje się, że sprzężenie bentosowo-pelagiczne wywoła istotną przestrzenną współzmienność między warstwami wód głębokich i wód porowych. Letnia stratyfikacja osłabia jednak sprzężenie między wodami powierzchniowymi a głębszymi, prowadząc do powstania odrębnych sygnatur biogeochemicznych poszczególnych warstw i sprzyjając tworzeniu się lokalnych hotspotów biogeochemicznych - obszarów, w których ograniczona cyrkulacja zbiega się ze zwiększoną dostawą materii organicznej. Jeżeli taka współzmienność występuje, warunki biogeochemiczne wód porowych, w tym lokalizacja hotspotów, powinny być przynajmniej częściowo możliwe do wywnioskowania wyłącznie na podstawie opróbowania toni wodnej.

Pytania badawcze:

- Jak stężenia związków biogenicznych i węgla współzmieniają się w pięciu pionowych warstwach (woda powierzchniowa, woda przydenna, woda nad osadem oraz górna i dolna warstwa wód porowych osadów)?
- W jaki sposób sygnały biogeochemiczne pochodzące z osadów są powiązane z leżącą nad nimi tonią wodną i które warstwy wykazują najsilniejsze sprzężenie?
- Które stacje badawcze mają nieproporcjonalnie duży udział w zmienności podpowierzchniowej i jakie wspólne cechy basenów oraz warunki środowiskowe je charakteryzują?

Podejście badawcze: Zintegrowanie zbiorów danych z toni wodnej i osadów z kampanii 2021 i 2022 r. Zastosowanie wielorakiej analizy czynnikowej (MFA) do sześciu zmiennych chemicznych mierzonych w każdej z pięciu warstw na 19 stacjach, na których opróbowano wszystkie warstwy, z włączeniem zmiennych hydrograficznych i charakteryzujących stanowiska jako zmiennych uzupełniających. Identyfikacja stacji stanowiących hotspoty na podstawie ich udziału w głównej osi ordynacyjnej oraz ocena, czy skład chemiczny wód przydennych odzwierciedla warunki panujące w wodach porowych.

Obszar badań

Badane fiordy rozciągają się wzdłuż gradientu arktyczno-atlantyckiego zachodniego Spitsbergenu, wzdłuż którego Prąd Zachodniospitsbergeński wnika do poszczególnych systemów fiordowych w różnym stopniu, zależnie od morfologii fiordu i głębokości progu (Cottier i in., 2005; Nilsen i in., 2008). Hornsund, położony na południu, pozostaje pod wpływem zimnych wód arktycznych i przybrzeżnych (Włodarska-Kowalczuk i in., 1998; Promińska i in., 2018) i jest podzielony płytkim progiem na basen główny i wewnętrzny basen Brepollen (Moskalik i in., 2014; Błaszczyk i in., 2019). Isfjorden, największy system fiordowy Svalbardu, składa się z kilku fiordów bocznych o kontrastujących cechach hydrograficznych - od zewnętrznych obszarów pozostających pod wpływem wód atlantyckich po zimne, oddzielone progami baseny wewnętrzne, takie jak Billefjorden (Szczuciński i in., 2009; Skogseth i in., 2020). Połączony system Kongsfjorden–Krossfjorden na północy ma stosunkowo otwarte połączenie z szelfem, co ułatwia częste wnikanie wody atlantyckiej (Hop i in., 2002; Svendsen i in., 2002; Tverberg i in., 2019). Wszystkie fiordy otrzymują wodę słodką i osady z lodowców uchodzących do morza oraz kończących się na lądzie (Smith i in., 2015; Halbach i in., 2019; Hopwood i in., 2020) i leżą na zróżnicowanym geologicznie podłożu zlewni - od prekambryjskiego podłoża krystalicznego Hornsundu (Görlich, 1986; Dallmann, 2015) po sekwencje węglanowe i piaskowcowe otaczające Kongsfjorden (Svendsen i in., 2002). Te różnice geologiczne wpływają na skład chemiczny wód porowych poprzez takie procesy jak rozpuszczanie węglanów i wietrzenie krzemianów (Wallmann i in., 2008; März i in., 2015). Fiordy te stanowią naturalne środowisko do badania biogeochemicznych reakcji na zróżnicowany stopień atlantyfikacji i wpływu lodowców (Svendsen i in., 2002; Promińska i in., 2018).

Metody

Przedstawiono tu przegląd metod zastosowanych w prezentowanych publikacjach; szczegółowe informacje analityczne i statystyczne zamieszczono w poszczególnych pracach.

Badania terenowe prowadzono na pokładzie r/v Oceania podczas letnich sezonów topnienia w latach 2021 i 2022, a trzy prace opierają się na częściowo pokrywających się zbiorach stacji i rdzeni, a nie na jednym połączonym zbiorze danych. Praca 1 opiera się na przeprowadzonym w 2021 r. przeglądzie toni wodnej w wielu fiordach - po trzy do pięciu głębokości na każdej z 33 stacji opróbowanych za pomocą rozety CTD - uzupełnionym o rdzenie o długości do około 40 cm pobrane próbnikami Niemistö i/lub GEMAX. Praca 2 opiera się na dwunastu głębszych rdzeniach osadów o długości do około 1,5 m, pobranych w 2022 r. rdzeniówką grawitacyjną i próbnikiem GEMAX.

Praca 3 łączy dane z toni wodnej i osadów z obu kampanii (2021–2022) na 19 stacjach, na których dostępne były wszystkie pięć warstw pionowych, z wykorzystaniem rdzeni o różnej długości. Wody porowe ekstrahowano próbnikami Rhizon, a głębokość wody na stacjach w trzech badaniach wynosiła od około 17 do 374 m. Mierzone zmienne obejmowały temperaturę, zasolenie i tlen rozpuszczony mierzone in situ, a także rozpuszczone nieorganiczne biogeny (NO_3^-, NH_4^+, PO_4^{3-}, DSi), rozpuszczony węgiel nieorganiczny i organiczny (DIC, DOC), Cl^-, główne kationy (Na^+, K^+, Ca^{2+}, Mg^{2+}) oraz - w wodach porowych osadów - skład trwałych izotopów węgla DIC ($\delta^{13}C_{DIC}$). Wszystkie składniki oznaczono standardowymi metodami analitycznymi z kontrolą jakości opartą na certyfikowanych materiałach odniesienia.

Masy wodne sklasyfikowano na podstawie ich właściwości termohalinowych (temperatura–zasolenie) zgodnie z ustalonymi definicjami dla Svalbardu (Cottier i in., 2005; Nilsen i in., 2008; Promińska i in., 2018), co stanowi standardowe podejście do rozdzielenia wód atlantyckich, arktycznych i lokalnie uformowanych w tych fiordach. Strumieni powrotnych przez granicę osad–woda obliczono na podstawie gradientów stężeń w wodach porowych z zastosowaniem pierwszego prawa Ficka (Berner, 1980). Podejście to jest odpowiednie dla drobnoziarnistych, zdominowanych przez dyfuzję mułów fiordowych i pozwala wyznaczyć strumienie bezpośrednio ze zmierzonych profili wód porowych. Wysładzanie wód porowych i SGD śledzono za pomocą Cl^-, który zachowuje się konserwatywnie w osadach morskich, a źródła DIC w wodach porowych scharakteryzowano na podstawie $\delta^{13}C_{DIC}$, ponieważ zremineralizowana materia organiczna, rozpuszczające się węglany i węgiel pochodzący z metanu mają odmienne sygnatury izotopowe. Wzorce przestrzenne analizowano nieparametrycznym testem Kruskala–Wallisa z porównaniami post hoc Dunna (wybranym ze względu na brak rozkładu normalnego danych i nierówną liczebność grup), HCA (metodą Warda, która wyznacza strefy geochemiczne bez z góry narzuconego podziału na grupy), LDA (użytą do sprawdzenia rozdzielności uzyskanych skupień) oraz MFA (która nadaje jednakową wagę każdej opróbowanej warstwie, dzięki czemu współzmienność między warstwami można ocenić bez dominacji którejkolwiek z nich w ordynacji).

Synteza prac badawczych

Rozprawa składa się z trzech powiązanych ze sobą prac, prowadzących od charakterystyki przestrzennych wzorców biogeochemicznych, poprzez identyfikację podstawowych procesów zachodzących w osadach, po zintegrowaną analizę oddziaływań między tonią wodną a osadami w fiordach zachodniego Spitsbergenu. Łącznie prace te dają całościowy obraz rozmieszczenia i obiegu węgla oraz związków biogenicznych w pionowym kontinuum ekosystemów fiordów arktycznych.

Pierwsza praca, „Distributions of in-situ parameters, dissolved (in)organic carbon, and nutrients in the water column and pore waters of Arctic fjords (western Spitsbergen) during a melting season" (Saghravani i in., 2024), stworzyła podstawę obserwacyjną rozprawy i realizowała Cel szczegółowy 1. W sezonie topnienia 2021 r. scharakteryzowano w niej temperaturę, zasolenie, tlen, nieorganiczne biogeny i rozpuszczony węgiel w toni wodnej i płytkich wodach porowych fiordów Hornsund, Isfjorden, Kongsfjorden i Krossfjorden. Na podstawie właściwości termohalinowych wyróżniono siedem mas wodnych: wodę powierzchniową, arktyczną, schłodzoną zimą, pośrednią, lokalną, przekształconą atlantycką oraz atlantycką. Test Kruskala–Wallisa wykazał, że większość składników różniła się istotnie między fiordami i między masami wodnymi. Hornsund, w którym nie stwierdzono wody atlantyckiej ani przekształconej wody atlantyckiej, okazał się systemem najbardziej wzbogaconym w biogeny i DIC, pozostającym głównie pod wpływem wód arktycznych i przybrzeżnych (Włodarska-Kowalczuk i in., 1998), podczas gdy Kongsfjorden wykazywał najwyraźniejszą sygnaturę atlantycką. Woda Lokalna, występująca wyłącznie w fiordzie Isfjorden, charakteryzowała się najwyższymi stężeniami NO_3^-, PO_4^{3-}, DSi i DIC spośród wszystkich mas wodnych. Powierzchniowe wody porowe były wzbogacone w NH_4^+, PO_4^{3-}, DSi i DIC względem wód przydennych, miejscami o ponad rząd wielkości, co wskazuje na znaczny potencjał wymiany bentosowo-pelagicznej. Dzięki zastosowaniu jednolitej metodyki we wszystkich fiordach i zdeponowaniu pełnego zbioru danych w otwartym repozytorium publikacja ta ustanowiła przestrzenny i składowy punkt odniesienia dla kolejnych badań procesowych.

Druga praca, „Nutrients and carbon cycling in marine sediments of Arctic fjords" (Saghravani i in., w recenzji), opierając się na tych wzorcach, przeszła od analizy opisowej do mechanistycznej, realizując Cel szczegółowy 2. W 2022 r. pobrano dwanaście rdzeni osadów o długości do około 1,5 m i przeanalizowano w nich biogeny, rozpuszczony węgiel, Cl^- oraz skład trwałych izotopów węgla DIC w wodach porowych. Metodą HCA wyodrębniono pięć stref geochemicznych (HC1–HC5) odpowiadających głębokości w osadzie: natlenioną, bogatą w azotany strefę płytką pozostającą w wymianie z wodą przydenną; strefy pośrednie wzbogacone w DSi, NH_4^+, DOC i PO_4^{3-}, w których remineralizacji ulega labilna materia organiczna; oraz strefy głębsze o najwyższych stężeniach DIC, DOC, PO_4^{3-} i DSi, w których słabo przepuszczalne muły i rozpuszczanie minerałów sprzyjają akumulacji substancji rozpuszczonych. Wartości $\delta^{13}C_{DIC}$, mieszczące się w zakresie od około +1 do −14‰, wraz z ujemną zależnością między DIC a $\delta^{13}C_{DIC}$ wskazują, że w dynamice węgla dominują rozpuszczanie węglanów i remineralizacja materii organicznej, a nie utlenianie metanu. Stężenia Cl^- maleją z głębokością na dwóch stanowiskach w Hornsundzie, co wskazuje na wysładzanie wód porowych zgodne z SGD (Kim i in., 2022). Porównanie objętych i nieobjętych wysładzaniem głębokich skupień sugeruje,

że to źródło wody słodkiej wprowadza azot nieorganiczny, a jednocześnie rozcieńcza DIC, fosforany i krzemionkę. Strumieni powrotnych, obliczone według pierwszego prawa Ficka, znacząco odbiegały od stechiometrii Redfielda–Brzezińskiego: stosunki strumieni azotu do fosforu (N:P) wynosiły średnio 0,2 w Hornsundzie, 6,2 w fiordzie Isfjorden i 10,1 w fiordzie Kongsfjorden, a więc poniżej oczekiwanej wartości 16:1. W fiordzie Krossfjorden ujemne strumienie (skierowane do osadów) wskazywały na pobieranie netto lub akumulację, w związku z czym wyłączono je z analizy stosunków. Stosunki strumieni N:DSi wynosiły 2,9 w Hornsundzie, 6,5 w fiordzie Isfjorden i 43,4 w fiordzie Kongsfjorden, we wszystkich przypadkach przekraczając oczekiwaną wartość ~1,1 (16:15), przy czym największy nadmiar azotu względem krzemu stwierdzono w Kongsfjorden. Hornsund cechował się wyraźnym uwalnianiem fosforu i krzemu względem azotu przy niskim strumieniu azotu, co jednak niekoniecznie oznacza limitację azotem w wodach nadległych. Kongsfjorden z kolei wykazywał największy nadmiar azotu względem krzemu. Ogólnie odchylenia od stechiometrii Redfielda–Brzezińskiego różniły się między fiordami, odzwierciedlając regionalną heterogeniczność (Koziorowska i in., 2018; Morata i in., 2020).

Trzecia praca, „Covariation of dissolved nutrients and carbon in seawaters and sediment porewaters of western Svalbard fjords" (Saghravani i in., 2026), połączyła dane z toni wodnej i osadów w celu realizacji Celu szczegółowego 3. Bada ona, w jaki sposób sygnały pochodzące z osadów są powiązane z leżącą nad nimi tonią wodną oraz które stanowiska mają nieproporcjonalnie duży udział w zmienności podpowierzchniowej. MFA sześciu zmiennych chemicznych w pięciu warstwach - wodzie powierzchniowej, wodzie przydennej, wodzie nad osadem oraz górnej i dolnej warstwie wód porowych - na dziewiętnastu stacjach wykazała, że wody głębokie i wody porowe tworzą jeden system: woda przydenna, woda nad osadem i wody porowe wykazywały silne ładunki na pierwszej osi ordynacyjnej (0,65–0,72), podczas gdy woda powierzchniowa była od nich odseparowana, co odzwierciedla letnią stratyfikację. Ścisły związek między składem chemicznym wody przydennej a wód porowych sugeruje, że skład wody przydennej odzwierciedla sygnały pochodzące z leżących poniżej osadów, co daje praktyczny sposób wykrywania aktywności bentosowej poprzez opróbowanie toni wodnej i bezpośrednio odpowiada na Cel szczegółowy 3. Co istotne, trzy stanowiska - w oddzielonym progiem Billefjorden oraz w głębokim basenie głównym Hornsundu - miały nieproporcjonalnie duży udział w tej osi, odpowiadając za około 73% jej wariancji, i wyróżniały się jako wzbogacone człony skrajne na tle poziomu odniesienia o niższych stężeniach, wyznaczonego przez pozostałe stanowiska. Hotspoty te łączyło ograniczone odnawianie wód głębokich oraz dopływ materii organicznej; tam, gdzie warunki te nie występowały łącznie, jak w wewnętrznym basenie Brepollen, hotspoty były słabiej rozwinięte, co wskazuje, że samo ograniczenie wymiany wód w basenie nie jest wystarczające. Zmienność między

basenami w obrębie jednego fiordu często przewyższała różnice między fiordami, prowadząc do wniosku, że fiordy zachodniego Spitsbergenu funkcjonują jako mozaika odrębnych środowisk biogeochemicznych. To niewielka liczba lokalnie kontrolowanych hotspotów, a nie systematyczne gradienty w skali fiordu, w głównej mierze kształtuje podpowierzchniowy obieg związków biogenicznych i węgla (Cottier i in., 2005; Skogseth i in., 2020).

Łącznie trzy prace wykazały, że fiordy arktyczne funkcjonują jak mozaiki, w których fizyczna izolacja i dostawa materii organicznej, działając synergicznie, koncentrują obieg węgla i związków biogenicznych w określonych miejscach. Ta przestrzenna konfiguracja jest często pomijana w opisach geograficznych lub uśrednionych dla całego fiordu i należy oczekiwać, że będzie ewoluować w miarę, jak tworzenie się wód zimowych, wnikanie wód atlantyckich i dopływ wód słodkich będą nadal przekształcać środowisko (Tverberg i in., 2019; Diak i in., 2023).

Osiągnięcia

- Utworzono kompleksowy zbiór danych obserwacyjnych obejmujący związki biogeniczne, rozpuszczony węgiel nieorganiczny i organiczny oraz parametry hydrograficzne w fiordach zachodniego Spitsbergenu. Zbiór ten obejmuje toń wodną i wody porowe osadów i został udostępniony publicznie na potrzeby dalszych badań arktycznych [Artykuły naukowe 1, 2, 3].
- Wykazano silne zróżnicowanie biogeochemiczne między masami wodnymi i systemami fiordowymi. Analizy statystyczne wykazały, że stężenia związków biogenicznych i węgla różniły się istotnie między fiordami i masami wodnymi, ujawniając odrębne sygnatury biogeochemiczne związane z wodami pozostającymi pod wpływem arktycznym i atlantyckim. Woda arktyczna w Hornsundzie była względnie wzbogacona w biogeny (z wyjątkiem NH_4^+) i DIC w porównaniu z fiordem Isfjorden, natomiast woda lokalna w fiordzie Isfjorden charakteryzowała się najwyższymi stężeniami NO_3^-, PO_4^{3-}, DSi i DIC spośród badanych mas wodnych [Artykuł naukowy 1].
- Wyodrębniono pięć związanych z głębokością stref geochemicznych osadów za pomocą hierarchicznej analizy skupień i LDA oraz wykorzystano zależność DIC-$\delta^{13}C_{DIC}$ do przypisania węgla w głębokich wodach porowych rozpuszczaniu węglanów i remineralizacji materii organicznej [Artykuł naukowy 2].
- Zidentyfikowano wysładzanie wód porowych na dwóch stanowiskach w Hornsundzie i wykazano jego wpływ na biogeochemię osadów. Zubożenie w Cl^- w głębokich wodach porowych zinterpretowano jako świadectwo domieszki wody słodkiej zgodnej z SGD. Porównanie wysłodzonych i niewysłodzonych

wód porowych wykazało wyższe stężenia azotu nieorganicznego, lecz niższe stężenia DIC, PO_4^{3-} i DSi w wodach wysłodzonych [Artykuł naukowy 2].

- Ilościowo określono przestrzennie zmienne strumieni powrotnych węgla i związków biogenicznych oraz wykazano odchylenia od stechiometrii Redfielda–Brzezińskiego. Wyniki pokazały, że osady mogą pełnić rolę źródła lub pochłaniacza związków biogenicznych w zależności od stanowiska, przy wysokim uwalnianiu fosforu w Hornsundzie i ujemnych strumieniach azotu i fosforu na niektórych stanowiskach w fiordzie Kongsfjorden. Zaobserwowane stosunki strumieni N:P i N:DSi (średnie dla fiordów N:P od 0,2 do 10,1 wobec 16:1; N:DSi od 2,9 do 43,4 wobec ~1.1=16:15) odbiegały od referencyjnych stosunków Redfielda–Brzezińskiego, wskazując, że bentosowa regeneracja związków biogenicznych jest silnie specyficzna dla poszczególnych fiordów i stanowisk [Artykuł naukowy 2].
- Ujawniono silną heterogeniczność w skali basenów i zidentyfikowano hotspoty biogeochemiczne w fiordach zachodniego Spitsbergenu. Trzy stacje odpowiadały za około 73% wariancji wzdłuż dominującego wymiaru MFA. "Hotspoty" te występowały w basenach o ograniczonej wymianie wód, cechujących się ograniczonym odnawianiem wód głębokich oraz dostawą labilnej materii organicznej. Różnice między basenami w obrębie poszczególnych systemów fiordowych były często równie duże lub większe niż różnice między systemami fiordowymi, co przemawia za mozaikowym, a nie gradientowym w skali fiordu, charakterem podpowierzchniowej biogeochemii [Artykuł naukowy 3].
- Wykazano silne sprzężenie między biogeochemią wód przydennych a wód porowych osadów w skali stacji pomiarowej. MFA wykazała, że woda przydenna, woda nad osadem oraz górna i dolna warstwa wód porowych silnie się współzmieniały, podczas gdy wody powierzchniowe były w dużej mierze od nich odseparowane. Sugeruje to, że skład chemiczny wody przydennej integruje przestrzenną zmienność leżącego poniżej środowiska biogeochemicznego osadów, umożliwiając identyfikację hotspotów w wodach porowych - przynajmniej częściowo - na podstawie opróbowania toni wodnej [Artykuł naukowy 3].