



You have downloaded a document from
RE-BUŚ
repository of the University of Silesia in Katowice

Title: Klucz do zrozumienia Arktyki. Fiord jako ogniwo integrujące ocean, ląd i atmosferę

Author: Mariusz Grabiec

Citation style: Grabiec Mariusz. (2014). Klucz do zrozumienia Arktyki. Fiord jako ogniwo integrujące ocean, ląd i atmosferę. W: A. Babczyńska, M. Nakonieczny (red.), "Problemy Środowiska i Jego Ochrony" Cz. 22 (S. 51-66). Katowice : Wydawnictwo Uniwersytetu Śląskiego



Uznanie autorstwa - Użycie niekomercyjne - Bez utworów zależnych Polska - Licencja ta zezwala na rozpowszechnianie, przedstawianie i wykonywanie utworu jedynie w celach niekomercyjnych oraz pod warunkiem zachowania go w oryginalnej postaci (nie tworzenia utworów zależnych).



Mariusz Grabiec

**Klucz do zrozumienia Arktyki.
Fiord jako ogniwo integrujące
ocean, ląd i atmosferę**

Uniwersytet Śląski
Wydział Nauk o Ziemi
Sosnowiec

dr Mariusz Grabiec – doktor nauk o Ziemi, glaciolog, adiunkt w Katedrze Geomorfologii Wydziału Nauk o Ziemi Uniwersytetu Śląskiego; uczestnik licznych wypraw polarnych na Spitsbergen; autor publikacji głównie z zakresu bilansu masy lodowców, topografii podłoża i miąższości lodowców na podstawie stosowania metod geofizycznych, zwłaszcza sondowań radarowych.

Przyroda jest pełna przeciwieństw, każdy z nas jest w stanie bez namysłu wymienić je jednym tchem: światło i ciemność, sen i jawa, zdrowie i choroba, prawda i fałsz, ruch i bezruch, skurcz i rozkurcz, przyciąganie i odpychanie. Każdym z tych zjawisk zajmuje się inna dziedzina nauki, każde z nich badane jest przez specjalistów w swojej dziedzinie. Naukowa pewność siebie słabnie jednak wobec stanów pośrednich, równie oczywistych, jak skrajne przeciwieństwa. Półmrok, półsen, półprawda – wydaje się, że z takimi niuansami najlepiej radzą sobie poeci. Jednak i naukowcy przyznają, że najwięcej ciekawych rzeczy dzieje się na styku dziedzin, tam, gdzie reguły właściwe jednej z nich stopniowo przestają działać, ustępując pola zasadom obowiązującym w tej drugiej, wzajemnie się, bynajmniej, nie wykluczając.

Prawdziwa zabawa zaczyna się wtedy, gdy przenikają się żywioły. Są miejsca na kuli ziemskiej, gdzie widać to nadzwyczaj wyraźnie, a prowadzenie tam badań staje się szczególnym wyzwaniem. Należą do nich lodowe szczeliny i rozpadliny wysp archipelagu Svalbard, daleko za kołem podbiegunowym a blisko bieguna północnego. Linia brzegowa tych wysp nie pozwala ostatecznie zdecydować, czy to ocean tak głęboko wcina się w ląd, czy to ląd tak daleko sięga w głąb oceanu. Fiordy Spitsbergenu, i pozostałych wysp archipelagu, są właśnie miejscem, gdzie swe reguły narzucają trzy żywioły: ziemi, powietrza i wody – przy czym ta ostatnia, aby jeszcze skomplikować sytuację, przyjmuje kilka postaci. Można by i to zostawić poetom, którzy, wspomagani zorzą polarną, mieliby co robić przez długie polarne noce i dnie, gdyby nie to, że pokrywa lodowa Arktyki jest czułym wskaźnikiem zmian, o jakich od dawna mówią klimatolodzy. W arktycznych fiordach koncentrują się zjawiska związane ze wzajemnym oddziaływaniem wód Oceanu Arktycznego, lodowców i powietrza.

Polarna przyroda jest szczególnie bogata w przeciwieństwa. Zrozumienie zasad ich współistnienia na stosunkowo niewielkim podbiegunowym obszarze kuli ziemskiej może okazać się niezwykle ważne dla całej planety, nie wyłączając afrykańskich pustyń czy południowoamerykańskich lasów deszczowych. Przyrodnicze przeciwieństwa są bowiem znacznie sobie bliższe, niż mogłoby się wydawać (przyj. red. z serwisu internetowego www.us.edu.pl).

Wstęp

Spośród wielu typów wybrzeży morskich jednym z najbardziej spektakularnych krajobrazowo, a zarazem istotnych gospodarczo jest wybrzeże fiordowe, których nazwa pochodzi z języków skandynawskich (szwedzki/norweski/duński: *fjord*, *fjorden*, islandzki: *fiörður*). Fjord stanowi specyficzną odmianę zatoki morskiej wcinającą się głęboko w ląd wąskim pasem wody, nierzadko rozgałęziając się i tworząc skomplikowane systemy (Fot. 1.). Zatokę otaczają strome stoki górskie, kontynuując swój przebieg głęboko pod poziomem morza. W dnie morskim fiordu występują liczne przegłębienia, oddzielone od siebie progami, z których najbardziej zewnętrzny izoluje zatokę od zewnętrznego akwenu morskiego. Stąd też wymiana wody pomiędzy fiordem i wodami zewnętrznymi jest ograniczona.

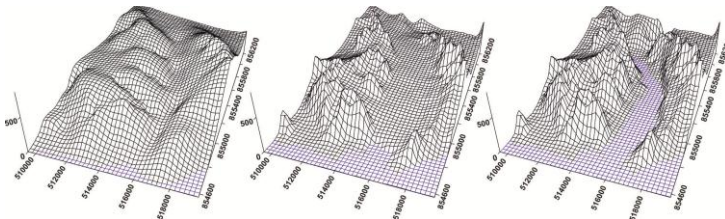


FOT. 1. Wijdefjorden – najdłuższy fiord archipelagu Svalbard, stanowi przykład fiordu typu subpolarnego, z pokrywą lodową w czasie zimy (zlodzenie widoczne na zdjęciu wykonanym w maju 2009). Widok w kierunku północnym. Fot. M. GRABIEC.

Praca opisuje znaczenie wybrzeży typu fiordowego dla człowieka oraz przedstawia uwarunkowania jego funkcjonowania w świetle współczesnych zmian środowiskowych. W szczególności przedstawione zostały procesy zachodzące we fiordach arktycznych na przykładzie Svalbardu (Arktyka Europejska), ze względu na ciągle pierwotny, naturalny charakter środowiska oraz dynamikę zmian klimatu w obszarach polarnych, która jest znacznie bardziej ekspresyjna aniżeli w średnich szerokościach geograficznych. Pozwala to na śledzenie zmian zachodzących w środowisku fiordu w skali lokalnej i na tej podstawie wnioskowanie o możliwych konsekwencjach dla regionu.

Fiord – geneza i morfologia

Fiordy występują w rejonach o krajobrazie górskim, które w swojej historii geologicznej podlegały zlodowaceniom. To właśnie lodowce swoją działalnością erozyjną przyczyniły się do ich powstania. Jęzory lodowców spływając dolinami mającymi wcześniejsze założenie najczęściej fluwialne (wyżłobionymi przez rzeki) przemodelowały je, tworząc doliny zwane „żłobami lodowcowymi” o przekroju zbliżonym kształtem do litery „U” i charakterystycznych szerokich dnach i stromych stokach (Rys. 1.). Szerokość doliny, jej głębokość, długość i rozczłonkowanie zależy od cech lodowca który ją wyżłobił takich jak objętość, długość jęzora, czy dynamika ruchu. Dzisiaj takie doliny polodowcowe możemy podziwiać np. w Tatrach, dla przykładu Dolina Roztoki, czy Dolina Małej Łąki. Jednakże w przypadku fiordów po ustąpieniu lodowców doliny zostały zajęte przez wody morskie (Rys. 1.). Progi występujące powszechnie w dnach fiordów to najczęściej wały morenowe spiętrzone w czasie awansu lodowca lub deponowane w czasie jego stagnacji. Proces tworzenia fiordów ciągle jest aktywny głównie w Arktyce, w miejscach, gdzie lodowce uchodzą bezpośrednio do morza. Ze względu na fluktuacje zasięgów czoł lodowców wielkość i objętość fiordów również podlega zmianom.



Rys. 1. Etapy tworzenia się fiordu na przykładzie zlodowaczonej doliny lodowca Hansbreen (południowy Spitsbergen). Kolorem niebieskim zaznaczono poziom morza. A – faza preglacjalna, hipotetyczna morfologia powierzchni przed zlodowaczeniem, wcięcia erozyjne dolin rzecznych zostały w czasie zlodowaczenia zaadoptowane na doliny lodowcowe; B – faza glacialna – lodowiec wypełnia dolinę – model terenu 2005 [GRABIEC i in. 2012]; C – faza postglacjalna – powierzchnia terenu po ustąpieniu lodowca; część doliny zostaje wypełniona wodami morskimi [wizualizacja modelu podłoża lodowca na podstawie sondowań radarowych z 2008 r. – GRABIEC i in. 2012]. Układ współrzędnych: UTM 33X WGS84.

Imponujące rozmiary fiordy zawdzięczają ich kreatorom czyli lodowcom. Najdłuższy a zarazem najgłębszy fiord tworzy kompleks Scoresby Sund ulokowany we wschodniej Grenlandii, którego długość sięga ok. 350 km, natomiast głębokość 1500 m. Niewiele rozmiarami ustępują norweskie fiordy Sognefjord i Hardanger Fjord o długości odpowiednio 203 i 179 km. Fiordy na Spitsbergenie są krótsze, najdłuższy z nich – Wijdefjorden (Fot. 1.) mierzy około 100 km [COTTIER i in., 2010].

Zatoki tego typu występują w tzw. pasie fiordów w średnich i wysokich szerokościach geograficznych na obydwu półkulach. HOWE i in. [2010] dokonali podziału fiordów ze względu na warunki klimatyczne w jakich występują. W warunkach permanentnego pokrycia zatoki lodem morskim oraz w otoczeniu lodowców uchodzących do morza występują *fiordy polarne* (np. północna i wschodnia Grenlandia, Arktyka Kanadyjska, Antarktyda). Jeśli klimat jest na tyle łagodny, że średnia temperatura lata przekracza 0 °C, a lód morski skuwa zatokę na okres zimy, to wówczas mamy do czynienia z *fiordami subpolarnymi* (np. zachodnia Grenlandia, Svalbard, Arktyka Kanadyjska, Półwysep Antarktyczny). Dalej w kierunku średnich szerokości geograficznych występują *fiordy umiarkowane*, sporadycznie zamarzające zimą w odcinkach najbardziej wciętych w ląd, natomiast lodowce mogą sporadycznie występować w otoczeniu zatoki (Islandia, Alaska, Chile, Norwegia, Szkocja, Nowa Zelandia).

Znaczenie ekonomiczne i społeczne fiordów

Wybrzeża morskie były jednym z głównych czynników wpływających na rozwój osadnictwa. Zasiadlanie terenów wokół fiordów rozpoczęło się w neolicie [HOWE i in., 2010]. Charakter zatoki wpływał na intensywny rozwój osadnictwa. Z jednej strony fiordy stanowiły „okno na świat” dla ludności zamieszkującej nawet odległe tereny w interiorze, pozwalały czerpać z zasobów naturalnych zarówno samego fiordu, jak i otaczających mórz. Z drugiej strony częściowe zamknięcie fiordów przez progi występujące w dnie u ujścia zatoki stanowiły od zawsze bezpieczne schronienie dla żeglugi w czasie sztormów. Stąd we fiordach zakładano osady, przystanie i porty. W okresie intensywnego wykorzystania dróg morskich w celu transportu towarów, rud i paliw niebagatelnym stała się dostępność portów dla wielkowypornościowych statków handlowych. Głębokie wody fiordów dają możliwość zaopatrzenia nawet portom zlokalizowanym z dala od otwartego morza (np. porty norweskie: Oslo, Trondheim, Drammen, Narvik i inne). Licznie występujące fiordy przekładają się na długość linii brzegowej, a to z kolei na rozwój tych gałęzi gospodarki, które związane są z wykorzystaniem zasobów mórz i oceanów (np. rybołówstwo, przemysł stoczniowy itd.). Przykładem może być Norwegia o powierzchni zbliżonej do Polski i długości linii brzegowej 130 razy dłuższej (długość linii brzegowej Norwegii wraz z wyspami 92 260km [Statistisk årbok, 2013], Polski – ok. 700km), co stawia ją w czołówce światowej jedynie za takimi państwami jak

Kanada i Rosja (gdzie również występują fiordy) oraz niektórymi krajami wyspiarskimi jak np. Indonezja i Australia (w zależności od metodyki obliczeń).

Wody fiordów norweskich stały się miejscem hodowli łososia, krewetek, małży i skorupiaków w tzw. farmach. O dynamice rozwoju tej gałęzi hodowli może świadczyć fakt, że na początku lat 70. XX wieku w Norwegii pozyskiwano w ten sposób zaledwie 70 t łososia atlantyckiego (najważniejszego gatunku hodowlanego), aby w połowie następnej dekady osiągnąć poziom 35 tys. t, w 2002 roku ponad 400 tys. t, a w 2012 ponad 1 200 tys. t [FORD, 1984; Key figures from aquaculture industry, 2012].

Walory estetyczne spektakularnych krajobrazów fiordów i ich otoczenia przyczyniły się do intensywnego wykorzystania turystycznego. W 2013 roku Norwegię odwiedziło 4,7 mln turystów, co przyniosło 5,7 mld dolarów wpływu. W tym samym czasie Polska gościła 15,8 mln turystów, co przełożyło się na 10,9 mld przychodu, jednak biorąc pod uwagę, że Norwegię zamieszkuje ponad 6 razy mniej mieszkańców, przychód z turystyki na jednego mieszkańca jest znacznie większy) [UNWTO World Tourism Barometer, 2014].

Wykorzystanie gospodarcze fiordów niesie za sobą również pewne zagrożenia dla środowiska. Wspomniane farmy, osadnictwo skoncentrowane wokół fiordów, przemysł w połączeniu z ograniczeniami swobodnej wymiany wody z otwartym oceanem powoduje koncentrację zanieczyszczeń mogących zakłócić równowagę ekologiczną w akwenie [HOWE i in., 2010]. Ostatnie badania koncentracji zanieczyszczeń w organizmach morskich oraz osadach we fiordach i wodach przybrzeżnych Norwegii wskazują jednak na stopniową poprawę stanu zanieczyszczenia środowiska. W 2011 roku 78,5% monitorowanych na zlecenie norweskiej służby Climate and Pollution Agency stanowisk uznano za nieznacznie zanieczyszczone, a 4,6% określono jako zanieczyszczone, silnie, lub ekstremalnie zanieczyszczone [GREEN i in., 2012].

Aktywność wykorzystania środowiska przez człowieka spada w kierunku bieguna na skutek ograniczeń środowiskowych (warunki oświetleniowe, warunki klimatyczne, zlodzenie). Jednocześnie ze względu na zachowanie naturalnego stanu środowiska obszary te są niezwykle cenne i coraz powszechniej obejmowane ochroną prawną. W 2000 roku różnymi formami ochrony objętych było 17% lądowej części Arktyki [CAFF, 2002]. Jednocześnie ze względu na ciągle niewielkie przekształcenie środowiska przez człowieka oraz wyjątkową dynamikę zmian klimatu obszary polarne stanowią niezwykle cenne źródło informacji dla poznania procesów współczesnych zmian środowiskowych.

Zmiany klimatyczne w Arktyce

Globalne zmiany klimatyczne obserwowane w ostatnich dekadach w szczególności w zakresie ocieplenia atmosfery i oceanu, zmian w opadach, redukcji kriosfery lądowej i lodu morskiego oraz wzrostu poziomu wszechoceanu w konsekwencji

prowadzą do pogorszenia jakości życia człowieka poprzez zagrożenia dla niego samego i wytworów jego działalności [IPCC, 2013; IPCC, 2014]. Szczególnie wrażliwe na zmiany środowiskowe są fiordy arktyczne i subarktyczne, ponieważ zmiany paleoklimatyczne oraz obserwowane obecnie (zwłaszcza fluktuacje temperatury) w Arktyce są dwa do czterech razy większe aniżeli w innych częściach ziemskiego globu [MILLER i in., 2010; SERREZE i BARRY, 2011]. Najnowsze wyniki analiz klimatycznych wskazują, że najszybciej ocieplającym się miejscem w Europie (w tempie $2,6^{\circ}\text{C}/100$ lat) jest arktyczny archipeląg Svalbard [NORDLI i in., 2014].

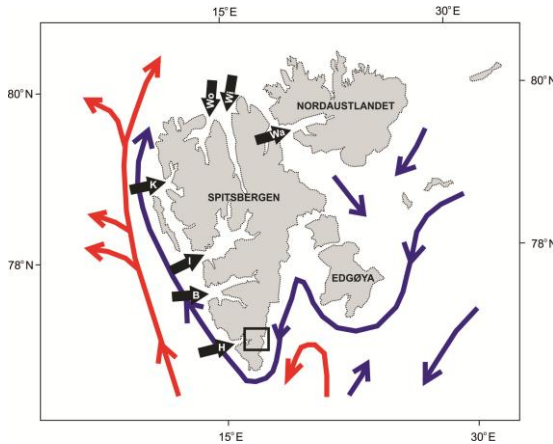
Przyczyn zwiększonej dynamiki zmian klimatu w rejonie Arktyki należy upatrywać w zaburzeniu stanu równowagi tego środowiska co doprowadziło do uruchomienia systemu sprzężeń zwrotnych wzajemnie powiązanych ze sobą elementów. Stąd odsłaniające się na skutek ocieplenia powierzchnie lądów zajmowane dotychczas przez lodowce, śnieg lub lód morski prowadzą do zwiększonej absorpcji energii cieplnej dostarczanej do powierzchni (na skutek zmniejszonego albedo), której następne oddawanie prowadzi do ocieplenia atmosfery. Szczególnie efektywne jest tutaj magazynowanie ciepła w wodzie, jej transfer i oddawanie w innych rejonach. Ocieplenie powoduje skrócenie czasu występowania lodu morskiego, a przez to ocean jest dłużej eksponowany na strumień promieniowania słonecznego, natomiast wytworzony lód cieńszy. Zmniejszenie powierzchni oceanu zajętej przez lód morski i skrócenie sezonu z pokrywą lodową intensyfikuje proces oddawania ciepła zgromadzonego i przetransportowanego przez wody oceanu [SERREZE i BARRY, 2011]. Sprzężenia te powodują, że w kolejnych sezonach obserwuje się rekordowo małe zasięgi lodu morskiego. Ostatnie absolutne minimum lodu morskiego zaobserwowano we wrześniu 2012 wynoszące zaledwie 3 mln km^2 [PARKINSON i COMISO, 2013], przy średniej z wielolecia 1981–2010 6,52 mln km^2 (na podstawie Sea Ice Index National Snow & Ice Data Center – http://nsidc.org/data/seaiice_index/baseline-change.html). Warto zaznaczyć, że woda jest znacznie efektywniejszym akumulatorem ciepła aniżeli powietrze. Wprawdzie nagrzewa się dłużej, jednak skutki zmian temperatury są znacznie bardziej rozciągnięte w czasie i przestrzeni, aniżeli w przypadku atmosfery. Warstwa zaledwie 3 m wody jest w stanie zgromadzić tyle ciepła, co cała nadległa kolumna atmosfery, natomiast powierzchniowe prądy oceaniczne przenoszą gigantyczne zapasy ciepła w kierunku obszarów polarnych, przewyższające ok. 20 tys. razy możliwości produkcyjne wszystkich polskich elektrowni [WALCZOWSKI, 2012]. Nie bez znaczenia dla tempa zmian klimatycznych w Arktyce jest zwiększona dynamika cyrkulacji atmosferycznej i oceanicznej przyczyniającej się do przenoszenia ciepła z innych obszarów do Arktyki. Ciągłe jednak znaczne rozprzestrzenienie powierzchni śnieżno-lodowych powoduje że nadwyżka ciepła nie może zostać spożytkowana na inne procesy (jak np. parowanie), natomiast w całości ogrzewa troposferę, która dodatkowo w rejonach polarnych jest cieńsza, co powoduje możliwość jej szybszego ogrzania [ACIA, 2004].

Zwiększona dynamika zmian klimatu w obszarach polarnych przyczynia się do intensyfikacji badań tych procesów w wysokich szerokościach geograficznych, zwłaszcza w Arktyce.

Funkcjonowanie fiordów arktycznych Svalbardu w świetle współczesnych zmian klimatycznych

Jednym z kluczowych dla poznania współczesnych zmian środowiskowych laboratoriów terenowych jest archipelag Svalbard położony w połowie drogi między północną Norwegią, a Biegunem Północnym. Fiordy arktyczne występujące na Svalbardzie, ze względu na obecność licznych lodowców w głębi zatok, dynamicznie zmieniają się. Ze względu na swoje odizolowanie od wpływów antropogenicznych tworzą one laboratorium wciąż naturalnych procesów zachodzących w systemie fiordu, których w innych miejscach trudno byłoby znaleźć.

Charakter fiordów Svalbardu jest warunkowany w głównej mierze przez wody otaczające archipelag (Rys. 2.). Cyrkulacja wód w Arktyce, cechuje się dominacją zimnych prądów morskich. Na tym tle archipelag Svalbard znajduje się w uprzywilejowanej pozycji, będąc od zachodu oblewany ciepłym Prądem Zachodniospitsbergeńskim, najdalej na północ wysuniętym odgałęzieniem Prądu Zatokowego (Rys. 2.). Wymiana ciepła przez tzw. Cieśninę Frama między Svalbardem a Grenlandią należy do kluczowych mechanizmów powodujących ocieplenie tej części Arktyki.



Rys. 2. Cyrkulacja oceaniczna w rejonie Svalbardu. Kolorem niebieskim zaznaczono zimne szelfowe wody arktyczne; kolorem czerwonym ciepłe wody Prądu Zachodniospitsbergeńskiego [SVENDSEN i in. 2002]. Strzałki wskazują wybrane fiordy Svalbardu: Wi – Wijdefjorden, Wo – Woodfjorden, K – Krossfjorden/Kongsfjorden, I – Isfjorden, B – Bellsund wraz z Van Mijenfjorden/Van Keulenfjorden, H – Hornsund, Wa – Wahlenbergfjorden. Rejon „mostu lodowego” Hornbreen – Hambergbreen zaznaczono kwadratem.

W ostatnich latach obserwuje się istotne zwiększenie temperatury (z maksimum w roku 2006) i zasolenia wód transferowanych w kierunku północnym oraz większą dynamikę transportu przejawiającą się przepływem większej objętości wody, w konsekwencji również transfer większej ilości ciepła [WALCZOWSKI i in., 2012].

Temperatura wód atlantyckich transportowanych przez prąd Zachodniospitsbergeński odgrywa kluczową rolę w kształtowaniu klimatu regionu, w szczególności w okresie nocy polarnej, kiedy działalność radiacyjna jest wykluczona [PIECHURA i WALCZOWSKI, 2009; WALCZOWSKI i PIECHURA, 2011; WALCZOWSKI i in., 2012]. Pomiary temperatury wody prowadzone przez Instytut Oceanologii Polskiej Akademii Nauk (IO PAN) w transekcji 76,5°N w latach 2000–2007 wykazują 92% korelację z temperaturami notowanymi na stacji meteorologicznej w Hornsundzie (77°N) na południowym Spitsbergenie, co potwierdza istotny wpływ termiki wód oceanicznych na kształtowanie klimatu regionu [WALCZOWSKI i PIECHURA, 2011]. Zmiany właściwości wód mogą doprowadzić również do konieczności adaptacji przez faunę morską i zajmowania przez gatunki dotychczas występujące w cieplejszych wodach Atlantyku coraz bardziej północnych siedlisk, wypierając dotychczas występujące tu gatunki [WALCZOWSKI i in., 2012].

Bezpośredni dostęp prądu Zachodniospitsbergeńskiego do fiordów Svalbardu jest blokowany przez równoległe płynący po szelfie prąd zimny (Rys. 2.) [SVENDSEN i in., 2002].

Ciepłe wody wierzchniej warstwy Prądu Zachodniospitsbergeńskiego incydentalnie wdzierają się w rejon szelfu, a nierzadko wlewają się do fiordów eksponowanych na zachód (WALCZOWSKI 2014 – informacja ustna). Tego typu zdarzenia mogą mieć niezwykle daleko idące konsekwencje dla systemu fiordu. Ciepłe wody powodują dostawę dodatkowej energii cieplnej wpływającej zarówno na termikę wód fiordów (w konsekwencji warunkując zmniejszone zlodzenie zimą lub jego brak), na atmosferę, jak też na funkcjonowanie lodowców otoczenia fiordu uruchamiając całą lawinę sprzężeń zwrotnych, które zaburzają stan równowagi systemu fiordu i jego otoczenia.

Wlewy ciepłej wody atlantyckiej do fiordów powodują zatem zachwianie charakterystycznej stratyfikacji wód, co w konsekwencji wywołuje agresywny stres oceaniczno-meteorologiczny na procesy utraty masy przez lodowce otoczenia fiordu (topnienie powierzchniowe i dynamika cieleń).

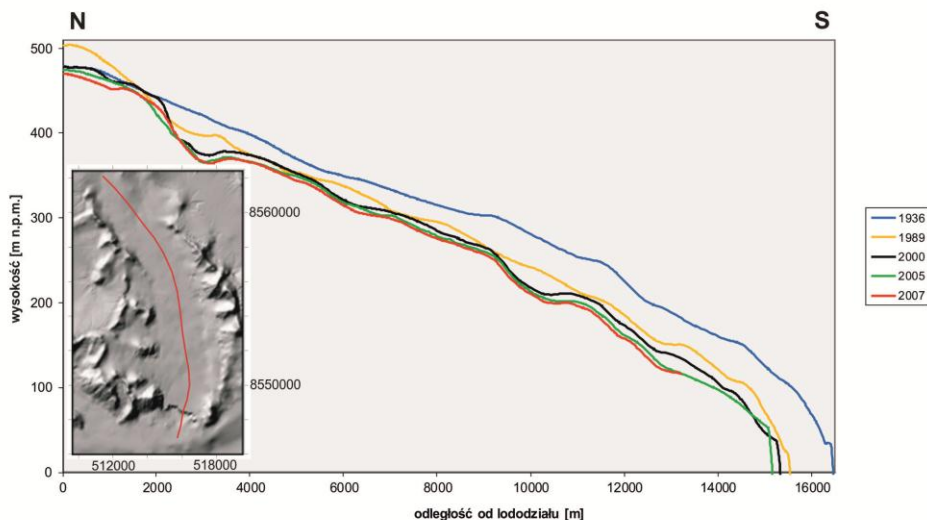
Interakcja pomiędzy fiordem i lodowcami

Cechą charakterystyczną fiordów arktycznych jest obecność w ich otoczeniu lodowców, w tym lodowców uchodzących do morza. Stąd też integracja pomiędzy procesami glacialnymi oraz oceanicznymi ma tutaj najbardziej ekspresyjny przebieg. O znaczeniu lodowców świadczy ich powszechność na Svalbardzie. Zajmują one 60% powierzchni archipelagu, z czego 60% uchodzi bezpośrednio do morza (w większości są to fiordy). To właśnie lodowce kończące się w wodzie stanowią

bezpośredni kontakt pomiędzy wodą morską i kriosferą. Stan wód w zatoce niewątpliwie oddziałuje w sposób bezpośredni na lodowce (w szczególności na intensywność cienia poprzez temperaturę, zlodzenie, falowanie) ale również pośredni (poprzez interakcję z atmosferą i modyfikację warunków meteorologicznych). Z kolei lodowce wpływają na wody fiordu w szczególności poprzez właściwości wody dostarczanej do morza (jej temperaturę, zawartość mineralną, ilość dostawy wody).

Lodowiec może tracić swoją masę do fiordu w dwóch formach: ciekłej – wody z topnienia lub stałej w postaci gór lodowych.

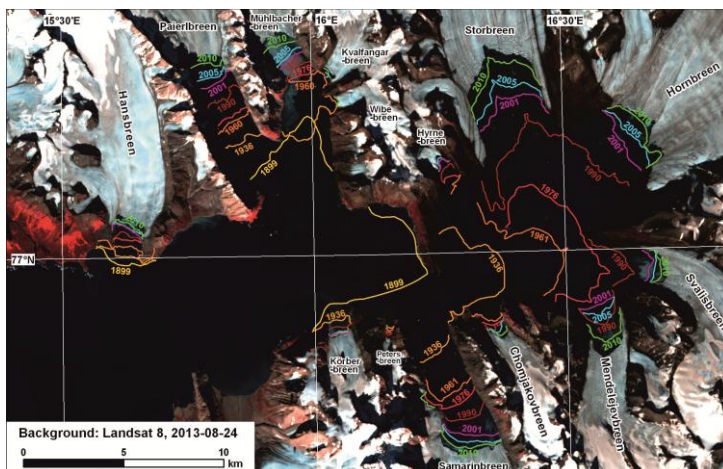
Intensywne topnienie lodowców na skutek ocieplenia klimatu przewyższa rozmiarami zimową dostawę masy w postaci opadów śniegu oraz napływ lodu z wyższych partii lodowców, czego efektem jest postępujące obniżanie powierzchni lodowców. Przykładowo miąższość Lodowca Hansa na południowym Spitsbergenie zmniejszyła się od 1936 r. średnio o ok. 60 m, przy czym dynamika tempa obniżania powierzchni po roku 2000 uległa trzykrotnej akceleracji w porównaniu do lat 1936–1989 i wyniosła ponad 1,4 m/rok (Rys. 3).



Rys. 3. Zmiany wysokości powierzchni Lodowca Hansa wzdłuż jego osi w latach 1936–2007. Źródła danych: 1936 – mapy topograficzna arkusz Torellbreen (1984), 1989 – naziemne pomiary tachymetryczne, numeryczny model terenu (J. JANIA, L. KOLONDRĄ – dane niepublikowane), 2000, 2005, 2007 – profilowania DGPS, numeryczny model terenu (J. JANIA, M. GRABIEC, IGF PAN). Profil pomiarowy zaznaczono kolorem czerwonym na mapie (układ współrzędnych: UTM 33X WGS84).

Najbardziej spektakularną formą wymiany masy pomiędzy lodowcem, a fiordem jest odłamywania się gór lodowych bezpośrednio do zatoki. Procesy zachodzące na czołach lodowców uchodzących do morza wpływają na zasięg lodowców, a jednocześnie na zmiany powierzchni fiordów. Zmiany pozycji czoła są wypadkową dwóch składowych: dynamiki ruchu czoła oraz ablacji mechanicznej czyli cielenia. Latem, kiedy obrywanie lodu na czole przewyższa progresywny ruch lodowca czoło intensywniej cofa się, zimą pomimo wolniejszego ruchu lodowca czoło notuje awans na skutek prawie zupełnego braku cielenia.

Jednakże w dłuższej perspektywie czasowej obserwowany jest bardzo istotny trend recesji czoł lodowców, co można prześledzić na zmianach zasięgów czoł z ostatnim stuleciem (Rys. 4.). Średnie tempo recesji lodowców kończących się w fiordzie Hornsund w ostatnich dekadach wyniosło ok. 70 m/rok, z wyraźnym przyspieszeniem w pierwszej dekadzie XXI wieku [BŁASZCZYK i in., 2013]. Współczesne tempo cofania się lodowców jest ponad 3 razy większe, aniżeli notowane przed ok. 100 laty. Od roku 1899 do 2010 powierzchnia wód w fiordzie Hornsund powiększyła się kosztem lodowców o 141,8 km² [BŁASZCZYK i in., 2013].



RYS. 4. Zmiany zasięgów czoł lodowców Hornsundu od końca XIX w. [opracowanie M. BŁASZCZYK, 2014].

Kontynuacja recesji lodowców może doprowadzić do dramatycznych zmian w funkcjonowaniu fiordu Hornsund. Dotyczyć to może wschodniej części fiordu, gdzie znajduje się „most lodowy”, łączący Hornsund z Morzem Barentsa. Tworzą go lodowce Hornbreen (kierujący się na zachód) i Hambergbreen (kierujący się na wschód). Dotychczasowe prace nie rozwiązują sygnalizowanej możliwości połączenia Morza Grenlandzkiego z Morzem Barentsa cieśniną Hornsundu po recesji i przerwaniu „mostu lodowego” [DOWDESWELL i in., 1984; PÁLLI i in., 2003]. Jednakże wstępne wyniki z sondowań radarowych prowadzonych w latach 2013–2014

wskazują na wysokie prawdopodobieństwo takiej ewentualności po wycofaniu się lodowców z tego obszaru, które szacuje się, że nastąpi za ok. 80–100 lat [PALLI i in., 2003]. Konsekwencje połączenia Morza Grenlandzkiego z Morzem Barentsa cieśniną mogą skutkować destrukcją typowej dla fiordów stratyfikacji wód, zmianami w cyrkulacji i właściwości wód, a w konsekwencji zmiany warunków siedliskowych fauny morskiej. Zmiany w cyrkulacji wody mogą mieć również istotny wpływ na klimat lokalny południowego Spitsbergenu.

Oprócz zjawisk związanych z intensywną recesją lodowców drugim zjawiskiem glacialnym skutkującym zmianami geometrii fiordu jest szarża lodowcowa. W odróżnieniu od recesji szarża charakteryzuje się awansem czoła oraz przyspieszoną dynamiką ruchu lodowca na skutek gwałtownego przemieszczenia masy głównie na skutek zmian warunków drenażu podlodowcowego (zablokowanie kanałów), zwiększonej dostawy wody do podłoża lodowca, podniesienia ciśnienia wód podlodowcowych i wreszcie zwiększonego ślizgu po podłożu. Występują one niesynchronicznie, jednak najczęściej w zbliżonych interwałach czasu. Generalnie kolejne szarże i awanse przyczyniają się jednak do następujących po nich jeszcze intensywniejszych recesji, a kolejne szarże są coraz słabsze [JANIA, 1988]. Szacuje się, że ok. 40–45% lodowców Svalbardu posiada cechy lodowców szarżujących [BŁASZCZYK i in., 2009].

Ostatni spektakularny awans lodowca na Spitsbergenie dotyczył Lodowca Nathorst w fiordzie Van Keulenfjorden na północ od Hornsundu. Pomiędzy rokiem 2008 a 2013 lodowiec awansował o 15 km, zwiększając swoją powierzchnię o 20% [SUND i in., 2014].

Szacunki ilości wody dostarczanej do fiordu Hornsund z lodowców wskazują, że ok. 75% pochodzi z topnienia, a tylko ok. 25% z gór lodowych. W roku 2007 ilość słodkiej wody z lodowców do Hornsundu oszacowano na 0,74 i 0,34 km³/rok odpowiednio z topnienia i cielenia [JANIA i in., 2010]. To około tyle co pojemność jeziora Mamry.

AWAKE i AWAKE2 – Interdyscyplinarne badania funkcjonowania fiordu arktycznego

Funkcjonowanie systemu fiordu oraz jego otoczenia było dotychczas dość wrywkowo badane najczęściej pod kątem zainteresowań oceanologii, brakowało natomiast opracowań kompleksowych.

W roku 2009 został zapoczątkowany międzynarodowy projekt AWAKE (*Arctic Climate and Environment of the Nordic Seas and the Svalbard – Greenland Area* <http://www.iopan.gda.pl/projects/AWAKE//index.html>), finansowany z Programu Polsko-Norweskiej Współpracy Badawczej, zakończony w 2011 roku. Projekt ten miał za zadanie badanie interakcji kluczowych komponentów środowiska polarnego Svalbardu: oceanu, atmosfery i kriosfery w warunkach współczesnych zmian środowiskowych. Miał on charakter kompleksowy i multidyscyplinarny, skupiając

specjalistów zarówno z oceanologii, klimatologii, glaciologii, jak i technik teledetekcyjnych.

W realizację projektu zaangażowane były polskie i norweskie instytucje z ogromnym doświadczeniem i zapleczem logistycznym umożliwiającym prowadzenie badań w niedostępnych rejonach polarnych. Koordynatorem projektu był prof. JAN PIECHURA z Instytutu Oceanologii Polskiej Akademii Nauk (IO PAN), wśród współrealizatorów znalazły się: Uniwersytet Śląski, Nansen Environmental and Remote Sensing Center, Uniwersytet Mikołaja Kopernika, Norwegian Meteorological Institute, The University Centre in Svalbard, Norwegian Polar Institute.

Projekt zakończył się sukcesem naukowym i organizacyjnym, ale jednocześnie jednym z wniosków projektu była konieczność zintensyfikowania badań nad funkcjonowaniem fiordów arktycznych jako najważniejszego ogniwa łączącego trzy domeny: ocean, atmosferę i litosferę w obszarach polarnych. Za zadanie postawiono sobie poznanie mechanizmów, które napędzają i rządzą zachodzącymi tam zmianami. Obecnie zadanie to jest realizowane w ramach projektu AWAKE2 (*Arctic Climate System Study of Ocean, Sea Ice and Glaciers Interactions in Svalbard Area*). <http://water.iopan.gda.pl/projects/AWAKE2/index-pol.html>), również finansowanego przez Program Polsko-Norweskiej Współpracy Badawczej (okres realizacji 2013–2016), będącego kontynuacją i poszerzeniem poprzedniego projektu. Zespół realizujący projekt został rozszerzony o Instytut Geofizyki Polskiej Akademii Nauk (IG PAN), a koordynatorem jest prof. WALDEMAR WALCZOWSKI.

Podstawową hipotezą badawczą projektu jest, że częstotliwość wlewów ciepłej wody atlantyckiej w najbliższych latach będzie większa na skutek zmian cyrkulacji oceanicznej i atmosferycznej. Dostawa dodatkowej porcji ciepła z wód atlantyckich wpływa bezpośrednio i pośrednio na dynamikę zmian zlodowacenia otoczenia fiordu. Ciepło niesione przez wodę jest uwalniane do atmosfery, co z kolei wpływa na intensywność procesów glaciologicznych takich jak ablacja, akumulacja, dynamika ruchu i intensywność cielenia lodowców uchodzących do akwenów wodnych. Z drugiej strony bezpośredni kontakt wody z czołem lodowców uchodzących do morza jest czynnikiem sterującym mechanizmem utraty masy na drodze cielenia, gdzie sezony zwiększonej intensywności cielenia korelują się z incydentami napływu ciepłych wód atlantyckich. Konsekwencją jest przyspieszenie zarówno recesji, jak redukcji miąższości lodowców. Efektem jest również zwiększenie intensywności cielenia i dostawy słodkiej wody do fiordu w postaci gór lodowych, które dla Svalbardu szacowane są na ok. $9,6 \text{ km}^3/\text{rok}$ (2006–2011) [BŁASZCZYK i JANIA, 2011]. Woda słodka pochodzenia lodowcowego z kolei w istotny sposób modyfikuje nie tylko cyrkulację wody we fiordach, ale również ewakuuje się poprzez fiordy do otwartego oceanu. Studia w małoskalowej zlewni fiordów svalbardzkich mogą być dobrym wzorcem dla systemu fiordów Grenlandii odpowiedzialnych za dostawę największej ilości wody słodkiej pochodzenia lodowcowego na świecie.

Podsumowanie

Fiordy (w szczególności te arktyczne) stanowią ogniwo integrujące hydrosferę, atmosferę i litosferę (której istotnym elementem jest również kriosfera). Pomędzy tymi elementami środowiska istnieje szereg związków które poprzez system sprzężeń zwrotnych warunkują dynamikę zmian środowisk zintegrowanych fiordem. Współczesne zmiany w jednym z komponentów środowiska pociągają za sobą konsekwencje w pozostałych elementach uruchamiając spiralę zmian. Zmiany w termice i cyrkulacji wody w fiordzie (będące konsekwencją zmian globalnych), w sposób bezpośredni modyfikują klimat lokalny oraz warunki procesów zachodzących na czołach lodowców kończących się we fiordzie. Warunki w dolnej warstwie atmosfery przekładają się z kolei na temperaturę wierzchniej warstwy wód morskich, wpływają na dostawę masy dla lodowców (opady) oraz ubytek poprzez ablację fizyczną (topnienie). Z kolei lodowce odpowiadając swym bilansem masy na zmieniające się czynniki atmosferyczne i oceaniczne dostarczają do fiordów słodką wodę wpływając na właściwości wód fiordu (termika, zasolenie, stratyfikacja, cyrkulacja). Kompleks wzajemnych powiązań pomiędzy czynnikami pochodzącymi z różnych elementów środowiska polarnego podlegał badaniom w ramach projektu AWAKE (2009–2011), a obecnie studia są kontynuowane w projekcie AWAKE2 (2013–2016). Uzyskane wyniki w lokalnej skali Svalbardu mogą być ekstrapolowane na rozległe obszary Arktyki, które ze względu na swój zakres przestrzenny i trudności logistyczne nie mogą podlegać bezpośrednim, kompleksowym pomiarom (Grenlandia, Arktyka Kanadyjska, Arktyka Rosyjska). Jednocześnie ze względu na większą dynamikę zmian klimatycznych w obszarach polarnych obecne badania pozwolą przewidzieć procesy, które wkrótce mogą mieć miejsce na gęsto zasiedlonych przez człowieka obszarach w niższych szerokościach geograficznych. W konsekwencji może to w istotny sposób pomóc człowiekowi w zaadaptowaniu się do zmienionych warunków środowiskowych i uchronić przed negatywnymi ich skutkami.

Podziękowanie

Praca powstała dzięki wsparciu projektu „*Arctic climate system study of ocean, sea ice and glaciers interactions in Svalbard area*” – AWAKE2 (Pol-Nor/198675/17/2013) przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju w ramach Programu Polsko-Norweskiej Współpracy Badawczej.

Piśmiennictwo

1. ACIA 2004: Impacts of a warming Arctic: Arctic Climate Impact Assessment. Cambridge University Press: 139 ss.
2. BŁASZCZYK M., JANIA J. 2011: Iceberg flux from Svalbard tidewater glaciers to surrounded seas. [W:] Ocean influence on climate and cryosphere in the Arctic. Workshop. Abstracts. Sopot, Poland – November 28–30, 2011: 24–25.

3. BŁASZCZYK M., JANIA J.A., HAGEN J.O. 2009: Tidewater glaciers of Svalbard: Recent changes and estimates of calving fluxes. *Polish Polar Research* 30(2): 85–142.
4. BŁASZCZYK M., JANIA J.A., KOLONDRĄ L. 2013: Fluctuations of tidewater glaciers in Hornsund Fiord (Southern Svalbard) since the beginning of the 20th century. *Polish Polar Research* 34(4): 327–352.
5. CAFF (Conservation of Arctic Flora and Fauna). 2002: Protected Areas of the Arctic: Conserving a Full Range Values. Ottawa: 40 ss.
6. COTTIER F.R., NILSEN F., SKOGSETH R., TVERBERG V., SKARDHAMAR J., SVENDSEN H. 2010: Arctic fjords: a review of the oceanographic environment and dominant physical processes. [W:] HOWE J.A., AUSTIN W.E.N., FORWICK M., PAETZEL M. (red.). *Fjord Systems and Archives*. Geological Society. Special Publication 334: 35–50.
7. DOWDESWELL J.A., DREWRY D.J., LIESTØL O., ORHEIM O. 1984: Airborne Radio Echo Sounding of Sub-Polar Glaciers in Spitsbergen. *Skrifter Nr. 182*. Norsk Polarinstitut. Oslo: 41 ss.
8. FORD J.R. 1984: Norwegian Salmon and Trout Farming. *Marine Fishing Review* 46(3): 44–47.
9. GREEN N.W., SCHØYEN M., ØXNEVAD S., RUUS A., HØGÅSEN T., BEYLICH B., GUDMUNSON ROGNE Å., TVEITEN L. 2012: Hazardous substances in fjords and coastal waters – 2011. Rapportnr. 1132/2012. Norwegian Institute for Water Research: 264 ss.
10. HOWE J.A., AUSTIN W.E.N., FORWICK M., PAETZEL M., HARLAND R., CAGE A.G. 2010: Fjord systems and archives: a review. [W:] HOWE J.A., AUSTIN W.E.N., FORWICK M., PAETZEL M. (red.). *Fjord Systems and Archives*. Geological Society. Special Publication 334: 5–16.
11. GRABIEC, M., JANIA J., PUCZKO D., KOLONDRĄ L., BUDZIK T. 2012: Surface and bed morphology of Hansbreen, a tidewater glacier in Spitsbergen. *Polish Polar Research* 38(2): 111–138.
12. IPCC. 2013: Climate Change 2013. Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, New York: 1535 ss.
13. IPCC, 2014: Climate Change 2014. Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge and New York (<http://report.mitigation2014.org/>).
14. JANIA J. 1988: Dynamiczne procesy glacialne na południowym Spitsbergenie w świetle badań fotointerpretacyjnych i fotogrametrycznych. Uniwersytet Śląski. Katowice: 258 ss.
15. JANIA J.A., KOLONDRĄ L., BŁASZCZYK M., GRABIEC M., IGNATIUK D., LASKA M., BUDZIK T. 2010: Recent state of Svalbard glaciers with special reference to Southern Spitsbergen. AWAKE fall meeting Sopot, 4–5 November 2010. Prezentacja. (http://water.iopan.gda.pl/projects/AWAKE/Jania2_Sopot.pdf)
16. Key figures from aquaculture industry 2012. 2013. Fiskeridirektoratet: 30 ss.
17. MILLER G.H., ALLEY R.B., BRIGHAM-GRETTE J., FITZPATRICK J.J., POLYAK L., SERREZE M.C., WHITE W.C. 2010: Arctic amplification: can the past constrain the future? *Quaternary Science Reviews* 29: 1779–1790.
18. NORDLI Ø., PRZYBYŁAK R., OGILVIE E.J., ISAKSEN K. 2014: Long-term temperature trends and variability on Spitsbergen: the extended Svalbard Airport temperature series, 1898–2012. *Polar Research* 33 (21349).

19. PARKINSON C.L., COMISO J.C. 2013: On the 2012 record low Arctic sea ice cover: Combined impact of preconditioning and an August storm. *Geophysical Research Letters* 40: 1356–1361.
20. PÄLLI A., MOORE J.C., JANIA J., GŁOWACKI P. 2003: Glacier changes in southern Spitsbergen, Svalbard, 1901–2000. *Annals of Glaciology* 31: 219–225.
21. PIECHURA J., WALCZOWSKI W. 2009: Warming of the West Spitsbergen Current and sea ice north of Svalbard. *Oceanologia* 51(2): 147–164.
22. SERREZE M.C., BARRY R. G. 2011: Processes and impacts of Arctic amplification: A research synthesis. *Global and Planetary Change* 77: 85–96.
23. Statistisk årbok 2013. Statistics Norway. Oslo – Kongsvinger: 399 ss.
24. SUND M., LUKNES T.R., EIKEN T. 2014: Surge dynamics in the Nathorstbreen glacier system, Svalbard. *The Cryosphere* 8: 632–638.
25. SVENDSEN H., BESZCZYŃSKA-MØLLER A., HAGEN J.O., LEFAUCONNIER B., TVERBERG V., GERLAND B., ØRBÆK J.B., BISCHOF K., PAPUCCI C., ZAJĄCZKOWSKI M., AZZOLINI R., BRULAND O., WIENCKE CH., WINTHER J.-G., DALLMANN W. 2002: The physical environment of Kongsfjorden-Krossfjorden, an Arctic fjord system in Svalbard. *Polar Research* 21(1): 133–166.
26. Torellbreen. Spitsbergen. Svalbard 1:100 000. Blad12. 1984. Norsk Polarinstitut. Oslo
27. UNWTO World Tourism Barometer and Statistical Annex 2014. 72 ss.
28. WALCZOWSKI W. 2012: Ocean – główny czynnik kształtujący klimat. [W:] *Arktyka Europejska – morski przewodnik użytkownika*. Instytut Oceanologii PAN, Sopot: 28–29. (www.iopan.gda.pl/projects/Arktyka_europejska)
29. WALCZOWSKI W., PIECHURA J. 2011: Influence of the West Spitsbergen Current on the local climate. *International Journal of Climatology* 31: 1088–1093.
30. WALCZOWSKI W., PIECHURA J., GOSZCZKO I., WIECZOREK P. 2012: Changes in Atlantic water properties: an important factor in the European Arctic marine climate. *ICES Journal of Marine Science* 69(5): 864–869.