

Streszczenie

Długoterminowe serie danych atmosferycznych dowodzą, że klimat ociepla się nieprzerwanie od kilku dekad. Te same trendy obserwuje się również w oceanie. Arktyka jest traktowana jako tzw. „hot spot” (ang.) zmian klimatycznych, gdzie ocieplenie postępuje około cztery razy szybciej niż gdziekolwiek indziej na świecie. Samo ocieplenie napędza szereg innych czynników, które mogą bezpośrednio i pośrednio wpływać na ekosystem Arktyki. Należą do nich: utrata lodu morskiego, wzrost mętności spowodowany rosnącą dostawą zawiesiny niesionej przez rzeki i topniejące lodowce, wysładzanie wód powierzchniowych zaostrzające problem stratyfikacji, rosnące zakwaszenie wód spowodowane rozpuszczaniem CO₂ itd. Wszystkie wymienione czynniki mogą się znacznie różnić w określonych skalach przestrzennych, batymetrycznych i czasowych. Ponieważ bentos w Arktyce jest liczny i zróżnicowany gatunkowo, jest kluczowym elementem morskich sieci troficznych. Odgrywa ważną rolę w ekosystemie, wspierając cyrkulację materii i wymianę energii znane jako sprzężenie bentosowo-pelagiczne. Bentos dzieli się na bentos żyjący na miękkim i twardym dnie; pierwszy jest często badany, drugiemu zaś poświęcano znacznie mniej uwagi. Ta rozbieżność w badaniach często wynika z trudności związanych z pobieraniem próbek z siedlisk skalistych. Często wymagane jest zaangażowanie doświadczonych płetwonurków. W prezentowanym badaniu asystowali oni przy montażu konstrukcji eksperymentalnych z wymiennymi płytkami kolonizacyjnymi. Zastosowanie plastikowych płytek o określonym rozmiarze pozwala na uzyskanie ustandaryzowanych wyników, które można porównywać między różnymi badaniami. Metodyka ta jest stosowana co najmniej od lat 20. XX wieku (choć płytki były wykonane z innego materiału), ale od tego czasu została udoskonalona.

Bentos dna twardego obejmuje wiele organizmów żyjących na skalistych podłożach, w tym faunę i florę, ale może również obejmować gatunki drylujące w skałach lub mobilną faunę związaną z tym siedliskiem. W niniejszym badaniu główny nacisk położono na faunę osiadłą (z wyjątkiem rozdziału V, w którym uwzględniono również wapienne glony koralowe) zamieszkującą płytką

strefę przybrzeżną arktycznego fiordu (Isfjord, Archipelag Svalbard). Gatunki litofilne mogą rosnąć na podłożu naturalnym lub o pochodzeniu antropogenicznym, w tym na skałach, brunatnicach, filarach i konstrukcjach portowych. Należą do nich między innymi pąkle, mszywioly, wieloszczety osiadłe, gąbki i osłonice.

Istnieje wiele czynników środowiskowych, które kształtują kolonizację i różnorodność fauny dna twardego, i można je podzielić na abiotyczne i biotyczne. Czynniki abiotyczne obejmują dostępność samego podłoża o preferowanej teksturze, orientacji i składzie mineralogicznym, hydrodynamikę środowiska (np. obecność pływów i prądów) oraz warunki fizykochemiczne, takie jak temperatura, zasolenie, pH i mętność. Czynniki biotyczne są również istotne dla tego procesu; obejmują one obecność biofilmu na podłożu, obecność niektórych organizmów, które mogą wspierać lub hamować kolonizację (np. występowanie konkurencji międzygatunkowej) oraz inne interakcje międzygatunkowe (np. drapieżnictwo).

Głównym celem niniejszej pracy było zbadanie czynników wpływających na proces kolonizacji fauny dna twardego w zmieniających się warunkach środowiskowych Arktyki, w oparciu o długoterminowy eksperyment terenowy.

Oczekuje się, że w wyniku ocieplenia klimatu gatunki z niższych szerokości geograficznych rozszerzą swoje zasięgi na północ. Zjawisko to nazywane jest borealizacją i odnotowano już tego typu zmiany w różnych siedliskach Arktyki. Nowi przybysze mogą zacząć konkurować z lokalną fauną arktyczną, co może prowadzić do redukcji liczebności gatunków arktycznych, a nawet całkowitego ich wyparcia. Aby rzetelnie zbadać skutki zmiany klimatu, jedno lub dwa badania sezonowe nie wystarczą; konieczny jest długoterminowy monitoring. Niestety, badania trwające dłużej niż dekadę są niezwykle rzadkie w tym rejonie. Dlatego celem badania było zbadanie struktury zbiorowisk zespołu litofilów na płyciznach fiordu arktycznego (Isfjord) pomiędzy dwiema odległymi w czasie kampaniami poboru prób (rozdział III). Konstrukcje eksperymentalne po raz pierwszy zainstalowano latem 2004 r., a pierwszy pobór prób miał miejsce rok później, w 2005 r. Procedurę powtórzono następnie latem 2019 r., przy czym pobranie prób miało miejsce w 2020 r. Uzyskane wyniki wskazały istotne różnice w składzie gatunkowym i zagęszczeniu fauny między okresami pobierania prób. Główną obserwacją była zmiana

dominacji taksonomicznej, która sugeruje reorganizację struktury zespołu. Na przykład w 2020 roku odnotowano wzrost zagęszczenia mszywiolów *Cylindroporella tubulosa*, *Microporella arctica* i *Tegella arctica*, przy jednoczesnym spadku zagęszczenia *Harmeria scutulata*. Zaobserwowano istotny wpływ głębokości na zagęszczenia osiągane przez taksony. Na płytszych głębokościach stwierdzono podwodne lasy brunatnic, które odegrały znaczącą rolę w kształtowaniu środowiska wokół miejsc poboru prób stwarzając sprzyjające warunki dla licznych litofilów. W próbach nie stwierdzono żadnych nowych gatunków pochodzenia borealnego, co nie potwierdza założeń dotyczących postępu procesu borealizacji zbiorowisk dna twardego. Jednak na podstawie zaledwie dwóch odległych kampanii poboru prób nie można z całą pewnością wyciągnąć wniosku, że wyniki badania były bezpośrednio związane ze zmianą klimatu.

Ocieplenie klimatu objawia się nie tylko stopniowym wzrostem temperatury, ale także zjawiskiem znanym jako fale upałów (ang. *heatwaves*). Fale upałów opisuje się jako przedłużające się okresy anormalnie ciepłych warunków, przekraczających typowe temperatury charakterystyczne dla danego obszaru. Mogą one występować o każdej porze roku, ale w Arktyce oczekuje się, że anomalie występujące w miesiącach zimowych będą miały większy wpływ na ekosystem. U wielu gatunków nawet krótkotrwałe ciepłe warunki mogą prowadzić do zmian w procesie rekrutacji i sukcesie reprodukcyjnym. Dlatego kolejnym celem projektu badawczego było zbadanie rocznej zmienności struktury zespołów dennych w okresie 11 lat (rozdział IV). Projekt eksperymentu ściśle odzwierciedlał protokół przedstawiony w rozdziale III; jednak coroczna wymiana płytek kolonizacyjnych miała miejsce od lata 2009 do lata 2020. Eksperyment terenowy pozwolił na obserwację nieliniowych trendów w składzie taksonomicznym i zagęszczeniu zespołów litofilnych w odpowiedzi na fluktuacje termiczne obserwowane na tym obszarze. Efekty nie były jednolite we wszystkich próbach, a reakcje na cieplejsze warunki często obserwowano z opóźnieniem, co jest możliwe, jeśli warunki te nie były śmiertelne dla już zrekrutowanych organizmów, lecz raczej wpływały na ich sukces reprodukcyjny. Również w tym badaniu nie zidentyfikowano żadnych nowych gatunków pochodzenia borealnego. Niemniej jednak udział organizmów borealnych, już obecnych w tym obszarze, wzrastał po cieplejszych

latach. Głównym zaobserwowanym rezultatem był znaczny spadek zagęszczenia endemicznego, oportunistycznego arktycznego mszywiola *H. scutulata* w próbach zebranych po 2013 roku.

Innym czynnikiem wpływającym na kolonizację organizmów jest orientacja przestrzenna podłoża. W niniejszym badaniu porównano sztuczne podłoża w położeniu poziomym skierowane w dół i w górę, oraz w położeniu pionowym. Każda z orientacji charakteryzowała się innym stopniem ekspozycji na światło i zdolnością do zapewnienia schronienia przed drapieżnikami. Celem rozdziału V było zbadanie wpływu orientacji podłoża i drapieżnictwa na różnorodność zespołu litofilów. Wcześniejsze doniesienia wskazują, że podłoża skierowane w dół, równoległe do dna morskiego, przyciągają większą bioróżnorodność niż te zorientowane pionowo. Uważa się jednak, że podłoża o orientacji pionowej sprzyjają intensywnej rekrutacji bezkręgowców ze względu na mniejszy wpływ sedymentacji.

Arktyka to region o stosunkowo niskim tempie kolonizacji dna twardego, dlatego drapieżnictwo może mieć istotny wpływ na strukturę zespołu, kształtując rozwój stadiów inicjalnych i wtórnych. Jednak wpływ drapieżnictwa może być również zależny od orientacji podłoża. Wiele gatunków litofilnych preferuje siedliska ukryte, ponieważ wkrótce po zasiedleniu młode osobniki są wrażliwe na ataki drapieżników. Do konsumentów żerujących na organizmach osiadłych należą ślimaki, jeżowce, chitony, pancerzowce, rozgwiazdy, wężowidła, kikutnice, wieloszczety i ryby z rodziny promieniopłetwych. Postawiono hipotezę, że intensywna aktywność drapieżników będzie miała miejsce na łatwiej dostępnych płytkach, skierowanych ku górze, podczas gdy płytki ustawione pionowo będą miały mniej śladów żerowania. Ślady żerowania są rodzajem bioerozji. Mogą być wynikiem skrobienia po podłożu przez ślimaki (ślady tarki - raduli) i jeżowce (wyżłobione ślady zębów - latarni Arystotelesa) podczas żerowania. Wiedząc, że niektóre zwierzęta pozostawiają ślady, celem było ilościowe określenie wpływu drapieżnictwa i próba przypisania śladów konkretnym drapieżnikom, o których wiadomo, że zamieszkują płytką strefę pływową Isfjordu. Oprócz podstawowego protokołu, konstrukcje eksperymentalne rozszerzono o dodatkowe poziome (skierowane ku górze) płytki kolonizacyjne i pionowe instalacje. Tak rozszerzony eksperyment przeprowadzono przez dwa kolejne lata, z corocznym zanurzaniem płytek kolonizacyjnych. Orientacja podłoża była istotnym czynnikiem kształtującym strukturę

zespołów litofilnych, przy czym jeden gatunek dominował w każdym położeniu. W przypadku płytek skierowanych ku górze był to jedyny zidentyfikowany glon, *Boreolithothamnion* sp., w przypadku płytek skierowanych w dół był to wieloszczet osiadły *Circeis* sp., a wśród płyt pionowych najliczniej występowała pąkla *Semibalanus balanoides*. Wbrew hipotezie, na płytkach skierowanych ku górze nie zaobserwowano największej aktywności drapieżników; przeciwnie, odnotowano najniższą intensywność żerowania. Zarówno na płytkach kolonizacyjnych skierowanych w dół, jak i pionowych stwierdzono najwyższą aktywność drapieżników mierzoną liczbą śladów, przy czym większość śladów żerowania była związana z aktywnością jeżowców.

Na potrzeby całego projektu doktorskiego przeanalizowano próbki z okresu 16 lat i zidentyfikowano ponad 200 000 pojedynczych organizmów. Badanie ujawniło wpływ wybranych czynników (miejsca, roku, głębokości i orientacji podłoża) na strukturę zespołów litofilnych w płytkich strefach przybrzeżnych Arktyki. Uzyskany zbiór danych stanowi istotne źródło informacji referencyjnych do wykorzystania w przyszłości, zwłaszcza w kontekście trwających zmian klimatu. Badania zgrupowań dna twardego są jak dotąd nieliczne, ale mają kluczowe znaczenie, ponieważ organizmy je tworzące są uznawane za bioindykatory zmian środowiskowych ze względu na osiadły charakter ich dorosłego życia (brak możliwości ucieczki przed niekorzystnymi warunkami środowiskowymi). Wyniki te potwierdzają znaczenie długoterminowego, kompleksowego monitorowania różnych czynników środowiskowych i składników ekosystemów w celu wiarygodnej oceny skutków zmian klimatycznych.