

Szymon Smoliński

„Reakcja ichtiofauny na zmienność warunków środowiskowych w południowym Bałtyku”

Rozprawa doktorska składa się z trzech spójnych tematycznie artykułów naukowych, opisujących, w jaki sposób ichtiofauna reaguje na zmienność środowiska, w tym czynniki naturalne, związane z warunkami hydrologicznymi i klimatycznymi oraz presję antropogeniczną, jak również nagłe zmiany w strukturze i funkcjonowaniu całego ekosystemu (tzw. „regime shifts”). Przedmiotem badań były zjawiska ekologiczne obserwowane na poziomie całego zbiorowiska ichtiofauny, uwzględniając jego strukturę taksonomiczną lub funkcjonalną, jak również na poziomie wybranej populacji ryb (stornia z południowego Bałtyku), poprzez analizę zmian w tempie wzrostu osobników. Wybrane reakcje ichtiofauny analizowano w skali przestrzennej lub czasowej z użyciem zaawansowanych technik statystycznych.

Rozdział pierwszy niniejszej pracy doktorskiej przedstawia wyniki modelowania reakcji zbiorowisk ryb w polskich wodach przejściowych i przybrzeżnych na zmiany poziomu presji antropogenicznych. Uzyskane wyniki posłużyły do stworzenia Indeksu Multimetrycznego, który wykorzystuje informacje na temat struktury i funkcjonowania ichtiofauny do oceny stanu ekologicznego wód w tych rejonach morza. Testowanie reakcji metryk ichtiofauny (wskaźników, opisujących różne cechy tego zbiorowiska) na zmiany w jakości środowiska wiąże się z trudnościami w odseparowaniu wpływu czynników naturalnych od reakcji wywołanej presją człowieka. Z tego powodu w procesie modelowania odpowiedzi poszczególnych wskaźników uwzględniono oba typy czynników środowiskowych. Na podstawie danych zebranych wzdłuż polskiego wybrzeża Morza Bałtyckiego w 2011, 2013 i 2014 roku wykazano, że największym źródłem naturalnej zmienności w strukturze ichtiofauny było zasolenie wód. Biorąc pod uwagę zasolenie wód oraz informację na temat sposobu połowu ryb, z użyciem uogólnionych modeli liniowych przetestowano statystycznie odpowiedź 20 wybranych metryk na zmiany wartości skumulowanego wskaźnika presji antropogenicznej (Baltic Sea Impact Index). Pięć wybranych metryk włączono w Indeks Multimetryczny, który wykazywał istotnie ujemną korelację ze wskaźnikiem presji antropogenicznej. Wyniki tej części pracy stanowią doskonałą podstawę do dalszego rozwoju i testowania narzędzi do oceny stanu ekologicznego wód na podstawie ichtiofauny w polskiej strefie przybrzeżnej i przejściowej. Zaprezentowany Indeks Multimetryczny został dostosowany do lokalnej specyfiki zbiorowisk ryb i warunków środowiskowych. Metryki włączone w Indeks Multimetryczny uwzględniają szerokie spektrum informacji na temat cech strukturalnych i funkcjonalnych ichtiofauny. Rozwinięty w tej pracy system oceny stanu ekologicznego pozwala na zmniejszenie wpływu naturalnych czynników środowiskowych oraz metodyki połowu na finalne wartości Indeksu oraz bardziej trafną ocenę stanu jakości ekosystemów. Zaproponowana metoda stanowi czułe narzędzie, pomagające w zidentyfikowaniu zmian ichtiofauny związanych z oddziaływaniem presji antropogenicznej. Zgodnie z dostępną wiedzą była to pierwsza próba wykorzystania uniwersalnego indeksu do oceny stanu ekosystemów na podstawie ichtiofauny zarówno w morskiej strefie przybrzeżnej, jak i strefie przejściowej. Opracowany Indeks Multimetryczny stanowi dobry sposób na zsyntetyzowanie złożonej informacji na temat odpowiedzi zgrupowania ryb na zmiany jakości środowiska i może pomóc w komunikacji z zarządzającymi, zainteresowanymi podmiotami oraz społeczeństwem.

W drugim rozdziale niniejszej pracy doktorskiej zbadano wpływ gradientów środowiskowych na zmiany bioróżnorodności ryb demersalnych (mierzonej wskaźnikiem Shannona-Weavera lub liczbą gatunków). Przedstawiono wyniki modelowania zależności

między bioróżnorodnością ryb demersalnych i cechami środowiska w obszarze południowego Bałtyku. Następnie dokonano predykcji bioróżnorodności tej grupy organizmów na podstawie dostępnych map warunków środowiskowych dla całego obszaru badań. W tej części pracy wykorzystane zostały dane pochodzące z międzynarodowego programu monitoringu ryb Baltic International Trawl Surveys (2001–2014) oraz mapy sześciu potencjalnych predyktorów: zasolenia wody w warstwie przydennej, głębokości, nachylenia dna, średniej temperatury wód przydennych w trakcie sezonu wegetacyjnego, rodzaju osadów dennych oraz rocznej średniej prędkości przepływu wód w strefie przydennej. W trakcie analiz statystycznych porównane zostało sześć technik modelowania: uogólnione modele liniowe, uogólnione modele addytywne, wielozmienna regresja adaptacyjna z użyciem funkcji sklepanych, metoda wektorów nośnych, wzmacniane drzewa regresyjne oraz lasy losowe. Zastosowano powtarzaną walidację krzyżową w celu porównania dokładności, będącej miarą jakości testowanych metod. Model oparty o lasy losowe wybrany został jako najlepszy algorytm i wykorzystany do predykcji przestrzennej wartości badanych wskaźników. Zgodnie z wynikami modelowania zasolenie wód wskazane zostało jako najważniejszy predyktor bioróżnorodności ryb demersalnych, co potwierdzało wcześniejsze studia innych autorów. Kolejnymi zmiennymi istotnie wpływającymi na wartość bioróżnorodności ichtiofauny demersalnej były głębokość i średnia temperatura wód przydennych w trakcie sezonu wegetacyjnego. W tej części pracy doktorskiej wykazano jak zmienność warunków środowiskowych wpływa na różnicowanie zbiorowiska ryb bytujących w strefie przydennej. Na podstawie poznanych zależności możliwe było stworzenie map predykcyjnych reprezentujących wartości wskaźników różnorodności ichtiofauny demersalnej w obszarze całego południowego Bałtyku. W tym rozdziale przedstawiono również w jaki sposób nowoczesne techniki modelowania, w oparciu o dostępne publicznie dane środowiskowe, mogą być zastosowane w celu dostarczenia informacji o przestrzennej dystrybucji wybranej grupy organizmów. Wykorzystanie tego typu informacji w planowaniu przestrzennym obszarów morskich powinno pomóc w stworzeniu rzetelnych podstaw zarządzania zasobami naturalnymi lub strategii na rzecz zachowania różnorodności biologicznej.

W trzecim rozdziale wykorzystano techniki sklerochronologiczne, oparte o analizę twardych struktur organizmów, w celu zbadania reakcji populacji wybranego gatunku ryb na zmienność czynników hydrologicznych i klimatycznych Morza Bałtyckiego. Do badań zmian intensywności wzrostu ryb posłużyły otolity storni (*Platichthys flesus*). Celem tej części pracy było przetestowanie znaczenia czynników środowiskowych, które wpływają na zmienność tempa wzrostu ryb, mierzoną na podstawie analizy przyrostów otolitu. Wykorzystane liniowe modele mieszane pozwoliły na stworzenie 74-letniej biochronologii, przedstawiającej obserwowane w czasie zmiany w tempie wzrostu ryb. W badaniach uwzględnione zostały archiwalne otolity pozyskane od storni złowionych w latach 1957-2016 w południowej części Morza Bałtyckiego. Poprzez analizę szerokości pierścieni rocznych otolitów wykazano, że na wzrost ryb w badanej populacji znaczący wpływ mają czynniki hydroklimatyczne. Zaobserwowano istotny efekt tzw. Baltic Sea Index, będącego ogólnym wskaźnikiem warunków hydrologicznych w Bałtyku. Na wzrost ryb istotny wpływ miała również średnia temperatura powierzchni morza. Ponadto analiza stworzonej serii biochronologicznej pozwoliła na zidentyfikowanie istotnych statystycznie zmian w tempie wzrostu storni w latach 1988, 1992 i 2006. Wyniki te potwierdziły wcześniejsze badania, skupiające się na procesach reorganizacji struktury i funkcjonowania ekosystemu (tzw. „regime shifts”) Morza Bałtyckiego. Wyniki przedstawione w tej części pracy doktorskiej opisują reakcje komercyjnie poławianej populacji storni na zmienność warunków środowiskowych i mogą wspomóc zarządzanie zasobami tych ryb z uwzględnieniem procesów ekosystemowych. Mają one również nowatorski charakter, wskazując na możliwość zastosowania technik sklerochronologicznych do identyfikacji nagłych reorganizacji

ekosystemów, które miały miejsce w przeszłości. Badania tego typu mogą być pomocne w zrozumieniu przeszłych przemian ekosystemów, zwłaszcza w rejonach morskich, w których dostępność innych serii danych biologicznych jest ograniczona.

Podsumowując, we wszystkich rozdziałach pracy zastosowano nowoczesne podejście do modelowania ekologicznego, wykorzystujące uogólnione modele liniowe, modele mieszane, analizy wielowymiarowe, czy uczenie maszynowe. Metody tego typu mają praktyczne zastosowanie jako narzędzie testowania hipotez, uogólniania obserwowanych procesów, jak również predykcji i symulacji stanu badanych populacji lub zbiorowisk organizmów w określonych warunkach środowiskowych. Wyniki badań przedstawionych w niniejszej dysertacji, poza walorem poznawczym, stanowią oryginalne rozwiązanie problemu badawczego oraz mają znaczenie praktyczne w działaniach służących monitorowaniu stanu środowiska morskiego i zarządzaniu jego zasobami. Rezultaty omawianych badań posłużą m.in. wdrażaniu Ramowej Dyrektywy Wodnej w zakresie oceny stanu ekosystemów na podstawie ichtiofauny. W pierwszym rozdziale pracy zastosowano nowatorskie podejście do analizy danych pochodzących zarówno ze strefy przybrzeżnej, jak i strefy przejściowej Polskich Obszarów Morskich. Wykorzystana metodyka testowania wskaźników, stanowiących elementy składowe indeksu multimetrycznego, pozwoliła na stworzenie narzędzia, które może zostać wykorzystane w monitoringu stanu ekologicznego wód morskich na podstawie ichtiofauny. Rozdział drugi dostarcza informacji o różnorodności ryb w obszarze południowego Bałtyku, które mogą być wykorzystane w planowaniu przestrzennym wspomagającym osiągnięcie celów Ramowej Dyrektywy do spraw Strategii Morskiej. Przeprowadzone badania poszerzyły wiedzę na temat czynników środowiskowych kształtujących zróżnicowanie zbiorowisk ryb związanych z siedliskami dennymi w południowym Bałtyku. Prezentowane w trzecim rozdziale pracy wyniki stanowią również oryginalną propozycję wykorzystania badań sklerochronologicznych do określania potencjalnych okresów, w których doszło do reorganizacji struktury i funkcjonowania ekosystemów morskich. Ta część pracy doktorskiej dostarcza ponadto nowej wiedzy na temat wrażliwości badanej populacji storni na zmienność czynników hydrologicznych i klimatycznych w południowym Bałtyku.