

MECHANIZM ROZPRASZANIA WSTECZNEGO FAL AKUSTYCZNYCH NA ŚLEDZIU BAŁTYCKIM (*CLUPEA HARENGUS*)

Na Morzu Bałtyckim od lat obserwowany jest intensywny wpływ antropogenicznego oddziaływania na różnorodność biologiczną i funkcjonowanie ekosystemu morza. Skutkiem tego oddziaływania jest nadmierna eksploatacja ryb gatunków przemysłowych, eutrofizacja, zanieczyszczanie i wprowadzanie nowych gatunków do środowiska (MacKenzie, 2005). W celu zrównoważonej eksploatacji żywych zasobów morskich niezbędna jest wiedza o ich stanie, w tym ich liczebności. Im większa będzie dokładność oszacowania ich biomasy tym dokładniej będzie można zaplanować działania związane z pozyskiwaniem zasobów morskich nie narażając ekosystemu na utratę równowagi. Oznacza to, że potrzebne są wiarygodne i szybkie metody szacowania zasobów ryb. Ta potrzeba stała się przyczyną coraz szerszego wykorzystania w tym celu metod hydroakustycznych, które jako metody bezinwazyjne dla środowiska, pozwalają w względnie krótkim czasie pozyskać dane na temat liczebności ryb z rozległych obszarów morskich.

Rekomendacje do badań szacowania zasobów różnych gatunków ryb w różnych akwenach morskich opracowywane są w ramach przynależących do *Międzynarodowej Rady Badań Morza ICES (International Council for the Exploration of the Sea)* grup roboczych, takich jak WGACEGG - *Working Group on Acoustic and Egg Surveys for Sardine and Anchovy in ICES areas VIII and IX* czy WGFASST - *Working Group on Fisheries Acoustic Science and Technology*. Na Morzu Bałtyckim nad badaniami tymi czuwa grupa robocza WGBIFS - *Baltic International Fish Survey Working Group*. Jednym z celów tej grupy jest coroczny monitoring zasobów śledzia bałtyckiego (*Clupea harengus*).

Badania zasobności śledzia są istotne z uwagi na kluczowe znaczenie tego gatunku zarówno dla gospodarki Polski jak i dla całego ekosystemu Morza Bałtyckiego. Akustyczne szacowania liczebności śledzia są prowadzone w różnych częściach morza poczynając od lat osiemdziesiątych. Jednak, wykorzystanie metod akustycznych napotkało na poważną przeszkodę. Pomiar hydroakustyczny wykazały, że siła celu *TS* bałtyckich ryb śledziowatych istotnie zależy od rejonu geograficznego oraz, że znacznie przewyższa wartości, które można otrzymać w ramach zależności *TS(L)* zalecanej obecnie przez organizację ICES przy akustycznym szacowaniu zasobów ryb śledziowatych w Bałtyku. Potwierdziły to również badania modelowe.

Biorąc pod uwagę zależność geograficzną modelu *TS(L)* dla śledziowatych ryb Bałtyckich, grupa robocza WGFASST zaleca przeprowadzenie badań charakterystyki rozpraszania fal akustycznych na śledziu (*TS(L)*) dla poszczególnych podobszarów południowego Bałtyku w tym podobszarów ICES nr 24, 25, 26, w których, za oszacowanie zasobów ryb, odpowiada Polska w ramach międzynarodowej konwencji ICES. Grupa robocza WGFASST rekomenduje wielostronnie podejście do badań: pomiary siły celu ryb przeprowadzone w warunkach *in situ* lub laboratoryjnych oraz modelowanie numeryczne.

Stosując się do tych zaleceń należy przeprowadzić modelowe badania właściwości rozpraszających osobników śledzia dla podobszarów ICES nr 24, 25 i 26. Uwzględniając, że w przypadku ryb posiadających pęcherz pławny (do których należą osobniki śledzia), na którym rozpraszanie wsteczne fal akustycznych może być determinujące, istotne jest, aby w badaniach uwzględnić szczegółowy kształt pęcherza pławnego oraz kąt nachylenia osi pęcherza pławnego

względem osi ciała ryby dla poszczególnych osobników ryb. Dotychczasowe badania modelowe nie uwzględniały tych czynników. Dysponując ograniczoną kolekcją danych morfometrycznych, badacze nie zajmowali się wpływem reprezentacyjności kolekcji danych na wyniki przeprowadzonych analiz. Te przesłanki stanowią motywację do przeprowadzenia badań realizowanych w ramach niniejszej rozprawy.

Główny cel rozprawy doktorskiej to: pogłębienie zrozumienia właściwości rozpraszających osobników śledzia (*Clupea harengus*) pozyskanego w obszarze polskiej strefy przybrzeżnej (podobszar ICES numer 26) na poszczególnych osobnikach ryb i ich skupiskach (uśrednione charakterystyki rozpraszania) korzystając ze statystycznie reprezentacyjnej kolekcji danych morfometrycznych osobników. Realizacja tego celu poznawczego, przyczyniając się do zrozumienia zaobserwowanych różnic modeli $TS(L)$ dla ryb śledziowatych różnych obszarów Bałtyku oraz umożliwiając opracowanie rekomendacji dla dalszych badań tej charakterystyki, ma istotny wymiar praktyczny związany z szacowaniem biomasy śledzia bałtyckiego.

W celu zrozumienia mechanizmów rozpraszania dźwięku na osobnikach śledzia przeprowadzono badania modelowe charakterystyk rozpraszania pojedynczych osobników ryb oraz ich uśrednionych charakterystyk rozpraszania. Do opisu rozpraszania fal akustycznych na ciełe i pęcherzu pławnym ryby wykorzystano Modal-Series-Based Deformed Cylinder Model (MSB-DCM) opracowany przez Stanton (1988, 1989). Za dane wejściowe do modelu posłużyły dane morfometryczne otrzymane na podstawie zdjęć rentgenowskich osobników śledzia pozyskanych z obszaru polskiej strefy przybrzeżnej (podobszar ICES 26) w listopadzie 2011 roku.

Na podstawie wyników otrzymanych podczas badań modelowych oraz ich szczegółowej analizy w oparciu o dane literaturowe istotnie pogłębiono zrozumienie mechanizmu rozpraszania fal akustycznych na śledziu bałtyckim: na pojedynczych osobnikach oraz skupiskach śledzia ("uśrednione" charakterystyki rozpraszania).

W wyniku przeprowadzonych w niniejszej rozprawie doktorskiej badań:

1. wykazano, że przy badaniach teoretycznych charakterystyk rozpraszania osobników śledzia istotne jest posiadanie reprezentacyjnej kolekcji wejściowych danych morfometrycznych do modelu;
2. uzasadniono istotność uwzględnienia w obliczeniach numerycznych charakterystyk rozpraszania dla poszczególnych osobników śledzia oraz "uśrednionych" charakterystyk dokładnych kształtów ciała i pęcherzy pławnych ryb oraz kąta pomiędzy osiami ciała i pęcherza pławnego;
3. udowodniono, że wkład rozpraszania na ciełe do całkowitego rozpraszania dla poszczególnych osobników śledzia może być istotny (może wynosić do 55%) w przypadku nieprostokątnego padania fal akustycznych na oś ciała ryby. Wkład ten zależy od długości osobnika, kąta pomiędzy osiami ciała i pęcherza pławnego, kształtu pęcherza oraz kąta nachylenia osi ciała ryby względem kierunku padania fali akustycznej;
4. zademonstrowano czułość "uśrednionej" charakterystyki rozpraszania w stosunku do parametrów rozkładu osobników ryb względem orientacji, kąta pomiędzy osiami ciała i pęcherza pławnego ryby, częstotliwości akustycznej oraz kształtu ciała i pęcherza pławnego ryby;

5. wykazano różnicę pomiędzy charakterystykami "uśrednionymi" $TS_m(L)$ otrzymanymi dla osobników śledzia z obszaru polskiej i szwedzkiej strefy przybrzeżnej związanej z różnicą ich morfometrii;
6. wykazano, że wartość parametru b_{20} wyznaczanego podczas pomiarów *in situ* siły celu TS zależy od składu gatunkowego kolekcji ryb wybranych do badań;
7. zgromadzona kolekcja zdjęć rentgenowskich oraz zbiory danych morfometrycznych są cennym materiałem dla ichtiologów prowadzących badania na bałtyckich osobnikach śledzia. Dużą wartość praktyczną może mieć również opracowana metodyka przygotowania do badań i pozyskania zdjęć RTG dla osobników śledzia.

Zademonstrowane wyniki badań numerycznych jednoznacznie przedstawiają, że charakterystyka $TS(L)$ zaadoptowana z Morza Północnego, nie powinna być wykorzystywana w badaniach szacowania zasobów śledzia Morza Bałtyckiego, gdyż może prowadzić do przeszacowania gatunku.

W celu otrzymania charakterystyki "uśrednionej" $TS_m(L)$ dla skupisk śledzia na podstawie pomiarów *in situ*, która będzie mogła być wykorzystana przy akustycznych szacowaniach zasobów śledzia bałtyckiego są potrzebne dodatkowe badania dla różnych podobszarów ICES Morza Bałtyckiego. Szczególną uwagę należy zwrócić na:

- określenie parametrów rozkładu osobników ryb według orientacji. Należy zbadać orientację ryb w skupisku nie tylko dla ich pływania swobodnego w kolumnie wody ale również i zmianę ich zachowania (orientacji) podczas akustycznego szacowania ich zasobów z wykorzystaniem wyposażonego w aparaturę hydroakustyczną statku ("ucieczka" od statku pod wpływem generowanych przez niego szumów oraz pozostałego pola ciśnień hydro-fizycznych);
- szczegółowe zbadanie wpływu czynników podlegających zmianom czasowo - przestrzennym, mających pośredni wpływ na mierzone wartości siły celu TS w różnych sezonach, latach i obszarach badań;
- ujednoczenie sposobów zbierania i analizy danych akustycznych i/lub biologicznych dla całego obszaru Morza Bałtyckiego;
- przeprowadzenie pomiarów siły celu oddzielnie dla szprota i śledzia bałtyckiego;
- przeprowadzenie oddzielnej analizy danych dla poszczególnych częstotliwości przy pomiarach siły celu dla różnych częstotliwości akustycznych.

Usystematyzowanie i rozszerzenie zakresu badań umożliwi w sposób konstruktywny porównywanie ze sobą otrzymanych przez różnych badaczy wyników i na ich podstawie formułowanie obiektywnych wniosków. Uwzględniając niezbędność tych badań do dalszego rozwoju akustycznej techniki szacowania zasobów ryb śledziowatych w Bałtyku można wnioskować o dużym znaczeniu praktycznym niniejszej rozprawy doktorskiej.