



**Charakterystyczne cechy rozkładów
przestrzennych siły objętościowego
rozpraszania wstecznego – rozpraszanie
fal akustycznych na rybach Zatoki
Puckiej.**

Rozprawa Doktorska

**Characteristic features of the spatial
volume backscattering strength
distributions - the scattering of acoustic
waves by fish of the Puck Bay.**

PHD Thesis

Patryk Damian Pezacki

2022

Promotor pracy / Supervisor

Dr hab. Natalia Gorska

Instytut Oceanologii Polskiej Akademii Nauk w Sopocie

Składam serdeczne podziękowania Pani dr hab. Natalii Gorskiej,
promotorowi mojej pracy,
za pełne zaangażowanie w mój rozwój naukowy
oraz wspólne działania na rzecz nauki.

Dziękuję Panu dr. Jakubowi Idczakowi,
którego pomoc podczas prowadzenia badań była kluczowa.

Dziękuję za konsultacje biologiczne
Panu dr. hab. Mariuszowi Sapocie, prof. UG,
Pani dr hab. Iwonie Psuty, prof. MIR-PIB,
Panu mgr. Maciejowi Kramkowskiemu.

Dziękuję Panu dr. Helge Balk z Uniwersytetu w Oslo,
za udostępnienie pełnej wersji oprogramowania Sonar5-Pro.

Dziękuję załodze statku r/v Oceanograf,
za każdą pomoc w pracach badawczych na morzu.

Dziękuję studentom, biorącym udział w naszych rejsach.

Dziękuję moim Rodzicom,
wspierających moją pasję naukową.

Dziękuję Justynie, mojej dziewczynie,
za motywację do ukończenia rozprawy.

Niniejszą pracę dedykuję moim Rodzicom – Alicji i Adamowi
oraz Justynie.

Streszczenie

Głównym celem badań jest określenie charakterystycznych cech morfometrycznych (geometrycznych), energetycznych oraz „spektralnych” (zależność siły objętościowego rozpraszania wstecznego od częstotliwości) rozkładów przestrzennych siły objętościowego rozpraszania wstecznego, w tym ich zmienności czasowej dla rozpraszania na skupiskach ryb w Zatoce Puckiej.

Uzasadnienie badań: Unikalność badanego obszaru przyrodniczego i jego wrażliwość na czynniki antropogeniczne oraz nie wykorzystany w pełni na Morzu Bałtyckim znaczący potencjał zdalnych metod hydroakustycznych w badaniach ekosystemów morskich, jak również i niemożliwość bezpośredniego zastosowania metod hydroakustycznych opracowanych dla innych akwenów do Morza Bałtyckiego oraz niemożność przeniesienia wiedzy, dotyczącej charakterystycznych cech rozkładów przestrzennych siły objętościowego rozpraszania wstecznego, z głębokowodnych obszarów polskiej części południowego Bałtyku do Zatoki Puckiej, sprawiają, że badania, wyniki których są przedstawione w niniejszej rozprawie są bardzo istotne. Bez prowadzenia badań skierowanych na określenie charakterystycznych cech rozkładów przestrzennych siły objętościowego rozpraszania wstecznego dla rozpraszania fal akustycznych na obiektach biologicznych w Zatoce Puckiej nie jest możliwe opracowanie hydroakustycznych metod klasyfikacyjnych dla badanego obszaru.

Wyniki: Badania wykazały, że charakter rozkładów przestrzennych siły objętościowego rozpraszania wstecznego dla rozpraszania fali akustycznej na skupiskach ryb w zewnętrznej Zatoce Puckiej istotnie różni się od charakteru rozkładów zaobserwowanych hydroakustycznie w głębokowodnej części Zatoki Gdańskiej oraz na Głębi Gdańskiej.

Pomiary hydroakustyczne, wyniki których są przedstawione w niniejszej rozprawie, pogłębiają zrozumienie zmienności sezonowej i dobowej parametrów, opisujących rozkłady przestrzenne siły objętościowego rozpraszania wstecznego dla rozpraszania fali akustycznej na skupiskach ryb. Wykazano różnicę w charakterze zmienności czasowej (dobowej i sezonowej) tych parametrów w porównaniu z badanymi wcześniej głębokowodnymi obszarami.

Hydroakustyczne pomiary z zastosowaniem echosondy typu split-beam, prowadzone w sposób ciągły podczas trwania migracji, pozwoliły na wgląd w jaki sposób organizmy przemieszczają się w toni wodnej. Tak szczegółowe badania nie były prowadzone na głębszych

obszarach Zatoki Gdańskiej i Głębi Gdańskiej w przeszłości. Przeprowadzone pomiary dając wgląd w charakterystyczne cechy migracji w zewnętrznej Zatoce Puckiej wykazały również różnice z wymienionymi wyżej obszarami.

Po raz pierwszy:

- dla polskich obszarów południowego Bałtyku przeprowadzono szczegółowe badania dla ławic akustycznych,

- dla Morza Bałtyckiego przeanalizowano zmiany dobowe i sezonowe odpowiedzi częstotliwościowej dla skupisk organizmów oraz przedstawiono ich interpretację,

- dla Morza Bałtyckiego podjęto wysiłek przygotowawczy - analizę cech szczególnych rozkładów przestrzennych siły rozpraszania wstecznego (dla rozpraszania na rybach) - niezbędny dla opracowania hydroakustycznych metod klasyfikacyjnych. Podjęto pierwsze próby klasyfikacji.

Znaczenie przeprowadzonych badań: Przeprowadzone badania, wyniki których są przedstawione w rozprawie, należą do nowatorskiego nurtu światowego w rozwoju hydroakustyki. Nurt ten polega na rozwoju nowych klasyfikacyjnych technik hydroakustycznych, w tym zwiększeniu obszaru ich zastosowania do badań szerszego zakresu: komponentów ekosystemów morskich i ich charakterystyk. Przeprowadzone badania posłużą rozwojowi klasyfikacyjnych metod hydroakustycznych do badań stanu oraz funkcjonowania ekosystemów Morza Bałtyckiego.

Należy podkreślić, że został wybrany do badań obszar głębokowodnej części Zatoki Puckiej zewnętrznej, gdzie badania hydroakustyczne o charakterze biologicznym prowadzone były w bardzo ograniczonym zakresie i gdzie istnieją również luki wiedzy dotyczącej sezonowych i dobowych zmian rozkładów przestrzennych, biomasy, zachowania oraz składu gatunkowego ryb. Wiedza otrzymana w ramach niniejszej pracy, dotycząca rozkładów przestrzennych ryb, jest istotna dla dalszych badań ichtiologicznych i ekologicznych tego obszaru.

Przeprowadzone badania posiadają również istotny wymiar praktyczny, ponieważ zdobyta wiedza oraz wykonany krok w kierunku opracowania klasyfikacyjnych metod hydroakustycznych, otwierając nowe możliwości dla zrozumienia funkcjonowania ekosystemu Zatoki Gdańskiej, przyczynią się do doskonalenia naukowych podstaw innowacyjnego

podejścia, jakim jest podejście ekosystemowe w zintegrowanym zarządzaniu obszarami morskimi.

Summary

The main objective of this research is to determine the characteristic morphometric (geometric), energetic and "spectral" characteristics (dependence of the volume backscattering strength on frequency) spatial distributions of the volume backscattering strength, including their temporal variability for scattering on fish clusters in the Puck Bay.

Justification of the research: Puck Bay is a unique natural habitat, highly sensitive to anthropogenic factors. Because of its distinctive characteristics, it is impossible to apply hydroacoustic methods developed for other waters of the Baltic Sea and, therefore, to adapt expert knowledge regarding the characteristic features of spatial distributions of volume backscattering strength from deep-water areas of the Polish part of the Southern Baltic Sea to the Puck Bay. As remote hydroacoustic methods in the study of marine ecosystems are not yet fully exploited in the Baltic Sea, the abovementioned circumstances make the research, the results of which are presented in this dissertation, very important. Without conducting research aimed at determining the characteristic features of spatial distributions of the volume backscattering strength for the scattering of acoustic waves on biological objects in the Puck Bay, it is not possible to develop hydroacoustic classification methods for the studied area.

Results: Studies have shown that the nature of spatial distributions of the volume backscattering strength for acoustic wave scattering on fish clusters in the outer Puck Bay is significantly different from the nature of distributions observed hydroacoustically in the deep-water part of the Gulf of Gdańsk and in the Gdańsk Deep.

Hydroacoustic measurements, the results of which are presented in this dissertation, increase understanding of seasonal and diurnal variability of parameters describing spatial distributions of the volume backscattering strength for the scattering of acoustic waves on fish clusters. A difference in the nature of the temporal (daily and seasonal) variability of these parameters compared to the previously studied deep-water areas is demonstrated.

Hydroacoustic measurements using a split-beam sonar, carried out continuously throughout migration, allowed for insight into how organisms move in the water depths. Such detailed research has not been done in deeper areas of the Gulf of Gdansk and the Gdansk Deep

in the past. Conducted measurements not only provided insight into characteristic features of migration in the outer Puck Bay, but also showed differences with the above-mentioned areas.

For the first time:

- detailed research was carried out for acoustic shoals for the Polish areas of the Southern Baltic Sea,

- daily and seasonal changes in the frequency response for clusters of organisms for the Baltic Sea were analyzed and interpreted,

- analysis of the features of the specific spatial distributions of the volume backscattering strength (for scattering on fish) was carried out as a preliminary effort necessary for the development of hydroacoustic classification methods for the Baltic Sea. The first attempts at classification were made.

Significance of the conducted research: The results that are presented in this dissertation belong to an innovative world trend in the development of hydroacoustic. This trend involves development of new hydroacoustic classification techniques, including increasing the area of their application to the study of broader array of parameters, specifically the components of marine ecosystems and their characteristics. Presented research will be used to develop hydroacoustic classification methods to study the state and functioning of the ecosystems of the Baltic Sea.

It should be emphasized that the deep-water part of the Outer Puck Bay was selected for research because hydroacoustic research of a biological nature so far has been carried out there to a very limited extent and where gaps in knowledge regarding seasonal and daily changes in spatial distributions, biomass, behavior and species composition of fish are present. Insights gained from this work, regarding the spatial distributions of fish, are important for further ichthyological and ecological research of this area.

Conducted research also has an important practical dimension, because the knowledge gained and the steps taken towards the development of classification hydroacoustic methods, open new opportunities for understanding the functioning of the ecosystem in the Gulf of Gdansk, and will contribute to the improvement of the scientific basis of the innovative approach, which is the ecosystem approach for the integrated management of marine areas.

Spis Treści

| | |
|--|----|
| 1. Wstęp..... | 12 |
| 1.1 Wprowadzenie..... | 12 |
| 1.1.1 Cel pracy | 12 |
| 1.2 Uzasadnienie badań. Dotychczasowy stan wiedzy. | 14 |
| 1.2.1 Zatoka Gdańska jako ważny obszar badań | 14 |
| 1.2.2 Unikalność wybranego obszaru badań w skali południowego Bałtyku | 16 |
| 1.2.3 Metody hydroakustyczne w badaniach ekosystemów morskich..... | 18 |
| 1.2.4 Wykorzystanie metod hydroakustycznych do badań biologicznych na Zatoce Puckiej (stan wiedzy) | 25 |
| 1.3 Struktura rozprawy | 27 |
| 2. Metodyka..... | 29 |
| 2.1 Pomiary hydroakustyczne | 29 |
| 2.1.1 Aparatura hydroakustyczna..... | 29 |
| 2.1.2 Konfiguracja pomiarowa..... | 32 |
| 2.1.3 Pomiary szumu..... | 32 |
| 2.1.4 Kalibracja echosond | 33 |
| 2.2 Strategia zbierania danych hydroakustycznych | 34 |
| 2.2.1 Poligon badawczy | 34 |
| 2.2.2 Strategia wykonywania pomiarów hydroakustycznych..... | 36 |
| 2.3 Analiza danych hydroakustycznych..... | 40 |
| 2.3.1 Oprogramowanie Sonar5-Pro, jego możliwości i wykorzystanie do wstępnej obróbki danych. | 40 |
| 2.4 Pomiary środowiskowe | 41 |
| 2.4.1 Zbieranie danych hydrofizycznych | 41 |
| 2.4.2 Określenie warunków optycznych | 43 |
| 2.5 Źródła informacji o gatunkach ryb obecnych na poligonie badawczym..... | 43 |
| 3. Dobowe i sezonowe zmiany rozkładów przestrzennych organizmów..... | 46 |

| | | |
|-------|---|----|
| 3.1 | Metodyka – analiza danych..... | 47 |
| 3.2 | Rozkłady przestrzenne siły objętościowego rozpraszania wstecznego dla okresów dziennego i nocnego w poszczególnych sezonach badawczych - wyniki..... | 48 |
| 3.2.1 | Sezon jesienny (październik 2018). Wyniki pomiarów w okresach dziennym i nocnym | 48 |
| 3.2.2 | Sezon zimowy. Wyniki pomiarów w okresach dziennym i nocnym. | 50 |
| 3.2.3 | Sezon wiosenny. Wyniki pomiarów w okresach dziennym i nocnym..... | 53 |
| 3.2.4 | Sezon letni. Wyniki pomiarów w okresach dziennym i nocnym | 56 |
| 3.3 | Dyskusja - porównanie akustycznych obrazów zarejestrowanych w godzinach dziennych i nocnych dla różnych pór roku | 59 |
| 3.3.1 | Obraz akustyczny - pora dzienna | 59 |
| 3.3.2 | Obraz akustyczny - pora nocna. Wpływ warunków hydrofizycznych. Różnica z obszarami głębszymi | 61 |
| 3.3.3 | Obraz akustyczny w różnych sezonach badawczych a gatunek ryb | 63 |
| 3.4 | Podsumowanie | 66 |
| 4. | Parametryzacja obrazów akustycznych - zmiany dobowe i sezonowe rozkładów przestrzennych siły objętościowego rozpraszania wstecznego | 69 |
| 4.1 | Metodyka - analiza danych | 70 |
| 4.1.1 | Analiza parametryczna całkowitego obrazu akustycznego zarejestrowanego przez echosondę | 70 |
| 4.1.2 | Analiza parametryczna ławic akustycznych | 71 |
| 4.2 | Analiza parametryczna echogramów. Wyniki i Dyskusja | 72 |
| 4.2.1 | Rozkład przestrzenny siły objętościowego rozpraszania wstecznego - głębokość środka ciężkości | 72 |
| 4.2.2 | Rozkład przestrzenny siły objętościowego rozpraszania wstecznego - unormowany moment bezwładności | 77 |
| 4.2.3 | Rozkład przestrzenny siły objętościowego rozpraszania wstecznego - siła objętościowego rozpraszania wstecznego scałkowana po głębokości | 83 |
| 4.3 | Analiza parametryczna ławic akustycznych. Wyniki i Dyskusja..... | 92 |

| | |
|---|-----|
| 4.3.1 Ławice akustyczne - głębokość środka ciężkości | 93 |
| 4.3.2 Ławice akustyczne - unormowany moment bezwładności | 94 |
| 4.3.3 Ławice akustyczne - uśredniona siła objętościowego rozpraszania wstecznego | 95 |
| 4.4 Podsumowanie | 96 |
| 5. Dobowe migracje pionowe na Zatoce Puckiej | 99 |
| 5.1 Analiza danych | 100 |
| 5.2 Wyniki - wzorzec dobowych migracji pionowych w sezonie jesiennym | 101 |
| 5.2.1 Dobowa migracja pionowa w dół podczas wschodu słońca. Październik 2018 ... | 101 |
| 5.2.2 Dobowa migracja pionowa w górę podczas zachodu słońca. Październik 2018 .. | 106 |
| 5.3 Wyniki - wzorzec dobowych migracji pionowych w sezonie wiosennym | 111 |
| 5.3.1 Dobowa migracja pionowa organizmów o wschodzie słońca. Kwiecień 2019 | 111 |
| 5.3.2 Dobowa migracja pionowa organizmów podczas zachodu słońca. Kwiecień 2019 | 116 |
| 5.4 Dyskusja. Porównanie wzorców dobowych migracji pionowych w różnych sezonach | 120 |
| 5.4.1 Różnica w przebiegu dobowej migracji pionowej (wzorzec migracji) w sezonach wiosennym i jesiennym | 120 |
| 5.4.2 Czas rozpoczęcia dobowych migracji pionowych względem momentu zachodu i wschodu słońca oraz czas ich trwania w sezonach wiosennym i jesiennym | 121 |
| 5.4.3 Czas pojawiania i rozproszenia się ławic akustycznych względem początku migracji oraz względem wschodu i zachodu słońca. Kwiecień 2019. | 123 |
| 5.4.4 Sezonowe różnice w pionowej amplitudzie (magnitudzie) migracji | 124 |
| 5.4.5 Prędkość dobowych migracji pionowych | 126 |
| 5.5 Podsumowanie | 131 |
| 6. Charakterystyka „spektralna” przestrzennego rozkładu siły objętościowego rozpraszania wstecznego (ang. – frequency response - odpowiedź częstotliwościowa) – rozpraszanie na skupiskach organizmów w Zatoce Puckiej. Zmienność dobową i sezonową | 134 |
| 6.1 Metodyka – zbiór i analiza danych | 136 |

| | |
|---|-----|
| 6.1.1 Analiza wstępna – przygotowanie danych hydroakustycznych do określenia odpowiedzi częstotliwościowej..... | 136 |
| 6.1.2 Analiza właściwa – oszacowanie odpowiedzi częstotliwościowej | 139 |
| 6.2 Odpowiedź częstotliwościowa. Zmiany sezonowe i dobowe. Wyniki | 140 |
| 6.2.1 Zmiany dobowe odpowiedzi częstotliwościowej. Sezony jesienny i zimowy..... | 140 |
| 6.2.2 Zmiany sezonowe odpowiedzi częstotliwościowej dla ławic. Sezony jesienny (październik 2018), wiosenny (kwiecień 2019) i letni (lipiec 2019) | 144 |
| 6.2.3 Różnica odpowiedzi częstotliwościowej dla ławic w toni wodnej i przy dnie. Sezon wiosenny (kwiecień 2019). | 146 |
| 6.3 Odpowiedź częstotliwościowa. Zmiany sezonowe i dobowe. Dyskusja. | 148 |
| 6.3.1 Zmiany dobowe odpowiedzi częstotliwościowej. Sezony jesienny i zimowy..... | 148 |
| 6.3.2 Sezon jesienny: porównanie wyników pomiarowych z wynikami teoretycznymi dla bałtyckich śledzia oraz szprota..... | 150 |
| 6.3.3 Zmiany sezonowe odpowiedzi częstotliwościowej dla ławic. Sezony jesienny (październik 2018), wiosenny (kwiecień 2019) i letni (lipiec 2019). | 153 |
| 6.4 Podsumowanie | 155 |
| 7. Próba rozróżnienia organizmów: klasteryzacja z wykorzystaniem parametrów ławic akustycznych przy użyciu logiki rozmytej (Fuzzy c-means) | 157 |
| 7.1 Wstęp..... | 157 |
| 7.2 Metodyka..... | 159 |
| 7.2.1 Klasteryzacja danych – algorytm klasyfikacyjny..... | 159 |
| 7.2.2 Dane wejściowe..... | 160 |
| 7.3 Wyniki: trzy próby klasyfikacji..... | 161 |
| 7.4 Dyskusja – trzy próby klasyfikacji..... | 163 |
| 7.5 Podsumowanie | 165 |
| 8. Podsumowanie: główne wyniki i ich znaczenie (aspekty naukowy i praktyczny) | 166 |
| Spis rysunków | 173 |
| Spis Tabel | 179 |

Bibliografia..... 180

1. Wstęp

1.1 Wprowadzenie

Od wielu lat Morze Bałtyckie jest pod intensywnym wpływem antropogenicznym. W raporcie HELCOM z 2010 opisano, że na 24 zidentyfikowane usługi dostarczane przez ekosystem Morza Bałtyckiego tylko 10 funkcjonuje prawidłowo a 7 jest poważnie zagrożonych, w tym zdolność ekosystemu do regeneracji i buforowania antropogenicznych obciążeń (HELCOM 2010). Czynniki antropogeniczne mają wpływ między innymi na funkcjonowanie ekosystemu morskiego oraz na różnorodność biologiczną organizmów morskich, poprzez np. eutrofizację i inne zanieczyszczenia, wprowadzanie gatunków inwazyjnych i przelawianie gatunków ryb przemysłowych (MacKenzie, 2005). Wiedza o organizmach morskich, ich zachowaniu, liczebności, rozkładach przestrzennych jest ważna przy wdrażaniu zrównoważonych działań eksploatacyjnych Morza Bałtyckiego. Efektywne pozyskiwanie takiej wiedzy wymaga szybkich i wiarygodnych metod do badań środowiska morskiego. Do takich metod należą zdalne metody hydroakustyczne (Trenkel i in., 2011; 2016).

W ostatnich latach metody hydroakustyczne do badań ekosystemów morskich, w tym badań biologicznych, są prężnie rozwijane na różnych morzach i oceanach, ponieważ pozwalają na szybki zbiór danych z dużych obszarów i jako metody bezinwazyjne nie ingerują w środowisko w odróżnieniu od metod kontaktowych (np. zaciągów sieciowych czy trałowania) (Anderson i in., 2007; Fernandes, 2009; Korneliussen i in., 2009; De Robertis i in., 2010; Woillez i in., 2012; Campanella i Taylor, 2016; Gastauer i in., 2017; Berger i in., 2018).

Wyniki przedstawione w niniejszej rozprawie doktorskiej są istotne dla rozwoju metod hydroakustycznych i analitycznych danych akustycznych dla obszaru Zatoki Puckiej.

1.1.1 Cel pracy

Głównym celem badań jest określenie charakterystycznych cech morfometrycznych (geometrycznych), energetycznych oraz „spektralnych” (zależność siły objętościowego rozpraszania wstecznego od częstotliwości, *ang.* „frequency response”) rozkładów przestrzennych siły objętościowego rozpraszania wstecznego, w tym ich zmienności czasowej dla rozpraszania na skupiskach ryb w Zatoce Puckiej. Dla realizacji głównego celu badawczego zostały sformułowane cele szczegółowe, czyli cele poszczególnych zadań badawczych.

Cel szczegółowy 1

Określenie:

- (i) charakterystycznych cech morfometrycznych i energetycznych rozkładów przestrzennych siły objętościowego rozpraszania wstecznego (ze szczególnym uwzględnieniem tzw. „ławic akustycznych” - termin zostanie wyjaśniony w podrozdziale 3.1) oraz zmian dobowych i sezonowych tych rozkładów.
- (ii) Porównanie otrzymanych wyników w stosunku do rozkładów przestrzennych dla głębokowodnych obszarów polskiej części południowego Bałtyku (np., Zatoki Gdańskiej, Głębi Gdańskiej i in.), badanych w przeszłości.

Cel szczegółowy 2:

Określenie na podstawie obrazu akustycznego charakterystycznych cech migracji dobowych organizmów podczas wschodu i zachodu słońca dla różnych sezonów.

Cel szczegółowy 3:

Określenie częstotliwościowej zależności uśrednionej siły objętościowego rozpraszania wstecznego (ang. - frequency response) oraz jej zmienności dobowej i sezonowej.

Wyznaczenie powyższych celów badawczych jest uzasadnione z następujących powodów:

1. Unikalność badanego obszaru przyrodniczego i jego wrażliwość na intensyfikującą się działalność człowieka na morzu.
2. Istotność realizacji celu rozprawy dla rozwoju zdalnych technik hydroakustycznych posiadających szereg istotnych zalet w porównaniu z innymi kontaktowymi i bezkontaktowymi metodami wykorzystywanymi do badań ekosystemów morskich.
3. Niemożliwość bezpośredniego zastosowania klasyfikacyjnych metod hydroakustycznych z innych akwenów na Morzu Bałtyckim (organizmy bałtyckie jako organizmy morza półzamkniętego, posiadają swoją specyfikę, w stosunku do której są czule ich właściwości rozpraszające).

4. Niemożność bezpośredniego przeniesienia wiedzy, dotyczącej charakterystycznych cech rozkładów przestrzennych siły objętościowego rozpraszania wstecznego, z głębokowodnej części Zatoki Gdańskiej oraz innych głębszych obszarów polskiej części południowego Bałtyku do Zatoki Puckiej (część zewnętrzna), m.in. na skutek różnicy warunków hydrofizycznych.
5. Fragmentaryczność dotychczasowych badań hydroakustycznych ekosystemu Zatoki Gdańskiej, a w szczególności jej części - zewnętrznej Zatoki Puckiej.
6. Zgodność kierunku proponowanych badań z nowatorskim trendem rozwoju hydroakustyki szeroko stosowanej do badań ekosystemów morskich.
7. Ekosystem Zatoki Gdańskiej, jako zatoki morza półzamkniętego, jest dla mórz o podobnym charakterze obszarem modelowym do badań wpływu działalności człowieka na ekosystemy morskie.

Dla realizacji celu z wykorzystaniem nowoczesnych urządzeń i zaawansowanego oprogramowania specjalistycznego będą zebrane i przeanalizowane dane hydroakustyczne na poligonie badawczym w zewnętrznej Zatoce Puckiej oraz przeprowadzona ich interpretacja na podstawie pomiarów hydrofizycznych oraz istniejącej dostępnej dla tego akwenu wiedzy literaturowej oraz zawartej w opracowanych bazach danych.

W następnym podrozdziale przedstawiono szczegółowe uzasadnienie podjęcia realizacji wyznaczonego celu.

1.2 Uzasadnienie badań. Dotychczasowy stan wiedzy.

1.2.1 Zatoka Gdańska jako ważny obszar badań

Morze Bałtyckie jest specyficznym morzem, różniącym się znacznie od otwartych mórz i oceanów. Szczególną uwagę należy zwrócić na niskie zasolenie morza, które wynosi średnio w zależności od szerokości geograficznej od 3 PSU w Zatoce Botnickiej do 9 PSU w południowo-zachodniej części Bałtyku (Kullenberg, 1981; Viktorsson, 2018) i jest kilkakrotnie mniejsze niż w światowym oceanie (średnio 35 PSU (Eilers i in., 1990)).

Również pionowe uwarstwienie termohalinowe wód w Morzu Bałtyckim jest inne niż w głębokich oceanach, jest zmienne zarówno w czasie jak i w przestrzeni. Warunki termohalinowe na Morzu Bałtyckim będą się różnić między ujściem Cieśnin Duńskich a Głębią

Gdańską, czy Zatoką Pucką (Kullenberg, 1981, Viktorsson, 2018). Na strukturę termohalinową akwenu mają wpływ rzeki, wlewy z Morza Północnego czy wymiana ciepła z atmosferą w poszczególnych porach roku oraz mieszanie się toni wodnej (Kullenberg, 1981).

Warunki hydrofizyczne spowodowały, że organizmy żyjące w Bałtyku cechują się mniejszą różnorodnością w porównaniu do innych akwenach morskich. Posiadają one mniejsze wymiary geometryczne niż organizmy np. w Morzu Północnym, które bezpośrednio sąsiaduje z Morzem Bałtyckim. W Bałtyku występują zarówno formy zwierzęce pochodzenia słonowodnego oraz słodkowodnego i organizmy słonawowodne, pojawiające się sezonowo, zazwyczaj w porze cieplej, lub występujące w sposób ciągły w ciągu roku (Chojnacki, 1984; Rokicki, 1993; Skóra, 1993; Wiktor, 1993; Gic-Grusza i in., 2009)

Ze względu na unikalny charakter tego akwenu (wlewy z Morza Północnego, urozmaiconą batymetrię, różnorodność typów osadów dennych oraz warunków hydrologicznych i hydrodynamicznych, mieszania się słodkich wód rzecznych z wodami słonawymi oraz jego bogate walory przyrodnicze) jak również szczególne narażenie jego, jako morza półzamkniętego, na skutki działalności człowieka, Bałtyk przyciąga szczególną uwagę badaczy.

Dotyczy to również wód przybrzeżnych Morza Bałtyckiego, w tym Zatoki Gdańskiej, częścią której jest Zatoka Pucka, gdzie od lat prowadzone są intensywne interdyscyplinarne badania ekologiczne (np. Wiktor, 1993; Bielecka i in., 2000; Andrulowicz i in., 2004; Mudrak i Żmijewska, 2007; Tomczak i in., 2016; MIR 2019c; Bolałek i Burska, 2020; MIR, 2021). Jest to również związane nie tylko z unikalnością przyrodniczą tych obszarów, ale również z tym, że obszary przybrzeżne są szczególnie wrażliwe w stosunku do intensyfikującej się w ostatnich latach działalności człowieka na morzu.

Historycznie początki silnego wzrostu wpływu człowieka na stan Zatoki Puckiej miał miejsce już w latach sześćdziesiątych i siedemdziesiątych XX wieku, kiedy to nastąpił rozwój przemysłu i rolnictwa zarówno w bezpośredniej zlewni Zatoki Puckiej (obszar przyległych gmin), jak i w zlewni Zatoki Gdańskiej (MIR, 2019c). Podjęte działania naprawcze zapoczątkowane w latach 90-tych XX wieku (np. budowy oczyszczalni ścieków), skutkują poprawą czystości wód oraz powolną odbudową roślinności przydennej (MIR, 2019c). Obecnie największym problemem Zatoki Gdańskiej jest zasób ryb komercyjnych, który to jest dodatkowo pogarszany przez globalny problem bałtyckich zasobów gatunkowych dorsza

i śledzia obserwowany w ostatnim czasie (HELCOM 2010; ICES 2015; MIR, 2019c; ICES 2021).

To jak ważne i nadal aktualne są badania stanu środowiska Zatoki Puckiej świadczy fakt iż Ministerstwo Gospodarki Morskiej i Żeglugi Śródlądowej ogłosiło przetarg na przygotowanie i przeprowadzenie „Programu badań środowiska morskiego Zatoki Puckiej ze szczególnym uwzględnieniem czynników istotnych dla rybołówstwa w latach 2019-2021”. W wyniku postępowania wybrana została oferta Morskiego Instytutu Rybackiego - Państwowego Instytutu Badawczego (MIR, 2021).

Dla ochrony oraz zrównoważonego zarządzania zasobami tego obszaru ważne jest pogłębianie wiedzy o jego ekosystemie oraz monitoring jego stanu ekologicznego.

Istotnym elementem prowadzenia tych badań i monitoringu powinno być również poszukiwanie rozwiązań pozwalających na efektywne i bezinwazyjne prowadzenie pomiarów. Rozwój metod hydroakustycznych może być kluczowym elementem w poszukiwaniu rozwiązania pozwalającego na szybkie określenie stanu ekosystemu Zatoki.

Elementem takich poszukiwań są proponowane w rozprawie badania charakterystycznych cech morfometrycznych (geometrycznych), energetycznych oraz „spektralnych” (ang. „frequency response”) rozkładów przestrzennych siły objętościowego rozpraszania wstecznego dla rozpraszania na skupiskach ryb w Zatoce Puckiej, które to cechy będą w przyszłości służyły opracowaniu hydroakustycznych metod klasyfikacyjnych.

1.2.2 Unikalność wybranego obszaru badań w skali południowego Bałtyku

Zatoka Gdańska, w tym wybrana do badań jej część – Zatoka Pucka, jest unikalnym obszarem badawczym.

Zatoka Gdańska charakteryzuje się tym, że zachodzi w niej mieszanie się wód słodkich i morskich (Majewski, 1972). Głównym źródłem wód słodkich są wody lądowe, w szczególności z rzeki Wisły. Z tego powodu w Zatoce Gdańskiej mamy do czynienia ze zróżnicowaniem przestrzennym pod względem hydrologicznym i hydrochemicznym (Nowacki i Jarosz, 1998). Dno zatoki składa się z osadów ilastych, mulistych oraz piaszczystych, niewielkie obszary są pokryte kamieniami oraz głazami (Krzymiński i in., 2004).

Zatokę podzielono na mniejsze akweny: Zatokę Pucką wewnętrzną i zewnętrzną, Zatokę Gdańską właściwą i otwartą (Kruk-Dowgiałło i Szaniawska, 2008).

Zatoka Pucka jest częścią Basenu Gdańskiego, oddzieloną od głębokowodnych obszarów Półwyspem Helskim oraz częścią Zatoki Gdańskiej, gdzie za granicę Zatoki Puckiej powszechnie uznaje się linię łączącą Cypel Helski z Kamienna Górą (Słomianko, 1974). Zatoka Pucka dzieli się na część zewnętrzną i wewnętrzną zwaną też Zalewem Puckim, a granicę między nimi wyznacza linia łącząca Ryf Mew i Cypel Rewski.

Zewnętrzna Zatoka Pucka stanowi około 70% powierzchni oraz 94% objętości całej Zatoki Puckiej. (Projekt ZOSTERA, http://www.zostera.pl/index.php?option=com_content&view=article&id=4&Itemid=3&lang=pl).

Akwen ten różni się od wcześniej badanych akwenów południowego Bałtyku: Głębi Gdańskiej (Szczucka 2000a, 2003), głębszych obszarów Zatoki Gdańskiej, oraz przybrzeżnych obszarów otwartego morza polskiej strefy przybrzeżnej (Orłowski, 2001), ponieważ:

1. Jest on akwenem płytszym: średnia głębokość tej części Zatoki Puckiej wynosi 20,5 m, a maksymalna głębokość – 54 m (Nowacki, 1993a). Cała objętość wody Zatoki Puckiej znajduje się ponad halokliną wód Zatoki Gdańskiej (Nowacki, 1993b).
2. Jest osłonięty przez Półwysep Helski od morza otwartego. Powoduje to, że w mniejszym stopniu niż obszary badane w przeszłości podlega on swobodnej wymianie wód z otwartym morzem oraz okresowo powtarzającym się wlewowi z Morza Północnego.
3. Temperatura wody w zewnętrznej Zatoce Puckiej kształtuje się głównie pod wpływem sezonowych zmian czynników meteorologicznych (temperatury powietrza i usłonecznienia), turbulentnej wymiany ciepła oraz pod wpływem wód Wisły jak i wód morskich z głębokich rejonów Zatoki Gdańskiej. Wpływ ma również zróżnicowanie obszaru pod względem głębokości. Wody z głębokich rejonów Zatoki Gdańskiej powodują wzrost temperatury w sezonie zimowym i spadek w sezonie letnim, odwrotnie oddziałują wody rzeczne (Nowacki, 1993b).

W sezonie wiosenno-letnim w przypadku rzadko występujących wiatrów NE (na stacji Hel średnia roczna częstość występowania tego kierunku wiatru, to 8,8 % (Cyberski i Szeffler, 1993)), temperatura i zasolenie mogą być również modyfikowane przez dopływające do Zatoki wody Wisły (Cyberska, 1990). Z pomiarów przeprowadzonych w latach 1980 – 1985 wynika, że tylko w około 31% z zaobserwowanych sytuacji wystąpił odpływ wód Wisły w kierunkach zachodnim lub północnym do Zatoki Puckiej (Cyberska, 1990).

Uwzględniając, że warunki hydrofizyczne mają wpływ na rozmieszczenie przestrzenne organizmów morskich (Szcucka, 2000; Levinton, 2001; Orłowski, 2001; Szcucka, 2003; Schiewer, 2008) oraz odmiennosc tych warunków w Zatoce Puckiej, przedstawia interes badania charakterystycznych cech rozkładów przestrzennych siły objętościowego rozpraszania wstecznego dla rozpraszania na skupiskach ryb w tym obszarze oraz porównanie z wynikami wcześniejszych badań prowadzonych na głębszych wodach Południowego Bałtyku, czemu jest poświęcona niniejsza rozprawa.

Należy również wymienić wyniki obserwacji prowadzonych w ramach realizacji projektu badawczego: Program badań środowiska morskiego Zatoki Puckiej ze szczególnym uwzględnieniem czynników istotnych dla rybołówstwa w latach 2019-2021 (<https://zatokapucka.mir.gdynia.pl/informacje/>). Odnotowane zostały dwa istotne aspekty, które również mobilizowały do hydroakustycznych badań rozkładów przestrzennych organizmów w Zatoce Puckiej. Po pierwsze, zarówno w sezonach zimowych (miesiące: I - III) i letnich (miesiące: VII - IX) średnia temperatura jest o 3 stopnie wyższa niż zaobserwowana w latach 1965 – 1974. Po drugie, badania te wykazały poprawę jakości wód i stanu ekologicznego Zatoki Puckiej, związaną ze znacznym zmniejszeniem emisji substancji biogenicznych (zmniejszenie wpływu antropogenicznego). W sytuacji zachodzących zmian klimatycznych i zmniejszenia antropopresji systematyczne badania ekosystemu Zatoki Puckiej są bardzo ważne, a badania zaproponowane w niniejszej rozprawie wpisują się w ten nurt.

1.2.3 Metody hydroakustyczne w badaniach ekosystemów morskich

Podstawy teoretyczne - główna zasada metod hydroakustycznych, mierzone charakterystyki, stosowane urządzenia badawcze

Techniki hydroakustyki aktywnej, stosowane do badań biologicznych, wykorzystują urządzenia nadawczo-odbiorcze (różnego typu echosondy i sonary) (Medwin i Clay, 1998, Medwin, 2005; Simmonds i MacLennan, 2005). Te urządzenia generują falę akustyczną, która propagując w toni wodnej napotyka obiekt/obiekty biologiczne, na których może mieć miejsce zjawisko rozpraszania fali. Fala rozproszona w kierunku przetwornika hydroakustycznego, jest nazywana falą rozproszoną wstecznie (lub rozproszoną do tyłu). Zjawisko rozpraszania ma miejsce jeśli istnieje różnica impedancji akustycznej w wodzie morskiej i w tkankach biologicznych organizmów morskich. Impedancją akustyczną ośrodka nazywamy iloczyn jego gęstości i prędkości propagacji fali akustycznej w nim.

Fale rozproszone na obiekcie niosą informację o jego wymiarach i kształcie geometrycznym, gęstości tkanek biologicznych, prędkości propagacji fali akustycznej w nich oraz o jego orientacji względem wiązki przetwornika hydroakustycznego. W przypadku zaś skupiska sygnał rozproszony zawiera również informację o liczebności zagregowanych obiektów (Medwin, 2005; Simmonds i MacLennan, 2005).

Najpowszechniejszym przykładem urządzenia wykorzystywanego w aktywnej hydroakustyce do badań biologicznych jest echosonda jednowiązkowa (*ang.* Single Beam EchoSonder), oraz coraz szerzej używana w akustyce rybackiej (także podczas prowadzenia badań opisanych w tej pracy), echosonda jednowiązkowa z tak zwaną rozszczepioną wiązką (*ang.* split-beam echosonder) (Stepnowski, 2001; Simmonds i MacLennan, 2005). Taka echosonda posiada przetwornik składający się z kilku (najczęściej z czterech) segmentów ceramicznych, każdy z których jest elementem osobnego systemu nadawczo odbiorczego. W momencie nadawania fali akustycznej wszystkie segmenty przetwornika generują falę akustyczną równoległe o takich samych parametrach (amplituda i faza), tworząc jedną wspólną wiązkę. Jednak dzięki takiemu podziałowi na segmenty można porównać fazy fali akustycznej powracającej do przetworników, co pozwala na określenie pozycji obiektu w wiązce echosondy oraz kierunku jego poruszania się (Stepnowski, 2001; Simmonds i MacLennan, 2005). Odpowiednia obróbka rejestrowanych danych hydroakustycznych, za pomocą specjalistycznego oprogramowania, pozwala na określenie charakterystyk rozpraszania obiektów biologicznych (zarówno pojedynczych osobników jak i całych skupisk). Dzięki temu echosondy jednowiązkowe można z powodzeniem wykorzystywać podczas hydroakustycznych badań organizmów morskich.

Niżej przedstawione są **charakterystyki mierzone przez echosondy** o jednej wiązce, które klasycznie są wykorzystywane w badaniach organizmów morskich (Simmonds i MacLennan, 2005).

A. Głębokość na której znajdują się obiekty rozpraszające.

Echosonda mierzy czas (T) od momentu wysłania sygnału akustycznego do momentu jego powrotu do przetwornika po rozproszeniu na obiekcie. Znając prędkość dźwięku w wodzie (c) możemy wyliczyć głębokość (H), na której znajduje się ten obiekt, z następującego wzoru:

$$H = \frac{Tc}{2} \quad (1.1)$$

Wzór ten jest najprostszym wzorem demonstrującym ideę pomiarów głębokości. Można go stosować w ośrodku jednorodnym - nie uwzględnia on możliwych zmian przestrzennych prędkości propagacji fali akustycznej.

Te pomiary za pomocą echosondy pozwalają na określenie rozkładu przestrzennego obiektów biologicznych, czyli skupisk ryb i zooplanktonu.

B. Siła celu pojedynczego osobnika

Echosondy jednowiązkowe typu split-beam pozwalają na określenie charakterystyki rozpraszania pojedynczego obiektu. Najważniejszym parametrem opisującym rozpraszanie fali akustycznej na pojedynczym obiekcie jest przekrój czynny na rozpraszanie (często jest oznaczany symbolem σ_{sc}). Jest to wielkość charakteryzująca stosunek natężeń fal rozproszonej i padającej. Podczas badań prowadzonych w morzu szczególnie ważny jest przekrój czynny na rozpraszanie wsteczne (σ_{bsc}), charakteryzujący ile energii dany obiekt rozprasza do tyłu czyli w kierunku przetwornika echosondy (Simmonds i MacLennan, 2005).

Siła celu (ang. Target Strength, skrót TS), jest użyteczną i stosowaną w hydroakustyce miarą logarytmiczną efektywności objętościowego rozpraszania wstecznego na obiekcie biologicznym wyrażoną w decybelach [dB] (Simmonds i MacLennan, 2005). Siła celu wyliczana jest ze wzoru:

$$TS = 10 \log_{10}(\sigma_{bsc}) \quad (1.2)$$

Na siłę celu ryb wpływ ma kilka czynników. Przede wszystkim wpływ ma anatomiczna struktura osobnika:

1. Istotna jest obecność wypełnionego gazem pęcherza pławnego, który zapewnia rybce regulację jej pływalności i występuje u wielu gatunków ryb żyjących w Bałtyku. Rozpraszanie na pęcherzu pławnym ryb może być dominujące – pęcherz może odpowiadać za znaczącą część energii wstecznie rozproszonej na rybie (do 95 %) (Jones i Pearce, 1958; Foote, 1985; Blaxter i Batty, 1990). Na siłę celu osobników z pęcherzem pławnym wpływa jego kształt geometryczny i jego wymiary (Simmonds i MacLennan, 2005). W zależności od gatunku ryb pęcherz pławny może przyjmować różne kształty (Clay i Medwin, 1977; Foote, 1985). Pęcherz pławny ryb należących do grupy *physostomous* może zmieniać swoją wielkość w czasie migracji pionowych ryb: wraz ze wzrostem ciśnienia oddziałującego na rybę, będzie następować kompresja pęcherza

pławnego (Hersey i Backus, 1962; Blaxter i Batty, 1990). W wyniku tego siła celu dla tego samego osobnika będzie się zmieniać wraz ze zmianami głębokości na których ryba przebywa (Edwards i Armstrong, 1981; Edwards i in., 1984; Ona, 1990; Mukai i Iida, 1996; Gauthier i Rose, 2002; Gorska i Ona, 2003b; Ona, 2003; Fässler i Gorska, 2007b; Pedersen i in., 2009; Fässler, 2010). Na zmianę kształtu pęcherza pławnego czyli również na zmianę siły celu mogą wpływać np. stopień rozwoju gonad osobnika, czy nawet stopień wypełnienia żołądka przez treść pokarmową (Ona, 1990; Hamre i Dommasnes, 1994; Ona, 2003). Również zawartość tkanki tłuszczowej w ciele ryby wpływa na wielkość pęcherza pławnego (Reynisson, 1993; Ona i in. 2001). Istotna jest również orientacja osi podłużnej pęcherza pławnego osobnika względem osi podłużnej ciała ryby (Gorska i Idczak, 2021).

2. Niezależnie od obecności pęcherza pławnego w ciele ryby, na rozpraszanie wsteczne na niej może mieć wpływ akustycznie twardy szkielet kostny, który posiada istotną różnicę impedancji akustycznej z otaczającym ośrodkiem. Dla ryb z pęcherzem pławnym wpływ został zademonstrowany w publikacjach (Pérez-Arjona i in., 2018; Wanzenböck i in., 2020), natomiast dla gatunków bez pęcherza pławnego – w pracach Gorskiej i in. (2004) oraz Gorskiej i in. (2005). W wyżej wymienionych pracach pokazano, że rozpraszanie na szkielecie kostnym ryb zależy nie tylko od jego wymiarów geometrycznych i kształtu, ale również od prędkości propagacji fal akustycznych (poprzecznych i podłużnych) w nim oraz od gęstości jego tkanki.
3. Na rozpraszanie na rybie może mieć również wpływ rozpraszanie na jej ciele. Na przykład ma to miejsce dla ryb należących do grupy *physostomus* na większych głębokościach (Gorska i Ona, 2003a, 2003b). Na wartość siły celu mają też wpływ takie czynniki jak wymiary geometryczne organizmu (Clay i Medwin 1977; Simmonds i MacLennan, 2005; Burwen i in., 2007; Gorska i Idczak; 2010, Idczak i Książ-Kubacka, 2012) oraz orientacja organizmu względem kierunku padania fali akustycznej (Midttun i Hoff, 1962; Love, 1971; Edwards i in., 1984; Blaxter i Batty, 1990; Huse i Ona, 1996; Horne i Jech, 1999; Huse i Korneliusson, 2000; Ona, 2001; McQuinn i Winger, 2003; Henderson i in., 2008; Idczak i Książ-Kubacka, 2012). Wartość siły celu zależy również od częstotliwości generowanych przez echosondę fal akustycznych (Haslett, 1977; Foote, 1985; Holliday i Pieper, 1995; Gorska i in., 2004; Gorska i in., 2007b)

C. Siła objętościowego rozpraszania wstecznego

Echosonda mierzy również siłę objętościowego rozpraszania wstecznego SV dla zagregowanych celów rozpraszających. Jest ona powiązana ze współczynnikiem wstecznego rozpraszania objętościowego Sv . Opisuje on rozpraszanie przez jednostkę objętości skupiska obiektów rozpraszających. Jest to wielkość charakteryzująca własności rozpraszające skupiska, proporcjonalnie do ilości celów rozpraszających oraz ich średniego przekroju czynnego na rozpraszanie wsteczne (σ_{bsc}) (Simmonds i MacLennan, 2005). Siła zaś objętościowego rozpraszania wstecznego (SV) wyliczana jest ze wzoru:

$$SV = 10 \log_{10}(Sv) \quad (1.3)$$

Na siłę objętościowego rozpraszania wstecznego wpływ będą mieć te same czynniki co i na siłę celu pojedynczego obiektu rozpraszającego, ponieważ zależy ona od tego parametru. Dodatkowo wpływ na siłę objętościowego rozpraszania wstecznego może mieć liczebność organizmów (Hersey i Backus, 1962; Simmonds i MacLennan, 2005; Davison, 2011).

Zalety stosowania metod hydroakustycznych w badaniach ekosystemów morskich

W porównaniu z metodami bezpośrednimi oraz innymi metodami zdalnymi, np. metodą satelitarną czy metodą opartą na analizie zdjęć lotniczych, metody hydroakustyczne, mają szereg następujących zalet:

1. Metody te, w odróżnieniu od innych metod do badań formacji ekologicznych ekosystemu morskiego mogą być stosowane w szerokim zakresie skali przestrzennej i czasowej z dobrą rozdzielczością (Trenkel i in. 2011; Godø, i in., 2014; Trenkel i in., 2016).
2. Należąc do grupy metod zdalnych, w odróżnieniu od metod kontaktowych pozwalają na szybkie zbieranie danych z dużych obszarów przestrzennych (Simmonds i MacLennan, 2005).
3. Urządzenia hydroakustyczne są jedynymi urządzeniami, które zbierają informację z całej toni wodnej, w odróżnieniu np. od sieci czy trałów zbierających materiał biologiczny w sposób selektywny (Simmonds i MacLennan, 2005; Trenkel i in. 2011).

4. Techniki hydroakustyczne pozwalają na jednoczesne zbieranie informacji dotyczących:
 - kilku poziomów łańcuchu troficznego;
 - kilku formacji ekologicznych (np., planktonu, nektonu i bentosu)
 - organizmów o wymiarach ciała od milimetrów do metrów (Simmonds i MacLennan, 2005; Trenkel i in. 2011; Bertrand i in., 2014, Berger, 2018) .
5. Szczególną ich zaletą jest możliwość monitoringu w przypadku niejednorodnego plamistego rozkładu przestrzennego organizmów związanego, między innymi, z drobnoskalowymi zjawiskami oceanograficznymi (np., Bertrand i in., 2010).

Przedstawione zalety metod hydroakustycznych stymulowały niniejsze badania prowadzone dla Zatoki Puckiej, które będą służyć za podstawę do dalszego opracowania klasyfikacyjnych metod hydroakustycznych dla tego obszaru.

Dalej przedstawiono możliwości, które stwarzają metody hydroakustyczne w badaniach elementów biotycznych ekosystemów morskich.

Wkład metod hydroakustycznych w wiedzę o elementach biotycznych ekosystemów morskich

Metody hydroakustyczne są powszechnie stosowane w badaniach prowadzonych na morzach i oceanach. Początki wykorzystania urządzeń hydroakustycznych sięgają jeszcze I wojny światowej, kiedy to w celach militarnych wykorzystywano sonary (z ang. *Sound Navigation And Ranging*), głównie do namierzania okrętów podwodnych (Hartcup, 1988). Po wojnie zaczęto wykorzystywać te metody do wykrywania obiektów w słupie wody, w tym obiektów biologicznych.

Początki badań biologicznych przy użyciu narzędzi hydroakustycznych sięgają okresu międzywojennego i zostały opisane przez japońskiego naukowca Kimurę (*jap. 木村*) (1929). Zaobserwowano zakłócenia w wiązce akustycznej, które powodowały ryby obecne w zbiorniku wodnym podczas prowadzonych tam badań. Przez kolejne lata naukowcy wraz z rybakami wykorzystywali urządzenia hydroakustyczne w celach detekcji organizmów, oceny biomasy zasobów, wizualizacji rozkładów przestrzennych ryb oraz obserwacji zachowania organizmów morskich, udowadniając skuteczność takich pomiarów (np., Sund, 1935; Tester, 1943; Balls, 1948).

Znaczny postęp w rozwoju metod hydroakustycznych, związany zarówno z rozwojem technologii samych urządzeń hydroakustycznych jak i metod analizy danych hydroakustycznych, rozpoczął się na początku lat pięćdziesiątych. ubiegłego stulecia (Simmonds i MacLennan, 2005). Horne (2000) zwraca uwagę, że właśnie w tamtym czasie podjęto pierwsze próby identyfikacji organizmów morskich na podstawie echogramów rejestrowanych na papierze w konfrontacji z odławianymi organizmami.

Do postępu w analizie w dużej mierze przyczyniły się współczynniki korekcyjne. Jednym z takich współczynników jest czasowa regulacja wzmocnienia TVG (ang. Time Varied Gain), która ma na celu zrównoważenie strat energii spowodowanych geometrycznym rozprzestrzenianiem się fali akustycznej oraz jej absorpcją i rozpraszaniem. Dzięki temu zaistniała możliwość dokładniejszego akustycznego szacowania biomasy organizmów wodnych. Rozwinięto również procedury kalibracji urządzeń hydroakustycznych (Foote i in., 1983; Demer i in. 2015), co również przyczyniło się do zwiększenia dokładności akustycznego szacowania biomasy (Love, 1971; Nakken i Olsen, 1977; Foote, 1987).

W dzisiejszych czasach dzięki metodom hydroakustycznym mamy możliwości w sposób szybki i bezinwazyjny zbierać dane wysokiej rozdzielczości z dużych obszarów przestrzennych (Simmonds i MacLennan, 2005; Reeder, 2011; Trenkel i in., 2011, 2016).

Aktywne metody hydroakustyczne mają obecnie szerokie zastosowanie w badaniach organizmów wodnych, stosuje się je między innymi:

- w szacowaniu biomasy zasobów morskich. Zgodnie z zaleceniami Międzynarodowej Organizacji do Badań Mórz i Oceanów (ang. International Council for the Exploration of the Sea, skrót ICES) na wszystkich morzach i oceanach świata są prowadzone coroczne szacowania zasobów za pomocą metody hydroakustycznej (przykładowe raporty: ICES, 2006, 2015, 2021).
- dla określenia rozmiarów ryb (np., Diachok i in., 2001; Burwen i in., 2003, 2007);
- dla klasyfikacji organizmów morskich (np., Burwen i in., 2003; Petigas i in., 2003; Anderson i in., 2007; Fernandes, 2009; Trygonis i in., 2009; Korneliussen i in., 2009; De Robertis i in., 2010; Woillez i in., 2012; Campannella i in., 2016; Gastaue i in., 2017; Berger i in., 2018);

- w badaniach zachowania ryb, w tym:
 - migracji organizmów (np., Szczucka, 2003; Orłowski, 2005; Szczucka i Schmidt, 2005; Schmidt i Szczucka, 2010; Godø i in., 2014; Pezacki i in., 2017, 2018);
 - orientacji ryb w ławicach (np., Aglen, 1996; Huse i Korneliussen, 2000; Ona, 2001; McQuinn i Winger, 2003; Zedel i in. 2005);
 - reakcji na hałas pochodzenia antropogenicznego (od statków i innych pojazdów pływających) (np. Gerlotto i Fréon, 1992; Soria i in., 1996; Gerlotto i in., 1999; Ona i Korneliussen, 2000; Skaret i in., 2005; Hjellvik i in., 2008);

Do tych badań, jak wspomniano wyżej, stosuje się zwykle echosondy jednowiązkowe (ang. Single Beam EchoSounder), oraz echosondy jednowiązkowe typu split-beam (Stepnowski, 2001, Simmonds i MacLennan, 2005). Innym rodzajem urządzenia hydroakustycznego stosowanego do badań biologicznych jest echosonda wielowiązkowa (ang. Multi Beam EchoSounder). Echosondy tego typu są w stanie zobrazować przestrzenne rozmieszczenie ławic oraz określić ich przemieszczenia (Soria i in., 1996; Gerlotto i in., 1999; Kvamme i in., 2000; Brehmer i in., 2006). Echosonda wielowiązkowa do obserwacji zachowania ryb w ich naturalnym środowisku została wykorzystana z powodzeniem przez m. in.: Misund i Aglen (1992), Mayer i in. (2002), Gerlotto i Paramo (2003), Brehmer i in. (2006).

Przedstawione wyżej szerokie możliwości, które dają metody hydroakustyczne w badaniach organizmów morskich, stymulują poszukiwania związane z opracowaniem tych metod również dla obszaru Zatoki Puckiej.

Zademonstrujemy dalej w jakim wymiarze ten duży potencjał metod hydroakustycznych w badaniach organizmów morskich znalazł swoje wykorzystanie do badań w unikalnym ekosystemie Morza Bałtyckiego, w tym Zatoki Gdańskiej oraz jej części zewnętrznej Zatoce Puckiej.

1.2.4 Wykorzystanie metod hydroakustycznych do badań biologicznych na Zatoce Puckiej (stan wiedzy)

Należy pamiętać, że nie można przenieść istniejących metod hydroakustycznych, jak np. hydroakustycznej techniki szacowania biomasy zasobów czy hydroakustycznych technik klasyfikacyjnych, opracowanych na innych morzach, bezpośrednio do Zatoki Gdańskiej czy Zatoki Puckiej, ponieważ specyfika biologiczna organizmów przekłada się na ich właściwości

rozpraszające. Jak zostało zasygnalizowane wcześniej (Podrozdział 1.2.3), zależą one np. od anatomii organizmów, ich wymiarów geometrycznych oraz zachowania.

W celu opracowania metod hydroakustycznych do badań biologicznych w Zatoce Puckiej należy poznać specyfikę właściwości rozpraszających organizmów w tych obszarach, m. in. specyfikę rozkładów przestrzennych siły objętościowego rozpraszania wstecznego oraz ich zmienność czasową, jak również zależność siły objętościowego rozpraszania wstecznego od częstotliwości.

W zewnętrznej Zatoce Puckiej, która jest obszarem zainteresowania w tej pracy, do końca lat dziewięćdziesiątych prowadzono pomiary biomasy komercyjnych gatunków ryb takich jak szprot czy śledź, przy okazji zbierając dane o ich rozkładach przestrzennych (Orłowski, 2006; 2016; MIR, 2019c, 2021) z wykorzystaniem echosondy typu split-beam.

Inne pomiary hydroakustyczne prowadzone na Zatoce Puckiej, skierowane na obiektów biotycznych, dotyczyły detekcji łąk podwodnych, określenia ich rozkładów przestrzennych (Klusek i in., 2003; Tęgowski i in., 2003; Gorska i in., 2005; Tęgowski i in., 2007) oraz określenia składu gatunkowego tych łąk (Faghani i in., 2004).

Badania hydroakustyczne na Zatoce Puckiej do tej pory były prowadzone w ograniczonym zakresie. Do końca lat dziewięćdziesiątych prowadzono wyłącznie badania rozkładów przestrzennych ryb komercyjnych. Nie badano ich zmienności sezonowej (październik był głównym miesiącem badań (np. Orłowski, 1992, 2016)).

Nie tylko na Zatoce Puckiej, ale i szerzej na Morzu Bałtyckim (w odróżnieniu od innych akwenów) nie analizowano zależności częstotliwościowej siły objętościowego rozpraszania wstecznego na organizmach morskich oraz nie podjęto próby ich hydroakustycznej klasyfikacji.

Ograniczony zakres badań biologicznych z wykorzystaniem wyróżniających się dużym potencjałem badawczym metod hydroakustycznych w Zatoce Puckiej stymulowała niniejsze badania hydroakustyczne w tym obszarze.

Podsumowując rozdział 1.2, poświęcony uzasadnieniu prowadzonych badań można stwierdzić, że unikalność badanego obszaru przyrodniczego i jego wrażliwość na czynniki antropogeniczne oraz nie wykorzystany w pełni na Morzu Bałtyckim znaczący potencjał zdalnych metod hydroakustycznych w badaniach ekosystemów morskich, jak również

i niemożliwość bezpośredniego zastosowania metod hydroakustycznych opracowanych dla innych akwenów do Morza Bałtyckiego oraz niemożność przeniesienia wiedzy, dotyczącej charakterystycznych cech rozkładów przestrzennych siły objętościowego rozpraszania wstecznego, z głębokowodnych obszarów polskiej części południowego Bałtyku do Zatoki Puckiej, sprawiają, że badania, wyniki których są przedstawione w niniejszej rozprawie są bardzo istotne. Bez prowadzenia tych badań skierowanych na określenie charakterystycznych cech rozkładów przestrzennych siły objętościowego rozpraszania wstecznego dla rozpraszania fal akustycznych na obiektach biologicznych w Zatoce Puckiej, nie jest możliwe opracowanie hydroakustycznych metod klasyfikacyjnych dla badanego obszaru.

1.3 Struktura rozprawy

Praca składa się z ośmiu rozdziałów. W rozdziale pierwszym przedstawiono główny cel pracy oraz cele szczegółowe wraz z uzasadnieniem prowadzonych badań. Opisano również obecny stan wiedzy, dotyczący technik hydroakustycznych wykorzystywanych w badaniach biologicznych, oraz badań hydroakustycznych przeprowadzonych do tej pory na wybranym obszarze badawczym.

W rozdziale drugim opisana została wspólna część metodyki prowadzonych prac, która dotyczy realizacji każdego z celów szczegółowych, czyli celów wszystkich przedstawionych w poszczególnych Rozdziałach 3 – 7 badań. Przedstawiono obszar badawczy, sposób zbierania danych hydroakustycznych oraz hydrofizycznych. Opisano również przeszkody napotkane podczas prowadzonych badań.

Rozdziały 3 – 7 są dedykowane realizacji poszczególnych celów szczegółowych. Rozdziały 3 i 4 poświęcone są realizacji Celu szczegółowego 1. Rozdział 5 dotyczy Celu szczegółowego 2, tymczasem jak Rozdział 6 - realizacji Celu szczegółowego 3. Rozdział 7 jest poświęcony dyskusji o możliwości klasyfikacji hydroakustycznej różnych grup organizmów z wykorzystaniem parametrów rozkładów przestrzennych siły rozpraszania objętościowego przeanalizowanych w Rozdziałach 4 i 6.

Każdy z Rozdziałów 3-7 posiada jednolitą strukturę:

1. Każdy rozdział rozpoczyna krótki wstęp z określeniem celu badań oraz ze wskazaniem realizowanego celu szczegółowego.

2. Dalej następuje podrozdział poświęcony metodologii badań, zawierający elementy specyficzne dla realizacji konkretnego celu szczegółowego, które nie zostały ujęte w Rozdziale 2 poświęconym wspólnej części metodologii badań.
3. Następnie przedstawione są wyniki badań i dyskusja nad nimi.
4. Każdy rozdział jest zakończony podrozdziałem podsumowującym otrzymane wyniki.
6. Na skutek specyfiki wyników otrzymanych w poszczególnych rozdziałach różnią się one co do struktury części dotyczącej wyników i dyskusji (wyżej przedstawiony punkt 3):
 - w każdym z Rozdziałów 3, 5, 6 i 7 dyskusja nad wynikami zamieszczona jest w oddzielnym podrozdziale następującym po podrozdziale z wynikami.
 - w Rozdziale 4 dyskusja dla każdej z grup wyników jest zamieszczona po wynikach dotyczących tej grupy.

Ten niejednolity podział, dotyczący wyników i dyskusji, ułatwia czytelnikowi zapoznanie się z tekstem rozprawy.

Rozdział 8 zawiera wnioski ogólne dotyczące całej pracy i jest podsumowaniem wyników otrzymanych w ramach rozprawy doktorskiej.

2. Metodyka

2.1 Pomiary hydroakustyczne

W części 2.1 przedstawiono część metodyki zbierania danych hydroakustycznych wspólną dla wszystkich realizowanych zadań badawczych.

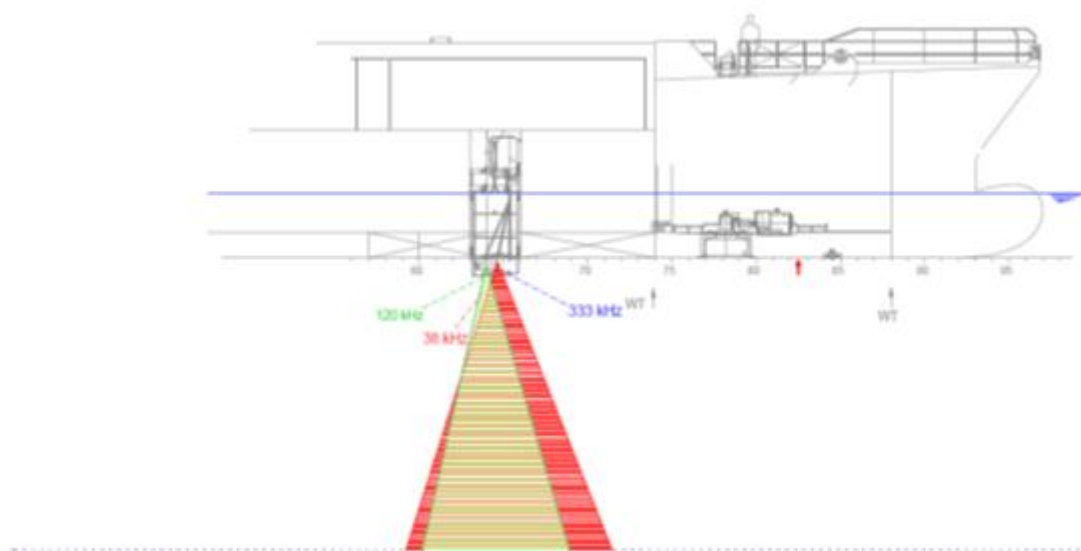
Prace badawcze były prowadzone ze statku r/v Oceanograf. Jest to katamaran o stalowej konstrukcji przeznaczony do interdyscyplinarnych badań morskich. Główną zaletą statku, mającą istotny wpływ na jakość gromadzonych danych, jest system dynamicznego pozycjonowania DP. Dzięki temu systemowi, statek – w połączeniu z precyzyjnym systemem pozycjonowania GPS RTK – z dużą dokładnością może przemieszczać się wzdłuż zadanych profili pomiarowych, a także stać na stałej pozycji w miejscu prowadzenia badań. Warunki te przy sprzyjającym kierunku wiatru mogą być spełnione przy stanie morza nawet 4 w skali Douglasa.

2.1.1 Aparatura hydroakustyczna

Podstawowym narzędziem wykorzystywanym w badaniach hydroakustycznych były 3 echosondy typu split-beam, model SIMRAD EK80 firmy Kongsberg Maritime. Są to szerokopasmowe echosondy o centralnych częstotliwościach 38 kHz, 120 kHz i 333 kHz. Przetworniki nadawczo-odbiorcze tych echosond są podzielone na niezależnie działające części: trzy w przypadku echosondy 38 kHz oraz cztery w przypadku pozostałych dwóch przetworników. Taka budowa pozwalała na możliwość określenia pozycji celów rozpraszających w wiązce echosondy oraz kierunku ich ruchu (np. dla organizmów morskich). Jest to możliwe ponieważ znając dla poszczególnych części przetwornika różnice w fazach fali rozproszonej od obiektu, można określić pozycję celu rozpraszającego względem wiązki przetwornika.

Echosondy są zamontowane jedna blisko drugiej w opływce (blisterze) tak, żeby listki główne ich funkcji kierunkowości pokrywały się ze sobą w jak największym stopniu, aby mieć pewność, że na każdej z trzech częstotliwości akustycznych rejestrowane są, te same obiekty rozpraszające. Przedstawiony został obrys statku z zamontowanymi na nim echosondami (Rys. 2.1). Pokazana została dla przykładu wspólna część wiązek dla dwóch echosond 38 kHz (funkcja kierunkowości jest zaznaczona kolorem czerwonym) i 120 kHz (kolor zielony).

Przedstawiono również wymiar geometryczny wspólnej części wiązek na głębokości 10 metrów. Widzimy, że wspólna część zajmuje znaczącą część obu wiązek.



Rys. 2.1 Poglądowy rysunek techniczny prezentujący pokrycie wiązek z echosond zainstalowanych na r/v Oceanografie (Cezary Komor, dane niepublikowane).

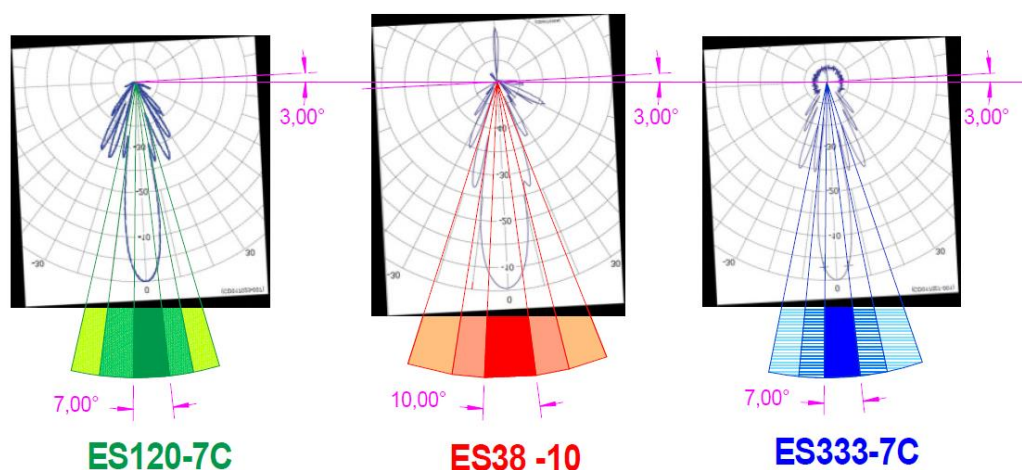
Ważne jest również to że zbierane dane można na bieżąco oglądać na ekranie komputera w postaci echogramów. (Kongsberg Maritime AS, 2018). Echosondy zostały wykorzystane w trybie pracy „continuous wave” (CW) czyli pracowały na jednej nie modulowanej centralnej częstotliwości. Ich dokładna specyfikacja jest przedstawiona w tabeli 1 (www.simrad.com). Funkcje kierunkowości echosond są przedstawione schematycznie na Rys. 2.2

Zgodnie z hydroakustycznymi obserwacjami prowadzonymi w Instytucie Oceanologii Polskiej Akademii Nauk, bałtycki zooplankton jest widoczny dla częstotliwości powyżej 400 kHz (dr hab. Joanna Szczucka, informacja ustna). Przeprowadzone przez Gorska i in. (2007a) modelowanie numeryczne siły objętościowego rozpraszania wstecznego na zooplanktonie bałtyckim potwierdzają te obserwacje. Oznacza to, że przy wykorzystaniu częstotliwości 38 kHz, 120 kHz oraz 333 kHz, są rejestrowane echa od ryb bałtyckich, nie od zooplanktonu.

Tab. 2.1 Specyfikacja przetworników akustycznych zamontowanych na jednostce r/v Oceanograf (www.simrad.com)

| Echosonda | Simrad ES38-10 | Simrad ES120-7c | Simrad ES333-7c |
|-----------------------------------|----------------|-----------------|-----------------|
| Centralna częstotliwość nadawania | 38 kHz | 120 kHz | 333 kHz |

| | | | |
|----------------------------------|-----------------------|-----------------------|-------------------------|
| Szerokość wiązki | 10° | 7° | 7° |
| Impedancja nominalna | 25 Ω | 19 Ω | 19 Ω |
| Odpowiedź transmisji | 181 dB re 1V per μPa | 185 dB re 1V per μPa | 182,5 dB re 1V per μPa |
| Czułość odbioru | -177 dB re 1V per μPa | -190 dB re 1V per μPa | -196,5 dB re 1V per μPa |
| Maksymalna moc wyjściowa impulsu | 1500 W | 1000 W | 200 W |



Rys. 2.2 Schemat funkcji kierunkowości echosond zamontowanych na r/v Oceanograf (Cezary Komor, dane niepublikowane).

Podczas profilowania system echosond był zintegrowany z DGPS (odbiornik Trimble SPS 855 wraz z anteną ZEPHYR Model 2 Rugged) w celu dokładnych pomiarów pozycji geograficznej oraz z czujnikami ruchu (kompensator przechyłów model OCTANS firmy IXSea). Działanie tych czujników pozwoli przeprowadzić korektę sygnału hydroakustycznego związaną z przechyłami statku.

2.1.2 Konfiguracja pomiarowa

Oprogramowanie Simrad EK80 (Kongsberg Maritime AS, 2018), używane podczas pomiarów, steruje pracą echosond oraz umożliwia wizualizację zebranych danych. W pierwszych rejsach zostały wykorzystane impulsy o długościach 0,256 ms; 0,128 ms (0,064ms w kutym); oraz 0,512 ms, odpowiednio dla 38 kHz, 120 kHz oraz 333 kHz. Od kwietnia 2019 roku wszystkie pomiary zostały przeprowadzone z wykorzystaniem dla wszystkich trzech echosond tej samej długości impulsu 0,256 ms. Częstotliwość nadawania impulsów była ustawiona na optymalną automatycznie dostosowującą się do głębokość dna. Oprogramowanie to również podczas zbierania danych wzmacniało odbierany sygnał za pomocą TVG. Prędkość statku zależała w dużej mierze od pogody. Przy dobrej pogodzie (stan morza do 2 w skali Douglasa) prędkość statku wynosiła 4 węzły. Natomiast podczas niesprzyjającym stanie morza (od 3 i powyżej w skali Douglasa) lub kierunku wiatru (np. wiejący w burtę statku) należało przyspieszyć, żeby statek płynął stabilnie po wyznaczonym kursie z wysoką dokładnością, dzięki systemowi DGPS. Maksymalna prędkość z jaką zbierano dane to 6,6 węzła. Średnio prędkość statku była poniżej 5 węzłów. Zmiany prędkości w tym zakresie nie wpływały na jakość gromadzonych danych. Wykonano również pomiary w dryfie na wyrzuconej kotwicy wówczas statek przemieszczał się wraz z wiatrem. Dzięki czujnikowi przechyłów, z którego dane trafiały do oprogramowania była robiona w czasie rzeczywistym kompensacja przechyłów.

2.1.3 Pomiary szumu

Oprócz zbierania danych w trybie aktywnym, czyli standardowym trybie działania echosondy (nadawanie impulsu akustycznego i rejestracja powracającego echa), zgodnie z zalecaniami ICES (Simmonds i MacLennan, 2005) podczas sesji pomiarowych gromadzone były również dane w tak zwanym trybie pasywnym. Wówczas przetworniki jedynie rejestrowały sygnały, które do nich docierały same nie nadając impulsów akustycznych. Rejestrowano przy tym otaczający szum. W trybie pasywnym dane były zbierane przez okres około 10 minut. dla każdej serii pomiarowej. Następnie, podczas późniejszej analizy danych szum ten był eliminowany z danych zgromadzonych za pomocą echosondy pracującej w trybie aktywnym.

2.1.4 Kalibracja echosond

Głównym celem kalibracji echosondy jest przystosowanie jej do nowych warunków hydrologicznych, zmieniających się np. ze względu na zmianę pory roku albo zmianę akwenu badawczego. Podstawowe zasady kalibracji opisane przez Foote i in. (1987), są aktualne do dzisiaj, mimo że niektóre praktyczne jej aspekty uległy zmianie. Kalibracje należy wykonywać za pomocą wzorcowych kul kalibracyjnych o znanej sile celu. Wybór kuli kalibracyjnej zależy od częstotliwości na której pracuje echosonda. Przy kalibracji echosondy kulę należy umieścić bezpośrednio pod przetwornikiem na odpowiedniej głębokości (w strefie dalekiej przetwornika). Ważne jest aby ta głębokość w miarę możliwości pozostawała niezmienna podczas całego procesu kalibracji. Kula powinna być podwieszona za pomocą jak najcieńszych żyłek, tak aby nie miały one wpływu na siłę celu kuli. Kula powinna być zawieszona w oparciu o trzy punkty umiejscowione na obu burtach statku, w taki sposób aby można było swobodnie przemieszczać ją w płaszczyźnie równoległej do dna. Dzięki temu podczas procesu kalibracji będzie można zebrać dane z całego przekroju poziomego wiązki przetwornika odpowiednio przemieszczając pod nim kule kalibracyjną. (Demer i in., 2015)

Oprogramowanie, wykorzystywane do sterowania echosondami posiada również moduł kalibracyjny. Korzystając z danych zebranych podczas kalibracji, oprogramowanie, aktualizuje system nastaw wzmocnień oraz kalkuluje nastawy o danej charakterystyce kierunkowej przetwornika co ma wpływ na funkcje kierunkowości echosondy oraz na precyzję pomiaru objętościowej siły rozpraszania wstecznego powracającego sygnału akustycznego.

Podczas rejsów pogoda nie sprzyjała przeprowadzeniu kalibracji echosond na poligonie badawczym oraz ze względu na ograniczony czas rejsowy, kalibrowaliśmy je w porcie na początku rejsu przed rozpoczęciem badań. Zdecydowaliśmy się na kalibracje w porcie ponieważ znajdował się on stosunkowo blisko obszaru badawczego i warunki hydrologiczne w miejscu kalibracji nie różniły się istotnie od warunków na poligonie badawczym.

Kalibracja echosond na katamaranie r/v Oceanograf jest trudniejsza niż na zwykłym jednokadłubowym statku. Jest to związane z jego dwukadłubową budową oraz z tym, że echosondy nie znajdują się w centralnej linii statku lecz są zamontowane w jego lewym kadłubie. Trudność ta została pokonana przez opracowanie specjalnego systemu umieszczania kul kalibracyjnych pod przetwornikami, który dobrze się sprawdził na katamaranie. System kalibracji echosond na r/v Oceanografie został opracowany przez dr Jakuba Idczaka. W sumie podczas prowadzenia pomiarów przeprowadzono trzy kalibracje: pierwsza w sezonie

jesiennym (26/10/2018) druga w sezonie wiosennym (04/03/2019) i trzecia w sezonie letnim (20/07/2019).

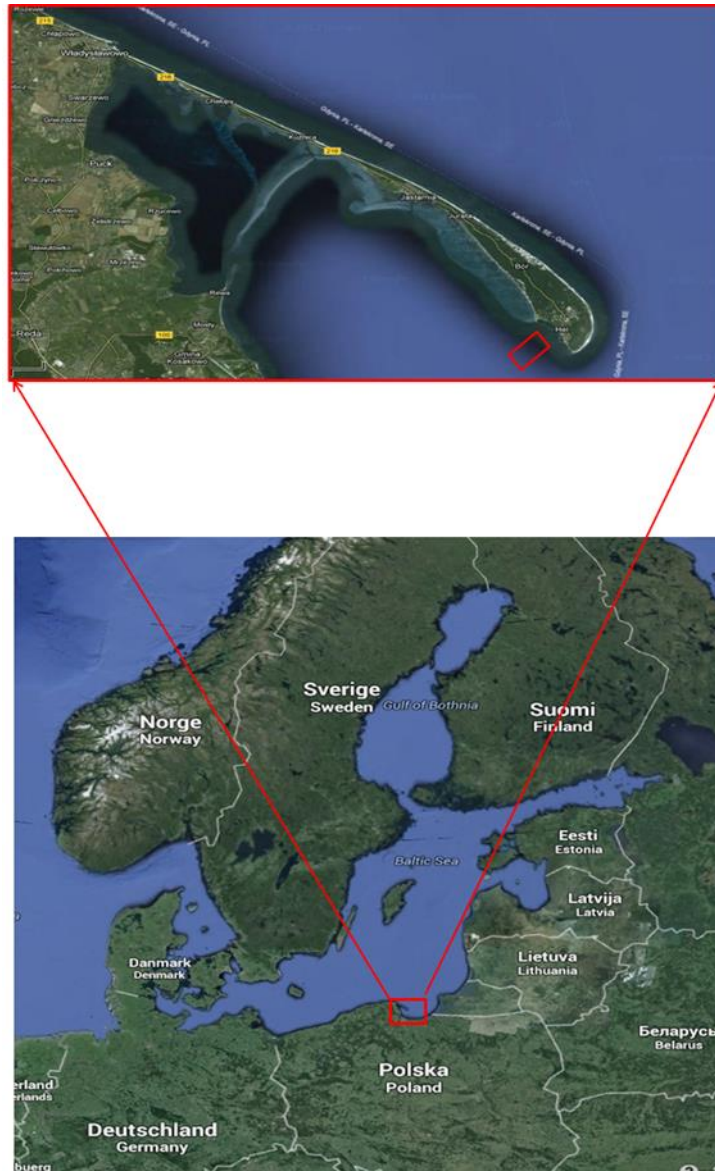
2.2 Strategia zbierania danych hydroakustycznych

W części 2.2 został przedstawiony poligon badawczy oraz opisana opracowana strategia zbierania danych hydroakustycznych dla realizacji poszczególnych zadań.

Dane były zbierane we wszystkich sezonach okresu rocznego podczas rejsów które odbyły się: jesienią (26-27 października 2018 roku), zimą (14 - 17 luty 2019), wiosną (13 - 15 kwiecień 2019) oraz latem (20 - 29 lipiec 2019). W każdym z rejsów dane zebrane były w okresie dobowym.

2.2.1 Poligon badawczy

Jako rejon badań została wybrana zewnętrzna Zatoka Pucka, która wchodzi w skład Zatoki Gdańskiej leżącej w południowej części Bałtyku. Obszar badań o wymiarach 3 km na 2 km, którego centralna część znajduje się w położeniu opisanym współrzędnymi: 54,60° N 18,74° E, był rozmieszczony w Zatoce Puckiej niedaleko od miasta Hel (Rys. 2.3). Głębokość na całym obszarze zmienia się w przedziale od 52,0 m we wschodniej części do 47,0 m w części zachodniej (Rys. 2.4).

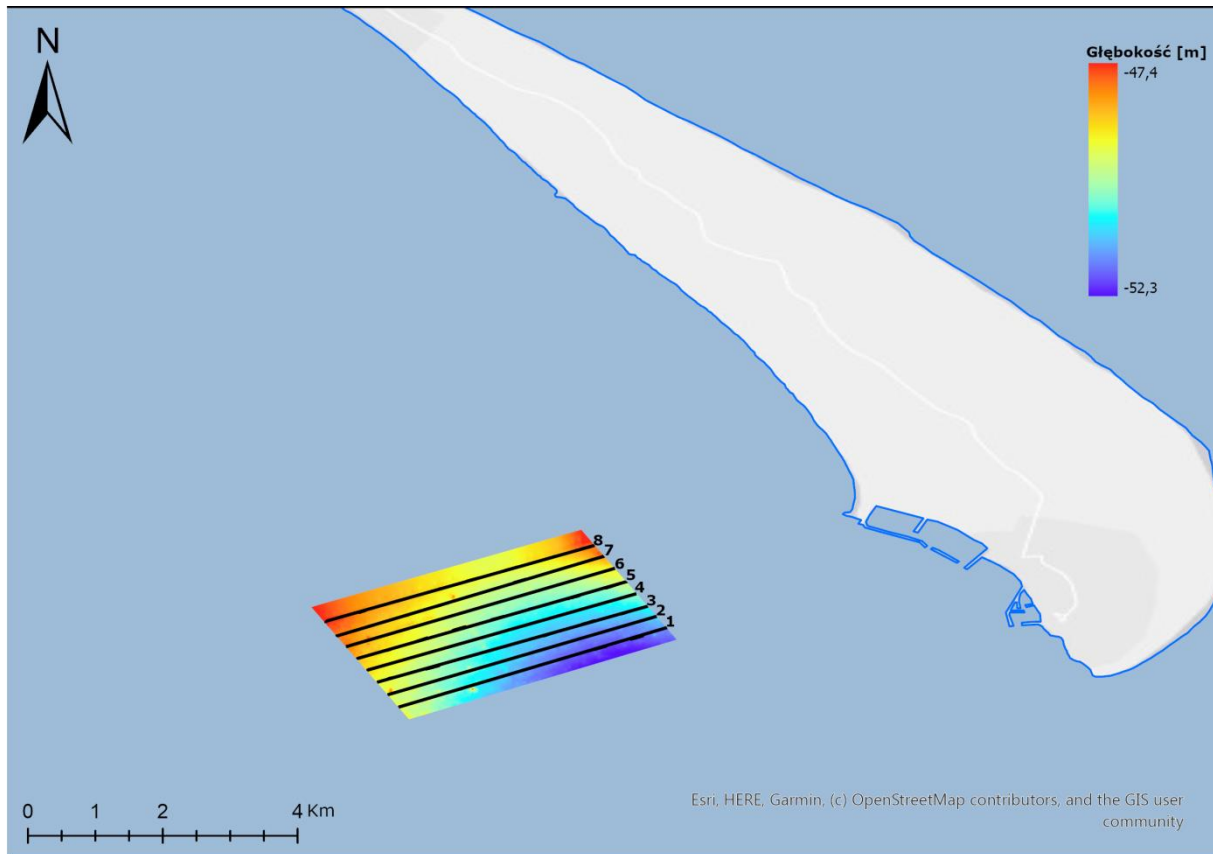


Rys. 2.3 Usytuowanie obszaru badawczego.(Google Earth).

Mapa batymetryczna (Rys. 2.4) została opracowana na podstawie danych zebranych w rejsie badawczym w dniu 20 listopada 2018 z zastosowaniem echosondy wielowiązkowej firmy Reson model SeaBat 7125 SV2. Dane zostały dostarczone w postaci punktowej, każdy punkt posiadał dokładne współrzędne geograficzne oraz informację o głębokości. Odległość między punktami wynosiła 32 m.

Przyczyny dlaczego ten obszar został wybrany dla prowadzenia badań zostały rozważone w Rozdziale 1 rozprawy, należy jednak dodać, że dzięki lokalizacji, w pobliżu Półwyspu Helskiego, obszar ten był osłonięty częściowo od działania wiatru, który mógłby zakłócić przebieg prowadzonych badań.

Obszar ten może być również zasilany biogenami pochodzenia rzecznoego (Wisła), co za tym idzie jest miejscem potencjalnego występowania organizmów, na badaniu których się skupiliśmy.



Rys. 2.4 Mapa przedstawiająca głębokość w badanym obszarze wraz z dokładnym umiejscowieniem. Czarnymi liniami zaznaczono oraz ponumerowano transekty na których były zbierane dane hydroakustyczne za pomocą echosond typu split-beam.

Rys. 2.4 przedstawia mapę batymetryczną badanego obszaru koloru niebieskie to wody najgłębsze a kolor czerwony najpłytsze, skala kolorów jest w prawym górnym rogu. Czarne linie odpowiadają profilom badawczym na których były zbierane dane hydroakustyczne, zostały one również ponumerowane, numeracja ta będzie obowiązywała w całej pracy doktorskiej.

2.2.2 Strategia wykonywania pomiarów hydroakustycznych

Na wybór strategii zbierania danych hydroakustycznych dla realizacji poszczególnych celów szczegółowych, przedstawionych w podrozdziale 1.1.1, wpłynęły: cel prowadzonych badań oraz czynniki zaburzające obraz hydroakustyczny takie jak praca pędników statku, szczególnie dziobowych, oraz zjawisko wabienia organizmów morskich przez oświetlony statek (Ona i Toresen, 1998; Fréon i Misund, 1999).

Cele szczegółowe 1 i 3

W celu określenia charakteru rozkładów przestrzennych siły objętościowego rozpraszania wstecznego, w tym ich parametryzacji, oraz ich zmienności dobowej i sezonowej, dane dla każdej pory roku zbierane były w ciągu dnia oraz nocy. Statek przy tym poruszał się po wcześniej wytypowanych profilach (Rys. 2.4). Prędkość pomiarowa zmieniała się między 4,0 a 6,6 węzła.

Cel szczegółowy 2

Zbieranie danych hydroakustycznych podczas wchodu/zachodu słońca miało na celu określenie wzorca migracji oraz czasu rozpoczęcia i zakończenia pionowej migracji dobowej organizmów, ich prędkości i amplitudy (czyli zasięgu zmian pozycji przestrzennej organizmów w pionie).

Dane były zbierane na dwa sposoby: w dryfie statku z wyrzuconą kotwicą oraz przy jego poruszaniu się wzdłuż zaplanowanych transektów pomiarowych. Należy zaznaczyć, że podczas dryfowania na skutek oddziaływania prądów morskich oraz wiatru, statek przemieszczał się ze zmienną prędkością od 0,1 węzła do 0,5 węzła. Przy tym pozycja kotwicy zmieniała się o około 1 km podczas 8 godzin rejestracji danych. Natomiast prędkość poruszania się statku wzdłuż transektów wynosiła 4,5 węzła.

Została podjęta również próba zebrania danych przy niezmiennej pozycji statku z wykorzystaniem systemu pozycjonowania dynamicznego: statek przy tym utrzymywał stałą pozycję geograficzną z dokładnością od 0,5 m do 1,5 m w zależności od warunków atmosferycznych – głównie od siły wiatru. Jednak już po pierwszych próbach z tego zrezygnowano. Jedną z przyczyn było zaburzenie obrazu akustycznego w obszarze pod powierzchnią wody, związane z pracą pędników, szczególnie dziobowych. Pędniki te wyrzucają strumienie wody, co powoduje włączanie znaczącej ilości pęcherzyków powietrza pod powierzchnię wody nawet do 10 m głębokości. Druga przyczyna była związana z dodatkowym szumem generowanym przez pracujące pędniki podczas postoju, co mogłoby odstraszać organizmy morskie (Mitson i Knudsen, 2003) i zniekształcać obraz akustyczny.

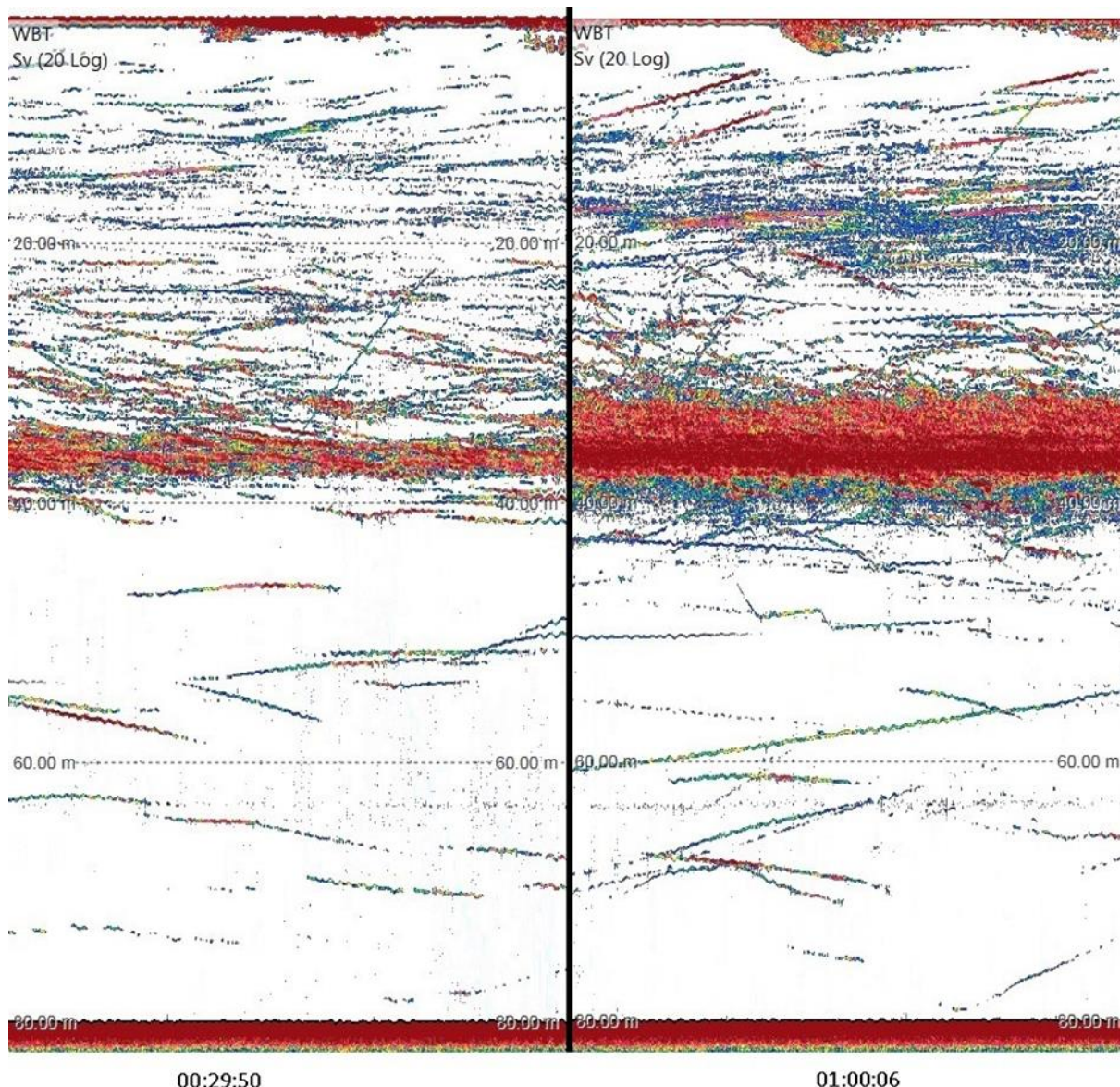
Istniała jeszcze jedna przyczyna dlaczego nie były przeprowadzone pomiary w pozycji stałej z włączonym DP. Jednym z czynników który może zaburzyć obserwacje jest wabienie organizmów przez oświetlenie statku (Fréon i Misund, 1999). Zaobserwowano, że jeśli w nocy statek z włączonymi światłami staje nieruchomo na stałej pozycji, to po pewnym czasie (po

około 30 minutach) pod nim gromadzą się organizmy. Po wyłączeniu oświetlenia, organizmy się rozpraszają, natomiast po ponownym włączeniu ponownie się pojawiają.

Rys. 2.5 prezentuje jeden z przykładów reakcji organizmów. Jest to obraz pogładowy (zrzut z ekranu) z oprogramowania echosondy do zbierania danych hydroakustycznych, dlatego nie zawiera skali dla siły objętościowego rozpraszania wstecznego. Pod echogramami są podane godziny o których zarejestrowano obrazy. Skala głębokości jest również pokazana na obrazach: poszczególne głębokości są zaznaczone poziomą przerywaną linią.

O godzinie 00:29 statek stał na stałej pozycji (włączono system DP - można zaobserwować chmurę pęcherzyków powietrza włączane przez przednie pędniki, na prawym echogramie) z wyłączonym oświetleniem. O godzinie 00:30 oświetlenie zostało włączone. Po upływie 30 minut pod statkiem na głębokości około 37 m organizmy, wabione światłem, stworzyły grubą silnie rozpraszającą warstwę. Zaczęły również pojawiać się organizmy w płytszych obszarach toni wodnej.

Obserwacje powtarzane wielokrotnie pokazały, że jest to zachowanie nie naturalne, wywołane obecnością statku. W związku z tym migracji dobowe organizmów nie można wykonywać podczas postoju statku w stałej pozycji.



Rys. 2.5 Echogramy zarejestrowane na tej samej pozycji, z wyłączonym oświetleniem statku (po lewej), i włączonym oświetleniem po upływie 30 minut (po prawej), wrzesień 2019.

Inaczej sprawa wygląda w przypadku podczas gdy statek przemieszcza się wzdłuż transektu lub jest zakotwiczony. Podczas pływnięcia statek nie ma potrzeby używania przednich pędników i pęcherzyki nie są włączane pod przetwornik akustyczny. Natomiast jeżeli chodzi o wabienie organizmów przez światłą statku, to czas reakcji organizmów jest na tyle duży (30 minut), że nie nadążają one reagować na przemieszczający się statek.

Podczas postoju na kotwicy żadne pędniki statku nie pracują, zatem problem pęcherzyków powietrza, zaburzających obraz akustyczny, znika całkowicie. Pozostaje jeszcze kwestia wabienia organizmów przez światła statku. Jednak i tu nie zaobserwowano takiego problemu, być może jest to związane z faktem że statek na kotwicy zmienia swoje położenie znacznie i sytuacja wygląda podobnie jak w przypadku pływnięcia statku, czyli organizmy nie

zdążają reagować na oświetlenie statku. Należy jednak pamiętać, że podczas postoju na kotwicy wiał silny wiatr, który spowodował że statek dynamicznie zmieniał swoje położenie, przy innych warunkach pogodowych sytuacja mogłaby wyglądać inaczej.

2.3 Analiza danych hydroakustycznych

W tym podrozdziale została opisana część analizy zebranych danych hydroakustycznych wspólna dla realizacji wszystkich celów szczegółowych. Części analizy specyficzne dla realizacji poszczególnych celów badawczych zostały przedstawione w podrozdziałach dedykowanych metodyce badań w rozdziałach rozprawy poświęconych realizacji poszczególnych celów badawczych.

2.3.1 Oprogramowanie Sonar5-Pro, jego możliwości i wykorzystanie do wstępnej obróbki danych.

Możliwości oprogramowania Sonar5-Pro

Do analizy danych zostało wykorzystano oprogramowanie Sonar5-Pro (www.fys.uio.no/~hbalk/) udostępnione przez producenta oprogramowania Helge Balka, z Uniwersytetu w Oslo. Oprogramowanie to jest jednym z rekomendowanych przez firmę Kongsberg do analizy surowych danych hydroakustycznych (Simrad EK80, 2018). Daje ono wiele możliwości w szczegółowej analizie zgromadzonych danych.

Oprogramowanie Sonar5-Pro, służy zarówno do wstępnej analizy danych jak i dalszej ich obróbki, między innymi dzięki wbudowanym narzędziom do:

1. Przekonwertowania surowych zebranych danych hydroakustycznych do formatu w którym pliki mogą być dalej analizowane z wykorzystaniem tegoż oprogramowania oraz MatLab'a, Microsoft Excel'a oraz Statsoft Statistica.
2. „Oczyszczenia” surowych danych od szumów.
3. Oceny jakości zgromadzonych danych.
4. Wyeksportowania plików tekstowych zawierających informacje takie jak: czas, współrzędne geograficzne poszczególnych impulsów hydroakustycznych, głębokość oraz odpowiadająca poszczególnym impulsom i głębokościom siła objętościowego rozpraszania wstecznego.

5. Opracowania echogramów.
6. Określenia odpowiedzi częstotliwościowej.
7. Generacji histogramów siły celu poszczególnych obiektów rozpraszających.

Analiza wstępna danych hydroakustycznych

Na pierwszym etapie analizy danych po ich przekonwertowaniu, korzystając z oprogramowania Sonar5-Pro, zostały usunięte szумы tła o których mowa w podrozdziale 2.1.3. Następnie wygenerowano echogramy i przeprowadzono ich analizę pod względem zakłóceń, które wystąpiły podczas pomiarów i nie należały do szumu tła. Oprogramowanie daje możliwość „ręcznego” usunięcia takich zakłóceń. Tak na przykład jednym z takich zakłóceń, były sygnały z innego urządzenia akustycznego, działającego na podobnej częstotliwości co jedna z wykorzystywanych echosond. Na echogramie zakłócenie to miało postać pionowych kresek pojawiających się w stałych odstępach. Tego typu artefakty również zostały wycięte z danych przed dalszą analizą.

Bardzo pomocnym narzędziem w trakcie analizy jest opcja wykrywanie dna, dzięki której można odseparować echa od dna i od obiektów biologicznych, które są rozmieszczone w jego pobliżu.

Po „wyczyszczeniu” danych przystąpiono do analizy właściwej. To jak wyglądała ta analiza zależało od konkretnego celu szczegółowego i zostało to opisane w poszczególnych rozdziałach: w podrozdziałach 3.1 i 4.1 (dotyczy realizacji Celu szczegółowego 1), 5.1 (dot. Celu szczegółowego 2), 6.1 (dot. Celu szczegółowego 3) i 7.1 (dot. Celu szczegółowego 4).

2.4 Pomiary środowiskowe

Do realizacji celów doktoratu razem z pomiarami hydroakustycznymi, wykonano pomiary pionowych profili zasolenia i temperatury, oraz obserwacje podwodne za pomocą kamery zamontowanej na zdalnie sterowanym pojeździe.

2.4.1 Zbieranie danych hydrofizycznych

Podczas prowadzenia badań hydroakustycznych, ważne jest aby znać warunki fizyczne w toni wodnej. Po pierwsze, pionowe profile temperatury i zasolenia mają wpływ na propagację dźwięku w wodzie morskiej. Dane te są wprowadzane w oprogramowanie echosondy obsługujące zbieranie danych hydroakustycznych. Informacje te powinny być aktualizowane

w miarę możliwości jak najczęściej. Po drugie dane te nie tylko są ważne podczas zbierania danych hydroakustycznych, ale również dla ich interpretacji.

Do określenia profili pionowych temperatury, zasolenia i prędkości propagacji dźwięku w toni wodnej była wykorzystywana sonda firmy Valeport model miniCTD (ang. *Conductivity, Temperature, Depth*). Sonda ta pozwala na rejestrację przewodnictwa właściwego wody, jej temperatury, oraz ciśnienia hydrostatycznego. Oprogramowanie do odczytywania danych z sondy pozwala wyliczyć zasolenie na podstawie przewodnictwa właściwego wody i temperatury, oraz prędkość dźwięku w wodzie na podstawie zasolenia, temperatury i ciśnienia hydrostatycznego. Szczegółowa specyfikacja sondy CTD została przedstawiona w tabeli 2.2. Dane hydrofizyczne były zbierane podczas wszystkich rejsów.

Tab. 2.2 Specyfikacja czujników sondy miniCTD Valeport (www.valeport.co.uk)

| Charakterystyka pomiaru | Sonda miniCTD Valeport |
|--------------------------------|-------------------------------|
| Przewodnictwo właściwe [mS/cm] | |
| Zakres pomiaru | 0 – 85 |
| Niepewność pomiaru | ± 0,01 |
| Rozdzielczość pomiaru | 0,001 |
| Temperatura [°C] | |
| Zakres pomiaru | -5 – 35 |
| Niepewność pomiaru | ±0,01 |
| Rozdzielczość pomiaru | 0,001 |
| Ciśnienie [bar] | |
| Zakres pomiaru | do 50 |
| Niepewność pomiaru | ±0,025 |
| Rozdzielczość pomiaru | 0,0005 |

2.4.2 Określenie warunków optycznych

Za zasięg strefy eufotycznej przyjmuje się tzw. głębokość kompensacyjną procesu fotosyntezy w morzu (Parsons i in. 1977). Jest to głębokość, na której tempo procesów metabolicznych i katabolicznych w fitoplanktonie są takie same. Powyżej tej głębokości fotosyntetyczna produkcja tlenu przewyższa jego zużycie na oddychanie fitoplanktonu zaś poniżej sytuacja jest odwrotna tj. zużycie tlenu na oddychanie fitoplanktonu przewyższa fotosyntetyczną produkcję tlenu. Zasięg strefy eufotycznej jest obliczany zgodnie z kryterium optycznym tj. wyznaczana jest głębokość do której dociera 1% strumienia światła wchodzącego tuż pod powierzchnię morza z zakresu fotosyntetycznie aktywnej radiacji PAR tj. od 400 nm do 700 nm. Skrót PAR pochodzi od Photosynthetically Available Radiation. Zasięg strefy eufotycznej wyrażony jest w metrach. (Majchrowski 2016, http://www.satbaityk.pl/sb_product/strefa-eufotyczna/)

Dane o strefie eufotycznej były pobierane z bazy danych System Satbaityk. Zasięg strefy eufotycznej, przedstawiony w bazie danych, wyznaczany jest za pomocą modelu DESAMBEM (Woźniak i in., 2008). Przy pomocy modelu DESAMBEM wyznaczane są pola światła w toni wodnej, które pozwalają określić oświetlenie na poszczególnych głębokościach. Wyznaczenie zasięgu strefy eufotycznej polega na wyznaczeniu głębokości na której oświetlenie względne (w stosunku do PAR tuż pod powierzchnią morza) $PAR(z)/PAR(0)$ przyjmuje wartość 1%. (Majchrowski 2016, http://www.satbaityk.pl/sb_product/strefa-eufotyczna/)

2.5 Źródła informacji o gatunkach ryb obecnych na poligonie badawczym

Przy badaniach rozkładów przestrzennych, biomasy czy klasyfikacji organizmów morskich za pomocą technik hydroakustycznych, jest zalecano (Simmonds i MacLennan, 2005) aby pomiarom akustycznym towarzyszyły zaciągi sieciowe. Niestety badania, wyniki których przedstawiono w niniejszej rozprawie, zostały przeprowadzone w pierwsze dwa lata eksploatacji statku badawczego r/v Oceanograf. W tym okresie nie została jeszcze uruchomiona możliwość trałowania toni wodnej oraz obszaru przydennego za pomocą włoków rybackich. Spowodowało to, że nie istnieje możliwość bezpośredniego określenia gatunku ryb zaobserwowanych na poligonie, czyli brakuje bezpośredniego źródła informacji. Wyjątkiem są obserwacje przeprowadzone podczas rejsu zimowego w lutym 2019 roku, gdzie wykorzystano zdalnie sterowany podwodny pojazd (model - Guardian miniROV, firma – Subsea Tech (Rys. 2.6)), wyposażony w kamerę optyczną. Zebrany materiał filmowy pozwolił zidentyfikować

organizmy, skupiska których wcześniej zostały zaobserwowane na echogramach podczas zbioru danych hydroakustycznych. Niestety, w innych sezonach badawczych pojazd nie mógł być używany ze względu na jego stan techniczny (potrzeba remontu).



Rys. 2.6 Zdalnie sterowany podwodny pojazd - Guardian miniROV, od firmy – Subsea Tech.

Ponieważ pomiary hydroakustyczne na częstotliwościach 38 kHz, 120 kHz oraz 333 kHz, zarejestrowano przede wszystkim echo od ryb (Simmonds i MacLennan, 2005). W powstałej sytuacji braku danych o gatunkach ryb na poligonie zwrócono się do pośrednich źródeł informacji. Dla pośrednich źródeł jest charakterystyczne, że dane, w nich zawarte, nie dotyczą bezpośrednio wybranego w niniejszej pracy poligonu badawczego, czy wybranych okresów badawczych. Dane te zostały zebrane w pobliżu tego poligonu i w okresach zbliżonych do okresów prowadzenia niniejszych badań.

Wykorzystano informacje zawarte w następujących źródłach:

Źródło 1. Raportach grupy roboczej Międzynarodowej organizacji do badań mórz i oceanów (ang. *International Council for the Exploration of the Sea*, skrót *ICES*), której angielska nazwa, brzmi: Baltic International Fish Survey Working Group (skrót *WGBIFS*) (ICES, 2018; ICES, 2019; ICES, 2021). Zacytowane raporty zawierają dane hydroakustyczne i/albo biologiczne, które zebrane są podczas corocznych rejsów prowadzonych przez Morski Instytut Rybacki – Państwowy Instytut Badawczy w Gdyni (na statku r/v *Baltica*). Dane zostały zebrane między innymi w podobszarze ICES SD26, w tym w kwadracie rybackim 37G8, do których należy zewnętrzna Zatoka Pucka, w ramach następujących rejsów:

1. Rejsy Baltic International Acoustic Survey (BIAS). Mają one miejsce we wrześniu – październiku każdego roku i są poświęcone oszacowaniu biomasy śledzia bałtyckiego.
2. Rejsy Baltic Acoustic Spring Survey (BASS) oraz od 2019 SPRat Acoustic Survey (SPRAS) Rejsy te odbywają się na wiosnę w maju każdego roku i są poświęcone oszacowaniu biomasy szprota bałtyckiego.
3. Rejsy Baltic International Trawl Survey (BITS) Są one prowadzone zazwyczaj w I i IV kwartałach roku, a badano w nich przede wszystkim rozkłady przestrzenne i biomasę dorsza bałtyckiego.

Została również wykorzystana informacja o wynikach badań prowadzonych podczas rejsów BITS zawarta w publikacjach (MIR, 2019a; MIR, 2019b).

Źródło 2. Raportach Narodowego Programu Zbierania Danych Rybackich na lata 2014-2020, (Multiannual Programme for Collection of Fisheries Data) (skrót polski: NPZDR) https://dcf.mir.gdynia.pl/?page_id=363) W raportach tych wymienione są główne źródła danych rybackich, w tym opisane w pkt.1.

Źródło 3. Nielicznych publikacjach poświęconych badaniom ichtiologicznym w Zatoce Puckiej (Strzyżewska, 1990; Skóra, 1993; Jackowski, 1998; Orłowski, 2001; Orłowski, 2016);

Źródło 4. Opracowaniach poświęconych realizacji Programu badań środowiska morskiego Zatoki Puckiej, ze szczególnym uwzględnieniem czynników istotnych dla rybołówstwa w latach 2019-2021 (A study programme on the marine environment of the Puck Bay, with particular emphasis on factors relevant to fisheries in 2019-2021) (skrót: Zatoka Pucka/19). Wyniki otrzymane w ramach tego programu zostały przedstawione na spotkaniu zorganizowanym przez Morski Instytut Rybacki – Państwowy Instytut Badawczy w Gdyni w dniu 13 grudnia 2021 roku (www.zatokapucka.mir.gdynia.pl/informacje/). W ramach tego programu przeprowadzono połowy badawcze w latach 2019-2020 w różnych sezonach badawczych na stanowisku badawczym w zewnętrznej Zatoce Puckiej, które znajduje się niedaleko miejscowości Hel oraz wybranego do badań w niniejszej rozprawie poligonu badawczego. Stanowisko to znajduje się na płytszych wodach niż wybrany poligon badawczy.

Źródło 5. Doniesieniach rybaków (np., film Rybacy Polskiego Wybrzeża na <https://www.youtube.com/watch?v=TCEoAGUJKfc>)

3. Dobowe i sezonowe zmiany rozkładów przestrzennych organizmów

Celem tego podrozdziału jest określenie charakterystycznych kształtów skupisk rozpraszających dla okresów dziennego i nocnego dla różnych sezonów dla badanego akwenu Zatoki Puckiej (dot. realizacji Celu szczegółowego 1). Zostanie również pokazana różnica z akwenami Południowego Bałtyku o większej głębokości wcześniej badanymi hydroakustycznie (m.in. Szczucka, 2000, Szczucka, 2003, Orłowski, 2001). W akwencie tym, w odróżnieniu od badanych wcześniej głębokowodnych akwenów Zatoki Gdańskiej, Głębi Gdańskiej czy Bałtyku Południowego, nie zaobserwowano obecności halokliny związanej z wlewami z Morza Północnego.

Metodyka zbierania danych hydroakustycznych oraz hydrofizycznych na poligonie badawczym, które wykorzystano w tym rozdziale, oraz ich analizy wstępnej została opisana w Rozdziale 2 rozprawy. Analiza danych jest przedstawiona poniżej w podrozdziale 3.1. Pozwoliła ona prześledzić zarówno dobowe i sezonowe zmiany rozkładów przestrzennych siły objętościowego rozpraszania wstecznego oraz zrozumieć wpływ na rozkłady warunków termochalinowych.

W podrozdziale 3.2 przedstawiono echogramy w celu określenia charakterystycznych form rozkładów przestrzennych siły objętościowego rozpraszania wstecznego w okresach dziennym i nocnym dla różnych sezonów.

W podrozdziale 3.3 przedstawiono interpretację wyników na podstawie:

- analizy warunków środowiskowych (pionowe profile temperatury i zasolenia),
- wykonanych obserwacji za pomocą podwodnej kamery (sezon zimowy),
- literatury, poświęconej badaniom rozkładów przestrzennych organizmów w Południowym Bałtyku (m. in.: Orłowski, 2001; Cardinale i in. 2003; Klusek i in., 2003; Szczucka, 2003; Axenrot i in. 2004; Schmidt i Szczucka 2010; Orłowski, 2016),

Podrozdział 3.4 jest poświęcony podsumowaniu wyników badań przeprowadzonych w ramach Rozdziału 3.

3.1 Metodyka – analiza danych

Dla opracowania wyników, przedstawionych w podrozdziale 3.2, na podstawie zebranych danych hydroakustycznych (surowych) po odpowiedniej analizie wstępnej, opisanej w Rozdziale 2, za pomocą programu Sonar5-Pro wyeksportowano echogramy. W celu interpretacji echogramów skonfrontowano je z pionowymi profilami temperatury i zasolenia.

Dla wszystkich sezonów badawczych w tym rozdziale wykorzystano dane zebrane w okresach dziennym i nocnym poza okresami zaobserwowanych pionowych migracji organizmów, które miały miejsce o wschodzie i zachodzie słońca. Dane o godzinach wschodu i zachodu słońca dla poszczególnych dni badawczych zostały zaczerpnięte ze strony: www.calendar.zoznam.sk/sunset-pl.php, na ich podstawie wyznaczono czas trwania dnia oraz nocy.

Dane o wschodzie i zachodzie słońca dla poszczególnych dni badawczych są przedstawione w Tabeli 3.1.

Tab. 3.1 Zestawienie godzin wchodów i zachodów słońca w dniach, w których wykonywano badania

| Sezon | Wschód słońca | Zachód słońca |
|------------------|---------------|---------------|
| Październik 2018 | 07:34 | 17.25 |
| Luty 2019 | 07:05 | 16:53 |
| Kwiecień 2019 | 05:49 | 19:44 |
| Lipiec 2019 | 04:36 | 21:06 |

Dla interpretacji wyników w Rozdziale 3.3 potrzebna była informacja o głębokości strefy eufotycznej. Została ona pozyskana z bazy danych udostępnionej przez System Operacyjny SatBałtyk (licencja CC BY-SA 2.5).

Na echogramach przedstawionym na Rys. 3.2 w następnym podrozdziale, górna warstwa powyżej 6 m nie jest wzięta pod uwagę w analizie z powodu zakłóceń:

- związanych ze „strefą martwą” echosondy,
- spowodowanych odbiciami sygnału nadawanego w kierunku powierzchni morza od statku i powierzchni

- związanych z rozproszeniem fal akustycznych spowodowanym pęcherzykami powietrza wtłaczanymi przez fale uderzające o kadłub statku lub załamujące się fali wiatrowe.

Podążając za pracami Lu i Lee (1995) oraz Fréon i in. (1996) i określając charakterystyczne cechy zaobserwowanych obrazów akustycznych, będziemy dalej korzystać z następującej terminologii:

- „ławice akustyczne” dla obiektów akustycznych przedstawionych na echogramach na Rys. 3.2, Rys. 3.8, Rys. 3.11 (przykładowy taki obiekt zaznaczono czarną ramką z literą A na Rys. 3.11).
- „warstwa rozpraszające” (przykładowe tego typu obiekty zostały zaznaczone na Rys. 3.11 czarnymi ramkami z literami B i C)

Charakterystycznym dla tych obiektów jest to, że osobniki są rozmieszczone tak blisko jeden drugiego, że echa od nich nie są rozdzielone w czasie.

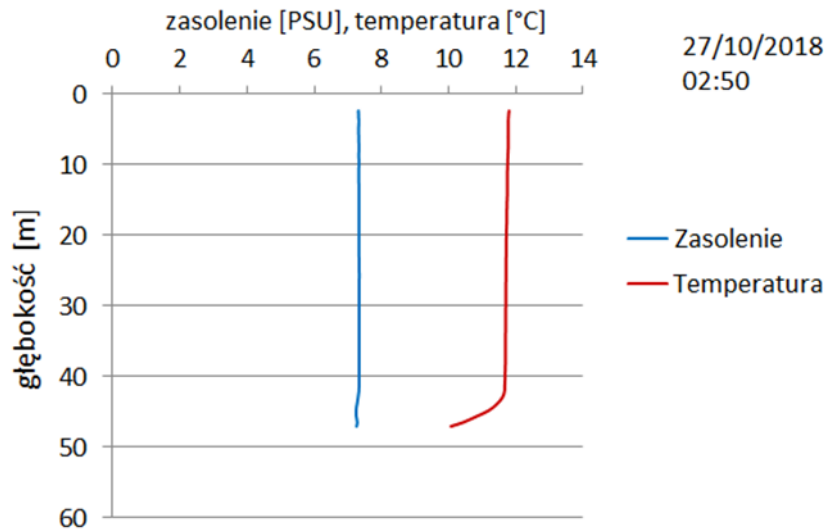
3.2 Rozkłady przestrzenne siły objętościowego rozpraszania wstecznego dla okresów dziennego i nocnego w poszczególnych sezonach badawczych - wyniki

3.2.1 Sezon jesienny (październik 2018). Wyniki pomiarów w okresach dziennym i nocnym

Warunki hydrofizyczne

Pomiary rozkładów pionowych temperatury i zasolenia wykonane na poligonie badawczym, wykazały ich jednorodność przestrzenną. Nie odnotowano również zmian w cyklu dobowym na odcinku między przetwornikiem echosondy (usytuowanym na głębokości 2,5 m pod powierzchnią morza) a dnem.

Typowe profile pionowe zasolenia i temperatury są zaprezentowane na Rys. 3.1. Pomiary wykazały, że temperatura zmieniała się z głębokością od 11,8 °C przy powierzchni do 10,1 °C przy dnie będąc stałą od powierzchni do głębokości 42 m. Najszybsze zmiany temperatury zostały zaobserwowane bezpośrednio przy dnie poniżej tej głębokości (Rys. 3.1). Zasolenie nie zmieniało się z głębokością i wynosiło 7,3 PSU.



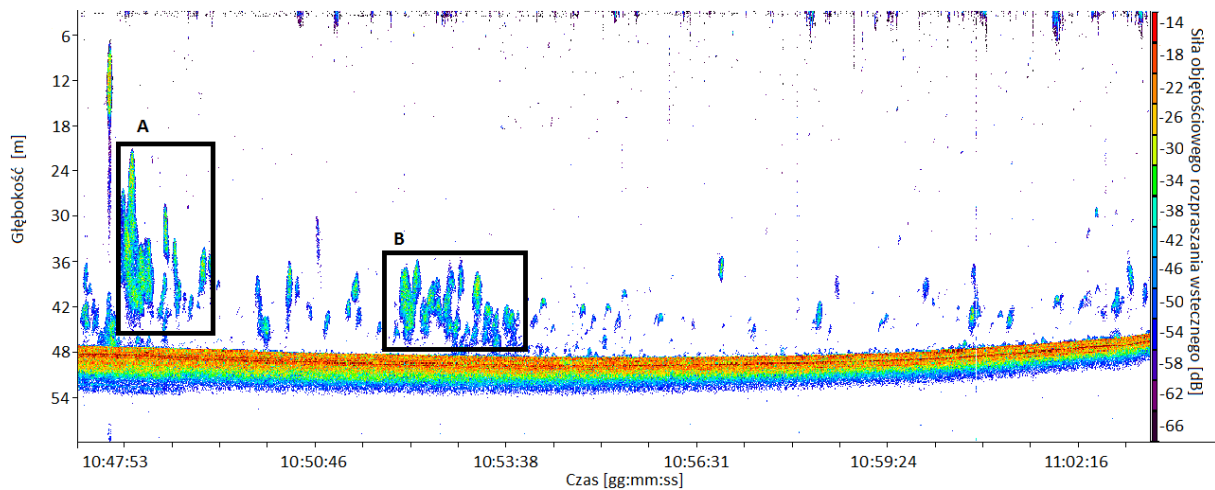
Rys. 3.1 Pionowe profile zasolenia i temperatury. Październik 2018

Wyniki obserwacji hydroakustycznych

Na Rys. 3.2 oraz Rys. 3.3, przedstawione zostały przykładowe echogramy opracowane na podstawie danych zebranych odpowiednio w okresach dziennym i nocnym dla przekrojów z centralnej części obszaru badawczego (transekt numer 5, patrz Rys. 2.4). Do prezentacji danych na echogramie wybraliśmy jeden ze środkowych transektów, ponieważ był on reprezentatywny pod względem kształtów skupisk rozpraszających występujących na poligonie badawczym.

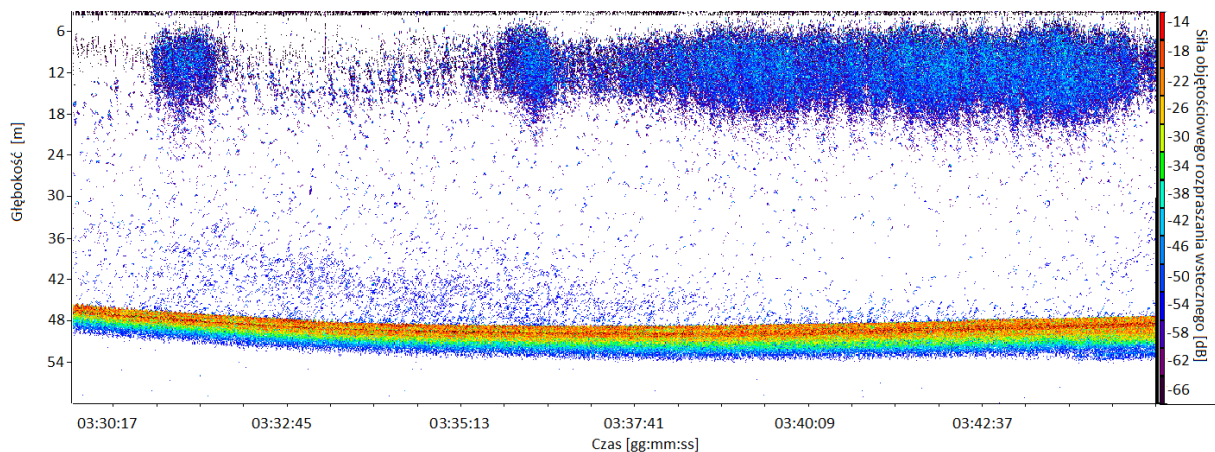
Na osi poziomej znajduje się czas lokalny (gg:mm:ss), na osi pionowej (w lewej części echogramu) głębokość w metrach. Każdy piksel na echogramie odpowiada sile objętościowego rozpraszania wstecznego. Skala kolorów (w prawej części echogramu) przedstawia wartości siły objętościowego rozpraszania wstecznego w decybelach (dB). Najniższym wartościom siły objętościowego rozpraszania wstecznego odpowiada kolor ciemno granatowy i niebieski, pośrednim – zielony i żółty, a najwyższym – pomarańczowy i czerwony. Na echogramie większe wartości siły objętościowego rozpraszania wstecznego oznaczają większą liczebność obiektów rozpraszających lub większą siłę celu tych obiektów, czyli charakterystyki opisującej ich właściwości rozpraszające.

Na echogramie z okresu dziennego (Rys. 3.2) zaobserwowano tzw. ławice akustyczne (przykładowe grupy ławic zaznaczono w ramkach o kolorze czarnym z literami A i B). Zaobserwowano, że zdecydowana większość ławic znajduje się na głębokościach większych od 30 m. Nieliczne ławice o większej wysokości pionowej sięgają powyżej tej granicy.



Rys. 3.2 Echogram zarejestrowany na częstotliwości 38 kHz w ciągu dnia, październik 2018.

Echogram (Rys. 3.3) z nocy przedstawia inny niż w dzień rozkład przestrzenny siły objętościowego rozpraszania wstecznego. Pierwsze na co należy zwrócić uwagę, że w dzień (Rys. 3.2) można zaobserwować skupiska organizmów w toni wodnej, głównie na głębokościach większych od 30 m natomiast w nocy Rys. 3.3) - warstwę rozpraszającą bliżej powierzchni morza (na głębokościach pomiędzy 6 m a 20 m pod powierzchnią wody).



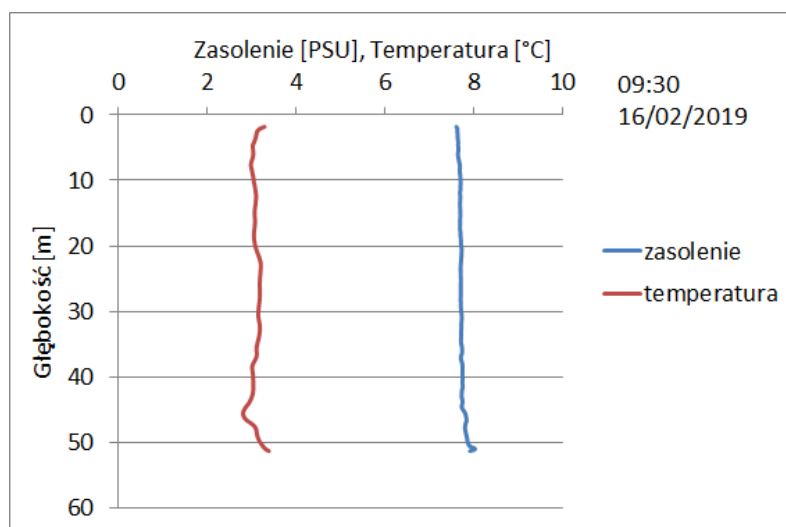
Rys. 3.3 Echogram zarejestrowany na częstotliwości 38 kHz w ciągu nocy, październik 2018

3.2.2 Sezon zimowy. Wyniki pomiarów w okresach dziennym i nocnym.

Warunki hydrofizyczne

Pomiary rozkładów pionowych temperatury i zasolenia wykonywane na poligonie badawczym, wykazały podobnie jak w sezonie jesiennym ich jednorodność przestrzenną. Nie odnotowano również zmian w cyklu dobowym na odcinku między przetwornikiem echosondy (znajduje się na głębokości 2,5 m względem powierzchni morza) a dnem. Wyniki są zaprezentowane na Rys. 3.4. Pomiary te wykazały, że temperatura zmieniała się z głębokością

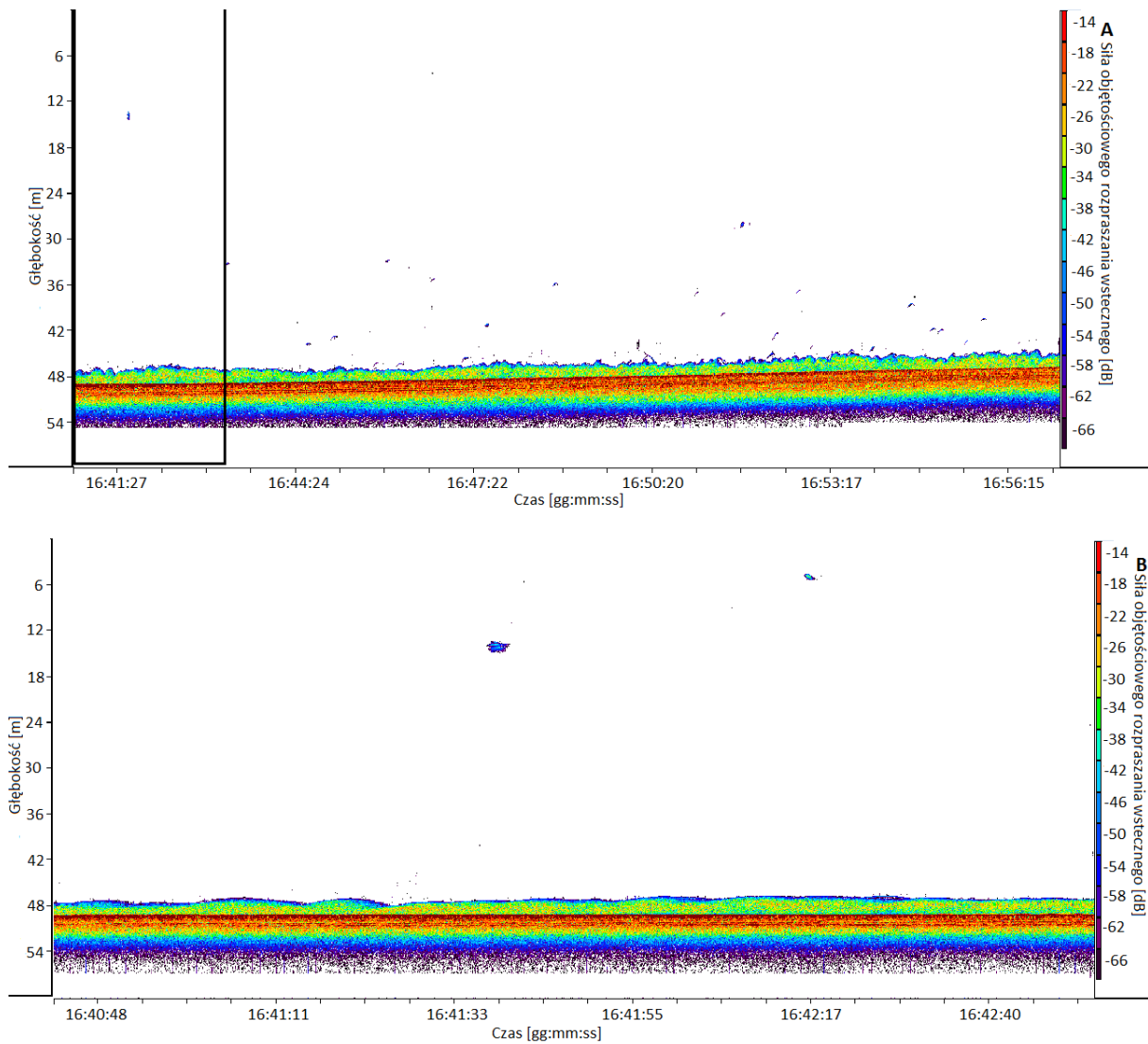
od 3,4 °C przy powierzchni do minimalnej wartości 2,8 °C zaobserwowanej kilka metrów na dnem (Rys. 3.4). Zasolenie zmieniało się nie znacznie z głębokością w zakresie 8,0 PSU do 7,6 PSU.



Rys. 3.4 Pionowe profile zasolenia i temperatury. Luty 2019

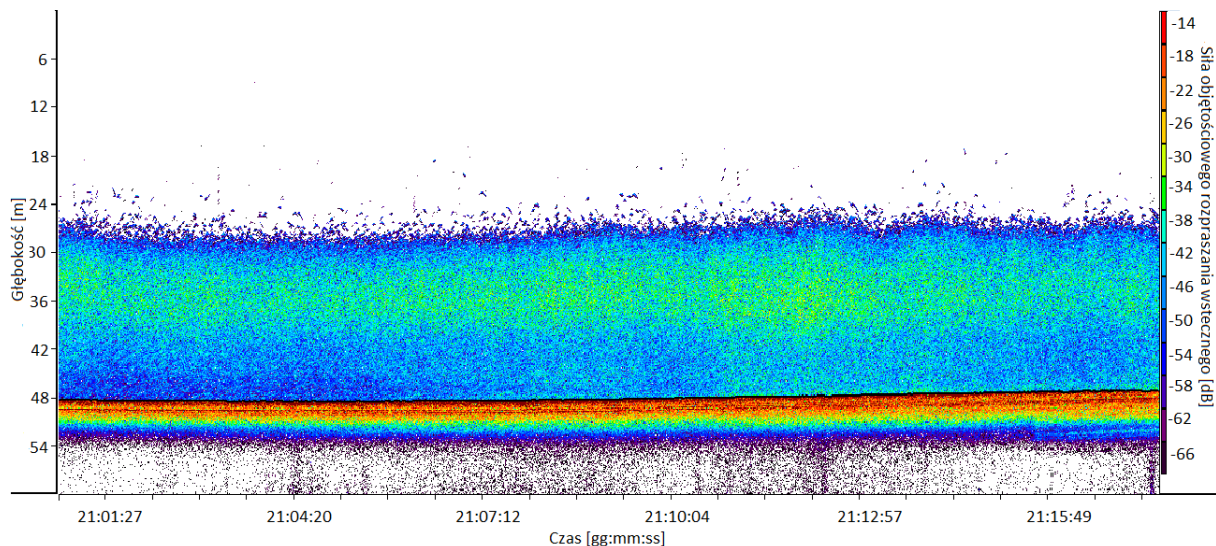
Wyniki obserwacji hydroakustycznych

Na Rys. 3.5A, B, oraz Rys. 3.6, przedstawione zostały przykładowe echogramy opracowane na podstawie danych zebranych odpowiednio w okresach dziennym i nocnym dla przekroju z centralnej części obszaru badawczego (transekt numer 4 patrz Rys. 2.4), Rys. 3.5B przedstawia powiększenie fragmentu echogramu zaprezentowanego na Rys. 3.5A (czarna ramka). Oś oraz skala kolorów są tak samo przedstawione jak na wcześniejszych echogramach na rysunkach (Rys. 3.2 i Rys. 3.3).



Rys. 3.5 Echogram zarejestrowany na częstotliwości 38 kHz w ciągu dnia (A). Na rysunku (B) - zbliżenie części zaznaczonej czerwoną ramką na rysunku A, luty 2019.

Na echogramie z okresu dziennego (Rys. 3.5) można zaobserwować, warstwę rozpraszającą od 1 m do 2 m miąższości przy dnie. W toni wodnej możemy zaobserwować nieliczne pojedyncze obiekty rozpraszające na głębokościach poniżej 25 m (Rys. 3.5B).



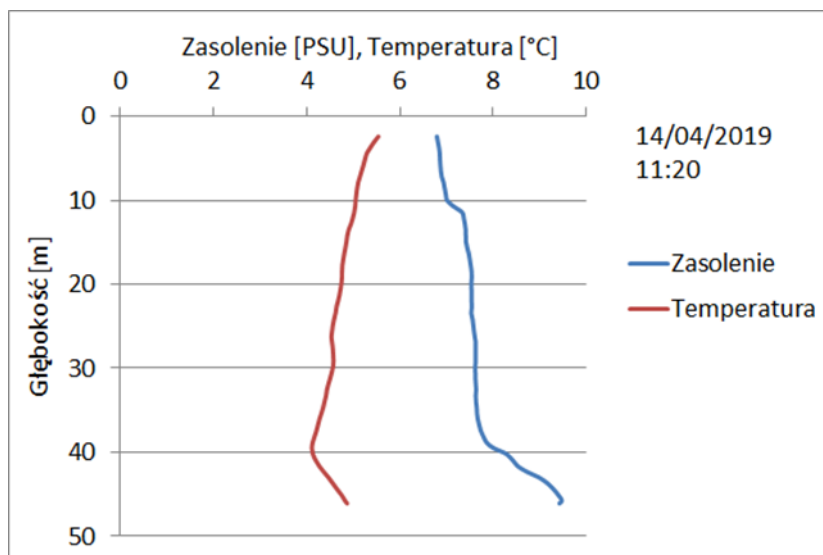
Rys. 3.6 Echogram zarejestrowany na częstotliwości 38 kHz w ciągu nocy, luty 2019.

Echogram (Rys. 3.6) z nocy przedstawia inny niż w dzień rozkład przestrzenny siły objętościowego rozpraszania wstecznego. Pierwsze co zwraca uwagę - w toni wodnej, która w ciągu dnia była opustoszała, pojawiła się warstwa rozpraszająca pomiędzy 24 m głębokości a dnem. Najsilniejsze objętościowe rozpraszanie wsteczne jest obserwowane pomiędzy między 28 m a 38 m głębokości.

3.2.3 Sezon wiosenny. Wyniki pomiarów w okresach dziennym i nocnym.

Warunki hydrofizyczne

Pomiary na poligonie badawczym, wykazały jego jednorodność przestrzenną pod względem rozkładów zasolenia i temperatury. Nie odnotowano również zmian w cyklu dobowym na odcinku między przetwornikiem echosondy (znajduje się na 2,5 m głębokości względem powierzchni morza) a dnem. Wyniki pomiarów są zaprezentowane na Rys. 3.7. Pomiary te wykazały, że temperatura malała od 5,5 °C (przy powierzchni) do 4,1 °C na głębokości gdzie zaobserwowano minimum temperatury, czyli na 40 m, z dalszym wzrostem głębokości temperatura rosła do 4,9 °C przy dnie (Rys. 3.7). Zasolenie rosło z głębokością, od 6,5 PSU przy powierzchni do 9,5 PSU przy dnie. Najszybszy wzrost zasolenia zaobserwowano poniżej głębokości 40 m. Taki rozkład termohalinowy może być związany z obecnością wód z głębszych rejonów Zatoki Gdańskiej (Cyberska, 1990).

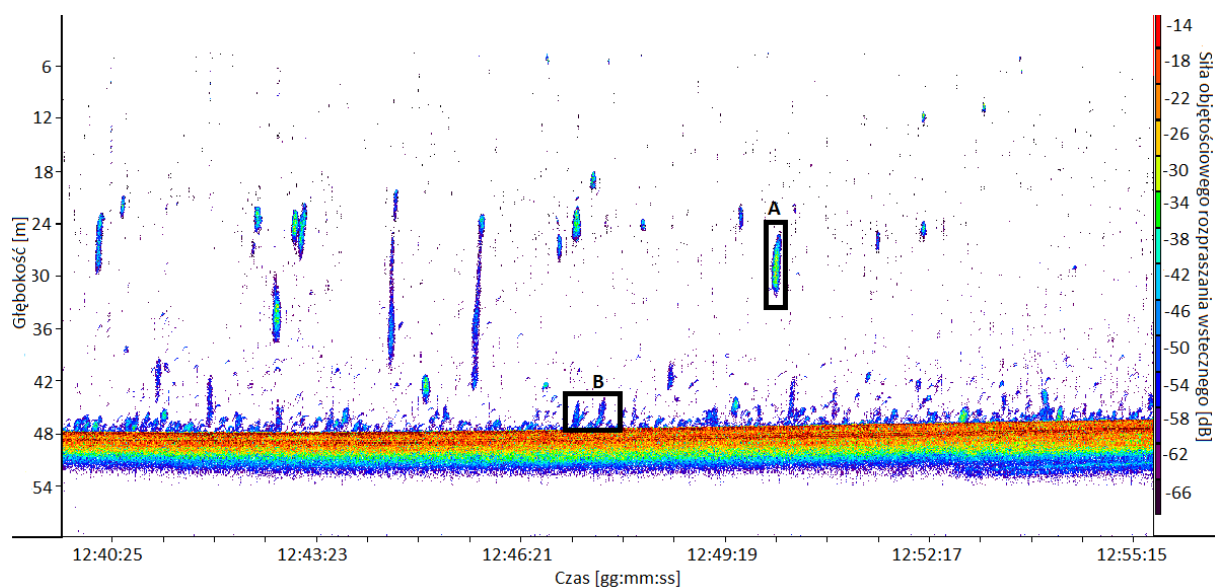


Rys. 3.7 Pionowe profile zasolenia i temperatury. Kwiecień 2019.

Wyniki obserwacji hydroakustycznych

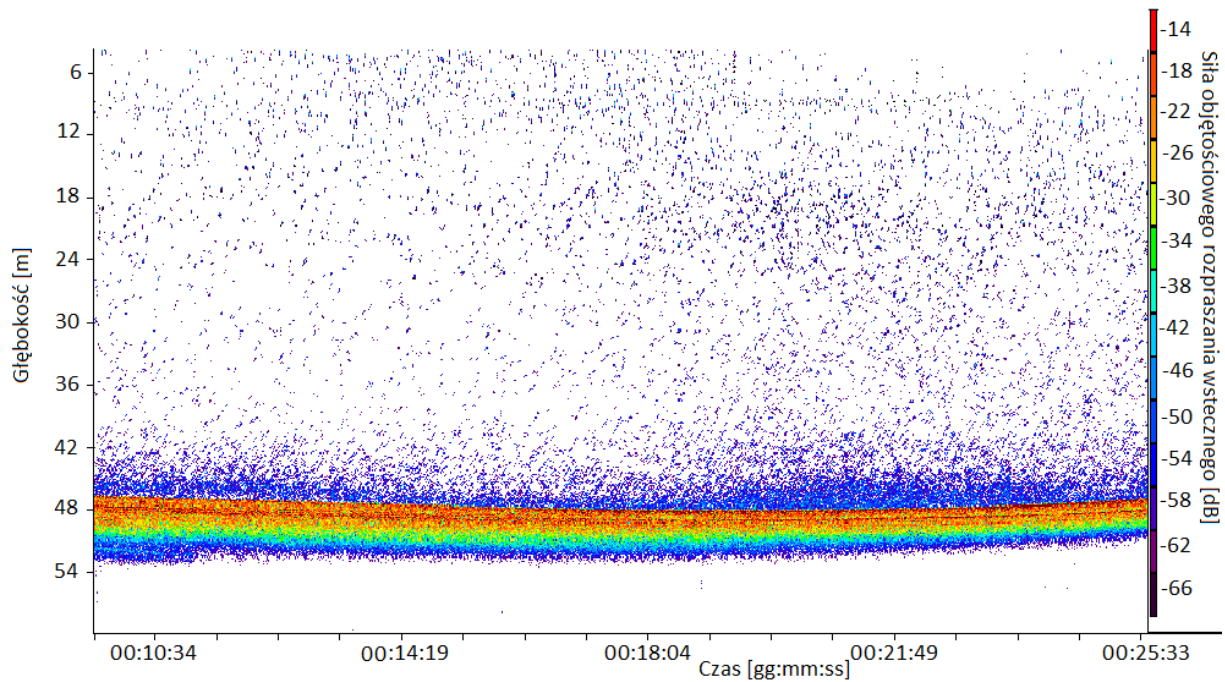
Na Rys. 3.8 oraz Rys. 3.9, przedstawione zostały przykładowe echogramy opracowane na podstawie danych zebranych odpowiednio w okresach dziennym i nocnym dla przekroju z centralnej części obszaru badawczego (transekt numer 5, patrz Rys. 2.4). Na echogramach na Rys. 3.8 i Rys. 3.9 osie oraz skala kolorów są tak samo przedstawione jak na wcześniejszych echogramach np. na Rys. 3.2, Rys. 3.3.

Na echogramie z okresu dziennego (Rys. 3.8) można zaobserwować, że większość skupisk organizmów (ławice akustyczne) znajduje się na głębokościach większych od 18 m (przykładowa ławica akustyczna jest oznaczona czarną prostokątną ramką z literą A). Największe skupiska, zaobserwowano między 18 m a 36 m głębokości. Blisko dna (poniżej 40 m głębokości) w wodach o podwyższonej temperaturze i zasoleniu, obserwujemy liczne pojedyncze osobniki oraz ich skupiska (ławice akustyczne) o małych wymiarach (przykładowe ławice są oznaczone czarna prostokątna ramką z literą B).



Rys. 3.8 Echogram zarejestrowany na częstotliwości 38 kHz w ciągu dnia, kwiecień 2019.

Echogram (Rys. 3.9) z okresu nocnego przedstawia inny niż w okresie dziennym rozkład przestrzenny siły objętościowego rozpraszania wstecznego. Pierwsze na co należy zwrócić uwagę, że w toni wodnej w dzień (Rys. 3.8) można zaobserwować ławice natomiast w nocy (Rys. 3.9) w toni wodnej są obecne wyłącznie pojedyncze osobniki. Oznacza to, że organizmy w dzień tworzące skupiska rozproszyły się, zajmując całą toni wodną od powierzchni do dna. Druga różnica dotyczy organizmów przy dnie: w dzień zaobserwowano (Rys. 3.8) pojedyncze małe ławice lub pojedyncze organizmy przy samym dnie, natomiast w nocy obserwujemy akustyczną warstwę rozpraszającą przy dnie.

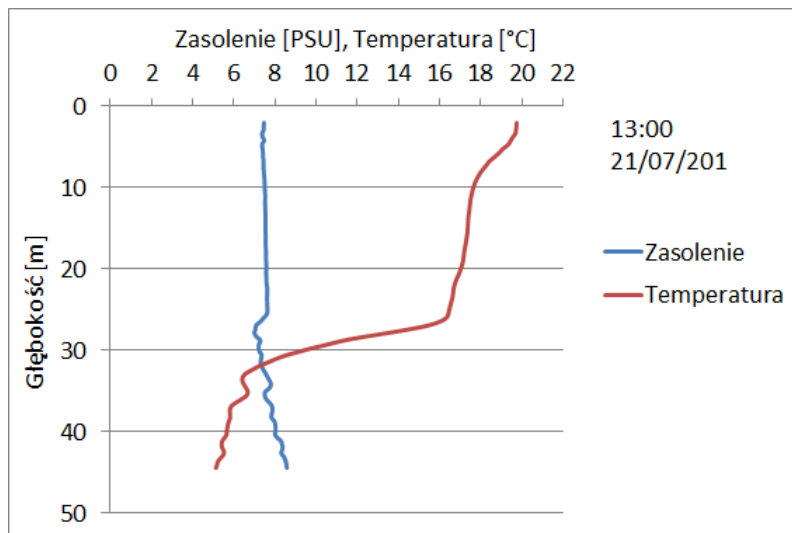


Rys. 3.9 Echogram zarejestrowany na częstotliwości 38 kHz w ciągu nocy, kwiecień 2019.

3.2.4 Sezon letni. Wyniki pomiarów w okresach dziennym i nocnym

Warunki hydrofizyczne

Podobnie jak w poprzednich sezonach badawczych pomiary na poligonie, wykazały jego jednorodność przestrzenną pod względem rozkładów zasolenia i temperatury. Nie odnotowano również zmian w cyklu dobowym. Wyniki pomiarów CTD są zaprezentowane na Rys. 3.10. Pomiary wykazały, że temperatura zmieniała się od około 20 °C (na powierzchni) do 5,1 °C (przy dnie). Na głębokości od 26 m do 32 m, zaobserwowano największy gradient temperatury (zmiany od 16,5 °C do 6,5 °C), co świadczy o obecności termokliny na tych głębokościach. Zasolenie również zmieniało się wraz z głębokością, w zakresie między 7 PSU a 8 PSU. Najmniejsze zasolenie odnotowano na poziomie termokliny.

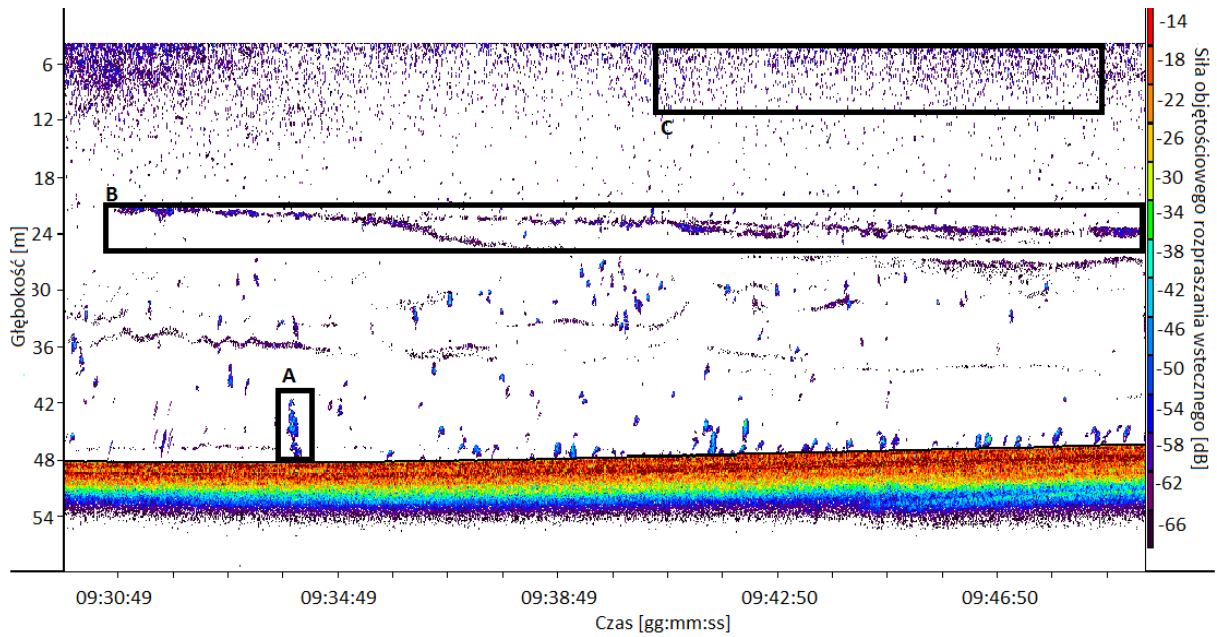


Rys. 3.10 Pionowe profile zasolenia i temperatury. Lipiec 2019.

Wyniki obserwacji hydroakustycznych

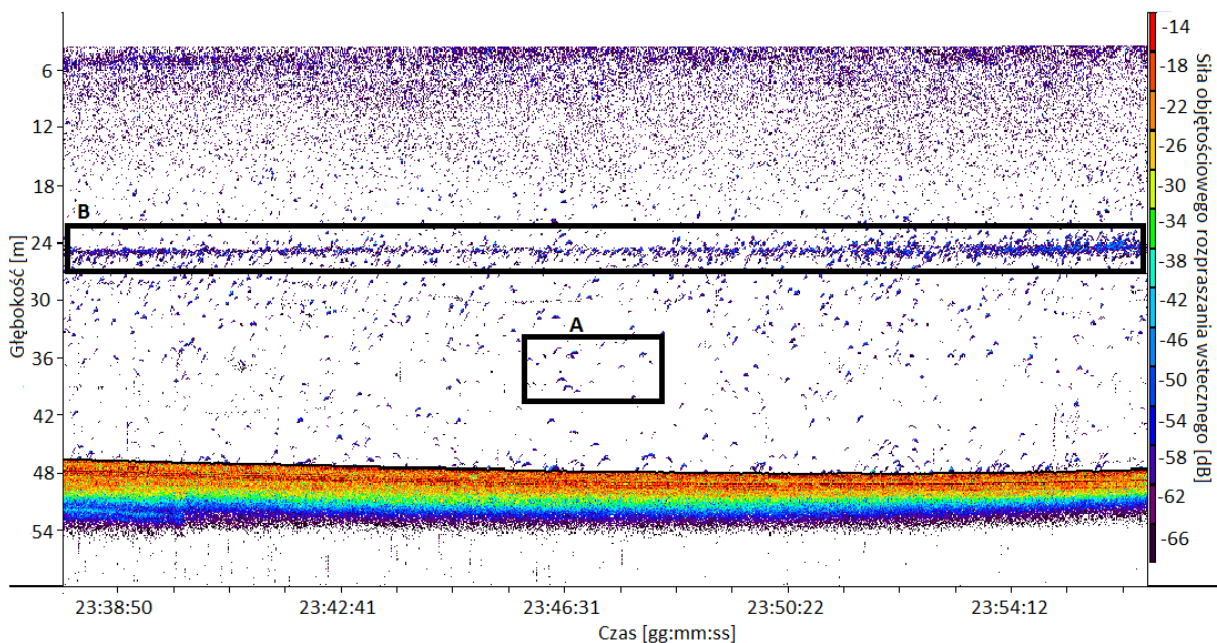
Na Rys. 3.11 oraz Rys. 3.12, przedstawione zostały echogramy opracowane na podstawie danych zebranych odpowiednio w okresach dziennym i nocnym dla przekroju z centralnej części obszaru badawczego (transekt numer 5, patrz Rys. 2.4). Osie oraz skala kolorów są tak samo przedstawione jak na wcześniejszych echogramach na przykład na Rys. 3.2, Rys. 3.3.

Na echogramie opracowanym na podstawie danych zebranych w dzień można zaobserwować kilka rodzajów skupisk rozpraszających. Przy dnie występują niewielkie skupiska organizmów, które są rozmieszczone poniżej 36 m głębokości, czyli poniżej termokliny (przykładowe skupiska organizmów są oznaczone czarna prostokątna ramką z literą A). Na głębokości około 24 m znajduje się warstwa rozpraszającą zalegającą nad termoklina (oznaczona literą B). Na głębokościach mniejszych od 18 m a w szczególności pomiędzy 10 m a powierzchnią znajdują się pojedyncze organizmy (przykładowe echa od pojedynczych osobników są oznaczone czarna prostokątna ramką z literą C).



Rys. 3.11 Echogram zarejestrowany na częstotliwości 38 kHz w ciągu dnia, lipiec 2019.

Na echogramie nocnym obraz akustyczny istotnie różni się od dziennego: przy dnie nie zaobserwowano skupisk organizmów, są natomiast nieliczne pojedyncze organizmy (przykładowe echa od pojedynczych osobników zostały oznaczone czarnym prostokątem z literą A(Rys. 3.12)). Na głębokości 26 m, czyli bezpośrednio na termoklinie, uformowała się warstwa rozpraszająca (oznaczona literą B(Rys. 3.12)), wyraźniejsza od tej, która w dzień była na głębokości około 24 m. Powyżej tej warstwy nadal mamy do czynienia z rozproszonymi pojedynczymi organizmami.



Rys. 3.12 Echogram zarejestrowany na częstotliwości 38 kHz w ciągu nocy, lipiec 2019.

3.3 Dyskusja - porównanie akustycznych obrazów zarejestrowanych w godzinach dziennych i nocnych dla różnych pór roku

W części tej przedstawiono porównanie rozkładów przestrzennych siły objętościowego rozpraszania wstecznego zarejestrowanych w okresie dziennym (nocnym) dla różnych sezonów. Porównanie echogramów przedstawionych w podrozdziale 3.2 pozwala na szereg ciekawych spostrzeżeń.

3.3.1 Obraz akustyczny - pora dzienna

Ławice akustyczne – zmiany sezonowe

Akustyczne ławice zostały zaobserwowane wyłącznie w porze dziennej we wszystkich sezonach (Rys. 3.2, Rys. 3.8, Rys. 3.11) za wyjątkiem sezonu zimowego, w którym w dzień zaobserwowano warstwę przy dnie lub echa od pojedynczych osobników w toni wodnej nad dnem (Rys. 3.5, Rys. 3.6).

Zaobserwowane obecność ławic w dzień i ich rozproszenie się w porze nocnej jest zgodne z obserwacjami dla ryb pelagicznych, wyniki których są przedstawione w pracach (Orłowski, 1999, 2001; Szczucka, 2003; Axenrot i in., 2004; Orłowski, 2016) dla Morza Bałtyckiego oraz w publikacjach (np. Blaxter i Holliday, 1969; Fréon i in., 1996; Fréon i Misund, 1999; Pavlov i Kasumyan, 2000; Cardinale i in., 2003) dla innych akwenów morskich. Za jedną z przyczyn uważa się presję drapieżników, rozproszenie ławic służy unikaniu drapieżników podczas żerowania w godzinach nocnych (Anger i in., 1977; Pavlov i Kasumyan, 2000). Dodatkowo również ryby żywiące się planktonem (Cardinale i in., 2003) żerując w nocy, rozpraszają się, nie pływają w ławicach.

Wpływ warunków hydrofizycznych (głębokości strefy eufotycznej, temperatury i zasolenia) w różnych sezonach badawczych. Różnica z obszarami głębszymi.

Ławice akustyczne w porze dziennej w okresie jesiennym i letnim znajdowały się głównie na głębokościach poniżej 30 metrów (echogramy na Rys. 3.2 oraz Rys. 3.11 odpowiednio), natomiast, w sezonie wiosennym (echogram Rys. 3.8) można było je spotkać również na mniejszych głębokościach.

Ta różnica w zakresach głębokości, na której ławice się znajdują, może być związana z tym że głębokość strefy eufotycznej w październiku i lipcu była zbliżona i wynosiła około 13 m i 15 metrów odpowiednio, natomiast, w kwietniu była prawie dwa razy mniejsza (około 7

m). Mogło to spowodować, że w sezonie wiosennym organizmy gromadziły się w dzień na płytszych wodach.

Można też zauważyć, że w ciągu dnia w żadnym miesiącu (echogramy: Rys. 3.2 Rys. 3.5 Rys. 3.8) oprócz lipca (echogram Rys. 3.11) w strefie eufotycznej nie zaobserwowano biologicznych obiektów rozpraszających (głębokość strefy eufotycznej wynosiła w październiku około 13 m, w lutym około 17 m, w kwietniu około 7 m, a w lipcu około 15 m). Organizmy wodne takie jak ryby unikają światła słonecznego (np., McFarland, 1986; Fréon i in., 1996; Olenin, 1997; Orłowski, 1999; Szczucka, 2000; Orłowski, 2001; Szczucka, 2003; Axenrot i in., 2004; Orłowski, 2016), co może wyjaśniać dlaczego nie obserwujemy w ciągu dnia organizmów w górnych warstwach wody.

W lipcu zaś zaobserwowano warstwę rozpraszającą w strefie eufotycznej, występuje ona też na tych głębokościach w ciągu nocy. Ciekawym jest zauważyć, że w pobliżu powierzchni w tym miesiącu zaobserwowana była duża ilość meduz oraz zaobserwowano silny zakwit fitoplanktonu, który będąc pokarmem mógł przyciągać organizmy.

Należy zwrócić uwagę na to, że obszar badany w tej pracy, istotnie się różnił pod względem warunków hydrologicznych od obszaru badanego przez Szczucką (2000, 2003), gdzie zaobserwowano obecność wyraźniej halokliny, związanej z wlewami z Morza Północnego (skok zasolenia wynosił do 5 PSU). W pracach (Szczucka, 2000, 2003) haloklina w dzień wyznaczała położenie ławic w toni wodnej.

Ciekawe jest, że w dzień w sezonie wiosennym małe ławice zaobserwowano w wąskiej warstwie przy dnie morza, różniącą się pod względem temperatury i zasolenia (wyższe wartości) od pozostałej masy wody powyżej. Ta warstwa mogła powstać na skutek dotarcia (przez sztormy) do Zatoki Puckiej przez głębokowodną część Zatoki Gdańskiej masy wody z Morza Północnego, bogatej w tlen (Cyberska, 1990; Tomkiewicz i in., 1998; Holste i in. 2009). Mogło to przyciągnąć organizmy, dla których ta woda była optymalna pod względem temperatury, zasolenia i natlenienia (Ojaveer, 1981; Strzyżewska, 1990; Jørgensen i in., 2005).

Warstwa rozpraszające – zmiany sezonowe Różnica z obszarami głębszymi.

W sezonach letnim i zimowym w porze dziennej zaobserwowano również warstwy rozpraszające. W sezonie letnim warstwa rozpraszająca o małej miąższości zarejestrowana została w okolicach termokliny (Rys. 3.11), natomiast w sezonie zimowym - przy samym dnie (Rys. 3.5).

Obecność słabej warstwy rozpraszającej nad termokliną w dzień w sezonie letnim podobnie jak w niniejszych badaniach, była odnotowana w pracach (Szczucka, 2000, 2003), gdzie prowadzono badania na głębszych wodach Zatoki Gdańskiej oraz na Głębi Gdańskiej. Również Axenrot i in. (2004), prowadząc badania na płytkowodnym obszarze (ok. 17 metrów głębokości) Zatoki Himmerfjarden (północno zachodnia część Morza Bałtyckiego), wykazali w sezonie letnim maksimum siły objętościowego rozpraszania w obszarze termokliny.

W badaniach (Szczucka, 2000, 2003) w okresie zimowym podobnie jak w niniejszych badaniach nie zaobserwowano w dzień obecności ławic, natomiast zarejestrowano warstwę rozpraszającą w obszarze halokliny.

3.3.2 Obraz akustyczny - pora nocna. Wpływ warunków hydrofizycznych. Różnica z obszarami głębszymi

Warstwa rozpraszające

Dla pory nocnej są charakterystyczne warstwy rozpraszające. Warstwy te zostały zaobserwowane:

- przy powierzchni (sezon jesienny - Rys. 3.3, sezon letni –Rys. 3.12)
- przy dnie (sezon zimowy - Rys. 3.6, sezon wiosenny –Rys. 3.9)
- na termoklinie (sezon letni - Rys. 3.12 (czarna ramka B))

W Tabeli 3.2 porównano głębokości występowania warstw rozpraszających w nocy zaobserwowane w niniejszych badaniach oraz w badaniach prowadzonych na Głębi Gdańskiej (Szczucka, 2000, 2003).

Tab. 3.2 Porównanie głębokości występowanie warstw rozpraszających.

| Sezon | Głębokość, na której w nocy znajduje się warstwa rozpraszająca | |
|----------|--|---|
| | Szczucka, 2000, 2003 | Niniejsza rozprawa |
| jesienny | Obszar termokliny i wyżej | Pomiędzy 6 m a 20 m pod powierzchnią wody (brak termokliny) |
| zimowy | 60 metrów, nad halokliną | Poniżej 24 metrów |

| | | |
|----------|---------------------------------|---|
| | | głębokości (brak halokliny) |
| wiosenny | 30-40 metrów | Przy dnie, obszar skoku zasolenia |
| letni | Obszar termokliny i wyżej | Obszar termokliny i wyżej |

Różnica w rozkładzie przestrzennym warstw rozpraszających w porze nocnej dla różnych sezonów może być związana z różnicą: (i) pionowych profili temperatury w różnych porach roku oraz (ii) dostępności pokarmu w warstwach przy powierzchniowych (Levinton, 2001).

Analiza wyników z tabeli 3.2:

1. W przedstawionych badaniach warstwa rozpraszająca nad termokliną została zaobserwowana jedynie w sezonie letnim (Rys. 3.12). Był to jedyny sezon w którym zaobserwowano obecność termokliny. W pracach poświęconych badaniom hydroakustycznym rozkładów przestrzennych organizmów południowego Bałtyku (Szczucka i Klusek 1996; Orłowski 1999, 2001; Szczucka 2003), wykazano również, że obecność termokliny wpływa na ich pionowy rozkład przestrzenny w okresie nocy.
2. W przedstawionych badaniach w sezonie jesiennym (Rys. 3.3) w nocy rozkład przestrzenny siły objętościowego rozpraszania wstecznego sięgał płytszych wód w porównaniu z sezonem zimowym (Rys. 3.6). W sezonie jesiennym warstwa rozpraszająca znajdowała się na głębokościach pomiędzy 6 m a 20 m pod powierzchnią wody. W sezonie zimowym zaś warstwę rozpraszającą zaobserwowano na głębokościach poniżej 24 metrów (Rys. 3.6). Może to być związane z tym, że jak wykazało porównanie pionowego profilu temperatury (Rys. 3.4) dla sezonu zimowego i jesiennego (Rys. 3.1), w sezonie zimowym zaobserwowano znacznie niższe temperatury (ok. 3°C) w całej kolumnie wody. Przyczyną mogła być również różnica w dostępności pokarmu w wodach przy powierzchniowych w sezonach jesiennym i zimowym. W badaniach, wyniki których są przedstawione w (Szczucka, 2000, 2003) również zaobserwowano, że w nocy w sezonie zimowym, organizmy nie docierają do

górných warstw morza. Pokazano, że warstwa rozpraszająca leży bliżej powierzchni jeśli wyższa jest temperatura kolumny wody.

3. Wykazano, że w sezonie wiosennym nocna warstwa rozpraszająca znajduje się przy dnie. Na tych głębokościach wykazano większe zasolenie (Rys. 3.7). Oznacza to obecność wód, które trafiły na południowy Bałtyk z wlewu z Morza Północnego. Wody te mogą być bogatsze w tlen i mają wyższą temperaturę (Cyberska, 1990; Tomkiewicz i in. 1998; Holste i in. 2009).

Echa od pojedynczych organizmów

We wszystkich sezonach za wyjątkiem sezonu zimowego, odnotowano, że echa od pojedynczych organizmów „wypełniają” kolumnę wody głównie w porze nocnej. Wynika to z porównania Rys. 3.3, Rys. 3.9, Rys. 3.12 (dla pory nocnej) odpowiednio z rysunkami Rys. 3.2, Rys. 3.8, Rys. 3.11 (dla pory dziennej).

Nie zaobserwowano tego w badaniach prowadzonych wcześniejsz (Blaxter i Holliday 1969; Hansson, 1993; Orłowski 1999; Szczucka, 2000; Orłowski 2001; Szczucka 2003; Orłowski, 2004; Szczucka i Schmidt, 2008) ponieważ interesowano się charakterystykami rozpraszania uśrednionymi po dużym interwale czasowym (nie mniej niż godzina) co nie pozwoliło na obserwację pojedynczych obiektów rozpraszających.

3.3.3 Obraz akustyczny w różnych sezonach badawczych a gatunek ryb

W poprzednich podrozdziałach przedyskutowano jako przyczyny sezonowych zmian obrazu akustycznego różnicę warunków hydrofizycznych oraz dostępność pokarmu. Niestety nie posiadamy żadnej informacji na temat presji drapieżników, która jest również istotna dla wyjaśnienia zmienności sezonowej. Natomiast przyczyną różnicy sezonowej może być również różnica gatunków organizmów morskich obecnych na poligonie badawczym w różnych sezonach.

Ponieważ pomiary hydroakustyczne, wyniki których są przedstawione w tym rozdziale oraz w Rozdziałach następnych 4 i 5 prowadzono na częstotliwości 38 kHz, zarejestrowano zostało przede wszystkim echo od ryb (Simmonds i MacLennan, 2005). Jak zostało zaznaczone w podrozdziale 2.5 nie mieliśmy możliwości wykonania bezpośrednich zaciągów pelagicznych podczas badań i dla tego wiedza dotycząca ryb na Zatoce Puckiej została zaczerpnięta z tzw. pośrednich źródeł, opisanych w podrozdziale 2.5.

Niżej przedstawiono przegląd gatunków ryb, które mogły być obecne na poligonie badawczym w różnych okresach sezonowych prowadzonych badań.

Październik 2018

Zaciąg, wykonany w ramach rejsu BIAS w październiku roku 2018 w kwadracie rybackim 37G8, wykazał, że głównym gatunkiem obecnym w tym obszarze był szprot, w mniejszym stopniu śledź (ICES, 2019). Zaobserwowano również obecność dorsza i stroni. Dane zebrane w ramach BIAS w latach 2017 (ICES, 2019) oraz 2019 (ICES, 2021), czyli w latach sąsiednich w stosunku do wybranego do badań roku, wykazują, że dominującym z badanych gatunków były w tym kwadracie rybackim odpowiednio śledź oraz szprot.

Na obecność śledzia w tym sezonie wykazują również publikacji naukowe (Strzyżewska, 1990; Jackowski, 1998; Orłowski, 2001, 2016).

Połowy badawcze prowadzone na stanowiskach Zatoce Puckiej zewnętrznej na głębokościach mniejszych od 20 metrów (wykorzystano sieć wielopanelową) potwierdzają obecność śledzia oraz okonia w tym obszarze w październiku roku 2019.

Ciekawe, że w październiku podczas rejsu badawczego, wyniki którego są przedstawione w rozprawie, osobniki śledzia były znajdowane zaplątane w kablach urządzeń pomiarowych, które były holowane jednocześnie z wykonaniem pomiarów za pomocą echosond typu split-beam. Obecność ryb śledziowatych na tym poligonie potwierdziły również zaciągi wykonane w rejsie statku badawczego r/v Oceanograf w roku 2021 (dr hab. Mariusz Sapota, informacja ustna). Rybacy również potwierdzają obecność ryb śledziowatych w Zatoce Puckiej w miesiącu październiku (www.youtube.com/watch?v=TCEoAGUJKfc).

Luty 2019

W lutym zaobserwowano korzystając z kamery podwodnej zamocowanej na zdalnie sterowanym pojeździe podwodnym (model - Guardian miniROV, firma – Subsea Tech) gęstą warstwę ryb śledziowatych (Rys. 3.13).



Rys. 3.13 Zdjęcie wykonane za pomocą pojazdu Guardian miniROV, 17 lutego 2019 r.

W rejsach BITS skierowanych na badania dorsza i prowadzonych w lutym, również odnotowano obecność ryb śledziowatych na granicy Zatoki Puckiej, gdzie wykonano jedno z trałowañ (MIR, 2019a, 2019b). Rybacy działające na Zatoce Puckiej zewnętrznej, połowy których w tym miesiącu są ukierunkowane głównie na dorsza, obserwują również obecność w Zatoce śledzia.

Kwiecień 2019

Doniesienia z rejsów BASS prowadzonych w maju w latach 2017 – 2019 wykazują, że w miesiącu maju w kwadracie rybackim do którego należy zewnętrzna Zatoka Pucka dominują zdecydowanie szproty. Według doniesień rybaków połowy na szprota rozpoczynają się już w marcu (www.youtube.com/watch?v=TCEoAGUJKfc).

Wiadome jest również, że grupa śledzi wiosennych w okresie kwiecień – maj przychodzi do Zatoki na tarło wiosennie (Strzyżewska, 1990; Jackowski, 1998; ICES, 2004). Uznane jest, że wiosną śledzie jesienne znajdują się na żerowiskach poza Zatoką Pucką (Strzyżewska, 1990).

W doniesieniach w ramach programu Zatoka Pucka/19, wykazano obecność śledzia i okonia w małej ilości w marcu i maju 2020 i istotną obecność śledzia w połowach w marcu roku 2021 (<https://zatokapucka.mir.gdynia.pl/informacje/>).

Lipiec 2019

W lipcu natomiast, w badaniach, wyniki których zaprezentowano w publikacji (Strzyżewska, 1990), w tym obszarze nie zaobserwowano ryb śledziowatych. Autorka uważa, że w tym sezonie śledzie znajdują się na żerowiskach na głębszych wodach Zatoki Gdańskiej.

W badaniach prowadzonych w ramach projektu Zatoka Pucka/19, wykazano obecność ławic okonia i śledzia (<https://zatokapucka.mir.gdynia.pl/informacje/>).

Rybacy, natomiast w tym miesiącu łowią okonia, a w zależności od pogody pod koniec lata na wczesną jesień rozpoczyna się polowanie na śledzia (<https://www.youtube.com/watch?v=TCEoAGUJKfc>).

Należy zauważyć, że we wszystkich sezonach badawczych lat 2019 – 2021 połowy sieciami wielopanelowymi wykazały obecność stroni w zewnętrznej Zatoki Puckiej, liczebność której zależy od sezonu badawczego i osiąga największe wartości w miesiącu lipcu (<https://zatokapucka.mir.gdynia.pl/informacje/>).

W rejonie poligonu badawczego oprócz wymienionego wyżej śledzia, szprota, dorsza i okonia mogą być zaobserwowane również inne typowe dla Zatoki Gdańskiej i Południowego Bałtyku gatunki, np. węgorzyca, tobiasz, stornia, skarp, węgorz i inni (np., Skóra, 1993; Gic-Grusza i in., 2009). W badaniach prowadzonych w ramach projektu Zatoka Pucka/19 wykazano obecność w Zatoce Puckiej 28 gatunków ryb.

3.4 Podsumowanie

Podsumowując dyskusję przedstawioną w poprzednim podrozdziale można stwierdzić, że obrazy akustyczne dla godzin nocnych i dziennych dla różnych sezonów istotnie się różniły, co mogło być związane między innymi z różnicą (i) warunków hydrofizycznych, (ii) dostępności pokarmu (iii) presji drapeżników oraz (iv) gatunków czy grup wiekowych bytujących ryb.

Określono również cechy wspólne i różnice obrazów akustycznych dla Zatoki Puckiej oraz głębokowodnej części Zatoki Gdańskiej i Głębi Gdańskiej.

Możemy przedstawić następujące wnioski:

Wnioski dotyczące rozkładów przestrzennych siły objętościowego rozpraszania wstecznego w porze dziennej:

1. Podobnie jak na Głębi Gdańskiej zaobserwowano obecność ławic akustycznych w dzień we wszystkich sezonach badawczych za wyjątkiem zimowego. Jeśli w głębokowodnej części Zatoki Gdańskiej (w październiku) oraz na Głębi Gdańskiej (we wszystkich sezonach) położenie ławic w toni wodnej w dzień definiowała pozycja halokliny, to w zewnętrznej Zatoce Puckiej istotnym czynnikiem hydrofizycznym może być głębokość do której sięga strefa eufotyczna. W sezonie zaś wiosennym ławice akustyczne zaobserwowano również w strefie przydennej o większym zasoleniu, co może być związane z obecnością wód z wlewów z Morza Północnego i związanych z nią lepszych warunków bytowania pod względem temperatury, zasolenia i natlenienia.
2. W sezonie zimowym zaś zaobserwowano w dzień warstwę rozpraszającą w pobliżu dna. Wykazuje to różnicę z Głębią Gdańską, gdzie warstwa rozpraszająca była również obserwowana w tym sezonie, ale jej pozycję wyznaczała haloklina.
3. W sezonie letnim w dzień zaobserwowano warstwę rozpraszającą na termoklinie, co również było obserwowano i na wodach głębokich południowego Bałtyku.

Wnioski dotyczące rozkładów przestrzennych siły objętościowego rozpraszania wstecznego w porze nocnej:

1. W odróżnieniu od badań prowadzonych w przeszłości, które nie zajmowały się rozpraszaniem pojedynczych organizmów, wykazano, że we wszystkich sezonach za wyjątkiem sezonu zimowego echa od pojedynczych organizmów „wypełniają” kolumnę wody głównie w porze nocnej.
2. Wykazano istnienie warstw rozpraszających we wszystkich sezonach w godzinach nocnych. Wykazana różnica w głębokości występowania warstw rozpraszających dla różnych sezonów. Ta różnica może być związana z różnicą średniej temperatury w toni wodnej o różnych porach roku, różnicą w dostępności pokarmu w warstwach przy powierzchniowych oraz różnicą bytujących gatunków ryb. Wpływ może mieć również obecność wód natlenionych z wlewów z Morza Północnego (sezon wiosenny) oraz obecność termokliny (sezon letni). W okresie letnim zaobserwowano warstwę rozpraszającą na termoklinie, podobnie do tego co było obserwowano latem w nocy na Głębi Gdańskiej. W sezonie jesiennym w nocy rozkład przestrzenny siły objętościowego rozpraszania wstecznego sięgał płytszych wód w porównaniu z sezonem zimowym. W sezonie zaś wiosennym warstwa rozpraszająca znajdowała się

przy dnie gdzie były obecne wody o większym zasoleniu. Głębokości na których zaobserwowano te warstwy rozpraszające różniły się od tego co było obserwowane w nocy w odpowiednich sezonach w głębokowodnej części Zatoki Gdańskiej (dla października) oraz na Głębi Gdanskiej (dla wszystkich sezonów).

4. Parametryzacja obrazów akustycznych - zmiany dobowe i sezonowe rozkładów przestrzennych siły objętościowego rozpraszania wstecznego

W tym rozdziale, dotyczącym realizacji Celu szczegółowego 1, zajmiemy się:

1. Głębszym rozpoznaniem różnic akustycznych obrazów przestrzennych w różnych sezonach dla dnia i nocy. Głównym celem jest tu określenie parametrów obrazów akustycznych dla godzin dziennych i nocnych przedstawionych w poprzednim rozdziale oraz ich dynamiki sezonowej. Porównamy wyniki badań z wynikami badań hydroakustycznych prowadzonych w przeszłości na głębokowodnych obszarach Południowego Bałtyku.
2. Określeniem parametrów morfometrycznych i energetycznych dla ławic akustycznych, obserwowanych w porze dziennej dla trzech sezonów badawczych: jesiennego, wiosennego i letniego. Badania prowadzone w przeszłości w obszarach głębokowodnych południowego Bałtyku, nie zajmowały się określeniem charakterystycznych cech ławic akustycznych.

Analizowane są tu parametry wprowadzone podczas badań na głębokowodnej części Zatoki Gdańskiej, na Głębi Gdańskiej i na morzu otwartym na Bałtyku południowym (Szczucka, 2000; Orłowski, 2001; Szczucka, 2003; Orłowski, 2004; Orłowski i Kujawa, 2005; Szczucka i Schmidt, 2008). W odróżnieniu od badań z przeszłości, zainteresowano się również zmianami czasowymi o mniejszej skali, bez uśredniania parametrów po dużych okresach czasowych, jak było to robione w przeszłości, aby nie zgubić istotnych informacji dla tej pracy.

Opisano zmiany dobowe i sezonowe akustycznych obrazów przestrzennych korzystając z takich parametrów jak: środek ciężkości, unormowany moment bezwładności poszczególnych impulsów echa oraz scałkowana po głębokości siła objętościowego rozpraszania wstecznego impulsu echa.

Metodykę (i) zbierania danych hydroakustycznych na obszarze badawczym, które wykorzystano w tym rozdziale, oraz (ii) ich analizy wstępnej, przedstawiono w Rozdziale 2 rozprawy. Wzory na wymienione wyżej parametry są przedstawione w podrozdziale 4.1.

W podrozdziale 4.2 przedstawiono wyniki obliczeń parametrów dla pełnych zarejestrowanych obrazów akustycznych oraz ich interpretację. Wyniki porównano z wynikami otrzymanymi w badaniach prowadzonych w innych rejonach Bałtyku Południowego w szczególności Zatoki Gdańskiej i Głębi Gdańskiej, oraz innych mórz (m. in.: Blaxter i Holliday, 1969; Hansson, 1993; Klusek i in., 1994; Fréon i in., 1996; Szczucka i Klusek, 1996; Orłowski 2001; Tęgowski i in., 2003). Każdy z podrozdziałów podrozdziału 4.2 składa się z dwóch części, pierwsza z nich dotyczy wyników badań, natomiast druga dyskusji nad tymi wynikami. Podrozdział 4.3 jest poświęcony analizie parametrycznej ławic akustycznych. Podrozdział 4.4 zawiera podsumowanie wyników badań.

4.1 Metodyka - analiza danych

4.1.1 Analiza parametryczna całkowitego obrazu akustycznego zarejestrowanego przez echosondę

W celu przeprowadzenia analizy parametrycznej całkowitego przestrzennego obrazu akustycznego, zarejestrowanego przez echosondę, wyniki której są przedstawione w podrozdziale 4.2, za pomocą oprogramowania Sonar5-Pro wyeksportowano pliki tekstowe, zawierające dane dotyczące rozkładów pionowych siły objętościowego rozpraszania wstecznego. Korzystając z tych danych obliczono szereg parametrów opisujących te rozkłady.

Pierwszym takim parametrem jest głębokość środka ciężkości z_{cog} (Szczucka, 2003). Jest on opisywany za pomocą równania:

$$z_{cog} = \frac{\sum_{i=1}^N 10^{SV_i/10} z_i}{\sum_{i=1}^N 10^{SV_i/10}} \quad (4.1)$$

gdzie:

z_{cog} – głębokość centrum środka ciężkości dla pojedynczego pingu [m]

N – liczba próbek w jednej transmisji (pojedynczy ping)

z_i – głębokość odpowiadająca i -tej próbce w pingu [m]

SV_i – siła objętościowego rozpraszania wstecznego odpowiadająca i -tej próbce w pingu [dB]

Parametr ten demonstruje na jakiej głębokości skoncentrowana jest rozproszona energia akustyczna dla poszczególnych impulsów echa, czyli na jakiej głębokości gromadzi się przeważająca część celów rozpraszających.

Kolejnym parametrem jest unormowany moment bezwładności, wprowadzony w pracach Szczuckiej i Kluska (1996) oraz Szczuckiej (2003). Można jego opisać za pomocą następującego równania:

$$InCen = \frac{\sum_{i=1}^N 10^{SV_i/10} (z_i - z_{cog})^2}{\sum_{i=1}^N 10^{SV_i/10}} \quad (4.2)$$

gdzie:

InCen - Unormowany moment bezwładności siły objętościowego rozpraszania wstecznego

Pozostałe symbole są jak we wzorze (4.1)

Parametr ten wykorzystywany jest do oceny stopnia rozproszenia organizmów w toni wodnej. Kiedy organizmy są skupione w wąskiej poziomej warstwie, wartość unormowanego momentu bezwładności jest niska osiągając wartości bliskie jeden. Natomiast kiedy obiekty są rozproszone w kolumnie wody, wartość momentu bezwładności sięga wartości większych nawet o kilka rzędów wielkości.

Unormowany moment bezwładności wraz z głębokością środka ciężkości, dają nam informacje na jakiej głębokości gromadzą się organizmy oraz jak mocno są one rozproszone.

Dla poszczególnych impulsów została policzona również scałkowana po głębokości siła objętościowego rozpraszania wstecznego:

$$SV_S = 10 \log_{10} \left(\sum_{i=1}^N 10^{SV_i/10} \right) \quad (4.3)$$

gdzie:

SV_S – scałkowana w kolumnie wody siła objętościowego rozpraszania wstecznego [dB]

Pozostałe symbole są jak we wzorze (4.1).

4.1.2 Analiza parametryczna ławic akustycznych

W celu przeprowadzenia analizy parametrycznej ławic akustycznych, wyniki której są przedstawione w podrozdziale 4.3, za pomocą oprogramowania Sonar5-Pro wyeksportowano pliki tekstowe, zawierające dane dotyczące rozkładów pionowych siły objętościowego rozpraszania wstecznego w tych ławicach. Dla sezonów letniego zimowego i wiosennego wybrano na poligonie badawczym losowo 30 ławic znajdujących się w toni wodnej nie mniej niż 5 metrów nad dnem morza. Korzystając z tych danych dla każdego impulsu z ławic

obliczono głębokość środka ciężkości (wzór 4.1), unormowany moment bezwładności siły objętościowego rozpraszania wstecznego (wzór 4.2) oraz scałkowaną w kolumnie wody siła objętościowego rozpraszania wstecznego (wzór 4.3). Obliczenia były prowadzone w zakresie głębokości ławic. Następnie wyniki te uśredniono dla każdej z ławic. Przy uśrednianiu scałkowanej po głębokości siły objętościowego rozpraszania, najpierw wyniki przeliczona na skale liniową, uśredniono, i z powrotem przeliczono na skale logarytmiczną.

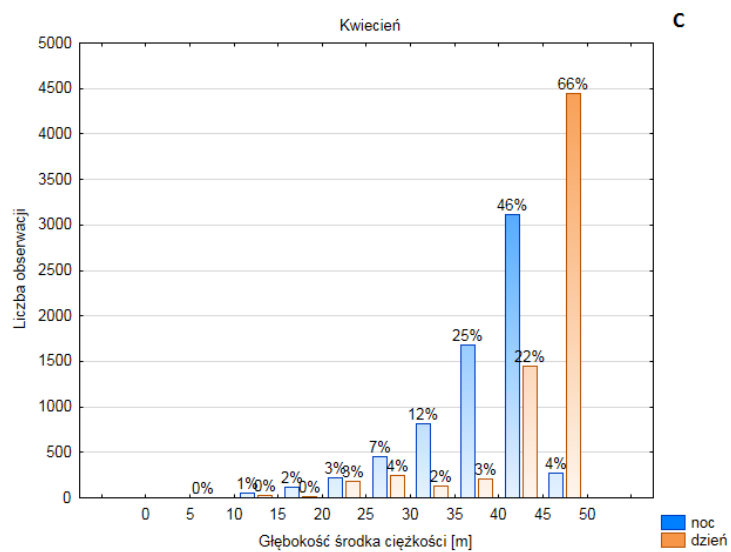
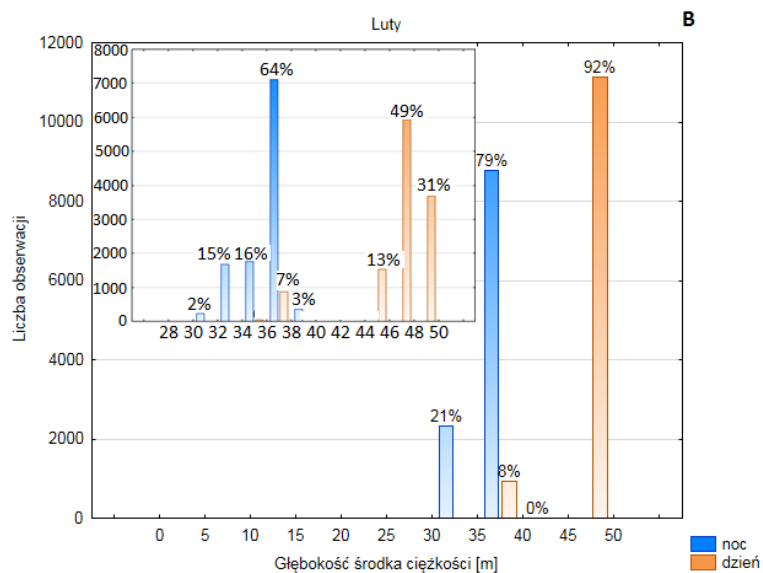
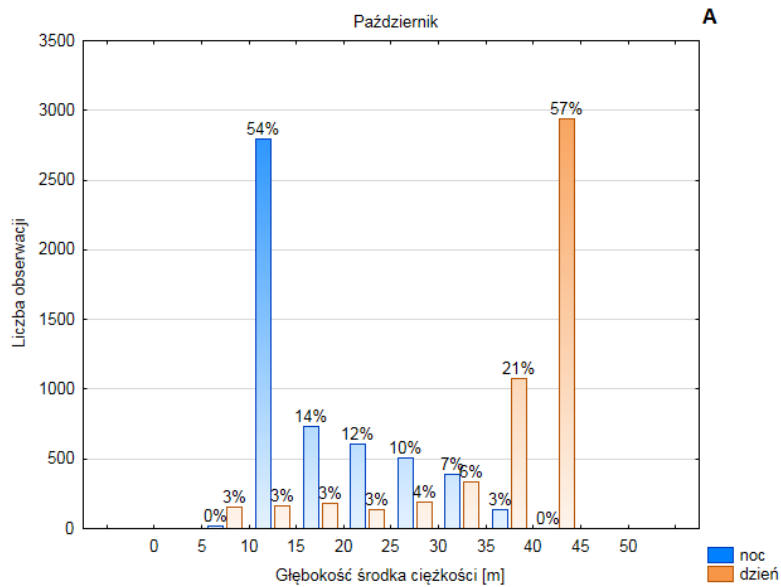
4.2 Analiza parametryczna echogramów. Wyniki i Dyskusja

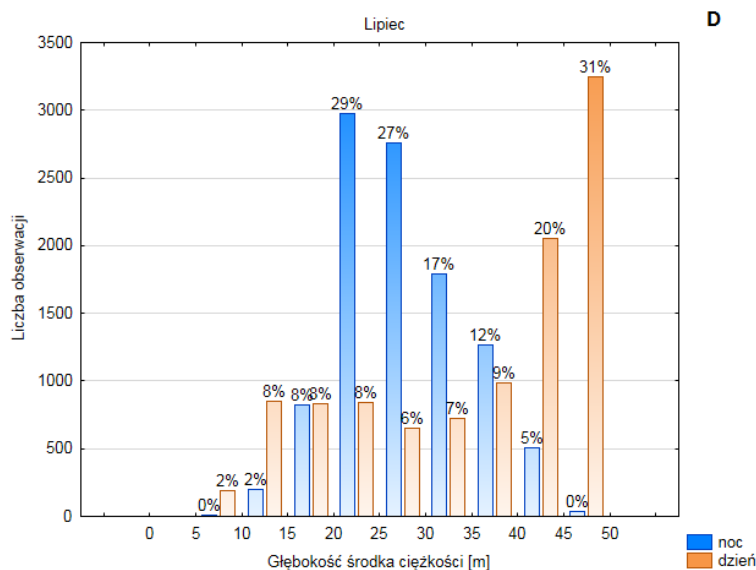
Ten rozdział jest poświęcony analizie parametrycznej przestrzennego rozkładu siły objętościowego rozpraszania wstecznego. W odróżnieniu od podrozdziału 4.3, gdzie analiza wykonana jest wyłącznie dla ławic akustycznych, tu analizowany jest cały zarejestrowany obraz akustyczny.

4.2.1 Rozkład przestrzenny siły objętościowego rozpraszania wstecznego - głębokość środka ciężkości

Wyniki

Na Rys. 4.1 przedstawione zostały histogramy dla głębokości środka ciężkości rozkładu przestrzennego siły objętościowego rozpraszania wstecznego w okresie dziennym (kolor pomarańczowy) i nocnym (kolor niebieski). Rysunki A, B, C i D dotyczą odpowiednio sezonów jesiennego, zimowego, wiosennego oraz letniego. Rysunki te zostały opracowane na podstawie tych samych danych co i echogramy przedstawione odpowiednio na Rys. 3.2 (dzień) i Rys. 3.3 (noc) dla sezonu jesiennego, Rys. 3.5 (dzień) i Rys. 3.6 (noc) dla zimowego okresu, Rys. 3.8 (dzień) i Rys. 3.9 (noc) dla okresu wiosennego oraz Rys. 3.11 (dzień) i Rys. 3.12 (noc) dla sezonu letniego. Zakres zmian głębokości środka ciężkości podzielono na 10 klas w przedziałach o wymiarze 5 m. Dodatkowo wykonano histogram dla lutego (Rys. 4.1B) dzieląc wyniki na 11 klas w przedziałach o wymiarze 2 m, w celu pokazania różnic które nie są widoczne przy zastosowaniu pierwszego podziału na klasy. Liczba próbek w zależności od sezonu wynosiła od około 5000 (październik) do około 12000 (luty). Pokazano, że przedstawione histogramy są reprezentatywne dla całego badanego obszaru.





Rys. 4.1 Głębokość środka ciężkości – zmienność dobowa i sezonowa

Na podstawie analizy Rys. 4.1 opracowano Tabelę 4.1 gdzie dla różnych pór doby dla każdego sezonu przedstawiono zakresy głębokości dla środka ciężkości dla ok. 80% sygnałów echa (kolumny druga i trzecia).

Tab. 4.1 Porównanie rozkładów przestrzennych siły rozpraszania wstecznego w dzień i w nocy dla różnych sezonów

| Sezon pomiarowy | Zakres głębokości środka ciężkości dla ok. 80% impulsów echa [m] | | Średnia głębokość środka ciężkości [m] | | Różnica średnich głębokości [m] |
|-----------------|--|---------|--|------|---------------------------------|
| | dzień | noc | dzień | noc | |
| jesień | 35 – 45 | 10 – 25 | 38,9 | 15,9 | 23,0 |
| zima | 44 – 50 | 34 – 38 | 46,7 | 36,0 | 10,7 |
| wiosna | 40 – 50 | 30 – 45 | 44,3 | 38,0 | 6,3 |
| lato | 25 – 50 | 20 – 40 | 35,6 | 27,9 | 7,7 |

Rys. 4.1A pokazuje, że w okresie jesiennym w dzień dla ok. 80% sygnałów echa środek ciężkości znajduje się w zakresie od 35 do 45 metrów (Tabela 4.1, kolumna druga), tym czasem w nocy - od 10 metrów do 20 metrów (Tabela 4.1, kolumna trzecia).

Dla okresu zimowego (Rys. 4.1B) te obszary znajdują się głębiej odpowiednio w zakresach głębokości: 44 - 50 metrów (Tabela 4.1, kolumna druga, dzień) oraz 34 - 38 metrów (Tabela 4.1, kolumna trzecia, noc).

Należy zauważyć, że te liczby adekwatnie opisują sytuację przedstawioną odpowiednio dla jesieni i zimy na echogramach Rys. 3.2 (dzień) i Rys. 3.3 (noc) dla sezonu jesiennego oraz Rys. 3.5 (dzień) i Rys. 3.6 (noc) dla zimowego okresu, co jest związane ze względnie prostym charakterem rozkładu przestrzennego siły objętościowego rozpraszania wstecznego (rozmięszczenia przestrzennego organizmów) w tych dwóch sezonach.

W kwietniu zaś (Rys. 4.1C) wyżej wymienione zakresy wynoszą: dla dnia: od 40 do 50 metrów, tym czasem dla nocy: od 30 do 45 metrów (odpowiednio kolumny 2 i 3 w Tabeli 4.1). W odróżnieniu od sezonu jesiennego i zimowego te liczby odzwierciedlają ogólny charakter dobowych migracji pionowych ku górze o zachodzie słońca oraz adekwatnie pokazują względnie prosty charakter rozkładu przestrzennego siły objętościowego rozpraszania wstecznego w nocy (warstwa przydenna w nocy na echogramie na Rys. 3.9), natomiast nie opisują one w sposób transparentny skomplikowanego charakteru rozkładu przestrzennego siły objętościowego rozpraszania wstecznego (rozmięszczenia przestrzennego organizmów) w dzień (Rys. 3.8).

W sezonie letnim (Rys. 4.1D) głębokość środka ciężkości rozkładu przestrzennego siły objętościowego rozpraszania wstecznego zmienia się od 25 do 50 metrów oraz od 20 do 40 metrów dla ok. 80% sygnałów echa odpowiednio dla dnia i nocy (kolumny 2 i 3 Tabela 4.1). Liczby te w adekwatny sposób wykazują kierunek dobowych migracji pionowych organizmów. Histogram również odzwierciedla adekwatnie rozkład przestrzenny siły objętościowego rozpraszania wstecznego (rozkład przestrzenny organizmów) w nocy, np. gromadzenie się organizmów na termoklinie, czyli na głębokościach 25 m – 32 m (Rys. 4.1D) – ok. 44 % impulsów echa posiada środek ciężkości należący dla tego zakresu. Jak i dla sezonu wiosennego histogram nie odzwierciedla w sposób transparentny skomplikowanego obrazu rozkładu przestrzennego w dzień (Rys. 3.11).

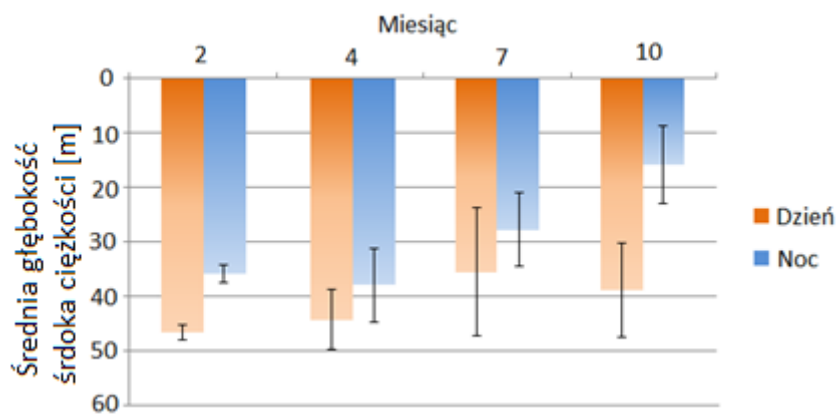
Dyskusja

Analiza wyników z Rys. 4.1 oraz Tabeli 4.1 pokazała, że zakresy zmian głębokości środka ciężkości różnią się w zależności od pory dnia oraz sezonu.

Porównanie histogramów przedstawionych na Rys. 4.1 i opisanych w Tabeli 4.1 pozwala na wniosek, że głębokość środka ciężkości rozkładu przestrzennego siły objętościowego rozpraszania wstecznego (parametr wprowadzony podczas badań prowadzonych w przeszłości na głębszych obszarach (Orłowski, 2000; Klusek i in., 2003;

Szczucka, 2003)) dobrze charakteryzuje wyłącznie rozkłady przestrzenne o prostej postaci. Dla niniejszych badań parametr ten adekwatnie odzwierciedla rozmieszczenie przestrzenne organizmów dla sezonu jesiennego i zimowego dla całej doby oraz dla sezonów wiosennego i letniego dla godzin wyłącznie nocnych.

Sezonowe zmiany średniej głębokości środka ciężkości rozkładu przestrzennego siły objętościowego rozpraszania wstecznego (wraz z odchyleniami standardowymi – „wąsy”) są przedstawione na Rys. 4.2. Oś pionowa przedstawia średnią głębokość środka ciężkości, oś pozioma - numer miesiąca w roku. Dzień i noc odpowiednio są oznaczone kolorami pomarańczowym i niebieskim.



Rys. 4.2 Średnia głębokość środka ciężkości rozkładu przestrzennego siły objętościowego rozpraszania wstecznego dla dnia (pomarańczowy) oraz nocy (niebieski) dla analizowanych miesięcy.

Można zauważyć (Rys. 4.2), że tylko w miesiącach luty i październik różnice **średnich** głębokości środka ciężkości między dniem i nocą są wyraźne i osiągają większych wartości niż w pozostałych miesiącach. Szczucka (2003) na Głębi Gdańskiej również obserwowała największe różnice tego parametru między dniem a nocą w miesiącach jesiennych, jednak w miesiącach zimowych różnice te nie były już tak duże.

W lutym zaobserwowano też najmniejsze odchylenia standardowe, co wynika bezpośrednio z jednorodnego charakteru obserwowanych wtedy warstw rozpraszających (Rys. 4.2). Podobny dobowy charakter zmian głębokości środka ciężkości rozkładu przestrzennego siły objętościowego rozpraszania wstecznego, czyli większe jego zagłębienie w godzinach dziennych w sezonie jesiennym, został wykazany również w pracach Orłowskiego (2001) i Szczuckiej (2003). Ze względu na większe głębokości obszarów badawczych i obecność halokliny, na której organizmy gromadziły się w nocy, zmiana pozycji środka ciężkości w październiku wynosiła w badaniach Orłowskiego (2001): od 30 m w dzień do ok. 55 m

w nocy. Zatem różnica tych głębokości wynosiła ok. 25 m, czyli była porównywalna z 23 metrową zmianą średniej głębokości środka ciężkości w październiku na badanym poligonie.

W pracy (Szcucka, 2003) pokazano, że zarówno średnia pozycja środka ciężkości w godzinach dziennych i nocnych oraz ich różnica zależą od sezonu badawczego. Różnica ta wynosiła od ok. kilka metrów (dla pomiarów we wrześniu 1991, październiku 1993, lutym 1995 oraz wrześniu 1998) do maksymalnie 40 metrów (listopad 1997). Szcucka (2003) wykazała, że zarówno średnia pozycja środka ciężkości w godzinach dziennych i nocnych oraz ich różnica mogą istotnie się różnić dla tego samego sezonu w różnych latach. Na to mogła mieć wpływ pogoda w okresie poprzedzającym pomiary. Definiowała ona pionowy rozkład temperatury wody, który z kolei określa rozkład przestrzenny organizmów i jego zmiany dobowe, jak zostało to pokazano w podrozdziale 3.3.

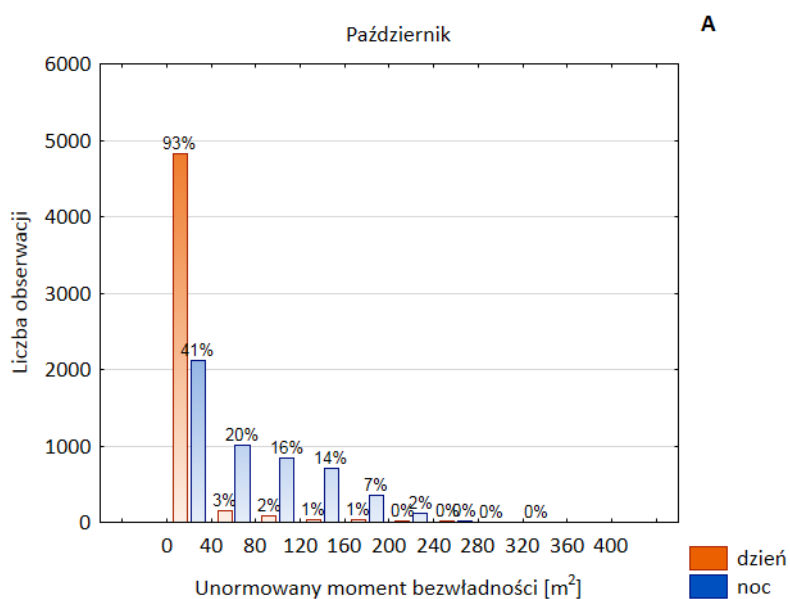
Badania przeprowadzone w czerwcu 2009 roku na Bałtyku Południowym (Schmidt i Szcucka, 2010) pokazały, że głębokość środka ciężkości średnio zmieniła się z 20 m w godzinach nocnych na 40 m w dzień (średnie wartości dla 6 dni w okresie od 16 do 22 czerwca) przy 80 metrowej głębokości w miejscu pomiarów. W pomiarach zaprezentowanych w niniejszej pracy różnica między dniem (28 m) a nocą (36 m) była mniejsza, ale również głębokość akwenu była mniejsza o ponad 30 m, co mogło być przyczyną mniejszej różnicy w porównaniu do głębszych rejonów Morza Bałtyckiego.

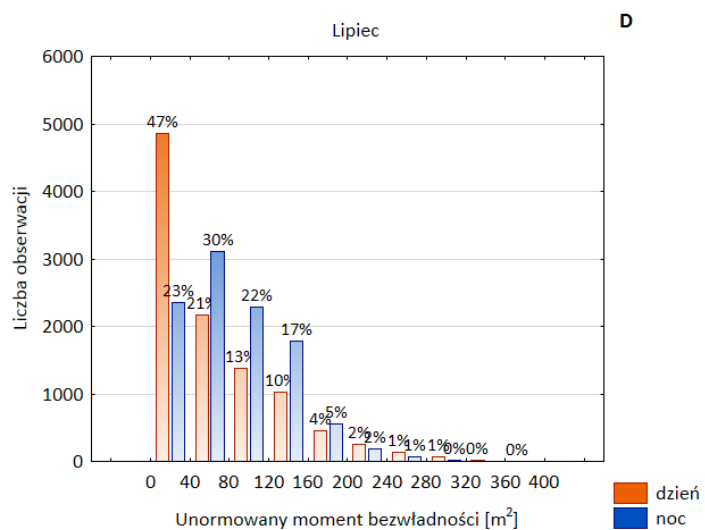
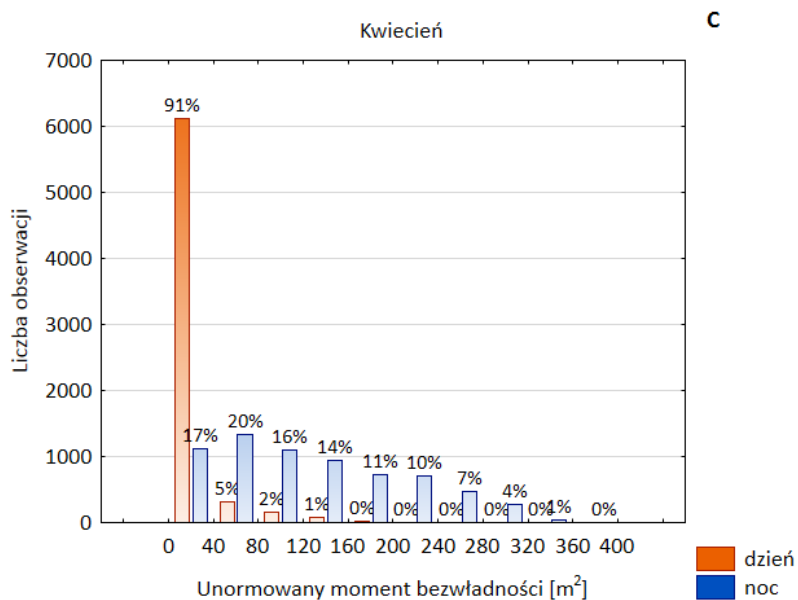
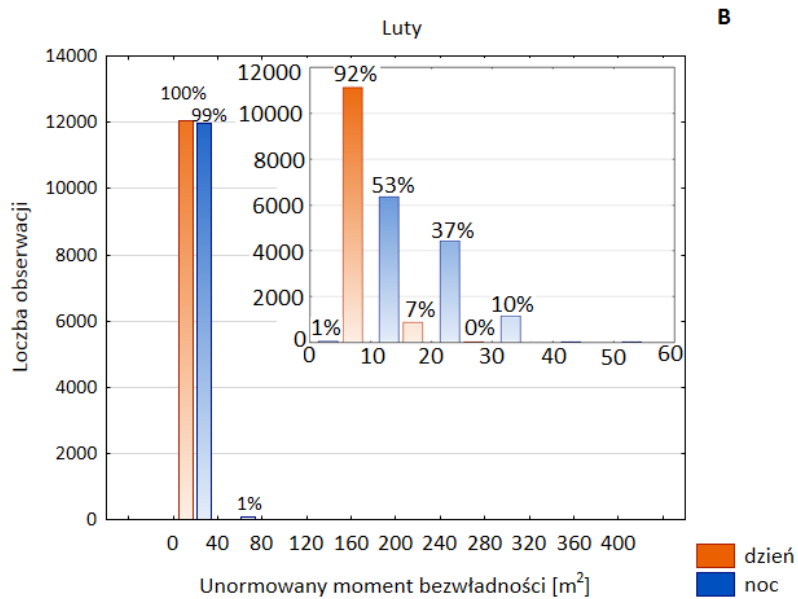
4.2.2 Rozkład przestrzenny siły objętościowego rozpraszania wstecznego - unormowany moment bezwładności

Wyniki

Na Rys. 4.3 A, B, C i D przedstawiono histogramy dla unormowanego momentu bezwładności dla dnia (kolor pomarańczowy) i nocy (kolor niebieski) odpowiednio dla sezonów jesiennego, zimowego, wiosennego i letniego. Parametr ten zawiera informację o pionowym rozrzucie energii impulsu echa wokół jego środka ciężkości. Im większa jest wartość unormowanego momentu bezwładności tym większy jest rozrzut (Szcucka, 2003). Histogramy zostały wygenerowane na podstawie danych wykorzystanych również dla opracowania echogramów przedstawionych na Rys. 3.2 (dzień) i Rys. 3.3 (noc) dla sezonu jesiennego, Rys. 3.5 (dzień) i Rys. 3.6 (noc) dla zimowego okresu, Rys. 3.8 (dzień) i Rys. 3.9 (noc) dla okresu wiosennego oraz Rys. 3.11 (dzień) i Rys. 3.12 (noc) dla sezonu letniego. Wykorzystano wzór (4.2), przedstawiony w podrozdziale 4.1. Wyniki obliczeń dla

unormowanego momentu bezwładności podzielono na 10 klas w przedziałach o szerokości 40 m². Dodatkowo wykonano histogram dla lutego (Rys. 4.3B) dzieląc zbiór danych dla unormowanego momentu bezwładności na 6 klas w przedziałach o szerokości 10 m², w celu pokazania różnic, które nie są widoczne przy zastosowaniu pierwotnego podziału na klasy. W zależności od sezonu liczba próbek wynosiła od około 5000 (październik) do około 12000 (luty). Histogramy są reprezentatywne dla całego badanego obszaru.





Rys. 4.3 Unormowany moment bezwładności- zmienność sezonowa i dobowa

Rys. 4.3A przedstawia histogram dla unormowanego momentu bezwładności dla października. Wykazano, że w ciągu dnia ponad 90% wyników mieści się w przedziale wartości unormowanego momentu bezwładności między 0 m^2 a 40 m^2 , natomiast w nocy liczba wyników w tym przedziale wynosiła tylko około 40%. Dla nocy udział wartości w przedziałach: od 40 m^2 do 80 m^2 ; od 80 m^2 do 120 m^2 ; od 120 m^2 do 160 m^2 , wzrasta odpowiednio do 20%; 16%; 14%. Pokazuje to, że w nocy pionowy rozrzut rozkładu przestrzennego siły objętościowego rozpraszania wstecznego wokół środka ciężkości był większy niż w dzień.

Rys. 4.3B zaprezentowano histogram dla unormowanego momentu bezwładności w sezonie zimowym. Różnica między dniem i nocą wydaje się mniejsza niż w pozostałych sezonach: zarówno dla dnia i dla nocy około 100% przypadków mieściło się w zakresie wartości $0 \text{ m}^2 - 40 \text{ m}^2$. Aby przejrzeć się temu dokładniej na wykresie w zakresie od 0 m^2 do 60 m^2 przedstawiono jeszcze jeden histogram z podziałem na mniejsze klasy wartości unormowanego momentu bezwładności. Te wykresy pokazują, że jeśli dla dnia 100% wyników mieści się w przedziale $0 \text{ m}^2 - 40 \text{ m}^2$, to 92% z nich - w przedziale $0 \text{ m}^2 - 10 \text{ m}^2$. Natomiast dla nocy 99% wyników mieści się w przedziale $0 \text{ m}^2 - 40 \text{ m}^2$, jednak tylko 1% w przedziale $0 \text{ m}^2 - 10 \text{ m}^2$. Dla nocy 53%; 37%; 10% wyników należało odpowiednio do zakresów: od 10 m^2 do 20 m^2 ; od 20 m^2 do 30 m^2 oraz od 30 m^2 do 40 m^2 . Jak i dla sezonu jesiennego można stwierdzić, że w godzinach nocnych rozrzut rozkładu przestrzennego siły objętościowego rozpraszania wstecznego wokół głębokości środka ciężkości jest większy niż w dziennych.

Histogram dla unormowanego momentu bezwładności zaprezentowany na Rys. 4.3C jest podobny do przedstawionego na Rys. 4.3A. Podobnie jak jesienią, wiosną dla ponad 90% impulsów echa dla dnia mieści się w przedziale wartości unormowanego momentu bezwładności: $0 \text{ m}^2 - 40 \text{ m}^2$. W nocy zaś około 90% wyników było prawie równomiernie rozłożone w przedziale między 0 m^2 a 240 m^2 . Pokazuje to, że wiosną, podobnie jak i w dwóch poprzednich sezonach, w nocy rozrzut rozkładu przestrzennego siły objętościowego rozpraszania wstecznego wokół głębokości środka ciężkości jest większy niż w dzień.

Latem dla dnia histogram dla unormowanego momentu bezwładności (Rys. 4.3D) różni się od pozostałych sezonów. Dla jesieni, zimy i wiosny ponad 90% przypadków należy do przedziału od 0 m^2 do 40 m^2 , natomiast latem - tylko 50% przypadków, tym czasem 90% - znajduje się w przedziale od 0 m^2 do 160 m^2 . W nocy sytuacja wyglądała podobnie 90% przypadków znajdowało się w tym samym przedziale co w ciągu dnia, z tą różnicą, że

maksimum (30%) było w przedziale 40 m² do 80 m². Przesunięcie maksimum w nocy może być spowodowane rozproszeniem skupisk, które znajdowały się poniżej termokliny w ciągu dnia (Rys. 3.11).

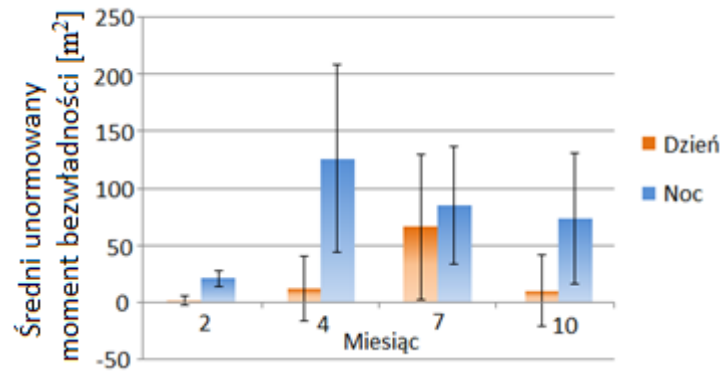
Dyskusja

Porównując dla różnych sezonów histogramy dla unormowanego momentu bezwładności (Rys. 4.3) możemy stwierdzić, że:

1. Dla wszystkich sezonów, z wyjątkiem sezonu letniego, w godzinach dziennych dla ponad 90% impulsów echa unormowany moment bezwładności znajduje się w zakresie mniejszych wartości od 0 m² do 40 m², odpowiadających mniejszemu rozrzutowi rozkładu przestrzennego siły objętościowego rozpraszania wstecznego wokół głębokości środka ciężkości.
2. W nocy zaś dla wszystkich sezonów z wyjątkiem sezonu zimowego procentowy udział w tym przedziale się zmniejszał: od 90 % w dzień do odpowiednio 41 % i 17 % w sezonach jesiennym i wiosennym oraz z 47% w dzień do 23 % w sezonie letnim. Wzrastał udział w zakresach o większych wartościach unormowanego momentu bezwładności i wzrastała szerokość histogramów. W sezonie zimowym zaś 90 % wyników znajdowało się w przedziale od 0 m² do 10 m² dla dnia i 90 % wyników w przedziałach od 10 m² do 30 m² w nocy. Czyli dla wszystkich sezonów unormowany moment bezwładności dla rozkładu przestrzennego siły objętościowego rozpraszania wstecznego w godzinach dziennych przyjmuje mniejsze wartości i ma miejsce mniejszy rozrzut energii impulsu echa wokół głębokości środka ciężkości. Unormowany moment bezwładności dla rozkładu przestrzennego siły objętościowego rozpraszania wstecznego charakteryzuje się w dzień mniejszym rozrzutem wartości w porównaniu z nocą.

Zmienność sezonowa średniej wartości unormowanego momentu bezwładności impulsu echa (wraz z SD) jest przedstawiona na Rys. 4.4, Oś pionowa przedstawia uśredniony unormowany moment bezwładności, oś pozioma - numery miesiąca w roku. Dzień i noc odpowiednio oznaczone kolorami pomarańczowym i niebieskim. Dla każdego miesiąca w nocy uśredniony unormowany moment bezwładności był większy niż w dzień, co pokazuje, że w nocy rozkład przestrzenny siły objętościowego rozpraszania wstecznego charakteryzuje się większym rozproszeniem w nocy (organizmy są bardziej rozproszone po głębokości w toni

wodnej). Największą dobową różnicę wartości uśrednionych zaobserwowano w kwietniu, a najmniejsza w - lipcu. W lutym zaobserwowane są najmniejsze średnie wartości unormowanego momentu bezwładności zarówno w dzień jak i w nocy, w porównaniu do pozostałych miesięcy.



Rys. 4.4 Uśredniony moment bezwładności dla godzin dziennych (pomarańczowy) i nocnych (niebieski) dla analizowanych miesięcy.

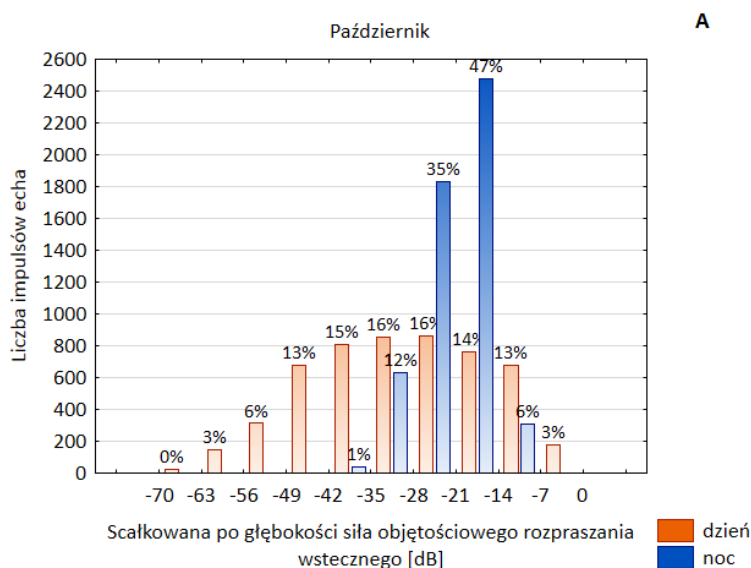
Unormowany moment bezwładności znajdował się w obszarze zainteresowania w monografii (Szcucka, 2003) oraz w publikacjach (Klusek i in., 1994; Szcucka i Klusek, 1996; Tęgowski i in., 2003). W odróżnieniu od wyniku dotyczącego mniejszych wartości unormowanego momentu bezwładności w porze dziennej dla wszystkich sezonów, dla 16 serii pomiarowych w głębokowodnej części Zatoki Gdańskiej (Szcucka, 2003) tylko w trzech seriach stosunek jest podobny, natomiast w pozostałych seriach – odwrotny, czyli unormowany moment bezwładności ma wyższą wartość w dzień niż w nocy. Różnica jest związana ze specyfiką rozkładów przestrzennych organizmów, związanej między innymi ze specyficznymi warunkami hydrofizycznymi w Zatoce Puckiej.

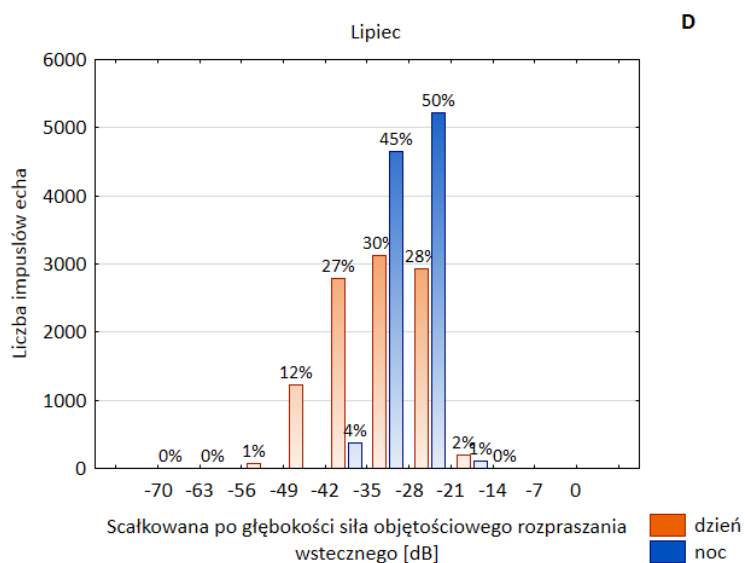
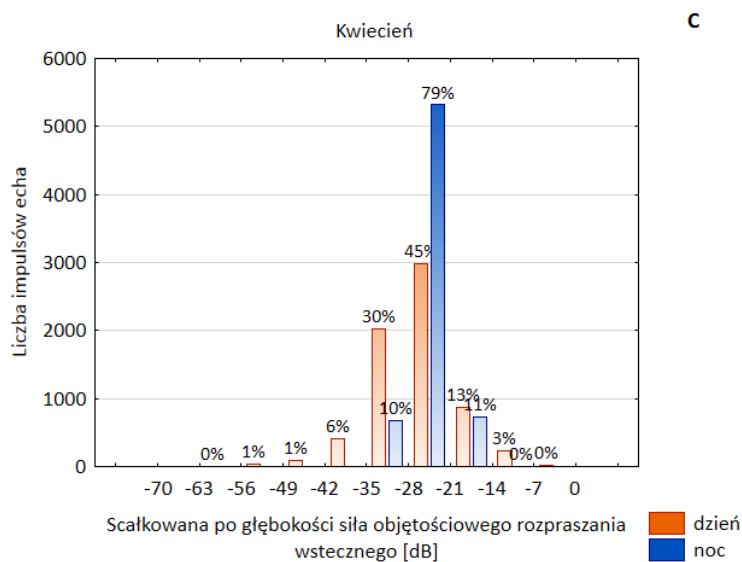
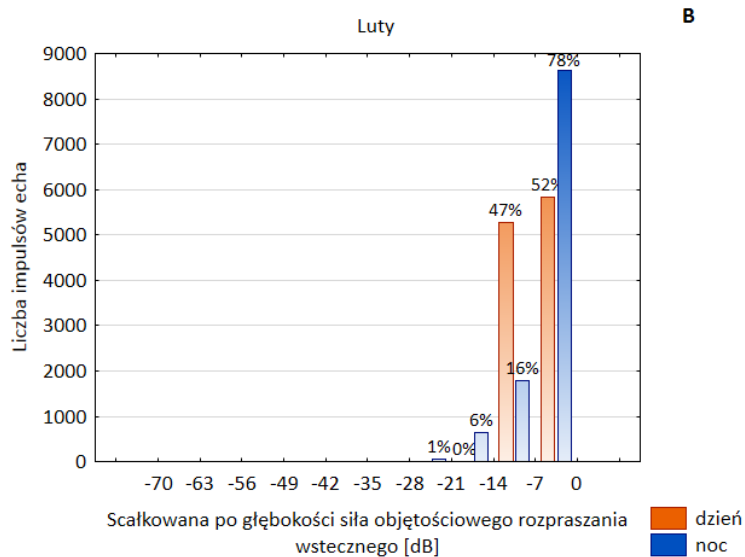
Jednak obserwacje, prowadzone dla ryb pelagicznych na różnych akwenach, pokazały, że generalnie ryby są bardziej rozproszone w przestrzeni w nocy w porównaniu z dniem (Blaxter i Holliday, 1969; Hansson, 1993; Fréon i in., 1996). Ten wynik zgadza się z wynikiem diskutowanym wyżej na podstawie histogramów (Rys. 4.3) oraz wartości średnich (Rys. 4.4). Jednak Fréon i in. 1996 analizując dane z Morza Śródziemnego zaobserwowali również i odwrotną zależność, podobnie jak Szcucka (2003) na Głębi Gdańskiej.

4.2.3 Rozkład przestrzenny siły objętościowego rozpraszania wstecznego - siła objętościowego rozpraszania wstecznego scałkowana po głębokości

Wyniki

Na Rys. 4.5 A, B, C i D przedstawiono histogramy scałkowanej po głębokości siły objętościowego rozpraszania wstecznego impulsu echa (wzór (4.3) w podrozdziale 4.1) dla dnia (kolor pomarańczowy) i nocy (kolor niebieski) odpowiednio dla sezonów jesiennego, zimowego, wiosennego i letniego. Histogramy przedstawiają wyniki dla impulsów echa zaprezentowanych na echogramach przedstawionych na Rys. 3.2 (dzień) i Rys. 3.3 (noc) dla sezonu jesiennego, Rys. 3.5 (dzień) i Rys. 3.6 (noc) dla zimowego okresu, Rys. 3.8 (dzień) i Rys. 3.9 (noc) dla okresu wiosennego oraz Rys. 3.11 (dzień) i Rys. 3.12 dla sezonu letniego. Wyniki dla scałkowanej po głębokości siły objętościowego rozpraszania wstecznego podzielono na 10 klas w przedziałach o szerokości 7 dB. W zależności od sezonu liczba próbek wynosiła od około 5000 (październik) do około 12000 (luty), wartości parametru są reprezentatywne dla całego badanego obszaru.





Rys. 4.5 Scałkowana po głębokości siła objętościowego rozpraszania wstecznych impulsów echa

W Tabeli 4.2 opracowanej na podstawie analizy danych zaprezentowanych na Rys. 4.5, zapis „minSV_s i maxSV_s„ oznacza, że są przedstawione minimalna i maksymalna wartości dla zakresu zmian scałkowanej po głębokości siły objętościowego rozpraszania wstecznego dla około 90% sygnałów echa dla dnia (kolumna 2) i nocy (kolumna 3). Natomiast symboli (ΔSV_s)_D i (ΔSV_s)_N oznaczają różnicę maksymalnej i minimalnej scałkowanej po głębokości siły objętościowego rozpraszania wstecznego dla zakresu zmian odpowiednio w godzinach dziennych (kolumna 2) i nocnych (kolumna 3).

Tab. 4.2 Porównanie scałkowanej po głębokości siły objętościowego rozpraszania wstecznego w dzień i w nocy dla różnych sezonów.

| Sezon | minSV_s i maxSV_s (dzień) | minSV_s i maxSV_s (noc) | (ΔSV_s)_D | (ΔSV_s)_N |
|--------------|--|--|---|---|
| jesień | -56 dB ÷ -7 dB | -35 dB ÷ -14 dB | 49 dB | 21 dB |
| zima | -14 dB ÷ 0 dB | -14 dB ÷ 0 dB | 14 dB | 14 dB |
| wiosna | -35 dB ÷ -14 dB | -28 dB ÷ -14 dB | 21 dB | 14 dB |
| lato | -49 dB ÷ -21 dB | -35 dB ÷ -21 dB | 38 dB | 14 dB |

Rys. 4.5A pokazuje, że w okresie jesiennym w nocy dla ok. 90% sygnałów echa scałkowana po głębokości siła objętościowego rozpraszania wstecznego znajdują się między -

35 dB a -14 dB, natomiast w dzień rozrzut ten jest większy: między -56 dB a -7 dB (Tabela 4.2, kolumny 2 i 3 odpowiednio).

Zimą sytuacja jest inna, ponieważ dla ok. 90 % sygnałów echa scałkowana po głębokości siła objętościowego rozpraszania wstecznego zmienia się od -14 dB do 0 dB zarówno dla dnia i nocy (Rys. 4.5B, Tabela 4.2, kolumny 2 i 3 odpowiednio, wiersz 3).

W kwietniu (Rys. 4.5C) zaś zakresy te wynoszą: od -35 dB do -14 dB dla dnia oraz od -28 dB do -14 dB dla nocy (Tabela 4.2, kolumny 2 i 3 odpowiednio, wiersz 3), a w lipcu (Rys. 4.5D), od -49 dB do -21 dB w dzień, i w nocy od -35 dB do -21 dB (Tabela 4.2, kolumny 2 i 3 odpowiednio, wiersz 4).

Dyskusja

Porównanie zakresu zmienności scałkowanej po głębokości siły objętościowego rozpraszania wstecznego - $(\Delta SV_S)_D$ oraz $(\Delta SV_S)_N$ - w okresach dziennym i nocnym dla różnych pór roku

Scałkowana po głębokości siła objętościowego rozpraszania wstecznego, będąca parametrem energetycznym, zawiera również informację o zmienności w kierunku horyzontalnym rozkładu przestrzennego organizmów. Porównanie kolumn 4 i 5 Tabeli 4.2 pokazało, że we wszystkich sezonach, z wyjątkiem sezonu zimowego, w okresie dziennym jest obserwowana większa zmienność scałkowanej po głębokości siły objętościowego rozpraszania wstecznego w porównaniu z okresem nocnym. Wskazuje to na większą niejednorodność rozkładu przestrzennego organizmów w dzień w porównaniu z nocą. Porównanie echogramów dla dnia i dla nocy na rysunkach: Rys. 3.2 i Rys. 3.3 dla sezonu jesiennego, Rys. 3.8 i Rys. 3.9 dla sezonu wiosennego oraz Rys. 3.11 i Rys. 3.12 dla sezonu letniego potwierdza ten wniosek. Większa zmienność parametru w ciągu dnia jest związana z powstaniem ławic. Natomiast w sezonie zimowym, gdy nie powstawały ławice w ciągu dnia to zarówno w ciągu dnia i nocy zaobserwowano jednorodne w poziomie warstwy rozpraszające (Rys. 3.5 i Rys. 3.6) to również zakresy scałkowanej po głębokości siły objętościowego rozpraszania wstecznego są podobne. Większa zmienność parametru energetycznego w dzień w porównaniu z nocą została również wykazana przez Axenrota i inne (2004) prowadzących badania w płytkowodnym obszarze (ok. 17 metrów głębokości) w Zatoce Himmerfjärden (północno zachodnia część Morza Bałtyckiego) w sezonie letnim oraz przez Orłowskiego (2001), prowadzącego badania w głębokowodnej części Zatoce Gdańskiej oraz na wodach otwartych południowego Bałtyku w październiku, lata 1988 - 1999.

Podobne zjawisko zaobserwowała również Szczucką (2003) w sezonach jesiennym i wiosennym. Natomiast podobnie do niniejszych badań w sezonie zimowym te zmienności są porównywalne (Szczucka, 2003). Większa zmienność parametru energetycznego w dzień w porównaniu z nocą zaobserwowano również i na innych akwenach dla innych organizmów morskich (Fréon i Misund, 1999; Gauthier i Rose, 2002).

Ważne jest również zwrócić uwagę na to, że analiza histogramów przedstawionych na Rys. 4.5A – D oraz Tabeli 4.2 pokazała, że zmienność scałkowanej po głębokości siły objętościowego rozpraszania wstecznego jak dla dnia tak i dla nocy zależy od sezonu.

Porównanie wartości scałkowanej po głębokości siły objętościowego rozpraszania wstecznego w okresach dziennym i nocnym dla różnych pór roku

Warto zauważyć, że rozkład według scałkowanej po głębokości siły objętościowego rozpraszania wstecznego dla godzin nocnych jest przesunięty w prawo w kierunku większych wartości parametru w porównaniu do godzin dziennych dla wszystkich sezonów z wyjątkiem sezonu zimowego. Tak w sezonie jesiennym dla godzin dziennych scałkowana po głębokości siła objętościowego rozpraszania wstecznego jest większa od -28 dB dla ponad 46 % impulsów echa, natomiast w nocy - dla 88%. W sezonie wiosennym liczby te wynoszą odpowiednio 61% i 90 %. Latem zaś, scałkowana po głębokości siła objętościowego rozpraszania wstecznego jest większa od -35 dB dla ponad 60 % impulsów echa w dzień i dla 95 % - w nocy. Natomiast dla sezonu zimowego stosunek jest odwrotny i parametr jest większy od - 14 dB w dzień dla 99% impulsów echa, a w nocy zaś dla 93 %.

Oznacza to, że w sezonach jesiennym, wiosennym i letnim zaobserwowano większe wartości scałkowanej po głębokości siły objętościowego rozpraszania wstecznego impulsów echa w nocy niż w dzień. Podobny wyniki otrzymały również Szczucka (2003) dla 14 z 16 serii badawczych (wyjątkiem był: kwiecień roku 1993 oraz czerwiec roku 1999) dla Głębi Gdańskiej oraz Orłowski (2001) dla głębokowodnej części Zatoki Gdańskiej oraz polskich wód przybrzeżnych ze strony otwartego morza. Jeśli dane Szczuckiej (2003) dotyczą różnych sezonów badawczych, to dane Orłowskiego (2001) – 8 rejsów badawczych wyłącznie w październiku w latach 1989 - 1999.

Natomiast w pracy (Axenrot i in., 2004) dla płytkowodnego obszaru Zatoki Himmerfjärden w sezonie letnim pokazano, że w dzień tzw. nautical area scattering coefficient

(termin angielski), który jest „proporcjonalny” scałkowanej po głębokości sile objętościowego rozpraszania wstecznego, w dzień przyjmuje większe wartości niż w nocy.

Uwzględniając, że siła objętościowego rozpraszania wstecznego zależy od dwóch czynników: od liczebności organizmów oraz od siły celu, odpowiadającej średniemu przekrojowi czynnemu na rozpraszanie wsteczne, osobników (Simmonds i MacLennan, 2005), możemy stwierdzić, że za reprezentację w histogramach większych wartości scałkowanej po głębokości siły objętościowego rozpraszania wstecznego w godzinach nocnych w porównaniu do godzin dziennych mogą odpowiadać: większe wartości siły celu poszczególnych osobników w nocy; większa koncentracja organizmów w nocy.

Dzienne ławice z wyższymi wartościami siły objętościowego rozpraszania wstecznego organizmów zajmują w wymiarze horyzontalnym mniejsze przestrzenie niż nocne warstwy rozpraszające (niższa liczba impulsów przy pingowaniu dziennych ławic w porównaniu do liczby impulsów odpowiadających nocnym warstwom, co ma wpływ na postać histogramu).

Jakie mogą być przyczyny dobowych zmian siły celu pojedynczych organizmów? Aby odpowiedzieć na to pytanie musimy uwzględnić, że siła celu osobnika zależy przede wszystkim od jego wymiarów i morfologii, częstotliwości akustycznej i orientacji osobników w stosunku do wiązki echosondy (Midttun i Hoff, 1962; Love, 1971; Nakken i Olsen, 1977; Edwards i in., 1984; Blaxter i Batty, 1990; Ona, 1990; Huse i Ona, 1996; Horne i Jech, 1999; Huse i Korneliussen, 2000; Ona, 2001; McQuinn i Winger, 2003; Simmonds i MacLennan, 2005; Henderson i in., 2008; Idczak i Książ-Kubacka, 2012). Na wymiary pęcherza pławnego ryb, który gra dominującą rolę w rozpraszaniu fali akustycznej (Simmonds i MacLennan, 2005), mogą wpłynąć różne czynniki, wymienione w podrozdziale 1.2.3 niniejszej rozprawy, między innymi głębokość, na której osobnik się znajduje (dla ryb należących do grupy *physostomes*) (Blaxter i Hunter, 1982, Ona, 1990, Mukai i Iida, 1996, Gauthier i Rose, 2002; Gorska i Ona, 2003a, 2003b; Fässler i Gorska, 2009 Ona, 2003; Fässler i in, 2008; Pedersen i in., 2009; Fässler, 2010). Oznacza to następujące możliwe przyczyny dobowych zmian siły celu osobników:

Przyczyna 1: W miesiącach października 2018 oraz lutym 2019, jak zostało zaznaczone wcześniej, na poligonie mogły się znajdować ryby śledziowate. To są ryby, które należą do grupy *physostomes* i nie potrafią regulować zawartość gazu w pęcherzu pławnym. Efektem jest kompresja pęcherza pławnego tych osobników ze zwiększeniem głębokości i wzrostem ciśnienia hydrostatycznego (Blaxter i Hunter, 1982; Ona, 1990; Mukai i Iida, 1996; Gauthier

i Rose, 2002; Gorska i Ona, 2003a, 2003b; Ona, 2003; Fässler i Gorska, 2009; Pedersen i in., 2009). Na skutek tego ze wzrostem głębokości maleje siła celu osobników, która zależy od wymiarów pęcherza pławnego.

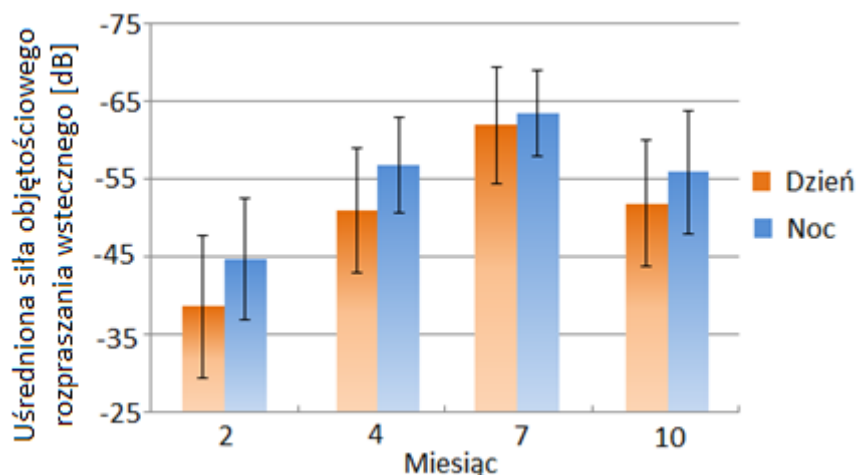
Na zależność siły celu od głębokości dla bałtyckich ryb śledziowatych zwrócono uwagę w pracach (Orłowski, 2001; Peltonen i Balk, 2005; Fässler i in., 2008; Fässler i Gorska, 2009). Fässler i in. (2008) oraz Fässler i Gorska (2009) zademonstrowali, że zmiana głębokości od 0 metrów do 50 metrów może spowodować zmniejszenie siły celu do ok. 2 dB.

Podsumowując, w przypadku udziału ryb śledziowatych zmniejszenie głębokości, na której się znajdują (na skutek migracji o zachodzie słońca), może spowodować wzrost siły celu osobników tych ryb i przyczynić się do wzrostu scałkowanej po głębokości sile objętościowego rozpraszania wstecznego w godzinach nocnych.

Przyczyna 2: Do różnicy może również przyczynić się i zróżnicowanie w orientacji osobników w skupiskach dziennych i nocnych (Nakken i Olsen, 1977; Foote, 1980; Edwards i in., 1984; Blaxter i Batty, 1990; Huse i Ona, 1996, Huse i Korneliussen, 2000; Ona, 2001). Orientacja ryb bałtyckich w skupiskach nie była badana. Natomiast dla śledzia norweskiego Huse i Ona (1996) oraz Huse i Korneliussen (2000) potwierdziły dobowe zmiany rozkładu osobników względem orientacji.

Przyczyna 3: Przyczyna ta została wymieniona przez Orłowskiego (2001), który prowadził badania w październiku w latach 1989 - 1999. Zwrócił on uwagę na to, że podczas migracji o zachodzie słońca na mniejsze głębokości z mniejszym ciśnieniem hydrostatycznym i większą temperaturą, zmiana tych parametrów może wpłynąć na balans gazowy w płynach ryby i spowodować, że z gazu rozpuszczonego we krwi osobnika powstają pęcherzyki gazowe. Sprzyja to wzrostowi siły celu osobników.

Warto też porównać wartości średnie dla scałkowanej po głębokości siły objętościowego rozpraszania wstecznego w poszczególnych sezonach. Na Rys. 4.6 przedstawiono takie zestawienie. Oś pozioma reprezentuje miesiące a oś pionowa scałkowaną po głębokości siłę objętościowego rozpraszania wstecznego w [dB]. Wartości średnie dla dnia (pomarańczowe kolumny) oraz nocy (kolumny niebieskie) zostały policzone wraz z odchyleniem standardowym (zaprezentowane w postaci „wąsów”). Najmniejsza różnica średnich wartości między dniem a nocą była zaobserwowana w lipcu, a największa w lutym.



Rys. 4.6 Usredniona siła objętościowego rozpraszania wstecznego dla dnia (pomarańczowy kolor) i nocy (niebieski kolor), dla poszczególnych miesięcy.

W badaniach prowadzonych w głębokowodnej części Bałtyku południowego (Szcucka, 2003), największe różnice w średniej wartości scałkowanej siły objętościowego rozpraszania wstecznego były odnotowane w miesiącach wrzesień 1994, luty 1995 oraz marzec 2001, przy czym różnica w lutym podobnie jak w niniejszej pracy była największa. Najmniejsze różnice odnotowano zaś w kwietniu 1994, październiku 1994 oraz w czerwcu 1999. Podobieństwo z wynikami z tej pracy dotyczy wyłącznie sezonu letniego, gdzie w niniejszych wynikach różnica również była niewielka.

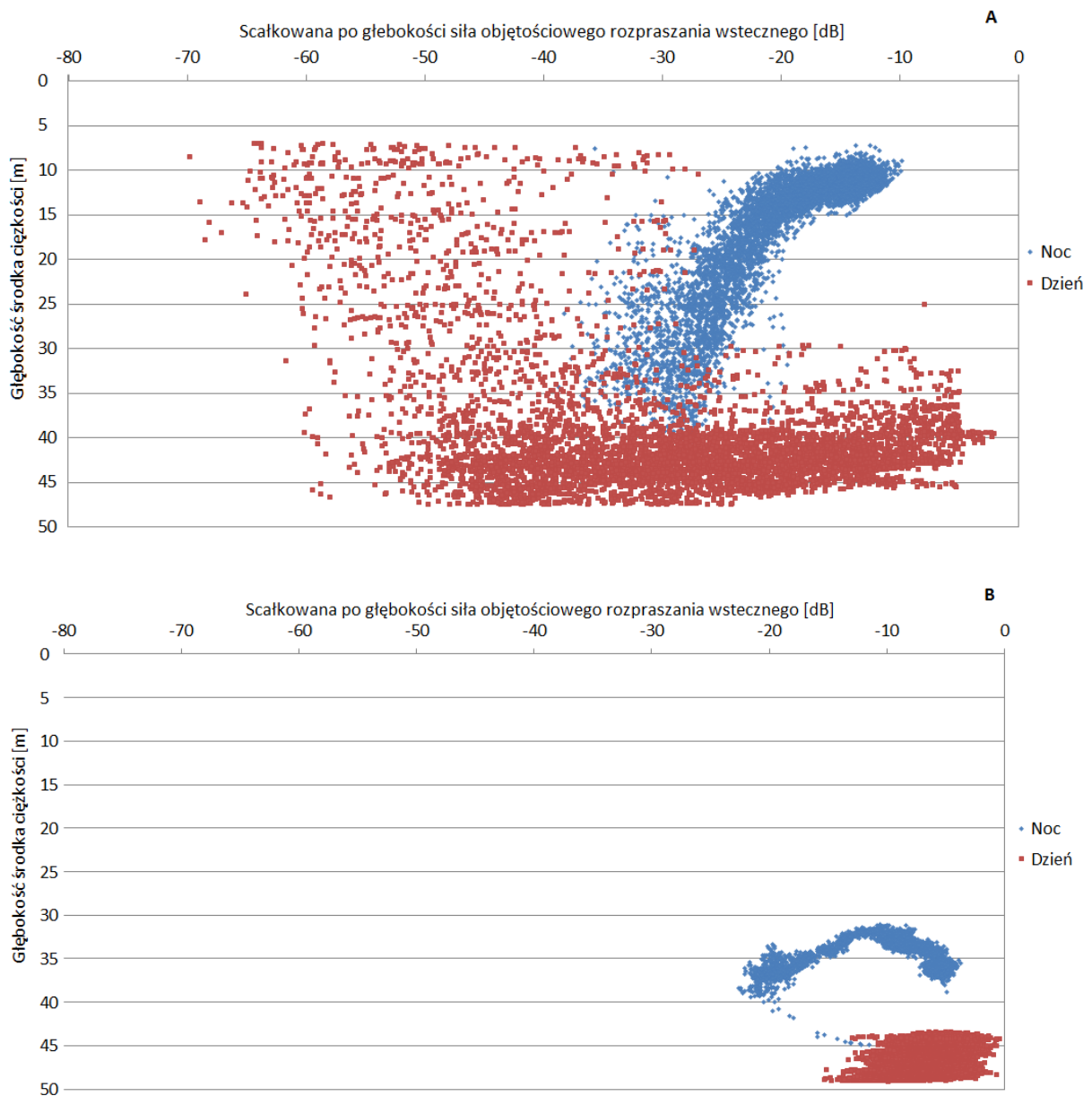
Głębokość środka ciężkości a scałkowana po głębokości siła objętościowego rozpraszania wstecznego poszczególnych impulsów echa

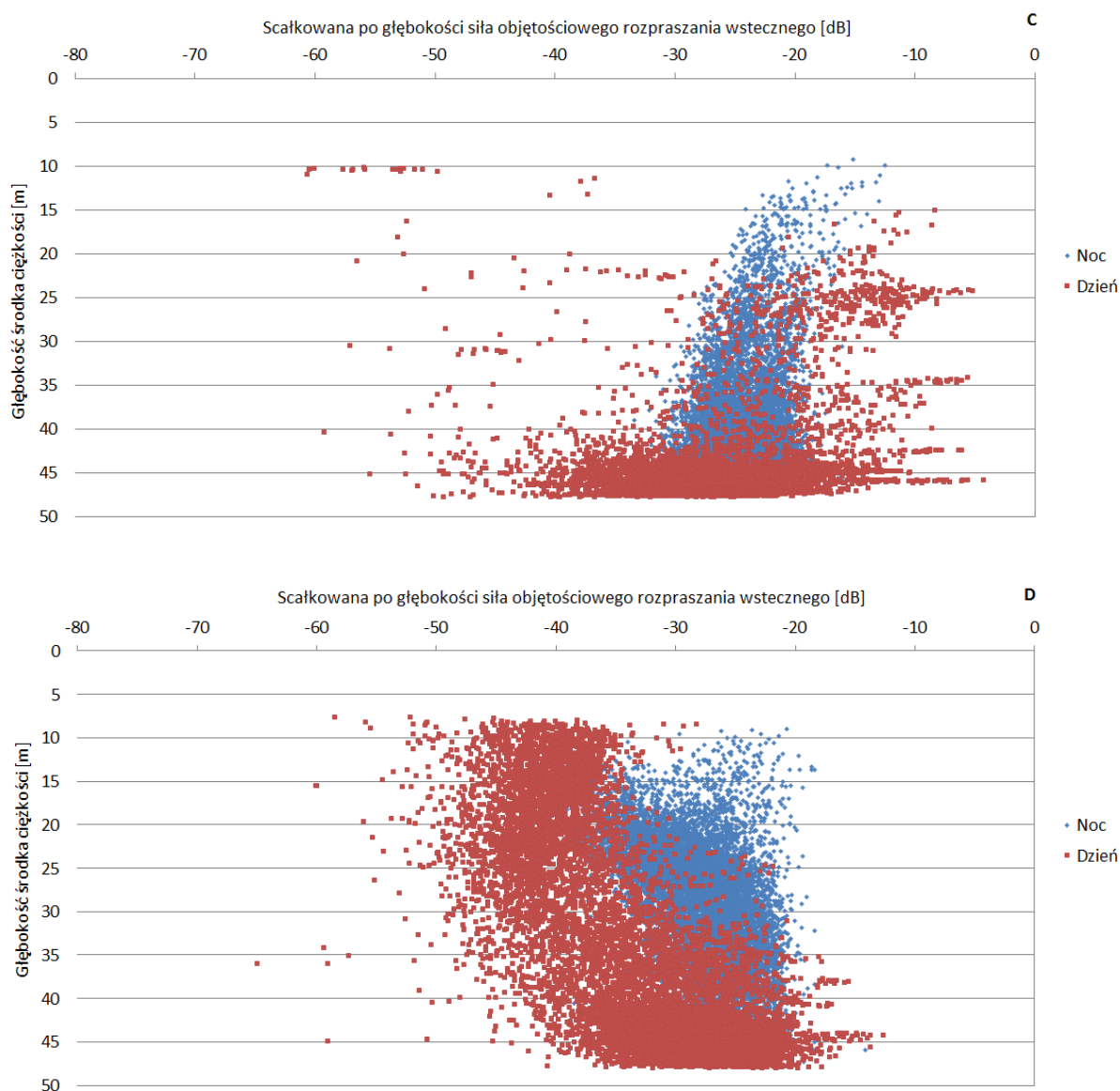
Ciekawym w niniejszych badaniach może być zastosowanie zaproponowanego w publikacjach (Szcucka, 2003; Szcucka i Schmidt, 2008) typu zestawienia na jednym wykresie głębokości środka ciężkości i siły objętościowego rozpraszania wstecznego. W tej pracy zestawiono na jednym wykresie głębokości środka ciężkości oraz scałkowaną po głębokości siłę objętościowego rozpraszania wstecznego dla poszczególnych impulsów echa (Rys. 4.7 A, B, C i D odpowiednio dla sezonów jesiennego, zimowego, wiosennego i letniego).

Analiza porównawcza tych rysunków (Rys. 4.7A – D) względem zmienności parametrów scałkowanej siły objętościowego rozpraszania wstecznego i głębokości środka ciężkości dla impulsów echa **potwierdzają wyżej przedstawione wnioski**, powstałe w wyniku analizy echogramów (Rys. 3.2 (dzień) i Rys. 3.3 (noc) dla sezonu jesiennego, Rys. 3.5 (dzień) i Rys. 3.6 (noc) dla zimowego okresu, Rys. 3.8 (dzień) i Rys. 3.9 (noc) dla okresu wiosennego oraz Rys. 3.11 (dzień) i Rys. 3.12 (noc) dla sezonu letniego) oraz analizy rysunków: Rys. 4.2,

Rys. 4.4 oraz Rys. 4.5A-D dla „morfometrycznych” oraz energetycznych charakterystyk „skupisk akustycznych”. Dlatego nie będą tu powtórzone.

Ciekawym jest, że Rys. 4.7A - C (sezony jesienny, zimowy i wiosenny) odzwierciedlają w sposób adekwatny charakter zmian dobowych rozkładu przestrzennego siły objętościowego rozpraszania wstecznego. Szczególnie transparentne zmiany są dla sezonów jesiennego i zimowego, gdy zaobserwowano względnie proste rozkłady przestrzenne organizmów o różnych porach doby.





Rys. 4.7 Głębokość środka ciężkości względem skałkowanej po głębokości siły objętościowego rozpraszania wstecznego dla października 2018 (A), lutego 2019 (B), kwietnia 2019 (C) oraz lipca 2019 (D). Niebieskie punkty odpowiadają pomiarom nocnym, czerwone – dziennym.

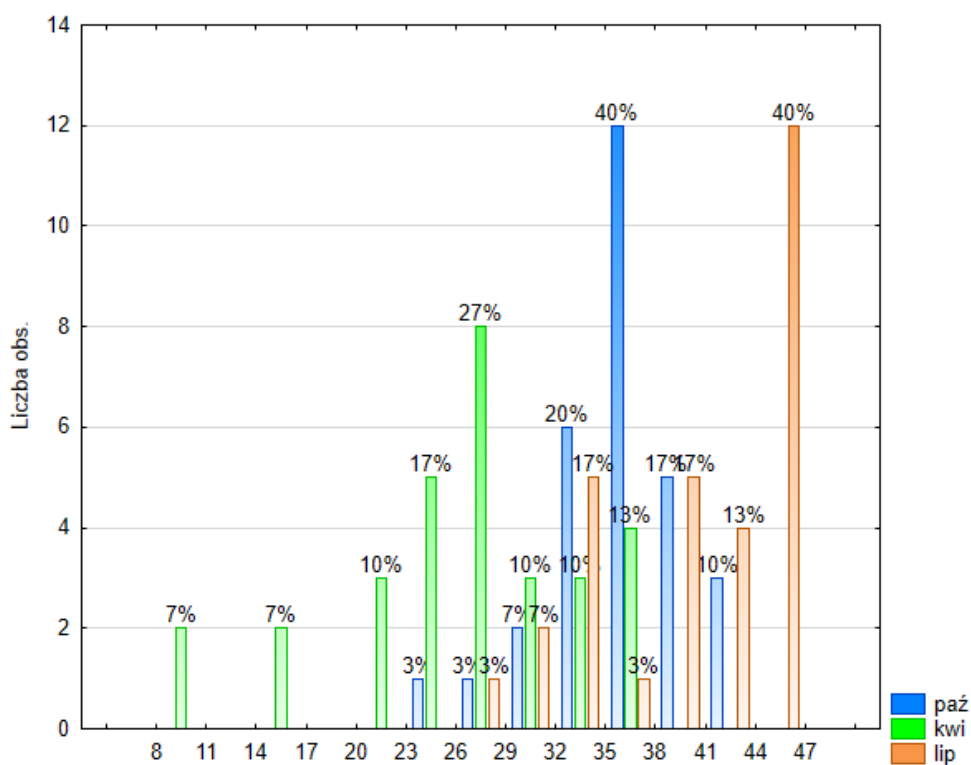
4.3 Analiza parametryczna ławic akustycznych. Wyniki i Dyskusja

Ten rozdział jest poświęcony analizie parametrycznej nie całościowego przestrzennego rozkładu siły objętościowego rozpraszania wstecznego, jak to zostało przedstawione w podrozdziale 4.2, ale wyłącznie ławic akustycznych. Przeanalizowano tu zmienność sezonową parametrów morfometrycznych i energetycznych opisujących rozkład przestrzenny siły objętościowego rozpraszania wstecznego dla ławic akustycznych znajdujących się w toni wodnej, nie mniej niż 5 metrów nad dnem. Ławice akustyczne nie były analizowane w badaniach prowadzonych w przeszłości (Szczucka, 2000; Orłowski, 2001; Szczucka, 2003;

Orłowski, 2004; Orłowski i Kujawa, 2005; Szczucka i Schmidt, 2008) zajmujących się pomiarami hydroakustycznymi na głębszych wodach południowego Bałtyku.

4.3.1 Ławice akustyczne - głębokość środka ciężkości

Na Rys. 4.8 przedstawione zostały histogramy dla uśrednionej (po wszystkich impulsach każdej z ławic) głębokości środka ciężkości dla rozkładu przestrzennego siły objętościowego rozpraszania wstecznego dla poszczególnych ławic w trzech sezonach, w których zostały one zaobserwowane: jesiennym (kolor niebieski), wiosennym (kolor zielony) oraz letnim (kolor pomarańczowy). Zakres zmian uśrednionej głębokości środka ciężkości podzielono na 10 klas o 5 m – szerokości każda.



Rys. 4.8 Ławice akustyczne – histogramy uśrednionej głębokości środka ciężkości - trzy sezony: jesienny (kolor niebieski), wiosenny (kolor zielony) i letni (kolor pomarańczowy).

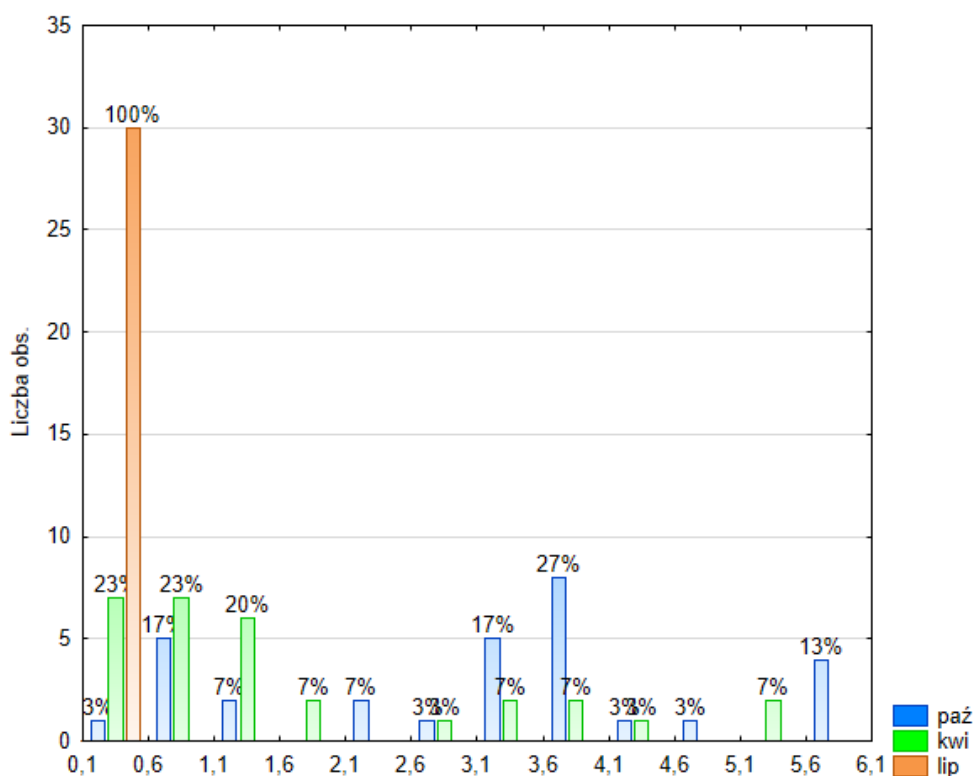
Analiza danych z Rys. 4.8 pokazuje, że w kwietniu centrum ciężkości znajdowało się na głębokościach mniejszych niż 32 metry dla 74% ławic akustycznych, tym czasem temu zakresowi zmian środka ciężkości odpowiada 13% ławic dla sezonu jesiennego oraz 10% dla sezonu letniego.

Pojawienie się ławic w kwietniu na mniejszych głębokościach zostało odnotowane w Rozdziale 3 przy analizie echogramów dziennych dla różnych sezonów badawczych. Jako

jedną z przyczyn została podana została różnica w głębokość strefy eufotycznej, która, może limitować górną granicę występowania organizmów(Aksnes i in., 2017): w październiku i lipcu była ona zbliżona i wynosiła około 13 m i 15 metrów odpowiednio, natomiast, w kwietniu była prawie dwa razy mniejsza - około 7 m.

4.3.2 Ławice akustyczne - unormowany moment bezwładności

Na Rys. 4.9 przedstawiono histogramy dla uśrednionego (po impulsom każdej z ławic) unormowanego momentu bezwładności dla poszczególnych ławic akustycznych dla sezonów jesiennego (kolor niebieski), wiosennego (kolor zielony) i letniego (kolor pomarańczowy). Parametr ten, jak było odnotowane już wcześniej, jest wskaźnikiem pionowego rozrzutu energii impulsu echa wokół jego środka ciężkości. Im większa jest wartość unormowanego momentu bezwładności tym większy jest rozrzut (Szczucka, 2003). Zakres zmian obliczonych wartości uśrednionego unormowanego momentu bezwładności podzielono na 13 klas w przedziałach o szerokości 0,5 m².



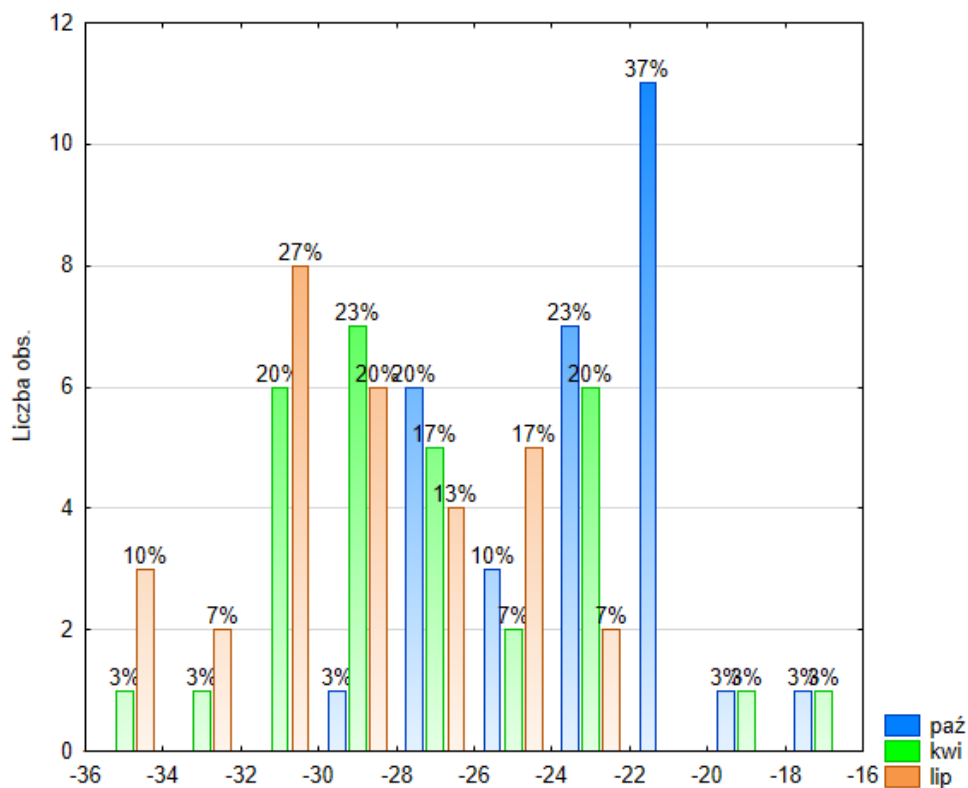
Rys. 4.9 Ławice akustyczne – histogramy uśrednionego unormowanego momentu bezwładności – trzy sezony: jesienny (kolor niebieski), wiosenny (kolor zielony) i letni (kolor pomarańczowy).

Porównując dane z 3 sezonów (Rys. 4.9), można zauważyć, że najmniejsze wartości uśrednionego unormowanego momentu bezwładności, wartości mniejsze od 0,6 m², zaobserwowano w sezonie letnim (kolor pomarańczowy) co oznacza, że ławice w tym sezonie

posiadały najmniejsze wymiary pionowe. W sezonie wiosennym dla 66 % ławic uśredniony unormowany moment bezwładności jest mniejszy od 1,6 m², czyli można było zaobserwować ławice o większych wymiarach pionowych niż w sezonie letnim. Natomiast w sezonie jesiennym histogram jest jeszcze bardziej szeroki i dla ok. 71% ławic uśredniony unormowany moment bezwładności jest mniejszy od 4,1 m². Oznacza to, że ławice o największych wymiarach pionowych zaobserwowano w październiku. Zgodnie z literaturą (Partridge, 1980; Wooton, 1990; Massé i in., 1996) różny stopień rozbudowania w pionie ławic w różnych sezonach może świadczyć o obecności różnych gatunków ryb.

4.3.3 Ławice akustyczne - uśredniona siła objętościowego rozpraszania wstecznego

Na Rys. 4.10 przedstawiono histogramy scałkowanej w poszczególnych impulsach ławicy i uśrednionej dla każdej z ławic po wszystkich impulsach do niej należących siły objętościowego rozpraszania wstecznego dla sezonów jesiennego (kolor niebieski), wiosennego (kolor zielony) i letniego (kolor pomarańczowy). Zakres obliczonych wartości uśrednionej scałkowanej w ławicach akustycznych siły objętościowego rozpraszania wstecznego podzielono na 10 klas w przedziałach o szerokości 2 dB.



Rys. 4.10 Ławice akustyczne – histogramy uśrednionej scałkowanej po głębokości dla poszczególnych impulsów siły objętościowego rozpraszania wstecznego – trzy sezony: jesienny (kolor niebieski), wiosenny (kolor zielony) i letni (kolor pomarańczowy).

Najmniejsze wartości uśrednionej scałkowanej siły objętościowej rozpraszania wstecznego w ławicach akustycznych odnotowano w lipcu (pomarańczowy kolor) - parametr ten zmieniał się od -36 dB do -22 dB. Najwyższe wartości zaobserwowano w październiku (kolor niebieski): zakres zmian od -30 dB do -16 dB. Natomiast w kwietniu wartości miały największy rozrzut od -36 dB do -16 dB.

Jak zostało to przedyskutowane w podrozdziale 4.2.3 uśredniona scałkowana siła objętościowego rozpraszania wstecznego w ławicach jest zależna zarówno od liczebności osobników w ławicy oraz od siły celu poszczególnych osobników. Zaobserwowaną różnicę sezonową parametru nie można wytłumaczyć różnicą w głębokości na której się znajdowały ławice w różnych sezonach: zgodnie z analizą Rys. 4.1 (podrozdział 4.2.1) w kwietniu zdecydowanie większa część ławic znajdowała się na mniejszych głębokościach niż w lipcu i październiku, co oznaczałoby w przypadku ryb należących do grupy *physostomes* (np., śledź i szprot), że w kwietniu można spodziewać się większych wartości siły celu osobników co powinno zwiększyć uśrednioną scałkowaną siłę objętościowego rozpraszania wstecznego w kwietniu, co nie zostało zaobserwowane. Czyli zgodnie z dyskusją w podrozdziale 4.2.3, sezonowa różnica parametru może być związana:

- z wpływem innych czynników na siłę celu osobników, np. ich orientacji przestrzennej w ławicach oraz czynników wpływających na wymiary i kształt pęcherza pławnego, jak np., gatunek ryb, stopień wypełnienia żołądka, stopień rozwoju gonad, wymiary geometryczne ryb
- z różnicą w liczebności ryb w ławicach w różnych sezonach.

4.4 Podsumowanie

W Rozdziale 4 sparametryzowano charakterystyczne cechy „morfometryczne” oraz „energetyczne” obrazów akustycznych. Na podstawie analizy histogramów dla środka ciężkości, unormowanego momentu bezwładności i scałkowanej po głębokości siły objętościowego rozpraszania wstecznego impulsów echa wykazano:

1. Sezonową zmienność histogramów dla wszystkich parametrów zarówno dla okresów dziennego i nocnego. Można mówić jak o zmienności sezonowej zakresów zmian parametrów tak i o ich średnich wielkości.
2. Dobową zmienność histogramów dla każdego z wymienionych wyżej parametrów.

3. Dla wszystkich pór roku histogramy dla głębokości środka ciężkości dla okresów dziennego i nocnego nie są symetryczne i dla nocy przesunięte one są w kierunku mniejszych głębokości: tak dla okresów jesiennego, zimowego, wiosennego oraz letniego dla 80 % impulsów wartości parametru odpowiednio zmieniają się w zakresach: 35 m - 45 m (dzień) i 10 m - 20 m (noc); 44 m - 50 m (dzień) i 34 m - 38 m (noc); 40 m - 50 m (dzień) i 30 m - 45 m (noc) oraz 25 m - 50 m (dzień) i 20 m - 40 m (noc).
4. W odróżnieniu od głębokowodnej części Zatoki Gdańskiej i Głębi Gdańskiej, w Zatoce Puckiej, we wszystkich sezonach unormowany moment bezwładności sygnałów echa osiąga mniejsze wartości w dzień (zakres zmian dla 90% impulsów, to: $0\text{ m}^2 - 40\text{ m}^2$ dla sezonów jesiennego, wiosennego i letniego) niż w nocy (gdzie dla tych sezonów obserwujemy zmienność parametru w zakresie od 0 m^2 do 240 m^2). Oznacza to, że w dzień ma miejsce mniejszy rozrzut energii impulsu echa wokół głębokości jego środka ciężkości, niż w nocy oraz że przestrzenne rozkłady organizmów charakteryzują się mniejszym pionowym rozrzutem w dzień w porównaniu z nocą. Unormowany moment bezwładności sygnału echa również charakteryzuje się w dzień mniejszym rozrzutem wartości w porównaniu z nocą.
5. W odróżnieniu od głębokowodnej części Zatoki Gdańskiej i Głębi Gdańskiej, we wszystkich sezonach, z wyjątkiem sezonu zimowego, w okresie dziennym jest obserwowana większa zmienność scałkowanej po głębokości siły objętościowego rozpraszania wstecznych impulsów echa (w zakresie 21 dB – 49 dB w zależności od sezonu) w porównaniu z okresem nocnym (nie była większa od 21 dB). Wskazuje to na większą zmienność w poziomie rozkładu przestrzennego organizmów w dzień w porównaniu z nocą (ławice w okresie dziennym).
6. Podobnie jak w głębokowodnej części Zatoki Gdańskiej oraz Głębi Gdańskiej w Zatoce Puckiej w sezonach jesiennym, wiosennym i letnim zaobserwowano większe wartości scałkowanej po głębokości siły objętościowego rozpraszania wstecznych impulsów echa w nocy niż w dzień.
7. Po raz pierwszy dla południowego Bałtyku została przeprowadzona analiza parametryczna ławic akustycznych. Wykazano sezonową zmienność parametrów ławic akustycznych takich jak uśredniona głębokość środka ciężkości, uśredniony unormowany moment bezwładności ławicy akustycznej oraz uśredniona scałkowana

wartość siły objętościowego rozpraszania wstecznego. W kwietniu zaobserwowano ławice o najmniejszych uśrednionej głębokości środka ciężkości i największej uśrednionej scałkowanej sile objętościowego rozpraszania wstecznego. W lipcu zaś, sytuacja była odwrotna: zaobserwowano ławice o największej uśrednionej głębokości środka ciężkości i najmniejszej uśrednionej scałkowanej sile objętościowego rozpraszania wstecznego. Największe zaś wymiary pionowe ławic zaobserwowano w październiku, a najmniejsze – w lipcu.

5. Dobowe migracje pionowe na Zatoce Puckiej

Analiza przedstawionych w podrozdział 4.2.1 dobowych zmian głębokości środka ciężkości rozkładu przestrzennego siły objętościowego rozpraszania wstecznego pokazała, że w nocy dla zdecydowanie większej części impulsów echa wartości głębokości środka ciężkości są mniejsze w porównaniu z okresem dziennym (Rys. 4.1). Jak zaznaczono w poprzednim rozdziale, sugeruje to udział organizmów w dobowej migracji pionowej organizmów: o zachodzie słońca – do góry i o wschodzie słońca – w dół. Zaobserwowana we wszystkich sezonach i przedstawiona na echogramach w Rozdziale 3, różnica rozkładu przestrzennego siły objętościowego rozpraszania wstecznego w okresach dziennym i nocnym, również sugeruje taki charakter dobowych migracji pionowych organizmów.

Celem badań (dotyczy realizacji Celu szczegółowego 2), których wyniki są przedstawione w tym rozdziale, było określenie charakterystycznych cech dobowych migracji pionowych organizmów w Zatoce Puckiej, gdzie wcześniej tego typu badania nie były prowadzone. W odróżnieniu od badań prowadzonych w przeszłości, w głębokowodnych obszarach południowego Bałtyku (Orłowski, 2001; Szczucka, 2003; Schmidt i Szczucka, 2007; Szczucka i Schmidt, 2008; Schmidt i Szczucka, 2010; Pezacki i in., 2018), zwrócono uwagę nie tylko na amplitudę oraz prędkość dobowych migracji pionowych, ale również:

- przeanalizowano sezonową różnicę w godzinach rozpoczęcia dobowych migracji pionowych oraz różnicę czasu ich trwania,
- opisano szczegółowo przebieg dobowych migracji pionowych o wschodzie i zachodzie słońca (wzorce migracji) w sezonach o wyraźnej różnicy tego przebiegu, czyli jesiennym i wiosennym,
- sparametryzowano zmiany rozkładu przestrzennego siły objętościowego rozpraszania wstecznego podczas dobowej migracji pionowej,
- porównano otrzymane wyniki z wynikami badań prowadzonych w przeszłości w głębokowodnych obszarach Bałtyku Południowego.

Bardziej uważne spojrzenie na przebieg dobowych migracji pionowych wydaje się szczególnie istotne dla sezonów wiosennego i letniego. W tych sezonach obserwowano znacznie bardziej skomplikowany rozkład przestrzenny siły objętościowego rozpraszania wstecznego w dzień niż np. w sezonach jesiennym i zimowym (echogramy Rys. 3.8 oraz na

Rys. 3.11). Oznacza to, że już jak zauważono wcześniej zmiany dobowe nie są odzwierciedlone w sposób transparentny przez zmiany dobowe głębokości środka ciężkości rozkładu przestrzennego siły objętościowego rozpraszania wstecznego. Dla sezonów jesiennego i zimowego przebieg dobowej migracji pionowej o zachodzie słońca i jego wschodzie jest bardziej czytywisty: echogramy dla dnia i nocy Rys. 3.2 i Rys. 3.3 oraz Rys. 3.5 i Rys. 3.6 odpowiednio dla jesieni i zimy. Różnica rozkładów przestrzennych siły objętościowego rozpraszania wstecznego dla dnia i nocy wyraźnie wskazuje na to, że o wschodzie słońca organizmy poruszają się w dół, tym czasem o zachodzie do góry.

Podrozdział 5.1 jest poświęcony metodyce analizy danych. W podrozdziałach 5.2 oraz 5.3 są przedstawione otrzymane wyniki, natomiast podrozdział 5.4 jest poświęcony ich interpretacji. W podrozdziale 5.5 podsumowano główne osiągnięcia Rozdziału 5.

5.1 Analiza danych

Dane hydroakustyczne wykorzystane do analizy w Rozdziale 5.2, poświęconym pomiarom w październiku 2018, zbierano ze statku zakotwiczonego na poligonie badawczym zarówno podczas wschodu i zachodu słońca. Sposób zbierania danych został opisany w podrozdziale 2.2.2. Ponieważ statek dryfował, to w różnych momentach mogły być obserwowane różne skupiska migrujących organizmów.

Dane hydroakustyczne wykorzystane do analizy w podrozdziale 5.3, poświęconym pomiarom w kwietniu 2019, były zbierane ze statku podczas płynięcia po wyznaczonych profilach (Rys. 2.4) podczas wschodu jak i zachodu słońca. Sposób zbierania danych został opisany w podrozdziale 2.2.2.

Oprogramowanie obsługujące pomiary echosondy typu split-beam EK80 daje, możliwość odtworzenia wyników pomiarów. Pozwoliło to na wgląd w przebieg dobowej migracji pionowej o wschodzie i zachodzie słońca (w sezonach jesiennym i wiosennym) oraz wyznaczenie jego kluczowych momentów. Po odpowiedniej analizie wstępnej, opisanej w podrozdziale 2.3.1 za pomocą programu Sonar5-Pro dla wyznaczonych momentów kluczowych wyeksportowano echogramy (Rys. 5.1, Rys. 5.2, Rys. 5.3, Rys. 5.7, Rys. 5.8, Rys. 5.9, Rys. 5.14, Rys. 5.15, Rys. 5.16, Rys. 5.20, Rys. 5.21, Rys. 5.22)

Zarówno dla okresu wschodu i zachodu słońca dla obu sezonów badawczych przeprowadzono analizę parametryczną zebranych danych hydroakustycznych. W celu przeprowadzenia tej analizy za pomocą oprogramowania Sonar5-Pro wyeksportowano pliki

tekstowe, zawierające dane dotyczące rozkładów pionowych siły objętościowego rozpraszania wstecznego. Korzystając z tych danych oszacowano przebieg czasowy głębokości środka ciężkości oraz unormowanego momentu bezwładności rozkładu przestrzennego siły objętościowego rozpraszania wstecznego. Korzystano przy tym odpowiednio ze wzorów 4.1 oraz 4.2 przedstawionych w podrozdziale 4.1.1.

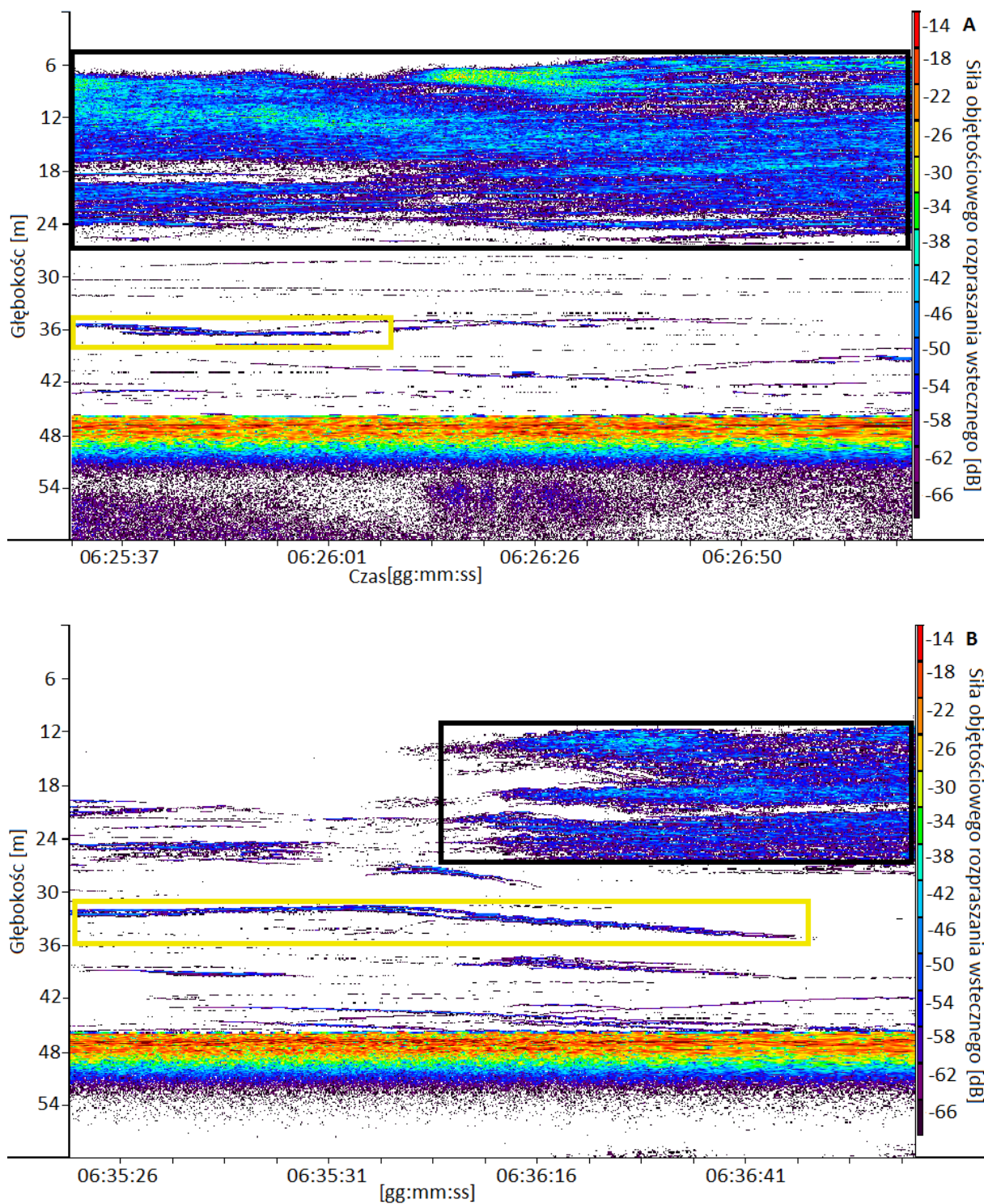
5.2 Wyniki - wzorzec dobowych migracji pionowych w sezonie jesiennym

5.2.1 Dobowa migracja pionowa w dół podczas wschodu słońca. Październik 2018

Opis przebiegu dobowej migracji pionowej

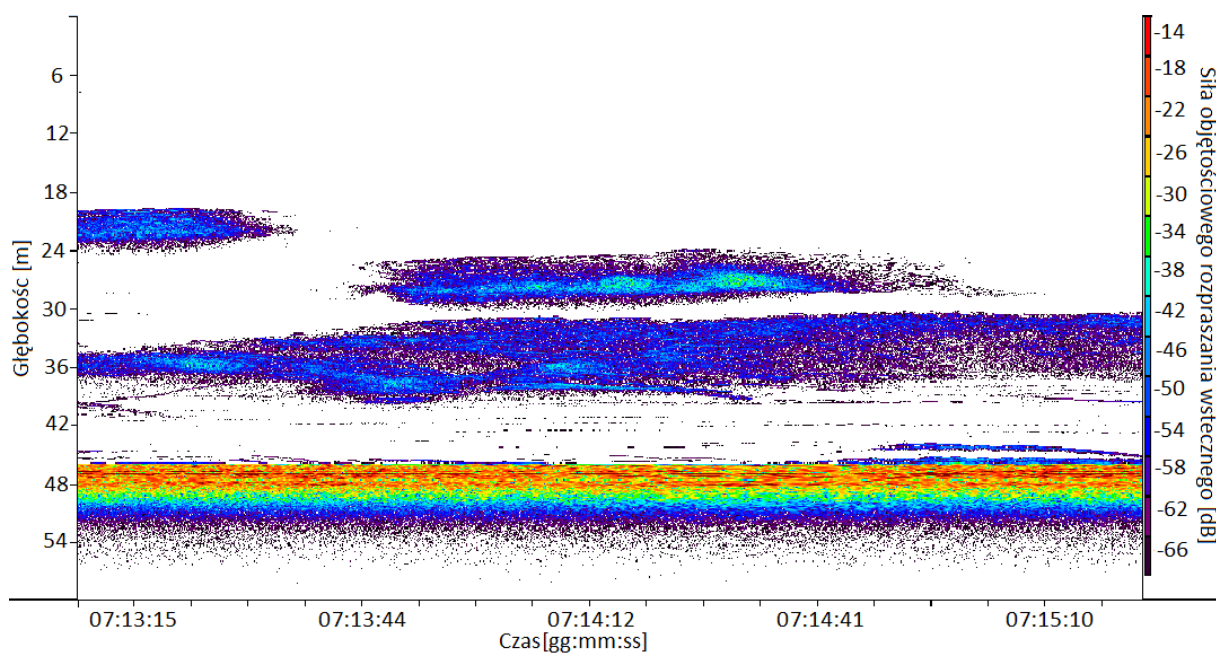
Migracja w dół podczas wschodu słońca w sezonie jesiennym trwała około 1 godziny i 15 minut, od godziny 06:25 do godziny 07:40. Wschód słońca tego dnia (27/10/2018) był o godzinie 07:35, czyli migracja rozpoczęła około godziny przed wschodem słońca.

Na Rys. 5.1 przedstawiono echogramy dla początkowego etapu pionowej migracji pionowej. Na osi poziomej przedstawiony jest czas lokalny (gg:mm:ss), oś pionowa przedstawia głębokość (m), a skala kolorów po prawej stronie przedstawia siłę objętościowego rozpraszania wstecznego (dB). Najniższym wartościom siły objętościowego rozpraszania wstecznego odpowiada kolor ciemno granatowy i niebieski, pośrednim – zielony i żółty, a najwyższym – pomarańczowy i czerwony. Na początku migracji zaobserwowano skupiska o maksymalnej miąższości około 18 m, z górną granicą na głębokości od 6 m do 10 m oraz dolną - na 24 m głębokości (oznaczone czarnym prostokątem na Rys. 5.1A). Na Rys. 5.1B oprócz warstwy o dużej miąższości około 12 m (po prawej stronie echogramu), jest też fragment echogramu bez żadnego skupiska organizmów (po lewej stronie), są widoczne wyłącznie pojedyncze organizmy poniżej 24 m głębokości. Są one również widoczne na Rys. 5.1A (przykłady oznaczone są żółtymi prostokątami). Ponieważ statek dryfował, a organizmy mogły znajdować się poza obszarem wiązki echosondy, zdarzały się momenty, kiedy nie zarejestrowano żadnych organizmów.



Rys. 5.1 Echogramy przedstawiające początek dobowej migracji pionowej w dół podczas wschodu słońca - pomiar ze statku zakotwiczonego na Zatoce Puckiej. Październik 2018

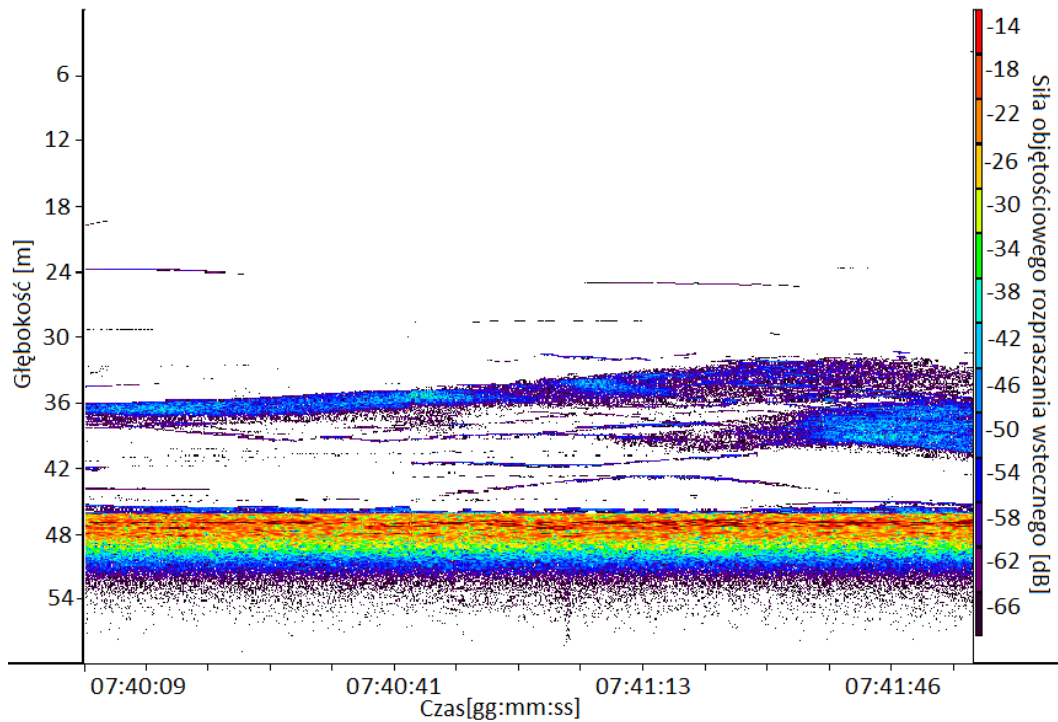
Następnie, po około 45 minutach od rozpoczęcia migracji, zaobserwowano „rozszczenie się” skupisk i powstanie warstwowej struktury o mniejszej miąższości poszczególnych warstw na głębokościach poniżej 20 m (Rys. 5.2).



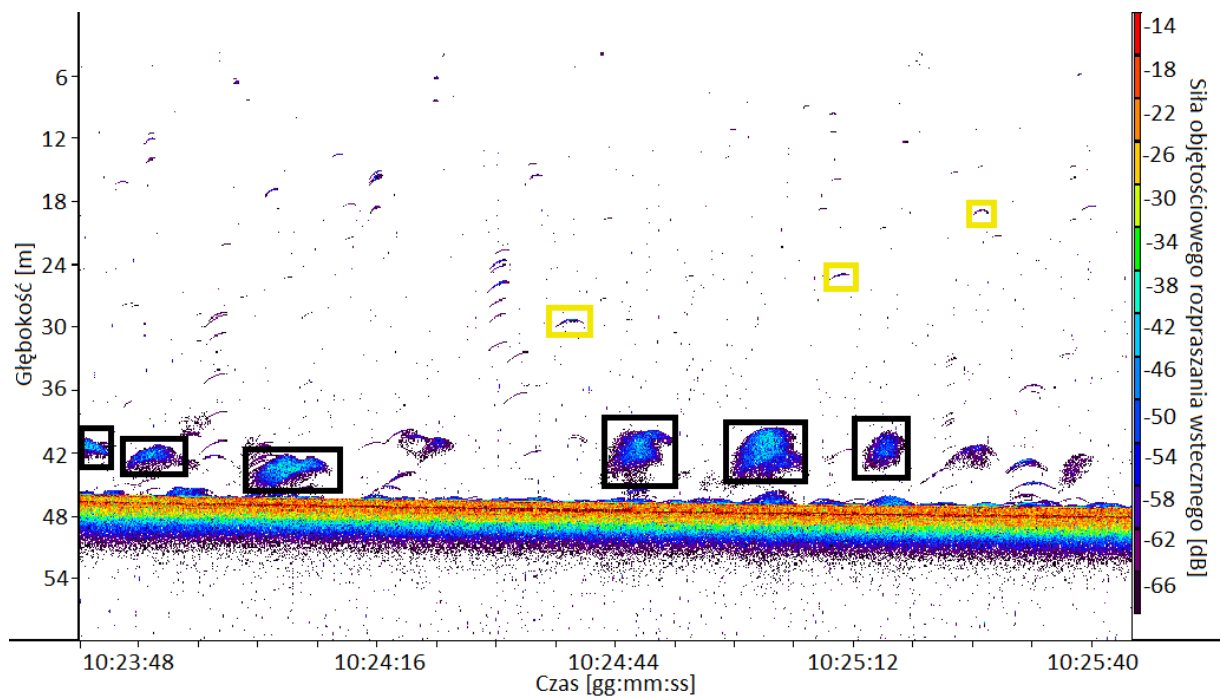
Rys. 5.2 Echogram po około 45 minutach od rozpoczęcia dobowej migracji pionowej w dół podczas wschodu słońca - pomiar ze statku zakotwiczonego na Zatoce Puckiej. Październik 2018

Na Rys. 5.3 przedstawiono obraz akustyczny zarejestrowany po 1 godzinie i 15 minutach od momentu rozpoczęcia migracji. Skupiska organizmów były rejestrowane jedynie poniżej 36 metrów głębokości. Na takiej głębokości były rejestrowane skupiska organizmów w ciągu dnia (Rys. 3.2) Również ich wymiar pionowy był porównywalny z zaobserwowanym w ciągu dnia - nie więcej niż 6 m. Skupiska organizmów (oznaczone czarnymi prostokątami (Rys. 5.4)) znajdują się poniżej 36 m głębokości, powyżej obserwujemy jedynie pojedyncze organizmy (przykłady oznaczone żółtym prostokątem).

Zwraca uwagę różnica obrazu akustycznego na Rys. 5.3 oraz Rys. 5.4. Jest to związane z tym, że dane hydroakustyczne dla dnia (Rys. 5.4) zostały zebrane podczas płynięcia statku wzdłuż przekroju badawczego przez obszar, gdzie zakotwiczony statek dryfował podczas rejestrowania danych hydroakustycznych w celu obserwacji dobowej migracji pionowej o wschodzie słońca.



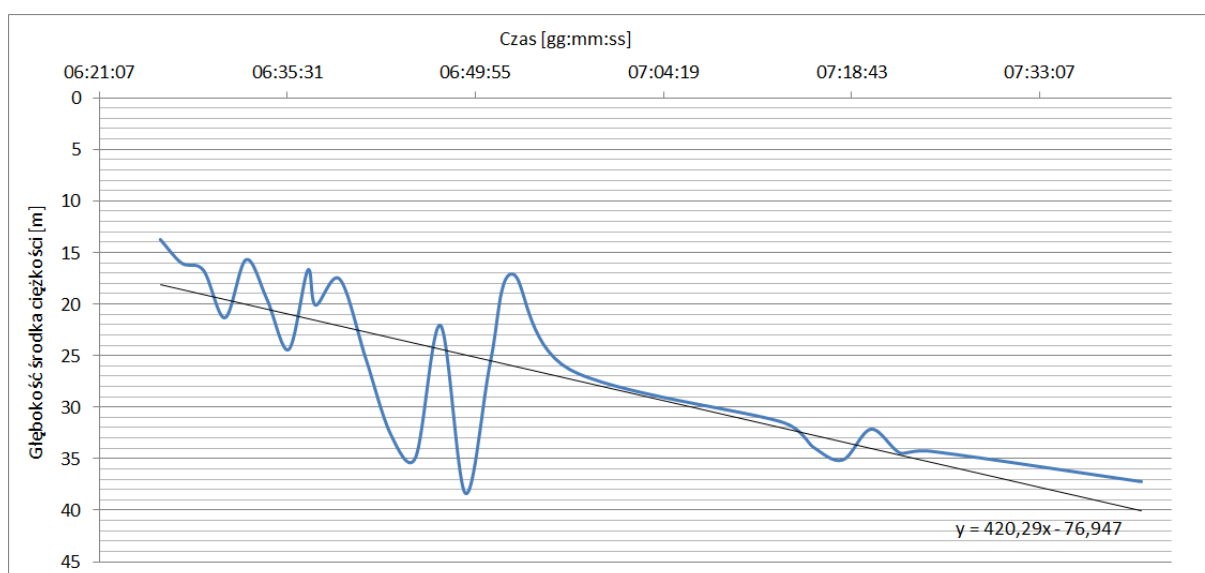
Rys. 5.3 Echogram przedstawiający ostatnią fazę dobowej migracji pionowej w dół podczas wschodu słońca pomiar ze statku zakotwiczonego na Zatoce Puckiej Zewnętrznej. Październik 2018



Rys. 5.4 Obraz akustyczny dla godzin dziennych (po zakończeniu migracji), dane zebrane podczas płynięcia statku wzdłuż przekroju badawczego przez obszar, gdzie zakotwiczony statek dryfował podczas rejestrowania danych hydroakustycznych w celu obserwacji dobowej migracji pionowej o wschodzie słońca. Październik 2018.

Analiza parametryczna – czasowe zmiany unormowanego momentu bezwładności oraz głębokości centrum środka ciężkości rozkładu przestrzennego siły objętościowego rozpraszania wstecznego. Wschód słońca

Na Rys. 5.5 zaprezentowano czasowe zmiany głębokości środka ciężkości rozkładu przestrzennego siły objętościowego rozpraszania wstecznego i oraz linii regresji liniowej (czarna prosta) dla hydroakustycznych danych (siła objętościowego rozpraszania wstecznego) zebranych podczas wschodu słońca. Na osi poziomej znajduje się czas, na osi pionowej wartości głębokości środka ciężkości. Głębokość środka ciężkości rozkładu przestrzennego siły objętościowego rozpraszania wstecznego (na podstawie linii regresji) zmieniła się od 18 m do 37 m. Prędkość dobowej migracji pionowej wyznaczona została na podstawie linii regresji i wynosi około 0,48 cm/s.

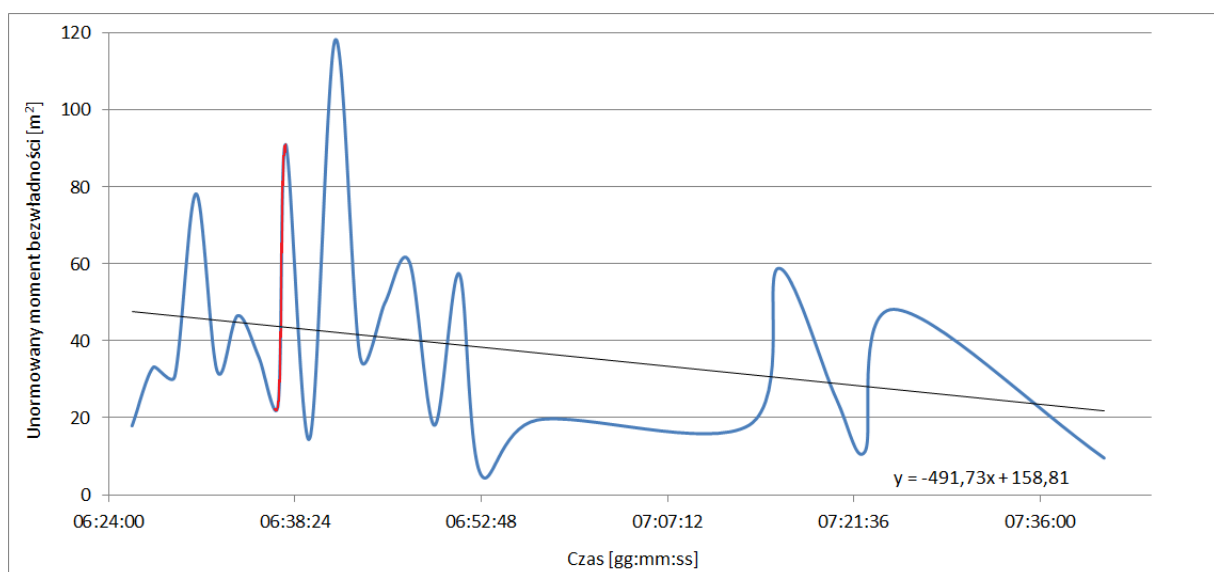


Rys. 5.5 Zmiany głębokość środka ciężkości rozkładu przestrzennego siły objętościowego rozpraszania wstecznego podczas dobowej migracji pionowej o wschodzie słońca, październik 2018.

Na Rys. 5.6 zostały przedstawione czasowe zmiany unormowanego momentu bezwładności oraz linię regresji (czarna prosta) dla danych zebranych podczas wschodu słońca. Na osi poziomej znajduje się czas, na osi pionowej - wartości unormowanego momentu bezwładności sygnału echa.

Parametr ten mocno oscylował w trakcie trwania migracji. W początkowej fazie migracji, największe wartości jakie osiągał wahały się od około 80 m² do 120 m². Natomiast w ostatniej fazie migracji parametr ten nie przekraczał 60 m². Oscylacje wartości unormowanego momentu bezwładności rozkładu przestrzennego siły objętościowego rozpraszania wstecznego w trakcie migracji nie wynikają z gwałtownych zmian miąższości warstw rozpraszających,

a mogą być związane z brakiem warstw rozpraszających w obszarze zajmowanym przez wiązkę echosondy, następuje wtedy silnie zmniejszenie wartości parametru unormowanego momentu bezwładności. Jest to widoczne na przykładzie echogramu z Rys. 5.1B, gdzie o godzinie 06:35 na echogramie (lewa strona) brak warstw rozpraszających, natomiast od godziny 06:36 na echogramie (prawa strona) została zaobserwowana warstwa organizmów. Ma to swoje odzwierciedlenie w zmianie wartości parametru unormowanego momentu bezwładności z około 20 m² do około 90 m² (czerwony fragment linii na Rys. 5.6). Przebieg linii trendu (zmniejszenie unormowanego momentu bezwładności) potwierdza, że organizmy formowały skupiska o mniejszej miąższości pod koniec migracji w dół.



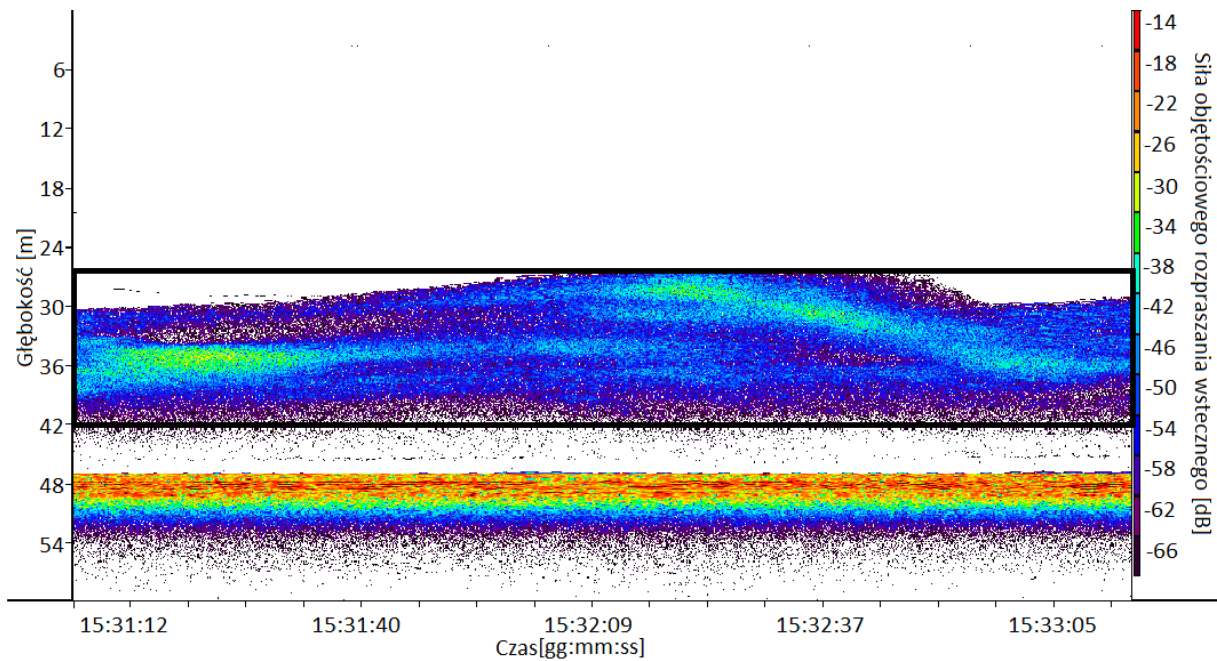
Rys. 5.6 Czasowe zmiany unormowanego momentu bezwładności rozkładu przestrzennego siły objętościowego rozpraszania wstecznego podczas dobowej migracji pionowej o wschodzie słońca, październik 2018.

5.2.2 Dobowa migracja pionowa w górę podczas zachodu słońca. Październik 2018

Opis przebiegu dobowej migracji pionowej

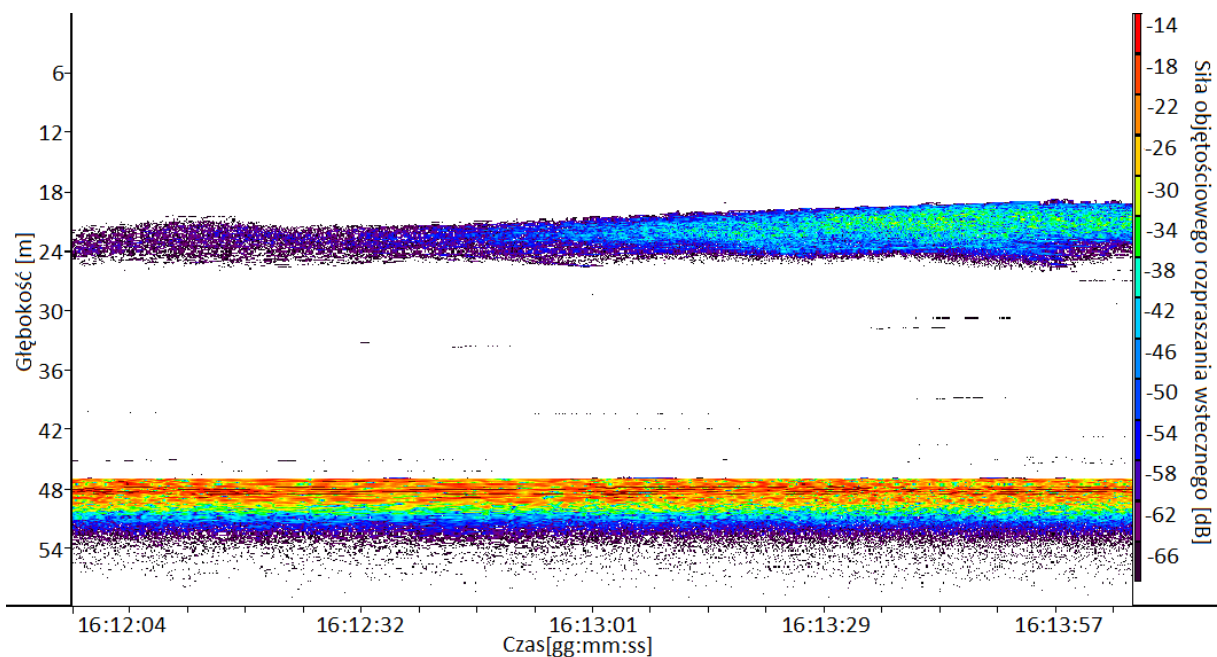
Dobowa migracja pionowa w górę podczas zachodu słońca w sezonie jesiennym trwała około 1 godziny i 30 minut, od godziny 15:30 do godziny 17:00. Zachód słońca tego dnia (27/10/2018) był o godzinie 17:23, czyli migracja rozpoczęła około dwóch godzin przed zachodem słońca.

Na Rys. 5.7 przedstawiono echogram dla początkowego etapu migracji. Na początku migracji organizmy tworzyły skupiska o maksymalnej zaobserwowanej miąższości około 12 m - 14 m a dolna granica skupisk była na głębokości 42 m (czarny prostokąt na rysunku).



Rys. 5.7 Echogram przedstawiający początek dobowej migracji pionowej w górę podczas zachodu słońca - pomiar ze statku zakotwiczonego na Zatoce Puckiej Zewnętrznej. Październik 2018

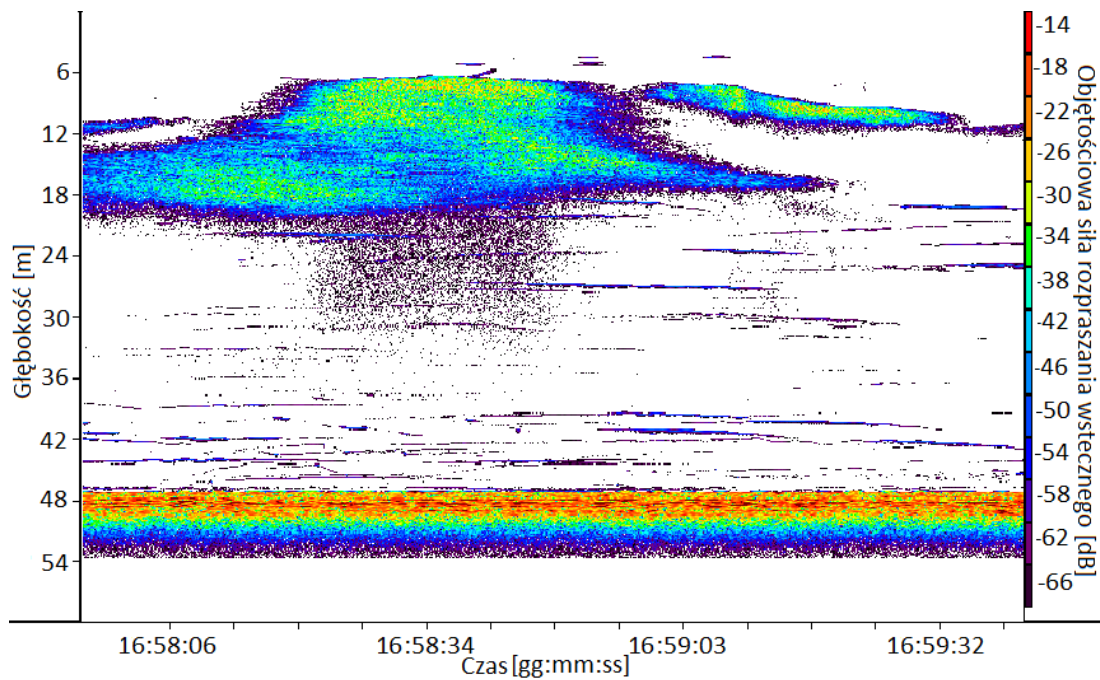
Po upływie 40 minut od rozpoczęcia migracji skupiska przemieściły się na głębokość około 24 metrów (Rys. 5.8).



Rys. 5.8 Echogram po około 40 minutach od rozpoczęcia dobowej migracji pionowej w górę podczas zachodu słońca - pomiar ze statku zakotwiczonego na Zatoce Puckiej Zewnętrznej. Październik 2018

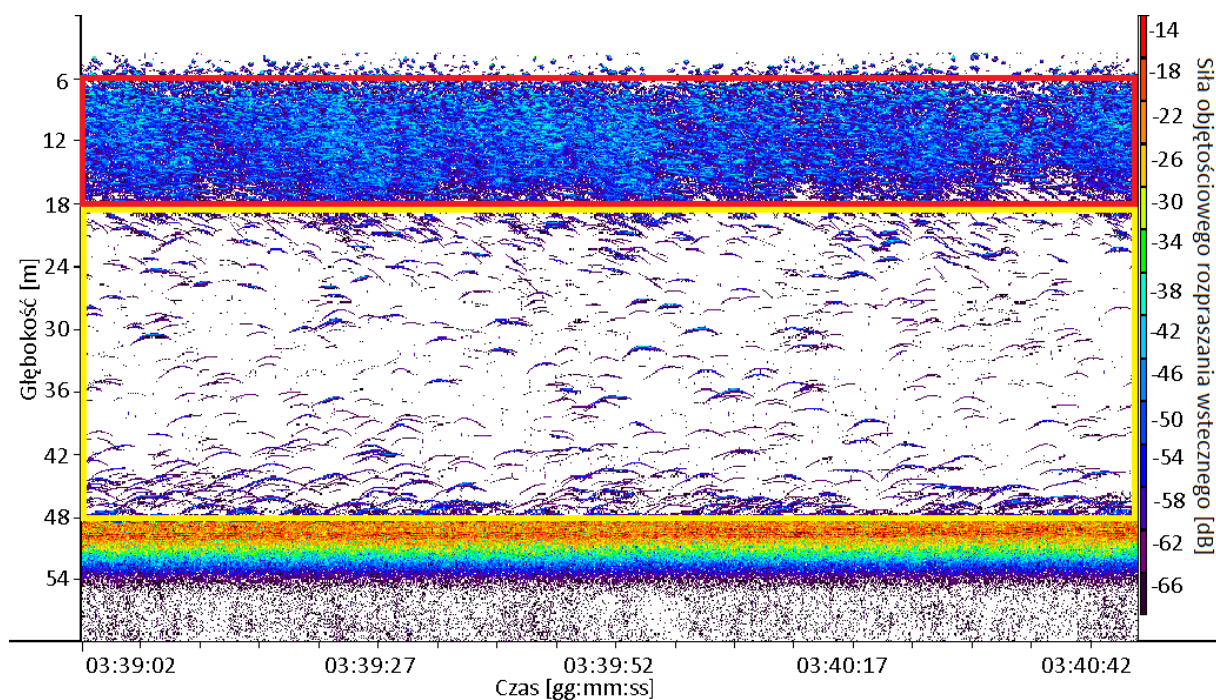
Po upływie półtorej godziny od początku migracji warstwa rozpraszająca znajdowała się na głębokościach 6 m – 18 m (Rys. 5.9), poniżej zaobserwowano tylko pojedyncze

organizmy. Na takiej głębokości były rejestrowane warstwa rozpraszające podczas nocy (Rys. 5.9).



Rys. 5.9 Echogram po półtorej godziny od rozpoczęcia dobowej migracji pionowej w górę podczas zachodu słońca - pomiar ze statku zakotwiczony na Zatoce Puckiej Zewnętrznej. Październik 2018

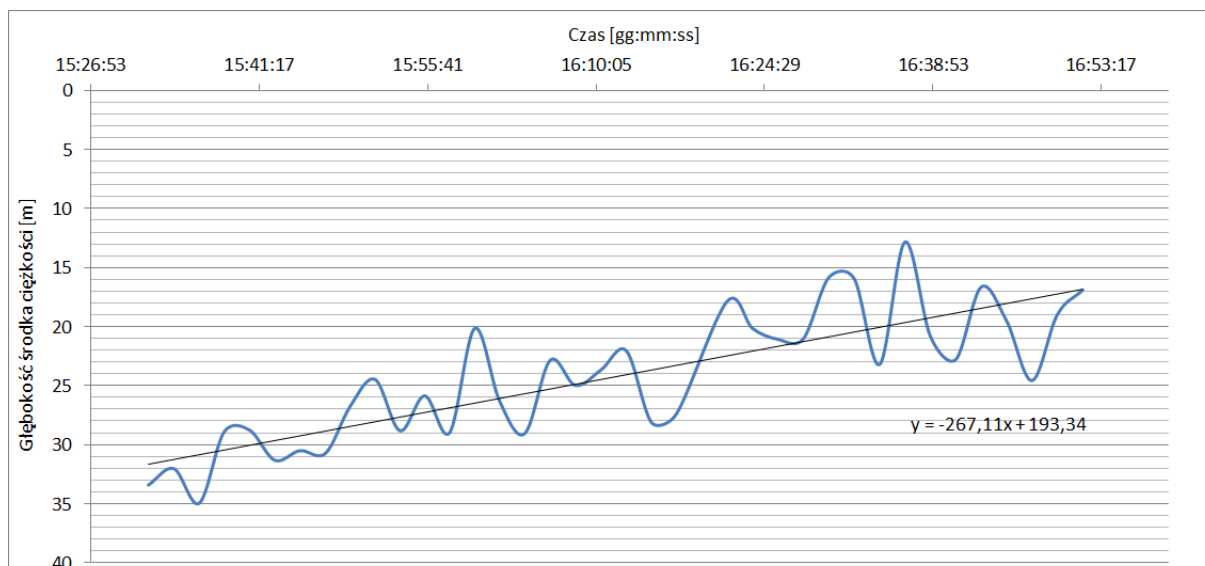
Na Rys. 5.10 przedstawiono obraz akustyczny zarejestrowany w nocy. Dane dla nocy zostały zebrane podczas pływnięcia statku wzdłuż przekroju badawczego przez obszar, gdzie zakotwiczony statek dryfował podczas rejestrowania danych hydroakustycznych w celu obserwacji dobowej migracji pionowej o zachodzie słońca. Można zauważyć, że skupiska organizmów znajdują się na głębokościach od 6 m do 18 m (czerwony prostokąt Rys. 5.10), poniżej obserwujemy pojedyncze organizmy (żółty prostokąt, Rys. 5.10).



Rys. 5.10 Obraz akustyczny w ciągu nocy (po zakończeniu migracji), dane zebrane podczas płynięcia statku wzdłuż przekroju badawczego przez obszar, gdzie zakotwiczony statek dryfował podczas rejestrowania danych hydroakustycznych w celu obserwacji dobowej migracji pionowej o zachodzie słońca. Październik 2018.

Analiza parametryczna – czasowe zmiany unormowanego momentu bezwładności oraz głębokości środka ciężkości rozkładu przestrzennego siły objętościowego rozpraszania wstecznego. Zachód słońca.

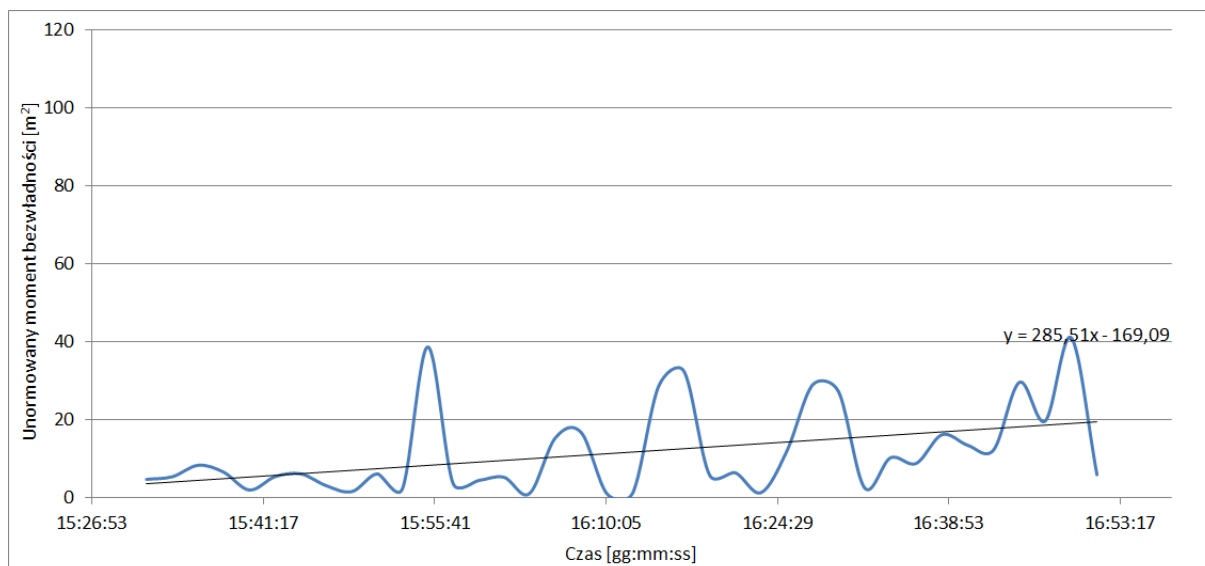
Na Rys. 5.11 zaprezentowano czasowe zmiany głębokości środka ciężkości oraz odpowiednia linia regresji liniowej (czarna prosta) dla danych hydroakustycznych (siła objętościowego rozpraszania wstecznego) zebranych podczas zachodu słońca. Parametr się zmniejszył się (na podstawie linii regresji) z 31,5 m do 17 m. Prędkość dobowej migracji pionowej wyznaczona na podstawie linii regresji wynosi około 0,30 cm/s



Rys. 5.11 Zmiany czasowe głębokości środka ciężkości rozkładu przestrzennego siły objętościowego rozpraszania wstecznego podczas zachodu słońca, październik 2018.

Na Rys. 5.12 przedstawiono czasowe zmiany unormowanego momentu bezwładności oraz linię regresji (czarna prosta) dla danych hydroakustycznych zebranych podczas zachodu słońca.

Parametr ten oscylował w trakcie trwania migracji. Jednak z mniejszą amplitudą niż podczas migracji w dół o wschodzie słońca (Rys. 5.6) Wartości unormowanego momentu bezwładności sygnału echa nie przekraczały 40 m². Wartości osiągnęte przez unormowany moment bezwładności podczas zachodu słońca wg linii trendu zwiększyły się od kilku m² do kilkunastu m². Oznaczana to, że podczas wędrówki w górę, organizmy migrowały w bardziej zwartych skupiskach niż podczas migracji w dół. Podobnie jak podczas wschodu słońca w momentach, kiedy wartości unormowanego momentu bezwładności spadały blisko zera obserwowano brak skupisk w wiązce echosondy.



Rys. 5.12 Czasowe zmiany unormowanego momentu bezwładności rozkładu przestrzennego siły objętościowego rozpraszania wstecznego podczas dobowej migracji pionowej o zachodzie słońca, październik 2018.

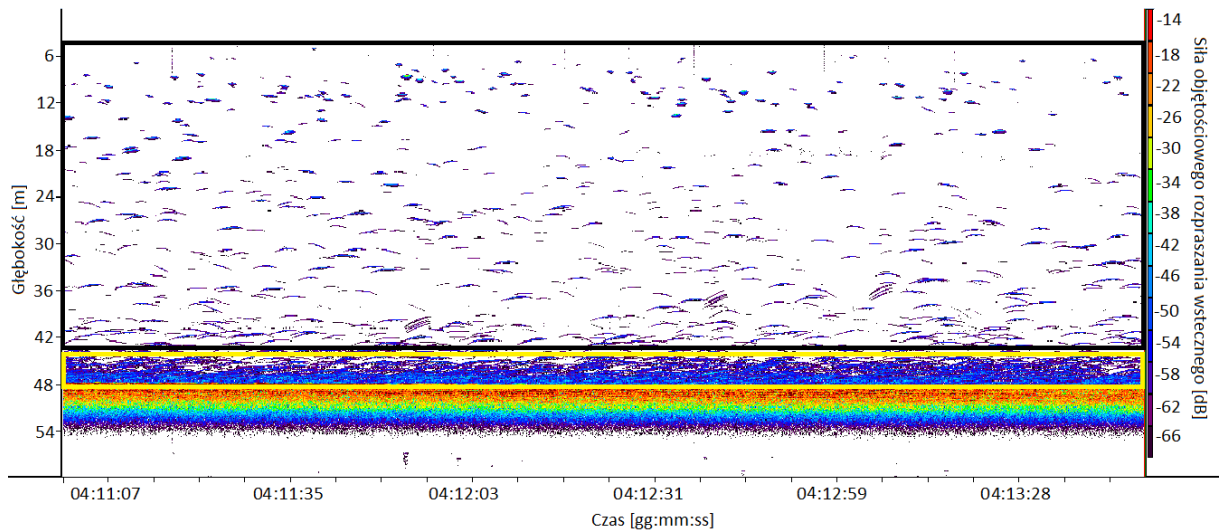
5.3 Wyniki - wzorzec dobowych migracji pionowych w sezonie wiosennym

5.3.1 Dobowa migracja pionowa organizmów o wschodzie słońca. Kwiecień 2019

Opis przebiegu dobowej migracji pionowej

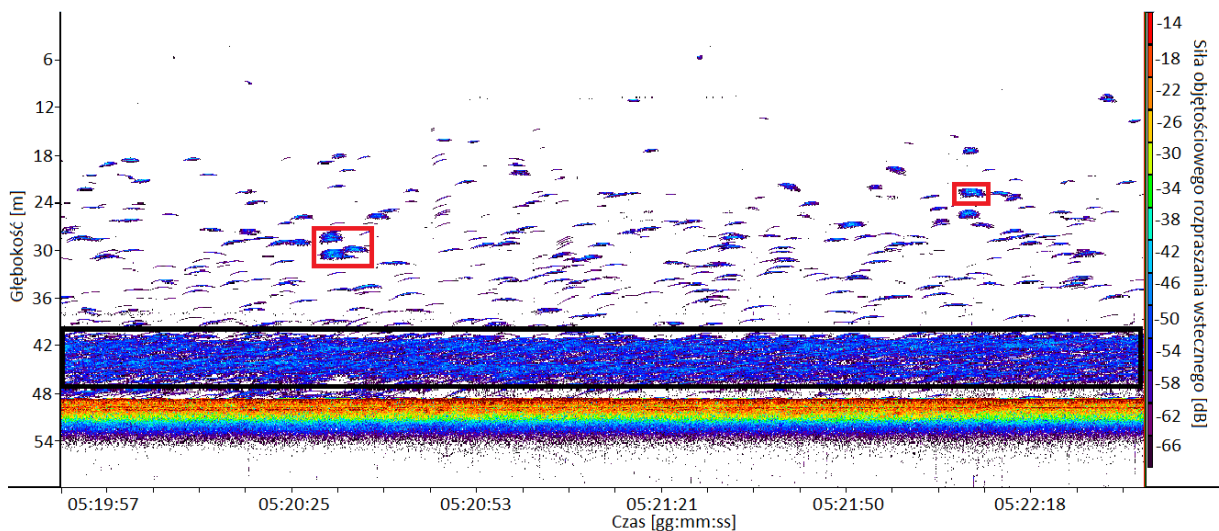
Dobowa migracja pionowa w sezonie wiosennym trwała około 2 godziny i 40 minut, od godziny 03:10 do godziny 05:50. Wschód słońca tego dnia (15/04/2019) był o godzinie 05:47, czyli migracja rozpoczęła mniej więcej na dwie i pół godziny przed wschodem słońca.

Na Rys. 5.13 przedstawiono echogram dla początkowego etapu migracji. Na początku migracji pojedyncze rozpraszacze znajdowały się w toni wodnej od głębokości 6 m do głębokości 42 m (obszar ten zaznaczono czarnym prostokątem na rysunku). Poniżej tej głębokości, blisko dna, zaobserwowano spójną warstwę rozpraszającą (oznaczona żółtym prostokątem na echogramie).



Rys. 5.13 Echogram przedstawiający początek dobowej migracji pionowej w dół podczas wschodu słońca – pomiar wykonany z płynącego statku wzdłuż przekroju badawczego na Zatoce Puckiej. Kwiecień 2019.

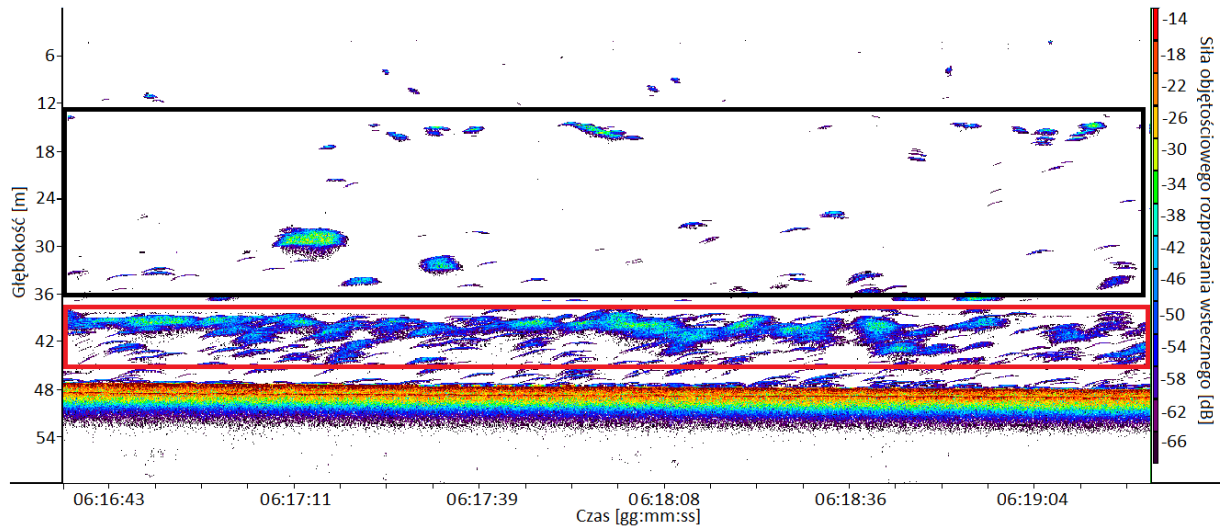
W okresie ponad jednej godziny od początku migracji organizmy znajdujące się najbliżej powierzchni zeszły poniżej 12 m głębokości i zaczęły tworzyć gęste skupiska o małych wymiarach, ławice akustyczne (termin wprowadzony w Rozdziale 3) (przykładowe oznaczono czerwonym prostokątem na Rys. 5.14). W toni wodnej, poniżej głębokości 12 m nadal są obserwowane pojedyncze osobniki. Przy dnie obserwujemy spójną warstwę rozpraszającą (zaznaczono czarną ramką).



Rys. 5.14 Echogram po ponad 1 godzinie od rozpoczęcia dobowej migracji pionowej w dół podczas wschodu słońca - pomiar wykonany z płynącego statku wzdłuż przekroju badawczego na Zatoce Puckiej. Kwiecień 2019

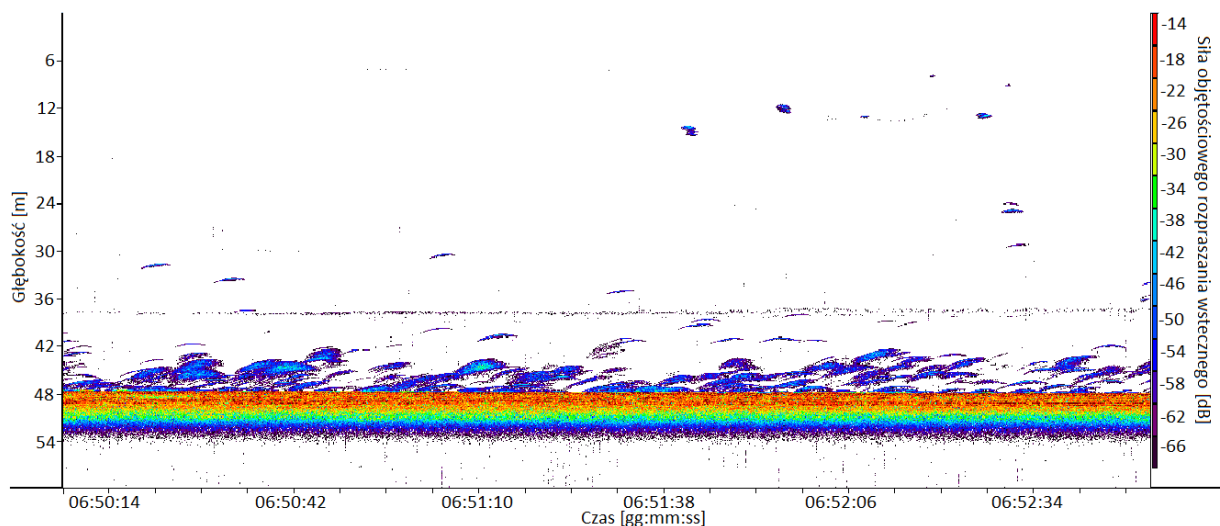
W ciągu kolejnej godziny (Rys. 5.15) w toni wodnej z warstwy rozpraszającej i pojedynczych rozproszonych organizmów sformowały się skupiska organizmów (ławice akustyczne) przebywające poniżej 12 m głębokości (czarny prostokąt, Rys. 5.15). Pojedyncze osobniki są obserwowane głównie w pobliżu dna. Na głębokości około 42 m organizmy są teraz

zgrupowane nie w warstwie rozpraszającej, ale w skupiskach (obserwowane są tzw. Ławice akustyczne) o większej niż dla warstwy sile objętościowego rozpraszania wstecznego (czerwony prostokąt, Rys. 5.15).



Rys. 5.15 Echogram po około 2 godzinach od rozpoczęcia dobowej migracji pionowej w dół podczas wschodu słońca - pomiar wykonany z płynącego statku wzdłuż przekroju badawczego na Zatoce Puckiej. Kwiecień 2019.

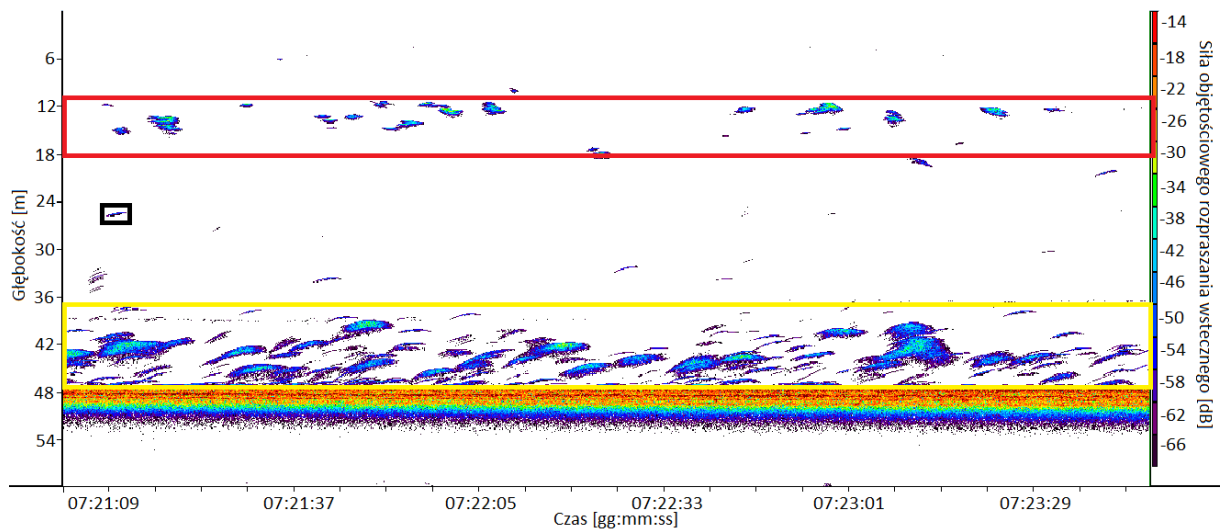
Na Rys. 5.16 zaprezentowano ostatni etap migracji. Uformowane są ławice akustyczne: nieliczne ławice przebywają na głębokościach 12 m – 18 m, natomiast w pobliżu dna zaobserwowano liczne ławice akustyczne. W ciągu dnia organizmy przebywały właśnie na takich głębokościach (Rys. 3.8).



Rys. 5.16 Echogram po około 2 godzinach i 40 minutach od rozpoczęcia dobowej migracji pionowej w dół podczas wschodu słońca - pomiar wykonany z płynącego statku wzdłuż przekroju badawczego na Zatoce Puckiej. Kwiecień 2019.

Rys. 5.17 pokazuje obraz akustyczny po zakończeniu migracji: zaobserwowano ławice akustyczne zajmujące dwie przestrzenie w toni wodnej: na głębokości pomiędzy 10 m a 18 m

(oznaczone są czerwonym prostokątem) oraz na głębokościach poniżej 36 m (oznaczone są żółtym prostokątem). Natomiast pomiędzy 18 m głębokości a 36 m głębokości można zaobserwować nieliczne pojedyncze organizmy, przykład oznaczony czarnym prostokątem.

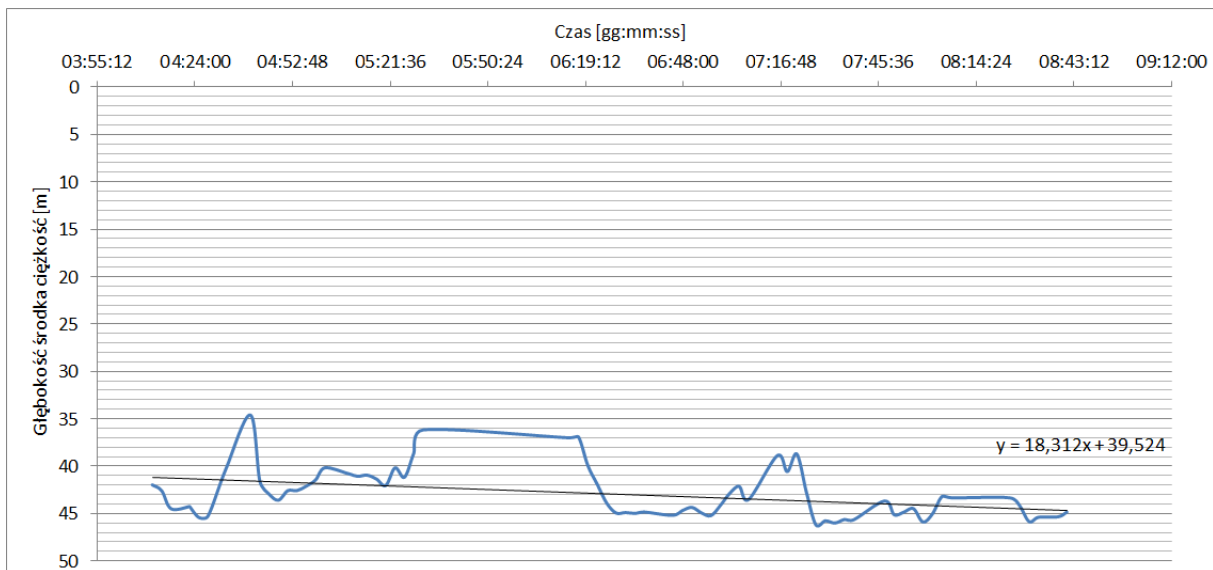


Rys. 5.17 Obraz akustyczny w ciągu dnia (po zakończeniu migracji), dane zebrane w dzień podczas płynięcia statku wzdłuż przekroju badawczego, gdzie rejestrowano dane hydroakustyczne w celu obserwacji dobowej migracji pionowej o wschodzie słońca. Kwiecień 2019.

Można zauważyć dwa podstawowe etapy migracji organizmów o wchodzie słońca. Pierwszy etap, to przejście pojedynczych osobników na głębokości poniżej 10 metrów i formowanie się skupisk w toni wodnej na głębokości około 10 – 18 metrów. Drugi zaś późniejszy etap, to uformowanie się ławic akustycznych poniżej 36 metrów głębokości.

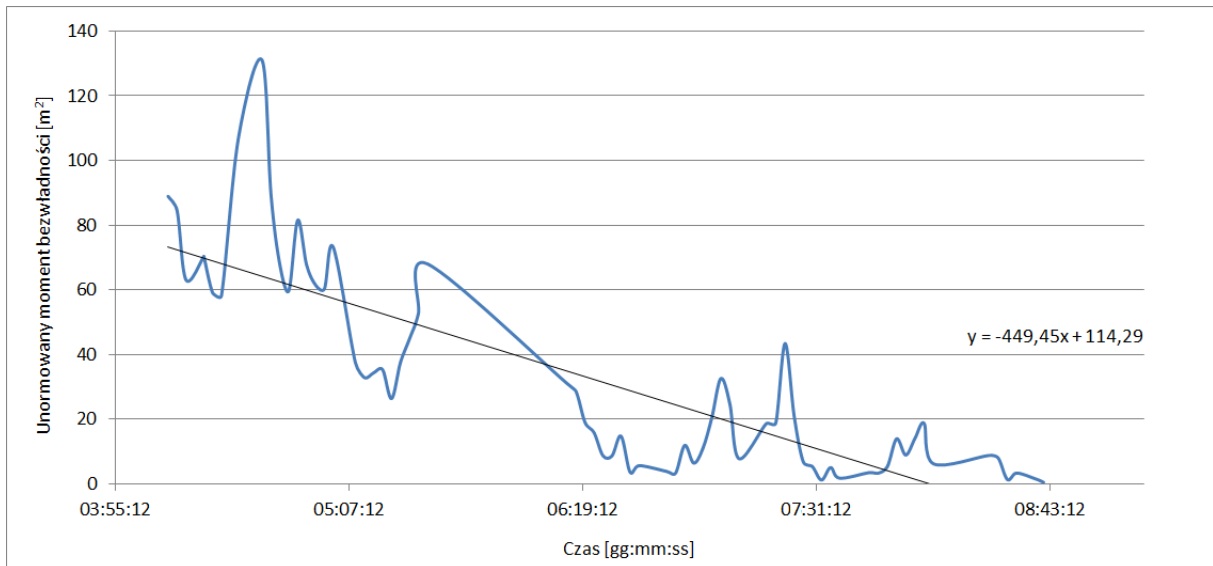
Analiza parametryczna – czasowe zmiany unormowanego momentu bezwładności oraz głębokości środka ciężkości rozkładu przestrzennego siły objętościowego rozpraszania wstecznego. Wchód słońca.

Na Rys. 5.18 zaprezentowano czasowe zmiany głębokości środka ciężkości oraz odpowiednią linię regresji (prosta linia czarna) rozkładu przestrzennego siły objętościowego rozpraszania wstecznego. Głębokość środka ciężkości (na podstawie linii regresji) zmieniła się z 41 m do 45 m. Wyznaczenie prędkości dobowej migracji pionowej na podstawie zmiany środka ciężkości nie byłoby wiarygodne ze względu na skomplikowany charakter migracji organizmów.



Rys. 5.18 Zmiany czasowe głębokości środka ciężkości rozkładu przestrzennego siły objętościowego rozpraszania wstecznego podczas wschodu słońca, kwiecień 2019.

Na Rys. 5.19 przedstawiono czasowe zmiany unormowanego momentu bezwładności oraz linię regresji (prosta linia czarna). Parametr ten oscylował w przedziale od 131 m² do 0,5 m². Linia regresji wykazuje zmniejszenie się unormowanego momentu bezwładności. Ma to związek z tym, że organizmy podczas migracji zgromadziły się w skupiska (ławice akustyczne).



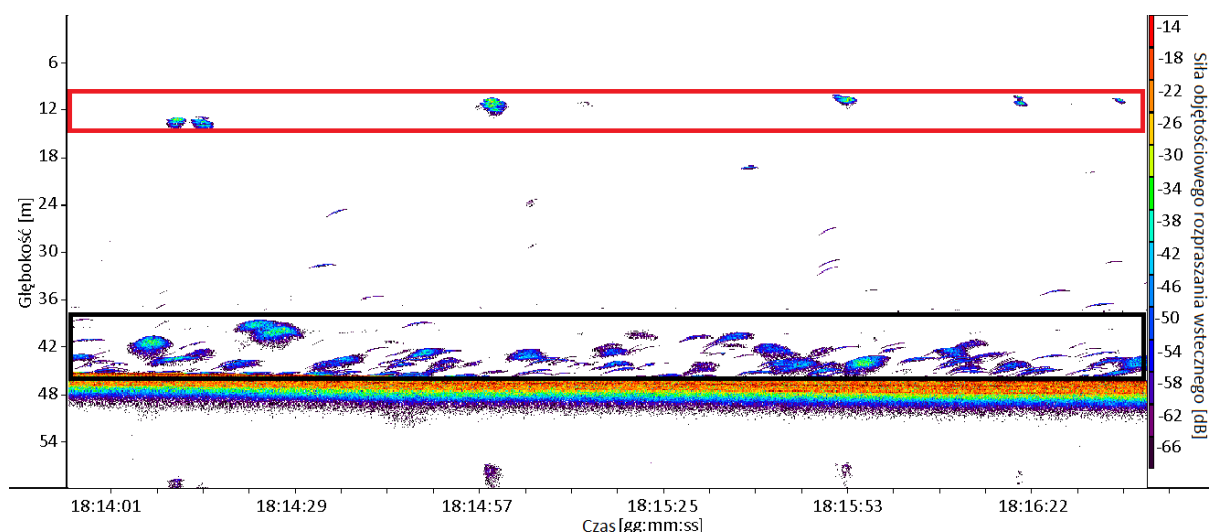
Rys. 5.19 Czasowe zmiany unormowanego momentu bezwładności rozkładu przestrzennego siły objętościowego rozpraszania wstecznego podczas wschodu słońca, kwiecień 2019.

5.3.2 Dobowa migracja pionowa organizmów podczas zachodu słońca. Kwiecień 2019

Opis przebiegu dobowej migracji pionowej

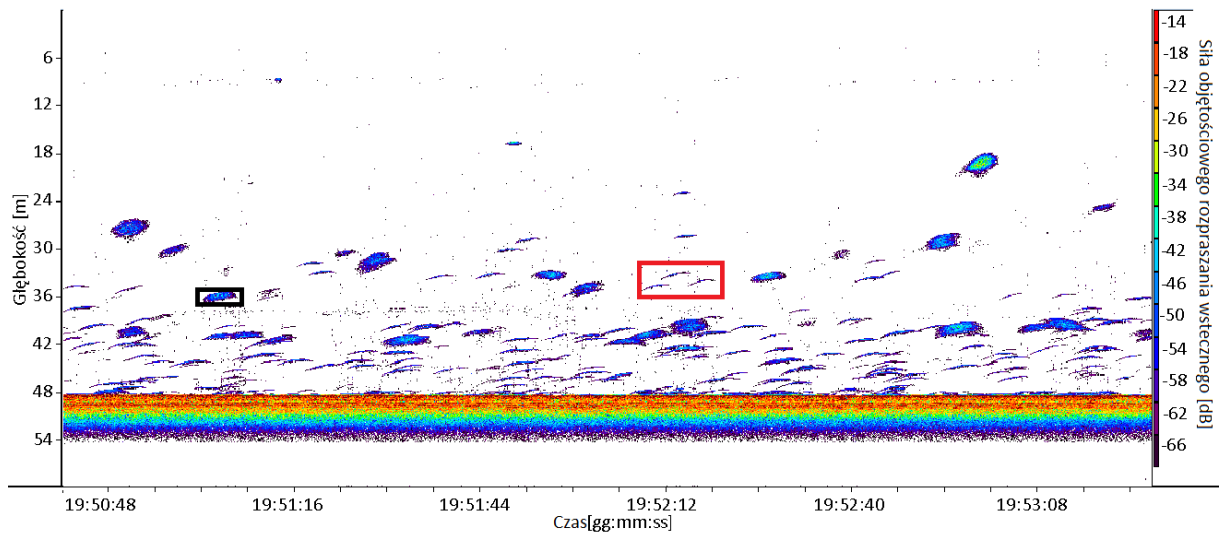
Dobowa migracja pionowa w sezonie wiosennym trwała około 2 godziny i 30 minut, od godziny 18:15 do godziny 20:50. Zachód słońca tego dnia (15/04/2019) był o godzinie 19:46, czyli migracja rozpoczęła mniej więcej na godzinę przed zachodem słońca.

Na Rys. 5.20 przedstawiono echogram z początkowym etapem migracji. Na początku organizmy znajdowały się w skupiskach (ławice akustyczne) i zajmowały one dwa zakresy głębokości w toni wodnej. Pierwszy zakres (mniej liczna grupa ławic), to okolice 12 m głębokości (czerwony prostokąt rysunku), drugi zaś (większa liczba skupisk) - od około 36 m głębokości do dna (czarny prostokąt).



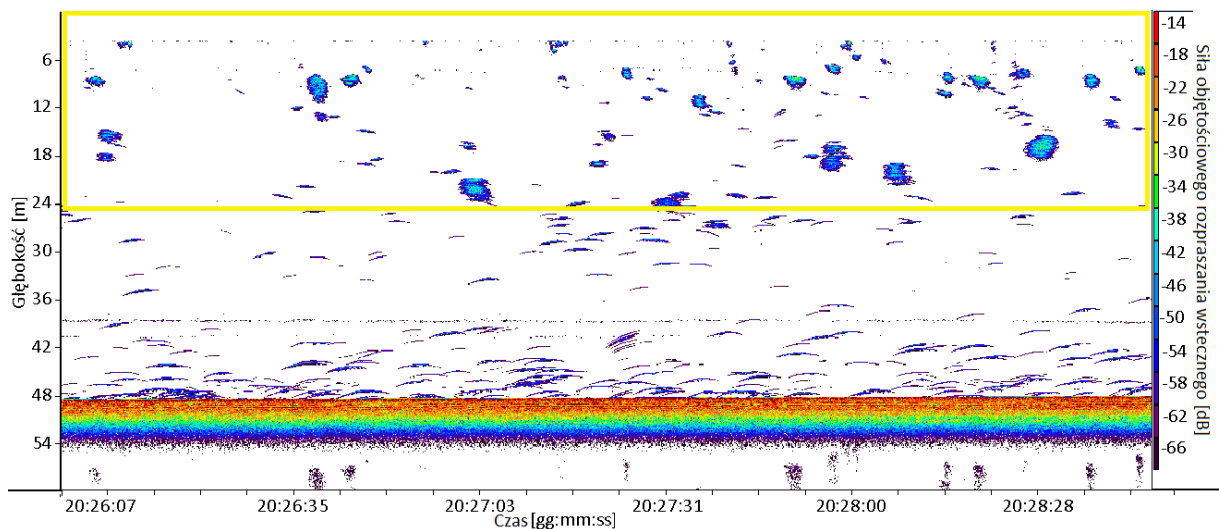
Rys. 5.20 Echogram przedstawiający początek dobowej migracji pionowej w górę podczas zachodu słońca pomiar wykonany z płynącego statku wzdłuż przekroju badawczego na Zatoce Puckiej. Kwiecień 2019.

Po upływie ponad jednej godziny od rozpoczęcia migracji, zaobserwowano przemieszczenie się skupisk w górę do głębokości około 18 m (Rys. 5.21). Oprócz samego przemieszczenia ku górze nastąpiło również rozproszenie się skupisk – pojawiły się pojedyncze organizmy. Przykłady oznaczone odpowiednio czarnym prostokątem oraz czerwonym prostokątem na Rys. 5.21.



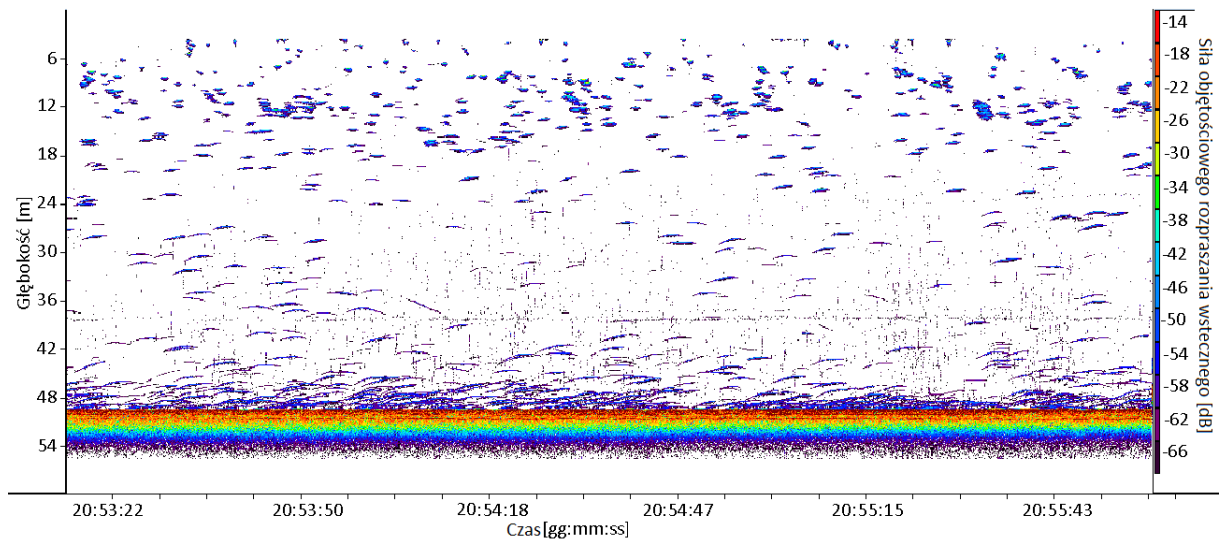
Rys. 5.21 Echogram po półtorze godzinie od rozpoczęcia dobowej migracji pionowej w górę podczas zachodu słońca pomiar wykonany z płynącego statku wzdłuż przekroju badawczego na Zatoce Puckiej. Kwiecień 2019.

Po ponad dwóch godzinach od rozpoczęcia migracji ławice akustyczne są obserwowane tylko na głębokościach mniejszych od 24 m (żółty prostokąt Rys. 5. 22), poniżej tej głębokości występują jedynie pojedyncze osobniki (Rys. 5. 22).



Rys. 5. 22 Echogram po ponad 2 godzinach od rozpoczęcia dobowej migracji pionowej w górę podczas zachodu słońca pomiar wykonany z płynącego statku wzdłuż przekroju badawczego na Zatoce Puckiej. Kwiecień 2019.

Po upływie dwóch i pół godziny od początku migracji w całej toni wodnej znajdują się wyłącznie pojedyncze organizmy, skupiska występują sporadycznie i wielkością są mniejsze niż te obserwowane podczas trwania migracji (Rys. 5. 23). Jest to typowy nocny obraz akustyczny.

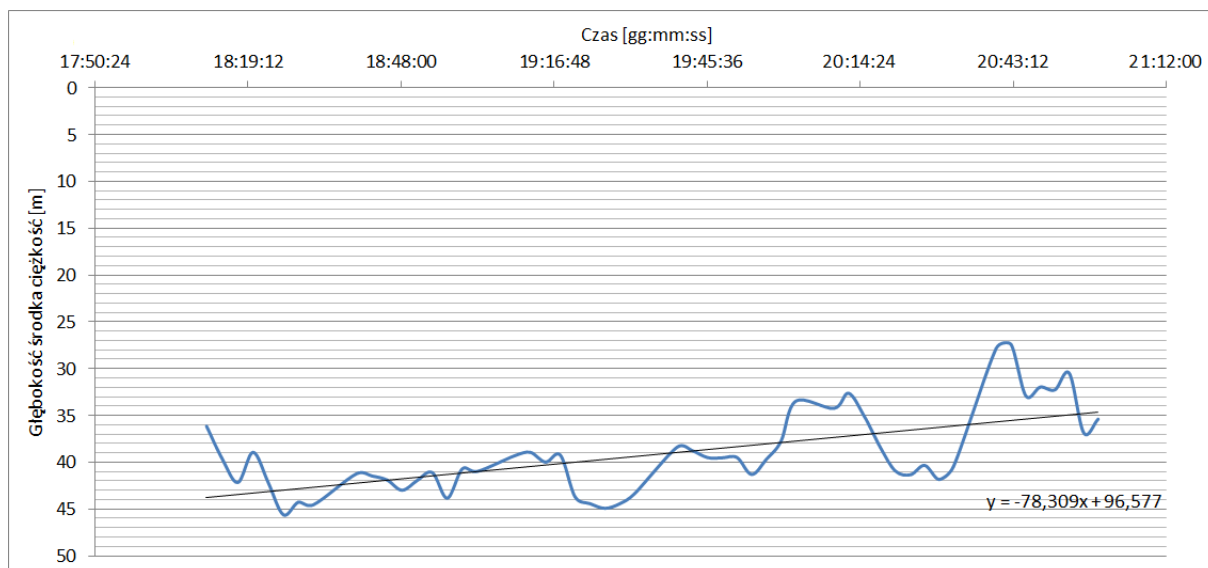


Rys. 5. 23 Obraz akustyczny w ciągu nocy (po zakończeniu migracji), dane zebrane podczas płynięcia statku wzdłuż przekroju badawczego pośrodku obszaru, gdzie rejestrowano dane hydroakustyczne w celu obserwacji dobowej migracji pionowej o zachodzie słońca. Kwiecień 2019.

O zachodzie słońca zaobserwowano następujące zmiany obrazu akustycznego: podnoszenie się ławic akustycznych w toni wodnej, ich rozproszenie się i pojawienie się pojedynczych celów rozpraszających w toni wodnej oraz formowanie się „nocnej” warstwy rozpraszającej przy dnie.

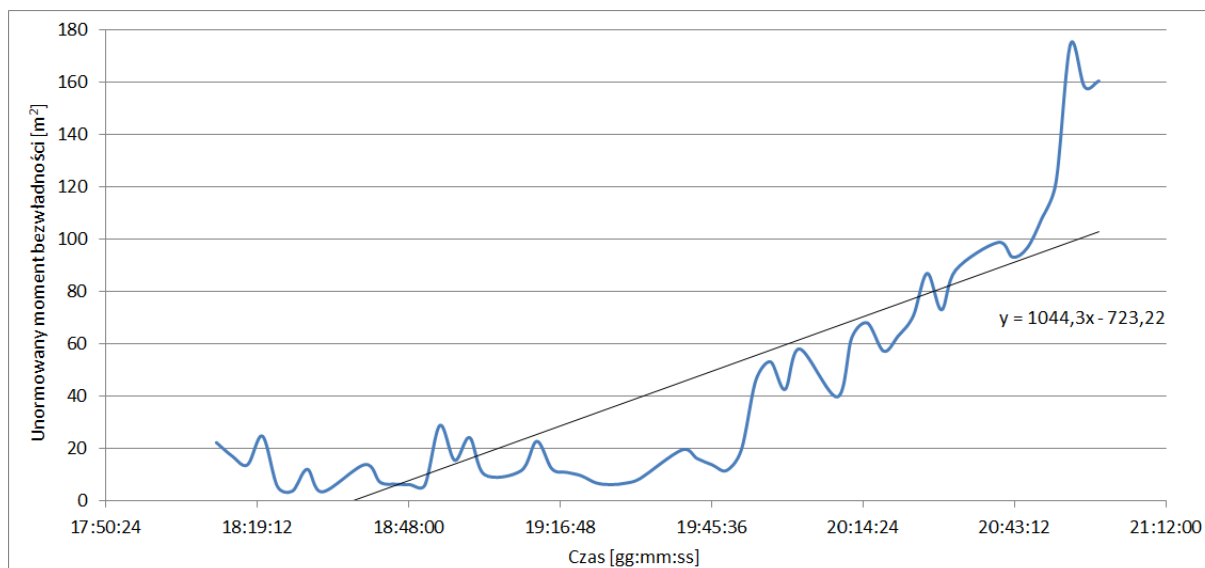
Analiza parametryczna – czasowe zmiany unormowanego momentu bezwładności oraz głębokości środka ciężkości rozkładu przestrzennego siły objętościowego rozpraszania wstecznego. Zachód słońca.

Na Rys. 5.24 zaprezentowano czasowe oraz przestrzenne zmiany głębokości środka ciężkości oraz linia regresji (czarna prosta) rozkładu przestrzennego siły objętościowego rozpraszania wstecznego. Głębokość środka ciężkości (na podstawie linii regresji) zmieniła się z 44 m do 35 m. Zmiana głębokości środka ciężkości jest większa niż podczas wschodu słońca. Jednak dalej nie oddaje w pełni obrazu wiosennej dobowej migracji pionowej. Podobnie jak podczas migracji o wschodzie słońca, wyznaczenie prędkości migracji na podstawie tego parametru byłoby nie rzetelne.



Rys. 5.24 Czasowe zmiany głębokości środka ciężkości rozkładu przestrzennego siły objętościowego rozpraszania wstecznego podczas zachodu słońca, kwiecień 2019.

Na Rys. 5.25 przedstawiono czasowe zmiany unormowanego momentu bezwładności oraz linie regresji (czarna prosta) dla danych przedstawionych na wykresie. Parametr ten zmieniał się w przedziale od 3 m² do 174 m². Oscylacja wartości parametru była mniejsza niż podczas wschodu słońca. Najszybszy wzrost rozpoczął się o 19:45. O tej godzinie organizmy dotarły już na głębokość 24 m, dalej jednak pozostając w skupiskach (Rys. 5.21). Jest to również godzina zachodu słońca, wtedy ławice akustyczne zaczęły się rozpraszac i zaobserwowano pojawienie się ech od pojedynczych osobników oraz rozprzestrzenianie się ich po całej toni wodnej. Pokazuje to zarówno wzrost unormowanego momentu bezwładności (Rys. 5.25) oraz echogramy (Rys. 5.22 oraz Rys. 5.23).



Rys. 5.25 Czasowe zmiany wartości unormowanego momentu bezwładności rozkładu przestrzennego siły objętościowego rozpraszania wstecznego podczas zachodu słońca, kwiecień 2019.

5.4 Dyskusja. Porównanie wzorców dobowych migracji pionowych w różnych sezonach

Dobowe migracje pionowe w sezonie wiosennym i jesiennym różnią się pod względem tego jak się przebiegają, oraz czasem ich rozpoczęcia względem wschodu czy zachodu słońca i czasem ich trwania, oraz pokonywaną przez organizmy odległością w pionie (amplitudą albo magnitudą migracji).

5.4.1 Różnica w przebiegu dobowej migracji pionowej (wzorzec migracji) w sezonach wiosennym i jesiennym

Zaobserwowano dwa różne wzorce dobowej migracji pionowej: jesienny i wiosenny. Jesienią zarejestrowano, że organizmy wędrowały zarówno w górę (o zachodzie słońca) jak i w dół (o wschodzie słońca) „wspólnie”. Przy tym zostało zaobserwowane, że o wschodzie słońca pojawiają się na obrazie ławice akustyczne, natomiast o zachodzie słońca rozpraszają się one i formuje się warstwa rozpraszająca oraz na obrazie akustycznym pojawiają się echa od pojedynczych osobników.

Natomiast wiosną wzorzec był bardziej skomplikowany, ponieważ ławice, zaobserwowane w dzień przy dnie, w nocy nie przemieszczały się ku powierzchni, ale rozpraszają się, formując warstwę rozpraszającą przy dnie. W kwietniu migracje wyglądały w sposób następujący:

- o wschodzie słońca zaobserwowano „przemieszczenie się” ech od pojedynczych osobników na mniejsze głębokości poniżej 10 metrów oraz formowanie się ławic akustycznych w toni wodnej na głębokości około 10 – 18 metrów. Zatem następowało formowanie się ławic akustycznych wewnątrz nocnej warstwy rozpraszającej poniżej 36 metrów głębokości;
- o zachodzie słońca zaobserwowano podnoszenie się ławic akustycznych, które w dzień znajdowały się w toni wodnej, ich rozproszenie się i pojawienie się pojedynczych celów rozpraszających w toni wodnej oraz formowanie się „nocnej” warstwy rozpraszającej przy dnie.

Pokazuje to, że na tym samym obszarze badawczym charakter dobowych migracji pionowych organizmów może się zmieniać w zależności od sezonu.

Fréon i in. (1996), prowadząc pomiary w okresie wiosennym, zauważyli, że organizmy podczas wschodu słońca tworzą skupiska. Natomiast podczas zachodu słońca, w zależności od wielkości skupiska, objętość poszczególnych skupisk się zwiększa albo rozpraszają się one całkowicie. Rozproszenie się skupisk o zachodzie słońca oraz ich pojawienie się o wschodzie potwierdziły również badania przeprowadzone na Morzu Bałtyckim: przez Orłowskiego (2001) w sezonie jesiennym, Szczucką (2003) w sezonie wiosennym i jesiennym, oraz Axenrot i in. (2004) w sezonie letnim. Fréon i Misund (1999) również zaznaczyli to w monografii poświęconej badaniom zachowania ryb pelagicznych.

Natomiast w odróżnieniu od niniejszej pracy Orłowski (2001) oraz Szczucka (2003), Axenrot i in. (2004), nie badali przebiegu procesu dobowych migracji pionowych o wschodzie i zachodzie słońca. Rozważano raczej migracje o prostym przebiegu (Szczucka, 2000, 2003). Nie badano również sezonowej zmienności wzorców dobowych migracji pionowych organizmów.

5.4.2 Czas rozpoczęcia dobowych migracji pionowych względem momentu zachodu i wschodu słońca oraz czas ich trwania w sezonach wiosennym i jesiennym

Tabela 5.1 zawiera zestawienie czasu rozpoczęcia migracji organizmów o zachodzie i wschodzie słońca (odpowiednio kolumna pierwsza i trzecia tabeli) w sezonie jesiennym (wiersz drugi) oraz wiosennym (wiersz trzeci). Kolumna druga i czwarta zawierają informację o czasie trwania migracji odpowiednio podczas zachodu i wschodu słońca.

Tab. 5.1 Zestawienie czasu rozpoczęcia migracji względem wschodu/zachodu słońca oraz czasu trwania migracji dla sezonów jesiennego i wiosennego.

| Sezon | <i>Czas rozpoczęcia migracji w dół względem wschodu słońca</i> | <i>Czas trwania migracji w dół o wschodzie słońca</i> | <i>Czas rozpoczęcia migracji w górę względem zachodu słońca</i> | <i>Czas trwania migracji w górę o zachodzie słońca</i> |
|----------------------|---|--|--|---|
| <i>jesień</i> | 1 godzina 10 minut przed wschodem słońca | 1 godzina 15 minut | około 2 godziny przed zachodem słońca | 1 godzina 30 minut |
| <i>wiosna</i> | 2 godziny 37 minut przed wschodem słońca | 2 godziny i 40 minut | około godziny przed zachodem słońca | 2 godziny i 35 minut |

W badaniach prowadzonych w przeszłości zaobserwowano, że czas trwania migracji różni się w zależności od szerokości geograficznej oraz od pory roku (Fréon i in. 1996). Różnice sezonowe zaobserwowano również w niniejszych badaniach (Tab. 5.1). Należy zwrócić uwagę na to, że migracje zarówno o wschodzie i zachodzie słońca, w sezonie wiosennym trwały dłużej niż w sezonie jesiennym. Natomiast, dla każdego z sezonów migracje o wschodzie jak i o zachodzie słońca trwały podobny czas: jesienią – od ok. godziny i piętnaście minut do półtorej godziny, zaś wiosną - około 2 godzin i 40 minut. Różnica w czasie migracji między jesienią a wiosną wynosiła ponad godzinę, zarówno dla migracji w dół jak i w górę. Różnica ta może być związana z różnicą temperatury kolumny wody: w październiku wynosiła ona około 12°, tym czasem w kwietniu 6° – 8°, co mogło spowodować większą aktywność organizmów w sezonie jesiennym (Levinton, 2001).

Analiza Tabeli 5.1 pokazała również, że od sezonu zależy czas rozpoczęcia migracji względem wschodu/zachodu słońca. Jesienią i wiosną migracja w górę rozpoczynała się odpowiednio około 2 godzin i około godziny przed zachodem słońca. Jesienią migracja ta kończyła się około 30 minut przed zachodem słońca, natomiast wiosną - półtorej godziny po zachodzie słońca.

Jesienią i wiosną migracja w dół rozpoczynały się odpowiednio około 1 godzin i 10 minut oraz 2 godzin i 37 minut przed wschodem słońca. Kończyły się zaś dla obu sezonów blisko godziny wschodu słońca.

Obserwacje prowadzone na Głębi Gdańskiej w latach 1991-2001, pokazały, że pionowa migracja w różnych sezonach, w większości zarejestrowanych przypadków rozpoczynała się

tuż przed wschodem (migracja w dół), lub tuż po zachodzie (migracja w górę), a czas migracji wynosił poniżej 1 godziny (Szcucka, 2003). W pracy Orłowskiego (2001), gdzie przedstawiono wyniki badań prowadzonych w głębokowodnej części Zatoki Gdańskiej i otwartego morza przy Polskim wybrzeżu w październiku, lata 1989-1999, zamieszczono informację, że migracja w górę zaczynała się przed zachodem, a migracja w dół - razem ze wschodem słońca. Natomiast w badaniach prowadzonych przez Axenrot i in. (2004) w strefie przybrzeżnej północno zachodniej części Bałtyku, od końca lipca do początku sierpnia, o wschodzie słońca proces migracji rozpoczynał się około 30 minut przed wschodem, a o zachodzie słońca - około 15 – 30 minut po zachodzie. Czyli nawet na jednym akwenu, na Morzu Bałtyckim, godziny rozpoczęcia i zakończenia migracji różnią się dla różnych części akwenu.

5.4.3 Czas pojawiania i rozproszenia się ławic akustycznych względem początku migracji oraz względem wschodu i zachodu słońca. Kwiecień 2019.

Pojawienie się i rozproszenie ławic akustycznych względem wschodu i zachodu słońca

Badania przeprowadzone w kwietniu, w szczególności wykres zmian unormowanego momentu bezwładności (Rys. 5.19 i Rys. 5.25) pokazują, że owszem, migracja o zachodzie słońca rozpoczęła się około godziny przed zachodem, natomiast najszybszy wzrost jego wartości, związany z rozproszeniem się ławic rozpoczął się właśnie o godzinie zachodu słońca. Fréon i in. (1996) również zauważali, że rozproszenie ławic rozpoczyna dokładnie o zachodzie słońca.

Axenrot i in. (2004), podczas badań w strefie przybrzeżnej (średnia głębokość dna 20 m) Morza Bałtyckiego w jego północno-zachodniej części, zaobserwowali w okresie letnim więc innym niż omawiany w tej pracy, że ławice akustyczne pojawiają się około 20-30 minut przed wschodem słońca, a znikają 30 minut po zachodzie słońca. Niniejsze badania, które dotyczą Zatoki Puckiej oraz sezonu wiosennego, pokazują odmienny obraz. Pierwsze ławice akustyczne pojawiają się już na półtorej godziny przed wschodem słońca (wcześniej niż u Axenrot i in. (2004)), tym czasem jak znikają ostatecznie półtorej godziny po zachodzie słońca (później niż u Axenrot i in. (2004)).

W październiku ze względu na inny sposób zbierania danych podczas migracji (zbieranie danych z dryfującego i zakotwiczonego statku), nie udało się zaobserwować momentu rozproszenia się tworzenia się ławic akustycznych.

Pojawienie się i rozproszenie ławic akustycznych względem czasu rozpoczęcia migracji

Przeprowadzone badania pokazały, że w kwietniu cały proces migracji trwa podobny czas o wschodzie i o zachodzie słońca (Tabela 5.1). Jednak podczas wschodu słońca pierwsze ławice pojawiają się już po jednej godzinie od rozpoczęcia się migracji, natomiast podczas zachodu wiele ławic (co prawda o mniejszych wymiarach) jest jeszcze widocznych na echogramie po dwóch godzinach od rozpoczęcia migracji.

Fréon i in. (1996), tak samo jak w niniejszych badaniach, zauważyli, że dynamika procesów formowania się ławic (o wschodzie słońca) oraz ich rozpraszania się (o zachodzie słońca) jest różna: szybka agregacja w ławice o świcie i wolniejsze ich rozpraszanie się o zmierzchu. Badania te były prowadzone również na wiosnę tylko na innym akwenie (Morze Śródziemne).

Natomiast model przedstawiony w pracy Azzali i in. (1985), pokazuje sytuację odwrotną: szybkie rozproszenie się skupisk o zmierzchu oraz wolniejsze ich reformowanie o świcie. Model ten nie sprawdził się dla obszaru badanego w tej pracy.

5.4.4 Sezonowe różnice w pionowej amplitudzie (magnitudzie) migracji

Organizmy w różnych sezonach pokonywały różną odległość w pionie, podczas migracji dobowych. Różnice te widoczne są zarówno na echogramach (Rys. 3.2, Rys. 3.3, Rys. 3.5, Rys. 3.6, Rys. 3.8, Rys. 3.9, Rys. 3.11, Rys. 3.12) jak i na histogramach dla głębokości środka ciężkości rozkładu przestrzennego siły objętościowego rozpraszania wstecznego (Rys. 4.1, Rys. 4.3, Rys. 4.8, Rys. 4.9) Różnica ta wynika między innymi z różnego wzorca migracji jak zostało to przedyskutowane dla sezonów wiosennego i jesiennego wyżej w podrozdziale 5.4.1.

W Tabeli 5.2 w kolumnach drugiej i trzeciej przedstawiono średnie głębokości środka ciężkości dla okresów dziennego i nocnego dla różnych sezonów pomiarowych. Informacje te są istotne, bo pokazują kierunek migracji o wschodzie i zachodzie słońca - odpowiednio w dół i do góry.

W Tabeli 5.2 w kolumnie czwartej przedstawiono różnicę średnich głębokości środka ciężkości rozkładu przestrzennego siły objętościowego rozpraszania wstecznego dla okresów dziennego i nocnego. Różnica ta odzwierciedla amplitudę migracji dla sezonów zimowego i jesiennego, gdy wzorzec migracji był stosunkowo prosty. Organizmy pokonują większe

odległości podczas migracji w cieplejszym sezonie jesiennym (różnica średnich głębokości środka ciężkości rozkładu przestrzennego siły objętościowego rozpraszania wstecznego wynosi 23 m) w porównaniu do sezonu zimowego (10,7 m), gdzie temperatura była niższa niż w sezonie jesiennym o ok. 7° C. Jest to widoczne dobrze na echogramach (Rys. 3.2, Rys. 3.3 oraz Rys. 3.5, Rys. 3.6). Dla sezonu jesiennego w porównaniu do sezonu zimowego jest większe prawdopodobieństwo obecności pokarmu dla migrujących organizmów w górnej warstwie toni wodnej, co również mogło być przyczyną większej amplitudy migracji w sezonie jesiennym.

Natomiast dla wiosny i lata w związku ze skomplikowanym charakterem migracji wartości przedstawione w ostatniej kolumnie Tabeli 5.2 raczej nie dają reprezentatywnych informacji o odległościach pokonywanych przez migrantów w pionie.

Tab. 5.2 Średnie głębokości środka ciężkości rozkładu przestrzennego siły objętościowego rozpraszania wstecznego dla okresów dziennego i nocnego dla różnych sezonów pomiarowych

| Sezon pomiarowy | Średnia głębokość środka ciężkości (dzień) | Średnia głębokość środka ciężkości (noc) | Różnica średnich głębokości |
|-----------------|--|--|-----------------------------|
| jesień | 38,9 m | 15,9 m | 23 m |
| zima | 46,7 m | 36,0 m | 10,7 m |
| wiosna | 44,3 m | 38,0 m | 6,3 m |
| lato | 35,6 m | 27,9 m | 7,7 m |

Szczucka (2000, 2003) również obserwowała zmienność sezonową amplitudy migracji dla dwóch sezonów – zimowego i wiosennego, dla którego w odróżnieniu od opisanego w tej pracy wiosennego sezonu schemat migracji nie był skomplikowany. Wykazano, że dla tych okresów organizmy wędrują między głębokością halokliny (ok. 80 m głębokości), gdzie przebywają one w dzień, a głębokością 75 m w nocy w sezonie zimowym oraz głębokością 30-40 m w wiosennym okresie. Ta różnica amplitudy migracji, jak pisze autorka jest związana z różnicą temperatury w kolumnie wody. W zimę wynosiła ona 3 stopnie Celsjusza od powierzchni morza do głębokości 75 metrów, natomiast w sezonie wiosennym była wyższa o 2-3 stopni Celsjusza w zależności od głębokości (im płycej tym cieplej). Można było również zauważyć początek wiosennego zakwitu fitoplanktonu. Oznacza to, że dążenie organizmów do

mniejszych głębokości w nocy w sezonie wiosennym mogła również stymulować obecność pokarmu.

5.4.5 Prędkość dobowych migracji pionowych

W Tabeli 5.3 przedstawiono prędkości dobowych migracji pionowych określone w badaniach prowadzonych na Bałtyku (Orłowski, 2001; Szczucka, 2003; Schmidt i Szczucka 2010; Pezacki i in. 2018) oraz w niniejszej rozprawie. Tabela dodatkowo zawiera informacje dotyczące: miejsca badań, sezonu badawczego oraz metody wyznaczania prędkości. W ostatniej kolumnie tabeli „Prędkości dobowych migracji pionowych”, umieszczono również informacje czy podane wartości prędkości dotyczą migracji podczas wschodu czy zachodu słońca. Brak takiej informacji dla dwóch pierwszych publikacji oznacza, że nie zaobserwowano różnicy w prędkościach dobowych migracji pionowych o wschodzie i zachodzie słońca.

Podczas porównania wyników dla Zatoki Puckiej z wynikami otrzymanymi przez innych badaczy, wzięto pod uwagę metodę określania prędkości migracji. Stosowano przez badaczy na Bałtyku dwie metody - pierwsza metoda to wyznaczenie prędkości migracji pionowej na podstawie analizy zmiany głębokości środka ciężkości rozkładu siły objętościowego rozpraszania wstecznego (w tabeli jest oznaczona jako „Metoda 1”). Drugą metodą polega na bezpośrednim pomiarze prędkości za pomocą prądomierza akustycznego Acoustic Doppler Current Profiler (ADCP), urządzenie to wykorzystuje efekt Dopplera do mierzenia prędkości (oznaczona jako „Metoda 2” w tabeli). W Tabeli 5.3 przedstawione zostały średnie prędkości dobowych migracji pionowych, zmierzonych przez ADCP podczas dobowych migracji pionowych.

Tab. 5.3 Zestawienie wyników badań prędkości dobowych migracji pionowych, na Morzu Bałtyckim.

| Publikacja | Miejsce badań | Sezon badawczy | Metoda badań | Prędkości dobowych migracji pionowych |
|-------------------------|-----------------------------------|----------------|--------------|--|
| Orłowski, 2001 | Bałtyk Południowy | Jesień | Metoda 1 | większe od 0,17 cm/s |
| Szczucka, 2003 | Głębia Gdańska | Wiosna, jesień | Metoda 1 | 0,50 – 2,00 cm/s |
| Schmidt i Szczucka 2010 | Otwarte wody Bałtyku Południowego | Lato | Metoda 2 | 0,22cm/s (wschód słońca) 0,18 cm/s (zachód słońca) |
| | | | Metoda 1 | 0,18cm/s (wschód słońca) 0,20 cm/s (zachód słońca) |
| Pezacki i in., 2018 | Zatoka Gdańska | Wiosna | Metoda 2 | 0,50cm/s (wschód słońca) |
| | | | Metoda 1 | 0,70 cm/s |
| Niniejsza rozprawa | Zatoka Pucka | Jesień | Metoda 1 | 0,48 cm/s (wschód słońca) 0,30 cm/s (zachód słońca) |

Prędkości migracji uzyskane na podstawie zmian środka ciężkości rozkładu przestrzennego siły objętościowego rozpraszania wstecznego w okresie jesiennym wynosiły: podczas wschodu słońca 0,48 cm/s i podczas zachodu 0,30 cm/s (podrozdział 5.2). Prędkości migracji w sezonie wiosennym byłyby zaniżone, gdyby zostały wyznaczone na podstawie zmian głębokości środka ciężkości rozkładu przestrzennego siły objętościowego rozpraszania wstecznego, ze względu na ich skomplikowany charakter. W celu określenia prędkości migracji w sezonie wiosennym, należałoby przeprowadzić pomiary z wykorzystaniem prądomierza akustycznego ADCP, jak to zostało zrealizowane w niżej cytowanych pracach (Schmidt i Szczucka 2010, Pezacki i in., 2018).

Różnica prędkości dobowych migracji pionowych o wschodzie i zachodzie słońca

W niniejszej rozprawie wykazano, że prędkość dobowej migracji pionowej podczas zachodu słońca była mniejsza o 0,18 cm/s niż podczas wschodu. Schmidt i Szczucka (2010) dla otwartych wód południowego Bałtyku w sezonie letnim, również wykazały różnicę w prędkościach migracji o wschodzie i zachodzie słońca, jednak różnica ta, określona za pomocą Metody 1, jest mniejsza niż dla pomiarów prowadzonych w ramach niniejszej rozprawy. Analiza zmiany głębokości środka ciężkości pokazała: prędkość o zachodzie słońca jest większa o 0,02 cm/s w porównaniu do prędkości o wschodzie słońca. Pomiary, przeprowadzone przez tych samych autorów, za pomocą urządzenia ADCP (Metoda 2) wykazały odwrotny stosunek: prędkość migracji jest większa o wschodzie niż o zachodzie słońca o 0,04 cm/s. Niniejsze badania w odróżnieniu od badań Schmidt i Szczucką (2010) prowadzono na innym obszarze oraz w innym sezonie: w niniejszej rozprawie - jesienią, natomiast w (Schmidt i Szczucka, 2010) – latem. W pozostałych publikacjach brakuje informacji o różnicy w prędkości dobowych migracji pionowych w dół (wschód słońca) i w górę (zachód słońca).

Różnica prędkości dobowych migracji pionowych dla różnych obszarów badawczych i różnych sezonów

Orłowski (2001) prowadząc badania dobowych migracji pionowych organizmów głównie na wodach otwartego morza wzdłuż Polskiego wybrzeża oraz głębokowodnej części Zatoki Gdańskiej, na podstawie danych hydroakustycznych, uśrednionych po dużych skalach przestrzennej dla sezonów jesiennych w latach 1989-1999, wyznaczył prędkości dobowych migracji pionowych (Metoda 1). Wynosiła ona ponad 0,17 cm/s dla każdej migracji zarówno o wschodzie jak i zachodzie słońca.

Badania przeprowadzone na Głębi Gdańskiej (Szcucka, 2003), pokazały, że w zależności od warunków środowiskowych zmiennych sezonowo (badania prowadzono wiosną i jesienią), prędkości dobowych migracji pionowych wynoszą od 0,5 cm/s do 2 cm/s zarówno podczas zachodu i wschodu słońca (Metoda 1). Wartości te są wyższe niż wartości uśrednione (Orłowski, 2001)

Kolejne badania przeprowadzono na otwartych wodach Bałtyku Południowego na jednej stacji umiejscowionej na północ od półwyspu Helskiego w okresie letnim (Schmidt i Szcucka, 2010). Wyznaczone prędkości dobowych migracji pionowych (Metoda 1) wynosiły od 0,18 cm/s do 0,22 cm/s. Wyniki te są zbliżone do uśrednionej prędkości uzyskanej dla Bałtyku Południowego dla sezonu jesiennego (Orłowski, 2001).

Inne badania przeprowadzono w okresie wiosennym na Zatoce Gdańskiej na stacji umieszczonej od zewnętrznej strony półwyspu Helskiego w pobliżu miasta Hel. Wykazały one większe prędkości dobowych migracji pionowych: 0,5 cm/s – 0,7 cm/s (Pezacki i in. 2018) niż średnie prędkości wyznaczone przez Orłowskiego (2001).

Natomiast badania prędkości dobowej migracji pionowej w niniejszej pracy, przeprowadzone dla Zatoki Puckiej w okresie jesiennym, pokazały, że: prędkości te są wyższe niż uzyskane na Bałtyku Południowym zarówno dla sezonu jesiennego oraz letniego odpowiednio w (Orłowski, 2001) i (Schmidt i Szcucka, 2010), ale mniejsze od prędkości migracji uzyskanych na Głębi Gdańskiej (Szcucka, 2003) oraz wiosną na głębokowodnej części Zatoki Gdańskiej (Pezacki i in., 2018).

Największe prędkości dobowych migracji pionowych, zaobserwowano w sezonie wiosennym, w głębokowodnej części Zatoki Gdańskiej (Pezacki i in. 2018) oraz na Głębi Gdańskiej (Szcucka 2003). Pomiary prędkości dobowych migracji pionowych przeprowadzone w sezonach jesiennych na Głębi Gdańskiej (Szcucka 2003) oraz na Zatoce Puckiej, dały zbliżone wyniki do tych uzyskanych w sezonie wiosennym (Pezacki i in. 2018). Jedynie badania przeprowadzone na wodach otwartego morza wzdłuż Polskiego wybrzeża (Orłowski, 2001) w sezonie jesiennym wykazały ponad dwa razy mniejsze prędkości migracji niż te uzyskane jesienią w pozostałych badaniach, prawdopodobnie jest to spowodowane dużym uśrednieniem zarówno w skali czasowej jak i przestrzennej.

Natomiast sezon letni charakteryzuje się mniejszymi prędkościami migracji w stosunku do sezonów jesiennego i wiosennego (Schmidt i Szcucka, 2010).

Wpływ metody badawczej na wartości wyznaczonych prędkości dobowych migracji pionowych

Użycie różnych metod badawczych, może dać różne wyniki dla prędkości dobowych migracji pionowych. Aby zrozumieć skąd wynika ta różnica należy zdać sobie sprawę z tego co jest mierzone przy wykorzystaniu dwóch wspomnianych metod badawczych. Pierwsza metoda pozwala określić prędkość dobowej migracji pionowej na podstawie analizy zmiany pozycji środka ciężkości rozkładu przestrzennego siły objętościowego rozpraszania wstecznego. Oznacza to, że nie jest określana bezpośrednio prędkość samych organizmów, ale prędkość zmiany położenia środka ciężkości dla rozkładu przestrzennego siły objętościowego rozpraszania wstecznego w toni wodnej, na którą prędkości migracji mają wpływ. Druga metoda, pomiar prędkości za pomocą urządzenia ADCP, pozwala zmierzyć chwilową prędkość organizmów które znajdują się w wiązkach akustycznych przetworników urządzenia.

Porównując wyniki pomiaru prędkości dobowej migracji pionowych uzyskanych za pomocą powyższych dwóch metod można zauważyć, że dla badań przeprowadzonych dla otwartych wód Południowego Bałtyku (Schmidt i Szczucka, 2010) różnica w wynikach była rzędu 0,02 – 0,04 cm/s, z tym, że o wschodzie większa prędkość dobowych migracji pionowych dały pomiary z ADCP, a o zachodzie większa prędkość migracji została wyznaczona z analizy zmiany położenia środka ciężkości. Inne badania również wykorzystujące te dwie metody badawcze przeprowadzone w głębokowodnej części Zatoki Gdańskiej (Pezacki i in. 2018), pokazały różnice na poziomie 0,2 cm/s dla migracji o wschodzie słońca.

Należy również zwrócić uwagę i na następujące aspekty metodologiczne:

1. Badania przeprowadzone wzdłuż całego Polskiego wybrzeża między innymi nad prędkością dobowych migracji pionowych wykazały średnią prędkość ponad 0,17 cm/s (Orłowski, 2001). Jednak prędkość ta jest uśredniona w dużej skali czasu na przestrzeni 10 lat. Kolejne badania prowadzone na mniejszych obszarach i w mniejszych interwałach czasowych pokazały, że zmienność prędkości dobowych migracji pionowych w zależności od sezonu i obszaru badań. Badania przeprowadzone na Głębi Gdańskiej (Szczucka, 2003) wykazały większe prędkości dobowych migracji pionowych (0,5 – 2,0 cm/s), niż średnia dla wszystkich obszarów znajdujących się wzdłuż linii brzegowej Polski. Również wyniki pomiarów przeprowadzonych na Zatoce Gdańskiej (Pezacki i in. 2018) oraz Zatoce Puckiej (niniejsza rozprawa) były większe niż średnia wyznaczona przez Orłowskiego (2011). Sumując, porównanie wyników

otrzymanych na różnych obszarach między sobą oraz z ogólną średnią (Orłowski, 2001), pokazuje, że różnice te mogą być znaczące. Oznacza to, że dalsze badania powinny być prowadzone w małej skali przestrzennej i dla różnych sezonów.

2. Również metoda badawcza może mieć wpływ na uzyskany wynik, zatem przy wyborze metody badawczej należy więc pamiętać na jakiej zasadzie wyznaczana jest prędkość dobowej migracji pionowej, aby w odpowiednio sposób interpretować wyniki oraz odpowiednio stosować metody.
3. Przed wykorzystaniem metody wyznaczenia prędkości migracji na podstawie określenia zmiany pozycji środka ciężkości rozkładu przestrzennego siły objętościowego rozpraszania wstecznego, należy wyjaśnić szczegółowy przebieg migracji dobowej. Dobrym przykładem w niniejszej pracy jest sytuacja opisana dla okresu wiosennego, gdzie ze względu na charakter dobowej migracji pionowej wiarygodność wyników wyznaczenia prędkości na podstawie zmiany głębokości środka ciężkości rozkładu przestrzennego siły objętościowego rozpraszania wstecznego, byłaby zaniżona. Jednak, gdyby zastosowano urządzenie ADPC, można by było określić te prędkości w sposób wiarygodny.

5.5 Podsumowanie

W Rozdziale 5 przeanalizowano szczegółowy przebieg dobowej migracji pionowej dla dwóch sezonów wiosennego i jesiennego. Przenalizowano godziny rozpoczęcia i trwania migracji o zachodzie i wschodzie słońca dla sezonów wiosennego i jesiennego, jak również i sezonową zmienność amplitudy migracji (dla wszystkich sezonów). Określono prędkość dobowych migracji pionowych o wschodzie i zachodzie słońca dla sezonu jesiennego. Porównano wyniki dla Zatoki Puckiej z wynikami otrzymanymi na innych obszarach Bałtyku Południowego w tym w Zatoce Gdańskiej, na otwartych wodach Bałtyku Południowego przy Polskim wybrzeżu oraz na Głębi Gdańskiej. Można przedstawić następujące wnioski:

1. Wzorzec dobowej migracji pionowej na wybranym poligonie Zatoki Puckiej zależy od sezonu. Zastosowana metodyka (hydroakustyczne pomiary, prowadzone w sposób ciągły podczas trwania migracji) pozwoliła na wgląd w jaki sposób organizmy się przemieszczają w toni wodnej podczas migracji. Jesienią zaobserwowano jednolity charakter zachowania się organizmów podczas dobowej migracji pionowej zarówno o wschodzie i zachodzie słońca. Podczas migracji w górę w czasie zachodu słońca

ławice akustyczne łączyły się w warstwę rozpraszającą w górnej części toni wodnej, a podczas migracji w dół o wschodzie słońca z warstwy rozpraszającej formowały się ławice akustyczne. Podczas dobowych migracji pionowych wiosną nie zaobserwowano jednolitego charakteru zachowania się organizmów: organizmy znajdujące się w warstwie przydennej o większym zasoleniu, pozostając w tym samym zakresie głębokości, zmieniały charakter występowania – w dzień zaobserwowano ławice hydroakustyczne w warstwie przydennej, tym czasem jak w nocy w tym zakresie głębokości zaobserwowano warstwę rozpraszającą. Z kolei druga grupa organizmów, w dzień skupiona w ławicach w toni wodnej na mniejszych głębokościach, w nocy rozpraszała się w toni wodnej zbliżając się również ku powierzchni morza.

2. Wykazano w jaki sposób na Zatoce Puckiej czas rozpoczęcia dobowych migracji pionowych oraz czas ich trwania zarówno o wschodzie i zachodzie słońca zależy od sezonu: dobowe migracje pionowe zarówno o wschodzie i zachodzie słońca na wiosnę trwają dłużej niż na jesień, i rozpoczynają się wcześniej względem wschodu słońca i później względem zachodu słońca w porównaniu z jesienią. Czas trwania dobowej migracji pionowej w Zatoce Puckiej, w sezonie jesiennym, był dłuższy niż na otwartych wodach Morza Bałtyckiego
3. W odróżnieniu od badań przeprowadzonych dla południowego Bałtyku, zwrócono uwagę na czas formowania się ławic o wschodzie słońca podczas dobowej migracji pionowej oraz czas ich rozformowania się podczas migracji o zachodzie słońca (sezon wiosenny). Pokazano, że proces przebiega szybciej o wschodzie niż o zachodzie słońca.
4. Określono zmienność amplitudy dobowych migracji pionowych zarówno o wschodzie i zachodzie słońca w zależności od sezonu. W lutym amplituda dobowej migracji pionowej była mniejsza niż w październiku czy kwietniu. Amplituda migracji nie zawsze może być określona na podstawie zmiany głębokości środka ciężkości, w miesiącach kwietniu i lipcu wzorzec migracji był bardziej skomplikowany - dobowe migracje pionowe przebiegały w różny sposób dla różnych grup organizmów.
5. Prędkości dobowych migracji pionowych udało się wyznaczyć jedynie dla sezonu jesiennego na podstawie zmian głębokości środka ciężkości rozkładu przestrzennego

siły objętościowego rozpraszania wstecznego. Porównując wyniki z innymi obszarami Bałtyku uzyskanymi za pomocą tej samej metody zaobserwowano, że:

- a. na Głębi Gdańskiej w sezonie jesiennym i wiosennym, oraz na głębokowodnej części Zatoki Gdańskiej w sezonie wiosennym prędkości migracji były większe niż na Zatoce Puckiej w sezonie jesiennym,
- b. prędkości dobowych migracji pionowych o wschodzie i zachodzie słońca w Zatoce Puckiej są większe niż średnia wartość dla obszaru całego Bałtyku Południowego dla sezonu jesiennego.

6. Charakterystyka „spektralna” przestrzennego rozkładu siły objętościowego rozpraszania wstecznego (ang. – frequency response - odpowiedź częstotliwościowa) – rozpraszanie na skupiskach organizmów w Zatoce Puckiej. Zmienność dobową i sezonową

Identyfikacja gatunków organizmów morskich jest istotna przy akustycznym oszacowaniu ich liczebności i biomasy (Korneliussen, 2018). W akustycznej klasyfikacji kluczowym jest określenie charakterystycznych cech rozpraszania wstecznego różnych grup (m.in. gatunków) organizmów.

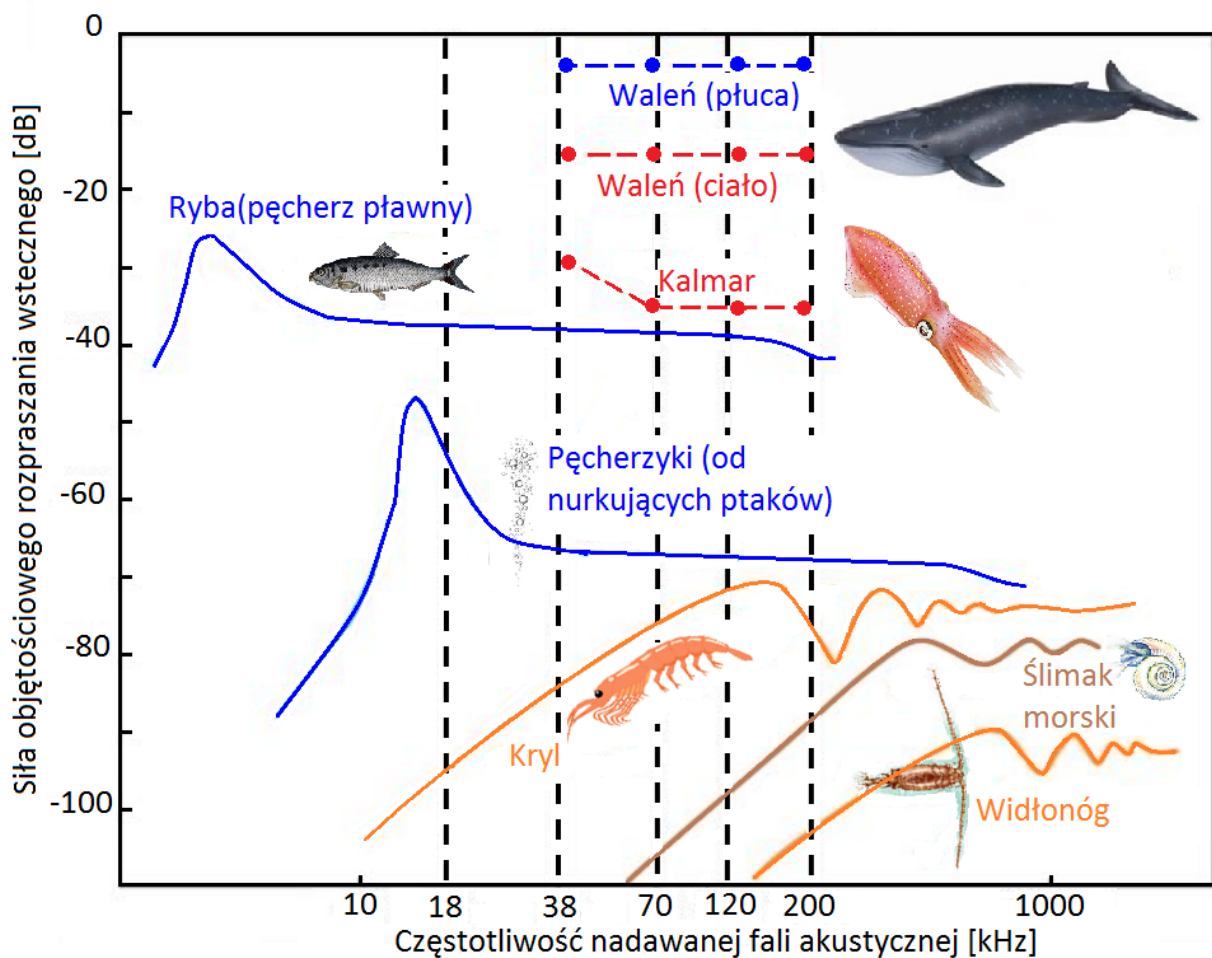
Odpowiedź częstotliwościowa, która pozwala na porównanie siły objętościowego rozpraszania wstecznego tego samego obiektu dla różnych częstotliwości nadawanych fal akustycznych, jest wykorzystywana w badaniach hydroakustycznych w celu rozróżnienia grup organizmów morskich np. gatunków ryb czy zooplanktonu. (Horne, 2000; Kang i in., 2002; Kloster i in., 2002; Korneliussen i Ona, 2002; Fernandes i in., 2006; Everson i in., 2007; Axenrot i in., 2009; Korneliussen i in., 2009; Fässler, 2010; Benoit-Bird i Lawson, 2016). Metoda ta również sprawdza się podczas odróżnienia obiektów biologicznych od obiektów fizycznych takich jak np. pęcherzyki gazowe (Horne, 2000).

Odpowiedź częstotliwościowa jest zróżnicowana dla różnych gatunków zwierząt (Rys. 6.1). Rysunek ten jest zaadaptowaną reprodukcją Rysunku 2 z publikacji (Benoit-Bird i Lawson, 2016). Różnica morfologii organizmów oraz ich zachowania odpowiada za różnicę właściwości rozpraszających tych organizmów. Rys. 6.1 przedstawia przebieg średniej siły objętościowego rozpraszania wstecznego (oś Y) względem częstotliwości nadawanej fali akustycznej (oś X (skala logarytmiczna)) dla różnych organizmów z uwzględnieniem ich typowych rozmiarów. Pionowymi przerywanymi liniami oznaczono typowe badawcze częstotliwości w zakresie od 18 kHz do 200 kHz.

W tym zakresie częstotliwości siła objętościowego rozpraszania wstecznego małych płynopodobnych organizmów (np. kryl, ślimak morski, widłonóg), rośnie ze wzrostem częstotliwości nadawanej fali. W zakresie wysokich częstotliwości mają miejsce oscylacje siły objętościowego rozpraszania wstecznego (ciągłe krzywe pomarańczowe i brązową na Rys. 6.1).

Wszystkie obiekty wypełnione gazem, takie jak różnego pochodzenia pęcherzyki gazowe (np. pęcherzyki gazu emitowanego z dna morza, czy podczas załamywania się fal wiatrowych, czy powstające podczas nurkowania ptaków) oraz pęcherzy pławne ryb, wykazują rozpraszanie rezonansowe z częstotliwością, zależną od głębokości i ich wielkości, w obszarze niższych częstotliwości (piki - niebieskie ciągle krzywe na Rys. 6.1).

Istnieją również różnice w cechach rozpraszania w obrębie każdej klasy, np. tempo wzrostu w obszarze niskich częstotliwości, wysokość i szerokość piku rezonansowego, odstępy między oscylacjami o wysokiej częstotliwości oraz siła objętościowego rozpraszania wstecznego na wysokich częstotliwościach.



Rys. 6.1 Objętościowa siła rozpraszania wstecznego dla różnych gatunków zwierząt. Krzywe dla typowych rozmiarów organizmów. Reprodukacja z Benoit-Bird i Lawson (2016).

Metoda oparta na pomiarach odpowiedzi częstotliwościowej uznawana jest za najbardziej obiecującą metodę identyfikacji gatunków za pomocą metod hydroakustycznych (Fässler, 2010). Zgodnie z rekomendacjami ICES od początku 2000 roku są zbierane dane hydroakustyczne na wielu częstotliwościach podczas badań oceny biomasy ryb na Morzu

Północnym (Fässler, 2010). Metody identyfikacji grup organizmów za pomocą tej techniki nie zostały jeszcze opracowane dla Morza Bałtyckiego.

Celem tego rozdziału jest określenie zależności siły objętościowego rozpraszania wstecznego od częstotliwości dla różnych typów rozkładów przestrzennych tego parametru o różnych porach dnia i nocy oraz w różnych sezonach.

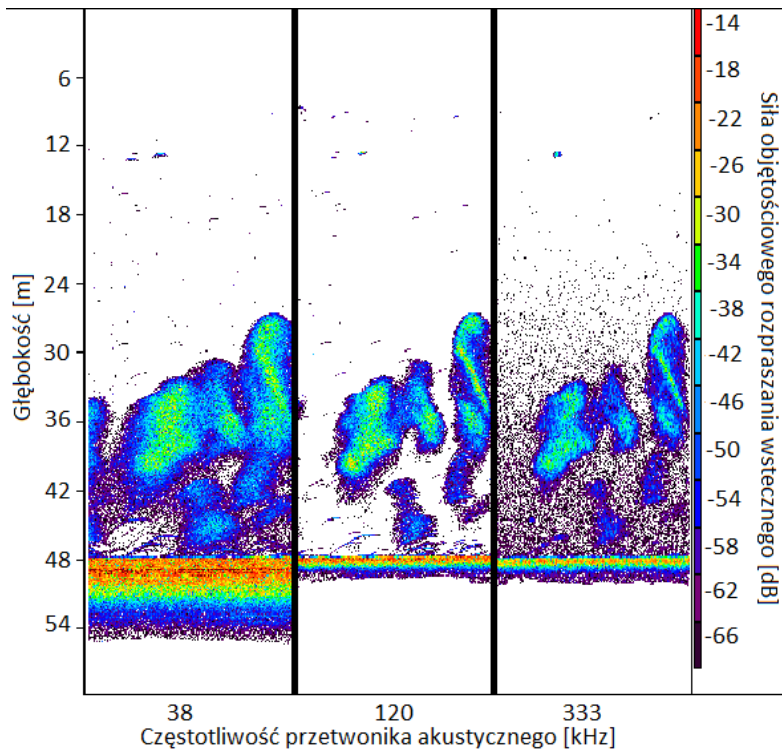
Podrozdział 6.1 jest poświęcony metodyce analizy danych. W podrozdziale 6.2 są przedstawione otrzymane wyniki, natomiast podrozdział 6.3 dotyczy ich interpretacji. W podrozdziale 6.4 podsumowano główne osiągnięcia Rozdziału 6.

6.1 Metodyka – zbiór i analiza danych

Dane, dotyczące siły objętościowego rozpraszania wstecznego przy różnych częstotliwościach akustycznych (38 kHz, 120 kHz oraz 333 kHz), zostały zebrane podczas rejsów badawczych opisanych w Rozdziale 2 na wybranym poligonie badawczym podczas dnia i nocy w różnych sezonach. Przy pomiarach dane na różnych częstotliwościach (38 kHz, 120 kHz oraz 333 kHz) zostały zebrane z tego samego obszaru, „naświetlonego” przez echosondę, dzięki rozmieszczeniu przetworników w bezpośredniej bliskości jeden obok drugiego na wspólnym wysięgniku, zamontowanym w dno statku.

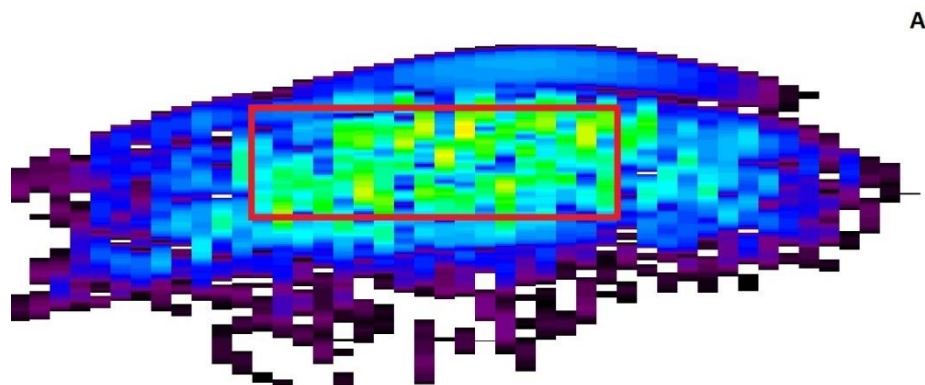
6.1.1 Analiza wstępna – przygotowanie danych hydroakustycznych do określenia odpowiedzi częstotliwościowej

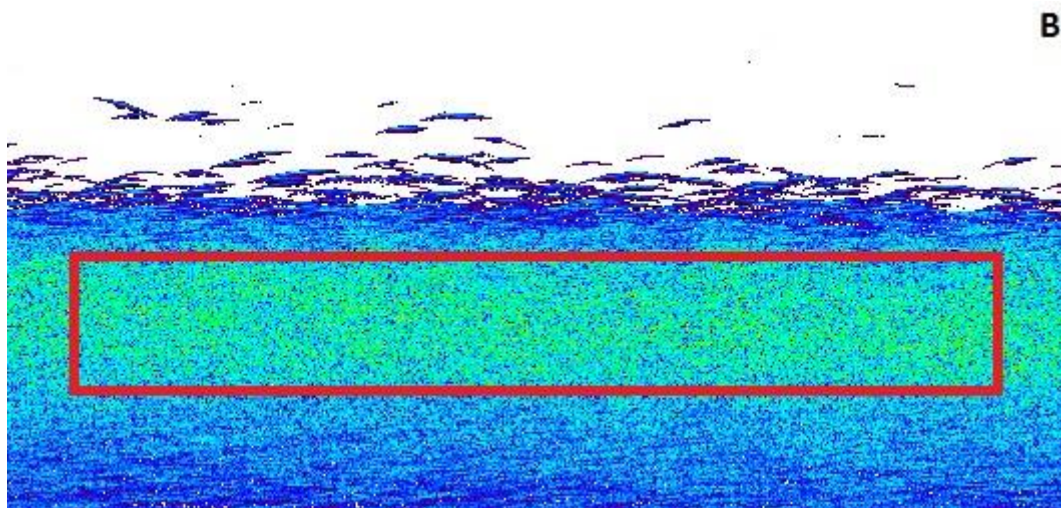
Na Rys. 6.2 są przedstawione echogramy opracowane na podstawie danych zebranych za pomocą trzech echosond 38 kHz, 120 kHz i 333 kHz. Na wszystkich trzech echogramach widoczne są te same ławice akustyczne. Oś pionowa reprezentuje głębokość, oś pozioma częstotliwość nadawanej fali akustycznej, której echo jest prezentowane. Legenda (przy prawej krawędzi echogramu) wskazuje wielkość siły objętościowego rozpraszania wstecznego od najniższych wartości – kolor niebieski do najwyższych wartości – kolor czerwony. Na echogramach są widoczne różnice w sile objętościowego rozpraszania wstecznego dla różnych częstotliwości dla tych samych ławic. Największe wartości siły objętościowego rozpraszania wstecznego dla poszczególnych ławic zostały zarejestrowane na częstotliwości 38 kHz, co można zobaczyć po dominacji na echogramie żółtego koloru. Najniższe wartości były natomiast dla częstotliwości 333 kHz, co można zauważyć dzięki przewadze kolorów błękitnych w ławicach.



Rys. 6.2 Echogramy dla ławicy ryb na częstotliwościach (zlewa na prawo) 38 kHz , 120 kHz i 333 kHz.

Przed oszacowaniem odpowiedzi częstotliwościowej dla skupienia zgodnie z zaleceniami (Korneliussen i in., 2008), wyizolowano tak zwany „trzon” ławicy akustycznej (Rys. 6.3A), czy warstwy rozpraszającej (Rys. 6.3B). Na Rys. 6.3 przedstawiono przykładowy obraz ławicy akustycznej oraz warstwy rozpraszającej wygenerowany z wykorzystaniem programu Sonar5-Pro, z czerwoną linią ciągłą oznaczającą granice obszaru („tzw. „trzonu”), który wykorzystano dalej przy obliczeniach odpowiedzi częstotliwościowej dla ławicy/warstwy.





Rys. 6.3 Przygotowanie danych hydroakustycznych do oszacowania odpowiedzi częstotliwościowej dla przedstawionej ławicy akustycznej (A) oraz warstwy rozpraszającej (B) – wyselekcjonowanie „trzonu”.

Nieuwzględnienie obszarów przygranicznych ławicy/warstwy rozpraszającej jest rekomendowane w związku z zaobserwowaną różnicą siły objętościowego rozpraszania wstecznego w nich w porównaniu do obszarów wewnątrz tych skupisk.

Może być to spowodowane tym, że osobniki w tych dwóch obszarach różnią się pod względem ich charakterystyki rozpraszania, czyli siły celu (Reid i Simmonds, 1993; Fässler, 2010). To z kolei może być związane z tym, że w obszarze przygranicznym ryby mogą zachowywać się inaczej niż w centrum skupiska - na przykład mogą mieć inną orientację przestrzenną (Foote, 1980). Co więcej w tym obszarze mogą być również obecne osobniki o innych wymiarach geometrycznych niż w centralnej części skupiska (DeBlois i Rose, 1995).

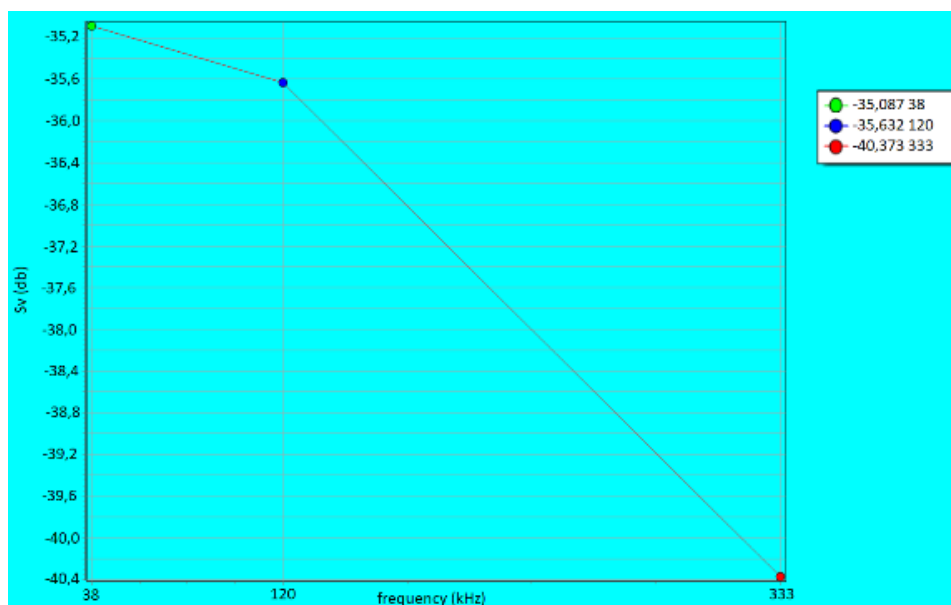
Inną przyczyną różnicy siły objętościowego rozpraszania wstecznego w obszarach centralnym i przygranicznym może być to, że podczas echosondażu ławicy akustycznej dla pierwszych impulsów na początku detekcji ławicy oraz ostatnich - pod koniec jej detekcji, nie cała wiązka akustyczna, ale tylko jej część, "naświetla" ławicę. Powoduje to zmniejszenie energii echa od obszarów granicznych ławicy (Korneliussen i in., 2008). Ten problem przy pomiarach dla tej pracy jest szczególnie istotny ze względu na różnicę szerokości funkcji kierunkowości między przetwornikiem pracującym na częstotliwości 38 kHz (szerokość funkcji kierunkowości na poziomie 3 dB wynosi 10°) oraz przetwornikami o częstotliwościach 120 kHz i 333 kHz (szerokość funkcji kierunkowości na poziomie 3 dB wynosi 7°).

6.1.2 Analiza właściwa – oszacowanie odpowiedzi częstotliwościowej

Do analizy były wybierane ławice znajdujące się co najmniej 5 metrów nad dnem. Z każdego sezonu losowo wybrano 30 ławic akustycznych do analizy, lub w przypadku warstw akustycznych 30 losowo wybranych „prób”.

Poziom uśrednionej siły objętościowego rozpraszania wstecznego na trzech częstotliwościach 38 kHz, 120 kHz oraz 333 kHz, został określony wykorzystując odpowiednią funkcje oprogramowania Sonar5-Pro (frequency response).

Ten moduł oprogramowania pozwala na oszacowanie i eksport danych dotyczących uśrednionej siły objętościowego rozpraszania wstecznego dla wybranej części ławicy lub „próby” warstwy rozpraszającej na każdej z trzech częstotliwości (SV(f)), gdzie f może przyjmować wartości 38 kHz, 120 kHz oraz 333 kHz. Przykładowy raport wraz z wykresem wygenerowanym przez program przedstawiono na Rys. 6.4.



```

*****
*** Frequency response report: 25 sie 21 14:09:16 ***
*****
Hint: To split data into analysis cells with defined ESUs and range layers, use the Analysis controller II
Averaging methods
1: Mean = sum / N 1) Erased data is regarded as NOT Recorded
2: Mean = sum / N 2) Erased data is regarded as Thresholded
3: Mean = sum / N 3) Erased and Thresholded data is handled as Not recorded
(Averaging method is controlled at the System configuration dialogs advanced page. See the Utilities=>system menu)
(GPS printout is controlled at the System configuration dialogs advanced page. See the Utilities=>system menu)

```

| Filename | Frequency (kHz) | From Ping | To ping | From range (m) | To range (m) | Mean Sv (dB) | Mean sA (m2/ha) | Mean TSc (dB) |
|--|-----------------|-----------|---------|----------------|--------------|--------------|-----------------|------------------|
| DATA 27 10 2018-D20181027-T092329 ch01.uuu | 38 | 548 | 570 | 35.68 | 38.42 | -35.09 | 106.8767929077 | -29.59 10318 126 |
| DATA 27 10 2018-D20181027-T092329 ch01.uuu | 120 | 548 | 570 | 35.68 | 38.42 | -35.63 | 94.2725601196 | -31.19 20636 276 |
| DATA 27 10 2018-D20181027-T092329 ch01.uuu | 333 | 548 | 570 | 35.68 | 38.42 | -40.37 | 31.6432647705 | -28.03 5170 60 |

Rys. 6.4 Wykres SV(f) oraz raport wygenerowany przez program Sonar5-Pro, za pomocą funkcji frequency response.

Zgodnie z rekomendacjami (Korneliussen i Ona 2003; Pedersen i Korneliussen 2009; Korneliussen i in. 2009; Fässler, 2010), zostały określone również względne (względem siły objętościowego rozpraszania wstecznego na częstotliwości 120 kHz) zmiany częstotliwościowe siły objętościowego rozpraszania wstecznego ($\Delta\text{dB}(f)$). Parametr ten jest równoznacznym wskaźnikiem odpowiedzi częstotliwościowej. Może on być przedstawiony za pomocą następującego równania:

$$\Delta\text{dB}(f) = \text{SV}(f) - \text{SV}(120) \quad (6.1)$$

gdzie: $\text{SV}(f)$ jest średnią siłą objętościowego rozpraszania wstecznego dla częstotliwości (f) [dB].

6.2 Odpowiedź częstotliwościowa. Zmiany sezonowe i dobowe. Wyniki

6.2.1 Zmiany dobowe odpowiedzi częstotliwościowej. Sezony jesienny i zimowy

Te dwa sezony zostały wybrane do porównania odpowiedzi częstotliwościowej skupisk organizmów w okresie dziennym i nocnym, ponieważ zgodnie z wynikami przedstawionymi w Rozdziałach 3 i 4 niniejszej rozprawy właśnie w tych dwóch sezonach w odróżnieniu od pozostałych dwóch (wiosennego i letniego) zaobserwowano, że wszystkie organizmy uczestniczą w dobowej migracji pionowej. Oznacza to, że dla każdego z tych sezonów w dzień w łąwach znajdują się te same organizmy co i w warstwach w nocy (Rys. 3.2 i Rys. 3.3 oraz Rys. 3.5 i Rys. 3.6; Rys. 4.7)

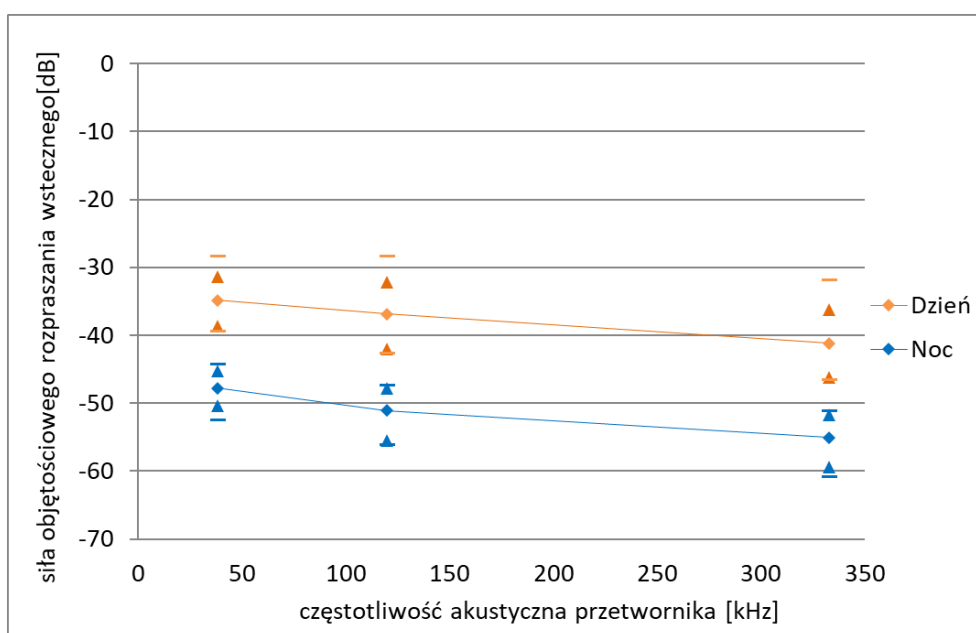
Sezon jesienny (październik 2018)

Na Rys. 6.5 przedstawiona została siła objętościowego rozpraszania wstecznego dla 30 łąwach akustycznych zaobserwowanych na poligonie badawczym w październiku w ciągu dnia (Rys. 3.2) oraz dla 30 „prób” z warstwy rozpraszającej w ciągu nocy (Rys. 3.3). Na osi pionowej przedstawiono wartości siły objętościowego rozpraszania wstecznego, na osi poziomej – częstotliwości. Romby odpowiadają wartościom uśrednionym po wszystkich łąwach (dla pory dziennej) lub wszystkich „próbach” warstwy rozpraszającej (dla pory nocnej). Uśrednienie zostało przeprowadzone w skali liniowej, czyli dla współczynnika objętościowego rozpraszania wstecznego. Wartością średnią dla siły objętościowego rozpraszania wstecznego nazywamy wartość odpowiadającą uśrednionemu współczynnikowi objętościowego rozpraszania wstecznego.

Dla każdej częstotliwości przedstawiono granice wyznaczone przez percentyl 95-ty oraz 5-ty (trójkąty), oraz oznaczono maksymalne i minimalne wartości za pomocą poziomych kresek. Kolor pomarańczowy reprezentuje dzień, a kolor niebieski noc. Zarówno podczas pory dziennej jak i nocnej siła objętościowego rozpraszania wstecznego maleje wraz ze wzrostem częstotliwości nadawanej fali akustycznej.

Porównując wyniki dla dnia i nocy (Rys. 6.5) widać podobieństwo w kształcie wykresu. Obserwowany jest spadek siły objętościowego rozpraszania wstecznego wraz ze wzrostem częstotliwości akustycznej. Zademonstrowano również większe wartości siły objętościowego rozpraszania wstecznego w ciągu dnia w porównaniu z nocą.

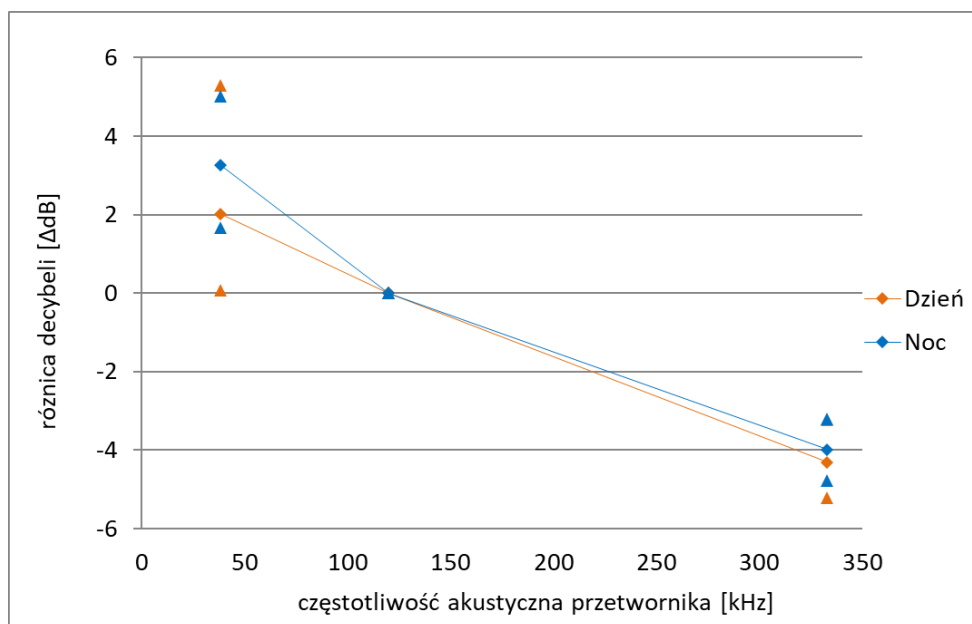
Na Rys. 6.6 dla tych samych danych (dla siły objętościowego rozpraszania wstecznego), które zostały wykorzystane w Rys. 6.5, przedstawiono zależność częstotliwościową $\Delta dB(f)$, opisaną wzorem (6.1) (odpowiedź częstotliwościowa). Na osi pionowej przedstawiono parametr $\Delta dB(f)$, na osi poziomej - częstotliwość f nadawanej fali akustycznej. Trójkątami oznaczono 95-ty i 5-ty percentyl uzyskanych wyników. Kolor pomarańczowy reprezentuje dzień, a kolor niebieski - noc.



Rys. 6.5 Siła objętościowego rozpraszania wstecznego dla trzech częstotliwości: 38 kHz, 120 kHz, 333 kHz (dla 30 ławic akustycznych - dzień, oraz 30 „prób” z warstwy rozpraszającej - noc). Romby oznaczają wartość średnią, trójkąty symbolizują granice percentyli 95-tego (górny trójkąt) oraz 5-tego (dolny trójkąt), poziome kreski - maksymalną (górna kreska) i minimalną (dolna kreska) wartości. Październik: dzień (kolor pomarańczowy) i noc (kolor niebieski).

Odpowiedzi częstotliwościowe dla dziennych ławic akustycznych oraz nocnej warstwy rozpraszającej w październiku są podobne. Różnica dotyczy wartości parametrów $\Delta dB(38)$ i $\Delta dB(333)$ dla dnia i nocy. Dla średnich wartości parametr $\Delta dB(38)$ wynosił: 2,02 dB oraz 3,27

dB dla dnia i nocy odpowiednio w przypadku fali akustycznej o częstotliwości 38 kHz. Tym czasem parametr $\Delta dB(333)$ wyniósł -4,21 dB dla dnia oraz -3,99 dB dla nocy.



Rys. 6.6 Różnica w decybelach $\Delta dB(f)$ dla $f = 38$ kHz i $f = 333$ kHz (dla 30 ławic akustycznych - dzień, oraz 30 „prób” z warstwy rozpraszającej - noc). Romby oznaczają wartość średnią, trójkąty symbolizują granice percentyli 95-tego (górny trójkąt) oraz 5-tego (dolny trójkąt). Październik: dzień (kolor pomarańczowy) i noc (kolor niebieski).

Sezon zimowy (luty 2019)

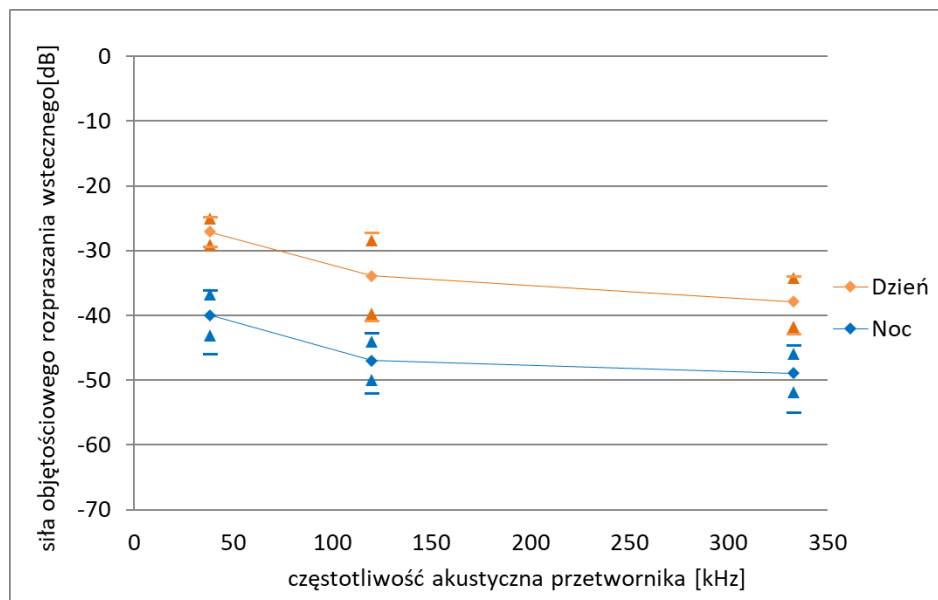
Na Rys. 6.7 przedstawiona została siła objętościowego rozpraszania wstecznego dla 30 wybranych losowo „prób” z warstwy akustycznej obserwowanej na poligonie w lutym zarówno w ciągu dnia (Rys. 3.5) i nocy (Rys. 3.6). Na osi pionowej przedstawiono wartości siły objętościowego rozpraszania wstecznego, na osi poziomej – częstotliwości. Wartości uśrednione po 30 „próbach” dla dnia i nocy przedstawiono za pomocą rombów. Przedstawiono również granice wyznaczone przez percentyl 95-ty oraz 5-ty (trójkąty), oraz oznaczono maksymalne i minimalne wartości za pomocą poziomych kresek. Dzień oznaczono kolorem pomarańczowym oraz noc - kolorem niebieskim.

Zarówno jak i dla sezonu jesiennego obserwujemy (Rys. 6.7) podobieństwo w kształcie wykresów dla pór dziennej i nocnej: siła objętościowego rozpraszania wstecznego maleje ze wzrostem częstotliwości akustycznej. Podobnie jak w październiku wartości siły objętościowego rozpraszania wstecznego w ciągu dnia są większe niż nocy.

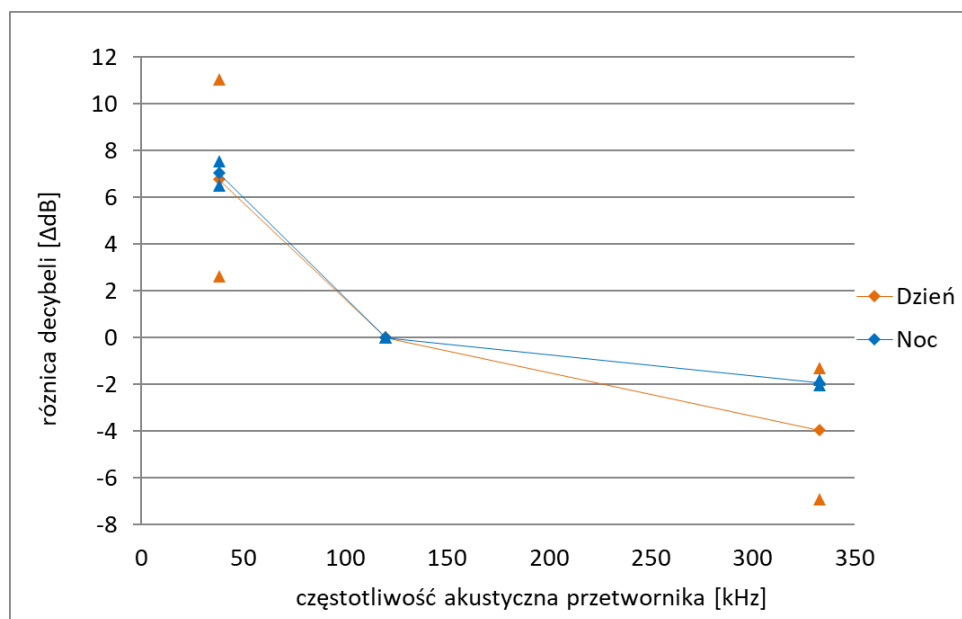
Na Rys. 6.8 przedstawiono częstotliwościową zależność $\Delta dB(f)$ opisaną wzorem (6.1). Na osi poziomej przedstawiono częstotliwości nadawanej fali akustycznej f . Na osi pionowej

parametr $\Delta\text{dB}(f)$. Trójkątami oznaczono 95-ty i 5-ty percentyl dla uzyskanych wyników. Kolorami oznaczono: dzień - kolor pomarańczowy, noc - kolor niebieski.

Charakter zależności częstotliwościowych dla dnia i nocy jest podobny, natomiast różnice $\Delta\text{dB}(f)$ wynosiły dla dnia: 6,76 dB w przypadku fali akustycznej o częstotliwości 38 kHz oraz -3,97 dB dla fali akustycznej 333 kHz; dla nocy: odpowiednio 7,04 dB i -1,95 dB.



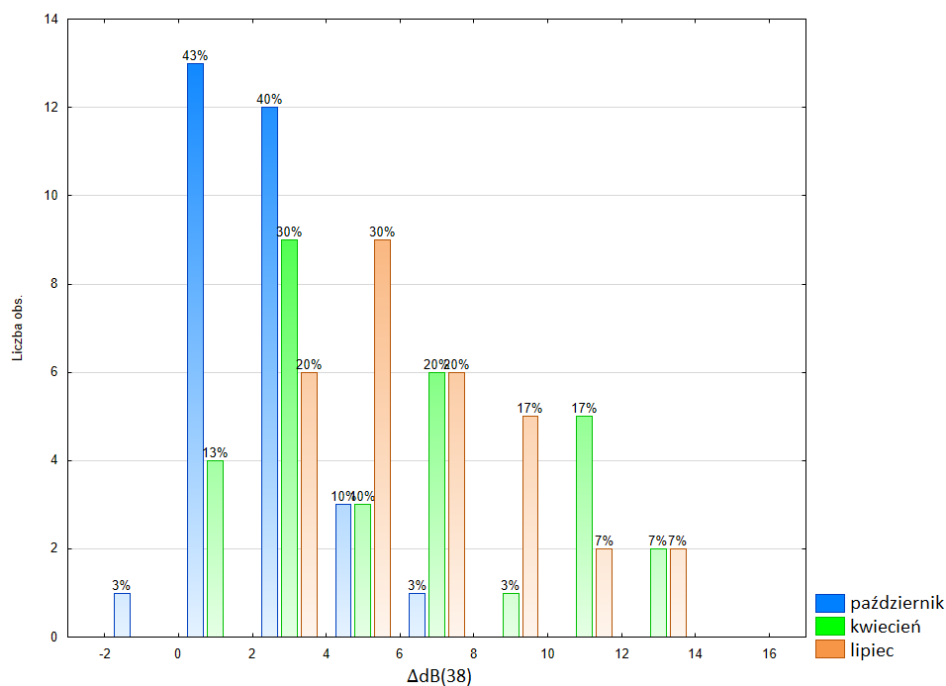
Rys. 6.7 Siła objętościowego rozpraszania wstecznego dla trzech częstotliwości: 38 kHz, 120 kHz, 333 kHz (dla 30 „prób” z warstw rozpraszających zarówno w dzień i w nocy). Romby oznaczają wartość średnią, trójkąty symbolizują granice percentyli 95-tego (górny trójkąt) oraz 5-tego (dolny trójkąt), poziome kreski - maksymalną (górną kreskę) i minimalną (dolną kreskę) wartości. Luty: dzień (kolor pomarańczowy) i noc (kolor niebieski).



Rys. 6.8 Różnica w decybelach $\Delta\text{dB}(f)$ dla $f = 38$ kHz i $f = 333$ kHz. Romby oznaczają wartość średnią, trójkąty symbolizują granice percentyli 95-tego (górny trójkąt) oraz 5-tego (dolny trójkąt). Luty: dzień (kolor pomarańczowy) i noc (kolor niebieski).

6.2.2 Zmiany sezonowe odpowiedzi częstotliwościowej dla ławic. Sezony jesienny (październik 2018), wiosenny (kwiecień 2019) i letni (lipiec 2019)

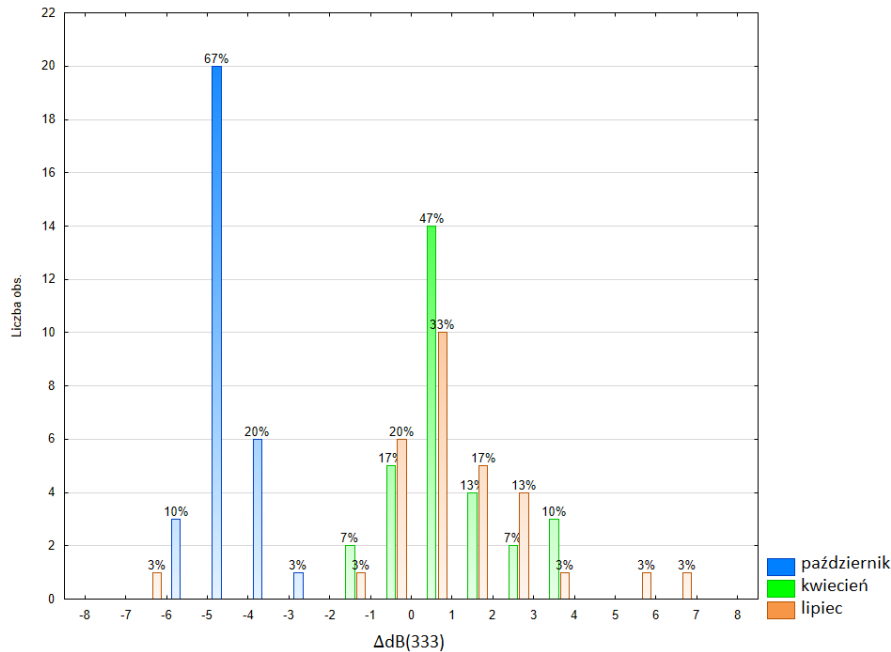
Na Rys. 6.9 oraz Rys. 6.10 zostały przedstawione odpowiednio histogramy $\Delta\text{dB}(38)$ (jest to $\Delta\text{dB}(f)$ dla $f=38$ kHz) i $\Delta\text{dB}(333)$ (jest to $\Delta\text{dB}(f)$ dla $f=333$ kHz) dla 3 sezonów (jesień – kolor niebieski, wiosna – zielony, lato - pomarańczowy). Parametry te zostały obliczone za pomocą wzoru (6.1). Na osi poziomej – parametr $\Delta\text{dB}(38)$ dla Rys. 6.9 oraz $\Delta\text{dB}(333)$ dla Rys. 6.10), na osi pionowej obu wykresów – liczba przypadków odpowiadająca zadanej wielkości parametru $\Delta\text{dB}(f)$, dla każdego słupka na wykresie jest również przedstawiona częstotliwość występowania zadanej wartości tego parametru. Kolory poszczególnych sezonów przedstawione są w legendzie. Podczas analizy danych, wyniki której są przedstawione w tym podrozdziale, dla sezonu wiosennego rozpatrywane były wyłącznie ławice znajdujące się w odległości ponad 5 metrów nad dnem, nie rozpatrywano ławic przy dnie (patrz Tabela 6.1).



Rys. 6.9 Parametr $\Delta\text{dB}(38)$, dla 3 sezonów jesiennego (kolor niebieski), wiosennego (kolor zielony), letniego (kolor pomarańczowy).

Porównując rozkłady zaprezentowane na Rys. 6.9, można zauważyć, że histogramy wiosenne (kolor zielony) i letnie (kolor pomarańczowy) są do siebie zbliżone, natomiast histogram dla sezonu jesiennego (kolor niebieski) jest „przesunięty” względem nich w kierunku mniejszych wartości. 94% wyników dla sezonu jesiennego mieści się w przedziale od 0 dB do 6 dB, natomiast 93% wyników dla wiosny (kolor zielony) oraz lata (kolor pomarańczowy)

mieszczą się w szerszych przedziałach: od 0 dB do 12 dB oraz od 2 dB do 12 dB odpowiednio. Większa różnica między sezonem jesiennym a sezonami wiosennym i letnim jest widoczna dla parametru $\Delta\text{dB}(333)$, histogramy dla którego są przedstawione na kolejnym rysunku Rys. 6.10.



Rys. 6.10 Parametr $\Delta\text{dB}(333)$, dla 3 sezonów jesiennego (kolor niebieski), wiosennego (kolor zielony), letniego (kolor pomarańczowy).

Rys. 6.10 pokazuje, że 97% wyników dla jesieni (kolor niebieski) mieści się w przedziale od -6 dB do -4 dB. Natomiast histogramy dla wiosny oraz lata są „przesunięte” w prawo (wyższe wartości parametru $\Delta\text{dB}(333)$). Dla wiosny (kolor zielony) 93%, a dla lata (kolor pomarańczowy) 71% wyników znajduje się w przedziale od -1 dB do 4 dB, .

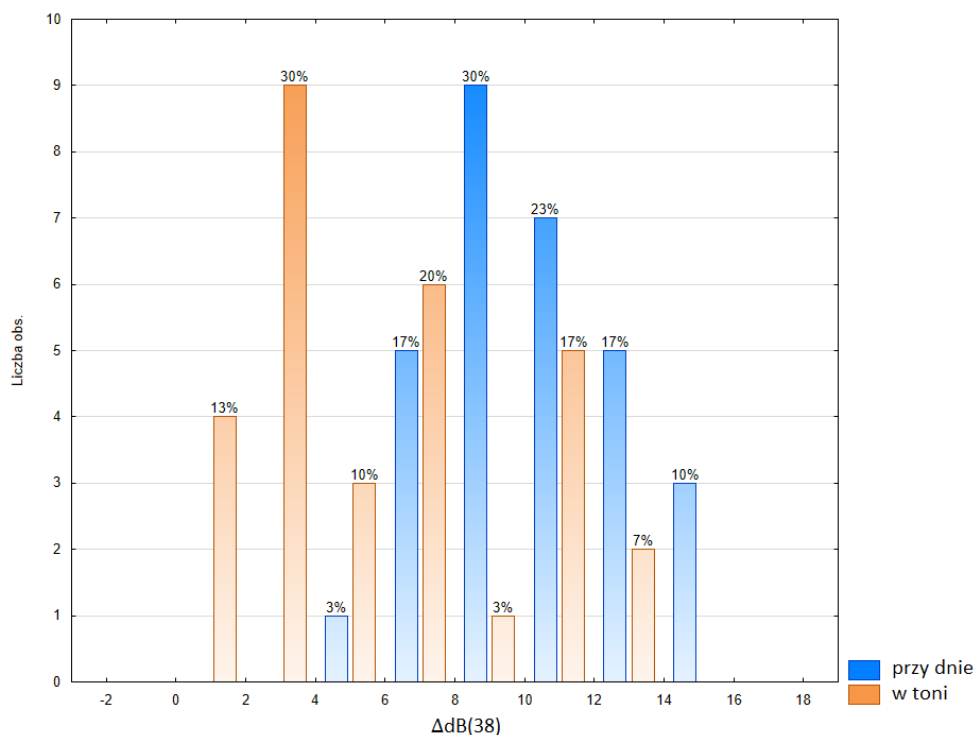
Należy również zwrócić uwagę na to, że dla ławic w okresach letnim i wiosennym odpowiednio dla 96 % i 76% ławic $\Delta\text{dB}(333) > 0$, tym czasem dla wszystkich ławic w okresie jesiennym ten parametr jest mniejszy od 0.

Rys. 6.9 oraz Rys. 6.10 pokazują, że ławice akustyczne obserwowane jesienią różnią się od ławic obserwowanych wiosną oraz latem pod względem odpowiedzi częstotliwościowych, zarówno pod względem parametrów $\Delta\text{dB}(38)$ oraz $\Delta\text{dB}(333)$. Natomiast ławice akustyczne z sezonów wiosennego i letniego są zbliżone do siebie pod tym względem.

6.2.3 Różnica odpowiedzi częstotliwościowej dla ławic w toni wodnej i przy dnie. Sezon wiosenny (kwiecień 2019).

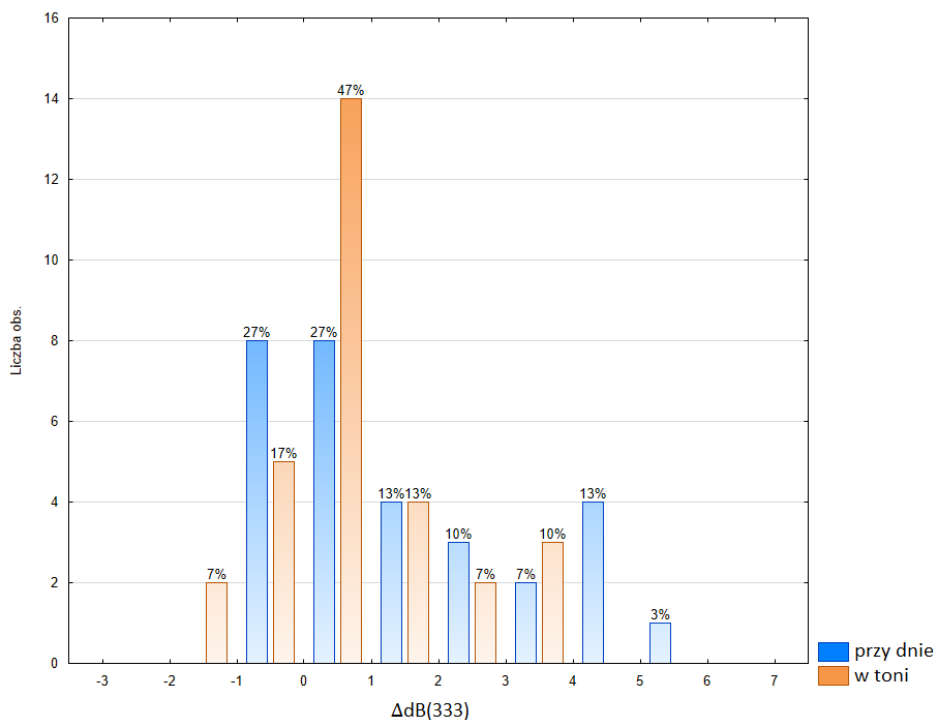
W sezonie wiosennym w ciągu dnia były obserwowane zarówno ławice akustyczne w toni wodnej (powyżej 5 metrów nad dnem, (Rys. 3.8, czarna ramka A).) jak i ławice akustyczne znajdujące się blisko dna (w obszarze nie wyżej niż 5 metrów nad dnem, (Rys. 3.8, czarna ramka B)). Z obserwacji dobowej migracji pionowej przedstawionej w Rozdziale 5 wiemy, że zachowanie tych dwóch grup ławic podczas migracji różniło się. Ciekawym jest, jak wyglądają odpowiedzi częstotliwościowe dla tych dwóch grup ławic.

Rys. 6.11 oraz Rys. 6.12 przedstawiają dla sezonu wiosennego histogramy $\Delta\text{dB}(38)$ i $\Delta\text{dB}(333)$ odpowiednio. Ławicom akustycznym w toni wodnej odpowiada kolor pomarańczowy, a blisko dna – kolor niebieski. Parametry $\Delta\text{dB}(38)$ i $\Delta\text{dB}(333)$ zostały obliczone za pomocą wzoru (6.1). Dla obu grup organizmów różnica $\Delta\text{dB}(f)$ została obliczona dla 30 ławic. Na osi poziomej na tych rysunkach zaprezentowano wartości parametrów $\Delta\text{dB}(38)$ (Rys. 6.11) albo $\Delta\text{dB}(333)$ (Rys. 6.12). Na osi pionowej przedstawiono liczbę przypadków, w których występują odpowiednie wartości parametru. Na obu wykresach dla każdego słupka, zarówno dla ławic z toni wodnej i z warstwy przydennej, jest przedstawiona częstotliwość występowania zadanej wartości parametru $\Delta\text{dB}(38)$ (Rys. 6.11) albo $\Delta\text{dB}(333)$ (Rys. 6.12). Kolory słupków opisane są w legendzie.



Rys. 6.11 Parametr $\Delta\text{dB}(38)$, dla sezonu wiosennego dla ławic akustycznych zarejestrowanych w toni wodnej (kolor pomarańczowy) i ławic akustycznych zarejestrowanych w pobliżu dna (kolor niebieski).

Porównując rozkłady przedstawione na Rys. 6.11 można zaobserwować różnicę dla dwóch badanych grup ławic akustycznych. Po pierwsze, maksimum histogramu dla ławic akustycznych z toni wodnej (kolor pomarańczowy) znajduje się w zakresie między 2 dB a 4 dB, natomiast dla ławic akustycznych bliskich dna (kolor niebieski) - między 8 dB a 10 dB. Wszystkie wyniki natomiast w przypadku ławic z toni wodnej zawierają się w przedziale od 0 dB do 14 dB, a dla ławic blisko dna - od 4 dB do 16 dB. Należy również zauważyć, że 53% wyników dla ławic w toni wodnej znajduje się w przedziale $\Delta\text{dB}(38) < 6$ dB, tym czasem jak w tym przedziale znajduje się tylko 3 % wyników dla ławic przy dnie.



Rys. 6.12 Parametr $\Delta\text{dB}(333)$, dla sezonu wiosennego dla ławic akustycznych zarejestrowanych w toni wodnej (kolor pomarańczowy) i ławic akustycznych zarejestrowanych blisko dna (kolor niebieski).

Z kolei porównując wyniki dla dwóch grup ławic dla parametru $\Delta\text{dB}(333)$ (Rys. 6.12) można zauważyć, że, wartości parametru dla ławic akustycznych z toni wodnej (kolor pomarańczowy) zmieniają się od -2 dB do 4 dB, natomiast dla ławic przebywających blisko dna - od -1 dB do 6 dB. Dodatkowo histogram parametru $\Delta\text{dB}(333)$ dla ławic z toni wodnej ma wyraźne maksimum (47% wyników) między 0 a 1 dB, tym czasem histogram dla ławic przebywających w pobliżu dna nie posiada wyraźnego maksimum. Należy również zauważyć, że 71% wyników dla ławic w toni wodnej są w przedziale $\Delta\text{dB}(333) < 1$ dB, tym czasem jak w tym przedziale znajduje się 54 % wyników dla ławic przy dnie.

6.3 Odpowiedź częstotliwościowa. Zmiany sezonowe i dobowe. Dyskusja.

6.3.1 Zmiany dobowe odpowiedzi częstotliwościowej. Sezony jesienny i zimowy.

Zależność siły objętościowego rozpraszania wstecznego od częstotliwości

Zarówno w sezonach jesiennym i zimowym ze wzrostem częstotliwości siła objętościowego rozpraszania wstecznego maleje (Rys. 6.5 i Rys. 6.7 – dla siły objętościowego rozpraszania wstecznego oraz Rys. 6.6 i Rys. 6.8 – dla różnicy $\Delta\text{dB}(f)$). Takim kształtem zależności cechują się bałtyckie ryby śledziowate (Gorska i in. 2004, Fässler, 2010). Argumenty

przedstawione w Rozdziałach 3 i 4 niniejszej rozprawy potwierdzają obecność ryb śledziowatych na poligonie badawczym w sezonie jesiennym i zimowym.

Dla obu sezonów badawczych zaobserwowano większe wartości siły objętościowego rozpraszania wstecznego w dzień (dla ławic akustycznych w sezonie jesiennym) w porównaniu z nocą (dla warstwy rozpraszającej) na wszystkich trzech częstotliwościach. Większe wartości siły objętościowego rozpraszania wstecznego w ciągu dnia mogą wynikać:

1. Z większej liczebności (koncentracji) organizmów wewnątrz ławic w porównaniu z nocną warstwą rozpraszającą. Jak pokazały obserwacje dobowych migracji dla miesięcy października i lutego wszystkie organizmy uczestniczą w procesie dobowych migracji pionowych, czyli można się spodziewać, że skupiska w dzień i w noc są tworzone przez te same organizmy. Porównanie echogramów na Rys. 3.2 dla dnia oraz na Rys. 3.3 dla nocy dla października, jak również porównanie Rys. 3.5 dla dnia oraz na Rys. 3.6 dla nocy dla lutego, pokazało, że skupiska w porze dziennej posiadają relatywnie mniejsze rozmiary przestrzenne niż w porze nocnej zarówno dla obu sezonów. Jeśli założyć, że organizmy nie migrują w poziomie, to można spodziewać się większych koncentracji organizmów w porze dziennej.
2. Z różnicy siły celu organizmów na przykład, jak to zostało przedyskutowane w Rozdziale 4 rozprawy, na skutek dobowych zmian w orientacji organizmów (Midttun i Hoff, 1962; Foote 1980; Huse i Ona, 1996; Huse i Korneliussen, 2000; Henderson i in., 2008).

Odpowiedź częstotliwościowa

Dla obu sezonów badawczych zarówno $\Delta\text{dB}(38)$ oraz $\Delta\text{dB}(333)$ są mniejsze w okresie dziennym w porównaniu z nocnym (Tab. 6.1).

Tab. 6.1 Wartości $\Delta\text{dB}(38)$ oraz $\Delta\text{dB}(333)$ w okresie dziennym i nocnym dla dwóch sezonów badawczych

| LUTY: | $\Delta\text{dB}(38)$ | $\Delta\text{dB}(333)$ |
|--------------------|-----------------------|------------------------|
| Dzień | 6,76 dB | -3,97 dB |
| Noc | 7,04 dB | -1,95 dB |
| PAŹDZIERNIK | | |
| Dzień | 2,02 dB | -4,21 dB |
| Noc | 3,27 dB | -3,99 dB |

Jakie mogą być przyczyny tych zmian dobowych? W ciągu dnia środek ciężkości zarówno dla pałdziernika i lutego znajdował się na większych głębokościach niż w ciągu nocy (histogramy na Rys. 4.1A i B dla środka ciężkości). Jednak jak zostało pokazano w (Fässler, 2010), głębokość, na której znajdują się organizmy, w zakresie od 0 metrów do 100 metrów nie wpływa istotnie na wielkość $\Delta\text{dB}(f)$ dla ryb śledziowatych bałtyckich. W związku z tym mógł wystąpić inny czynnik, który wpłynął na mniejszą wartość parametrów $\Delta\text{dB}(38)$ oraz $\Delta\text{dB}(333)$ w ciągu dnia, na przykład orientacja ryb względem pionowej wiązki przetwornika akustycznego (Gorska i in. 2004, Fässler i Gorska, 2009).

Co dotyczy różnicy sezonowej zarówno dla dnia i dla nocy (Tab. 6.1), to może ona być związana z różnicą w morfometrii organizmów w różnych sezonach badawczych, która może istotnie wpływać na odpowiedź częstotliwościową (Gorska, 2007, Fässler, 2010).

6.3.2 Sezon jesienny: porównanie wyników pomiarowych z wynikami teoretycznymi dla bałtyckich śledzia oraz szprota

W tym podrozdziale wyniki pomiarów w sezonie jesiennym na poligonie badawczym zostały skonfrontowane z wynikami teoretycznymi (Fässler, 2010). Sezon jesienny został wybrany do porównania. Modelowanie odpowiedzi częstotliwościowej dla śledzia i szprota bałtyckich zostało przeprowadzone dla pałdziernika, dlatego porównanie wykonane jest dla sezonu jesiennego. Jest to istotne, ponieważ odpowiedź częstotliwościowa jest czuła w stosunku do morfometrii ryb, szczególnie ich pęcherza pławnego oraz ich orientacji względem wiązki echosondy (Gorska i in. 2004; Gorska, 2007; Fässler i Gorska, 2009; Fässler, 2010). Te charakterystyki mogą się zmieniać z sezonu na sezon.

Krzywe czarne i szare na Rys. 6.13A i B, przedstawiają zależność parametru $\Delta\text{dB}(38)$ (oś pionowa) od długości osobników (oś pozioma) dla dwóch gatunków ryb bałtyckich: odpowiednio szprota i śledzia na głębokości 0 m. Rys. 6.13A odpowiada porze dziennej, tym czasem Rys. 6.13B – porze nocnej. Obliczenia wykonane zostały dla śledzia i szprota odpowiednio w zakresach długości: od 6 cm do 14 cm oraz od 15 cm do 26 cm

Krzywe czarna i szara, przedstawione na rysunkach, są opisywane odpowiednio następującymi równaniami:

dla szprota:

$$\Delta\text{dB}(38) = \text{TS}(38) - \text{TS}(120) = \left((27,50 * \log_{10}(L)) - 73,06 \right) - \left((22,92 * \log_{10}(L)) - 69,94 \right) = 4,58 * \log_{10}(L) - 3,12 \quad (6.2)$$

dla śledzia:

$$\Delta\text{dB}(38) = \text{TS}(38) - \text{TS}(120) = \left((20,08 * \log_{10}(L)) - 64,07 \right) - \left((15,26 * \log_{10}(L)) - 60,65 \right) = 4,82 * \log_{10}(L) - 3,42 \quad (6.3)$$

gdzie:

L to długość organizmu w cm

$\text{TS}(38)$ i $\text{TS}(120)$ - siła celu osobników na częstotliwościach 38 kHz i 120 kHz odpowiednio.

Równania te otrzymano na podstawie równań, teoretycznych dla siły celu osobników (charakterystyka uśredniona według orientacji osobników w skupisku), przedstawionych w (Fässler, 2010) w legendzie do Rys. 3.9a(Fässler, 2010) - dla śledzia bałtyckiego dla częstotliwości 38 kHz i 120 kHz oraz na Rys. 3.9c(Fässler, 2010) - dla szprota bałtyckiego – dla tych samych częstotliwości.

Porównując na Rys. 6.13 wyniki teoretyczne i pomiarowe, uwzględniono, że:

$$\begin{aligned} \Delta\text{dB}(f) &= \text{SV}(f) - \text{SV}(120) \\ &= 10 \log N + \text{TS}(f) - (10 \log N + \text{TS}(120)) = \text{TS}(f) - \text{TS}(120) \end{aligned} \quad (6.4)$$

gdzie:

N opisuje średnią liczebność organizmów. Wykorzystano tu związek między siłą objętościowego rozpraszania wstecznego i siłą celu osobnika (Simmonds i MacLennan, 2005).

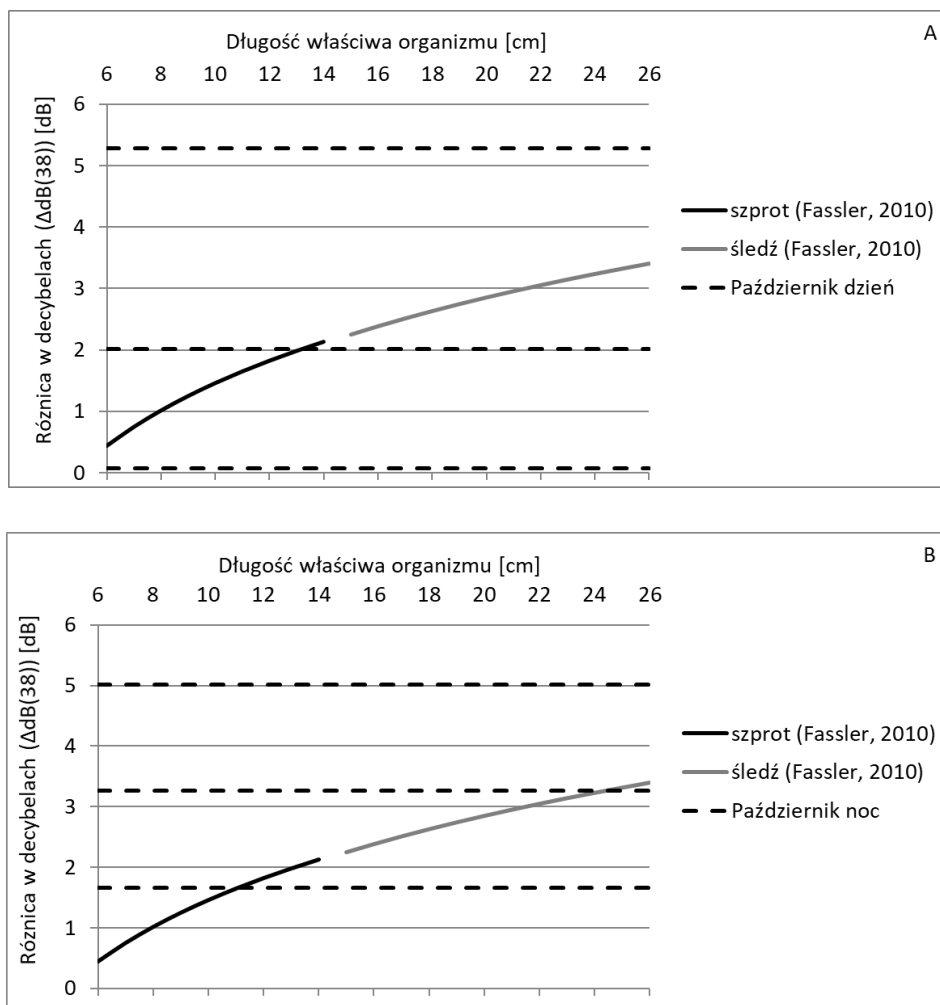
Z pracy (Fässler, 2010) również wynika, że ani dla śledzia, ani dla szprota bałtyckiego różnica odpowiedzi częstotliwościowej dla częstotliwości 38 kHz i 120 kHz ($\Delta\text{dB}(38)$) nie zależy od głębokości w zakresie głębokości od 0 do 100 metrów. Oznacza to, że przedstawione

równania (6.2 – 6.3) są stosowalne dla całego zakresu głębokości na poligonie badawczym wykorzystamy w niniejszej pracy.

Na rysunkach Rys. 6.13A i B, przedstawiono również trzy czarne przerywane linie, środkowa odpowiada średniej zmierzonej wartości $\Delta\text{dB}(38)$ dla danej pory dnia, a dwie pozostałe – górna i dolna - to odpowiedni percentyl 95-ty i 5-ty.

W ciągu dnia (Rys. 6.13A) średnia wartość $\Delta\text{dB}(38)$ wynosiła 2,02 dB, a percentylom, odpowiednio 5-temu i 95-temu, odpowiadał poziom: 5,28 dB i 0,07dB. Natomiast zakres zmian $\Delta\text{dB}(38)$ dla szprota (czarna linia) $0,44 \leq \Delta\text{dB}(38) \leq 2,13$ oraz śledzia (szara linia) $2,25 \leq \Delta\text{dB}(38) \leq 3,40$ mieści się w zakresie zmian określonym w wyniku pomiarów.

W ciągu nocy (Rys. 6.13B) średnia wartość $\Delta\text{dB}(38)$ wynosiła 3,27 dB, tym czasem jak dla percentyów 5-tego i 95-tego poziom odpowiednio wynosił: 5,02 dB i 1,66 dB. Podobnie jak i dla pory dziennej, dla pory nocnej można stwierdzić, że wyniki pomiarów niniejszej pracy są porównywalne z wynikami teoretycznymi.



Rys. 6.13 Porównanie wyników pomiarów parametru $\Delta\text{dB}(38)$ z wynikami teoretycznymi (Fässler, 2010) dla sezonu jesiennego: dla dnia (A) oraz dla nocy (B)

Jak zostało zaznaczone w Rozdziale 3 niniejszej rozprawy było możliwości wykonania bezpośrednich zaciągów pelagicznych podczas badań i dla tego, jak zostało to opisane w podrozdziale 2.5, wiedzę dotyczącą ryb na Zatoce Puckiej została zaczerpnięta ze źródeł pośrednich. Źródła pośrednie, jak zostało to zademonstrowano w podrozdziale 3.3.3, potwierdzają możliwość obecności ryb śledziowatych w tym obszarze w październiku

Zgodność wyników teoretycznych (Fässler, 2010) i eksperymentalnych potwierdza możliwość obecności ryb śledziowatych na poligonie.

6.3.3 Zmiany sezonowe odpowiedzi częstotliwościowej dla ławic. Sezony jesienny (październik 2018), wiosenny (kwiecień 2019) i letni (lipiec 2019).

W tabeli 6.2, przedstawione zostały średnie dla parametru $\Delta\text{dB}(f)$, (wzór 6.1) dla $f = 38$ kHz (druga kolumna) oraz $f = 333$ kHz (pierwsza kolumna) dla ławic akustycznych dla pory dziennej.

Tab. 6.2 Średnie wartości $\Delta\text{dB}(f)$ dla częstotliwości 38 kHz i 333 kHz, dzień, trzy sezony badawcze.

| Sezon | $\Delta\text{dB}(38)$ - dzień | $\Delta\text{dB}(333)$ - dzień |
|--------|-------------------------------|--------------------------------|
| Jesień | 2,02 | -4,31 |
| Wiosna | 5,90 | 0,79 |
| Lato | 6,57 | 1,01 |

Porównując sezony, można zauważyć różnicę pomiędzy sezonami wiosennym i letnim a jesiennym. W kwietniu i lipcu w przeciwieństwie do października wartość parametru $\Delta\text{dB}(333)$ jest dodatnia. Należy podkreślić, że zaobserwowana była również różnica (Rozdziały 3 i 5) w zachowaniu organizmów podczas migracji: w sezonie jesiennym wszystkie organizmy uczestniczyły w migracji, natomiast w sezonach wiosennym i letnim, nie wszystkie organizmy migrowały. Może to oznaczać, że w październiku mamy do czynienia ze skupiskami rozpraszającymi zbudowanymi z innych gatunków lub z innych grup wiekowych tego samego gatunku co w lipcu i kwietniu.

Można również zauważyć, że dodatnie wartości parametru $\Delta\text{dB}(333)$ mogą świadczyć o obecności w ławicach ryb jak i również zooplanktonu, dla którego siła celu rośnie ze wzrostem częstotliwości (Rys. 6.1, Benoit-Bird i Lawson, 2016) w zakresie częstotliwości od 38 do 333 kHz. Zgodnie z hydroakustycznymi obserwacjami prowadzonymi w Instytucie Oceanologii Polskiej Akademii Nauk, bałtycki zooplankton jest widoczny dla częstotliwości powyżej 400 kHz (dr hab. Joanny Szczuckiej, informacja ustna), natomiast można założyć, że w przypadku jego dużych koncentracji może on również być „widoczny” przez echosondę na zbliżonych niższych częstotliwościach (333 kHz). Niestety stwierdzenie to pozostaje jedynie hipotezą i jego sprawdzenie wymaga głębszych badań.

Można wnioskować, że zaobserwowana różnica w unormowanej odpowiedzi częstotliwościowej oznacza obecność różnych grup organizmów w Zatoce w sezonie jesiennym w porównaniu z sezonami wiosennym i letnim oraz że warto wykorzystać unormowaną odpowiedź częstotliwościową dla identyfikacji grup organizmów.

Większe wartości $\Delta\text{dB}(38)$ i $\Delta\text{dB}(333)$ latem w porównaniu do wiosny, mogą np. wskazywać zarówno na obecność innych gatunków organizmów oraz na obecność latem organizmów o większej długości ciała (Gorska, 2007; Fässler i Gorska, 2009).

6.4 Podsumowanie

W niniejszym Rozdziale po raz pierwszy dla Morza Bałtyckiego przeanalizowano zmiany dobowe i sezonowe odpowiedzi częstotliwościowej skupisk organizmów oraz przedstawiono ich interpretacje.

1. Wykazano sezonowe zmiany odpowiedzi częstotliwościowych:
 - a. W sezonach jesiennym i zimowym zaobserwowano zarówno w godzinach dziennych i nocnych odpowiedź częstotliwościową (zmniejszenie siły objętościowego rozpraszania wstecznego z częstotliwością) typową dla ryb z pęcherzem pławnym (np. ryb śledziowatych).
 - b. W sezonach letnim i wiosennym w dzień (dla ławic akustycznych), zaobserwowano inny charakter zależności częstotliwościowej, w odróżnieniu od jesiennego i zimowego sezonu, odpowiedź częstotliwościowa na częstotliwości 333 kHz jest większa niż dla częstotliwości 120 kHz dla zdecydowanie większej (więcej niż 76 %) liczby ławic. Natomiast we wszystkich sezonach zaobserwowano większą wartość siły objętościowego rozpraszania wstecznego na częstotliwości 38 kHz w porównaniu do częstotliwości 120 kHz.
2. Zademonstrowano różnice częstotliwościowych charakterystyk rozpraszania dla tych samych organizmów w okresach dziennym i nocnym dla sezonów jesiennego i zimowego:
 - a. większe średnie wartości siły objętościowego rozpraszania wstecznego zostały zaobserwowane w dzień w porównaniu z nocą, co może być związane z większymi koncentracjami organizmów w skupiskach dziennych,
 - b. mniejsze wartości parametrów $\Delta\text{dB}(38)$ oraz $\Delta\text{dB}(333)$ zaobserwowano w dzień w porównaniu z nocą.
3. Uwzględniając, że:
 - a. Odpowiedzi częstotliwościowe, określone w wyniku pomiarów w sezonie jesiennym oraz zgodność ich z wynikami modelowania numerycznego odpowiedzi częstotliwościowej dla śledzia bałtyckiego (Fässler, 2010), potwierdzają zaobserwowaną w niniejszej pracy oraz badaniach

prowadzonych w przeszłości obecność ryb śledziowatych na poligonie badawczym w tym sezonie.

b. dla różnych grup organizmów (porównanie np. sezonu jesiennego i wiosennego) zaobserwowano różny charakter odpowiedzi częstotliwościowej $\Delta B(f)$,

można stwierdzić, że warto wykorzystać tą charakterystykę dla identyfikacji grup organizmów na Bałtyku.

7. Próba rozróżnienia organizmów: klasteryzacja z wykorzystaniem parametrów ławic akustycznych przy użyciu logiki rozmytej (Fuzzy c-means)

7.1 Wstęp

Jak zostało wspomniane w Rozdziale 6, wykorzystanie wielu częstotliwości w akustyce rybackiej jest szeroko stosowane dla klasyfikacji organizmów morskich (np. Kloser i in., 2002; Gauthier i Horne, 2004a, 2004b; Korneliussen i Ona; 2004, Fernandes i in., 2006; Fassler, 2010; Bassett i in., 2018).

Celem badań, wyniki, których są przedstawione w tym rozdziale, jest próba rozróżnienia organizmów, zgromadzonych w ławicach, korzystając z ich odpowiedzi częstotliwościowej (Rozdział 6). Korzystając z metody, opartej na logice rozmytej, wykonano próby rozróżnienia:

- ryb zgromadzonych w ławicach w toni wodnej w sezonie jesiennym i w toni wodnej powyżej 5 m nad dnem morza w sezonie wiosennym (próba 1),
- dla sezonu wiosennego – ryb w ławicach przy dnie (w 5 m – warstwie nad dnem) i w toni wodnej (powyżej 5 m nad dnem) (próba 2),
- ryb zgromadzonych w ławicach w toni wodnej w sezonie jesiennym oraz ryb w ławicach przy dnie w sezonie wiosennym (próba 3).

Poniżej podano jest uzasadnienie podjęcia tych prób klasyfikacji.

Uzasadnienie podjęcia próby 1

Badania, wyniki których przedstawione są w Rozdziałach 3 – 6, pokazały różnice zarówno w rozkładach przestrzennych siły objętościowego rozpraszania wstecznego w ławicach akustycznych oraz w zachowaniu organizmów zaobserwowanych w tych dwóch miesiącach.

W podrozdziale 4.3 zademonstrowano istotną różnicę w miesiącach października i kwietniu w histogramach parametrów opisujących rozkład przestrzenny siły objętościowego rozpraszania wstecznego dla ławic które znajdują się w toni wodnej powyżej 5 metrów nad dnem morskim (Rys. 4.8, Rys. 4.9, Rys. 4.10), gdzie pionowe rozkłady temperatury i zasolenia były zbliżone do jednorodnych (porównanie Rys. 3.1 i Rys. 3.7)

W odróżnieniu od października, w kwietniu organizmy, zgromadzone w dzień w ławicach w toni wodnej (powyżej 5 metrów nad dnem morza), w nocy nie tworzą warstwy rozpraszającej bliżej powierzchni morza, ale są rozproszone prawie równomiernie po całej toni (porównanie echogramów Rys. 3.3 i Rys. 3.9).

W Rozdziale 6 wykazano różnicę odpowiedzi częstotliwościowych względem częstotliwości 120 kHz zarówno dla częstotliwości 38 kHz ($\Delta\text{dB}(38)$) jak i 333 kHz ($\Delta\text{dB}(333)$) dla miesięcy października i kwietnia (Rys. 6.9 i Rys. 6.10). Dla 97 % ławic w październiku: $-2\text{dB} \leq \Delta\text{dB}(38) \leq 6\text{ dB}$, tym czasem dla kwietnia $\Delta\text{dB}(38)$ należy do tego zakresu tylko dla około połowy ławic. Zakresy zaś zmian parametru $\Delta\text{dB}(333)$ dla kwietnia i października nie pokrywają się.

Uzasadnienie podjęcia próby 2:

W miesiącu kwietniu w odróżnieniu od października ławice zostały zaobserwowane nie tylko w toni wodnej powyżej 5 metrów nad dnem, ale również i w pobliżu dna w warstwie około 5 m nad dnem (Rys. 3.8). Te dwie grupy organizmów różnią się:

- swoimi preferencjami co do temperatury i zasolenia (Rys. 3.7): pionowe rozkłady tych parametrów się różnią w tych dwóch wybranych warstwach toni wodnej,
- zachowaniem: organizmy zebrane w ławicach znajdujących się w warstwie około 5 metrów nad dnem morza, migrują inaczej niż organizmy w toni powyżej tej granicy (Rozdział 5). różnicą odpowiedzi częstotliwościowych względem częstotliwości 120 kHz: $\Delta\text{dB}(38)$ i $\Delta\text{dB}(333)$) (Rys. 6.11 i 6.12). Dla 73% ławic w toni wodnej parametr $\Delta\text{dB}(38)$ zmienia się w zakresie $0\text{ dB} \leq \Delta\text{dB}(38) \leq 8\text{ dB}$, tym czasem parametr $\Delta\text{dB}(38)$ należy do tego zakresu tylko dla 20% ławic przy dnie. Natomiast parametr $\Delta\text{dB}(333)$ dla 71% ławic z toni wodnej oraz 54% ławic przy dnie jest mniejszy niż 1 dB.

Uzasadnienie podjęcia próby 3:

Organizmy zgromadzone w ławicach w toni wodnej w miesiącu październiku różnią się od organizmów zgromadzonych w ławicach przy dnie morza w kwietniu:

- wzorcem pionowych migracji dobowych (Rozdział 5),
- odpowiedzią częstotliwościową (Rozdział 6): różnica dla parametru $\Delta\text{dB}(38)$ między tymi dwoma grupami jest znacząca. Dla ławic w październiku $\Delta\text{dB}(38)$ nie przewyższał wartości 4 dB dla 86% ławic (Rys. 6.9), natomiast dla wszystkich ławic znajdujących

się przy dnie w kwietniu $\Delta\text{dB}(38)$ był większy od 4 dB (Rys. 6.11). Również istotna była różnica dla parametru $\Delta\text{dB}(333)$ (Rys. 6.10, Rys. 6.12): dla ławic z października zakres zmian tego parametru: od -6 do -2 dB, a dla ławic znajdujących się przy dnie w kwietniu: od -1 do 6 dB.

Niestety jak to zostało przedstawiono w poprzednich rozdziałach nie posiadamy dokładnej informacji o gatunkach obecnych w październiku i kwietniu w głębokowodnej części Zatoki Puckiej. Zgodnie z tym jak zostało to zaznaczone w podrozdziale 3.3.3 źródła pośrednie (opisane w podrozdziale 2.5) pozwalają założyć, że zarówno w październiku jak i w kwietniu mogły być zaobserwowane dwa gatunki śledź i szprot, z prawdopodobną dominacją śledzia w październiku, a szprota w kwietniu.

W podrozdziale 7.2 opisana została metoda klasyfikacyjna (Fuzzy c-means (FCM)). W podrozdziałach 7.3 przedstawione wyniki podjętych prób klasyfikacji, a w rozdziale 7.4 podsumowano wyniki badań.

7.2 Metodyka

7.2.1 Klasteryzacja danych – algorytm klasyfikacyjny

Fuzzy c-means (FCM) to metoda grupowania, która pozwala aby każdy punkt danych mógł przynależeć z różnym stopniem członkostwa do wielu klastrów klasyfikacyjnych (Bezdek, 1981).

FCM opiera się na minimalizacji następującej funkcji celu:

$$J_m = \sum_{i=1}^D \sum_{j=1}^N \mu_{ij}^m \|x_i - c_j\|^2 \quad (7.1)$$

gdzie:

D – liczba punktów danych,

N – liczba klastrów,

m – wykładnik macierzy podziału rozmytego do kontrolowania stopnia nakładania się rozmytego, przy czym $m > 1$. Nałożenie rozmyte odnosi się do stopnia rozmycia granic między klastrami, to znaczy liczby punktów danych, które mają istotne członkostwo w więcej niż jednym klastrze,

x_i – i -ty punkt danych,

c_j – centrum j-tego klastra,

μ_{ij}^m – stopień przynależności punktu x_i do j-tego klastra. Dla danego punktu danych x_i , suma wartości przynależności dla wszystkich klastrów wynosi jeden.

$\|\bullet\|$ - przestrzeń unormowana, przestrzeń liniowa, w której określono pojęcie normy będące uogólnieniem pojęcia długości (modułu) wektora w przestrzeni euklidesowej.

Zastosowanie metody FCM podczas klasteryzacji włącza następujące kroki (Bezdek, 1981):

1. Losowo jest inicjowany stopień przynależności punktu x_i do j-tego klastra: μ_{ij}^m .
2. Obliczane są centra klastrów c_j na podstawie wzoru:

$$c_j = \frac{\sum_{i=1}^D \mu_{ij}^m x_i}{\sum_{i=1}^D \mu_{ij}^m} \quad (7.2)$$

3. Aktualizowane są μ_{ij}^m na podstawie następującego wzoru:

$$\mu_{ij} = \frac{1}{\sum_{k=1}^N \left(\frac{\|x_i - c_j\|}{\|x_i - c_k\|} \right)^{\frac{2}{m-1}}} \quad (7.3)$$

4. Obliczane są funkcje celu J_m
5. Kroki 2 – 4 są powtarzane dopóki różnica J_m dla dwóch kolejnych kroków nie będzie mniejsza od określonego progu minimalnego lub dopóki nie zostanie wykonana określona maksymalna liczba iteracji.

7.2.2 Dane wejściowe

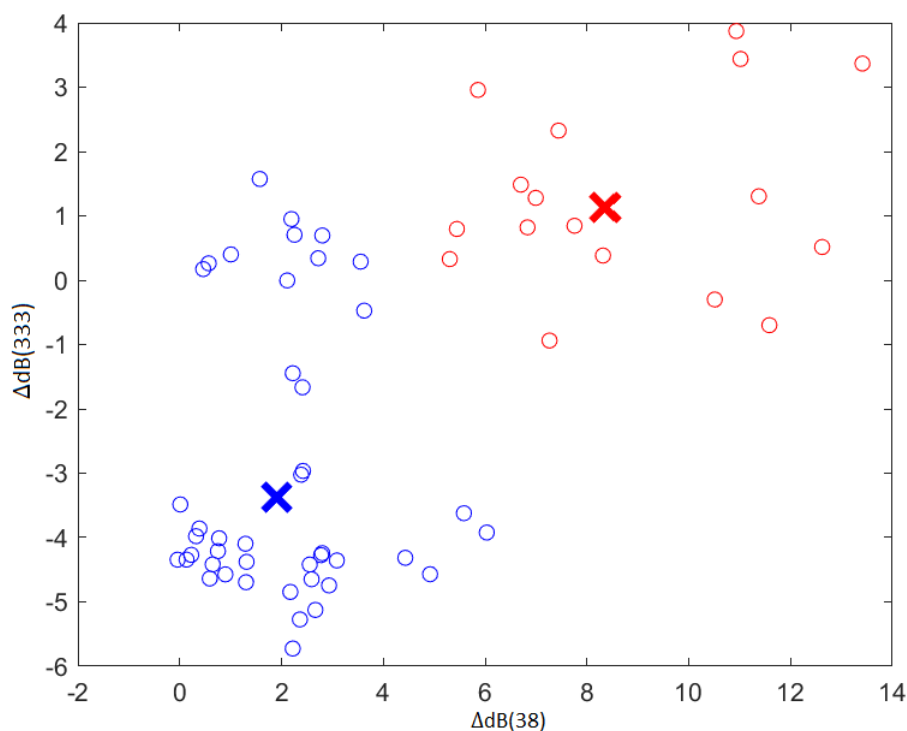
Danymi wejściowymi były odpowiedzi częstotliwościowe $\Delta\text{dB}(38)$ i $\Delta\text{dB}(333)$ dla częstotliwości akustycznych 38 kHz i 333 kHz w odniesieniu do 120 kHz dla poszczególnych ławic akustycznych. Zgodnie z raportem ICES (Korneliussen, 2018), odpowiedź częstotliwościowa dla wielu gatunków organizmów na różnych akwenach może służyć dla ich klasyfikacji. Ponieważ algorytm opiera się na klasteryzacji punktów danych przygotowano zestawy współrzędnych: dla każdej ławicy o numerze i współrzędne punktu danych x_i , to $\Delta\text{dB}(38)_i$, oraz $\Delta\text{dB}(333)_i$.

Niżej korzystano z następującego nazewnictwa dla zbiorów danych z których korzystamy:

- zbiór danych $\Delta\text{dB}(38)$ i $\Delta\text{dB}(333)$ dla ławic z sezonu jesiennego nazywamy dalej - zbiór danych 1;
- zbiór danych $\Delta\text{dB}(38)$ i $\Delta\text{dB}(333)$ dla ławic w toni wodnej dla sezonu wiosennego - zbiór danych 2;
- zbiór danych $\Delta\text{dB}(38)$ i $\Delta\text{dB}(333)$ dla ławic w warstwie przydennej dla sezonu wiosennego - zbiór danych 3.

7.3 Wyniki: trzy próby klasyfikacji

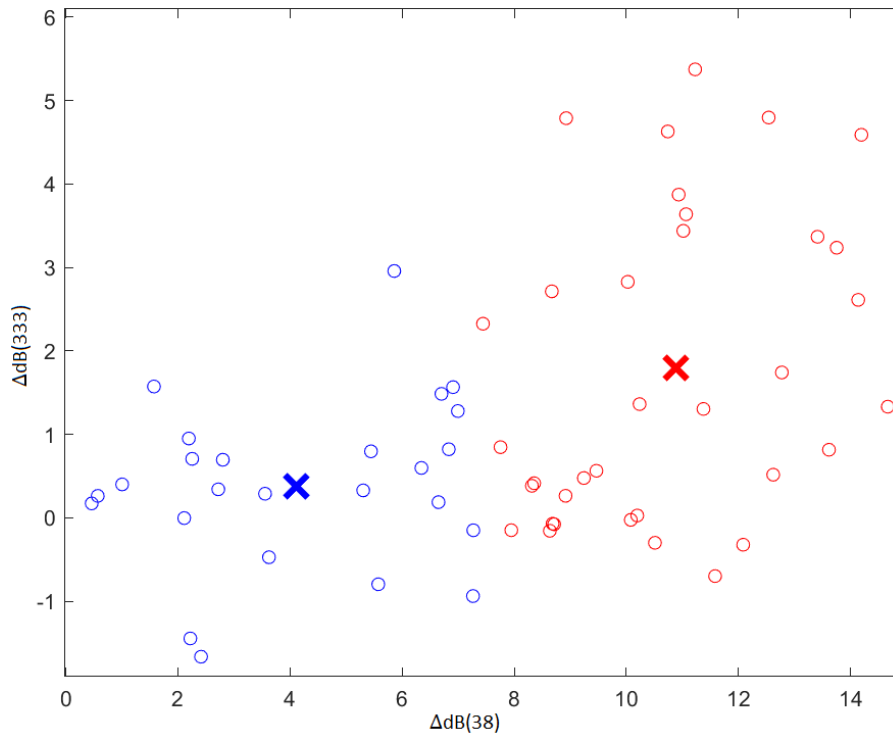
Wyniki próby rozróżnienia dwóch grup organizmów zgromadzonych w ławicach w toni wodnej w sezonie jesiennym (zbiór danych 1) i w toni wodnej powyżej 5 m nad dnem morza w sezonie wiosennym (zbiór danych 2) (próba 1) zademonstrowano na Rys. 7.1. Na rysunku na osiach poziomej i pionowej przedstawiono parametry $\Delta\text{dB}(38)$ oraz $\Delta\text{dB}(333)$. Rysunek ten przedstawia wyniki klasteryzacji FCM dla danych, $\Delta\text{dB}(38)$ (oś pozioma) i $\Delta\text{dB}(333)$ (oś pionowa) z podziałem na dwa klastry (kolory czerwony i niebieski). Centra klastrów są oznaczone za pomocą znacznika „X”.



Rys. 7.1 Wyniki klasteryzacji FCM. – próba 1

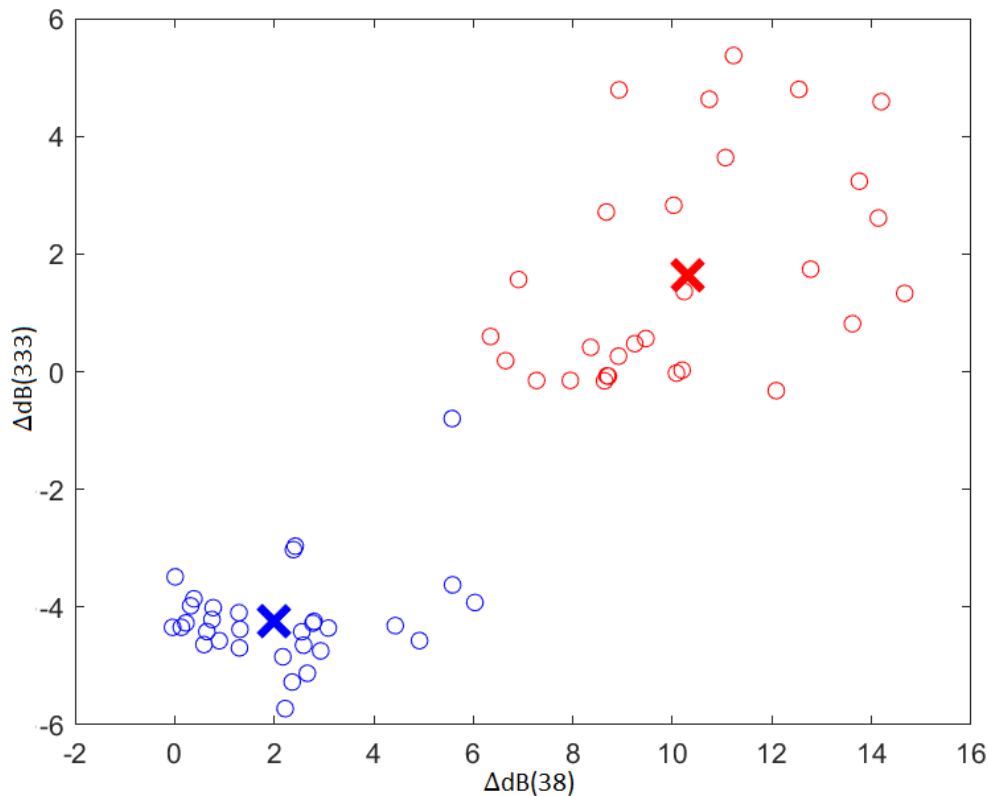
Odpowiednio 69,8% i w 30,2 % danych, zakwalifikowanych do klastra, zaznaczonego kolorem niebieskim, należą do kolekcji danych z sezonów jesiennego i wiosennego, czyli w klastrze tym dominują dane z sezonu jesiennego (ze zbioru danych 1). Wszystkie zaś dane

zaklasyfikowane do klastra, zaznaczonego kolorem czerwonym, należą do sezonu wiosennego (zbiór danych 2). Niebieski klaster składa się z większej liczby punktów danych. (Rys. 7.1)



Rys. 7.2 Wyniki FCM. Dane z kwiecien dla dwóch grup organizmów: przebywających w toni wodnej i przebywających przy dnie.

Podjęto również próbę (próba 2) rozróżnienia dwóch grup organizmów w ławicach w 5 m – warstwie nad dnem morza (zbiór danych 3) oraz powyżej tej warstwy (zbiór danych 2). Wyniki klasteryzacji FCM z podziałem na dwa klastry są przedstawione na Rys. 7.2. Rysunek ten oraz rysunek następny (Rys. 7.3) jest zbudowany w sposób analogiczny do Rys. 7.1. Klaster, zaznaczony kolorem niebieskim, składa się głównie (w 80,0%) z danych dla ławic akustycznych przebywających w toni wodnej (zbiór danych 2) i w 20,0% - z danych dla ławic akustycznych przebywających przy dnie (zbiór danych 3). Dla klastra, zaznaczonego kolorem czerwonym, te liczby procentowe, to odpowiednio 28,6% i 71,4%, czyli dominują dane dla ławic w warstwie przydennej (zbiór danych 3).

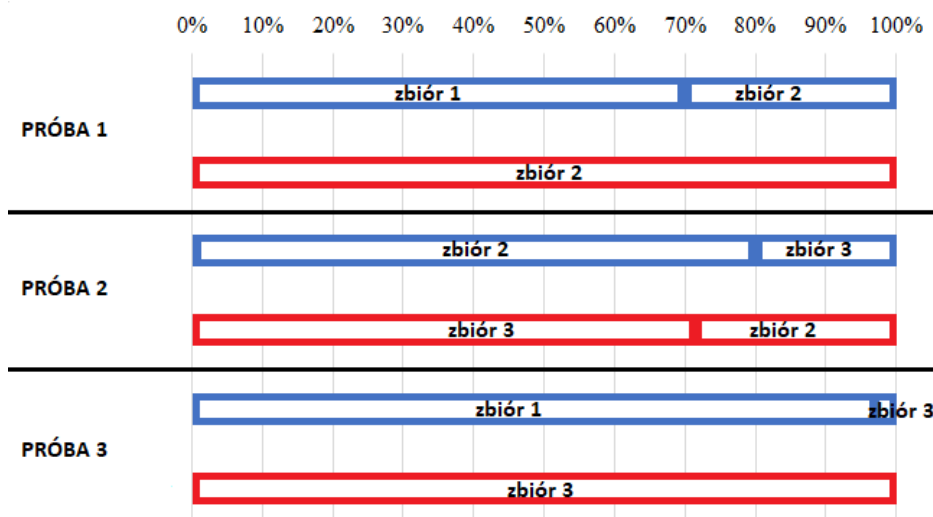


Rys. 7.3 Wyniki FCM. Dane dla dwóch grup organizmów: przebywających w toni wodnej w październiku oraz przebywających przy dnie w kwietniu.

Wykonano również próbę (próba 3) rozróżnienia organizmów zaobserwowanych w ławicach w toni wodnej w październiku (zbiór danych 1) oraz ławic zaobserwowanych w warstwie przydennej w kwietniu (zbiór danych 3). Wyniki próby zademonstrowano na Rys. 7.3. Odpowiednio 96,8% i 3,2% danych, zakwalifikowanych do klastra, zaznaczonego kolorem niebieskim, należą do kolekcji danych z sezonów jesiennego (dla ławic w toni wodnej - zbiór danych 1) i wiosennego (dla ławic w warstwie przydennej - zbiór danych 3), czyli dominują dane z października. Wszystkie zaś dane zaklasyfikowane do klastra, czerwonego, należą do sezonu wiosennego (zbiór danych 3).

7.4 Dyskusja – trzy próby klasyfikacji

Na Rys. 7.4 porównano wyniki dla trzech przedstawionych prób klasyfikacji grup organizmów. Informacja o numerze próby jest przedstawiona w lewej części rysunku. Niebieskie i czerwone ramki poziome odpowiadają odpowiednio klastrze niebieskim i czerwonym z Rys. 7.1, Rys. 7.2, Rys. 7.3. Na osi poziomej prezentowane są procentowe udziały danych z odpowiedniego zbioru danych (zbiór jest opisany na słupku) w danym klastrze.



Rys. 7.4 Zestawienie wyników klasteryzacji FCM (3 próby rozróżnienia różnych grup organizmów).

Trzy wykonane próby klasyfikacji oparte na zastosowaniu metody klasteryzacji Fuzzy c-means (FCM) do zbiorów danych $\Delta dB(38)$ oraz $\Delta dB(333)$ dla ławic akustycznych, pokazały skuteczność w odróżnianiu grup organizmów, charakteryzujących się różnym zachowaniem i właściwościami akustycznymi. Z Rys. 7.4 wynika, że najbardziej skuteczna była próba 3, ponieważ każdy z klastrów zawierał dane wyłącznie z jednego zbioru danych: dane ze zbioru 1 w klastrze niebieskim (tylko 3,2% danych ze zbioru 3) oraz wyłącznie dane ze zbioru 3 w klastrze czerwonym. Pozostałe próby 1 i 2 również można uznać za skuteczne: w próbie 1 zbiory danych 1 i 2 dominowały odpowiednio ok. 70% i 100% całości poszczególnych klastrów. Natomiast w próbie 2 zbiory danych 2 i 3 stanowiły ok. 80% i 70% odpowiednio klastra niebieskiego i czerwonego.

Niestety jak to zostało podane w podrozdziałach 2.5 i 3.3.3 nie posiadamy dokładnej informacji o gatunkach ryb obecnych w październiku i kwietniu w głębokowodnej części Zatoki Puckiej. Jak zostało to zaznaczone w podrozdziałach źródła pośrednie pozwalają założyć, że zarówno w październiku jak i w kwietniu mogły być zaobserwowane: śledź i szprot; z bardziej prawdopodobną dominacją śledzia w październiku, a szprota w kwietniu.

Przeprowadzone hydroakustyczne obserwacje zaś sugerują różnice w zachowaniu rozpatrywanych grup organizmów jak zostało to opisane w podrozdziale 7.1. Różnice w zachowaniu ławic (w rozkładzie przestrzennym organizmów lub we wzorcu dobowej migracji pionowej) mogą sugerować, że mamy do czynienia dla każdej z prób z różnymi gatunkami organizmów w porównywanych grupach lub z różnymi grupami wiekowymi tego samego gatunku. Na przykład w Rozdziale 5 został zademonstrowany różny charakter migracji

dla osobników znajdujących się w dzień w ławicach w pobliżu dna i w toni wodnej. Axenrot i in. (2004) pokazał dla płytkowodnej Zatoce Himmerfjarden w północno zachodniej części Morza Bałtyckiego różny charakter migracji śledzia Bałtyckiego należącego do różnych grup wiekowych.

Dla przeprowadzonych prób klasyfikacji, możliwość rozróżnienia grup organizmów ma u podstaw różnicę we właściwościach rozpraszających organizmów. Ta różnica z kolei, jak to zostało przedyskutowane w Rozdziale 4, może być związana z różnicą w orientacji organizmów oraz z różnym kształtem geometrycznym i wymiarami geometrycznymi pęcherza pławnego (np., Nakken i Olsen, 1977; Blaxter i Batty, 1990; Ona, 1990; Simmonds i MacLennan, 2005; Fässler i in., 2008; Fässler i Gorska, 2009). Uwzględniając, że na kształt pęcherza pławnego i na jego wymiary wpływają: gatunek ryb, wiek organizmów, głębokość, na której organizm się znajduje, stan gonad oraz stopień napełnienia żołądka, możemy się spodziewać, że zaobserwowane i opisane wyżej różnice mogą być związane z obecnością na poligonie badawczym różnych gatunków ryb lub ryb tego samego gatunku, ale należących do różnych grup wiekowych oraz o różnym stanie napełnienia żołądka lub stanie rozwoju gonad.

Dla prowadzenia klasyfikacji mogą być wykorzystane również inne parametry, które zostały wprowadzone przy opisie rozkładów przestrzennych siły objętościowego rozpraszania wstecznego (Rozdział 4): centrum środka ciężkości, unormowany moment bezwładności oraz zintegrowana po głębokości siła objętościowego rozpraszania wstecznego. Interesujące są ich wartości zarówno dla dnia i nocy. Na te parametry wpływają nie tylko właściwości rozpraszające organizmów oraz struktura termohalinowa toni wodnej, ale również to jak wpływa ta struktura na zachowanie organizmów.

7.5 Podsumowanie

Wykorzystanie zbiorów danych $\Delta dB(38)$ oraz $\Delta dB(333)$ (odpowiedzi częstotliwościowe) dla ławic akustycznych w algorytmie klasyfikacyjnym, okazało się skutecznym w odróżnianiu grup organizmów, charakteryzujących się różnym zachowaniem i właściwościami akustycznymi.

Istnieje możliwość zwiększenia skuteczności klasyfikacji przy wykorzystaniu pozostałych wprowadzonych parametrów opisujących rozkłady przestrzenne siły objętościowego rozpraszania wstecznego.

8. Podsumowanie: główne wyniki i ich znaczenie (aspekty naukowy i praktyczny)

Przede wszystkim należy podkreślić, że przeprowadzone badania, wyniki których są przedstawione w dysertacji, należą do nowatorskiego nurtu światowego w rozwoju hydroakustyki. Nurt ten uwzględnia rosnące potrzeby badań ekosystemów morskich oraz ekosystemowego zarządzania obszarami morskimi. Polega on na rozwoju nowych klasyfikacyjnych technik hydroakustycznych, w tym zwiększeniu obszaru ich zastosowania do badań szerszego zakresu: komponentów ekosystemów morskich i ich charakterystyk. Określenie charakterystycznych cech rozkładów siły objętościowego rozpraszania wstecznego dla rozpraszania fal akustycznych na rybach Zatoki Puckiej, któremu jest poświęcona niniejsza rozprawa, jest niezbędnym krokiem umożliwiającym dalsze prace nad rozwojem metod klasyfikacyjnych dla badań biologicznych na obszarze Zatoki Puckiej. Podsumowując otrzymane wyniki można stwierdzić, że wszystkie sformułowane w Rozdziale 1 cele szczegółowe, zostały zrealizowane:

1. **Badania wykazały, że charakter rozkładów przestrzennych siły objętościowego rozpraszania wstecznego dla rozpraszania fali akustycznej na skupiskach ryb w zewnętrznej Zatoce Puckiej istotnie różni się od charakteru rozkładów zaobserwowanych hydroakustycznie w głębokowodnej części Zatoki Gdańskiej oraz na Głębi Gdańskiej. Wykazano następujące różnice:**

- 1.1 Dla pory dziennej:

Jeśli w głębokowodnej części Zatoki Gdańskiej (w październiku) oraz na Głębi Gdańskiej (we wszystkich sezonach) położenie ławic (sezony wiosenny, letni i jesienny) w toni wodnej lub warstwy rozpraszającej (w sezonie zimowym) definiowała pozycja halokliny, to w zewnętrznej Zatoce Puckiej istotnym czynnikiem hydrofizycznym może być głębokość, do której sięga strefa eufotyczna: w kwietniu, gdy zanotowano najmniejszą głębokość przenikania strefy eufotycznej, zanotowano również najmniejsze głębokości środka ciężkości dla rozkładu siły objętościowego rozpraszania wstecznego dla ławic z toni wodnej.

- 1.2 Dla pory nocnej:

Jeśli w głębokowodnej części Zatoki Gdańskiej (dla października) oraz na Głębi Gdańskiej (dla wszystkich sezonów) położenie nocnych warstw rozpraszających

definiowała przede wszystkim haloklina, to w zewnętrznej Zatoce Puckiej, gdzie haloklina nie jest obserwowana, w sezonie jesiennym w nocy warstwa rozpraszająca była obserwowana na mniejszych głębokościach niż w sezonie zimowym, gdzie znajdowała się przy dnie, co mogło być związane z niższą temperaturą słupa wody w okresie zimowym. W sezonie zaś wiosennym warstwa rozpraszająca znajdowała się przy dnie, gdzie były obecne wody o większym zasoleniu.

- 1.3 Zaobserwowano również, że na Zatoce Puckiej we wszystkich sezonach za wyjątkiem sezonu zimowego echa od pojedynczych organizmów „wypełniają” słup wody głównie w porze nocnej, czego nie notowano w obserwacjach w głębokowodnej części Zatoki Gdańskiej oraz na Głębi Gdańskiej ze względu na zastosowaną metodykę pomiarów i analizy danych.

2. Pomiary hydroakustyczne, wyniki których są przedstawione w niniejszej rozprawie, pogłębiają zrozumienie zmienności sezonowej i dobowej parametrów, opisujących rozkłady przestrzenne siły objętościowego rozpraszania wstecznego dla rozpraszania fali akustycznej na skupiskach ryb. Wykazano różnicę w charakterze zmienności czasowej (dobowej i sezonowej) tych parametrów w porównaniu z badanymi wcześniej głębokowodnymi obszarami :

- 2.1 Zademonstrowana sezonowa zmienność funkcji prawdopodobieństwa rozkładu unormowanego momentu bezwładności dla sygnałów echa (parametr ten opisuje rozrzut rozkładu przestrzennego siły objętościowego rozpraszania wstecznego względem jego środka ciężkości) oraz scałkowanej po głębokości siły objętościowego rozpraszania wstecznego impulsów echa (parametr energetyczny) dla pory dziennej jak i nocnej. Można mówić zarówno o zmienności sezonowej średnich wielkości parametrów jak zakresów ich zmian.

Wykazano dobową zmienność funkcji gęstości prawdopodobieństwa tych parametrów.

- 2.2 W odróżnieniu od głębokowodnej części Zatoki Gdańskiej i Głębi Gdańskiej, w Zatoce Puckiej:
 - we wszystkich sezonach unormowany moment bezwładności sygnałów echa osiąga mniejsze wartości w dzień niż w nocy, co wskazuje na mniejszy rozrzut pionowy organizmów w porze dziennej oraz charakteryzuje się w dzień mniejszym rozrzutem wartości w porównaniu z nocą,

- we wszystkich sezonach, z wyjątkiem sezonu zimowego, w porze dziennej jest obserwowana większa zmienność scałkowanej po głębokości siły objętościowego rozpraszania wstecznych impulsów echa w porównaniu z porą nocną, co wskazuje na większą zmienność horyzontalną rozkładu przestrzennego organizmów w dzień w porównaniu z nocą (ławice w porze dziennej).

3. Hydroakustyczne pomiary z zastosowaniem echosondy typu split-beam, prowadzone w sposób ciągły podczas trwania migracji, pozwoliły na wgląd w jaki sposób organizmy przemieszczają się w toni wodnej. Tak szczegółowe badania nie były prowadzone na głębszych obszarach Zatoki Gdańskiej i Głębi Gdańskiej w przeszłości. Przeprowadzone pomiary dając wgląd w charakterystyczne cechy migracji w zewnętrznej Zatoce Puckiej wykazały również różnice z wymienionymi wyżej obszarami.

3.1 Pokazano, że wzorzec dobowej migracji pionowej w zewnętrznej Zatoce Puckiej zależy od sezonu:

- Jesienią zaobserwowano jednolity charakter zachowania się organizmów podczas dobowej migracji pionowej zarówno o wschodzie i zachodzie słońca. Podczas migracji w górę w czasie zachodu słońca ławice akustyczne łączyły się w warstwę rozpraszającą w górnej części toni wodnej, a podczas migracji w dół o wschodzie słońca z warstwy rozpraszającej formowały się ławice akustyczne.
- Podczas dobowych migracji pionowych wiosną nie zaobserwowano jednolitego charakteru zachowania się organizmów: organizmy znajdujące się w warstwie przydennej o większym zasoleniu, pozostając w tym samym zakresie głębokości, zmieniały charakter występowania: zaobserwowano ławice akustyczne w dzień i warstwę rozpraszającą w nocy. Z kolei druga grupa organizmów, w dzień skupiona w ławicach w toni wodnej na mniejszych głębokościach, w nocy rozpraszająca się w całej toni wodnej zbliżając się również ku powierzchni morza.

3.2 Określono sezonową zmienność amplitudy dobowych migracji pionowych zarówno o wschodzie i zachodzie słońca: w zimie amplituda dobowych migracji pionowych była mniejsza niż jesienią czy zimą.

- 3.3 Dla Zatoki Puckiej wykazano sezonową zależność czasu rozpoczęcia dobowych migracji pionowych oraz czasu ich trwania zarówno dla wschodu i zachodu słońca: dobowe migracje pionowe zarówno o wschodzie i zachodzie słońca na wiosnę trwają dłużej niż na jesień, oraz rozpoczynają się wcześniej względem wschodu słońca i później względem zachodu słońca w porównaniu z jesienią. Czas trwania dobowej migracji pionowej w Zatoce Puckiej w sezonie jesiennym był dłuższy niż w głębszych wodach Polskiej strefy.
- 3.4 Prędkości dobowych migracji pionowych udało się wyznaczyć jedynie dla sezonu jesiennego. Pokazano, że prędkości dobowych migracji pionowych o wschodzie i zachodzie słońca w Zatoce Puckiej są większe niż średnia wartość dla obszaru całego południowego Bałtyku dla sezonu jesiennego, natomiast są mniejsze niż na Głębi Gdańskiej.

4. Po raz pierwszy dla polskich obszarów południowego Bałtyku przeprowadzono szczegółowe badania dla ławic akustycznych.

- 4.1 Sparametryzowano charakterystyczne cechy morfometryczne, energetyczne oraz zależność częstotliwościową („ang. frequency response”) dla rozkładów przestrzennych siły objętościowego rozpraszania wstecznego dla ławic akustycznych w różnych sezonach (sezony jesienny, wiosenny i letni). Wykazano:
- najmniejszą uśrednioną głębokość środka ciężkości oraz najmniejszą uśrednioną scałkowaną siłę objętościowego rozpraszania wstecznego dla ławic w sezonie wiosennym. W sezonie zaś letnim, w toni wodnej zaobserwowano ławice o największej uśrednionej głębokości środka ciężkości,
 - największe wymiary pionowe ławic - w październiku, a najmniejsze – w lipcu.
 - inny charakter zależności częstotliwościowej w dzień w sezonach letnim i wiosennym, w odróżnieniu od jesiennego: w tych sezonach odpowiedź częstotliwościowa na częstotliwości 333 kHz jest większa niż dla częstotliwości 120 kHz dla zdecydowanie większej (więcej niż 76%) liczby ławic.
- 4.2 Przeanalizowano szczególnie dla sezonu wiosennego proces formowania się ławic akustycznych o wschodzie słońca i ich rozproszenia o zachodzie słońca - w odróżnieniu od badań prowadzonych w przeszłości dla południowego Bałtyku, zwrócono uwagę na czas powstawania\zanikania ławic

o wschodzie\zachodzie słońca podczas dobowej migracji pionowej (sezon wiosenny). Pokazano, że proces przebiega szybciej o wschodzie niż o zachodzie słońca.

5. Po raz pierwszy dla Morza Bałtyckiego przeanalizowano zmiany dobowe i sezonowe odpowiedzi częstotliwościowej dla skupisk organizmów oraz przedstawiono ich interpretację.

5.1 Zademonstrowano sezonowe zmiany częstotliwościowej zależności siły rozpraszania wstecznego oraz odpowiedzi częstotliwościowej:

- W sezonach jesiennym i zimowym zaobserwowano zarówno w godzinach dziennych jak i nocnych zmniejszenie siły objętościowego rozpraszania wstecznego ze wzrostem częstotliwości, co jest typowe dla ryb z pęcherzem pławnym (np. ryb śledziowatych).
- Dla sezonów zimowego i jesiennego zaobserwowano, w odróżnieniu od wiosny i lata, mniejsze wartości siły rozpraszania wstecznego dla częstotliwości 333 kHz w porównaniu z częstotliwością 120 kHz. Wiosną i latem ten stosunek jest odwrotny.

5.2 Zademonstrowano dobową różnicę częstotliwościowej zależności dla tych samych organizmów zarówno dla sezonów jesiennego jak i zimowego:

- większe średnie wartości siły objętościowego rozpraszania wstecznego zostały zaobserwowane w dzień w porównaniu z nocą, co może być związane z większymi koncentracjami organizmów w skupiskach dziennych,
- mniejsze wartości parametrów $\Delta\text{dB}(38)$ oraz $\Delta\text{dB}(333)$ zaobserwowano w dzień w porównaniu z nocą.

6. Po raz pierwszy dla Morza Bałtyckiego podjęto wysiłek przygotowawczy -analizę cech szczególnych rozkładów przestrzennych siły rozpraszania wstecznego (dla rozpraszania na rybach) - niezbędny dla opracowania hydroakustycznych metod klasyfikacyjnych. Podjęto pierwsze próby klasyfikacji.

6.1 Wykorzystanie zbiorów danych $\Delta\text{dB}(38)$ oraz $\Delta\text{dB}(333)$ (odpowiedzi częstotliwościowe) dla ławic akustycznych w algorytmie klasyfikacyjnym,

okazało się skuteczne w odróżnianiu grup organizmów, charakteryzujących się różnym zachowaniem i właściwościami akustycznymi.

- 6.2 O efektywności wykorzystania tej charakterystyki świadczy również fakt, że charakter odpowiedzi częstotliwościowych, określonych w wyniku pomiarów w sezonie jesiennym oraz ich zgodność ich z wynikami modelowania numerycznego dla odpowiedzi częstotliwościowej dla śledzia i szprota bałtyckich, potwierdzają zaobserwowaną w tej pracy oraz w badaniach prowadzonych w przeszłości obecność ryb śledziowatych na poligonie badawczym w tym sezonie.
- 6.3 Zaobserwowane różnice parametrów morfometrycznych i energetycznego dla ławic akustycznych w różnych sezonach również sugerują możliwość wykorzystania ich do klasyfikacji hydroakustycznej w Zatoce Puckiej. Jednak, aby jednoznacznie określić tę możliwość, potrzebna jest dodatkowa informacja o gatunkach ryb na poligonie badawczym, ich wieku, rozkładzie ich według długości, stanu gonad, stopniu napełnienia żołądka i in., czyli o wszystkich charakterystykach, które odpowiadają za kształt pęcherza pławnego wpływającego na siłę objętościowego rozpraszania wstecznego organizmów. Wymaga to zbierania materiału biologicznego (zaciągi) jednocześnie z pomiarami hydroakustycznymi.

Przeprowadzone badania posłużą rozwojowi klasyfikacyjnych metod hydroakustycznych do badań stanu oraz funkcjonowania ekosystemów Morza Bałtyckiego.

Należy podkreślić, że został wybrany do badań obszar głębokowodnej części Zatoki Puckiej zewnętrznej, gdzie badania hydroakustyczne o charakterze biologicznym prowadzone były w bardzo ograniczonym zakresie i gdzie istnieją również luki wiedzy dotyczącej sezonowych i dobowych zmian rozkładów przestrzennych, biomasy, zachowania oraz składu gatunkowego ryb. Wiedza otrzymana w ramach niniejszej pracy, dotycząca rozkładów przestrzennych ryb, jest istotna dla dalszych badań ichtiologicznych i ekologicznych tego obszaru.

Uwzględniając powiązanie ekosystemu Zatoki z ekosystemem całego Morza Bałtyckiego, można stwierdzić, że prowadzone podczas realizacji doktoratu badania są istotne dla pogłębienia wiedzy dotyczącej ekosystemu całego morza.

Z kolei biorąc pod uwagę, że ekosystem Zatoki Gdańskiej jest dla mórz półzamkniętych obszarem modelowym do badań wpływu działalności człowieka na ekosystemy morskie, należy zaznaczyć, że prowadzone badania mogą być istotne dla zrozumienia funkcjonowania innych mórz półzamkniętych.

Przeprowadzone badania posiadają również istotny wymiar praktyczny, ponieważ zdobyta wiedza oraz wykonany krok w kierunku opracowania klasyfikacyjnych metod hydroakustycznych, otwierając nowe możliwości dla zrozumienia funkcjonowania ekosystemu Zatoki Gdańskiej, przyczynią się do doskonalenia naukowych podstaw innowacyjnego podejścia, jakim jest podejście ekosystemowe w zintegrowanym zarządzaniu obszarami morskimi.

Spis rysunków

| | | |
|-----------|--|----|
| Rys. 2.1 | Poglądowy rysunek techniczny prezentujący pokrycie wiązek z echosond zainstalowanych na r/v Oceanografie (Cezary Komor, dane niepublikowane). ... | 30 |
| Rys. 2.2 | Schemat funkcji kierunkowości echosond zamontowanych na r/v Oceanograf (Cezary Komor, dane niepublikowane). | 31 |
| Rys. 2.3 | Usytuowanie obszaru badawczego.(Google Earth). | 35 |
| Rys. 2.4 | Mapa przedstawiająca głębokość w badanym obszarze wraz z dokładnym umiejscowieniem. Czarnymi liniami zaznaczono oraz ponumerowano transekty na których były zbierane dane hydroakustyczne za pomocą echosond typu split-beam. | 36 |
| Rys. 2.5 | Echogramy zarejestrowane na tej samej pozycji, z wyłączonym oświetleniem statku (po lewej), i włączonym oświetleniem po upływie 30 minut (po prawej), wrzesień 2019. | 39 |
| Rys. 2.6 | Zdalnie sterowany podwodny pojazd - Guardian miniROV, od firmy – Subsea Tech. | 44 |
| Rys. 3.1 | Pionowe profile zasolenia i temperatury. Październik 2018 | 49 |
| Rys. 3.2 | Echogram zarejestrowany na częstotliwości 38 kHz w ciągu dnia, październik 2018. | 50 |
| Rys. 3.3 | Echogram zarejestrowany na częstotliwości 38 kHz w ciągu nocy, październik 2018. | 50 |
| Rys. 3.4 | Pionowe profile zasolenia i temperatury. Luty 2019 | 51 |
| Rys. 3.5 | Echogram zarejestrowany na częstotliwości 38 kHz w ciągu dnia (A). Na rysunku (B) - zbliżenie części zaznaczonej czerwoną ramką na rysunku A, luty 2019. | 52 |
| Rys. 3.6 | Echogram zarejestrowany na częstotliwości 38 kHz w ciągu nocy, luty 2019. | 53 |
| Rys. 3.7 | Pionowe profile zasolenia i temperatury. Kwiecień 2019. | 54 |
| Rys. 3.8 | Echogram zarejestrowany na częstotliwości 38 kHz w ciągu dnia, kwiecień 2019. . | 55 |
| Rys. 3.9 | Echogram zarejestrowany na częstotliwości 38 kHz w ciągu nocy, kwiecień 2019. | 56 |
| Rys. 3.10 | Pionowe profile zasolenia i temperatury. Lipiec 2019. | 57 |
| Rys. 3.11 | Echogram zarejestrowany na częstotliwości 38 kHz w ciągu dnia, lipiec 2019. | 58 |
| Rys. 3.12 | Echogram zarejestrowany na częstotliwości 38 kHz w ciągu nocy, lipiec 2019. | 58 |
| Rys. 3.13 | Zdjęcie wykonane za pomocą pojazdu Guardian miniROV, 17 luty 2019 r. | 65 |

| | |
|--|-----|
| Rys. 4.1 Głębokość środka ciężkości – zmienność dobową i sezonową | 74 |
| Rys. 4.2 Średnia głębokość środka ciężkości rozkładu przestrzennego siły objętościowego rozpraszania wstecznego dla dnia (pomarańczowy) oraz nocy (niebieski) dla analizowanych miesięcy. | 76 |
| Rys. 4.3 Unormowany moment bezwładności- zmienność sezonowa i dobową..... | 79 |
| Rys. 4.4 Uśredniony moment bezwładności dla godzin dziennych (pomarańczowy) i nocnych (niebieski) dla analizowanych miesięcy. | 82 |
| Rys. 4.5 Scałkowana po głębokości siła objętościowego rozpraszania wstecznego impulsów echa..... | 84 |
| Rys. 4.6 Uśredniona siła objętościowego rozpraszania wstecznego dla dnia (pomarańczowy kolor) i nocy (niebieski kolor), dla poszczególnych miesięcy. | 90 |
| Rys. 4.7 Głębokość środka ciężkości względem scałkowanej po głębokości siły objętościowego rozpraszania wstecznego dla października 2018 (A), lutego 2019 (B), kwietnia 2019 (C) oraz lipca 2019 (D). Niebieskie punkty odpowiadają pomiarom nocnym, czerwone – dziennym. | 92 |
| Rys. 4.8 Ławice akustyczne – histogramy uśrednionej głębokości środka ciężkości - trzy sezony: jesienny (kolor niebieski), wiosenny (kolor zielony) i letni (kolor pomarańczowy). | 93 |
| Rys. 4.9 Ławice akustyczne – histogramy uśrednionego unormowanego momentu bezwładności – trzy sezony: jesienny (kolor niebieski), wiosenny (kolor zielony) i letni (kolor pomarańczowy). | 94 |
| Rys. 4.10 Ławice akustyczne – histogramy uśrednionej scałkowanej po głębokości dla poszczególnych impulsów siły objętościowego rozpraszania wstecznego – trzy sezony: jesienny (kolor niebieski), wiosenny (kolor zielony) i letni (kolor pomarańczowy). | 95 |
| Rys. 5.1 Echogramy przedstawiające początek dobowej migracji pionowej w dół podczas wschodu słońca - pomiar ze statku zakotwiczonego na Zatoce Puckiej. Październik 2018 | 102 |
| Rys. 5.2 Echogram po około 45 minutach od rozpoczęcia dobowej migracji pionowej w dół podczas wschodu słońca - pomiar ze statku zakotwiczonego na Zatoce Puckiej. Październik 2018 | 103 |

| | |
|--|-----|
| Rys. 5.3 Echogram przedstawiający ostatnią fazę dobowej migracji pionowej w dół podczas wschodu słońca pomiar ze statku zakotwiczonego na Zatoce Puckiej Zewnętrznej. Październik 2018 | 104 |
| Rys. 5.4 Obraz akustyczny dla godzin dziennych (po zakończeniu migracji), dane zebrane podczas płynięcia statku wzdłuż przekroju badawczego przez obszar, gdzie zakotwiczony statek dryfował podczas rejestrowania danych hydroakustycznych w celu obserwacji dobowej migracji pionowej o wschodzie słońca. Październik 2018. | 104 |
| Rys. 5.5 Zmiany głębokość środka ciężkości rozkładu przestrzennego siły objętościowego rozpraszania wstecznego podczas dobowej migracji pionowej o wschodzie słońca, październik 2018. | 105 |
| Rys. 5.6 Czasowe zmiany unormowanego momentu bezwładności rozkładu przestrzennego siły objętościowego rozpraszania wstecznego podczas dobowej migracji pionowej o wschodzie słońca, październik 2018. | 106 |
| Rys. 5.7 Echogram przedstawiający początek dobowej migracji pionowej w górę podczas zachodu słońca - pomiar ze statku zakotwiczonego na Zatoce Puckiej Zewnętrznej. Październik 2018 | 107 |
| Rys. 5.8 Echogram po około 40 minutach od rozpoczęcia dobowej migracji pionowej w górę podczas zachodu słońca - pomiar ze statku zakotwiczonego na Zatoce Puckiej Zewnętrznej. Październik 2018 | 107 |
| Rys. 5.9 Echogram po półtorej godziny od rozpoczęcia dobowej migracji pionowej w górę podczas zachodu słońca - pomiar ze statku zakotwiczonego na Zatoce Puckiej Zewnętrznej. Październik 2018 | 108 |
| Rys. 5.10 Obraz akustyczny w ciągu nocy (po zakończeniu migracji), dane zebrane podczas płynięcia statku wzdłuż przekroju badawczego przez obszar, gdzie zakotwiczony statek dryfował podczas rejestrowania danych hydroakustycznych w celu obserwacji dobowej migracji pionowej o zachodzie słońca. Październik 2018.. | 109 |
| Rys. 5.11 Zmiany czasowe głębokości środka ciężkości rozkładu przestrzennego siły objętościowego rozpraszania wstecznego podczas zachodu słońca, październik 2018..... | 110 |
| Rys. 5.12 Czasowe zmiany unormowanego momentu bezwładności rozkładu przestrzennego siły objętościowego rozpraszania wstecznego podczas dobowej migracji pionowej o zachodzie słońca, październik 2018. | 111 |

- Rys. 5.13 Echogram przedstawiający początek dobowej migracji pionowej w dół podczas wschodu słońca – pomiar wykonany z płynącego statku wzdłuż przekroju badawczego na Zatoce Puckiej. Kwiecień 2019. 112
- Rys. 5.14 Echogram po ponad 1 godzinie od rozpoczęcia dobowej migracji pionowej w dół podczas wschodu słońca - pomiar wykonany z płynącego statku wzdłuż przekroju badawczego na Zatoce Puckiej. Kwiecień 2019 112
- Rys. 5.15 Echogram po około 2 godzinach od rozpoczęcia dobowej migracji pionowej w dół podczas wschodu słońca - pomiar wykonany z płynącego statku wzdłuż przekroju badawczego na Zatoce Puckiej. Kwiecień 2019. 113
- Rys. 5.16 Echogram po około 2 godzinach i 40 minutach od rozpoczęcia dobowej migracji pionowej w dół podczas wschodu słońca - pomiar wykonany z płynącego statku wzdłuż przekroju badawczego na Zatoce Puckiej. Kwiecień 2019. 113
- Rys. 5.17 Obraz akustyczny w ciągu dnia (po zakończeniu migracji), dane zebrane w dzień podczas płynięcia statku wzdłuż przekroju badawczego, gdzie rejestrowano dane hydroakustyczne w celu obserwacji dobowej migracji pionowej o wschodzie słońca. Kwiecień 2019. 114
- Rys. 5.18 Zmiany czasowe głębokości środka ciężkości rozkładu przestrzennego siły objętościowego rozpraszania wstecznego podczas wschodu słońca, kwiecień 2019. 115
- Rys. 5.19 Czasowe zmiany unormowanego momentu bezwładności rozkładu przestrzennego siły objętościowego rozpraszania wstecznego podczas wschodu słońca, kwiecień 2019..... 115
- Rys. 5.20 Echogram przedstawiający początek dobowej migracji pionowej w górę podczas zachodu słońca pomiar wykonany z płynącego statku wzdłuż przekroju badawczego na Zatoce Puckiej. Kwiecień 2019. 116
- Rys. 5.21 Echogram po półtorej godzinie od rozpoczęcia dobowej migracji pionowej w górę podczas zachodu słońca pomiar wykonany z płynącego statku wzdłuż przekroju badawczego na Zatoce Puckiej. Kwiecień 2019. 117
- Rys. 5. 22 Echogram po ponad 2 godzinach od rozpoczęcia dobowej migracji pionowej w górę podczas zachodu słońca pomiar wykonany z płynącego statku wzdłuż przekroju badawczego na Zatoce Puckiej. Kwiecień 2019. 117
- Rys. 5. 23 Obraz akustyczny w ciągu nocy (po zakończeniu migracji), dane zebrane podczas płynięcia statku wzdłuż przekroju badawczego pośrodku obszaru, gdzie

- rejestrowano dane hydroakustyczne w celu obserwacji dobowej migracji pionowej o zachodzie słońca. Kwiecień 2019. 118
- Rys. 5.24 Czasowe zmiany głębokości środka ciężkości rozkładu przestrzennego siły objętościowego rozpraszania wstecznego podczas zachodu słońca, kwiecień 2019. 119
- Rys. 5.25 Czasowe zmiany wartości unormowanego momentu bezwładności rozkładu przestrzennego siły objętościowego rozpraszania wstecznego podczas zachodu słońca, kwiecień 2019. 120
- Rys. 6.1 Objętościowa siła rozpraszania wstecznego dla różnych gatunków zwierząt. Krzywe dla typowych rozmiarów organizmów. Reprodukacja z Benoit-Bird i Lawson (2016). 135
- Rys. 6.2 Echogramy dla ławic ryb na częstotliwościach (zlewa na prawo) 38 kHz , 120 kHz i 333 kHz. 137
- Rys. 6.3 Przygotowanie danych hydroakustycznych do oszacowania odpowiedzi częstotliwościowej dla przedstawionej ławicy akustycznej (A) oraz warstwy rozpraszającej (B) – wyselekcjonowanie „trzonu”..... 138
- Rys. 6.4 Wykres SV(f) oraz raport wygenerowany przez program Sonar5-Pro, za pomocą funkcji frequency response. 139
- Rys. 6.5 Siła objętościowego rozpraszania wstecznego dla trzech częstotliwości: 38 kHz, 120 kHz, 333 kHz (dla 30 ławic akustycznych - dzień, oraz 30 „prób” z warstwy rozpraszającej - noc). Romby oznaczają wartość średnią, trójkąty symbolizują granice percentyli 95-tego (górny trójkąt) oraz 5-tego (dolny trójkąt), poziome kreski - maksymalna (górną kreską) i minimalną (dolną kreską) wartości. Październik: dzień (kolor pomarańczowy) i noc (kolor niebieski). 141
- Rys. 6.6 Różnica w decybelach $\Delta dB(f)$ dla $f = 38$ kHz i $f = 333$ kHz (dla 30 ławic akustycznych - dzień, oraz 30 „prób” z warstwy rozpraszającej - noc). Romby oznaczają wartość średnią, trójkąty symbolizują granice percentyli 95-tego (górny trójkąt) oraz 5-tego (dolny trójkąt). Październik: dzień (kolor pomarańczowy) i noc (kolor niebieski). 142
- Rys. 6.7 Siła objętościowego rozpraszania wstecznego dla trzech częstotliwości: 38 kHz, 120 kHz, 333 kHz (dla 30 „prób” z warstw rozpraszających zarówno w dzień i w nocy). Romby oznaczają wartość średnią, trójkąty symbolizują granice percentyli 95-tego (górny trójkąt) oraz 5-tego (dolny trójkąt), poziome kreski - maksymalna (górną

| | |
|---|-----|
| kreska) i minimalną (dolna kreska) wartości. Luty: dzień (kolor pomarańczowy) i noc (kolor niebieski)..... | 143 |
| Rys. 6.8 Różnica w decybelach $\Delta\text{dB}(f)$ dla $f = 38 \text{ kHz}$ i $f = 333 \text{ kHz}$. Romby oznaczają wartość średnią, trójkąty symbolizują granice percentyli 95-tego (górny trójkąt) oraz 5-tego (dolny trójkąt). Luty: dzień (kolor pomarańczowy) i noc (kolor niebieski)..... | 143 |
| Rys. 6.9 Parametr $\Delta\text{dB}(38)$, dla 3 sezonów jesiennego (kolor niebieski), wiosennego (kolor zielony), letniego (kolor pomarańczowy)..... | 144 |
| Rys. 6.10 Parametr $\Delta\text{dB}(333)$, dla 3 sezonów jesiennego (kolor niebieski), wiosennego (kolor zielony), letniego (kolor pomarańczowy)..... | 145 |
| Rys. 6.11 Parametr $\Delta\text{dB}(38)$, dla sezonu wiosennego dla ławic akustycznych zarejestrowanych w toni wodnej (kolor pomarańczowy) i ławic akustycznych zarejestrowanych w pobliżu dna (kolor niebieski)..... | 147 |
| Rys. 6.12 Parametr $\Delta\text{dB}(333)$, dla sezonu wiosennego dla ławic akustycznych zarejestrowanych w toni wodnej (kolor pomarańczowy) i ławic akustycznych zarejestrowanych blisko dna (kolor niebieski)..... | 148 |
| Rys. 6.13 Porównanie wyników pomiarów parametru $\Delta\text{dB}(38)$ z wynikami teoretycznymi (Fässler, 2010) dla sezonu jesiennego: dla dnia (A) oraz dla nocy (B)..... | 153 |
| Rys. 7.1 Wyniki klasteryzacji FCM. – próba 1 | 161 |
| Rys. 7.2 Wyniki FCM. Dane z kwiecień dla dwóch grup organizmów: przebywających w toni wodnej i przebywających przy dnie. | 162 |
| Rys. 7.3 Wyniki FCM. Dane dla dwóch grup organizmów: przebywających w toni wodnej w październiku oraz przebywających przy dnie w kwietniu..... | 163 |
| Rys. 7.4 Zestawienie wyników klasteryzacji FCM (3 próby rozróżnienia różnych grup organizmów)..... | 164 |

Spis Tabel

| | |
|--|-----|
| Tab. 2.1 Specyfikacja przetworników akustycznych zamontowanych na jednostce r/v Oceanograf (www.simrad.com) | 30 |
| Tab. 2.2 Specyfikacja czujników sondy miniCTD Valeport (www.valeport.co.uk) | 42 |
| Tab. 3.1 Zestawienie godzin wchodów i zachodów słońca w dniach, w których wykonywano badania | 47 |
| Tab. 3.2 Porównanie głębokości występowanie warstw rozpraszających. | 61 |
| Tab. 4.1 Porównanie rozkładów przestrzennych siły rozpraszania wstecznego w dzień i w nocy dla różnych sezonów | 74 |
| Tab. 4.2 Porównanie scałkowanej po głębokości siły objętościowego rozpraszania wstecznego w dzień i w nocy dla różnych sezonów. | 85 |
| Tab. 5.1 Zestawienie czasu rozpoczęcia migracji względem wschodu/zachodu słońca oraz czasu trwania migracji dla sezonów jesiennego i wiosennego. | 122 |
| Tab. 5.2 Średnie głębokości środka ciężkości rozkładu przestrzennego siły objętościowego rozpraszania wstecznego dla okresów dziennego i nocnego dla różnych sezonów pomiarowych | 125 |
| Tab. 5.3 Zestawienie wyników badań prędkości dobowych migracji pionowych, na Morzu Bałtyckim. | 127 |
| Tab. 6.1 Wartości $\Delta\text{dB}(38)$ oraz $\Delta\text{dB}(333)$ w okresie dziennym i nocnym dla dwóch sezonów badawczych | 149 |
| Tab. 6.2 Średnie wartości $\Delta\text{dB}(f)$ dla częstotliwości 38 kHz i 333 kHz, dzień, trzy sezony badawcze. | 154 |

Bibliografia

1. Aglen A., 1996. Impact of fish distribution and species composition on the relationship between acoustic and swept-area estimates of fish density. *ICES Journal of Marine Science*, 53, 501-505.
2. Aksnes D.L., Røstad A., Kaartvedt S., Martinez U., Duarte C.M., Irigoien X., 2017. Light penetration structures the deep acoustic scattering layers in the global ocean. *Science advances*, 3(5), e1602468.
3. Anderson C.I.H., Horne J.K., Boyle J., 2007. Classifying multifrequency fisheries acoustic data using a robust probabilistic classification technique. *J. Acoust. Soc. Am.*, 121: 230–237. <https://doi.org/10.1121/1.2731016>
4. Anderson N.R., Zahuranec B.J., 1977. *Oceanic sound scattering prediction*. Plenum Press, New York, 859
5. Anger K., Rogal U., Schriever G., Valentin C., 1977. In-situ investigations on the echinoderm *Asterias rubens* as a predator of soft-bottom communities in the western Baltic Sea. *Helgoländerwissenschaftliche Meeresuntersuchungen*, 29, 439-459.
6. Axenrot T., Didrikas T., Danielsson C., Hansson S., 2004. Diel patterns in pelagic fish behaviour and distribution observed from a stationary, bottom-mounted, and upward-facing transducer. *ICES Journal of Marine Science*, 61, 1100-1104.
7. Axenrot T., Ogonowski M., Sandström A., Didrikas T., 2009. Multifrequency discrimination of fish and mysids. *ICES Journal of Marine Science*, 66, 1106-1110.
8. Azzali M., Buracchi G., Conti S., Gambetti S., Luna M., 1985. Relationship between the forms of pelagic fish distribution and nycthemeral periods. A tentative model of behaviour. *Oebalia*, 11, 471–488.
9. Balls R., 1948. Herring fishing with the echometer. *ICES Journal of Marine Science*, 15, 193-206.
10. Bassett C., De Robertis A., Wilson C.D., 2018. Broadband echosounder measurements of the frequency response of fishes and euphausiids in the Gulf of Alaska. *ICES Journal of Marine Science*, 75(3), 1131-1142.
11. Benoit-Bird K.J., Lawson G.L., 2016. Ecological insights from pelagic habitats acquired using active acoustic techniques. *Annual review of marine science*, 8, 463-490.
12. Berger L., Campanlla F., Chu D., Demer D., De Robertis A., Domokos R., Doray M., Fielding S., Fässler S.M.M., Gauthier S., Gastauer S., Horne J., Hutton B., Iriarte F.,

- Jech J.M., Kloser R., Lawson G., Lebourges-Dhaussy A., McQuinn I., Peña M., Scouling B., Sakinan S., Schaber M., Taylor J.C., Thompson C.H., 2018. Acoustic target classification. Ices Cooperative Research Report. No. 344, 110 pp. (Editor R. Korneliusseen)
13. Bezdek J.C., 1981. Pattern Recognition with Fuzzy Objective Function Algorithms, Plenum Press, New York.
 14. Blaxter J.H.S., Batty R.S., 1990. Swimbladder “behaviour” and target strength. *Rapports et Proces-verbaux des Réunions du Conseil International pour l’Exploration de la Mer*, 189, 233-244.
 15. Blaxter J.H.S., Hunter J.R., 1982. The biology of the clupeoid fishes. *Advances in marine biology*, 20, 1-223.
 16. Blaxter, J.H.S., Holliday, F.G., 1969. The behaviour and physiology of herring and other clupeids. *Adv. Mar. Biol.* 1, 261–393.
 17. Bolalek J., Burska D., 2020. *Zatoka Pucka Tom 1 Aspekty geologiczne i fizyczne*. Wyd. Uniwersytet Gdański. 348.
 18. Brehmer P., Lafont T., Georgakarakos S., Josse E., Gerlotto F., Collet C., 2006. Omnidirectional multibeam sonar monitoring: applications in fisheries science. *FISH and Fisheries*, 7, 165-179.
 19. Burwen D.L., Fleischman S.J., Miller J.D., Jensen M.E., 2003. Time-based signal characteristics as predictors of fish size and species for a side-looking hydroacoustic application in a river. *ICES Journal of Marine Science*, 60, 662-668.
 20. Burwen D.L., Nealson P.A., Fleischman S.J., Mulligan T.J., Horne J.K., 2007. The complexity of narrowband echo envelopes as a function of fish side-aspect angle. *ICES Journal of Marine Science*, 64(5), 1066-1074.
 21. Campanella F., Taylor J.C., 2016. Investigating acoustic diversity of fish aggregations in coral reef ecosystems from multifrequency fishery sonar surveys. *Fish. Res.*, 181: 63–76. <https://doi.org/10.1016/j.fishres.2016.03.027>
 22. Cardinale M., Casini M., Arrhenius F., Håkansson N., 2003. Diel spatial distribution and feeding activity of herring (*Clupeaharengus*) and sprat (*Sprattussprattus*) in the Baltic Sea. *Aquatic Living Resources*, 16, 283-292.
 23. Chojnacki J.C., 1984. *Zoocenozy planktonowe południowego Bałtyku* (Doctoral dissertation, Wydaw. Akademii Rolniczej).
 24. Clay C.S., Medwin H., 1977. *Acoustical oceanography: principles and applications*. John Wiley & Sons, New. York, 544.

25. Cyberska B., 1990. Zatoka Gdańska. Rozdział 5.4 Temperatura wody. Wydawnictwa Geologiczne, Warszawa, 187-203.
26. Cyberski J, Nowacki J. Hydrologia zlewiska i morfometria zatoki. W: Zatoka Pucka. Korzeniowski K (red.). Instytut Oceanografii UG, Gdańsk, 1993: 40-70.
27. Davison P.C., 2011. The export of carbon mediated by mesopelagic fishes in the northeast Pacific Ocean. Doctoral dissertation, UC San Diego.
28. De Robertis, A., McKelvey R., Ressler P.H., 2010. Development and application of an empirical multifrequency method for backscatter classification. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, 67: 1459–1474. <https://doi.org/10.1139/F10-075>
29. DeBlois E.M., Rose G.A., 1995. Effect of foraging activity on the shoal structure of cod (*Gadus morhua*). *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 52, 2377-2387.
30. Demer D.A., Berger L., Bernasconi, M., Bethke E., Boswell K., Chu D., Domokos R., i in., 2015. Calibration of acoustic instruments. ICES Cooperative Research Report No. 326, 133. DOI: [dx.doi.org/10.25607/OBP-185](https://doi.org/10.25607/OBP-185)
31. Diachok O., Liorzou B., Scalabrin C., 2001. Estimation of the number density of fish from resonance absorptivity and echo sounder data. *ICES Journal of Marine Science*, 58, 137-153.
32. Edwards J.I., Armstrong F., 1981. Measurement of the target strength of live herring and mackerel, ICES CM /B:26.
33. Edwards J.I., Armstrong F., Magurran A.E., Pitcher T.J., 1984. Herring, mackerel and sprat target strength experiments with behavioural observations, ICES CM /B:34.
34. *Eilers J.M., Sullivan T.J., Hurley K.C., 1990. The most dilute lake in the world?. Hydrobiologia. 199, 1–6. https://doi.org/10.1007/BF00007827*
35. Everson I., Tarling G.A., Bergström B., 2007. Improving acoustic estimates of krill: experience from repeat sampling of northern krill (*Meganyctiphanes norvegica*) in Gullmarsfjord, Sweden. *ICES Journal of Marine Research*, 64, 39-48.
36. Faghani D., Tęgowski J., Gorska N., Klusek Z., 2004. Recognition of Underwater Vegetation Species in the Baltic Sea. *Proceedings of the 7th European Conference on Underwater Acoustics, ECUA 2004, Delft, The Netherlands*, 373–378
37. Fässler S.M., Gorska N., 2009. On the target strength of Baltic clupeids. *ICES Journal of Marine Science*, 66, 1184-1190.

38. Fässler S.M., Gorska N., Ona E., Fernandes P.G. 2008. Differences in swimbladder volume between Baltic and Norwegian spring-spawning herring: Consequences for mean target strength. *Fisheries Research*, 92, 314-321.
39. Fässler S.M.M., 2010. Target strength variability in atlantic herring (*clupea harengus*) and its effect on acoustic abundance estimates, in: Fässler, S.M.M., A Thesis Submitted for the Degree of PhD at the University of St. Andrews. <http://hdl.handle.net/10023/1703>
40. Fernandes P.G. 2009. Classification trees for species identification of fish-school echotraces. *ICES J. Mar. Sci.*, 66: 1073–1080. <https://doi.org/10.1093/icesjms/fsp060>
41. Fernandes P.G., Korneliussen R.J., Lebourges-Dhaussy A., Massé J., Iglesias M., Diner N., Ona E., i in., 2006. The SIMFAMI project: species identification methods from acoustic multifrequency information. Final Report to the EC No. Q5RS-2001-02054. FRS Marine Laboratory Aberdeen, Aberdeen, Scotland,UK.
42. Foote K. G., 1985. Rather-high-frequency sound scattering by swimbladdered fish. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 78, 688-700.
43. Foote K.G. 1980. Importance of the swimbladder in acoustic scattering by fish: a comparison of gadoid and mackerel target strengths. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 67, 2084-2089.
44. Foote K.G., 1987. Fish target strengths for use in echo integrator surveys. *The Journal of the Acoustical Society of America*,82, 981-987.
45. Foote K.G., Knudsen H.P., Vestnes G., MacLennan D.N., Simmonds E.J., 1987. Calibration of acoustic instruments for fish density estimation: a practical guide. *ICES Coop. Res. Rep.* 144, 57.
46. Fréon P., Gerlotto F., Soria M., 1996. Diel variability of school structure with special reference to transition periods. *ICES Journal of Marine Science*, 53, 459–464.
47. Fréon P., Misund O.A., 1999. Dynamics of Pelagic Fish Distribution and Behaviour: Effects on Fisheries and Stock Assessment. Fishing News Books. Blackwell Science, Oxford. 348.
48. Gastauer S., Scoulding B., Parsons M., 2017. An unsupervised acoustic description of fish schools and the seabed in three fishing regions within the Northern Demersal Scalefish Fishery (NDSF, Western Australia). *Acoust. Aust.*, 45: 363–380. <https://doi.org/10.1007/s40857-017-0100-0>
49. Gauthier S., Horne J.K., 2004a. Potential acoustic discrimination within boreal fish assemblages. *ICES Journal of Marine Science*, 61, 836-845.

50. Gauthier S., Horne J.K., 2004b. Acoustic characteristics of forage fish species in the Gulf of Alaska and Bering Sea based on Kirchhoff-approximation models. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 61, 836-845.
51. Gauthier S., Rose G.A., 2002. Acoustic observation of diel vertical migration and shoaling behaviour in Atlantic redfishes. *Journal of Fish Biology*, 61, 1135-1153.
52. Gerlotto F., Fréon P., 1992. Some elements on vertical avoidance of fish schools to a vessel during acoustic surveys. *Fisheries Research*, 14, 251-259.
53. Gerlotto F., Paramo J., 2003. The three-dimensional morphology and internal structure of clupeid schools as observed using vertical scanning multibeam sonar. *Aquatic Living Resources*, 16, 113-122.
54. Gerlotto F., Soria M., Fréon P., 1999. From two dimensions to three: the use of multibeam sonar for a new approach in fisheries acoustics. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 56, 6-12.
55. Gic-Grusza G., Kryla-Straszewska L., Urbański J., Warzocha J., Węśławski J.M., 2009. Atlas siedlisk dna polskich obszarów morskich: waloryzacja przyrodnicza siedlisk morskich. Broker-Innowacji Gabriela Gic-Grusza.
56. Godø O.R., Hjellvik V., Iversen S.A., Slotte A., Tenningen E., Torkelsen T., 2004. Behaviour of mackerel schools during summer feeding migration in the Norwegian Sea, as observed from fishing vessel sonars. *ICES Journal of Marine Science*, 61, 1093-1099.
57. Gorska N., 2007. On target strength of Baltic herring. In *Proceedings of 2007 ICES Annual Science Conference*, Helsinki, Finland, 17-21.
58. Gorska N., Cieślik L., Didrikas T., Hansson S., 2007a. On acoustic backscattering by Baltic zooplankton. *Hydroacoustics*, 10, 55-68.
59. Gorska N., Idczak J., 2010. On the acoustic backscattering by Baltic herring and sprat. *Hydroacoustics*, 13, 89-100.
60. Gorska N., Idczak J., 2021. On Baltic herring morphometry and its impact on the backscattering properties. *Oceanologia*.
61. Gorska N., Korneliussen R., Ona E., 2007b. Acoustic backscatter by schools of adult Atlantic mackerel. *ICES Journal of Marine Science* 64: 1145-1151.
62. Gorska N., Ona E., 2003a. Modelling the acoustic effect of swimbladder compression in herring. *ICES Journal of Marine Science*, 60(3), 548-554.

63. Gorska N., Ona E., 2003b. Modelling the effect of swimbladder compression on the acoustic backscattering from herring at normal or near-normal dorsal incidences. *ICES Journal of Marine Science*, 60(6), 1381-1391.
64. Gorska N., Ona E., Korneliussen R., 2005. Acoustic backscattering by Atlantic mackerel as being representative of fish that lack a swimbladder. Backscattering by individual fish. *ICES Journal of Marine Science*, 62, 984-995.
65. Gorska N., Ona E., Korneliussen R.J., 2004. On acoustic multi-frequency species identification and separation of Atlantic mackerel, Norwegian spring spawn herring and Norway pout. *ICES*.
66. Gorska N., Ona E., Korneliussen R.J., 2004. On backscattering mechanism for fish without swimbladder. In *Proceedings of the Seventh European Conference on Underwater Acoustics, ECUA*, 367-372.
67. Gorska N., Tęgowski J., Klusek Z., Faghani D., 2005. The acoustical detection and characterization of underwater meadows in Gdańsk Bay (southern Baltic Sea). *Proceedings of 5th Baltic Sea Science Congress "The Baltic Sea – a changing ecosystem"*, Sopot, Polska 97–98.
68. Hamre J., Dommasnes A., 1994. Test experiments of target strength of herring by comparing density indices obtained by acoustic method and purse seine catches. *ICES C.M.*, 1994/B:17.
69. Hansson, S., 1993. Variation in hydroacoustic abundance of pelagic fish. *Fish. Res.* 16, 203–222.
70. Hartcup G., 1988. *The war of invention: scientific developments, 1914-1918*. Potomac Books Incorporated.
71. Haslett R.W.G., 1977. Automatic plotting of polar diagrams of target strength of fish in roll, pitch and yaw. *Rapports et Proces-Verbaux des Réunions du Conseil International pour l'Exploration de la Mer*, 170, 74-81.
72. HELCOM 2010. *Ecosystem Health of the Baltic Sea 2003-2007: HELCOM Initial Holistic Assessment*. Baltic Sea Environ. Proc. No. 122.
73. Henderson M. J., Horne J. K., Towler R.H., 2008. The influence of beam position and swimming direction on fish target strength. *ICES Journal of Marine Science*, 65, 226-237.
74. Hersey J. B., Backus R.H., 1962. Sound scattering by marine organisms. *The sea*, 1, 498-539.

75. Hjellvik V., Handegard N.O., Ona E., 2008. Correcting for vessel avoidance in acoustic-abundance estimates for herring. *ICES Journal of Marine Science*, 65, 1036-1045.
76. Holliday D.V., Pieper R.E., 1995. Bioacoustical oceanography at high frequencies. *ICES Journal of marine Science*, 52, 279-296.
77. Holste L., John M.A.S., Peck M.A., 2009. The effects of temperature and salinity on reproductive success of *Temoralongicornis* in the Baltic Sea: a copepod coping with a tough situation. *Marine Biology*, 156, 527-540.
78. Horne J.K., 2000. Acoustic approaches to remote species identification: a review. *Fisheries oceanography*, 9, 356-371.
79. Horne J.K., Jech J.M., 1999. Multi-frequency estimates of fish abundance: constraints of rather high frequencies. *ICES Journal of marine Science*, 56, 184-199.
80. https://def.mir.gdynia.pl/?page_id=363
81. Huse I., Korneliussen R., 2000. Diel variation in acoustic density measurements of overwintering herring (*Clupea harengus* L.). *ICES J. Mar. Sci.*, 57: 903–910. <https://doi.org/10.1006/jmsc.2000.057>
82. Huse I., Ona E., 1996. Tilt angle distribution and swimming speed of overwintering Norwegian spring spawning herring. *ICES J. Mar. Sci.*, 53: 863–873. <https://academic.oup.com/icesjms/article/53/5/863/704339>
83. ICES, 2004. Report of the Baltic Fisheries assessment working group. ICES CM 2004/ACFM:22.
84. ICES. 2006. Report of the Baltic International Fish Survey Working Group (WGBIFS), 3-7 April 2006, ICES Headquarters, Copenhagen. ICES CM 2006/LRC:07. 575 pp.
85. ICES. 2015. Report of the Baltic Fisheries Assessment Working Group (WGBFAS), 14–21 April 2015, ICES HQ, Copenhagen, Denmark. ICES CM 2015/ACOM:10. 826 pp.
86. ICES. 2018. Report of the Baltic International Fish Survey Working Group (WGBIFS). ICES WGBIFS report 2018 24-28 March 2018. Lyngby, Copenhagen, Denmark. 380 pp.
87. ICES. 2019. Working Group on Baltic International Fish Survey (WGBIFS). ICES Scientific Reports. 1:37. 79 pp

88. ICES. 2021. ICES Working Group on Baltic International Fish Survey (WGBIFS; outputs from 2020 meeting). ICES Scientific Reports. 3:02. 539pp. <https://doi.org/10.17895/ices.pub.7679>
89. Idczak J., Kniź-Kubacka N., 2012. Backscattering properties of southern Baltic herring. *Hydroacoustics*, 15, 57-64.
90. Jackowski E., 1998. The state of Puck Bay spawning grounds (in Polish). *Studia i Materiały, Seria B nr 71*, MIR Gdynia.
91. Jones F. ., Pearce G., 1958. Acoustic reflexion experiments with Perch (*Percifluviatilis* Linn.) to determine the proportion of the echo returned by the swimbladder. *Journal of Experimental Biology*, 35, 437-450.
92. Jørgensen H.B., Hansen M.M., Bekkevold D., Ruzzante D.E., Loeschcke V., 2005. Marine landscapes and population genetic structure of herring (*Clupeaharengus* L.) in the Baltic Sea. *Molecular Ecology*, 14, 3219-3234.
93. Kang M., Furusawa M., Miyashita K., 2002. Effective and accurate use of difference in mean volume backscattering strength to identify fish and plankton. *ICES Journal of Marine Science*, 59, 794-804.
94. Kimura K., 1929. On the detection of fish-groups by an acoustic method. *Journal of the Imperial Fisheries Institute, Tokyo*, 24, 41-45.
95. Kloser R., Ryan T., Sakov P., Williams A., Koslow J.A., 2002. Species identification in deep water using multiple acoustic frequencies. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 59, 1065-1077.
96. Klusek Z., Gorska N., Tęgowski J., Groza K., Faghani D., Gajewski L., Nowak J., Kruk-Dowgiało L., Opióła R., 2003. Acoustical techniques of underwater meadow monitoring in the Puck Bay (southern Baltic Sea). *Hydroacoustics*, 6, 79–90.
97. Klusek Z., Tęgowski J., Szczucka J., Śliwinski, A., 1994. Characteristic properties of bottom backscattering in the southern Baltic Sea at ultrasound frequencies. *Oceanologia*, 36, 81–102.
98. Kongsberg Maritime AS, www.kongsberg.com/maritime/products/mapping-systems/fishery-research/scientific-echo-sounders/ek80 18 czerwca 2018.
99. Korneliussen R.J. (Ed.) 2018. Acoustic Target Classification. ICES Cooperative Research Report No. 344. International Council for the Exploration of the Sea (ICES). <http://doi.org/10.17895/ices.pub.4567>

100. Korneliussen R.J., Diner N., Ona E., Berger L., Fernandes P.G., 2008. Proposals for the collection of multifrequency acoustic data. *ICES Journal of Marine Science*, 65, 982-994.
101. Korneliussen R.J., Heggelund Y., Eliassen I.K., Johansen G.O., 2009. Acoustic species identification of schooling fish. *ICES J. Mar. Sci.*, 66: 1111–1118. <https://doi.org/10.1093/icesjms/fsp119>
102. Korneliussen R.J., Ona E., 2002. An operational system for extraction of plankton and fish from mixed recordings. *ICES Journal of Marine Science*, 59, 293–313.
103. Korneliussen R.J., Ona E., 2003. Synthetic echograms generated from the relative frequency response. *ICES Journal of Marine Science*, 60, 636–640.
104. Korneliussen R.J., Ona E., 2004. Verified acoustic identification of Atlantic mackerel. *ICES CM /R:20*.
105. Kruk-Dowgiałło L., Szawniawska A., 2008. Gulf of Gdańsk and Puck Bay. W: Schiewer, U. (Red.) *Ecology of Baltic coastal waters. Ecological studies 197*. Berlin and Heidelberg: Springer-Verlag, 139-165.
106. Krzemyński W., Kruk-Dowgiałło L., Zawadzka-Kahlau E., Dubrawski R., Kamińska M., Łysiak-Pastuszek E., 2004. Typology of Polish marine waters, W: Schernewski G., Wilegat M. *Baltic Sea Typology. Coastline Reports 4*, 39-48.
107. Kullenberg G., 1981. Chapter 3 Physical Oceanography, Elsevier Oceanography Series 30, 135-181. [https://doi.org/10.1016/S0422-9894\(08\)70140-5](https://doi.org/10.1016/S0422-9894(08)70140-5)
108. Levinton J.S., 2001. *Marine biology: function, biodiversity, ecology*. New York: Oxford University Press.
109. Love R.H., 1971. Measurements of fish target strength: a review. *Fish. Bull*, 69, 703-715.
110. Lu H.J., Lee K.T., 1995. Species identification of fish shoals from echograms by an echo-signal image processing system. *Fisheries Research*, 24, 99-111.
111. MacKenzie B.R., 2005. Anthropogenic impacts on the Baltic Sea: problems and solutions. *Proceedings of International Conference on Biodiversity Science and Governance*, Paris, France, 24-28 January, 2005
112. Majewski A., 1972. Charakterystyka hydrologiczna estuariowych wód u polskiego wybrzeża. *Prace PIHM*, 105, 3-40.
113. Massé J., Koutsikopoulos C., Patty W., 1996. The structure and spatial distribution of pelagic fish schools in multispecies clusters: an acoustic study. *ICES journal of Marine Science*, 53(2), 155-160.

114. Mayer L., Li Y., Melvin G., 2002. 3D visualization for pelagic fisheries research and assessment. *ICES Journal of Marine Science*, 59, 216-225.
115. McFarland W.N., 1986. Light in the sea—correlations with behaviors of fishes and invertebrates. *American Zoologist*, 26, 389-401.
116. McQuinn I.H., Winger P.D., 2003. Tilt angle and target strength: target tracking of Atlantic cod (*Gadus morhua*) during trawling. *ICES Journal of Marine Science*, 60, 575-583.
117. Medwin H., 2005. *Sounds in the sea: From ocean acoustics to acoustical oceanography*. Cambridge University Press, Cambridge, 664.
118. Medwin H., Clay C.S., 1998. *Fundamentals of acoustical oceanography*. Academic Press.
119. Midttun L., Hoff I., 1962. Measurements of the reflection of sound by fish. *FiskDir. Skr. Ser. Havunders.* 13, 1–18
120. MIR, 2019a. *Wiadomości Rybackie*. Pismo Morskiego Instytutu Rybackiego: 1-2 (227), styczeń-luty 2019.
121. MIR, 2019b. *Wiadomości Rybackie*. Pismo Morskiego Instytutu Rybackiego: 3-4 (228), marzec-kwiecień 2019.
122. MIR, 2019c. Oświadczenie Morskiego Instytutu Rybackiego państwowego instytutu badawczego w sprawie stanu środowiska Zatoki Puckiej. <https://mir.gdynia.pl/oswiadczenie-mir-pib-w-sprawie-stanu-srodowiska-zatoki-puckiej> (opublikowano 2 sierpnia 2019).
123. MIR, 2021. Program badań środowiska morskiego Zatoki Puckiej 2019-2021. <https://zatokapucka.mir.gdynia.pl/> (stan na 02.10.2021)
124. Misund O.A., Aglen A., 1992. Swimming behaviour of fish schools in the North Sea during acoustic surveying and pelagic trawl sampling. *ICES Journal of Marine Science*, 49, 325-334.
125. Mitson R.B., Knudsen H.P., 2003. Causes and effects of underwater noise on fish abundance estimation. *Aquatic Living Resources* 16, 255–263.
126. Mukai T., Iida K., 1996. Depth dependence of target strength of live kokanee salmon in accordance with Boyle's law. *ICES Journal of Marine Science*, 53, 245-248.
127. Nakken O., Olsen K., 1977. Target strength measurements of fish. *Ices*.
128. Nowacki J. Morfometria zatoki. W: *Zatoka Pucka*. Korzeniewski K (red.). Instytut Oceanografii UG, Gdańsk 1993a: 71-78.

129. Nowacki J. Termika, zasolenie i gęstość wody. W: Zatoka Pucka. Korzeniewski K (red.). Instytut Oceanografii UG, Gdańsk 1993b: 71-78.
130. Nowacki J., Jarosz E., 1998. The hydrological and hydrochemical division of the Surface waters in the Gulf of Gdańsk. *Oceanologia* 40:261-272.
131. Ojaveer E., 1981. Influence of temperature, salinity, and reproductive mixing of Baltic herring groups on its embryonal development. *Rapports et Procès-Verbaux des Réunions du Conseil Int. Pour l'Exploration de la Mer*, 178, 409-415.
132. Olenin S., 1997. Benthic zonation of the Eastern Gotland Basin. *Neth. J. Aquat. Ecol.* 30, 265–282.
133. Ona E., 1990. Physiological factors causing natural variations in acoustic target strength of fish. *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom*, 70, 107-127.
134. Ona E., 2001. Herring Tilt Angles Measured through Target Tracking. Herring: Expectations for a New Millennium. Alaska Sea Grant College Program, AK-SG-01-04.
135. Ona E., 2003. An expanded target-strength relationship for herring, *ICES J. Mar. Sci.* 60, 493–499. <http://hdl.handle.net/11250/108201>
136. Ona E., Korneliussen R.J., 2000. Herring vessel avoidance; diving or density draining. In *Proceedings of the Fifth European Conference on Underwater Acoustics, ECUA*, 10, 1515-1520.
137. Ona E., Toresen R., 1988. Avoidance reactions of herring to a survey vessel, studied by scanning sonar. *ICES CM*, 46, 8.
138. Ona E., Zhao X., Svellingen I., Fosseidengen J.E., 2001. Seasonal variation in herring target strength. *Herring: expectations for a New Millennium*, 461, 461-487.
139. Orłowski A., 1992. Acoustic survey of fish stock abundance in Polish fishery zone October 1990. *ICES Baltic Fish Committee, C.M.1992/J:19*
140. Orłowski A., 1999. Acoustic studies of spatial gradients in the Baltic: Implication for fish distribution. *ICES Journal of Marine Science*, 56, 561-570.
141. Orłowski A., 2000. Environmental effect on acoustic measurements of Baltic fish. *Hydroacoustics*, 3, 161-168.
142. Orłowski A., 2001. Behavioural and physical effect on acoustic measurements of Baltic fish within a diel cycle. *ICES Journal of Marine Science*, 58, 1174–1183.

143. Orłowski A., 2004. Acoustic reconnaissance of fish and environmental background in demersal zone in southern Baltic. Annual Journal: Hydroacoustics 7, Polish Acoustics Society, Gdańsk, 183-194.
144. Orłowski A., 2005. Experimental verification of the acoustic characteristics of the clupeoid diel cycle in the Baltic. ICES Journal of Marine Science, 62, 1180-1190.
145. Orłowski A., 2006. Acoustic information applied to 4D environmental studies in the Baltic. Oceanologia, 48, 509–524.
146. Orłowski A., 2016. Distribution of herring, sprat, and cod in the southern Baltic 1981-2007 -BALTICA – October 2003. National Marine Fisheries Research Institute, Gdynia. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.16483.55842>
147. Orłowski A., Kujawa A., 2005. Acoustic Reconnaissance of fish and environmental background in demersal zone in southern Baltic. Hydroacoustics, 8, 137–146.
148. Parsons T.R., Takahashi M., Hargrave B., 1977. Biological oceanographic processes. Pergamon press.
149. Partridge B.L., Pitcher T., Cullen J.M., Wilson, J., 1980. The three-dimensional structure of fish schools. Behavioral Ecology and Sociobiology, 6(4), 277-288.
150. Pavlov D.S., Kasumyan A.O., 2000. Patterns and mechanisms of schooling behavior in fish: a review. Journal of Ichthyology, 40, 163-231.
151. Pedersen G., Handegard N.O., Ona E., 2009. Lateral-aspect, target-strength measurements of in situ herring (*Clupea harengus*), ICES J. Mar. Sci. 66,1191–1196.
152. Pedersen G., Korneliussen R.J., 2009. The relative frequency response derived from individually separated targets of northeast Arctic cod (*Gadus morhua*), saithe (*Pollachius virens*), and Norway pout (*Trisopterus esmarkii*). ICES Journal of Marine Science, 66, 1149-1154.
153. Peltonen H., Balk H., 2005. The acoustic target strength of herring (*Clupea harengus* L.) in the northern Baltic Sea. ICES Journal of Marine Science, 62: 803-808. <https://doi.org/10.1016/j.icesjms.2005.02.001>
154. Pérez-Arjona I., Godinho L., Espinosa V., 2018. Numerical simulation of target strength measurements from near to far field of fish using the method of fundamental solutions, Acta Acust. united Ac. 104, 25-38. <http://dx.doi.org/10.3813/AAA.919142>
155. Pezacki P.D., Gorska N., Rak D., 2018. ADCP Observations of Diel Vertical Migration of Biological Layers in Gulf of Gdańsk. In 2018 Joint Conference-Acoustics, IEEE, 1-6

156. Pezacki P.D., Gorska, N., Soloviev, V., 2017. An acoustic study of zooplankton diel vertical migration in the Black Sea. *Hydroacoustics*, 20.
157. Reeder D.B., 2011. Fish acoustics: Physics-based modeling and measurement. *Journal of Marine Science and Technology*, 19, 273-278.
158. Reid D.G., Simmonds E.J., 1993. Image analysis techniques for the study of fish school structure from acoustic survey data. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 50, 886-893.F
159. Reynisson P., 1993. In situ target strength measurements of Icelandic summer spawning herring in the period 1985-1992. *ICES C. M.*, 1993/B:40.
160. Rokicki J., 1993. Zatoka Pucka. Rozdział 8.12 Parazytofauna ryb. red.: Korzeniewski K. Instytut Oceanografii UG, Gdańsk, 455 – 467.
161. Schiewer U., 2008. Ecology of Baltic coastal waters (p. 428). Berlin: Springer.
162. Schmidt B., Gorska N., Szczucka J., 2011. Target strength relationship for herring and sprat in the southern Baltic Sea. *ICES Annual Science Conference*, Gdańsk, 19-23 September 2011, *ICES Council Meeting 2011/R:15*
163. Schmidt B., Szczucka J., 2007. Echosounder and ADCP investigation of Baltic fauna. *Hydroacoustics*, 10, 175-182.
164. Schmidt B., Szczucka J., 2010. Diel Vertical Migration observed by acoustic doppler current profiler. *Hydroacoustics*, 13, 235-242.
165. Simmonds E. J., MacLennan D.N., 2005. *Fisheries Acoustics: Theory and Practice*. Blackwell Publishing, Oxford, 437.
166. Simrad EK80 Wide band scientific echo sounder Reference Manual Release 1.12.x grudzień 2018 Kongsberg Maritime AS
167. Skaret G., Axelsen B.E., Nøttestad L., Fernö A., Johannessen A., 2005. The behaviour of spawning herring in relation to a survey vessel. *ICES Journal of Marine Science*, 62, 1061-1064.
168. Skóra K., 1993. Zatoka Pucka. Rozdział 8.11 Ichtyofauna. red.: Korzeniewski K. Instytut Oceanografii UG, Gdańsk, 455 – 467.
169. Słomianko P., 1974 Physical conditions in the region (in Polish). In: Słomianko P (ed.) *Puck Bay, Studia i Mat. Oceanolog. KBM, PAN*, 5, 7–30.
170. Soria M., Fréon P., Gerlotto F., 1996. Analysis of vessel influence on spatial behaviour of fish schools using a multi-beam sonar and consequences for biomass estimates by echo-sounder. *ICES Journal of Marine Science*, 53, 453-458.

171. Stepnowski A., 2001. Systemy akustycznego monitoringu środowiska morskiego. Gdańskie Towarzystwo Naukowe.
172. Strzyżewska K., 1990. Zatoka Gdańska. Rozdział 6.5 Ichtiofauna. Wydawnictwa Geologiczne, Warszawa, 431-451.
173. Sund O., 1935. Echo sounding in fishery research. *Nature*, 135, 953-953.
174. System Operacyjny SatBałtyk: satbaaltyk.iopan.gda.pl
175. Szczucka J. 2000. Acoustically measured diurnal vertical migration of fish and zooplankton in the Baltic Sea – seasonal variations. *Oceanology*, 42, 5–17.
176. Szczucka J., 2003. Akustyczne badania biologicznych warstw rozpraszających w Południowym Bałtyku. Instytut Oceanologii PAN, Sopot, 139.
177. Szczucka J., Klusek Z., 1996. Migration patterns of acoustic scatterers in the southern Baltic Sea. *Oceanologia*, 38, 61-79.
178. Szczucka J., Schmidt B., 2005. Influence of the ADCP geometry on the results of measurement. *Hydroacoustics*, 8, 227-232.
179. Szczucka J., Schmidt B., 2008. Acoustic studies of the diel migratory behaviour of Baltic fauna. *Hydroacoustics*, Gdańsk, 11, 369-380.
180. Tęgowski J., Gorska N., Klusek Z., 2003. Statistical analysis of acoustic echoes from underwater meadows in the eutrophic Puck Bay (southern Baltic Sea). *Aquatic Living Resources*, 16, 215–221
181. Tęgowski J., Gorska N., Klusek Z., Kruss A., Hermand J.P., 2007. Parametrical analysis of acoustic echoes from sea-grass in the southern Baltic Sea. *Proceedings of the 2nd International Conference on "Underwater Acoustics Measurements: Technologies and Results"*, Heraklion, Crete, Greece, 391–396.
182. Tester A.L., 1943. Use of the echo sounder to locate herring in British Columbia waters. *Fisheries Research Board of Canada*, 62, 21.
183. Tomkiewicz J., Lehman K.M., St. John M.A., 1998. Oceanographic influences on the distribution of Baltic cod, *Gadus morhua*, during spawning in the Bornholm Basin of the Baltic Sea. *Fish. Oceanogr.* 7, 48-62.
184. Trenkel V.M., Handegard N.O., Weber T.C., 2016. Observing the ocean interior in support of integrated management, *ICES J. Mar. Res.* 73, 1947–1954.
185. Trenkel V.M., Ressler P.H., Jech M., Giannoulaki M., Taylor C., 2011. Underwater acoustics for ecosystem-based management: state of the science and proposals for ecosystem indicators, *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 442, 285–301.

186. Trygonis V., Georgakarakos S., Simmonds E.J., 2009. An operational system for automatic school identification on multibeam sonar echoes. *ICES Journal of Marine Science*, 66, 935-949.
187. Viktorsson L., 2018. Hydrogeography and oxygen in the deep basins. HELCOM. Retrieved: 27 July 2018.
188. Wanzenböck J., Kubecka J., Sajdlova Z., Frouzova J., 2020. Hydroacoustic target strength vs. fish length revisited: Data of caged, free-swimming European whitefish (*Coregonus lavaretus* L.) suggest a bi-phasic linear relationship under a limited range of tilt angles, *Fish. Res.* 229, 105620. <https://doi.org/10.1016/j.fishres.2020.105620>
189. Wiktor K., 1993. Zatoka Pucka. Rozdział 8.10 Makrozoobentos. red.: Korzeniewski K. Instytut Oceanografii UG, Gdańsk, 455 – 467.
190. Woillez M., Ressler P.H., Wilson C.D., Horne J.K., 2012. Multifrequency species classification of acoustic-trawl survey data using semi-supervised learning with class discovery. *J. Acoust. Soc. Am.*, 131: EL184–EL190. <https://doi.org/10.1121/1.3678685>
191. Wootton R.J., 1990. Ecology of teleost fishes. Fish and Fisheries Series 1. Chapman and Hall, London. 404 pp.
192. Woźniak B., Krezel A., Darecki M., Wozniak S.B., Majchrowski R., Ostrowska M., Kozłowski L., Ficek D., Olszewski J., Dera J., 2008. Algorithm for the remote sensing of the Baltic ecosystem (DESAMBEM). Part 1: Mathematical apparatus. *Oceanologia*, 50(4), 451-508.
193. www.calendar.zoznam.sk/sunset-pl.php 11 grudzień 2019.
194. www.fys.uio.no/~hbalk/, 14 kwietnia 2018.
195. www.satbaltyk.pl/sb_product/strefa-eufotyczna/, Majchrowski 2 luty 2016,
196. www.simrad.com 18 czerwca 2018.
197. www.valeport.co.uk 18 czerwca 2018.
198. www.youtube.com/watch?v=TCEoAGUJKfc 10 grudnia 2021.
199. www.zatokapucka.mir.gdynia.pl/informacje/ 10 grudnia 2021.
200. www.zostera.pl/index.php?option=com_content&view=article&id=4&Itemid=3&lang=pl). 22 grudnia 2021
201. Zedel L., Patro R., Knutsen T., 2005. Fish behaviour and orientation-dependent backscatter in acoustic Doppler profiler data. *ICES Journal of Marine Science*, 62, 1191-1201.