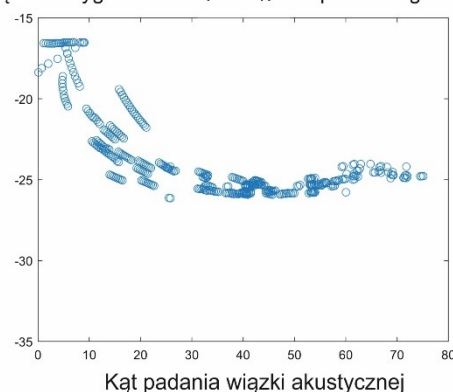


## STRESZCZENIE

Badania oceanograficzne często wiążą się z potrzebą rozpoznania dna morskiego – jego kształtu, typu osadu, pokrycia przez kolonie fito- lub zoobentosu, a więc występowania siedlisk dennych. Do wydzielenia obszarów występowania odmiennych siedlisk z powodzeniem stosowane są różne cechy batymetrii i informacje o natężeniu sygnału akustycznego rozproszonego wstecz, rejestrowanego przez echosondy wielowiązkowe (Diesing i Thorsnes 2018; Lecours i in. 2015; Held i Schneider von Deimling 2019). Zastosowanie miernika przechyłów oraz pomiar pozycji podczas badań umożliwiają uzyskanie dokładnie zlokalizowanych map o rozdzielczości przestrzennej rzędu kilku centymetrów (Montereale Gavazzi i in. 2016). Rejestracje wykonywane za pomocą echosond wielowiązkowych w ostatnich latach z dużym powodzeniem są stosowane w celu kartowania dna. Umożliwiają one jednoczesną rejestrację danych batymetrycznych w kilkuset punktach i podczas przemieszczania się jednostki badawczej tworzą precyzyjny model dna morskiego oraz mapę natężenia sygnału akustycznego rozproszonego wstecz. Wyniki tych prac są bardzo przydatne dla organów administrujących żeglugą oraz inwestorów planujących konstrukcje posadowione na dnie morskim. Badania dna morskiego są również niezwykle istotne w czasach gwałtownych zmian klimatycznych i środowiskowych, umożliwiając monitorowanie środowiska dna morskiego i występujących tam siedlisk bentosowych. Kartowanie i klasyfikacja siedlisk dennych dostarcza informacji niezbędnych do utworzenia Morskich Obszarów Chronionych. Działania takie mieszczą się w Ramowej Dyrektywie w Sprawie Strategii Morskiej 2008/56/WE, Ramowej Dyrektywie Wodnej 2000/60/WE oraz Dyrektywie Siedliskowej 92/43/EWG. Zakładają one potrzebę opracowania metod mapowania i monitoringu dna morskiego.

Obok informacji o batymetrii najczęściej rejestrowaną informacją o dnie za pomocą echosondy wielowiązkowej jest względne natężenie sygnału akustycznego rozproszonego wstecz. Jest ono zależne od czynników związanych z urządzeniem pomiarowym, takich jak: częstotliwość sygnału, czułość odbiornika, charakterystyka kierunkowa przetwornika; czynników związanych ze środowiskiem, przez które transmitowana jest fala akustyczna i powracający sygnał jak temperatura i zasolenie; czynników związanych z geofizycznymi cechami dna morskiego, jak nierówność powierzchni dna, czy gęstość osadu. Dodatkowo względne natężenie sygnału akustycznego rozproszonego wstecz od dna morskiego rejestrowanego przez echosondę wielowiązkową wykazuje silną zależność od kąta padania na dno. Na rysunku 1 przedstawiłam przykład takiej zależności zarejestrowanej podczas moich badań.

Natężenie sygnału akustycznego rozproszonego wstecz



Rys. 1. Przykład zależności kątowej natężenia sygnału akustycznego rozproszonego wstecz od dna morskiego.

Informacje zawarte w sygnałach rozproszonych wstecz są wykorzystywane w algorytmach bezinwazyjnej klasyfikacji dna morskiego, jednakże zależność kątowa natężenia takiego sygnału znacznie utrudnia poprawną klasyfikację. Problemem do rozwiązania jest ujednoczenie mapy natężeń sygnałów akustycznych rozproszonych wstecz poprzez sprowadzenie natężenia sygnałów w całym badanym akwenie do wartości odpowiadających jednemu kątowi padania wiązki akustycznej na dno. Próbę takiej korekcji zrealizowano w komercyjnym oprogramowaniu FMGT QPS z narzędziem o nazwie Geocoder (Fonseca i Calder 2005). Przygotowałam mapy względnego natężenia sygnałów rozproszonych wstecz badanego obszaru, wykorzystując narzędzie Geocoder, jednak w opracowanych tak mapach zaobserwowałam duże błędy dla kątów padania bliskich  $0^\circ$ . Dlatego zdecydowałam się opracować własną metodę zmiennego wzmocnienia kąтового (publikacja 3), co było nietrywialnym zadaniem.

Akustyczna klasyfikacja i mapowanie dna morskiego przy użyciu powtarzalnych, zautomatyzowanych metod wciąż wymaga ulepszenia, pomimo postępu dokonanego w ostatnich latach. Parametry dna obliczone dla batymetrii i natężenia sygnału akustycznego rozproszonego wstecz są bezpośrednio związane z przestrzennym zasięgiem siedlisk i często wykorzystywane w klasyfikacji dna morskiego. Niektóre z ostatnich publikacji podkreślają potrzebę wprowadzenia nowych parametrów opisujących dno morskie do kartowania siedlisk bentosowych (Diesing i in. 2016), dlatego zastosowałam parametry widmowe obliczone z cyfrowego modelu terenu, które są zupełnie nowe w nadzorowanej klasyfikacji siedlisk bentosowych.

Wyniki pomiarów natężenia sygnału akustycznego rozproszonego wstecz wykonane z użyciem różnej częstotliwości emitowanego sygnału lub podczas oddzielnych rejsów pomiarowych, prezentowane przez badaczy, zazwyczaj znacznie różnią się zakresami wartości. Utrudnia to wykonanie automatycznej lub półautomatycznej klasyfikacji siedlisk bentosowych. Na obserwowane różnice wpływa wiele czynników, takich jak: częstotliwość emitowanego sygnału akustycznego, zmieniająca się podczas różnych pomiarów absorpcja fal akustycznych w wodzie, czy kierunek płynięcia jednostki podczas wykonywania pomiarów oraz zmieniające się parametry fizyczne opisujące powierzchnię dna i osad na nim występujący.

Pomimo częstego stosowania w pracach badawczych względnego natężenia sygnałów rozproszonych wstecz od dna nie informują one o rzeczywistych własnościach rozpraszających, ponieważ ich wartość zależy nie tylko od typu osadu na dnie, ale również od urządzenia pomiarowego i czynników związanych z parametrami wysłanego impulsu. To rzeczywiste wartości siły rozpraszania wstecznego (ang. bottom backscattering strength - BBS) są immanentną cechą siedlisk bentosowych. By je zarejestrować, niezbędne jest zastosowanie echosondy skalibrowanej akustycznie, skorygowanie wyniku o absorpcję dźwięku w wodzie oraz o straty związane z geometrycznym rozchodzeniem się dźwięku i uwzględnienie wielkości powierzchni, od której zarejestrowany sygnał został rozproszony. Akustyczna kalibracja echosondy wielowiązkowej nie jest prostą sprawą. Od niedawna na rynku dostępne są echosondy wielowiązkowe firm Kongsberg i NORBIT skalibrowane akustycznie. Nadal informacje o rzeczywistych wartościach siły rozpraszania wstecznego różnych siedlisk bentosowych dla częstotliwości sygnałów powyżej 100 kHz są w literaturze niezwykle rzadkie. Modele teoretyczne rozpraszania sygnałów akustycznych na dnie morskim działają dla zakresu częstotliwości od 10 kHz do 100 kHz (model APL-UW 1994). Wiele echosond jednowiązkowych używa sygnałów o częstotliwościach mieszczących się w tym przedziale, natomiast echosondy wielowiązkowe i sonary boczne używają znacznie wyższych częstotliwości. Badaczom nadal brak szczegółowych informacji o rozpraszaniu dźwięku wstecz od dna morskiego dla częstotliwości sygnału sondującego większej niż 100 kHz. Charakterystyki kątowe rzeczywistej siły rozpraszania wstecznego są fizyczną cechą siedlisk bentosowych i stanowią ich

ważną akustyczną właściwość. Poznanie tych cech siedlisk bentosowych umożliwi stworzenie katalogu natężeń sygnałów akustycznych rozproszonych wstecz zależnych od częstotliwości sygnału, kąta padania oraz parametrów środowiska. Umożliwi to lepsze niż dotychczas zrozumienie procesów środowiskowych zachodzących na dnie morskim lub wpływających na nie. Pomiar bezwzględnych wartości zależności kątowych siły rozpraszania wstecznego jest również niezbędny do oceny zmienności w czasie i przestrzeni charakterystyk siedlisk bentosowych. Względne natężenie sygnałów rozpraszanych wstecz było najskuteczniejszym parametrem w klasyfikacji siedlisk dennych w licznych pracach (publikacja 1; Gaida i in. 2020; Buscombe i in. 201; Preston 2009). Podkreśla to znaczenie tego parametru i zwraca uwagę na konieczność jak najdokładniejszego pomiaru, aby móc go wykorzystać do badań w jak najbardziej efektywny sposób (Lurton i Lamarche 2015).

## Cele pracy

Głównym celem pracy doktorskiej jest zbudowanie wiarygodnego systemu akustycznej charakterystyki siedlisk dennych, na który składa się:

- wykonanie cyfrowego modelu dna badanych rejonów wraz z jego parametryzacją,
- wykonanie mapy natężenia sygnału akustycznego rozproszonego wstecz sprowadzonego do jednego kąta padania,
- poznanie charakterystyk kątowych bezwzględnej siły sygnału akustycznego rozproszonego wstecz od dna dla sygnałów o wybranej częstotliwości.
- bezinwazyjna klasyfikacja siedlisk bentosowych.

Ponadto celem pracy jest znalezienie parametrów opisujących powierzchnię dna, które zwiększają siłę predykcji w klasyfikacji nadzorowanej i nie są zależne od częstotliwości sygnału wykorzystywanego podczas rejestracji dna echosondą wielowiązkową i nie są także zależne od innych zmian względnych wartości natężenia sygnału akustycznego podczas różnych kampanii pomiarowych. Dodatkowym celem jest stworzenie własnego, empirycznego algorytmu do korekcji zależności kątowej natężenia sygnału rozproszonego wstecz, który umożliwi dalsze wykorzystanie tego parametru w procesie klasyfikacji.

## Obszar badań

Do testowania nowych metod badawczych wybrano obszar dna morskiego, który na niewielkim obszarze skupia różne typy siedlisk bentosowych. W akwenu pomiarowym o powierzchni  $\sim 1,4$  km<sup>2</sup> położonym w odległości ok 1,5 km na północ od portu Rowy w południowym Bałtyku zarejestrowano dane batymetryczne oraz natężenia sygnałów rozproszonych wstecz za pomocą echosondy wielowiązkowej (publikacja 1, publikacja 2, publikacja 3). Z zarejestrowanych danych przygotowano cyfrowy model batymetrii oraz mapę względnych wartości natężenia sygnału akustycznego rozproszonego wstecz od dna. W badanym obszarze występują: obszary pokryte bardzo drobnym piaskiem (VFS), piaskiem lub piaskiem ze żwirem miejscami tworzącym ripplemarki (S), żwir piaszczysty lub piasek żwirowy (SG-GS), głązy i otoczaki pokryte małżami *Mytilus trossulus* (B), głązy i otoczaki pokryte małżami *Mytilus trossulus*, porośnięte krasnorostami (R) oraz sztuczna struktura jaką jest wrak statku (A). Podczas pomiarów pobrano próbki osadów czerpaczem Van Veen'a oraz wykonano rejestracje video kamerą umieszczoną na zdalnie kierowanym pojeździe podwodnym. Łącznie zinwentaryzowano 57 miejsc dna morskiego. Pobrane próbki osadów zostały przeanalizowane laboratoryjnie w celu określenia ich składu granulometrycznego, natomiast miejsca występowania dużych głązów, w których nie udało się pozyskać próbek osadów, oceniono wizualnie na podstawie zarejestrowanego nagrania

wideo. Następnie punkty inwentaryzacji przyporządkowano do sześciu wymienionych wcześniej grup (Folk i Ward 1957; Wentworth 1922).

## Opis wykonanych prac wchodzących w skład dysertacji

### Klasyfikacja siedlisk dennych

W ostatnich latach w badaniach hydroakustycznych intensywnie poszukuje się jak najlepszych metod geomorfologicznej analizy dna morskiego (Goff i Jordan 1988; Wilson i in. 2007; Micallef i in. 2012; Diesing i Thorsnes 2018; Gafeira i in. 2018; Lucieer i in. 2018). Do klasyfikacji siedlisk bentosowych stosowane są różne metody (Diesing i in. 2020), które ogólnie możemy podzielić na klasyfikację nadzorowaną i nienadzorowaną, w której nie rozróżnia się na początku ilości i cech wynikowych klas. Często do określenia klas oraz miejsca ich występowania in situ wykorzystywane są próbki osadów dennych. Podczas grupowania na podstawie analizy map parametrów przypisywane do poszczególnych klas mogą być pojedyncze piksele lub piksele zgrupowane w obiekty o podobnych cechach. Wreszcie sposób przypisania danych do poszczególnych grup może być realizowany za pomocą różnych metod jak maszyna wektorów nośnych, las losowy, algorytm grupowania k-średnich, k-najbliższych sąsiadów, drzewa klasyfikacji i regresji, sieci neuronowe (Diesing i in. 2020; publikacja 1; publikacja 2). Punkty zinwentaryzowane na dnie morza mogą być podzielone na dwie grupy – grupę treningową, która bierze udział w „uczeniu” algorytmu prawidłowego przypisania klas oraz grupę walidacyjną służącą sprawdzeniu poprawności predykcji. Metoda klasyfikacji polegająca na wykorzystaniu nadzorowanej analizy obiektowej realizowanej w oprogramowaniu eCognition z wykorzystaniem wieloskalowej segmentacji, algorytmu doboru cech Boruta i porównania wyników kilku algorytmów klasyfikujących osiąga bardzo dobre rezultaty opisane między innymi ogólną dokładnością na poziomie powyżej 80% (publikacja 1; Janowski i in. 2020) dlatego została wybrana do klasyfikacji siedlisk w moim badaniu.

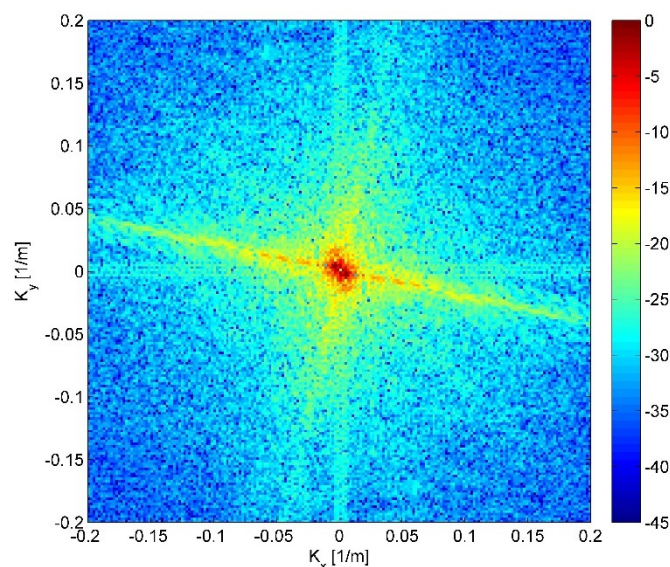
W przypadku nadzorowanej analizy obiektowej (publikacja 1; publikacja 2), czynnikami wejściowymi do klasyfikacji są próbki osadów dennych, mapy batymetryczne, mapy względnego natężenia sygnału akustycznego rozproszonego wstecz od dna morskiego oraz mapy obliczonych z nich parametrów. Parametry statystyczne obliczane w wielu pracach dla batymetrii to nachylenie (slope), kierunek ekspozycji (aspect), krzywizna (curvature), odchylenie standardowe (standard deviation). Przykłady parametrów obliczanych dla mapy względnego natężenia sygnału rozproszonego wstecz to odchylenie standardowe oraz parametry teksturalne (macierze współwystępowania poziomów szarości - GLCM) (Haralick i in. 1973; Montereale Gavazzi i in. 2017; Prampolini i in. 2018; Samsudin i Hasan 2017), w tym homogeniczność i kontrast. W badaniach metod klasyfikacji siedlisk bentosowych na szczególną uwagę zasługują analizy w wielu skalach przestrzennych (Lecours i in. 2015; Misiuk i in. 2018). Istnieje wiele możliwych do przygotowania map parametrów, dlatego ważne jest określenie, które z nich w sposób istotny opisują badany obszar. Realizuje się to poprzez algorytm doboru cech Boruta (Kursa i Rudnicki 2010) określający wskaźnik ważności (important score) lub poprzez analizę składowych głównych (Jolliffe 2002), która określa stopień korelacji wzajemnej poszczególnych zmiennych. Do grupowania siedlisk należy wybrać mapy parametrów, które w sposób istotny opisują zmienność badanego obszaru i nie są ze sobą silnie skorelowane (publikacja 2).

Jedną z najnowszych tendencji w mapowaniu siedlisk bentosowych jest wykorzystanie wieloczęstotliwościowych danych rejestrowanych przez echosondy wielowiązkowe. Zależność natężenia sygnału akustycznego rozproszonego wstecz od częstotliwości zaobserwowano w badaniach laboratoryjnych i terenowych, sprawdzając wartość tego parametru dla różnych typów

osadów (publikacja 1; Jackson i in. 1986; Urick 1983; Feldens i in. 2018; Gaida i in. 2018). Rejestracje akustyczne osadów dna morskiego przeprowadzone na kilku częstotliwościach często dostarczają więcej informacji na temat fizycznych i biologicznych właściwości siedlisk dna morskiego w porównaniu z badaniami wykorzystującymi jedną częstotliwość. Zaobserwowano, że drobne osady, takie jak piaski i muły inaczej rozpraszają sygnały akustyczne o danej częstotliwości, niż osady grubsze, takie jak żwir, muszle lub głązy (Jackson i in. 1986; Gaida i in. 2018).

Lyons i inni (2002) opisali jedno z pierwszych zastosowań Dwuwymiarowej Transformacji Fouriera (2D FFT) do charakterystyki dna morskiego o wysokiej rozdzielczości. Zastosowanie 2D FFT umożliwiło uzyskanie przestrzennego rozkładu widmowej gęstości mocy cyfrowego modelu terenu. Ta sama technika została zastosowana w kilku innych badaniach (np.: Briggs i in. 2005). Metoda została udoskonalona i zastosowana do analizy batymetrii o wysokiej rozdzielczości uzyskanej z nowoczesnych pomiarów hydroakustycznych, w tym z wykorzystaniem echosond wielowiązkowych (Cazenave i in. 2008; Lefebvre i in. 2009). Schönke i inni (2017) zastosowali transformację Fouriera do opisu mikro nierówności dna morskiego, stosując podwodne skanowanie laserem w południowo-wschodniej części Morza Północnego.

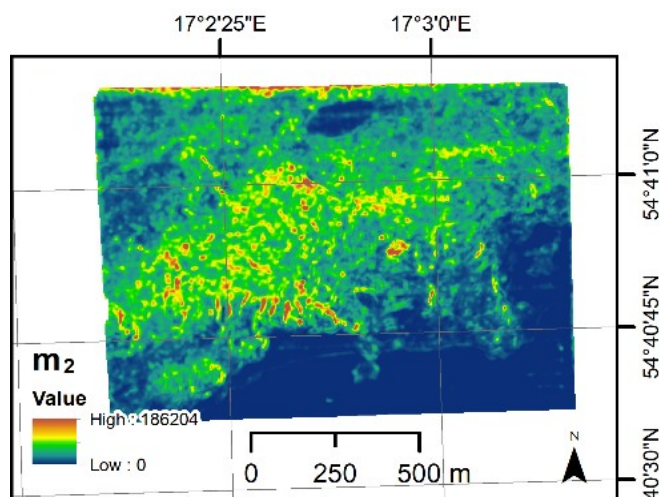
Zaproponowałam, aby w klasyfikacji siedlisk bentosowych zastosować parametry opisujące badany obszar obliczone z cyfrowego modelu dna morskiego. Wprowadziłam do analizy obiektowej nową grupę parametrów widmowych obliczonych z cyfrowego modelu dna (publikacja 2). Są nimi: moment widmowy  $m_0$ , moment widmowy  $m_2$ , średnia częstotliwość, szerokość widmowa, skośność widmowa, współczynnik dobroci (Q-factor), skośność widmowa zdefiniowana dla momentów centralnych, wymiar fraktalny. Cyfrowy model dna podzieliłam na małe kwadraty, przy czym każdy kolejny kwadrat zachodził w 90% na położenie poprzedniego a w każdym z nich obliczyłam gęstość widmową mocy korzystając z algorytmu 2D FFT (Rys. 2).



Rys. 2. Przykład gęstości widmowej mocy obliczonej w oknie obejmującym fragment cyfrowego modelu terenu.

W każdym z okien (Rys. 2) robiłam przekroje gęstości widmowej mocy co 5 stopni i z tak otrzymanych dwuwymiarowych przekrojów obliczyłam parametry widmowe. Uśrednione wyniki parametru z poszczególnych okien złożyłam w mapę przestrzennego rozkładu parametru w badanym obszarze. Na Rys. 3 przedstawiłam przykładowy parametr - moment widmowy 2, który został obliczony w oknie o wielkości 20x20 m.





Rys. 3. Mapa rozkładu wartości parametru moment widmowy ( $m_2$ ), obliczonego w ruchomym oknie 20x20 m.

W publikacji 2 przygotowano zestawienie map przykładowych parametrów mogących brać udział w procesie klasyfikacji dna, w tym parametry statystyczne, widmowe oraz macierze współwystępowania poziomów szarości. Następnie sprawdzono, które spośród 62 map parametrów są najistotniejsze w klasyfikacji nadzorowanej wykorzystując algorytm doboru cech Boruta (Kursa i Rudnicki 2010). Ten algorytm doboru cech wykorzystuje uczenie maszynowe typu random forest (RF) (Breiman 2001). Klasyfikację obiektową OBIA zrealizowano stosując oprogramowanie eCognition (publikacja 1; publikacja 2; Blaschke 2010; Janowski i in. 2020). W algorytmie segmentacji wielorozdzielczej (MS) piksele o podobnych cechach zostały połączone w grupy o określonych kształtach i rozmiarach (Benz i in. 2004). Najlepszy wynik klasyfikacji osiągnięto metodą - maszyna wektorów nośnych (Support Vector Machine - SVM). Otrzymano 86% ogólnej dokładności predykcji, porównując wynik klasyfikacji ze zbiorem próbek osadów walidacyjnych.

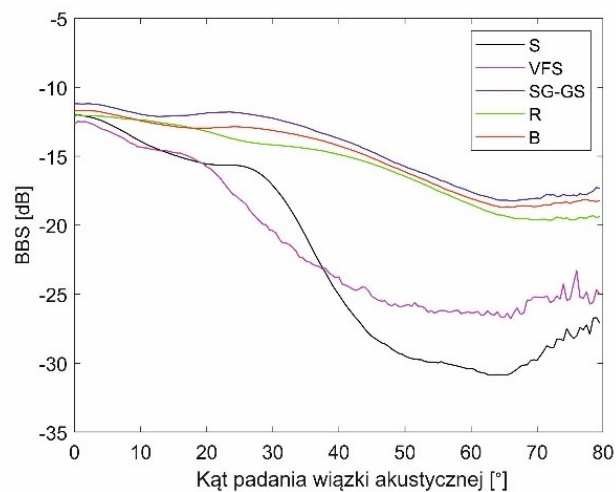
#### Rzeczywista wartość siły rozpraszania wstecznego od dna

Standardy hydrograficzne IHO (2008) w sposób szczegółowy opisują jakość pomiarów batymetrycznych echosondą wielowiązkową, jednak standardy związane z pomiarami echosondą wielowiązkową rozpraszania wstecznego niezmiernie rzadko są opisywane w literaturze. Kompendium dobrych praktyk w zakresie rejestracji i przetwarzania natężenia sygnałów rozpraszanych wstecz opracowane przez grupę BSWG GeoHab, jest pierwszym tego typu dokumentem skupiającym się na jakości danych o natężeniu sygnału akustycznego rozproszonego wstecz rejestrowanego przez echosondę wielowiązkową (Lurton i Lamarche 2015). Natężenie sygnałów akustycznych rozpraszonych wstecz powinno być rejestrowane urządzeniami skalibrowanymi akustycznie, dając dostęp do rzeczywistej siły rozpraszania wstecznego (Lurton i Lamarche 2015; Eleftherakis i in. 2018).

Dostarczenie rzeczywistych wartości siły rozpraszania wstecznego dna morskiego wymaga użycia sonaru, którego charakterystyka i czułość podczas nadawania i odbioru sygnału są dobrze znane przy określonej częstotliwości i kącie padania na dno morskie. Ponadto wymaga to zastosowania dokładnych kompensacji strat transmisji oraz powierzchni rewerberacji (Lurton i Lamarche 2015; Eleftherakis i in. 2018). W ostatnich latach opublikowano wyniki zaledwie kilku badań siedlisk bentosowych z wykorzystaniem skalibrowanej akustycznie echosondy wielowiązkowej (Wendelboe 2018; Eleftherakis i in. 2014; Weber i in. 2018; Roche i in. 2018). Prace

te przedstawiają wybrane charakterystyki rzeczywistej siły rozpraszania wstecznego dla kilku typów siedlisk przy zastosowaniu sygnałów o różnych częstotliwościach przy znanych parametrach środowiska. Gdy takie pomiary staną się częste, możliwe będzie stworzenie kompleksowego katalogu przedstawiającego charakterystyki kątowe rzeczywistej siły rozpraszania wstecznego dla różnych siedlisk bentosowych.

Do pomiarów prezentowanych w publikacji 3 wykorzystałam echosondę wielowiązkową iWBMSH (model STX) skalibrowaną akustycznie przez jej producenta - firmę NORBIT. Dodatkowo zarejestrowane wartości natężenia rozpraszania wstecznego zostały przeze mnie skorygowane o wielkość powierzchni rewerberacji oraz przyporządkowane do kątów padania wiązki akustycznej na dno. W publikacji zaprezentowałam krzywe przedstawiające kątowe zależności rzeczywistej siły rozpraszania wstecznego dla siedlisk dennych występujących w badanym obszarze dla sygnału akustycznego o częstotliwości 150 kHz. Jest to niezwykle ważny wynik w kontekście poznania akustycznej charakterystyki siedlisk bentosowych.



Rys. 4. Wyniki wartości rzeczywistej siły rozpraszania wstecznego w funkcji kąta padania dla obszarów pokrytych bardzo drobnym piaskiem (VFS), piaskiem lub piaskiem ze żwirem miejscami tworzącym ripplemarki (S), żwiru piaszczystego lub piasku żwirowego (SG-GS), głazów i otoczków pokrytych małżami *Mytilus trossulus* (B), głazów i otoczków pokrytych małżami *Mytilus trossulus*, porośniętych krasnorostami (R) dla sygnałów akustycznych o częstotliwości 150 kHz.

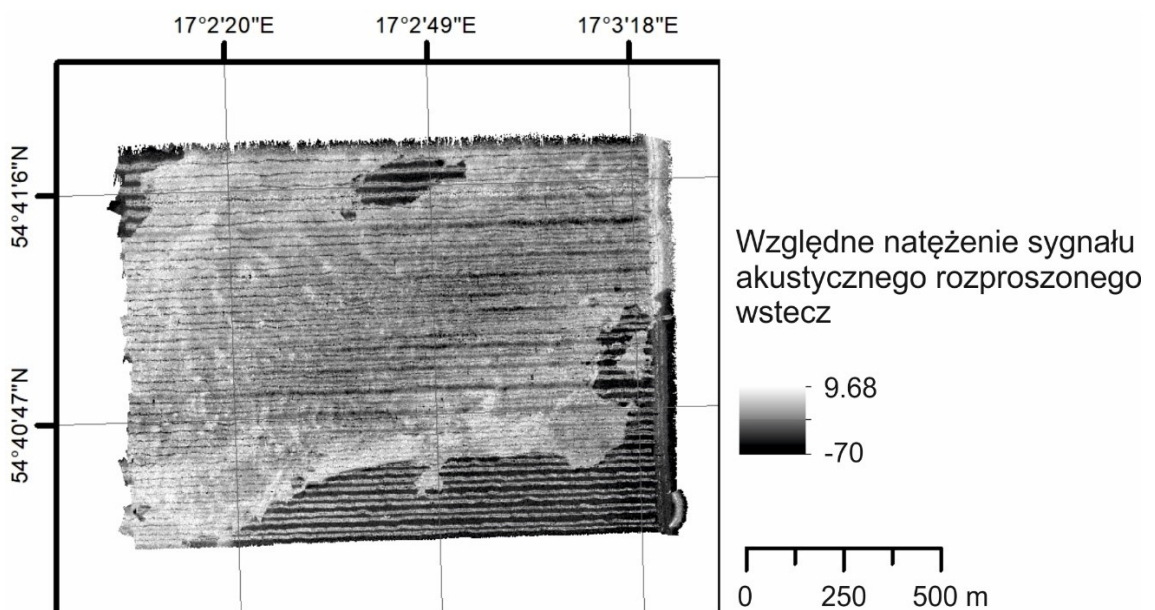
Uzyskane wartości rzeczywistej siły rozpraszania wstecznego wyniosły: od -12 do -31 dB dla obszarów pokrytych piaskiem lub piaskiem ze żwirem miejscami tworzącym ripplemarki (S); od -12,5 do -27 dB dla obszarów pokrytych bardzo drobnym piaskiem (VFS); od -10,5 do -18 dB dla żwiru piaszczystego lub piasku żwirowego (SG-GS); od -12 do -20 dB dla głazów i otoczków pokrytych małżami *Mytilus trossulus* i porośniętych krasnorostami (R) oraz -11,5 do -18 dB dla głazów i otoczków pokrytych małżami *Mytilus trossulus* (B).

W przypadku płaskich w makroskali typów dna (obszary pokryte bardzo drobnym piaskiem, obszary pokryte piaskiem lub piaskiem ze żwirem miejscami tworzącym ripplemarki) zaobserwowałam duży spadek rzeczywistej siły rozpraszania wstecznego wraz ze wzrostem odchylenia kierunku padania fali od pionu a w przypadku dna o bardziej nieregularnym kształcie (żwir piaszczysty lub piasek żwirowy, głazy i otoczki pokryte małżami *Mytilus trossulus*, głazy i otoczki pokryte małżami *Mytilus trossulus* i porośnięte krasnorostami) spadek wartości rzeczywistej siły rozpraszania wstecznego dla bardziej odchylonych wiązek ten jest mniejszy. Wartości rzeczywistej siły rozpraszania wstecznego uzyskane dla żwiru piaszczystego lub piasku

żwirowego, głazów i otoczków pokrytych małżami *Mytilus trossulus* i porośniętych krasnorostami oraz głazów i otoczków pokrytych małżami *Mytilus trossulus* były wyższe niż dla obszarów pokrytych piaskiem lub piaskiem ze żwirem miejscami tworzącym ripplemarki i obszary pokryte bardzo drobnym piaskiem. Krzywe wartości rzeczywistej siły rozpraszania wstecznego dla obszarów pokrytych piaskiem lub piaskiem ze żwirem miejscami tworzącym ripplemarki i obszarów pokrytych bardzo drobnym piaskiem w przedstawionych przeze mnie badaniach miały charakterystyczne kształty typowe dla krzywej osadów drobnoziarnistych w modelu APL-UW (1994).

#### Korekcja względnego natężenia sygnału rozproszonego wstecz od dna polegająca na zmiennym wzmocnieniu kątowym

Względne natężenie sygnału akustycznego rozproszonego wstecz wykazuje silną zależność od kąta padania. Na Rys. 5 przedstawiono przykładową mapę wartości względnego natężenia sygnałów rozproszonych wstecz w funkcji kąta padania zarejestrowanych przeze mnie w akwencie pomiarowym.



Rys. 5. Mapa względnych wartości natężenia sygnałów akustycznych rozproszonych wstecz zarejestrowana w akwencie Rowy w południowym Bałtyku.

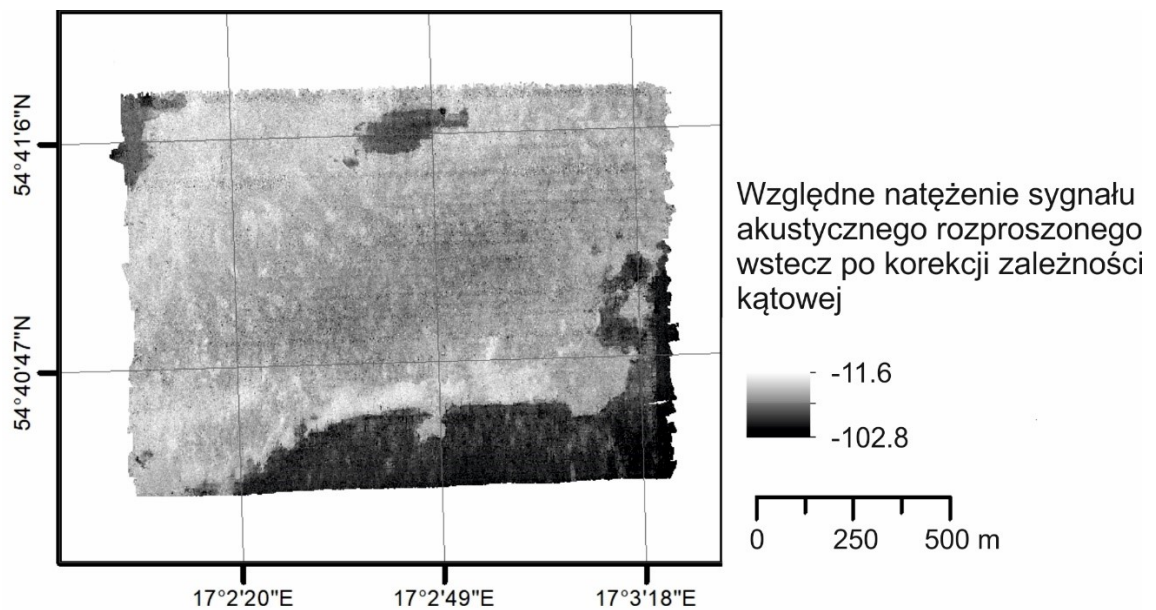
Opracowałam empiryczną metodę korekcji polegającą na zmiennym wzmocnieniu kątowym (publikacja 3). Wykorzystuje ona uśrednione wartości zmierzonego natężenia sygnału akustycznego rozproszonego wstecz, a nie założenia modelowe, tak jak to uczyniono w standardowym oprogramowaniu Geocoder. Wysokiej jakości mapy rozpraszania wstecznego sprowadzone do jednego kąta padania są niezbędne do przeprowadzenia dokładnej klasyfikacji siedlisk bentosowych. Wszystkie pomiary natężenia sygnału akustycznego rozproszonego wstecz w badanym obszarze sprowadziłam do wartości odpowiadających rozpraszaniu wstecznemu dla kąta padania 40° w celu sporządzenia jednorodnej mapy łatwej do interpretacji oraz dalszego wykorzystania w programach realizujących klasyfikację. Zaproponowany przeze mnie algorytm umożliwi sprowadzenie siły rozpraszania wstecznego do dowolnego kąta padania wiązki akustycznej na dno.

Nowatorska procedura korekcji polega na podziale danych zarejestrowanych przez echosondę wielowiązkową na grupy, z których każda zawiera sekwencję 50 impulsów, a każdy



impuls kilkaset zarejestrowanych odebranych sygnałów (wykorzystywana echosonda operowała na 512 wiązkach odbiorczych). Dla uproszczenia przyjął założenie, że właściwości rozpraszania wstecz sygnału akustycznego od dna morskiego są stałe w każdej sekwencji zarejestrowanych impulsów. Każdy zarejestrowany sygnał przypisałam do odpowiedniego przedziału kąta padania. Ze wszystkich danych zarejestrowanych w danej sekwencji obliczyłam średnie wartości natężenia sygnału akustycznego rozproszonego wstecz dla różnych kątów padania. Następnie sprawdziłam, jaka wartość odpowiada kątowi padania 40 stopni i obliczyłam współczynnik korekcji dla poszczególnych kątów padania. Każdą zarejestrowaną wartość natężenia sygnału akustycznego rozproszonego wstecz przemnożyłam ze współczynnikiem korekcji odpowiednim dla danego kąta padania. Współczynniki korekcji były obliczane oddzielnie dla każdej sekwencji 50 impulsów.

Na Rys. 6 przedstawiłam mapę względną wartości natężenia sygnałów akustycznych rozproszonych wstecz o wartościach przeliczonych do kąta padania 40°. Wynik procedury korekcyjnej jest przedstawiony w postaci mapy obliczonych wartości względnego natężenia sygnału akustycznego rozproszonego wstecz po korekcji nazwanej BBS-Coder.



Rys. 6. Rezultat działania algorytmu BBS-Coder - mapa względnych wartości natężenia sygnałów akustycznych rozproszonych wstecz o wartościach przeliczonych do kąta padania 40° zarejestrowana w akwenu Rowy w południowym Bałtyku.

Narzędzie Geocoder (Fonseca i Calder 2005) umożliwiło przygotowanie map względnego natężenia sygnału akustycznego rozproszonego wstecz badanego obszaru bez zależności kątowych. Jednak dla kątów padania bliskich 0° otrzymano wysokie odchylenie standardowe wartości parametru prezentowanego na mapie. Geocoder przypisuje informację o ważności do próbek rozpraszania wstecznego. Dane dla kątów padania bliskich 0° i blisko 90° mają niską ważność, natomiast próbki w środkowym zakresie mają wyższe wartości i większy wpływ na końcową mapę mozaikową rozpraszania wstecznego (Fonseca i Calder 2005). W przypadku przedstawionej przeze mnie korekcji polegającej na zmiennym wzmocnieniu kątowym (publikacja 3), gdy w jednym oknie mapy rastrowej występowały dane o rozpraszaniu zarejestrowane z różnym kątem padania, wszystkie wartości zostały uśrednione zgodnie z przyporządkowaniem przestrzennym do siatki rastrowej. Przedstawiona przeze mnie metoda polegającej na zmiennym wzmocnieniu kątowym

jest prostym i efektywnym narzędziem do przygotowania mapy mozaikowej rozpraszania wstecznego, przydatnej do klasyfikacji siedlisk dna morskiego.

## Podsumowanie i wnioski

Przygotowując dysertację, wykonałam cyfrowy model dna badanego obszaru na północ od miejscowości Rowy w południowym Bałtyku oraz przygotowałam mapy parametrów widmowych modelu cyfrowego powierzchni dna. W celu zbadania akustycznej charakterystyki siedlisk dennych w badanym obszarze zmierzyłam i obliczyłam rzeczywiste wartości siły rozpraszania wstecznego sygnałów akustycznych. W dysertacji wykorzystałam bardzo efektywną metodę klasyfikacji wykorzystującą analizę obiektową, którą ulepszyłam o wykorzystanie parametrów widmowych cyfrowego modelu terenu. Ponadto opracowałam metodę ujednoczenia mapy natężeń sygnałów akustycznych rozproszonych wstecz nazwaną w publikacji 3 BBS-Coder, poprzez sprowadzenie natężenia sygnałów w całym badanym akwenu do wartości odpowiadających jednemu kątowi padania wiązki akustycznej na dno. Za jej pomocą przygotowałam mapę natężenia sygnału akustycznego rozproszonego wstecz sprowadzonego do kąta padania 40°.

## Podsumowanie i wnioski dotyczące akustycznej klasyfikacji siedlisk bentosowych

Parametry widmowe opisujące dno morskie obliczone dla cyfrowego modelu terenu (publikacja 2) nie są zależne od zmiennych parametrów środowiska, takich jak natężenie sygnału rozproszonego wstecz od dna, dlatego dobrze realizują cel postawiony w dysertacji. Są ważne w opracowaniu powtarzalnych i jednorodnych metod klasyfikacji siedlisk dna morskiego. To zupełnie nowatorskie podejście umożliwia w sposób półautomatyczny i powtarzalny klasyfikować siedliska bentosowe południowego Bałtyku (publikacja 2) jak również znalazło zastosowanie w predykcji lądowych form postglacjalnych, co potwierdza skuteczność i uniwersalność metody (Janowski i in. 2021 - praca mojego współautorstwa nie wchodząca do dysertacji, opublikowana w IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, IF=5,6). Otrzymane wyniki badań potwierdzają wysoką efektywność parametrów widmowych w rozpoznawaniu siedlisk bentosowych, co potwierdza wysoka zgodność (86%) wyników klasyfikacji z próbkami osadów dennych w procesie walidacji (publikacja 2).

W pracy przedstawiłam osiem parametrów widmowych opisujących powierzchnię dna. Znaczenie parametrów widmowych zostało wyrażone za pomocą tak zwanego wskaźnika ważności (importance score) jako rezultatu algorytmu selekcji cech Boruta. Siedem z ośmiu zaproponowanych parametrów widmowych znacznie poprawiło moc predykcyjną klasyfikatorów nadzorowanych (publikacja 2). Najistotniejszymi parametrem w tym badaniu była mapa natężenia sygnału akustycznego rozproszonego wstecz od dna morskiego dla emitowanych sygnałów o częstotliwościach 400 kHz i 150 kHz. Natomiast kolejnym, istotnym parametrem był wymiar fraktalny obliczony z nachylenia widma. Co ciekawe, wyniki analizy algorytmu Boruta wskazują, że niektóre parametry widmowe mają większe znaczenie dla prawidłowej klasyfikacji niż batymetria, z której zostały obliczone. Na uwagę zasługuje fakt, że wszystkie inne wyekstrahowane cechy, w tym parametry geomorfologiczne, statystyczne i teksturalne batymetrii i natężenia sygnału akustycznego rozproszonego wstecz, nie zostały uznane za istotne. Wynik ten podkreśla, że zastosowanie parametrów widmowych może znacznie poprawić klasyfikację nadzorowaną i mapowanie siedlisk bentosowych. Przedstawiona przeze mnie metoda dowiodła swojej skuteczności na obszarze o złożonej geomorfologii. Odpowiednie zastosowanie nowych parametrów zwiększyło dokładność klasyfikacji w stosunku do prac przedstawionych w publikacji 1. Dodatkowo potwierdzono, że istnieją umiarkowane różnice w rozpraszaniu wstecznym badanych

siedlisk dla częstotliwości 150 kHz i 400 kHz i oba te parametry mają wysoki wskaźnik ważności. Potwierdza to użyteczność podejścia wieloczęstotliwościowego w mapowaniu siedlisk dennych.

Można zauważyć duże podobieństwo między mapami parametrów widmowych a niektórymi cechami mapy względnego natężenia sygnału akustycznego rozproszonego wstecz. Jest ono niezwykle istotne dla mocy predykcji klasyfikatorów nadzorowanych. Parametry widmowe mogą być bardzo przydatne do mapowania siedlisk bentosowych, gdy dostępna jest tylko batymetria. Jednak uwzględnienie parametrów spektralnych wymaga danych batymetrycznych o wysokiej rozdzielczości i jakości. Wszelkie artefakty związane z błędami podczas pomiarów echosondą wielowiązkową mogą zniekształcić obraz batymetryczny i wpływać na obliczone wartości parametrów widmowych. Jednakże nowoczesne systemy kompensacji ruchu podczas pomiarów echosondą wielowiązkową dobrze radzą sobie z korygowaniem tych błędów.

Kolejnym ciekawym zagadnieniem może być wykorzystanie tego typu parametrów widmowych do klasyfikacji cyfrowych modeli terenu o różnym pochodzeniu. Przykładem takiego zastosowania jest klasyfikacja morfologiczna form polodowcowych z wykorzystaniem cyfrowego modelu terenu między innymi z pomiarów lidarowych (Janowski i in. 2021 - praca mojego współautorstwa nie wchodząca do dysertacji, opublikowana w IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, IF=5,6).

Przedmiotem dalszych badań powinno być ustalenie optymalnej wielkości okna przesuwanego, w którym obliczane są parametry widmowe, aby mały jak największy wpływ na prawidłową predykcję siedlisk.

#### Podsumowanie i wnioski o pomiarach rzeczywistej siły rozpraszania wstecznego

Akustyczna kalibracja echosondy wielowiązkowej umożliwia pomiar wartości rzeczywistej siły rozpraszania wstecznego, które są istotną geoakustyczną cechą siedlisk bentosowych i są pomocne w ich dyferencjacji. Niestety wyniki pomiarów bezwzględnych wartości siły rozpraszania wstecznego zarejestrowanych echosondą wielowiązkową przedstawiających całą zależność kątową są niezwykle rzadkie i niewystarczające (Wendelboe 2018; Eleftherakis 2018). Każda fizycznie poprawna metoda kalibracji poprawia jakość danych i dostarcza cennych informacji. Przedstawiona przeze mnie w publikacji 3 metodyka uzyskania bezwzględnych wartości siły rozpraszania wstecznego umożliwia odtworzenie procesu pomiaru i analizy danych poprzez wykorzystanie skalibrowanej przez producenta echosondy i uzupełnienie o korekcję związaną z powierzchnią rewerberacji oraz korekcją kątów padania. Ważność bezwzględnych wartości siły rozpraszania wstecznego sprawia, że należy zawsze, gdy to możliwe stosować skalibrowane akustycznie echosondy.

Względne wartości natężenia sygnału akustycznego rozproszonego wstecz były skutecznie wykorzystywane do klasyfikacji siedlisk bentosowych (publikacja 1; Gaida i in. 2020; Buscombe i in. 2014; Preston 2009), jednak dla bardziej zaawansowanych analiz środowiskowych konieczne jest określenie bezwzględnych wartości siły rozpraszania wstecznego. Przykładem jest badanie zmienności dobowej i sezonowej rozpraszania wstecz przez trawy morskie, ponieważ różnica poziomu siły rozpraszania wstecznego o kilka dB może decydować o zmienności (Feldens i in. 2018). Rejestracje względnych wartości rozpraszania wstecznego od dna morskiego przeprowadzone w innym czasie w innych obszarach a często za pomocą innego modelu echosondy wielowiązkowej dają bardzo odmienne wyniki dla tych samych siedlisk bentosowych. Użycie bezwzględnych wartości siły rozpraszania wstecznego umożliwi porównanie tych wyników. Należy jednak pamiętać, że pozornie podobne siedliska denne mogą znacznie różnić się od siebie właściwościami fizycznymi, takimi jak liczba i wielkość pęcherzyków gazowych w osadzie, gęstość osadu i innych, co

wpływa na powstanie różnic w bezwzględnych wartościach siły rozpraszania wstecznego. Konieczne są intensywne badania, aby poznać rzeczywiste wartości rozpraszania wstecz różnych siedlisk bentosowych. Przykłady pomiarów przedstawionych w różnych badaniach wskazują na dużą zmienność rzeczywistej siły rozpraszania wstecznego, dlatego ważne jest znalezienie empirycznych wartości granicznych rzeczywistej siły rozpraszania wstecznego dla konkretnych siedlisk w różnych basenach. Przedstawione dotychczas badania opisujące charakterystyki kątowe rzeczywistej siły rozpraszania wstecznego są bardzo rzadkie i niewystarczające do poznania cech siedlisk bentosowych, dlatego w publikacji 3 opisałam ten problem, przedstawiłam sposób korekcji danych oraz charakterystyki siedlisk dennych badanego obszaru w południowym Bałtyku. To jedna z pierwszych tego typu prac na świecie.

W publikacji 3 przedstawiłam kątową zależność rzeczywistej siły rozpraszania wstecznego dla pięciu siedlisk bentosowych w Morzu Bałtyckim przy częstotliwości sygnału akustycznego 150 kHz. Korekcje zarejestrowanych danych o rozpraszaniu obejmowały wykorzystanie skalibrowanej akustycznie echosondy wielowiązkowej, korekcję nachylenia dna w obszarze rewerberacji sygnału oraz zastosowanie powierzchni rewerberacji.

Wyniki pomiarów rzeczywistej siły rozpraszania wstecznego w funkcji kąta padania przedstawione w publikacji 3 są zbieżne z przewidywaniami teoretycznymi jak również z wynikami uzyskanymi przez innych autorów, którzy przeprowadzili pomiary echosondą wielowiązkową (Eleftherakis 2018; Fonseca i in 2009). W przedstawionych przeze mnie badaniach dla kątów padania od 25 do 65 krzywa bezwzględnych wartości siły rozpraszania wstecznego wykazała znaczny spadek wartości większy niż w modelu APL (APL-UW 1994) przy 100 kHz. Może to być związane z wyższą częstotliwością stosowanego sygnału - 150 kHz.

W niektórych badaniach zauważono trend rosnącej wartości rzeczywistej siły rozpraszania wstecznego wraz ze wzrostem częstotliwości [Williams i in. 2002; Williams i in. 2009]. Wyższe wartości rzeczywistej siły rozpraszania wstecznego dla wyższych częstotliwości mogą być związane z silnym rozpraszaniem sygnałów na chropowatej powierzchni dna, natomiast stopień nierówności dna jest opisany parametrem Rayleigha i zależy od długości fali akustycznej, skali nierówności obecnych na powierzchni rozpraszającej i kąta padania (Ogilvy 1991).

Rzeczywiste wartości siły rozpraszania wstecznego są bardzo potrzebne do charakterystyki siedlisk bentosowych i stanowią ich ważną akustyczną właściwość. Zróżnicowane charakterystyki kątowe o znanym nachyleniu krzywej i znanym zakresie wartości dla odpowiednich siedlisk dennych mogą w przyszłości posłużyć do klasyfikacji z właściwym przypisaniem obszarów do klas siedlisk pomimo małej liczby próbek osadów dennych lub ich braku. Rzeczywiste wartości siły rozpraszania wstecznego umożliwią lepsze niż dotychczas zrozumienie procesów środowiskowych zachodzących na dnie morskim a ich poznanie jest częścią badań podstawowych.

#### Podsumowanie i wnioski o BBS-Coder

Do analizy obiektowej (OBIA), analizy teksturalnej (GLCM) czy automatycznej klasyfikacji niezbędne są skartowane wartości siły rozpraszania wstecznego bez widocznej zależności kątowej. Najczęściej stosowanym narzędziem pozwalającym na sprowadzenie wartości sygnałów rozproszonych wstecz do jednego kąta padania jest Geocoder (Fonseca i Calder 2005).

W mapach mozaikowych względnego natężenia sygnału akustycznego rozproszonego wstecz badanego obszaru przygotowanych za pomocą narzędzia Geocoder występują duże błędy dla kątów padania bliskich  $0^\circ$ , dlatego opracowałam własną metodę korekcji. Sprowadza ona siłę

rozpraszania wstecznego do wybranego kąta padania równego 40 stopni i w efekcie redukuje wpływ kąta padania.

Przedstawiony algorytm do korekcji polegającej na zmiennym wzmocnieniu kątowym BBS-Coder (publikacja 3) jest prosty i efektywny. Zostanie udostępniony do szerokiego użytku na stronie projektu ECOMAP (<https://www.bonus-ecomap.eu/>). Bardzo dobra jakość map rozpraszania wstecznego utworzonych za pomocą BBS-Coder wskazuje na ich przydatność do kartowania siedlisk bentosowych i zrównoważonego zarządzania zasobami dna morskiego.

## BIBLIOGRAFIA

APL-UW, 1994. High-Frequency Ocean Environmental Acoustics Models Handbook; Defense Technical Information Center: Seattle, WA, USA, 1994; APL-UW TR 9407

Benz, U.C., Hofmann, P., Willhauck, G., Lingenfelder, I., Heynen, M., 2004. Multi-resolution, object-oriented fuzzy analysis of remote sensing data for GIS-ready information. *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.* 58, 239–258. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2003.10.002>

Blaschke, T., 2010. Object based image analysis for remote sensing. *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.* 65, 2–16. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2009.06.004>

Breiman, L., 2001. Random Forests. *Mach. Learn.* 45, 5–32, <https://doi.org/10.1023/A:1010933404324>

Briggs, K.B., Lyons, A.P., Pouliquen, E., Mayer, L.A., Richardson, M.D., 2005. Seafloor Roughness, Sediment Grain Size and Temporal Variability, in *Underwater Acoustic Measurements: Technologies and Results*. Heraklion, Crete, Greece, pp. 29–37

Buscombe, D., Grams, P.E., Kaplinski, M.A., 2014. Characterizing riverbed sediment using high-frequency acoustics: Scattering signatures of Colorado River bed sediment in Marble and Grand Canyons. *J. Geophys. Res. Earth Surf.* 119, 2692–2710. <https://doi.org/10.1002/2014JF003191>

Cazenave, P.W., Lambkin, D.O., Dix, J.K., 2008. Quantitative bedform analysis using decimetre resolution swath bathymetry. In: *CARIS 12th International User Group Conference*. United Kingdom, Bath

Diesing, M., Mitchell, P., Stephens, D., 2016. Image-based seabed classification: what can we learn from terrestrial remote sensing? *ICES Journal of Marine Science: Journal du Conseil* 73, 2425–2441. <https://doi.org/10.1093/icesjms/fsw118>

Diesing, M., Thorsnes, T., 2018. Mapping of Cold-Water Coral Carbonate Mounds Based on Geomorphometric Features: An Object-Based Approach. *Geosciences*, 8(2), 34. DOI: 10.3390/geosciences8020034

Diesing, M., Mitchell, P. J., O’Keeffe, E., Montereale Gavazzi G. O. A., Le Bas, T., 2020. Limitations of Predicting Substrate Classes on a Sedimentary Complex but Morphologically Simple Seabed. *Remote Sensing*, 12, 3398

Eleftherakis, D., Snellen, M., Amiri-Simkooei, A., Simons, D.G., Siemes, K., 2014. Observations regarding coarse sediment classification based on multi-beam echo-sounder’s backscatter strength and depth residuals in Dutch rivers. *J. Acoust. Soc. Am.* 135, 3305–3315. <https://doi.org/10.1121/1.4875236>

Eleftherakis, D., Berger, L., Le Bouffant, N., Pacault, A., Augustin, J.M., Lurton, X., 2018. Backscatter calibration of high-frequency multibeam echosounder using a reference single-beam system, on natural seafloor. *Mar. Geophys. Res.* 39, 55–73. <https://doi.org/10.1007/s11001-018-9348-5>

Feldens, P., Schulze, I., Papenmeier, S., Schönke, M., Schneider von Deimling, J., 2018. Improved Interpretation of Marine Sedimentary Environments Using Multi-Frequency Multibeam Backscatter Data. *Geosciences*, 8(6), 214. DOI: 10.3390/geosciences8060214

Folk, R.L., Ward, W.C., 1957. A Study in the Significance of Grain-Size Parameters. *Journal of Sedimentary Petrology*, 27, 3-26. DOI: 10.1306/74D70646-2B21-11D7-8648000102C1865D



- Fonseca, L.; Calder, B., 2005. Geocoder: An Efficient Backscatter Map Constructor. In Proceedings of the U.S. Hydro 2005 Conference, San Diego, CA, USA, 22 September 2005; p. 9
- Fonseca, L., Brown, C., Calder, B., Mayer, L., Rzhanov, Y., 2009. Angular range analysis of acoustic themes from Stanton Banks Ireland: A link between visual interpretation and multibeam echosounder angular signatures. *Appl. Acoust.* 70, 1298–1304. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2008.09.008>
- Gafeira, J., Dolan, M., Monteys, X., 2018. Geomorphometric Characterization of Pockmarks by Using a GIS-Based Semi-Automated Toolbox. *Geosciences*, 8(5), 154. DOI: 10.3390/geosciences8050154
- Gaida, T., Tengku Ali, T., Snellen, M., Amiri-Simkooei, A., van Dijk, T., Simons, D., 2018. A Multispectral Bayesian Classification Method for Increased Acoustic Discrimination of Seabed Sediments Using Multi-Frequency Multibeam Backscatter Data. *Geosciences*, 8(12), 455. DOI: 10.3390/geosciences8120455
- Gaida, T.C., Mohammadloo, T.H., Snellen, M., Simons, D.G., 2020. Mapping the seabed and shallow subsurface with multi-frequency multibeam echosounders. *Remote Sens.* 12, 52. <https://doi.org/10.3390/rs12010052>
- Goff, J.A., Jordan, T.H., 1988. Stochastic modelling of seafloor morphology: Inversion of Sea Beam data for second-order statistics. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 93, 13589–13608. DOI: 10.1029/JB093iB11p13589
- Haralick, R.M., Shanmugam, K., Dinstein, I.H., 1973. Textural Features for Image Classification. *IEEE Trans. Syst. Man Cybern.* SMC-3, 610–621
- Held, P., Schneider von Deimling, J., 2019. New Feature Classes for Acoustic Habitat Mapping - A Multibeam Echosounder Point Cloud Analysis for Mapping Submerged Aquatic Vegetation (SAV). *Geosciences*, 9(5), 235. DOI: 10.3390/geosciences9050235
- IHO, 2008. Standards for Hydrographic Surveys. Monaco. Available online: [https://iho.int/uploads/user/pubs/standards/s-44/S-44\\_5E.pdf](https://iho.int/uploads/user/pubs/standards/s-44/S-44_5E.pdf) (accessed on 24 November 2021).
- Jackson, D.R., Baird, A.M., Crisp, J.J., Thomson, P.A.G., 1986. High-frequency bottom backscatter measurements in shallow water. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 80, 1188-1199. DOI: 10.1121/1.393809
- Janowski, L., Madricardo, F., Fogarin, S., Kruss, A., Molinaroli, E., Kubowicz-Grajewska, A., Tegowski, J., 2020. Spatial and Temporal Changes of Tidal Inlet Using Object-Based Image Analysis of Multibeam Echosounder Measurements: A Case from the Lagoon of Venice, Italy. *Remote Sens.* 12, 2117. <https://doi.org/10.3390/rs12132117>
- Janowski, L., Tylmann, K., Trzcinska, K., Rudowski S., Tegowski, J., 2022. Exploration of Glacial Landforms by Object-Based Image Analysis and Spectral Parameters of Digital Elevation Model, in *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 60, pp. 1-17, Art no. 4502817, doi: 10.1109/TGRS.2021.3091771
- Jolliffe, I. T., 2002. Principal Component Analysis. Springer Series in Statistics. New York: Springer-Verlag. doi:10.1007/b98835. ISBN 978-0-387-95442-4
- Kursa, M.B.; Rudnicki, W.R., 2010. Feature Selection with the Boruta Package. *J. Stat. Softw.* 36. DOI: 10.18637/jss.v.036.i11
- Lecours, V., Devillers, R., Schneider, D.C., Lucieer, V.L., Brown, C.J., & Edinger, E.N., 2015. Spatial scale and geographic context in benthic habitat mapping: review and future directions. *Marine Ecology Progress Series*, 535, 259-284. DOI: 10.3354/meps11378
- Lefebvre, A., Thompson, C.E.L., Collins, K.J., Amos, C.L., 2009. Use of a high-resolution profiling sonar and a towed video camera to map a *Zostera marina* bed, Solent, UK. *Estuar. Coast. Shelf Sci.* 82, 323–334. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2009.01.027>
- Lucieer, V., Lecours, V., Dolan, M., 2018. Charting the Course for Future Developments in Marine Geomorphometry: An Introduction to the Special Issue. *Geosciences*, 8(12), 477. DOI: 10.3390/geosciences8120477

- Lurton, X., Lamarche, G. (Eds.), 2015. Backscatter Measurements by Seafloor-Mapping Sonars. Guidelines and Recommendations; GeoHab Backscatter Working Group: 2015. Available online: <https://geohab.org/wp-content/uploads/2018/09/BWSG-REPORT-MAY2015.pdf> (accessed on 24 November 2021)
- Lyons, A.P., Fox, W.L.J., Hasiotis, T., Pouliquen, E., 2002. Characterization of the two dimensional roughness of wave-rippled sea floors using digital photogrammetry. *IEEE J. Ocean. Eng.* 27, 515–524. <https://doi.org/10.1109/JOE.2002.1040935>
- Micallef, A., Le Bas, T.P., Huvenne, V.A.I., Blondel, P., Hühnerbach, V., Deidun, A., 2012. A multi-method approach for benthic habitat mapping of shallow coastal areas with high-resolution multibeam data. *Continental Shelf Research*, 39-40, 14-26. DOI: 10.1016/j.csr.2012.03.008
- Misiuk, B., Lecours, V., Bell, T., 2018. A multiscale approach to mapping seabed sediments. *PLoS ONE*, 13, e0193647. DOI: 10.1371/journal.pone.0193647
- Montereale Gavazzi, G., Madricardo, F., Janowski, L., Kruss, A., Blondel, P., Sigovini, M., Foglini, F., 2016. Evaluation of seabed mapping methods for fine-scale classification of extremely shallow benthic habitats – Application to the Venice Lagoon, Italy. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 170, 45-60. DOI: 10.1016/j.ecss.2015.12.014
- Montereale-Gavazzi, G., Roche, M., Lurton, X., Degrendele, K., Terseleer, N., Van Lancker, V., 2017. Seafloor change detection using multibeam echosounder backscatter: case study on the Belgian part of the North Sea. *Marine Geophysical Research*, 39, 229-247. DOI: 10.1007/s11001-017-9323-6
- Ogilvy, J., 1991. *Theory of Wave Scattering from Random Rough Surfaces*; Adam Higler: Bristol, UK
- Prampolini, M., Blondel, P., Foglini, F., Madricardo, F., 2018. Habitat mapping of the Maltese continental shelf using acoustic textures and bathymetric analyses. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 207, 483-498. DOI: 10.1016/j.ecss.2017.06.002
- Preston, J., 2009. Automated acoustic seabed classification of multibeam images of Stanton Banks. *Appl. Acoust.* 70, 1277–1287. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2008.07.011>
- Roche, M., Degrendele, K., Vrignaud, C., Loyer, S., Le Bas, T., Augustin, J.M., Lurton, X., 2018. Control of the repeatability of high frequency multibeam echosounder backscatter by using natural reference areas. *Mar. Geophys. Res.* 39, 89–104. <https://doi.org/10.1007/s11001-018-9343-x>
- Samsudin, S.A., Hasan, R.C., 2017. Assessment of Multibeam Backscatter Texture Analysis for Seafloor Sediment Classification. *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLII-4/W5, 177-183. DOI: 10.5194/isprs-archives-XLII-4-W5-177-2017
- Schönke, M., Feldens, P., Wilken, D., Papenmeier, S., Heinrich, C., Schneider von Deimling, J., Held, P., Krastel, S.J.G.-M.L., 2017. Impact of *Lanice conchilega* on seafloor microtopography off the island of Sylt (German Bight, SE North Sea). *Geo-Mar. Lett.* 37, 305–318. <https://doi.org/10.1007/s00367-016-0491-1>
- Urick, R.J., 1983. *Principles of Underwater Sound*. New York: McGraw-Hill
- Weber, T.C., Rice, G., Smith, M., 2018. Toward a standard line for use in multibeam echo sounder calibration. *Mar. Geophys. Res.* 39, 75–87. <https://doi.org/10.1007/s11001-017-9334-3>
- Wendelboe, G., 2018. Backscattering from a sandy seabed measured by a calibrated multibeam echosounder in the 190–400 kHz frequency range. *Mar. Geophys. Res.* 39, 105–120. <https://doi.org/10.1007/s11001-018-9350-y>
- Wentworth, C. K., 1922. A Scale of Grade and Class Terms for Clastic Sediments. *The Journal of Geology*, 30 (5): 377–392. DOI: 10.1086/622910
- Williams, K.L., Jackson, D.R., Thorsos, E.I., Tang, D., Briggs, K.B., 2002. Acoustic backscattering experiments in a well characterized sand sediment: Data/model comparisons using sediment fluid and Biot models. *IEEE J. Ocean. Eng.* 27, 376–387. doi: 10.1109/JOE.2002.1040925

Williams, K.L., Jackson, D.R., Tang, D., Briggs, K.B., Thorsos, E.I., 2009. Acoustic Backscattering from a Sand and a Sand/Mud Environment: Experiments and Data/Model Comparisons. *IEEE J. Ocean. Eng.* 34, 388–398. doi: 10.1109/JOE.2009.2018335

Wilson, M.F.J., O'Connell, B., Brown, C., Guinan, J.C., Grehan, A.J., 2007. Multiscale Terrain Analysis of Multibeam Bathymetry Data for Habitat Mapping on the Continental Slope. *Marine Geodesy*, 30, 3-35. doi: 10.1080/01490410701295962