

Sławomir Kozaczka
Akademia Marynarki Wojennej

BADANIE STRUKTURY DNA ZATOKI GDAŃSKIEJ METODĄ AKUSTYKI NIELINIOWEJ

STRESZCZENIE

W pracy przedstawiono wyniki badań doświadczalnych i symulacyjnych, których celem jest wyznaczenie parametrów warstwowej struktury dna morskiego. W badaniach empirycznych zastosowano nieinwazyjną metodę sondowania wykorzystującą echosondę parametryczną SES-2000 Standard. Badania te przeprowadzono na akwenu Zatoki Gdańskiej. Wyniki sondowania porównano z danymi otrzymanymi z analizy odwiertów dokonanych przez wyspecjalizowane instytucje. Zwrócono uwagę na czynniki decydujące o dokładności pomiarów, a w szczególności na różne prędkości rozchodzenia się fali sondującej w zależności od rodzaju osadów dennych. Otrzymane wyniki są wstępem do opracowania pełnej procedury badania górnej warstwy dna morskiego wykorzystującej metody akustyki nieliniowej.

Słowa kluczowe:

dno morskie, echosonda parametryczna, osady denne, akustyka nieliniowa, struktura warstwowa, odwierty, fala sondująca.

WSTĘP

Skuteczne zastosowanie klasycznych, akustycznych metod echolokacyjnych do badania dna morskiego napotyka na duże trudności ze względu na sprzeczność między dążeniem do uzyskania możliwie małego tłumienia fal ultradźwiękowych w osadach dennych a wymaganą dużą rozdzielczością pomiaru głębokości warstw [5]. Małe tłumieniem wykazują bowiem fale o niskiej częstotliwości, lecz uniemożliwiają uzyskanie pożądaną, dużej rozdzielczości pomiaru głębokości, natomiast fale o wysokiej częstotliwości mają odwrotne cechy. Te trudności usuwa w znacznym stopniu

zastosowanie echosond parametrycznych [6]. Zasada działania takiej echosondy polega na wykorzystaniu nieliniowych właściwości wody w przypadku promieniowania fal sprężystych o dużym natężeniu. W wyniku nieliniowego oddziaływania dwóch fal akustycznych o dużej częstotliwości, rozchodzących się w tym samym kierunku i w tej samej przestrzeni, wytworzona zostaje nowa fala akustyczna o małej częstotliwości będącej różnicą częstotliwości fal pierwotnych. Fala o częstotliwości różnicowej posiada właściwości kierunkowe (wąską wiązkę) i rozdzielcze (krótki czas trwania impulsu sondującego), odpowiadające falom pierwotnym. Mimo stosunkowo małej sprawności przetwarzania sygnałów pierwotnych na sygnał o częstotliwości różnicowej, echosondy parametryczne są bardzo dobrym źródłem fal o małej częstotliwości i wysokiej rozdzielczości, co czyni je użytecznym narzędziem w badaniu sedimentów o głębokości do kilkudziesięciu metrów. Dodatkową zaletą echosondy parametrycznej jest możliwość wykorzystywania fal o wielkiej częstotliwości do określania kształtu powierzchni dna oraz do poszukiwania obiektów leżących na dnie morza.

Mimo korzystnych cech echosond parametrycznych, wykorzystanie ich do badania kształtu powierzchni dna i jego uwarstwienia wymaga rozwiązania kilku istotnych problemów. Pierwszym z nich jest zapewnienie dużej dokładności pomiaru głębokości powierzchni dna i grubości poszczególnych warstw. W pomiarach głębokości dna niewymagających dużej dokładności (echosondy nawigacyjne) przyjmuje się średnią wielkość prędkości propagacji fali akustycznej i zakłada się, że jest ona stała w funkcji głębokości. Względny błąd pomiaru odległości przy takich założeniach może dochodzić do $\pm 2,5\%$, gdyż w takich granicach zmienia się prędkość propagacji fali akustycznej w morzu. Błąd ten można radykalnie zmniejszyć, dokonując pomiaru rozkładu w głębokości prędkości propagacji specjalną aparaturą i wprowadzając odpowiednie korekty danych pomiarowych. Znacznie trudniejsza jest natomiast sytuacja w odniesieniu do warstw dennych. Zgrubne oszacowanie grubości warstw odbywa się zazwyczaj na podstawie średniej prędkości rozchodzenia się fali w wodzie morskiej, co w zależności od właściwości fizycznych tych osadów dennych może spowodować duże błędy. Bezwzględne błędy są tym samym większe, im warstwa jest grubsza. Dokładny pomiar grubości warstw wymaga znajomości prędkości rozchodzenia się fali w każdej warstwie, a ta związana jest ze strukturą geologiczną dna morskiego. Ponieważ owa struktura jest właśnie przedmiotem badań, można się więc jedynie posiłkować danymi uzyskanymi innymi metodami, na przykład wynikami pomiarów prędkości próbek osadów pochodzących z odwiertów. Szczęśliwie w przypadku Bałtyku, a w szczególności Zatoki Gdańskiej, różnice prędkości propagacji w występujących tam osadach dennych nie są znaczne (brak przypadków dna skalistego), a zatem błędy w ocenie grubości warstw są niewielkie.

Drugą ważną przyczyną błędów pomiaru głębokości dna i grubości osadów dennych jest ruch nośnika anteny nadawczo-odbiorczej echosondy. Odchylenia położenia anteny od płaszczyzny stycznej do średniej powierzchni dna powodują, że droga rozchodzenia się fali jest na ogół dłuższa niż w rzeczywistości. Problem ten występuje ze szczególną ostrością, gdy nośnikiem echosondy jest mała jednostka. W tym przypadku można zastosować stabilizację elektroniczną wiązki, co jednak wiąże się ze znaczną rozbudową echosondy. Aktualnie stabilizacja elektroniczna stosowana jest wyłącznie w echosondach wielowiązkowych. Prostszy rozwiązaniem wydaje się instalacja anteny echosondy na holowanym pod wodą pływaku.

Opisane wyżej pokrótce zabiegi mają na celu zwiększenie dokładności szacowania odpowiednich parametrów niejednorodnego środowiska, jakim są osady dennie. Jednakże zasadnicze informacje o badanym dnie są zawarte w relacjach amplitudowo-fazowych sygnału echa, a te są związane z lokalną impedancją akustyczną środowiska.

ZAKRES I METODYKA BADAŃ

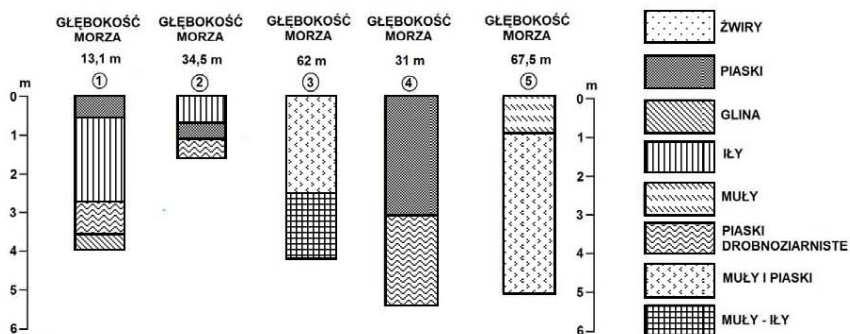
Badania struktury dna przeprowadzono wielokrotnie na akwenu południowego Bałtyku, stosując echosondę parametryczną SES 2000 Standard firmy INNOMAR. Podstawowe parametry tego urządzenia są podane w poniższej tabeli.

Tabela 1. Dane techniczne echosondy parametrycznej SES-2000 [4]

Parametr	Wartość
Wyższa częstotliwość pierwotna	100 kHz
Niższa częstotliwość pierwotna	100 ± 4, 5, 6, 8, 10, 12, 15 kHz
Częstotliwość różnicowa	4, 5, 6, 8, 10, 12, 15 kHz
Szerokość wiązki na wyższych częstotliwościach pierwotnych	3.6° x 3.6°
Szerokość wiązki częstotliwości różnicowej	jw.
Zakres głębokości	1–500 m
Maksymalna głębokość penetracji dna	< 50 m
Rozdzielczość wgłębna w wodzie	1 cm
Rozdzielczość wgłębna w dnie	5 cm

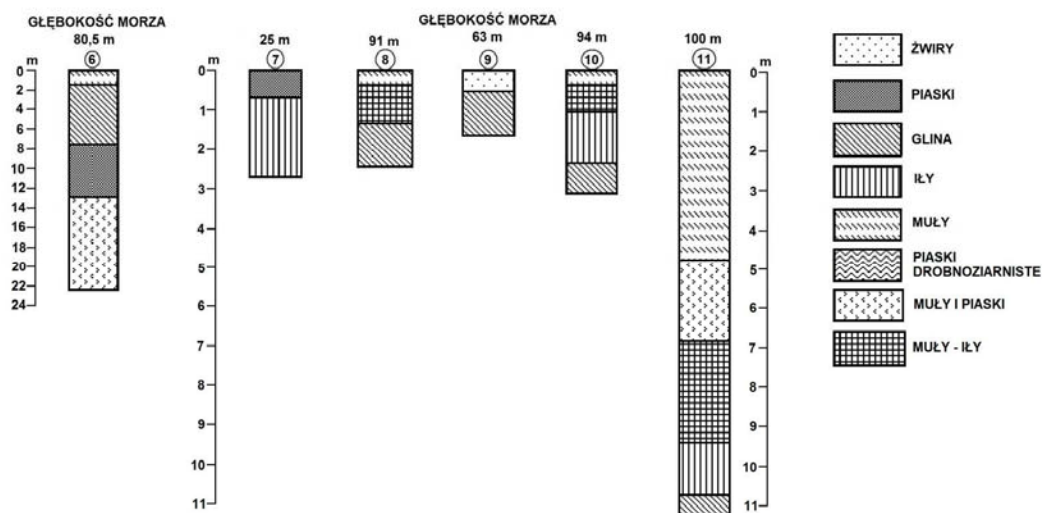
Źródło: *SES-2000 Narrow-beam parametric sub-bottom profilers, Innomar Technologie GmbH, Rostock 2008.*

Dane dotyczące struktury warstw osadów dennych z obszaru Zatoki Gdańskiej można uzyskać na podstawie analizy rdzeni pobranych podczas odwiertów. Przykładowe struktury osadów przedstawione zostały na rysunkach 1. i 2. Lokalizację wykonania odwiertów, na podstawie których sporządzone zostały te profile, zaznaczono na mapie Zatoki Gdańskiej zamieszczonej na rysunku 3.



Rys. 1. Profile geologiczne wierzchniej warstwy dna wyznaczone na podstawie analizy odwiertów wykonanych w różnych punktach Zatoki Gdańskiej

Źródło: na podstawie danych z J. E. Mojski i in., *Atlas geologiczny południowego Bałtyku*, Sopot — Warszawa 1995.



Rys. 2. Profile geologiczne wierzchniej warstwy dna wyznaczone na podstawie analizy odwiertów wykonanych w różnych punktach Zatoki Gdańskiej

Źródło: na podstawie danych z J. E. Mojski i in., *Atlas geologiczny południowego Bałtyku*, Sopot — Warszawa 1995.



Rys. 3. Mapa Zatoki Gdańskiej wraz z zaznaczonymi punktami wykonania odwiertów
Źródło: opracowanie własne.

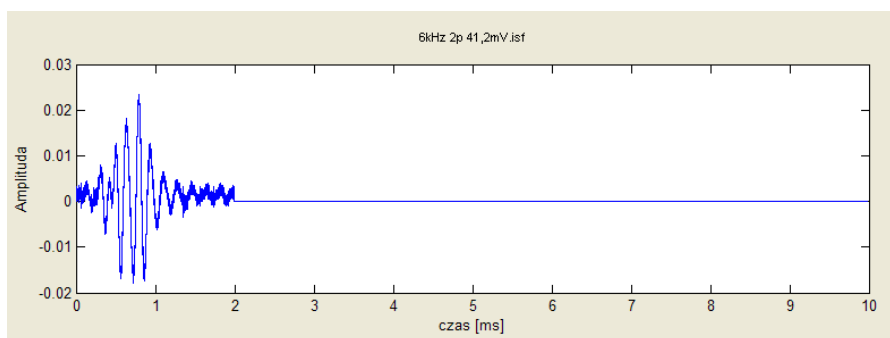
Przekroje geologiczne dna Zatoki Gdańskiej pokazują, że ma ono strukturę warstwową, a poszczególne warstwy różnią się od siebie pod względem zawartości dominujących frakcji, co przekłada się na różnice w parametrach fizycznych tych warstw [1, 2]. Szczególnie istotne z punktu widzenia metod hydroakustycznych są tutaj różnice impedancji akustycznych pomiędzy sąsiadującymi warstwami oraz tłumienie, jakiemu podlega fala akustyczna, przechodząc przez daną warstwę. Właściwości te wpływają silnie na poziom sygnału odbitego od granicy warstw, a więc na możliwości badania struktury wglębnej dna za pomocą metod akustycznych.

Fala akustyczna jest najbardziej tłumiona w żwirach i piaskach gruboziarnistych. Ze względu na dużą różnicę ich impedancji z impedancją wody morskiej dno utworzone z takich osadów będzie powodowało wysoki poziom echa od powierzchni pierwszej warstwy granicznej. Iły oraz muły charakteryzują się znacznie mniejszym współczynnikiem tłumienia, dzięki czemu możliwa jest penetracja nawet bardzo grubych warstw tych osadów. Ze względu na fakt, iż wartości gęstości oraz prędkości dźwięku w tych osadach są zbliżone do analogicznych wartości wyznaczonych dla wody morskiej, różnica impedancji pomiędzy wodą a wierzchnią warstwą dna utworzoną z drobnych mułów lub ilów będzie stosunkowo niewielka, co odpowiada niskiemu poziomowi sygnału odbitego od powierzchni dna.

Posiadając wyznaczone na podstawie wzorów empirycznych stałe materiałowe charakteryzujące konkretne rodzaje osadów dennych, możliwe jest numeryczne obliczenie przebiegu sygnału echa od dna morskiego o strukturze warstwowej dla

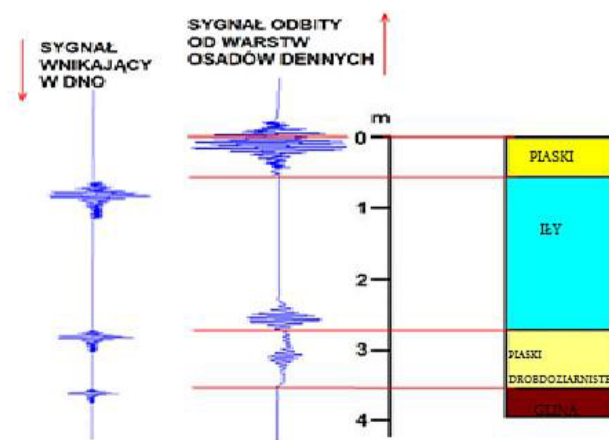
znanej postaci impulsu sondującego. Symulacje wykonano w oparciu o uproszczony model matematyczny odbicia fali akustycznej od układu płasko-równoległych warstw o różnych charakterystycznych impedancjach akustycznych. Do obliczeń wykorzystano zarejestrowane w warunkach laboratoryjnych przebiegi impulsu sondującego o częstotliwości 6 kHz wyemitowanego przez echosondę parametryczną. Zarejestrowany przebieg przedstawia rysunek 4.

Symulacje przeprowadzono przy założeniu, że struktura dna, od którego odbija się impuls sondujący, jest zgodna z wybranymi przekrojami geologicznymi dna Zatoki Gdańskiej, przedstawionymi na rysunkach 1. i 2. Przykładowe wyniki symulacji — w formie przebiegów czasowych sygnałów echa — zestawiono na rysunku 5. z wybranymi przekrojami dna w celu uwidocznienia odbić od granic poszczególnych warstw.



Rys. 4. Przebieg impulsu sondującego wykorzystany do obliczeń numerycznych

Źródło: opracowanie własne.



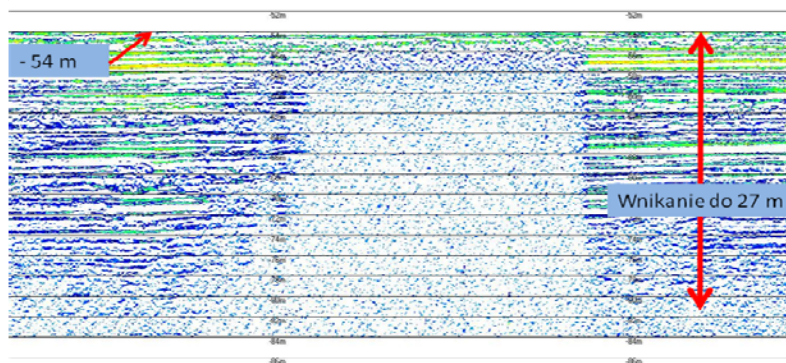
Rys. 5. Sygnały echa oraz sygnały wnikające w dno zestawione z odpowiadającymi im profilami geologicznymi

Źródło: opracowanie własne.

Sygnał echosondy parametrycznej wnika w dno morskie, przy czym na granicy warstw osadów o różnych impedancjach akustycznych część sygnału ulega odbiciu, a część wnika do kolejnej warstwy, odpowiednio do wartości tych impedancji.

Przedstawione wyniki obliczeń ilustrują wpływ rodzaju, grubości i ułożenia warstw dna morskiego na możliwości badania jego struktury za pomocą metod hydroakustycznych. Jeżeli różnice impedancji pomiędzy sąsiadującymi warstwami osadów są duże (np. ił — piasek), a tłumienie sygnału w warstwach wierzchnich stosunkowo niewielkie, wówczas impuls odbity od granicy sąsiadujących obszarów jest dostatecznie duży i może być łatwo wyodrębniony z rejestrowanego sygnału echa. Osady najbardziej gruboziarniste (żwir, piasek) charakteryzują się największymi współczynnikami tłumienia, będą więc ograniczały zasięg wnikania przez impulsy sondujące. Iły i muły tłumią fale akustyczne słabiej, pozwalając na obserwację głębiej położonych warstw osadów. Warstwy osadów złożone z frakcji o zbliżonych parametrach fizycznych (np. ily i drobny muł) słabo kontrastują ze sobą pod względem parametrów akustycznych i są trudno rozróżnialne w rejestrowanym sygnale echa.

Na podstawie przedstawionych powyżej spostrzeżeń dotyczących propagacji fal akustycznych w osadach dennych oraz opisu warunków geologicznych Zatoki Gdańskiej można oczekiwać, że największe głębokości penetracji dna podczas badań metodami hydroakustycznymi uzyska się w środkowej oraz wschodniej części zatoki, będącej strefą akumulacyjną najdrobniejszych frakcji osadów (muły, ily). Najmniejszego zasięgu wnikania wiązki akustycznej w dno należy się spodziewać w obszarach, gdzie wierzchnią warstwę stanowią żwiry i gruboziarniste piaski — głównie w przybrzeżnych strefach Zatoki Gdańskiej oraz pomiędzy Gdańskiem a Helem. Możliwości badania struktury w głębiej dna zależą silnie od różnicy impedancji pomiędzy sąsiadującymi ośrodkami oraz tłumienia warstw leżących powyżej.



Rys. 6. Obrazy akustyczne dna morskiego ilustrujące różne głębokości wnikania impulsu sondującego

Źródło: opracowanie własne.

W rejonie Zatoki Gdańskiej sąsiadują ze sobą bezpośrednio rejony o bardzo zróżnicowanym charakterze osadów, a zatem zupełnie odmiennych właściwościach akustycznych. Obrazy akustyczne otrzymane z echosondy parametrycznej (rys. 6.) przedstawiają omówione wyżej zmiany poziomu sygnału echa w funkcji odległości od przetwornika oraz zróżnicowanie możliwości penetracji dna na przykładzie danych zarejestrowanych podczas jednego z sondaży.

Echosonda daje jedynie informacje na temat opóźnień poszczególnych składowych sygnału echa. Skala odległości powstaje poprzez pomnożenie podstawy czasu przez podaną przez użytkownika prędkość propagacji fali akustycznej w wodzie. W rzeczywistości prędkość rozchodzenia się fal nie jest stała w całym analizowanym środowisku. Jak to powiedziano wyżej, w osadach dennych może ona znacznie różnić się od prędkości w wodzie. Procentowy błąd pomiaru grubości warstw różnych typów osadów dennych na podstawie echogramów przedstawiony został w tabeli 2.

Tabela 2. Względna różnica [%] grubości różnych warstw osadów wynikająca z założenia stałej prędkości propagacji w rozpatrywanym środowisku

Rodzaj osadu	Stosunek prędkości propagacji w osadzie do prędkości propagacji w wodzie	Procentowy błąd pomiaru grubości warstwy osadu na podstawie echogramu
Żwir drobny	1,338	25%
Piasek gruby	1,243	19%
Piasek drobny	1,118	10%
Pył średni	0,984	1,6%
II	0,98	2%

Źródło: opracowanie własne.

Podane względne prędkości propagacji fali akustycznej w osadach dennych wyznaczone zostały za pomocą wzorów empirycznych. Błąd popełniany przy ocenie grubości warstw dna morskiego na podstawie echogramu jest największy dla osadów gruboziarnistych, które charakteryzują się jednocześnie największym tłumieniem fali akustycznej.

Wyznaczenie rzeczywistej grubości warstw osadów dennych wymaga znajomości dwóch parametrów dla każdej z warstw — opóźnienia sygnału echa względem impulsu sondującego i prędkości propagacji fali w danym osadzie. Oszacowanie rzeczywistych odległości za pomocą metod hydroakustycznych wymaga zatem zastosowania złożonego sposobu analizy wyników pomiarów. W ocenie poszczególnych prędkości użyteczna będzie również intensywność odbicia od poszczególnych

warstw, gdyż współczynnik odbicia jest funkcją różnicy impedancji akustycznych warstw, a te zależą (obok gęstości objętościowej) od prędkości propagacji fal.

WNIOSKI

Przedstawione wyniki badań numerycznych i doświadczalnych wykazują, że bezpośrednia identyfikacja struktury dna morskiego z podaniem rodzaju warstw jest zagadnieniem złożonym, a same obrazy akustyczne nie dostarczają wystarczającej informacji. W tym celu należy uwzględnić wartości impedancji akustycznej poszczególnych materiałów dna, a następnie dokonać próby oszacowania prędkości rozchodzenia się fal w poszczególnych warstwach. To pozwoli na określenie grubości warstw poszczególnych osadów. Znając impedancję akustyczną i prędkość propagacji w warstwach, można oszacować gęstość warstw i na tej podstawie dokonać klasyfikacji struktury dna morskiego. Przedstawione wyniki badań stanowią pewien krok do rozwiązania tego zagadnienia.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Kozaczka E., Grelowska G., *Selected results of the parametric sounding of the Gdansk Bay*, 'Hydroacoustics', 2008, 105–112.
- [2] Kozaczka E., *Observation of sub-bottom sediment in the southern Baltic by means of nonlinear acoustics method*, ECUA 2008: 9th European Conference on Underwater Acoustics, proceedings, Vol. 2, Paris 2008.
- [3] Mojski J. E. i in., *Atlas geologiczny południowego Bałtyku*, Sopot — Warszawa 1995.
- [4] *SES-2000 Narrow-beam parametric sub-bottom profilers*, Innomar Technologie GmbH, Rostock 2008.
- [5] Sternlicht D. D., Moustier de Ch. P., *Time-dependent seafloor acoustic backscatter (10–100 kHz)*, 'Journal of Acoustical Society of America', 2003, 114(5).
- [6] Wunderlich J., Wendt G., *High-Resolution Echo-Sounding and Estimation of Sediment Properties using Nonlinear Acoustics*, EAGE, September 2004.

INVESTIGATION OF STRUCTURE OF BAY OF GDAŃSK BOTTOM WITH NON-LINEAR ACOUSTIC METHOD

ABSTRACT

The paper presents the results of experimental and simulation investigations, whose aim are to determine parameters of the sea bottom layered structure. The non-invasive sounding method employing SES-2000 parametric echo sounder was used to conduct empirical investigation. The investigations were conducted in the bay of Gdańsk. The results of the sounding were compared with the data obtained from the analyses of bore-holes made by specialized firms. Attention was paid to the factors responsible for the accuracy of measurement, especially to different speed values of propagation of the sounding wave dependent on the kind of bottom sediments.

Keywords:

sea bottom, parametric echo sounder, bottom sediment, non-linear acoustics, layered structure, bore-holes, sounding wave.