

Prof. dr hab. Jarosław Tęgowski
Instytut Oceanografii
Uniwersytet Gdański

POLITECHNIKA GDAŃSKA
WYDZIAŁ OCEANOTECHNIKI I OKRĘTOWNICTWA
Wpłynęło dnia 17.05.2019
l. dz. 188

Gdynia, 17.05.2019 r.

Recenzja

rozprawy doktorskiej mgr inż. Wojciecha Szymczaka pt.:

AKUSTYCZNE ZOBRAZOWANIE MORSKICH OSADÓW DENNYCH

1. Informacja ogólna o przedmiocie i celu badań

Dno morskie stanowi ok. 71% powierzchni naszej planety a stopień jego rozpoznania jest dotychczas niewielki i dotyczy on głównie stref szelfowych o relatywnie niedużych głębokościach. Trudności napotykane w badaniach głębin morskich są porównywane do trudności w badaniach prowadzonych w kosmosie. Silna absorpcja fal elektromagnetycznych w wodzie morskiej powoduje małą przenikalność światła ograniczając zasięg strefy eufotycznej do kilkudziesięciu metrów w oceanach i do 25-30 metrów w Bałtyku. Tam, gdzie ośrodek jest nieprzenikliwy dla światła, np. w wodzie wypełnionej zawiesinami i planktonem, dobrze są propagowane fale akustyczne, których zastosowanie w badaniach morza od kilkudziesięciu lat znacznie przyczyniło się do jego poznania.

Wiedza o dnie jest potrzebna między innymi w badaniach geologicznych i geofizycznych prowadzonych w celu poszukiwania minerałów, badaniach procesów zachodzących w skorupie ziemskiej, geotechnicznym rozpoznaniu dna przed posadowieniem konstrukcji hydrotechnicznych, położeniem kabli i rurociągów, w archeologii podwodnej, identyfikacji i szacowaniu zasobów biologicznych a także w działaniach militarnych prowadzonych na morzu.

Szczególną rolę w badaniach morza odgrywają metody czynne akustyki przydatne w pomiarach procesów fizycznych, identyfikacji obiektów pływających w toni wodnej a także w poznawaniu powierzchni dna i jego struktury warstwowej z dużą rozdzielczością przestrzenną i czasową. Trwający od ponad trzydziestu lat szybki rozwój technik cyfrowych spowodował znaczący postęp w rejestracji i przetwarzaniu informacji gromadzonych przy użyciu tzw. metod bezinwazyjnego badania dna będących między innymi przedmiotem recenzowanej dysertacji.

Przedstawiona do recenzji rozprawa porusza ważne problemy dotyczące badania dna morskiego a w szczególności zastosowania metod akustyki nieliniowej – echosondy parametrycznej do charakterystyki jego powierzchni i struktury warstwowej oraz obiektów zagrzebanych w dnie. Innym bardzo ważnym aspektem jest zastosowanie akustyki nieliniowej do poszukiwania gazu w wierzchniej warstwie osadów morskich. Wiedza na ten temat, a zwłaszcza na temat występowania metanu pod dnem morskim jest konieczna do oszacowania bilansu gazów cieplarnianych zagrażających rozwojowi naszej cywilizacji.

Można przyjąć, że tezą pracy jest stwierdzenie, że „metody akustyczne dają możliwość bezinwazyjnej klasyfikacji osadów dennych. Hipoteza zakłada ścisły związek pomiędzy wynikami symulacji górnej warstwy struktury osadów dennych w oparciu o informację geologiczną (zebrane próbki osadów dennych), wynikami pozyskanymi podczas badań laboratoryjnych oraz pomiarami w warunkach rzeczywistych.” Dla udowodnienia postawionej tezy autor przeprowadził: (i) analizy teoretyczne dotyczące propagacji fal akustycznych w wodzie morskiej, na granicy pomiędzy wodą i dnem oraz w wierzchniej warstwie osadów; (ii) eksperymenty w warunkach laboratoryjnych służące do oceny parametrów akustycznych różnego rodzaju osadów dennych; (iii) pomiary hydroakustyczne w akwenach morskich z użyciem echosond parametrycznej i wielowiązkowej oraz sonaru bocznego; (iv) stworzenie oprogramowania służącego do analizy rejestracji hydroakustycznych; (v) akustyczną klasyfikację osadów dennych wybranych rejonów Zatoki Gdańskiej na podstawie zarejestrowanych sygnałów hydroakustycznych i za pomocą skonstruowanego przez autora oprogramowania.

Praca powstała w oparciu o obszerny materiał pomiarowy zgromadzony przez mgr. inż. Szymczaka podczas badań laboratoryjnych w basenie wydziału Oceanotechniki i Okrętownictwa Politechniki Gdańskiej oraz podczas rejsów badawczych głównie na akwencie Zatoki Gdańskiej prowadzonych z pokładów s/y Windspell i s/y Freija - jachtów wyposażonych w laboratoria hydroakustyczne. Obydwie jednostki miały możliwość prowadzenie badań dna z wykorzystaniem echosondy parametrycznej, echosondy wielowiązkowej oraz sonaru bocznego a także posiadały nawigację podwodną. Także z pokładów wymienionych jednostek pobierano próbki dna i nurkowano w celu robienia zdjęć podwodnych badanych obiektów.

Praca doktorska pana mgr. inż. Wojciecha Szymczaka składa się z 8 rozdziałów, posiada „Wykaz ważniejszych oznaczeń” pomocny w studiowaniu dysertacji i obejmuje 201 stron. Autor powołał się w pracy na 115 pozycji bibliograficznych, z czego 5 pozycji jest jego współautorstwa. W rozprawie umieszczono 9 tabel i 184 rysunki (wykresy, mapy, echogramy, zdjęcia). Bardzo dobrze oceniam poziom graficzny schematów, rysunków poglądowych, map, zobrazowań akustycznych dna i wykresów, natomiast liczne błędy w numeracji rysunków polegające na rozbieżnościach pomiędzy odwołaniami do rysunków zawartymi w tekście a numerami w ich oznaczeniach wpływają na brak przejrzystości pracy.

Dysertacja jest napisana poprawnym językiem, zauważyłem w niej jednak nieliczne błędy składniowe i interpunkcyjne oraz brak streszczenia w języku angielskim,

Układ dysertacji jest prawidłowy. W jej wstępie przedstawiono cel pracy i motywację do prowadzenia badań. W rozdziale 2 omówiono ogólnie metody hydroakustyczne stosowane w badaniach podwodnych a zwłaszcza w badaniach dna morskiego. Rozdział 3 szeroko omawia podstawy akustyki nieliniowej i jej wykorzystanie do budowy parametrycznych źródeł fal akustycznych. Jest to dosyć ważny rozdział w kontekście analizy sygnałów zarejestrowanych przez echosondę parametryczną zastosowaną do pomiarów struktur warstwowych dna morskiego. Uważam, że ten rozdział teoretyczny jest opracowany bardzo solidnie a przedstawione obliczenia, oszacowania i zależności świadczą o dogłębnym przestudiowaniu tego tematu przez autora.

Następny rozdział (4) jest poświęcony teoretycznym podstawom fizyki odbicia, rozpraszania i tłumienia dźwięku na pofałdowanym i uwarstwionym dnie a także zawiera omówienie geofizycznych właściwości dna morskiego. Omawiane w tym rozdziale zagadnienia są głównie odnoszone do sygnałów emitowanych przez echosondę parametryczną. Opis teorii odbicia fali płaskiej od warstwowej struktury dna jest wykonany poprawnie, natomiast wiele do życzenia zostawia opis rozpraszanie fal akustycznych na nierównym dnie. Szczegółowe uwagi na temat tego zagadnienia zostaną zawarte w dalszej części recenzji.

Główne rezultaty pracy będące oryginalnym dorobkiem autora są zawarte w rozdziałach 5, 6 i 7, gdzie przedstawiono metodykę pomiarów w warunkach laboratoryjnych oraz morskich, analizę i interpretację wyników badań oraz metodę klasyfikacji akustycznej osadów dennych na podstawie zarejestrowanych sygnałów. Zostały tutaj szeroko omówione metody i procedury kalibracyjne zastosowane do użytych w pomiarach echosond i sonaru bocznego. Kalibracje przeprowadzono zarówno w basenie pomiarowym jak i w morzu. Rozdział 5 jest najobszerniejszym objętościowo rozdziałem dysertacji, zawierającym bardzo cenne informacje na temat geometrii propagowanych przez echosondę parametryczną sygnałów akustycznych, zmiany ich parametrów w czasie i przestrzeni a także niezwykle cenne wyniki doświadczeń laboratoryjnych odbicia i transmisji sygnałów padających na próbki osadów pobranych z dna Zatoki Gdańskiej. W rozdziale 6 autor przedstawił wyniki badań hydroakustycznych prowadzonych w morzu przeprowadzając ich analizę i interpretację. Są tutaj liczne przykłady odwzorowań akustycznych dna zarejestrowanych echosondą parametryczną, wielowiązkową i sonarem bocznym. Oprócz typowych przykładów rejestracji powierzchni dna i jego struktur warstwowych są przedstawione także zobrazowania obszarów zawierających gaz w postaci pęcherzyków zalegających w górnej warstwie osadów oraz wraki leżące na dnie. Rozdział 7 zawiera omówienie stworzonej przez autora metody akustycznej klasyfikacji osadów dennych, gdzie parametry echa sygnałów akustycznych użytych w pomiarach są zbiorem wejściowym do algorytmu sieci neuronowych. Zweryfikowana 95% skuteczność metody świadczy o prawidłowym zaprojektowaniu systemu klasyfikacyjnego. W rozdziale 8 nazwanym przez autora

Zakończenie, podsumował on wyniki swoich badań podkreślając samodzielne i nowatorskie dokonania naukowe przedstawione w dysertacji.

2. Ocena celów badawczych

Główny cel badawczy pracy polegający na weryfikacji tezy, że metody akustyczne dają możliwość bezinwazyjnej klasyfikacji osadów dennych, został przez autora dysertacji osiągnięty. Pan mgr inż. Wojciech Szymczak podjął się śmiałego wyzwania zbudowania systemu rejestracji, przetwarzania i analizy danych hydroakustycznych zarejestrowanych między innym przez źródło stosujące nieliniowe oddziaływanie fal akustycznych – echosondę parametryczną.

Za najważniejsze samodzielne osiągnięcie naukowe spośród wymienionych w rozprawie należy uznać następujące:

- budowę pomiarowego stanowiska laboratoryjnego oraz wykonanie badań w basenie badawczym Wydziału Oceanotechniki i Okrętownictwa. Autor przedstawił wyniki badań prowadzonych przez siebie na basenie modelowym Politechniki Gdańskiej mające na celu wyznaczenie charakterystyk pracy echosondy parametrycznej takich jak charakterystyki kierunkowe, analiza wpływu nastaw echosondy na rejestrowane echa, informacje o kształtowaniu się impulsów pomiarowych niskiej oraz wysokiej częstotliwości oraz przeprowadził doświadczalną analizę akustycznych, nieliniowych oddziaływań w ośrodku wodnym. Analiza akustycznych wyników badań osadów dennych umieszczonych w specjalnie przygotowanych pojemnikach umożliwiła podjęcie próby akustycznej klasyfikacji osadów oraz korelacji wyników badań laboratoryjnych z danymi zarejestrowanymi podczas pomiarów w warunkach rzeczywistych.
- budowę i kalibrację systemu pomiarowego oraz wykonanie badań morskich na akwenu południowego Bałtyku. Autor przygotował do pomiarów małą jednostkę pływającą, na której zestawiono pełne stanowisko laboratoryjne. Przedstawił dane akustyczne zarejestrowane podczas prowadzonych sesji pomiarowych. Ze względu na zróżnicowanie metod pomiarowych zostały one podzielone na wyniki prezentujące strukturę geologiczną osadów dennych wyznaczoną między innymi wzdłuż serii punktów, w których pobierane były rdzenie osadów. Umożliwiło to porównanie wyników otrzymanych z echosondy parametrycznej z danymi rzeczywistymi i wykazanie korelacji w otrzymanych zobrażeniach. Autor przeprowadził analizę zjawiska związanego z nagłą zmianą głębokości akustycznej penetracji osadów dennych, gdzie jest prawdopodobne występowanie w osadach pęcherzyków gazowych pochodzących z rozkładu materii organicznej. Wyniki poddano analizie, porównano z mapą zagrożeń chemicznych oraz wyeliminowano błędy wynikające z wadliwej pracy urządzenia echolokacyjnego poprzez wykonanie serii równoległych pomiarów nad interesującym obszarem dna wykazując powtarzalności w otrzymywanych wynikach. Dodatkowo podjęto próbę wyznaczenia współczynnika tłumienia oraz prędkości dźwięku w osadach dennych zawierających pęcherzyki gazowe na podstawie modeli przy założeniach stałej oraz zmiennej średnicy pęcherzyków przy stałej oraz zróżnicowanej ich koncentracji.

Ostatnim zestawem wyników były rejestracje akustyczne zalegających na dnie wraków oraz innych obiektów wraz z określeniu możliwości detekcji przy użyciu echosondy parametrycznej, obiektów zakopanych pod powierzchnią dna.

- autor przeprowadził poprawną analizę i syntezę otrzymanych zobrazowań akustycznych dna morskiego i wykazał, że zastosowanie metod akustyki nieliniowej do badania dna morskiego umożliwia precyzyjne rozpoznawanie obiektów zagrzebanych w dnie i pomiary własności geoakustycznych warstwy osadu zawierającej pęcherzyki gazowe.

- Pan mgr inż. Wojciech Szymczak podjął próbę akustycznej klasyfikacji wierzchniej warstwy osadów dennych opracowując autorską metodę parametryzacji sygnałów echa zarejestrowanych przez trzy urządzenia echolokacyjne: echosondę parametryczną, sonar boczny oraz echosondę wielowiązkową. Parametry sygnałów echa były zbiorem wejściowym do algorytmu sieci neuronowych. W wyniku klasyfikacji rozpoznano trzy główne typy osadów dennych występujących w akwenie Zatoki Gdańskiej z wiarygodnością 95%.

- autor udowodnił, że informacje na temat osadów dennych dostarczane przez nieliniowy system echosondy parametrycznej poszerzają znacznie nasze możliwości szybkiego, bezinwazyjnego monitorowania dużych obszarów dna morskiego.

3. Uwagi polemiczne i krytyczne (część mniej istotnych uwag zaznaczyłem w tekście dysertacji przedłożonym do recenzji)

Chociaż merytorycznie dysertację oceniam wysoko, to jednak znalazłem w niej pewne nieścisłości i niedociągnięcia. Ważniejsze według mnie uwagi zawarłem poniżej:

1. Str. 8 – we wstępie autor wymienia urządzenia do badania górnych warstw osadów dennych zapominając wymienić ważną klasę urządzeń nazywanych subbottom profilerami. Emitowane przez nie sygnały świergotowe umożliwiają penetrację osadów ze stosunkowo dużą rozdzielczością wgłębną. Ciekawe byłoby porównanie możliwości takich urządzeń z możliwościami echosondy parametrycznej, ponieważ funkcjonalnie są one do siebie podobne.
2. Str. 11 – w przeglądzie metod akustycznych badania dna zabrakło takich urządzeń jak subbottom profiler, boomer, sparker, air gun, water gun i źródła wybuchowe.
3. Str. 41-42 – autor bardzo pobieżnie opisał zagadnienie rozpraszania fali akustycznej na nierównej powierzchni dna. Analizując akustyczne pole fali rozproszonej w zależności od długości fali padającej i nierówności powierzchni dna nie przytoczył parametru Rayleigha wiążącego długość fali padającej, kąt jej padania i odchylenie standardowe nierównej powierzchni z polem rozproszonym. Wartość parametru Rayleigha informuje, czy pole jest koherentne, czy dyfuzyjne, czy przybiera formę pośrednią. Przedstawione na rysunku 4.13 schematy rozpraszania są nieprzekonywujące.
4. Str. 43 – autor pisze, że „Jedną z trudności sprawdzania wyników modeli dla wysokich częstotliwości do 300 kHz była ograniczona możliwość określania nierówności dna z

dokładnością do cm. Rozwój dwuwymiarowej cyfrowej fotogrametrii oraz trójwymiarowej tomografii na bazie fal rentgenowskich umożliwił walidację wyników symulacji z pomiarami realizowanymi w warunkach rzeczywistych.” W chwili obecnej używa się standardowo skaningu laserowego dna do budowy jego modelu topograficznego z rozdzielczością rzędu 1 mm.

5. Str. 46 – na rysunku 4-18 autor przedstawił wynik modelowania siły rozpraszania wstecznego nazywanej przez niego niepoprawnie „siłą rozpraszania” w zależności od kąta padania wiązki na dno na podstawie modelu APL-UW High Frequency Ocean Acoustic Models Handbook, APL-UW TR9407 1994. Autor wykonał obliczenia siły rozpraszania wstecznego dla częstotliwości 30 kHz, 100 kHz, 200 kHz i 400 kHz. Nie wiem na jakiej podstawie dokonano obliczeń i przedstawiono ich wyniki, ponieważ stosowność przytoczonego modelu jest w granicach częstotliwości od 10 kHz do 100 kHz. Przedstawiony na rysunku 4-18 wynik jest niepoprawny.
6. Str. 47 – autor pisze odnosząc się do rysunku 4-18 „Analizując powyższy wykres, można stwierdzić, że ta sama powierzchnia będzie gładka dla 30 kHz, z silnym echem dla kąta padania 0° - 10° oraz mocno rozproszonym echem dla kątów padania $10^{\circ}/20^{\circ}$ - 60° stopni (dominujące w tym przypadku jest rozpraszanie objętościowe).” Taka interpretacja nie jest prawdziwa. Dla kątów padania zbliżonych do pionowego mamy do czynienia z dużą składową dyfuzyjną – powierzchnia jest „pofałdowana”, natomiast dla dużych kątów padania i tej samej fali zwiększa się znacznie udział składowej koherentnej w polu rozproszonym i powierzchnię możemy uważać za płaską. Wynika to z analizy parametru Rayleigha.
7. Str. 51 - rysunek 4-21. Autor zaznaczył na rysunku przedstawiającym poziom echa, jego części pochodzące od rozpraszania powierzchniowego i objętościowego sugerując, że rozpraszanie objętościowe jest zawarte w ogonie rewerberacyjnym impulsu echa. Jest to według mnie błędna interpretacja, ponieważ składowa rozpraszania objętościowego pojawia się w chwili początku penetracji osadu przez impuls sondujący.
8. Str. 55 – Rysunek 4-25. autor podzielił właściwości geofizyczne osadów na właściwości fizyczne i geoakustyczne. Uważam, że właściwości geoakustyczne też są właściwościami fizycznymi i taki podział jest nieuprawniony.
9. Str. 55 – wzór 4.30 przedstawiający średnicę ziaren osadu w logarytmicznej skali ϕ . Występująca we wzorze średnica ziarna d powinna być podzielona przez średnicę odniesienia $d_0=1$ mm.
10. Str. 59. W tabeli 4-1 nie podano jednostek współczynnika tłumienia i prędkości dźwięku.
11. Str. 63. Autor przytacza funkcję TVG. W języku polskim jest to Zasięgowa Regulacja Wzmocnienia – ZRW.
12. Str. 67. Opisując procedury kalibracyjne echosondy wielowiązkowej autor nie wspominał o podstawowej procedurze polegającej na pomiarach płynącej w dół

podwodnego stoku i w jego górę. Porównanie i nałożenie na siebie dwóch zapisów umożliwia korekcję nastaw echosondy.

13. Wzory w tekście są przedstawiane bez zachowania zasad interpunkcji oraz są pisane czcionkami o różnych wielkościach. Wiele rysunków przytaczanych w tekście ma inną numerację niż widniejąca w ich podpisach. Rysunek 6-33 nie ma swojego odniesienia w tekście.
14. Na rysunku 7-13 autor przedstawił wynik akustycznej klasyfikacji osadów podając, że „trzy kolory kwadratów określają trzy typy osadów jakie występują w akwencie pomiarowym”. Nie podał natomiast, jakie to są osady.

4. Ocena końcowa

Pomimo uwag krytycznych uważam, że przedstawiona do recenzji praca nie zawiera istotnych błędów merytorycznych. Postawione cele dotyczące zagadnień o dużym znaczeniu poznawczym i praktycznym zostały w pełni osiągnięte z wykorzystaniem właściwych metod badawczych. Recenzowana rozprawa mgr inż. Wojciecha Szymczaka wnosi wartościowy wkład w rozwój nowych metod wykorzystania hydroakustyki w badaniach środowiska morskiego a zwłaszcza wykorzystania metod akustyki nieliniowej do eksploracji dna i spełnia wszelkie warunki stawiane rozprawom doktorskim.

Reasumując stwierdzam, że wszystkie postawione cele pracy zostały w pełni osiągnięte i w świetle obowiązujących przepisów praca mgr. inż. Wojciecha Szymczaka spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim i stawiam wniosek do Rady Naukowej Wydziału Oceanotechniki i Okrętownictwa Politechniki Gdańskiej o jej dopuszczenie do kolejnych etapów przewodu doktorskiego i publicznej obrony.

