

*Wojciech Maleika**, *Michał Palczyński**

WPŁYW SZEROKOŚCI WIĄZKI ECHOSONDY WIELOWIĄZKOWEJ NA DOKŁADNOŚĆ UZYSKANYCH MODELI DNA

1. Wprowadzenie

Wykorzystanie akwenów wodnych, zarówno związane z transportem, jak i eksploracją dna i zasobów pod dnem, wymaga szczegółowej wiedzy na temat głębokości. Coraz częściej informacja ta jest wizualizowana i przetwarzana za pomocą narzędzi komputerowych, dzięki czemu możliwe jest przeprowadzenie głębszych i bardziej wszechstronnych analiz. W przeciwieństwie do obszarów lądowych, gdzie metody geodezyjne czy globalne systemy pozycjonowania pozwalają określić wysokość każdego punktu z dużą dokładnością, pomiar głębokości wciąż nie jest dziś ani dokładny ani tani, w dodatku na wielu akwenach szybko traci aktualność z uwagi na ciągle zmiany rzeźby dna. Optymalizacja procesu pozyskiwania danych batymetrycznych ze względu na dokładność i koszty ma więc dużą wartość gospodarczą.

Obecnie jedną z najbardziej wydajnych i najdokładniejszych metod pomiaru głębokości jest sondaż z użyciem echosondy wielowiązkowej, który pozwala uzyskać duży zbiór punktów sondażowych pokrywający pas dna wzdłuż tzw. profilu, czyli trasy przebytej przez jednostkę hydrograficzną. Punkty ułożone są w linie, zwane dalej liniami pomiarowymi. Pomiar całego akwenu zwykle wymaga rejestracji wielu profili, planowanych jako zbiór linii prostych, których układ zależy od kształtu akwenu. Ostateczny rozkład punktów zależy od kształtu dna, ale także od parametrów echosondy, np. liczby i kąta rozwarcia wiązek, częstotliwości pomiaru oraz parametrów sondażu, takich jak prędkość jednostki czy układ profili.

Rejestracja akwenu za pomocą echosondy wielowiązkowej z reguły prowadzi do zgromadzenia bardzo dużej liczby punktów, które charakteryzują się nieregularnym rozkładem przestrzennym. Dane te są dalej przetwarzane do bardziej uporządkowanych struktur danych, jakimi są modele TIN (nieregularna siatka trójkątów) oraz GRID (regularna siatka kwadratów), zwane cyfrowymi modelami dna (DTM). Metody modelowania GRID na podstawie danych pochodzących z sondy wielowiązkowej można znaleźć w pracach [2, 3, 5, 13].

* Wydział Informatyki, Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie

W artykule przedstawiono analizę czynników wpływających na dokładność DTM oraz wyniki szczegółowych badań wpływu szerokości wiązki w echosondzie wielowiązkowej na dokładność tworzonych modeli GRID.

2. Istota dokładności w modelowaniu dna morskiego

Najważniejszym parametrem w procesie modelowania dna morskiego jest jego dokładność, rozumiana jako różnica głębokości pomiędzy każdym z punktów w utworzonym modelu a głębokością rzeczywistą w tym miejscu. Całość prac sondażowych powinna być wykonana w taki sposób, aby możliwe było oszacowanie wartości tego błędu, czyli aby możliwe było określenie dokładności stworzonego modelu dna.

Konieczność oszacowania błędu całkowitego tworzonych modeli wynika z wymogu zachowania wysokiej wiarygodności map, a maksymalne dopuszczalne wartości błędów określone są przez przepisy Międzynarodowej Organizacji Hydrograficznej (IHO) [6].

Istotnym problemem w procesie wykonywania prac sondażowych jest brak możliwości precyzyjnego oszacowania dokładności modelowania. Wynika to z faktu, iż nie znamy faktycznego ukształtowania mierzonej powierzchni dna, a co za tym idzie nie możemy porównać stworzonego modelu do powierzchni pierwotnej. W praktyce, określanie dokładności modelowania sprowadza się zazwyczaj do oszacowania, a następnie zsumowaniu błędów, które powstają w poszczególnych etapach modelowania. Przyjmuje się najczęściej (upraszczając), iż błąd głębokości odpowiada dokładności pomiarowej urządzenia, która podawana jest przez jego producenta. Często pomijane są pozostałe składowe zakładając, że są na tyle małe, iż nie mają istotnego wpływu na błąd całkowity.

Można przyjąć, że w obecnych czasach, tam gdzie oczekiwana jest najwyższa dokładność, w pracach sondażowych do pobierania danych wykorzystywane są nowoczesne sondy wielowiązkowe, a model dna oparty jest na jednorodnej siatce kwadratów zwanej GRID.

W ramach szerokich badań prowadzonych przez autorów, dokonywana jest analiza błędów powstających w różnych etapach prac sondażowych. W tym celu został stworzony symulator echosondy wielowiązkowej [8, 9], dokonano analizy danych i szacowania błędów otrzymywanych z echosondy wielowiązkowej Simrad EM-3000 [10], badano różne metody tworzenia struktury GRID na podstawie danych pomiarowych i powstających w tym procesie błędów.

W niniejszej pracy dokonano sprawdzenia jaki wpływ na dokładność końcowego modelu ma szerokość wiązki echosondy wielowiązkowej. Oczywisty jest fakt, iż pomiary wykonane z wykorzystaniem szerszej wiązki są tańsze (mniejsza liczba profili, krótszy czas pomiarów), lecz mogą mieć wpływ na pogorszenie dokładności tworzonych modeli z powodu posiadania mniejszej liczby punktów pomiarowych. Znalezienie rozwiązania optymalnego (wysoka dokładność przy skróceniu czasu sondażu) staje się więc pożądane.

W dostępnych publikacjach naukowych nie znaleziono żadnych prac które badałyby wpływ szerokości rozwarcia wiązek w echosondzie wielowiązkowej na dokładność tworzonych modeli powierzchni dna.

3. Badanie wpływu szerokości wiązki na dokładność DTM

W przypadku powszechnie używanej w pracach sondażowych echosondy wielowiązkowej, co pewien okres czasu następuje zapisanie około 120 pojedynczych pomiarów leżących na linii pomiarowej prostopadłej do kierunku płynięcia statku (na przykładzie echosondy Simrad EM3000). Długość owej linii zależna jest od szerokości pojedynczej wiązki. Ta zazwyczaj wynosi około 100° , lecz producenci umożliwiają często jej regulację w pewnym zakresie (w przypadku wykorzystania dwóch głowic nawet do 150°). Zwiększenie kąta wiązki przy zachowaniu tej samej liczby pojedynczych promieni spowoduje, że odległości pomiędzy sąsiednimi pomiarami będą większe. Efekt ten rośnie wykładniczo na krańcach wiązki. Wiadomo także, że wraz ze wzrostem kąta rozwarcia wiązki oraz wraz ze wzrostem głębokości rośnie poziom zakłóceń, co ma wpływ na dokładność tworzonych modeli [12].

Innym argumentem za wykorzystywaniem „szerokich wiązek” jest fakt, że jeden profil pomiarowy obejmuje większy obszar, zatem do wykonania pomiarów na danym akwencie potrzebujemy mniejszej liczby profili, co z kolei przekłada się na niższe koszty prac sondażowych. Oczywiście zatem jest, że szerokość wiązki ma istotny wpływ na liczbę i rozkład punktów pomiarowych oraz koszty prac sondażowych.

3.1. Metodyka badań

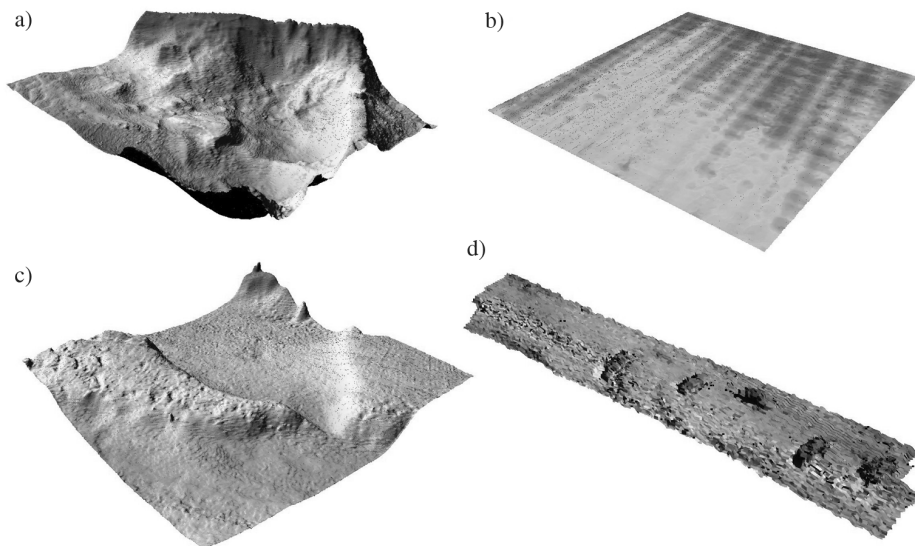
Aby możliwe było badanie wpływu różnych parametrów sondażu na dokładność tworzonych modeli, autorzy wykorzystują powierzchnie testowe o wysokiej rozdzielczości (grid $0,1 \times 0,1$ m) oraz symulator echosondy wielowiązkowej, który wykonuje wirtualne pomiary. Na podstawie tak pozyskanych danych tworzone są różne modele powierzchni (dla różnych parametrów wejściowych). Dzięki takiemu podejściu możliwe jest zarówno ilościowe, jak i jakościowe porównanie otrzymanej powierzchni w stosunku do powierzchni wzorcowej, a co za tym idzie szacowanie błędów powstałych na etapie modelowania struktury GRID [11].

3.2. Powierzchnie wzorcowe

Badania przeprowadzono z wykorzystaniem czterech powierzchni testowych uzyskanych na podstawie rzeczywistych danych pomiarowych zebranych przez jednostki Urzędu Morskiego w Szczecinie na obszarze kanału Piastowskiego oraz zatoki Pomorskiej (rys. 1).

Powierzchnie te posiadają różnorodne ukształtowanie dna:

- brama — znaczne zmiany głębokości charakteryzujące się łagodnością form;
- kotwicowisko — dno płaskie, nie posiadające gwałtownych zmian głębokości;
- obrotnica — powierzchnia urozmaicona, z gwałtownymi uskokami głębokości oraz nietypowymi formami powstałymi w wyniku prac czerpanych;
- wraki — powierzchnia, na której znajdują się wraki samochodów, przykład powierzchni z niewielkimi, nietypowymi obiektami.



Rys. 1. Powierzchnie testowe:
brama (a), kotwiczowisko (b), obrotnica (c), wraki (d)

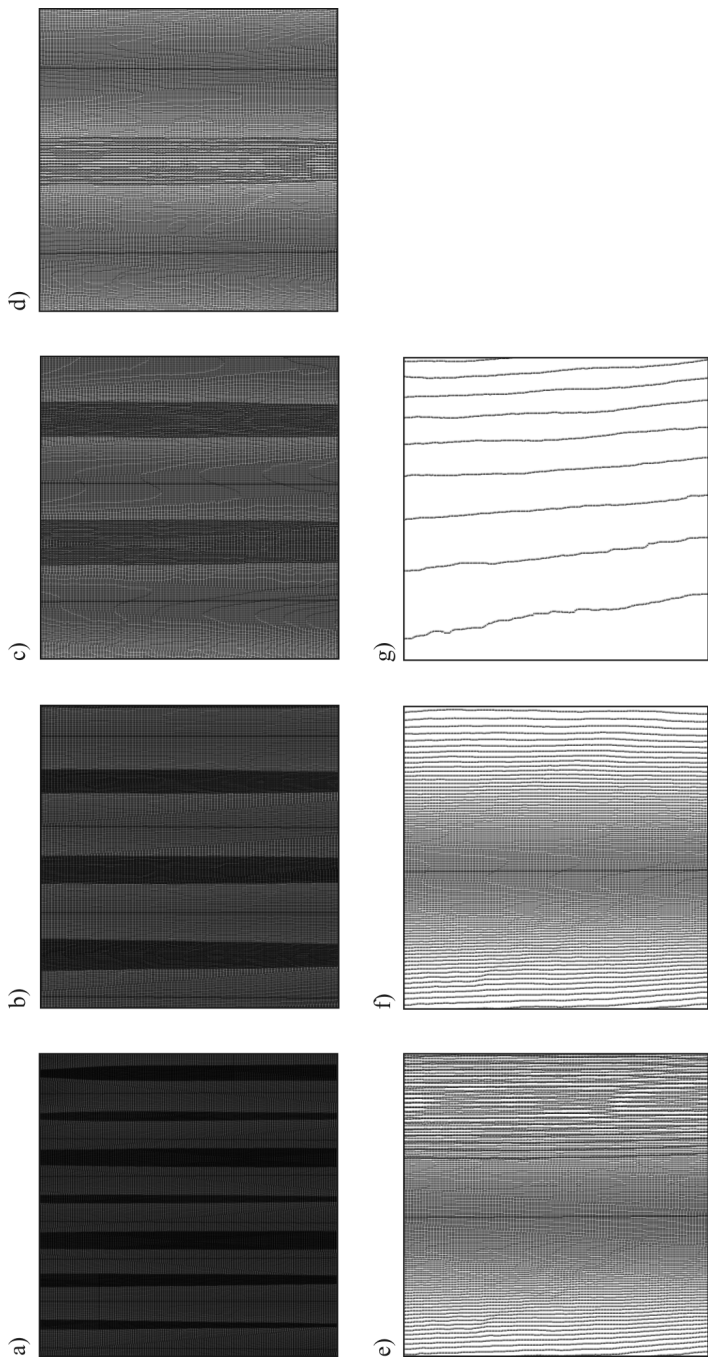
Każda stworzona powierzchnia wzorcowa zapisana jest w strukturze GRID o rozmiarze $0,1 \times 0,1$ metra i obejmuje obszar 200×200 metrów. Powierzchnie o takich parametrach można określić jako powierzchnie o wysokiej rozdzielczości.

3.3. Procedura testowa

Do wyznaczenia danych źródłowych, na podstawie których tworzono modele powierzchni, wykorzystano symulator sondy wielowiązkowej stworzony na Wydziale Informatyki ZUT [8, 9]. Jego działanie polega na symulacji ruchu jednostki pomiarowej oraz sondy wielowiązkowej, co sprowadza się do pobierania punktów pomiarowych (x, y, z) na bazie wskazanej powierzchni wzorcowej przy uwzględnieniu parametrów ruchu jednostki i charakterystyki działania urządzenia pomiarowego. Rysunek 2 prezentuje rozkład punktów pomiarowych dla powierzchni obrotnica przy różnych szerokościach wiązki.

W wyniku badań wykonano 28 wirtualnych sondaży morskich z następującymi parametrami pracy symulatora:

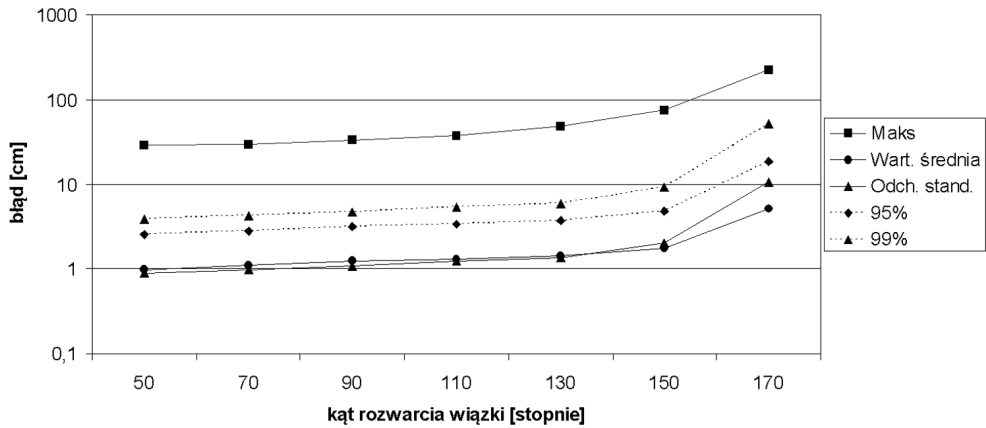
- prędkość jednostki: 5 węzłów,
- liczba wiązek: 127,
- szerokość wiązek: 50, 70, 90, 110, 130, 150, 170 stopni,
- częstość próbkowania: 10 Hz,
- układ profili: pionowe, zachodzące,
- metoda interpolacji przy tworzeniu struktury GRID: kriging,
- 4 powierzchnie testowe.



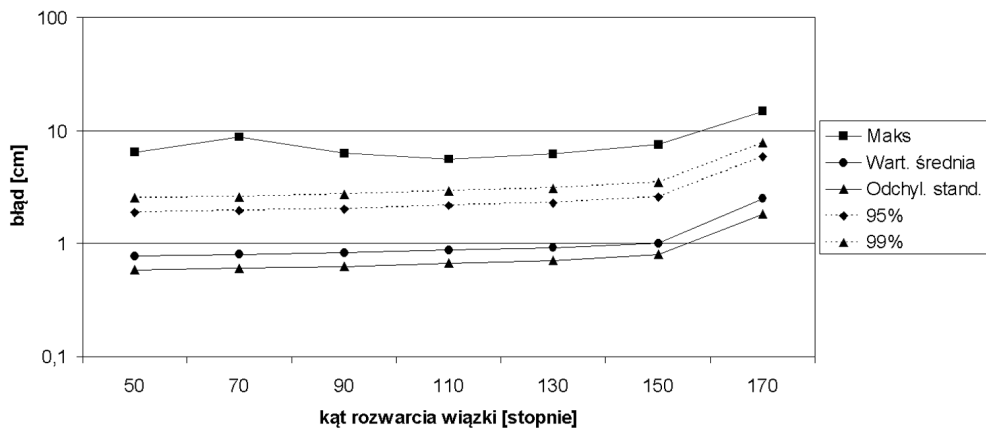
Rys. 2. Rozkład punktów pomiarowych dla różnych szerokości wiązki pomiarowej (fragment powierzchni obrotowej): 50 stopni (a), 70 stopni (b), 90 stopni (c), 110 stopni (d), 130 stopni (e), 150 stopni (f) oraz 170 stopni (g)

Uzyskane powierzchnie porównano z powierzchniami wzorcowymi. W ten sposób wyznaczono macierze opisujące błędy powstające w procesie pobierania danych i ich modelowania. Analiza otrzymanych wyników polegała na wyznaczeniu błędu maksymalnego, błędu średniego, odchylenia standardowego, oraz wartości błędów przy poziomie ufności 95% oraz 99%.

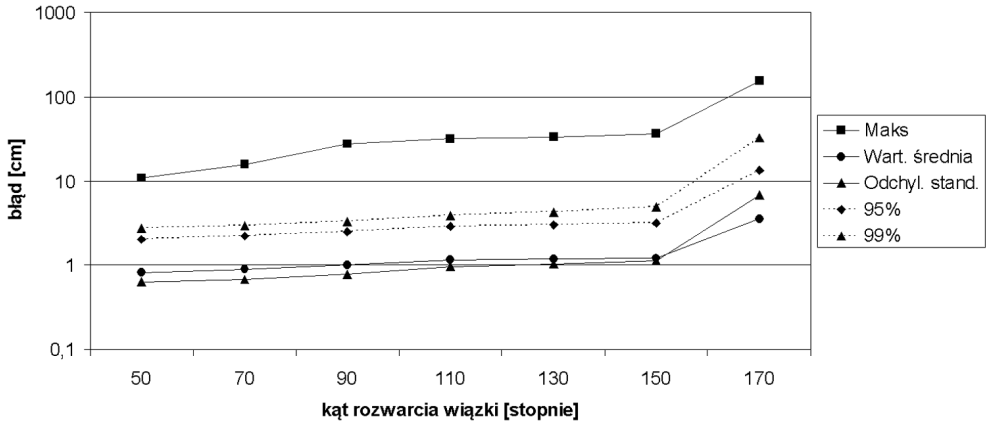
Niezależne wyniki otrzymano dla każdej z badanej powierzchni testowych. Rysunki 3–6 prezentują otrzymane wyniki odpowiednio dla powierzchni brama, kotwiczowisko, obrotnica, wraki.



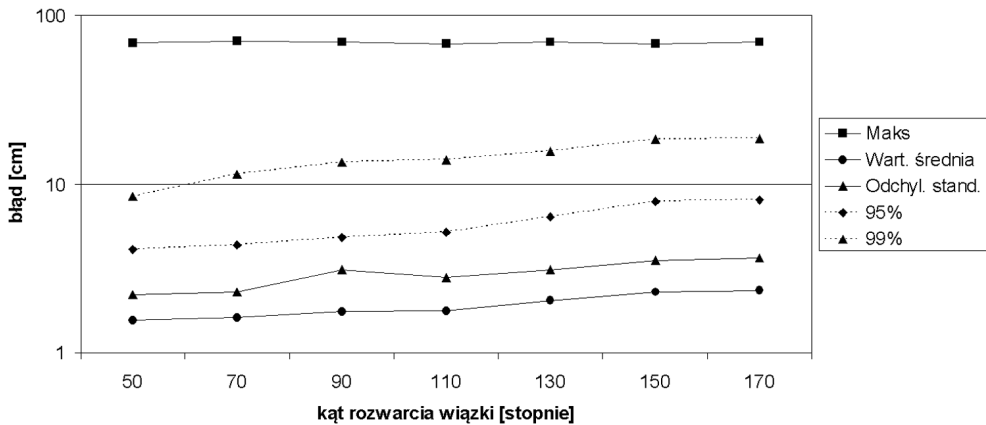
Rys. 3. Wyniki uzyskane dla powierzchni brama



Rys. 4. Wyniki uzyskane dla powierzchni kotwiczowisko



Rys. 5. Wyniki uzyskane dla powierzchni obrotowa



Rys. 6. Wyniki uzyskane dla powierzchni wraży

3.4. Wyniki

Na podstawie przeprowadzonej analizy można stwierdzić:

- błąd maksymalny w niewielkim stopniu zależy od szerokości wiązki echosondy przy której dokonuje się pomiaru i choć widać tendencje wzrostu błędu wraz ze wzrostem wartości kąta, to nie jest to zjawisko powtarzalne;
- wraz ze wzrostem szerokości wiązki rośnie wartość błędu średniego. Uogólniając można przyjąć, że do pewnych wartości (ok. 150°) jest to zależność liniowa. Wartości błędu rośnie powoli, przykładowo wzrost szerokości wiązki z 50° do 150° generuje wzrost błędu średniego o około 50%;

- błąd średniokwadratowy (MSE), również cechuje się niewielkim liniowym wzrostem wraz ze wzrostem szerokości wiązki pomiarowej;
- dla kątów wiązki mniejszych niż 150° przy poziomie ufności równym 95% błąd kształtuje się na poziomie 2–3 cm dla powierzchni mniej urozmaiconych i 5–8 cm dla powierzchni o bogatych zmiennych formach dna. Wszystkie te wartości mieszczą się w normach IHO;
- dla kątów wiązki mniejszej niż 150° przy poziomie ufności równym 99% błąd kształtuje się na poziomie 2–4 cm dla powierzchni mniej urozmaiconych i 10–18 cm dla powierzchni urozmaiconych. Wszystkie te wyniki także mieszczą się w normach IHO;
- można zauważyć że błąd średni rośnie tym szybciej wraz ze wzrostem kąta wiązki, im bardziej nieregularne jest ukształtowanie dna (powierzchnia brama i wraki). W badanym przypadku wzrost szerokości wiązki z 50° na 150° spowodował wzrost błędów o około 70%;
- dla regularnych powierzchni (np. kotwiczowisko), nawet znaczny wzrost szerokości wiązki powoduje nieznaczny wzrost błędów, w badanym przypadku wzrost szerokości wiązki z 50° na 150° spowodował wzrost błędów o ok. 30%, zauważyć należy jednak, że wartości rzeczywiste tych błędów są małe — poniżej 1 cm;
- dla większości badanych wartości kąta wiązki, dla wszystkich powierzchniach testowych, 99% błędów była niższa od 10 cm (dla badanych powierzchni dopuszczalny błąd IHO wynosi ok. 20–25 cm). Wyjątek stanowi jedynie powierzchnia wraki, gdzie błąd ten wynosił do 20 cm;
- odległość między sąsiednimi pomiarami na krańcach wiązki wynosi odpowiednio: 20 cm (kąt wiązki 110°), 50 cm (kąt wiązki 110°), 80 cm (kąt wiązki 130°), 110 cm (kąt wiązki 150°), 1000 cm (kąt wiązki 170°);
- aby uzyskać pokrycie całego badanego akwenu testowego wirtualna jednostka pomiarowa pokonała odpowiednio: 4000 metrów (dla kąta wiązki 50°), 2800 metrów (dla kąta wiązki 70°), 2000 metrów (dla kąta wiązki 90°), 1400 metrów (dla kąta wiązki 110°), 1000 metrów (dla kąta wiązki 130°), 600 metrów (dla kąta wiązki 150°) oraz 200 metrów (dla kąta wiązki 70°).

Na podstawie zebranych wyników można wyciągnąć następujące wnioski i propozycje:

- znaczny wzrost szerokości wiązki powoduje zmniejszenie liczby punktów pomiarowych, na podstawie których następuje modelowanie powierzchni dna. Jest ich jednak nadal na tyle dużo, że wpływają one w niewielki sposób na dokładność rekonstrukcji. Można zatem stwierdzić, iż z tego punktu widzenia pomiary można dokonywać przy dość dużych szerokościach wiązki (maksymalnej oferowanej przez producentów), dla powierzchni płaskich może ona wynosić 130 – 150° stopni, dla pozostałych powierzchni 110 – 130° . Pozwoli to znacznie zaoszczędzić czas pomiarów oraz obniży koszty przy jednoczesnym zachowaniu wysokiej dokładności modelowania;

- największe błędy powstają na krawędziach mierzonych obszarów, zaleca się zatem dokonywanie pomiarów na nieznacznie większym obszarze (wystarczy kilka metrów) od tego, który będzie modelowany;
- w przypadkach, gdy powierzchnia dna morza jest mocno urozmaicona a my oczekujemy jak najprecyzyjniejszych wyników, zaleca się dokonywanie pomiarów przy średnich szerokościach wiązki ($90\text{--}110^\circ$), co spowoduje wzrost dokładności modelu o ok. 30–50% w szczególności w okolicach, gdzie występują nietypowe formy na dnie morza (wraki, bloki betonowe, konstrukcje podwodne itp.).

4. Podsumowanie

Przeprowadzone na szeroką skalę badania dokładności rekonstrukcji powierzchni dna morskiego tworzonego na podstawie danych zebranych za pomocą sondy wielowiązkowej w zależności od szerokości wiązki pomiarowej w echosondzie wielowiązkowej pokazują, że dokładność tworzonych modeli maleje nieznacznie wraz z wzrostem szerokości wiązki. Można zatem dokonywać pomiarów z użyciem szerokiej wiązki. Jedyne w sytuacji, gdy oczekujemy najwyższej dokładności, powinno się dokonywać pomiarów przy wartościach kąta nieco niższych.

Nie brano jednak tutaj pod uwagę właściwości samej echosondy wielowiązkowej i metody jej działania (wraz ze wzrostem szerokości wiązki rośnie poziom zakłóceń), a jedynie rozkład i liczbę punktów pomiarowych. Dokładność wszystkich stworzonych w czasie badań modeli była zgodna z normami IHO.

Szacując rzeczywistą wartość błędu średniego można powiedzieć, że dla powierzchni mniej urozmaiconych jest on na poziomie 1 cm (szerokość wiązki $< 110^\circ$), oraz 2 cm przy wartościach wyższych. Dla powierzchni bardziej urozmaiconych rośnie ona do wartości odpowiednio 2 cm i 4 cm.

Należy zauważyć, że w badaniach brany pod uwagę był jedynie rozkład i liczba punktów pomiarowych, błąd MSE urządzenia pomiarowego (echosondy wielowiązkowej) oraz dobór metody interpolacyjnej. W rzeczywistych pomiarach na błąd modelowania mogą wpływać także inne czynniki, takie jak: systemy pozycyjne, systemy stabilizacyjne oraz sama konstrukcja echosondy. Autorzy planują weryfikację badań dokonując rzeczywistych pomiarów tego samego obszaru przy różnych parametrach ruchu statku badawczego i pomiaru.

LITERATURA

- [1] *Calder B.R., Mayer L.A.*: Automatic processing of high-rate, high-density multibeam echosounder data, *Geochemistry Geophysics Geosystems*, vol. 4(6), 2003, pp. 1048–1069.
- [2] *Hamilton E.L.*: Geoacoustic modeling of the sea floor, *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 68, Issue 5, pp. 1313–1340, 1980.
- [3] *Dinn, D.F., Loncarevic, B.D., Costello, G.*: The effect of sound velocity errors on multi-beam sonar depth accuracy OCEANS '95. MTS/IEEE. Challenges of Our Changing Global Environment. Conference Proceedings, vol. 2, pp. 1001–1010.

- [4] *Jay Gao*.: Resolution and accuracy of terrain representation by grid DEMs at a micro-scale, *International Journal of Geographical Information Science*, vol. 11, Issue 2, 2001, pp. 199–212.
- [5] *Hammerstad E., Asheim S., Nilsen K., Bodholt, H.*: Advances in multibeam echo sounder technology, *OCEANS '93. Engineering in Harmony with Ocean. Proceedings*, vol. 1, 1993, pp. 1482–1487.
- [6] *Internationa Hydrgraphic Organization*, IHO standards for hydrographic surveys, Publication No. 44, 4th Edition, 1998.
- [7] *Łubczonek J., Borkowski M.*: Comparative analysis of digital seabed models prepared from single and multibeam sounding data, *Maritime University of Szczecin, PJOES 2007*.
- [8] *Maleika W., Palczyński M.*: Virtual multibeam echosounder in investigations on sea bottom modeling. *Metody Informatyki Stosowanej* vol. 4/2008, Wydawnictwo PAN o. Gdańsk, 2008, s.111–120.
- [9] *Maleika W., Palczyński M.*: Virtual marine sounding. *Polish Journal of Environmental Studies*, vol. 17, No. 4C, 2008, pp. 312–316.
- [10] *Maleika W., Palczyński M., Frejlichowski D., Stateczny A.*: Analysis of survey data collected using Simrad EM3000 multibeam echosounder (In Polish). *Metody Informatyki Stosowanej*, nr 4/2010 (25), PAN o. Gdańsk, s. 55–64.
- [11] *Maleika W., Palczyński M.*: Opracowanie symulatora echosondy wielowiązkowej. *Biuletyn WAT*, nr 3 (663), 2011, s. 215–225.
- [12] *Maleika W., Palczyński M., Frejlichowski D.*: Multibeam Echosounder Simulator Applying Noise Generator for the Purpose of Sea Bottom Visualisation, [In:] G. Maino and G. L. Foresti (Eds.): *ICIAP 2011, Part II, Lecture Notes in Computer Science*, vol. 6979, 2011, pp. 285–293.
- [13] *Stateczny A. (red.)*: *The methods of the comparative navigation*” (In Polish), *Gdańskie Towarzystwo Naukowe*, Gdańsk 2004.
- [14] *Golden Software* — Technologically Advanced Mapping and Graphing Software, <http://www.goldensoftware.com/>, may 2011.