

**DOKŁADNOŚĆ HYDRODYNAMICZNYCH MODELI BAŁTYKU  
A BEZPIECZEŃSTWO W POLSKIM REJONIE ODPOWIEDZIALNOŚCI SAR**

**ACCURACY OF HYDRODYNAMIC MODELS OF THE BALTIC SEA  
AND SAFETY IN THE POLISH SAR RESPONSIBILITY AREA**

**Jerzy Pyrchla<sup>1</sup>, Marek Kowalewski<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Wydział Dowodzenia i Operacji Morskich, Akademia Marynarki Wojennej w Gdyni

<sup>2</sup> Instytut Oceanografii, Uniwersytet Gdański

**SŁOWA KLUCZOWE:** poszukiwanie i ratownictwo, hydrodynamiczne modele, dane geoinformatyczne, modelowanie matematyczne.

**STRESZCZENIE:** Zgodnie z międzynarodowymi dokumentami planistycznymi dotyczącymi ratownictwa morskiego w Polskim rejonie odpowiedzialności SAR należy wyznaczać obszar poszukiwania w oparciu o środowiskowe dane geoinformatyczne. Referat przedstawia modele hydrodynamiczne jako główne źródło tych danych w rejonie Bałtyku Południowego. Koncentruje się wokół problemów związanych z wyznaczeniem dokładności danych z hydrodynamicznych modeli Bałtyku. Przedstawiono wyniki badań nad tym zagadnieniem wykonanych w ramach projektu nr 0 T00A 01328 finansowanego przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego. Zaprezentowano analizę błędów modeli hydrodynamicznych jako funkcję zależną od czasu symulacji. Przedstawiono praktyczne wykorzystanie rezultatów badań podczas planowania akcji ratowniczych w polskim rejonie SAR.

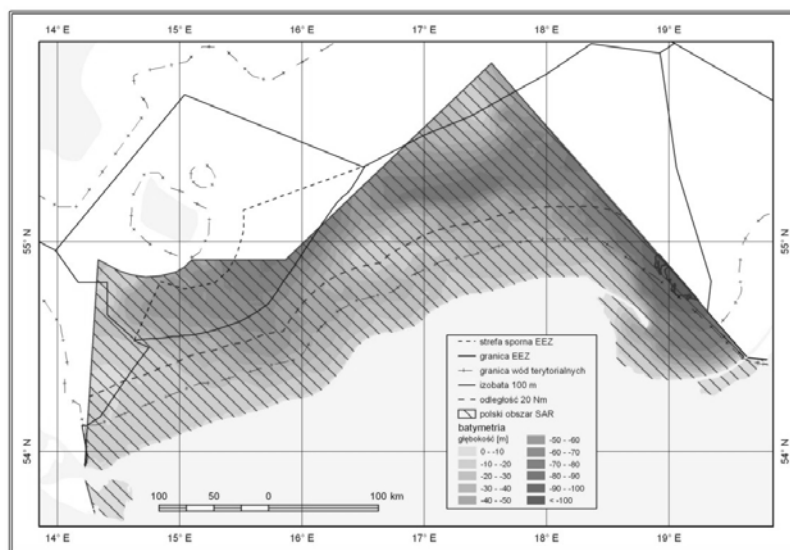
## **1. WSTĘP**

Misją służb ratowniczych na morzu jest skuteczne ratowanie ludzi. Powinno one wykorzystywać najnowsze osiągnięcia wiedzy i technologii w celu poprawy efektywności realizacji swoich kluczowych zadań. Do zadań tych należy dostosowanie do specyfiki akwenów, procedur lokalizacji wypadków morskich oraz planowania i koordynacji poszukiwań.

Polski rejon odpowiedzialności ratowniczej umiejscowiony w zamkniętym basenie Morza Bałtyckiego charakteryzuje się stosunkowo niedużą głębokością (średnia głębokość 56 m) oraz dużą zmiennością prądów morskich. Cechy takie jak: zwartość, pokrycie dozorem przez statki powietrzne i systemem łączności, częściowe pokrycie systemem V T S, to jego zalety. Silne wiatry, zalodzenie, zamglenia, niska temperatura wody i powietrza to jego wady które nie sprzyjają ratownictwu.

Specjalistyczne publikacje międzynarodowe (ATP 2004, IAMSAR 2007) opisujące zagadnienia planowania akcji SAR dzielą obszar ratowniczy w zależności od odległości od brzegu i głębokości na trzy strefy. Pierwsza strefa nazwana przybrzeżną to wody do 25 mil

morskich od brzegu. W tej strefie planowanie poszukiwań w czasie akcji ratowniczych zakłada przeszukanie obszaru o powierzchni 144 mil kwadratowych. Zawężenie tego obszaru można tylko poprzez wykorzystanie hydrometeorologicznych przestrzennych danych środowiskowych. Należy założyć, że dane te pochodzą z wiarygodnego źródła i wiernie opisują rzeczywiste wartości. W naszej rejonie odpowiedzialności SAR mogą to być dane z hydrodynamicznych modeli numerycznych Bałtyku.

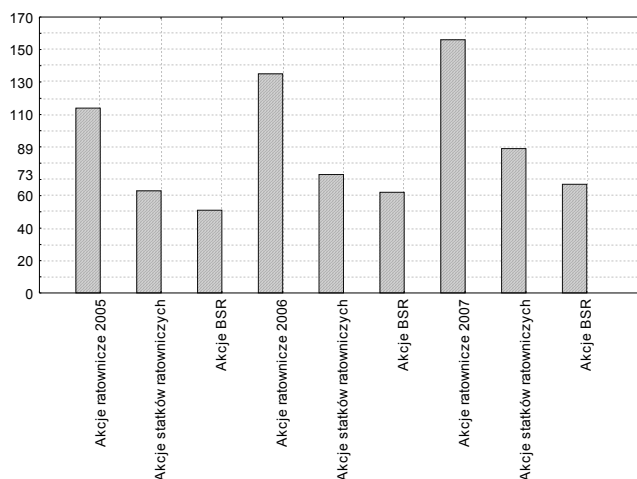


Rys. 1. Polski rejon odpowiedzialności SAR

Druga strefa planowania obszaru poszukiwań zakłada uwzględnianie wpływu na przemieszczanie się obiektu poszukiwań prądu wiatrowego. Rozciąga się ona na obszarze morskim oddalonym od brzegu 25 mil morskich i o głębokości 30,48 m. Trzecia strefa rozciąga się powyżej 25 mil morskich od brzegu i głębokości 91,44 m. Podczas planowania w tej strefie uwzględnia się prąd gradientowy i prąd wiatrowy.

Godzi się przypomnieć, iż w chwili obecnej około 70 % wszystkich awarii statków w skali światowej ma miejsce w pobliżu wybrzeży, czyli w strefie do 25 mil morskich od brzegu. Powodowane to jest wzmożonym ruchem żegludowym i zwiększeniem szybkości statków. W naszej strefie statystyka nie odbiega od światowej patrz rysunek 2.

Dodatkowo awariom ulegają a więc potrzebują pomocy, głównie statki nie konwencyjne. Im szczególnie szybko należy udzielać pomocy. Analizując dane należy zwrócić uwagę, że trasy żegludowe biegnące wzdłuż wybrzeża polskiego są oddalone 6 i 12 mil morskich od brzegu dlatego udział statków ratowniczych w dużej części odnosi się do rejonu oddalonego 25 mil morskich od brzegu.



Rys. 2. Statystyka akcji ratowniczych w polskim (BSR – brzegowe sekcje ratownicze)

## **2. BADANIE DOKŁADNOŚCI SYMULACJI TRAS PRZEMIESZCZANIA SIĘ OBIEKTU NA POWIERZCHNI MORZA Z WYKORZYSTANIEM HYDRODYNAMICZNYCH MODELI BAŁTYKU**

Badania nad zagadnieniem lokalizacji obiektów na morzu (Pyrchla 2001, 2002) a szczególności uwzględnienie czasu jako wymiaru podczas rozwiązywania tego zagadnienia, spowodowały konieczność wykonania pomiarów dokładności danych z hydrodynamicznych modeli numerycznych. Do określenia wiarygodności obliczanych prądów morskich przez hydrodynamiczne modele numeryczne wykorzystano grupy pław. Uzyskane w ten sposób wartości umożliwiły dostarczenie prognozy prądów morskich najbardziej zbliżonej do rzeczywistości.

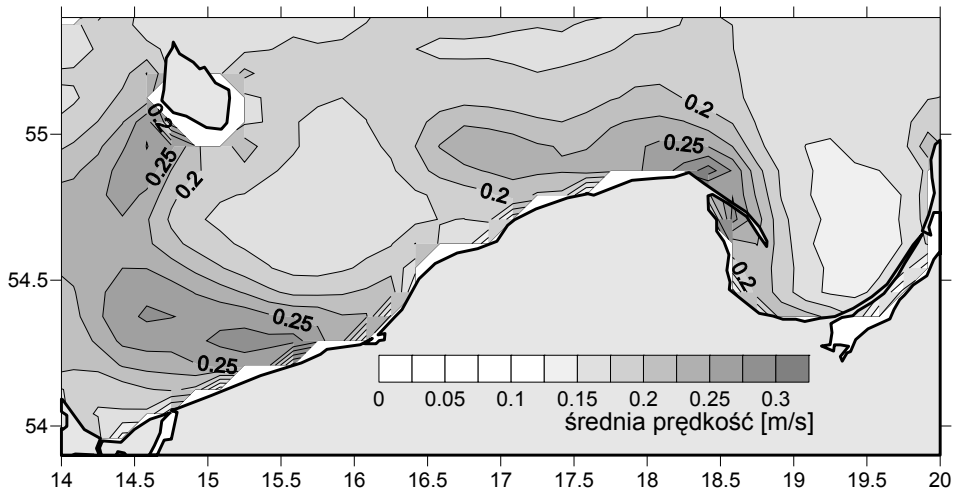
### **2.1. Charakterystyka obszaru badań**

Bałtyk jest morzem, na którym moduł wektora prędkości prądu powierzchniowego ma małe wartości. Z obliczeń wartości średnich prądów w całym Bałtyku dla ponad czterdziestu lat (1958-2002)<sup>1</sup> wynika, że w polskim obszarze odpowiedzialności osiągają one od 0,2 do 0,5 m/s. Największe prędkości prądu występują na obszarach przyległych do: Półwyspu Helskiego, Ławicy Stilo, Ławicy Słupskiej, Południowej Ławicy Środkowej, czy na akwenie od Ławicy Orlej do Ławicy Odrzanej. Zakładając, że średnie pole wiatru jest stosunkowo mało zróżnicowane, przyczyny intensyfikacji prądów można, zatem upatrywać w wypłyceniach dna oraz jego nachyleniach.

Należy jednak zauważyć, że nie wszędzie w pobliżu brzegów, a więc na wodach płytkich, prądy średnie są intensywne. Szczególnie wyraźne jest to na płytkim akwenie

<sup>1</sup> HIPOCAS project of European Commission (No.: EVK2-CT-1999-00038) (Jędrasik 2008).

na południe od Ławicy Odrzanej, gdzie nie występuje intensyfikacja prądów. Obszar o silniejszych prądach od Ławicy Orlej do Ławicy Odrzanej skręca łukiem na południowy wschód. Jeśli spojrzeć na mapę batymetryczną, dostrzegamy, że tam właśnie występują znaczne nachylenia dna. Ta sama uwaga dotyczy okolic Półwyspu Helskiego.



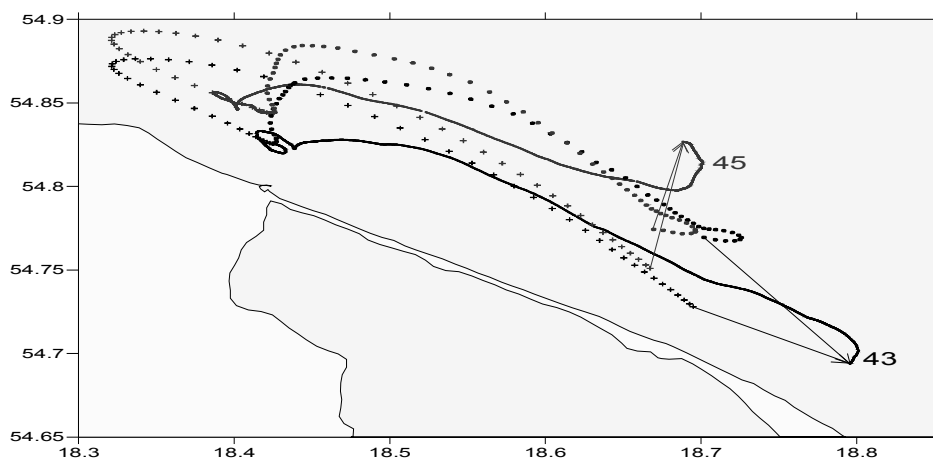
Rys. 3. Pole średniej wartości modu wektora prędkości prądu w warstwie powierzchniowej Bałtyku w okresie 1958-2002 według (Jędrasik 2008)

## 2.2. Realizacja badań

Do badań wykorzystano pławy przedstawione na rysunku 4. Konstrukcję i elektroniczne rozwiązania pław opracowano w Akademii Marynarki Wojennej. Pława ma formę szczelnego kulistego pojemnika wykonanego z włókna szklanego nasączonego żywicą epoksydową. Pojemnik pokryty jest warstwą lakieru koloru pomarańczowego, który jest dobrze widoczny. Jednocześnie konstrukcja pławy jest odporna na uderzenia podczas wodowania i wyjmowania jej z wody. Na dole pojemnika, na rurze osadzone są pod kątem prostym dwie powierzchnie z blachy aluminiowej. Wewnątrz znajduje się akumulator żelowy odporny na przechyły, odbiornik GPS oraz radiomodem lub radiomodem telefonii komórkowej (w zależności od wersji pławy). Pozycje pław są rejestrowane na okręcie lub w AMW przez łącze internetowe, wówczas, gdy zastosowany jest radiomodem telefonii komórkowej. Korzystając z opracowanych dla tego projektu programów komputerowych, uzyskać można przebieg trasy przemieszczania się dryfterów. Ponieważ podczas pojedynczego pomiaru używanych jest kilka pław jednocześnie, to rejestruje się dyspersję prądów. Na rysunku 5 przedstawiono przykładową trasę pławy.



Rys. 4. Pława pomiarowa



Rys. 5. Porównanie tras przemieszczania się pław (43 i 45) obliczonych za pomocą modeli: M3D (punkty) i HIROMB (+) z obserwacjami wykonanymi w dniach 18-20 lipca 2007 roku. Strzałki pokazują błędy modelowanych pozycji końcowych

Zasadnicze znaczenie dla przemieszczania się małych, częściowo zanurzonych obiektów mają prądy powierzchniowe. Badania, których celem było przetestowanie możliwości prognozowania trasy obiektu dryfującego pod wpływem prądów powierzchniowych, wykonywane za pomocą dostępnych operacyjnych modeli hydrodynamicznych Bałtyku wskazały, że, największą zgodność z obserwacjami uzyskuje się, gdy do symulacji przemieszczania obiektu wykorzystano modelowane prądy z głębokości 0,2 m pod powierzchnią morza. Podczas tych eksperymentów każde badanie rzeczywiste było poparte symulacjami, w których wykorzystano dane z modeli numerycznych M3D (Kowalewski 1997) i HIROMB (Funkquist 2001). Trasy dryfowania pław oraz symulowanego ich przemieszczania, obliczonego na podstawie danych z modeli hydrodynamicznych, zazwyczaj się nie pokrywały, co jest sumarycznym efektem błędów modeli hydrodynamicznych i modeli pogody.

Porównanie obserwowanych i obliczonych na podstawie modeli tras przemieszczania się pław dla najdłuższych serii pomiarowych przedstawiono na rysunku 5. Początkowe pozycje obu pławek były oddalone o ok. 2 km, podczas gdy końcowe pozycje o ponad 15 km. Odległość początkowa pław była rzędu kroku siatki obliczeniowej obu modeli (1.8 km) i dlatego modele obliczyły bardzo podobne trajektorie ruchu pływaków, gdyż opisują one przepływy o skalach większych niż krok siatki. Natomiast obserwacje pokazują, iż rzeczywisty ruch pław podlegał fluktuacjom o niewielkiej skali przestrzennej. Jest to widoczne zwłaszcza w początkowych i końcowych fragmentach trasy. W ostatniej fazie tory pław wskazują wręcz na przeciwny kierunek przemieszczania. Pokazuje to rolę, jaką odgrywają procesy podsiatkowe, które w analizowanym przypadku doprowadziły do tego, iż końcowe pozycje pław różniły się o ponad 15 km. Różnice końcowych pozycji obliczonych z modeli były podobnego rzędu jak odległość początkowa, gdyż pławy przemieszczały się w tym przypadku wraz z uśrednionym polem przepływu. Końcowe pozycje symulowane za pomocą modeli, a zwłaszcza w przypadku modelu M3D, znalazły się pomiędzy końcowymi pozycjami obserwowanymi. Można więc w tym przypadku powiedzieć, iż modele bardzo dobrze przybliżyły średnią trasę dryfu obiektu, a różnice pozycji modelowanych i obserwowanych, czyli błędy prognozy, są efektem procesów podsiatkowych.

Do dalszych analiz przyjęto założenie, iż błędy obliczonych za pomocą modeli hydrodynamicznych pozycji obiektów mają charakter błędów przypadkowych, gdyż są związane z turbulentnymi procesami podsiatkowymi mającymi losową naturę. Oszacowanie wielkości tych błędów pozwoliłoby określić dokładność modelowanych pozycji, a w konsekwencji promień poszukiwań obiektu. W tym celu dla każdej serii pomiarowej i dla każdej pary jednoczesnych obserwowanych i modelowanych pozycji obliczono błąd bezwzględny (wyrażony w km) pozycji modelowanej (rys. 6 i rys.7) w zależności od długości (czasu) prognozy.

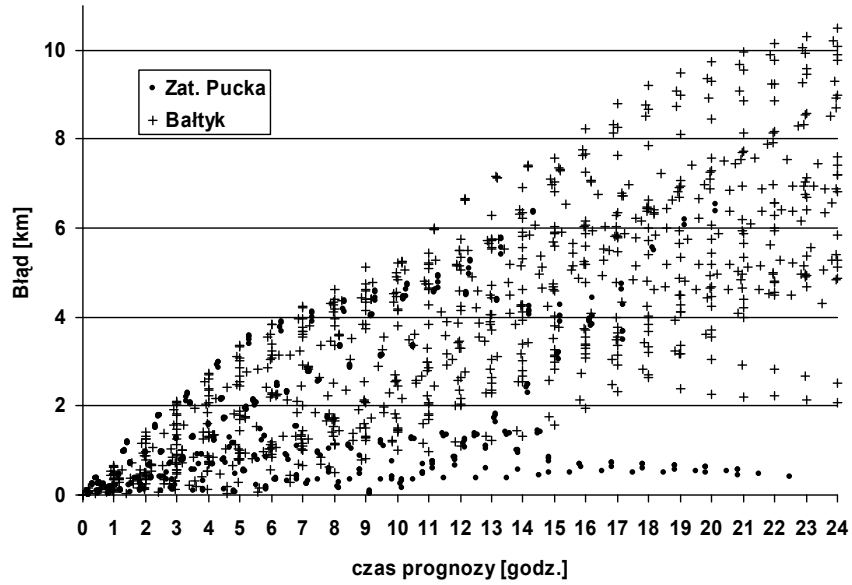
Zarówno w przypadku modelu M3D (rys.6) jak i modelu HIROMB (rys.7) błędy rosły w raz ze zwiększaniem czasu prognozy oraz cechowały się dużym zróżnicowaniem. W przypadku obu modeli daje się zauważyć górną granicę, którą można interpretować jako błąd maksymalny. Jak wynika z rysunków 6 i 7, nie ma specjalnych różnic pomiędzy błędami modeli w przypadku akwenu osłoniętego jakim jest Zatoka Pucka i rejonu otwartych wód Bałtyku.

W celu dalszej analizy obliczono pozycje modelowane dla kolejnych godzin licząc od początku pomiaru i uśredniono błędy dla poszczególnych serii pomiarowych. Pozwoliło to na obliczenie maksymalnych i średnich błędów dla poszczególnych godzin prognozy (rys. 8 i rys. 9). W przypadku obu modeli błędy średnie i maksymalne można aproksymować funkcją liniową. Pozwala to w prosty sposób obliczyć błąd dla dowolnego czasu prognozy. Współczynnik kierunkowy prostej mówi o ile km wzrasta błąd wraz z każdą godziną prognozy.

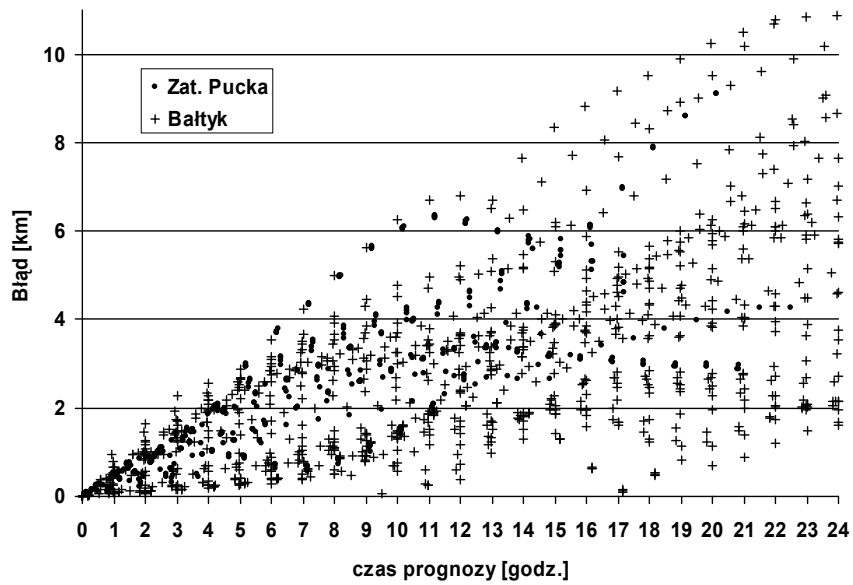
W przypadku błędu maksymalnego niższy współczynnik otrzymano dla modelu M3D (0.4267) niż HIROMB (0.4598), co oznacza iż M3D daje nieco mniejsze błędy dla dłuższych symulacji. Dla błędu średniego było odwrotnie, gdyż niższy współczynnik kierunkowy prostej regresji otrzymano dla modelu HIROMB.

Stosunkowo niewielka liczba danych (34 serii) nie pozwoliła sprawdzić jaki rozkład mają błędy. Jednak przeprowadzona analiza wskazywała, iż nie mają one rozkładu normalnego. Wobec powyższego, w celu przedstawienia charakteru funkcji „rozmycia” obliczono percentyl 90% i 75% (tzn. górny kwantyl) błędów dla poszczególnych godzin symulacji (rys. 6 i rys. 7). Podobnie jak w przypadku błędów średnich i maksymalnych, percentyle i kwantyle można przybliżyć za pomocą funkcji liniowej. Otrzymane równania prostych regresji pozwalają obliczyć dla dowolnego czasu symulacji modelowej błąd, w którym będzie mieściło się 90% lub 75% przypadków. Obliczając odpowiednie percentyle można więc opisać funkcję rozmycia obliczonej za pomocą modeli pozycji. Funkcja ta może być zdefiniowana jako prawdopodobieństwo, iż prawdziwa pozycja obiektu będzie odległa nie więcej niż wynosi odpowiedni percentyl błędu od obliczonej pozycji. Obszary o różnym prawdopodobieństwie będą miały kształt współśrodkowych kół o promieniu równym odpowiedniemu percentylowi błędu.

Przeprowadzone analizy pozwoliły wyznaczyć funkcję opisującą wzrost maksymalnych błędów (lub odpowiednich percentyli błędów) modeli HIROMB i M3D. Umożliwia to sprecyzowanie obszaru poszukiwań obiektu w zależności od czasu symulacji.

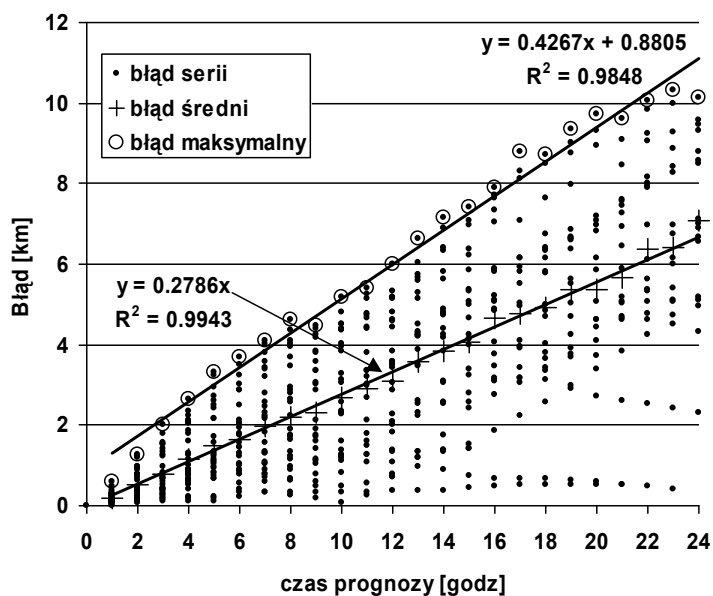


Rys. 6. Błędy pozycji pławy obliczonej za pomocą modelu M3D w zależności od długości prognozy

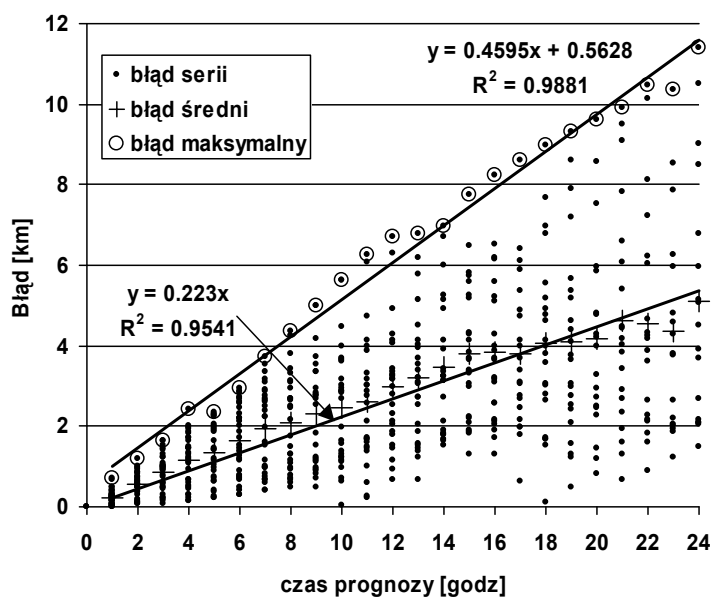


Rys. 7. Błędy pozycji pławy obliczonej za pomocą modelu HIROMB w zależności od długości prognozy

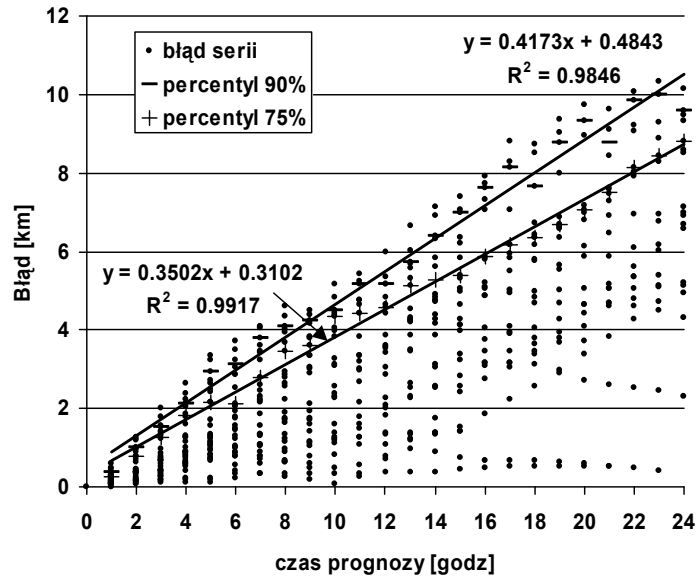




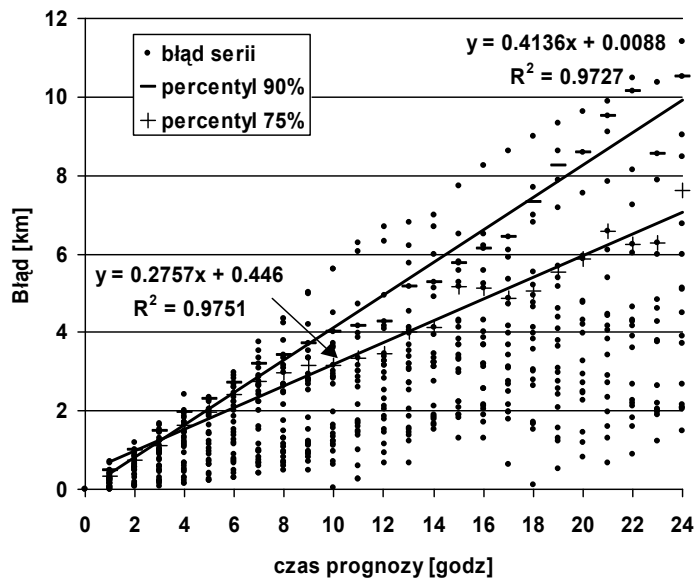
Rys. 8. Średni i maksymalny błąd modelu M3D w zależności od czasu prognozy



Rys. 9. Średni i maksymalny błąd modelu HIROMB w zależności od czasu prognozy



Rys. 10. Błędy modelu M3D (percentyl 90% i 75%) w zależności od czasu prognozy



Rys. 11. Błędy modelu HIROMB (, percentyl 90% i 75%) w zależności od czasu prognozy

### **3. WNIOSKI**

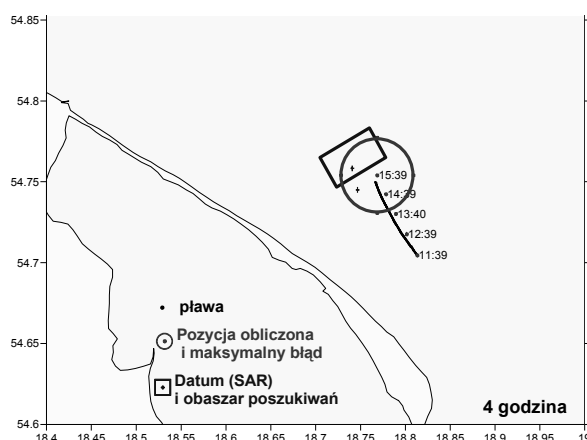
Badania w dziedzinie nauki o morzu przyczyniają się do lepszego zrozumienia środowiska, a ich wyniki mają praktyczne zastosowania w obszarze morskiej technologii informatycznej (Bednarczyk 2005). Stanowią istotny element tworzenia i modernizacji systemu wsparcia procesu decyzyjno-planistycznego działań służb SAR. Prace nad tym systemem warunkują postrzeganie Polski jako wiarygodnego i liczącego się partnera wśród wszystkich państw basenu Morza Bałtyckiego. Z uwagi na położenie geograficzne naszego kraju polskie służby SAR są odpowiedzialne za niesienie pomocy w sytuacjach zagrożenia w rejonie Bałtyku Południowego. Dlatego założenia dla takiego systemu powinny wynikać z analizy warunków hydrometeorologicznych i środowiskowych tego rejonu.

W aspekcie niektórych zagadnień badawczych związanych ze środowiskiem morskim można dokonywać uogólnień. Jednakże większość przypadków dotyczy ściśle określonych rejonów morza. Przykładem mogą być wyniki badania prądów powierzchniowych wykonanych w ramach projektu nr 0 T00A 01328 realizowanego w AMW wspólnie z pracownikami IM Gdańsk, IPI PAN oraz Wydziału Oceanografii UG. W ramach projektu badano dokładność symulacji przemieszczania się obiektu – dryftera wykonanych w oparciu o dane z modeli HIROMB i M3D.

Modele te różnią się między innymi: rozdzielczością, sposobem parametryzacji turbulencji, mają odmienne siatki numeryczne i korzystają z różnych modeli pogody (HIROMB z modelu HIRLAM, a M3D - z modelu UMPL). Przeprowadzone analizy symulowanych tras przemieszczania się obiektu w porównaniu z rzeczywistymi wykazały, iż modele te w różny sposób prognozują trajektorię obiektu. Można przypuszczać, iż różnice te spowodowane były między innymi błędami prognoz prędkości i kierunku wiatru w modelach pogody, HIRLAM i UMPL.

Badania potwierdziły zasadę, że obszar poszukiwań w strefie przybrzeżnej można wyznaczać tylko w oparciu o dane środowiskowe. Stosowanie procedury zalecanej w podręczniku międzynarodowym IAMSAR dla strefy trzeciej prowadzi do błędnego wyznaczenia granic obszaru poszukiwań, co zaprezentowano na rysunku 12.

Wyniki modeli, choć obarczone są błędami, to jednak pozwalają istotnie ograniczyć obszar poszukiwań (Drogosiewicz 1993). Na podstawie przeprowadzonych analiz trudno określić, który model dokładniej prognozuje położenie dryfującego obiektu. Maksymalne błędy obliczonej przez modele pozycji dryfterów były podobnego rzędu i rosły w przybliżeniu liniowo wraz z czasem prognozy. Błędy maksymalne modelu M3D były nieco mniejsze, jednak błędy średnie były wyższe niż dla modelu HIROMB. Uwzględnienie jednego modelu redukuje powierzchnie poszukiwań obiektu do ok. 20%, obszaru, który należałoby przeszukać w przypadku braku jakiegokolwiek informacji o prądach morskich.



Rys. 12. Obszar poszukiwań i symulacja przemieszczania się dryftera wykonana w oparciu o dane z modelu M3D

Dalszą poprawę dokładności prognozowania obszaru poszukiwań dryfującego obiektu można osiągnąć poprzez:

- zwiększenie rozdzielczości modeli hydrodynamicznych;
- udoskonalenie modeli meteorologicznych;
- uwzględnienie bezpośredniego dryfu wiatrowego.

#### 4. LITERATURA

Bednarczyk M., Pyrchla J., Piotrowski M., (2005): Toward the Application of AI Methods in Marine SAR Operations. The VIII International Maritime Conference "Safety of Surface, Subsurface and Flight Over the Sea Aspects". Polish Journal of Environmental Studies, Vol. 14.

Drogosiewicz M., (1993): Wpływ wielkości dryfu jednostki pływającej na ustalenie pozycji oraz rozmiarów akwenów poszukiwania podczas akcji ratowniczej. AMW.

Funkquist L. (2001): HIROMB an operational eddy resolving model for the Baltic Sea. Bull. Mar. Inst. v. 28, no. 2, pp. 7-16

Jędrasik J., Cieślakiewicz W., Kowalewski M., Bradtke K., Jankowski A., (2008), 44 years hindcast of the sea level and circulation in the Baltic Sea, Coastal Engineering 55, 849–860

Kowalewski M., (1997): A three-dimensional, hydrodynamic model of the Gulf of Gdańsk, Oceanol. Stud., 26 (4), 77–98.

Pyrchla J., (2001): The Utility of Fuzzy Set Theory for Locating Sea Accidents, Geodezja i Kartografia nr 4.

Pyrchla J., (2002): Zbiory rozmyte w teorii lokalizacji wypadków morskich. Wybrane zagadnienia. Wyd. J. Pyrchla.

IAMSAR II, (2007): International aeronautical and maritime search and rescue manual. Mission coordination. Volume II, IMO/ICAO.

ATP, (2004): Poszukiwanie i ratownictwo. Instrukcja sprzymierzonych ATP - 10 (D). Wydawnictwo MW RP.

**ACCURACY OF HYDRODYNAMIC MODELS OF THE BALTIC SEA  
AND SAFETY IN POLISH SAR RESPONSIBILITY AREA**

KEY WORDS: search and rescue, hydrodynamic models, geoinformational data, mathematical modelling

SUMMARY: According to international planning documents concerning lifeboat service in Polish SAR responsibility area, a rescue area must be established in accordance with geoinformational data. This article presents hydrodynamic models as the main source of those data in the South Baltic Region. It focuses on problems related to establishing the accuracy of data from hydrodynamic models of the Baltic Sea. The paper presents results of research concerning the issue, conducted within project no. OT00A 01328, funded by the Ministry of Science and Higher Education. Also the error analysis of hydrodynamic models was presented as a function dependent on the simulation time. Practical applications of research results while planning rescue operations in Polish region of SAR were illustrated.

Kmdr dr hab. inż. Jerzy Pyrchla  
e-mail: j.pyrchla@amw.gdynia.pl  
tel. +58 6262561

Dr Marek Kowalewski  
e-mail: ocemk@univ.gda.pl  
tel. +58 6601655