

**ZESZYTY NAUKOWE NR 2 (74)
AKADEMII MORSKIEJ
W SZCZECINIE**

EXPLO-SHIP 2004

Bernard Wiśniewski,
Piotr Medyna

**Prognozowany zasięg pola sztormowego cyklonu tropikalnego
jako domena rozmyta cyklonu**

Słowa kluczowe: cyklon tropikalny, prognoza, domena rozmyta

Podjęto próbę opisania zasięgu strefy sztormowej cyklonu z wiatrami przekraczającymi 34 w jako domenę rozmytą cyklonu na przykładzie prognoz +36 h dla Północnego Atlantyku.

**Forecasted Storm Field Range of Tropical Cyclone
as a Cyclone Fuzzy Domain**

Key words: tropical cyclone, forecast, fuzzy domain

The paper describes a tropical cyclone storm field range (winds exceeding 34 knots) as a tropical cyclone fuzzy domain, giving an example of 36H prognosis for the North Atlantic.

Wstęp

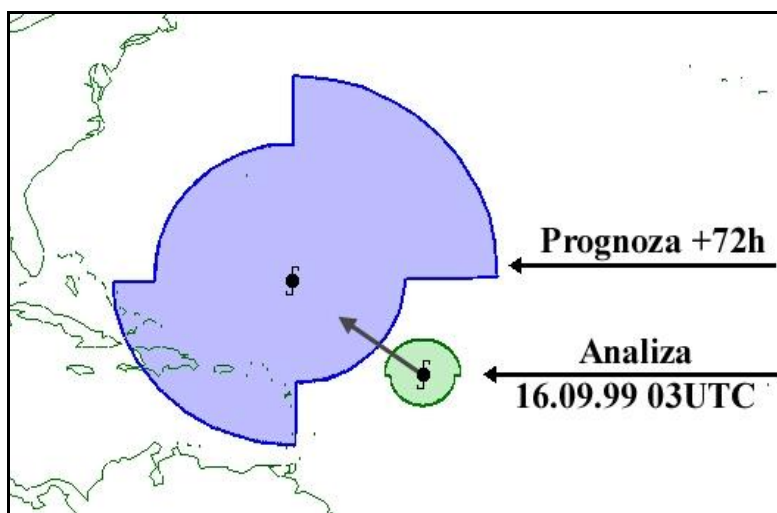
W przypadku żeglugi na akwenie objętym występowaniem cyklonu tropikalnego, standardowym postępowaniem jest taki wybór trasy statku, aby ominąć pole sztormowe cyklonu z wiatrami o prędkości przekraczającej 34 w. Nie jest to jednak równoznaczne z wykreśleniem kursu stycznego do figury określającej zasięg oddziaływania tychże wiatrów, a utworzonej poprzez uwzględnienie promienia ich zasięgu w poszczególnych kwadrantach, podanego w komunikacie meteorologicznym. Korzystając z prognozy położenia i zasięgu strefy sztormowej cyklonu, musimy uwzględnić zarówno błąd prognozowanej pozycji centrum cyklonu, jak i błąd prognozy samego zasięgu pola wiatrów. Oczywisty jest również fakt, że nie istnieje ostra granica pola sztormowego cyklonu, poza którą żegluga przebiega bez żadnych przeszkód a wewnątrz niej jest całkowicie niedopuszczalna. Komunikaty z ostrzeżeniami o cyklonie tropikalnym podawały niegdyś przewidywane pozycje cyklonu za następne 6, 12, 18 i 24 godziny. Aktualnie mamy do czynienia z prognozami 12, 24, 36, 48, a także 72 i 120-godzinnymi. Z jednej strony świadczy to o udoskonaleniu technik prognozowania pogody, z drugiej strony należy uprzedzić użytkowników o malejącym stopniu wiarygodności w miarę zwiększania przedziału czasowego prognozy i jego wpływie na taktykę manewrów omijania cyklonu. Malejący stopień wiarygodności coraz dłuższych prognoz, powoduje bardzo duże powiększanie się pola zagrożenia sztormowego (rys. 1). Kapitan statku nawet przy przyjęciu wiarygodności prognozy rzędu 70%, do celów obliczeń nawigacyjnych byłby zmuszony przyjmować zbyt rozległe obszary, w niektórych przypadkach aż do zamknięcia trasy do portu docelowego. Kolejna kwestia to czas, który pozostaje na podjęcie bądź zmianę decyzji nawigacyjnej, będący funkcją prędkości statku nad dnem i odległości od strefy, jaką chcielibyśmy ominąć. A zatem będąc w dużej odległości od zagrożenia chcielibyśmy definiować jego zasięg bardziej „optymistycznie”, natomiast w przypadku bezpośredniej bliskości należałoby uwzględnić większy margines bezpieczeństwa. Wszystko to przemawia za stosowaniem teorii zbiorów rozmytych i przedstawieniem pola sztormowego cyklonu jako domeny rozmytej tegoż cyklonu.

1. Domena rozmyta cyklonu na przykładzie prognozy 36-godzinnej dla Północnego Atlantyku

Podstawowymi informacjami zawartymi w prognozie dotyczącej cyklonów tropikalnych są: przewidywana pozycja centrum układu oraz promień zasięgu strefy sztormowej dla poszczególnych kwadrantów (NE, SE, SW, NW). Pierwszym elementem, który należy określić, jest zatem błąd prognozowanej pozycji

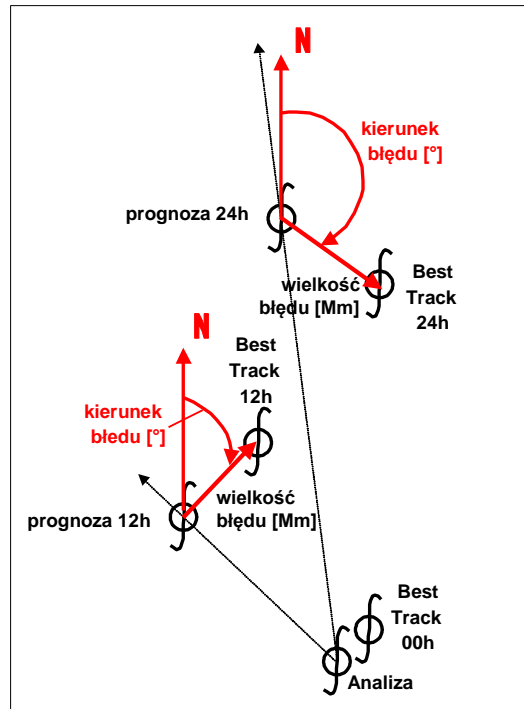
położenia centrum cyklonu. Opisują go dwie składowe – kierunek błędu i jego wartość. Jako kierunek błędu przyjęto kąt zawarty pomiędzy północą a linią poprowadzoną od prognozowanej pozycji, na której miał znaleźć się cyklon, do pozycji, na której znalazł się faktycznie. Natomiast wartość błędu to odległość pomiędzy tymi pozycjami (pozycją prognozowaną centrum cyklonu i pozycją osiągniętą przez cyklon). Jako pozycję rzeczywistą, na której znalazł się cyklon tropikalny, przyjęto pozycję z tzw. danych „best track”, które są opracowywane już po wystąpieniu cyklonu na podstawie wszelkich zebranych danych i stanowią najbliższe odzwierciedlenie rzeczywistości. Sposób postępowania był zdeterminowany strukturą komunikatów meteorologicznych i operowaniem przez nie kwadrantami NE, SE, SW i NW (rys. 2). Uzyskane wyniki wielkości błędów zawartych w prognozach z lat 1998 – 1999 dla Atlantyku Północnego pogrupowano według poszczególnych przedziałów czasowych prognoz zgodnie z kierunkiem błędu w czterech zbiorach odpowiadających sektorom z komunikatów, czyli NE ($0^\circ - 90^\circ$), SE ($90^\circ - 180^\circ$), SW ($180^\circ - 270^\circ$), NW ($270^\circ - 360^\circ$).

Rozgraniczono zbiór danych ze względu na stopień rozwoju i intensywności cyklonu na stadium depresji tropikalnej TD, sztormu tropikalnego TS i cyklonu tropikalnego TC. Otrzymano zatem 12 zbiorów liczb reprezentujących wartości błędu. Przykładowe wyniki przedstawia rysunek 3.



Rys. 1. Obszar do omińnięcia na przykładzie analizy i prognozy 72 h cyklonu Gert z dnia 16.09.1999 r. 03UTC [5]

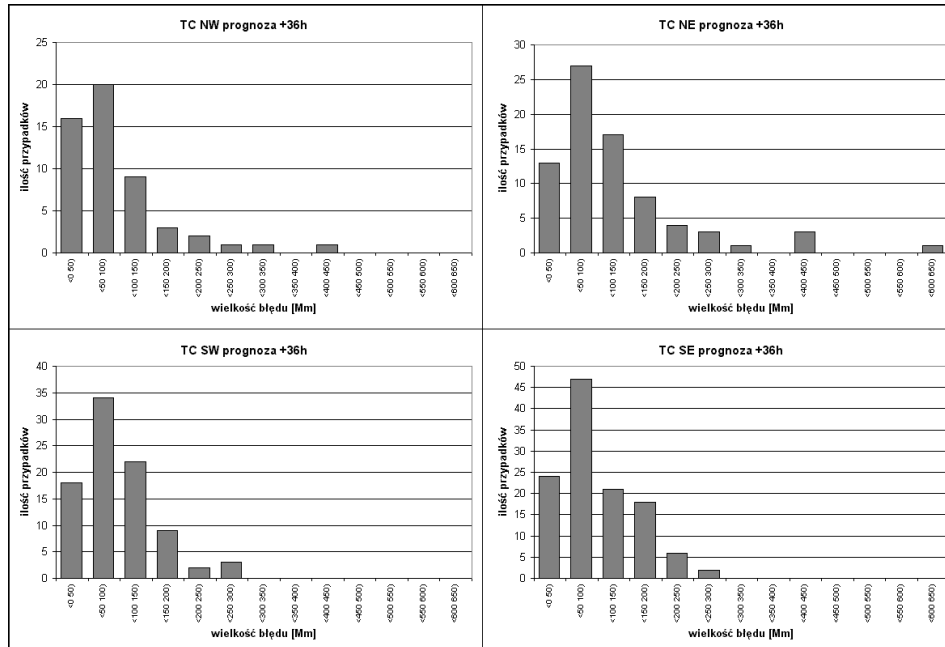
Fig. 1. Cyclone area to be avoided: tropical cyclone Gert 72 h forecast and analysis (16.09.99. 03UTC) [5]



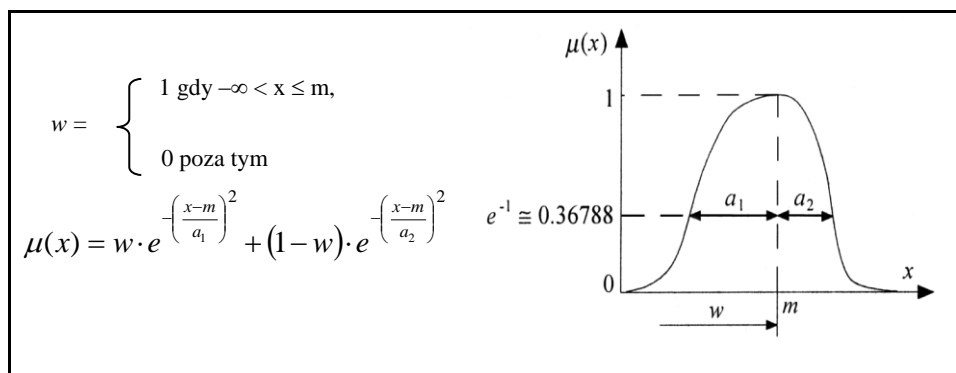
Rys. 2. Sposób określania elementów błędu prognozowanej pozycji cyklonu tropikalnego
 Fig. 2. Manner of determining tropical cyclone position errors

Kolejny krok to opisanie tych wielkości jako zbiorów rozmytych i znalezienie odpowiedniej funkcji przynależności. Najlepiej opisującą otrzymane dane okazała się niesymetryczna funkcja Gaussa (rys. 4). Przykładowy rozkład wielkości błędów (błąd położenia centrum cyklonu i błąd prognozowanego zasięgu strefy sztormowej wiatrów ≥ 34 kt) dla kwadrantu SE, stadium cyklonu TC, prognozy +36 godzin i ich opis funkcjami przynależności przedstawia rysunek 5.

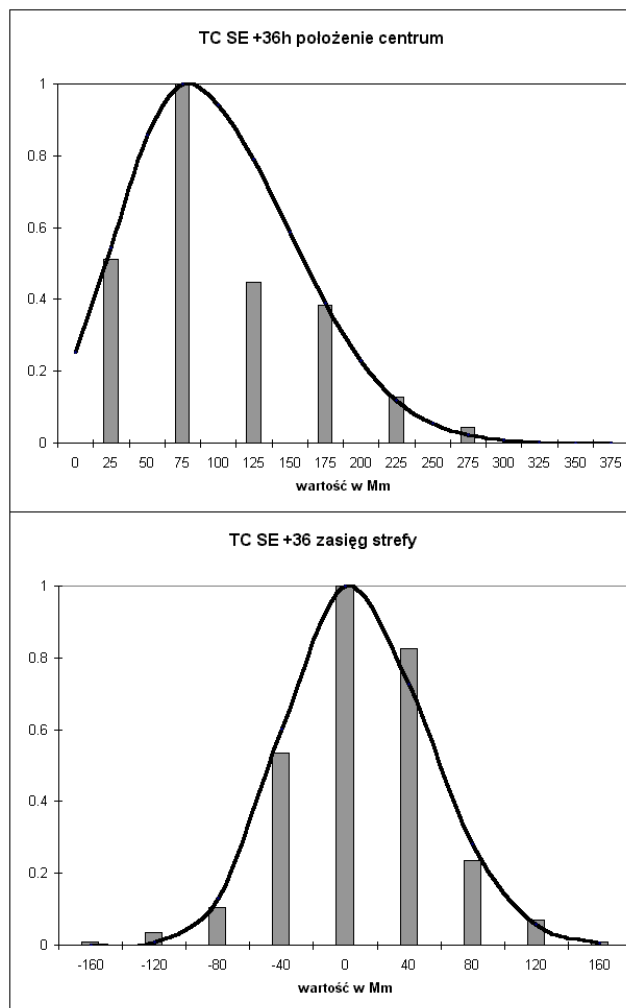
Jak widać na rysunku 3 dla wszystkich sektorów kierunkowych błędy położenia pozycji centrum cyklonu dla prognozy 36 h najczęściej zawierały się w przedziale $<50 \div 100$ Mm). Błąd prognozy zasięgu strefy sztormowej zawierał się najczęściej w przedziale $<-20 \div 20$ Mm). Rozrzut wielkości przeciętnie zawierał się w granicach ± 120 Mm. W znacznej mierze wynikało to z niedokładnego przewidywania momentu zaniku cyklonu lub zmiany jego intensywności.



Rys. 3. Rozkład wielkości błędu prognozy +36 h położenia centrum cyklonu w stadium TC dla poszczególnych kwadrantów kierunkowych (lata 1998 – 1999, Północny Atlantyk)
 Fig. 3. Distribution of tropical cyclone center location error for 36h prognosis, TC stage for each sector (1998-1999, North Atlantic)



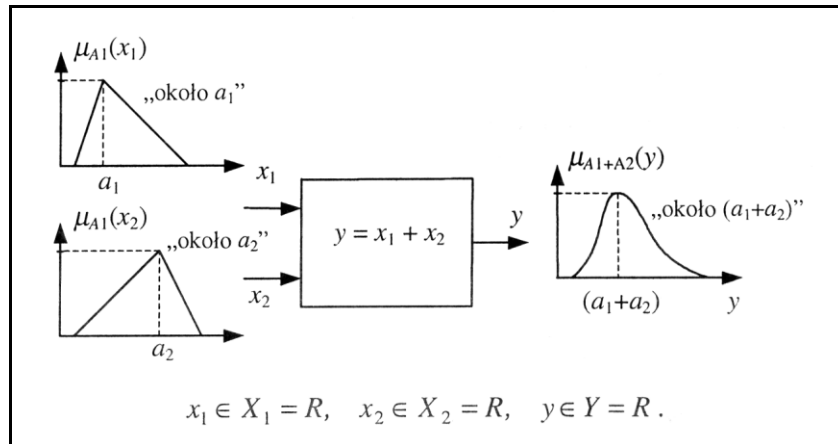
Rys. 4. Niesymetryczna funkcja Gaussa
 Fig. 4. Asymmetrical Gauss function



Rys. 5. Rozkład wielkości błędu położenia centrum i zasięgu strefy sztormowej wiatrów 34 kt dla kwadrantu SE prognozy 36-godzinnej i odpowiadające im funkcje przynależności
Fig. 5. Distribution of cyclone center location error value and storm field range error for SE sector, +36h forecast with corresponding functions of membership

Kierując się wymaganiami nawigatora, co do bezpiecznego określenia strefy zagrożenia cyklonem, należałoby zsumować wielkości błędów mające wpływ na zasięg domeny cyklonu w danym kwadrancie. W przypadku prognoz będzie to uwzględnienie błędu pozycji centrum cyklonu oraz błędu zasięgu strefy sztormowej dla danego stadium rozwoju cyklonu (TD, TS, TC) w postaci liczb rozmytych.

Zagadnienie dodawania liczb rozmytych ilustruje rysunek 6.



Rys. 6. Nierozmyty system dodający dwie liczby rozmyte [2]
 Fig. 6. Non-fuzzy system summing up two fuzzy numbers

W celu ułatwienia obliczeń zastosowano uproszczoną formę operacji arytmetycznej, opartej na reprezentacji L-R liczb rozmytych [2]. Ponieważ przebieg niesymetryczny funkcji Gaussa jest opisany trzema parametrami: m , a_1 , a_2 , zatem liczby rozmyte opisujące interesujące nas wielkości błędów możemy przedstawić w postaci trójek:

$$A_1 = (m_{A_1}, a_{1A_1}, a_{2A_1})$$

$$A_2 = (m_{A_2}, a_{1A_2}, a_{2A_2})$$

Tak więc ich sumę możemy wyrazić następująco:

$$(A_1 + A_2) = (m_{A_1+A_2}, A_{1A_1+A_2}, A_{2A_1+A_2})$$

Ponieważ:

$$m_{A_1+A_2} = m_{A_1} + m_{A_2},$$

$$A_{1A_1+A_2} = A_{1A_1} + A_{1A_2},$$

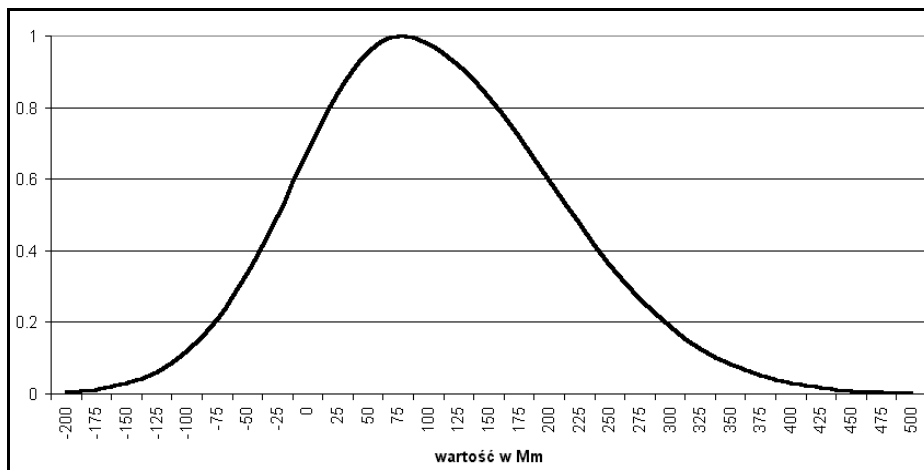
$$A_{2A_1+A_2} = A_{2A_1} + A_{2A_2},$$

zatem suma $(A_1 + A_2)$:

$$(A_1 + A_2) = (m_{A_1} + m_{A_2}, A_{1A_1} + A_{1A_2}, A_{2A_1} + A_{2A_2})$$

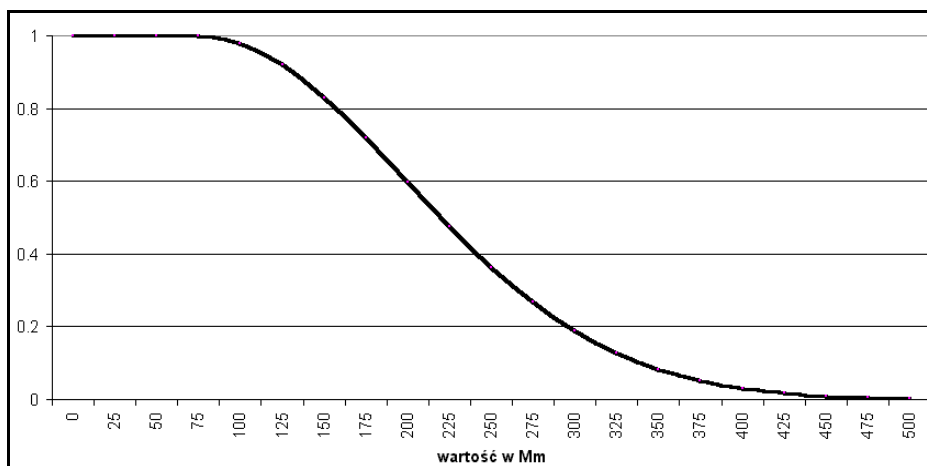
Przykład tak obliczonej sumy (suma wielkości z rys. 5) przedstawia rysunek 7.

Jeżeli przyjmiemy założenie, iż w żadnym przypadku nie przekraczamy granicy wyznaczonej przez punkty, w których przekonanie o występowaniu cyklonu osiąga wartość maksymalną, to wówczas, jeżeli $x \leq m$, to $\mu(x) = 1$. Tak wyznaczony zasięg błędu przyjmie postać jak na rysunku 8.



Rys. 7. Suma błędu położenia centrum i błędu zasięgu strefy sztormowej (dla prognozy +36 h, kwadrantu SE, stadium TC)

Fig. 7. Sum of center location error and storm field range error (for 36h forecast, SE sector, TC stage)



Rys. 8. Suma błędu położenia centrum i błędu zasięgu strefy sztormowej (dla prognozy +36 h, kwadrantu SE, stadium rozwoju cyklonu TC) dla założenia, jeżeli $x \leq m$, to $\mu(x) = 1$

Fig. 8. Sum of center location error and storm field range error (for 36h forecast, SE sector, TC stage) for the assumption that if $x \leq m$, then $\mu(x) = 1$

Zestawienie wartości m , $A1$, $A2$ i ich sumy dla przedziału prognoz +36 h zawiera tabela 1. Graficzny obraz zasięgu błędu całkowitego prognoz dla poszczególnych stadiów rozwoju cyklonu dla $\mu(x) = 1$ przedstawia rysunek 9.

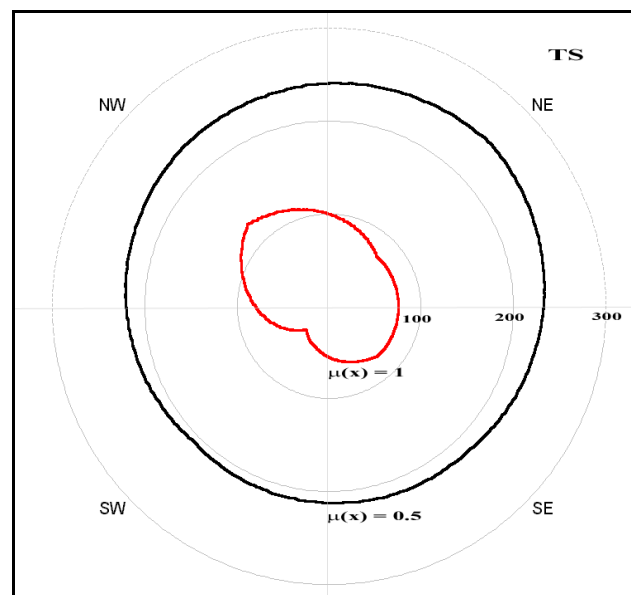
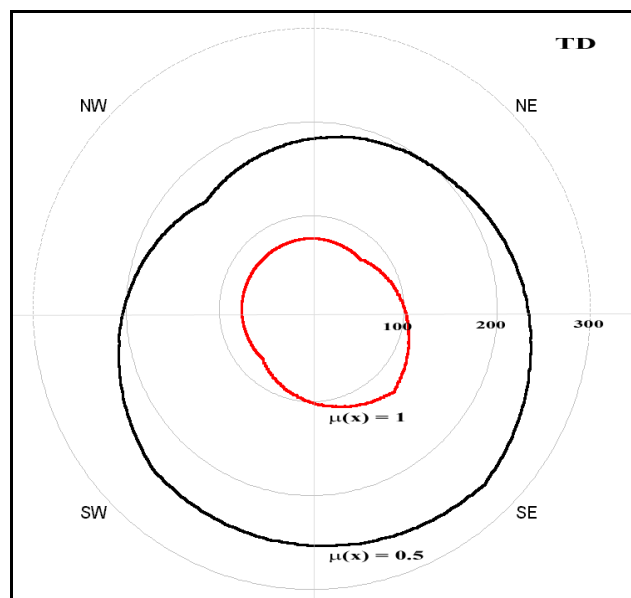
Tabela 1

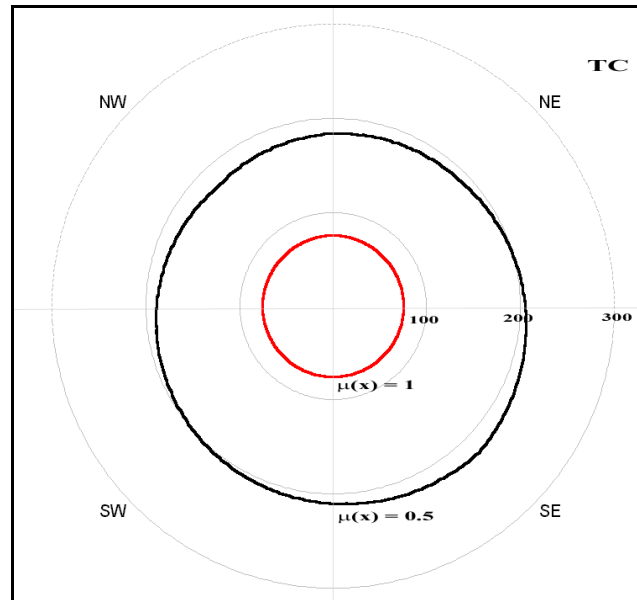
Wartości m , $A1$, $A2$, opisujące funkcje przynależności rozmytych elementów błędu prognoz +36 h
m, A1, A2 values, describing functions of membership of fuzzy 36h forecast error elements

	Rodzaj błędu	Parametr	Kwadrant			
			NE	SE	SW	NW
Tropica Depression TD	Pozycja centrum	m	75	125	75	75
		A1	60	83	32	31
		A2	119	131	163	75
	Zasięg strefy	m	0	0	0	0
		A1	47	51	82	38
		A2	33	36	38	29
	Suma	m	75	125	75	75
		A1	107	134	114	69
		A2	152	167	201	104
Tropica Storm TS	Pozycja centrum	m	75	75	75	125
		A1	63	40	40	125
		A2	149	114	120	75
	Zasięg strefy	m	0	0	-40	0
		A1	46	56	38	60
		A2	59	57	86	55
	Suma	m	75	75	35	125
		A1	107	96	78	185
		A2	208	171	206	130
Tropica Cyclone TC	Pozycja centrum	m	75	75	75	75
		A1	62	64	65	77
		A2	89	103	86	64
	Zasięg strefy	m	0	0	0	0
		A1	40	56	64	63
		A2	51	71	64	58
	Suma	m	75	75	75	75
		A1	102	120	129	140
		A2	140	174	150	122

Jak widać na przykładzie rysunku 9 i tabeli 1 stadium rozwoju cyklonu ma istotny wpływ na kształt wyznaczonej domeny cyklonu. Najbardziej regularny kształt prezentuje domena cyklonu (traktowana w tym przypadku jako złożenie błędów), będącego w stadium w pełni dojrzałym (TC) i to bez względu na stopień przynależności z jakim jest wykreślana. Są to domeny samego błędu

(pozycji centrum i zasięgu strefy). W konkretnych przypadkach na kształt obszaru będzie w równie istotnym stopniu wpływać zasięg prognozowany w komunikacji. Zauważalne jest natomiast odejście od okręgu, czy też figury złożonej z ćwiartek okręgu (rys. 1), na rzecz obszaru opisywanego w sposób bardziej naturalny.





Rys. 9. Graficzny obraz zasięgu błęd całkowitego prognoz 36 h dla poszczególnych stadiów rozwoju cyklonu dla $\mu(x) = 1$ i dla $\mu(x) = 0,5$ (zasięg w Nm)

Fig. 9. Graphic representation of 36 h forecast complete error for each stage of cyclone development for $\mu(x) = 1$ and $\mu(x) = 0.5$ (range in Nm)

Podsumowanie

W związku z przedłużeniem prognoz o cyklonach tropikalnych publikowanych dla potrzeb żeglugi morskiej (72 h, 120 h), celowe jest uwzględnienie tej informacji w programowaniu tras statków na oceanach. Proponuje się interpretować tę informację jako domenę rozmytą cyklonu z określeniem błędów prognozowanego położenia centrum cyklonu i błędu prognozowanego zasięgu strefy sztormowej sektorów ≥ 34 węzły.

Poprzez opisanie tych parametrów funkcjami przynależności i stosując operacje na liczbach rozmytych, obliczono domeny dla trzech stadiów zaburzeń tropikalnych (TD, TS, TC) na przykładzie rzeczywistych danych z lat 1998 – 1999 na Atlantyku Północnym na przykładzie prognoz 36-godzinnych.

Literatura

1. Holweg E.J., *Mariner's guide for hurricane awareness in the North Atlantic basin*. NOAA, National Weather Service, 2000.
2. Piegat A., *Modelowanie i sterowanie rozmyte*, Akademicka Oficyna Wydawnicza EXIT, Warszawa 1999.
3. Wiśniewski B., Medyna P., *Ocena informacji o cyklonach tropikalnych uzyskiwanych dla celów żeglugi*. VIII Konferencja Naukowo-Techniczna Inżynierii Ruchu Morskiego, WSM Szczecin, listopad 1999.
4. Wiśniewski B., Medyna P., Drozd A., *Analysis of exactitude of tropical cyclone position center prognosis on Northern Atlantic for weather navigation of the ship*. XII Międzynarodowa Konferencja Naukowo-Techniczna „Rola nawigacji w zabezpieczeniu działalności ludzkiej na morzu”, Akademia Marynarki Wojennej, Gdynia, listopad 2000.
5. Wiśniewski B., Medyna P., Chomski J., *Uwzględnienie dynamiki pola sztorowego cyklonu w optymalizacji drogi morskiej statku*. IV Sympozjum Nawigacyjne, Wyższa Szkoła Morska, Wydział Nawigacyjny, Gdynia, 19-20 czerwca 2001 r.
6. Wiśniewski B., Drozd A., Chomski J., Medyna P., *Omijanie cyklonów tropikalnych w żegludze oceanicznej*, „Inżynieria Morska” – 2001/5.

Wpłynęło do redakcji w lutym 2004 r.

Recenzenci

prof. dr inż. kpt.ż.w. Mirosław Jurdziński
prof. dr hab. inż. Andrzej Stateczny

Adresy Autorów

prof. dr hab. inż. Bernard Wiśniewski
mgr Piotr Medyna
Akademia Morska w Szczecinie
Instytut Nawigacji Morskiej
ul. Wały Chrobrego 1-2, 70-500 Szczecin