# Analiza wolnozmiennych składowych falowania w strefie brzegowej na południowym Bałtyku

Dr inż. Piotr Szmytkiewicz, dr hab. inż. Grzegorz Różyński, prof. IBW PAN Instytut Budownictwa Wodnego PAN w Gdańsku

Przedstawiana w niniejszym artykule analiza jest wynikiem realizacji w IBW PAN grantu badawczego NCN pt. "Analiza wpływu falowania podgrawitacyjnego i wiatrowego na przebudowę dna i brzegu morskiego – rozbudowa i weryfikacja mo*deli matematycznych i numerycznych"*. W ramach tego grantu, jako jedno z głównych przedsięwzięć, wykonano ekspedycję pomiarową w Morskim Laboratorium Brzegowym IBW PAN w Lubiatowie w dniach 17.09.2014 – 04.12.2015. W jej trakcie

mierzono w płytkowodnej części strefy brzegowej, na czterech sondach strunowych, położenie zwierciadła wody z częstotliwością 10 Hz. Pozwoliło to na szczegółowe określenie procentowego udziału różnych składowych częstotliwościowych w całości spektrum widma falowania w strefie brzegowej. Dodatkowo, na sondzie centralnej umieszczono prądomierz elektromagnetyczny w celu ułatwienia identyfikacji i weryfikacji wyodrębnionych wolnozmiennych składowych falowania (fale podgrawitacyjne) za pomocą odpowiadających im wzdłuż-, do- i odbrzegowych składowych przepływów wody.

Przedstawiane wyniki zostały zainspirowane przez oraz są rozszerzeniem prac wykonanych w ramach rozprawy doktorskiej [2], gdzie zastosowano jedynie dwie sondy w płytkowodnym obszarze strefy brzegowej. Obecne pomiary, wykonane na czterech sondach pomiarowych, rozmieszczonych w tym obszarze strefy brzegowej, stanowiły logiczne rozszerzenie prowadzonych wcześniej badań i analiz, ukierunkowanych na bardziej precyzyjną i mniej arbitralną identyfikację długości wolnozmiennych składowych falowania, rozumianych jako fale podgrawitacyjne. W konsekwencji pozwoliło to na proste określenie związanych z falami podgrawitacyjnymi liczb modalnych bez konieczności wykonywania problematycznych i dyskusyjnych założeń dotyczących szerokości strefy przyboju.

#### **INSTRUMENTARIUM POMIAROWE**

Na rys. 1 przedstawiono rozmieszczenie przyrządów pomiarowych. Trzy sondy (KE- "wschodnia", KS – "południowa", a właściwie centralna i KW – "zachodnia") znajdują się w odległości około 60 m od brzegu i są posadowione na głębokości około 0,6 m, a wzdłużbrzegowo oddalone od siebie o około 200 m. Jedną sondę falową (KN – "północna", czyli odmorska) posadowiono w odległości około 100 m od brzegu, na głębokości około 1,5 m. W tabl.1 przedstawiono współrzędne posadowienia urządzeń pomiarowych w lokalnym układzie geodzyjnym. Urządzenia pomiarowe zainstalowane w obszarze płytkowodnym mierzą z częstotliwością próbkowania 10 Hz wzniesienia swobodnej powierzchni wody. Prędkości prądu wzdłużbrzegowego i poprzecznego do brzegu są mierzone z taką samą częstotliwością równocześnie sondą centralną KS.

	Tabl. 1.	Współrzędne	geog	raficzne
i	głębokość	posadowienia	sond	strunowych

Sonda	Współrzędne	Głębokość posadowienia	
KE	772903.550	425606.150	-0,757
KN	772845.7666	425423.5859	-1,6672
KS	772828.7374	425430.0403	-0,6836
KW	772763.5978	425257.0533	-0,382

Na podstawie tabl. 1 można łatwo określić dokładne odległości między sondami:

- wschodniej od centralnej:  $L_{KE-KS} = 191,34 \text{ m},$
- zachodniej od centralnej:  $L_{KS-KW} = 184,85 \text{ m},$
- wschodniej od odmorskiej:  $L_{KE-KN} = 191,49 \text{ m},$
- zachodniej od odmorskiej:  $L_{KN-KW}$  = 185,68 m,
- wschodniej od zachodniej:  $L_{KE-KW}$  = 376,11 m,
- centralnej od odmorskiej:  $L_{KN-KS} = 18,21$  m.

Należy też zwrócić uwagę na stosunkowo płytką głębokość dna na sondzie KW, w stosunku do KS i KE. Ma to wpływ na rozkład energii falowej wśród różnych składowych częstotliwościowych, szczególnie w paśmie falowania wiatrowego.



Rys. 1. Rozmieszczenie sond falowych w trakcie realizacji ekspedycji pomiarowej

#### METODY ANALIZY POMIARÓW

Problem analizy niezwykle obszernych danych pomiarowych (każdy 24-godzinny szereg czasowy zawiera  $24 \times 3600 \times 10 = 864000$  pomiarów) wymaga zastosowania wydajnych metod rozkładu tych szeregów na niezależne od siebie, rozłączne spektralnie (choć addytywne) składowe częstotliwościowe. W tym celu, zastosowano dyskretną transformację falkową (*Discrete Wavelet Transform – DWT*) na podstawie prawie symetrycznej funkcji falkowej rodzaju 'coif5'. Funkcja ta była już stosowana poprzednio w badaniach stanowiących podstawę wspomnianej już rozporawy doktorskiej. Przy częstotliwości próbkowania równej 10 Hz pasmo o najwyższych częstotliwościach, a zatem najkrótszych okresach (detal D1), wyodrębnione dzięki metodzie DWT, będzie zawierać przedział częstotliwości

Tabl. 2. Przedziały okresów detali metody DWT przy częstotliwości próbkowania 10 Hz

Nazwa detalu	Przedział okresów [s]	Uwagi	
D1	0,2 ÷ 0,4		
D2	$0,4 \div 0,8$	Drobne zafalowania wody	
D3	0,8 ÷ 1,6		
D4	1,6 ÷ 3,2	Tzw. druga składowa harmoniczna	
D5	3,2 ÷ 6,4	Falowanie wiatrowe	
D6	6,4 ÷ 12,8	Falowanie rozkołysu	
D7	12,8 ÷ 25,6		
D8	25,6 ÷ 51,2		
D9	51,2 ÷ 102,4	Falowanie podgrawitacyjne	
D10	102,4 ÷ 204,8		
D11	204,8 ÷ 409,6		
D12	409,6 ÷ 819,2		
D13	819,2 ÷ 1638,4		
D14	1638,4 ÷ 3276,8	Gradientalne zmiany zwierciadła	
A14 (jest to tzw. gładka aproksy- macja zawierająca składowe o okre- sach dłuższych niż zawarte w D14)		(spiętrzenia sztormowe, przejście wyżu/niżu atmosferycznego, itp.).	

 $(2,5 \div 5 \text{ Hz})$ , czyli okresy  $(0,2 \div 0,4 \text{ s})$ . Pasmo o prawie najwyższych częstotliwościach (detal D2) będzie zawarte w przedziale  $(1,25 \div 2,5 \text{ Hz})$ , czyli będzie obejmować okresy  $0,4 \div 0,8 \text{ s}$ . Przedziały okresów pozostałych detali, określone w podobny sposób, podano w tabl. 2.

Ponadto, podjęto próbę wykorzystania metod analizy widma osobliwego (*Singular Spectrum Analysis SSA*) oraz empirycznych wzorców rozkładu (*Empirical Mode Decomposition EMD*) do bardziej precyzyjnego rozdzielenia składowych w obrębie jednego detalu, wyodrębnionego przez analizę falkową, w przypadku gdy taki detal cechował się dwupikowym charakterem swojej funkcji gęstości widmowej. Wnioski płynące z tych prób zamieszczono w części końcowej artykułu.

Analizę poszczególnych detali wykonano za pomocą ich analizy widmowej (określenie gęstości widmowej detali) oraz funkcji autokorelacji. Za ich pomocą określono okresy piku poszczególnych detali. Funkcje interkorelacji pomiędzy detalami z różnych sond dla tego samego przedziału częstotliwościowego pozwoliły na określenie długości fal składowych wolnozmiennych, identyfikowanych jako fale podgrawitacyjne. Tok rozumowania prowadzący do oszacowania tych długości przez analizę funkcji interkorelacyjnych przedstawiono w dalszej części artykułu.

## ANALIZA WYNIKÓW

Z badawczego punktu widzenia, w okresie pomiarowym od 17 września do 4 grudnia 2014 roku dominowało słabe falowanie. Zazwyczaj było ono zbyt słabe, aby na zasadniczo dyssypatywnym brzegu morskim w rejonie MLB Lubiatowo mogło wystąpić falowanie podgrawitacyjne. Najbardziej obiecującym wyjątkiem było zdarzenie z dnia 06.11.2014 roku, które można uznać za słaby sztorm, w którym składowe podgrawitacyjne mogą być już obecne. W tabl. 3 przedstawiono podstawowe parametry statystyczne zapisów z sond falowych i prądomierza w tym dniu.

Z danych zamieszczonych w tabl. 3 można natychmiast wyciągnąć dwa bardzo ciekawe wnioski. Po pierwsze, odchylenia standardowe pomiarów poziomów wody na sondach KN, KS i KE są do siebie bardzo zbliżone, natomiast odchylenie na sondzie KW jest rażąco mniejsze. Odchylenia standardowe są miernikiem energii falowej zawartej w pomiarze, stąd widać, że na sondzie KW jest ona zdecydowanie mniejsza. Wynika to z faktu, że sonda KW była umieszczona nad płytszym dnem i lokalna dyssypacja energii falowej w takim miejscu była większa niż w rejonie pozostałych trzech sond. Dowodzi to istotności lokal-

Mierzona wielkość	N ważnych	Średnia	Minimum	Maksimum	Odchylenie standardowe
KW [m] sonda zachodnia	861070	0,439488	0,13994	1,295207	0,107729
KN [m] sonda północna – odmorska	861070	0,508243	0,02004	1,642128	0,189522
KS [m] sonda południowa – centralna	861070	0,576705	0,07556	1,678992	0,178288
KE [m] sonda wschodnia	861070	0,651329	0,13362	1,726550	0,170618
LC [m/s] prąd wzdłużbrzegowy, wartość dodatnia kierunek W-E	861070	0,317397	-0,88374	1,431540	0,294613
CC [m/s] prąd poprzeczny, wartość dodatnia kierunek odbrzegowy (N)	861070	-0,401159	-2,28476	1,527398	0,435304

 Tabl. 3. Podstawowe parametry statystyczne falowania w dniu 06.11.2014

nych wypłyceń dna w pobliżu linii brzegowej, które mają duży wpływ na jej chwilowe położenie. Wypłycenia takie mogą być dość trwałymi elementami morfologii strefy brzegowej w okresach względnego spokoju; zmiana ich konfiguracji jest możliwa jedynie po zaistnieniu odpowiednio silnych sztormów, gdzie dopływ energii falowej wzdłuż linii brzegowej ulega homogenizacji w miarę przedłużania się czasu trwania sztormu.

Po drugie, dodatnia wartość średnia prądu wzdłużbrzegowego wskazuje, że opisywana sytuacja hydrodynamiczna była sztormem, w którym fale podchodziły z sektora zachodniego i kierunek tego prądu przebiegał zasadniczo z zachodu na wschód. Jest to istotne przy analizie pomiarów za pomocą funkcji interkorelacji, gdyż w takim przypadku zapis na sondzie KW można traktować jako "zmienną niezależną", sterującą zapisami na sondach KS, KN i KE, które są położone na wschód od KW. Tak samo zapisy na sondach KN i KS powinny "sterować" informacją na KE. Jest to najbardziej istotne przy analizie detali, będącymi kandydatami na progresywne fale podgrawitacyjne, które powinny rozchodzić się z zachodu na wschód.

W tabl. 4  $\div$  7 zawarto wyniki analizy DWT 4 sond falowych. Wyniki te demonstrują, jak istotna jest lokalna głębokość dna. Na najpłytszej sondzie KW (głębokość 0,38 m) zarejestrowane wahania poziomu wody miały najmniejszą średnią amplitudę opisywaną przez odchylenie standardowe całego zapisu; wynosiło ono jedynie 0,108 m, podczas gdy na najgłębszej sondzie KN (głębokość 1,67 m) wyniosło ono 0,189 m, a na sondach KS i KE (głębokości odpowiednio 0,68 i 0,76 m) 0,178 m i 0,171 m. Takie wyniki oznaczają, że w rejonie sondy KW występuje dużo większa dyssypacja energii falowej. Widać to wyraźnie na trzech głównych składowych klimatu falowego. Pierwszą z nich jest tzw. druga składowa harmoniczna ogólnego widma falowego (detale D4), jaka tworzy się w rezultacie nieliniowych przepływów energii między różnymi częstotliwościami falowania i ma okres piku równy połowie piku falowania wiatrowego. Na sondzie KW odchylenie standardowe tej składowej wyniosło 0,042 m, na sondzie KN 0,094 m, na sondzie KS 0,082 m oraz na sondzie KE 0,084 m. Drugą z nich są detale D5 falowania wiatrowego. Na sondzie KW odchylenie standardowe tego składnika wyniosło 0,052 m, na sondzie KN 0,11 m, na sondzie KS 0,097 m, a na sondzie KE 0,089 m. Trzecim składnikiem silnie kontrolowanym przez lokalną głębokość akwenu jest fala rozkołysu (detale D6), dla których na sondzie KW odchylenie standardowe wyniosło 0,058 m, KN 0,105 m, KS 0,105 m i KE 0,088 m. Tak więc, powyższe zestawienie pokazuje, jakie częstotliwości klimatu falowego przekazuja energię użyta do modyfikacji konfiguracji dna w warunkach sztormowych na płytkich częściach akwenu.

Dużo ciekawsza sytuacja występuje w przypadku detali D7  $\div$  D11, mających opisywać falowanie podgrawitacyjne. Na najpłycej położonej sondzie KW odchylenie standardowe zsumowanych detali D7  $\div$  D11 (przypominamy, że addytywność detali jest bardzo silną zaletą metody DWT) wynosi 0,0408 m, na najgłębszej sondzie KN 0,0356 m, a na KS i KE odpowiednio 0,0405 m i 0,0388 m. Szczególnie dwie pierwsze wielkości są zgodne z teorią fal podgrawitacyjnych, która świadczą o tym, że największa amplituda tych fal znajduje się w pobliżu linii brzegowej, tzn. im płytszy akwen i im bliższe sąsiedztwo brzegu, tym należy oczekiwać większych amplitud tego rodzaju falowania.

Element sygnału	Odchylenie standardowe [m]	% wariancji	Przedział czasowy [s]	Uwagi
Surowy szereg KW	0,1077	100	24h	
D1	0,0066	0,37	0,2 ÷ 0,4	
D2	0,0131	1,7	0,4 ÷ 0,8	Drobne zafalowania powierzchni wody zawierają 9,17% całko- witej energii falowania
D3	0,0287	7,1	0,8÷1,6	
D4	0,0425	15,6	1,6÷3,2	Druga składowa harmoniczna
D5	0,0524	23,7	3,2 ÷ 6,4	Falowanie wiatrowe
D6	0,0581	29,1	6,4 ÷ 12,8	Rozkołys – najistotniejszy element klimatu falowego na bardzo płytkiej wodzie, głębokość 0,38 m
D7	0,0312	8,4	12,8 ÷ 25,6	
D8	0,0190	3,1	25,6 ÷ 51,2	
D9	0,0140	1,7	51,2 ÷ 102,4	Falowanie podgrawitacyjne może zawierać do 14,36% wariancji sygnału na KW
D10	0,0103	0,91	102,4 ÷ 204,8	
D11	0,0054	0,25	204,8 ÷ 409,6	
D12	0,0076	0,50	409,6 ÷ 819,2	
D13	0,0084	0,61	819,2 ÷ 1638,4	7mionu andiantelno aquioraio do 9.520/ utarion :::
D14	0,0088	0,67	1638,4 ÷ 3276,8	Zinnany gradientanie zawierają do 8,55% wariancji sygnału
A14	0,0275	6,5	3276,8	

Tabl. 4. Rozkład energii falowej na składowe (detale) DWT na sondzie KW

Tabl 5 Rozklad energii falowe	i na skladowe (detal	a) DWT na sondzie KN
Table 5. Rozkiau chergh falowe	j na sklauowe (uctai	c) D W I ha sonuzic Kiv

Element sygnału	Odchylenie standardowe [m]	% wariancji	Przedział czasowy [s]	Uwagi
Surowy szereg KN	0,1895	100	24 h	
D1	0,0040	0,044	0,2 ÷ 0,4	
D2	0,0091	0,23	$0,4 \div 0,8$	Drobne zafalowania powierzchni wody zawierają 3,77% całko- witej energii falowania
D3	0,0355	3,5	0,8 ÷ 1,6	
D4	0,0937	24,4	1,6 ÷ 3,2	Druga składowa harmoniczna
D5	0,1104	33,9	3,2 ÷ 6,4	Falowanie wiatrowe – najistotniejszy element klimatu falowego na głębokości 1,67 m
D6	0,1052	30,8	6,4 ÷ 12,8	Rozkołys
D7	0,0238	1,6	12,8 ÷ 25,6	
D8	0,0216	1,3	25,6 ÷ 51,2	
D9	0,0124	0,42	51,2 ÷ 102,4	Falowanie podgrawitacyjne może zawierać do 3,54% wariancji sygnału na KN
D10	0,0072	0,14	102,4 ÷ 204,8	
D11	0,0052	0,075	204,8 ÷ 409,6	
D12	0,0078	0,17	409,6 ÷ 819,2	
D13	0,0085	0,20	819,2 ÷ 1638,4	
D14	0,0091	0,23	1638.4 ÷ 3276,8	Ziniany gradientaine zawierają do 5,45% wariancji sygnafu
A14	0,0320	2,85	3276,8	

#### Tabl. 6. Rozkład energii falowej na składowe (detale) DWT na sondzie KS

Element sygnału	Odchylenie standardowe [m]	% wariancji	Przedział czasowy [s]	Uwagi
Surowy szereg KS	0,1783	100	24 h	
D1	0,0056	0,10	0,2 ÷ 0,4	
D2	0,0137	0,60	$0,4 \div 0,8$	Drobne zafalowania powierzchni wody zawierają 6,9% całkowi- tej energii falowania
D3	0,0447	6,2	0,8 ÷ 1,6	
D4	0,0819	21,1	1,6 ÷ 3,2	2-ga składowa harmoniczna
D5	0,0965	28,7	3,2 ÷ 6,4	Falowanie wiatrowe
D6	0,1046	34,4	6,4 ÷ 12,8	Rozkołys – najistotniejszy element klimatu falowego na płytkiej wodzie, głębokość 0,68 m
D7	0,025	2	12,8 ÷ 25,6	
D8	0,0276	2,4	25,6 ÷ 51,2	
D9	0,0123	0,50	51,2 ÷ 102,4	Falowanie podgrawitacyjne może zawierać do 5,2% wariancji sygnału na KS
D10	0,0088	0,20	102,4 ÷ 204,8	
D11	0,0056	0,10	204,8 ÷ 409,6	
D12	0,0078	0,19	409,6 ÷ 819,2	
D13	0,0085	0,20	819,2 ÷ 1638,4	
D14	0,0091	0,20	1638,4 ÷ 3276,8	Ziniany gradientaine zawierają do 5,49% wariancji sygnafu
A14	0,0305	2,90	3276,8	

Tabl 7 Dogklad oporgii falowo	i na skladowa (dotale	) DWT no condzio KF
Tabl. 7. Rozkiau energii falowe	j na sklauowe (uetale	e) D w I ha sonuzie KE

Element sygnału	Odchylenie standardowe [m]	% wariancji	Przedział czasowy [s]	Uwagi
Surowy szereg KE	0,1706	100	24 h	
D1	0,0044	0,07	0,2 ÷ 0,4	
D2	0,0121	0,50	$0,4 \div 0,8$	Drobne zafalowania powierzchni wody zawierają 6,47% całko- witej energii falowania
D3	0,0414	5,9	0,8 ÷ 1,6	
D4	0,0836	24	1,6 ÷ 3,2	2-ga składowa harmoniczna
D5	0,0989	33,6	3,2 ÷ 6,4	Falowanie wiatrowe – najistotnieszy element klimatu falowego na płytkiej wodzie, głębokość 0,76 m
D6	0,0881	26,7	6,4 ÷ 12,8	Rozkołys
D7	0,0273	2,6	12,8 ÷ 25,6	
D8	0,0236	1,9	25,6 ÷ 51,2	
D9	0,0105	0,40	51,2 ÷ 102,4	Falowanie podgrawitacyjne może zawierać do 5,23% wariancji sygnału na KE
D10	0,0082	0,23	102,4 ÷ 204,8	
D11	0,0054	0,10	204,8 ÷ 409,6	
D12	0,0082	0,23	409,6 ÷ 819,2	
D13	0,0089	0,27	819,2 ÷ 1638,4	
D14	0,0091	0,28	1638,4 ÷ 3276,8	Ziniany gradientaine zawierają do 3,98% wariancji sygnatu
A14	0,0308	3,2	3276,8	]

# Tabl. 8. Rozkład energii prądu wzdłużbrzegowego (detale) DWT na sondzie KS

Element sygnału	Odchylenie standardowe [m/s]	% wariancji	Przedział czasowy [s]	Uwagi	
Szereg prądu wzdłużbrzegowego	0,2946	100	24h		
D1	0,0011	0,001	0,2 ÷ 0,4		
D2	0,0094	0,1	$0,4 \div 0,8$	Mniej niż 2% energii związanej z drobnymi oscylacjami wzdłużbrzegowego przepływu wody	
D3	0,0386	1,7	0,8 ÷ 1,6		
D4	0,0797	7,3	1,6÷3,2	Pasmo drugiej składowej harmonicznej obejmuje tylko 7,3% energii prądu wzdłużbrzegowego	
D5	0,1036	12,3	3,2 ÷ 6,4	Pasmo falowania wiatrowego obejmuje tylko 12,3% energii prądu wzdłużbrzegowego	
D6	0,1067	13,1	6,4 ÷ 12,8	Pasmo rozkołysu obejmuje tylko 13,1% energii prądu wzdłuż- brzegowego	
D7	0,0476	2,6	12,8 ÷ 25,6		
D8	0,0451	2,3	25,6 ÷ 51,2		
D9	0,0387	1,7	51,2 ÷ 102,4	Przepływy wody związane z wystąpieniem falowania podgrawi- tacyjnego zawierają 11,2% energii pradu wzdłużbrzegowego	
D10	0,0437	2,2	102,4 ÷ 204,8		
D11	0,0458	2,4	204,8 ÷ 409,6		
D12	0,0443	2,3	409,6 ÷ 819,2		
D13	0,0335	1,3	819,2 ÷ 1638,4	Prawie połowa energii sygnału związana z wolnozmiennym	
D14	0,0293	0,99	1638,4 ÷ 3276,8	z sektora zachodniego	
A14	0,2073	49,5	3276,8	1	

Tabl. 9. Rozkład energii prądu poprzecznego do brzegu (detale) DWT na sondzie KS

Element sygnału	Odchylenie standardowe [m/s]	% wariancji	Przedział czasowy [s]	Uwagi	
Szereg prądu poprzecznego	0,4353	100	24 h		
D1	0,002	0,002	0,2 ÷ 0,4		
D2	0,0113	0,07	$0,4 \div 0,8$	Mniej niż 2% energii związanej z drobnymi oscylacjami prądu poprzecznego	
D3	0,053	1,48	0,8 ÷ 1,6		
D4	0,149	11,7	1,6÷3,2	Pasmo drugiej składowej harmonicznej obejmuje 11,7% energii prądu popczecznego (falowy ruch orbitalny)	
D5	0,2004	21,2	3,2 ÷ 6,4	Pasmo falowania wiatrowego obejmuje 21,2% energii prądu poprzecznego (falowy ruch orbitalny)	
D6	0,1995	21	6,4 ÷ 12,8	Pasmo rozkołysu obejmuje tylko 21% energii prądu poprczecz- nego (falowy ruch orbitalny)	
D7	0,0746	2,9	12,8 ÷ 25,6		
D8	0,0655	2,3	25,6 ÷ 51,2	Przepływy wody związane z wystąpieniem falowania podgra-	
D9	0,0691	2,5	51,2 ÷ 102,4	witacyjnego zawierają 11,9% energii prądu poprzecznego; fale podgrawitacyjne nie są więc jedynymi składowymi falowania	
D10	0,0632	2,1	102,4 ÷ 204,8	w tych pasmach częstotliwościowych	
D11	0,063	2,1	204,8 ÷ 409,6		
D12	0,0593	1,85	409,6 ÷ 819,2		
D13	0,0424	0,95	819,2 ÷ 1638,4	Prawie połowa energii sygnału związana z wolnozmiennym	
D14	0,0363	0,069	1638,4 ÷ 3276,8	z sektora zachodniego	
A14	0,2349	29,1	3276,8	1	

Na koniec, najwolniej zmienne elementy rejestrowanych poziomów wody są wyjątkowo jednorodne. Na sondzie KW odchylenie standardowe zsumowanej gładkiej reprezentacj A14 i detali D12-D14 wynosi 0,0310 m, na sondzie KN 0,0352 m, na sondzie KS 0,0338 m, a na KE 0,0343 m. Elementy te opisują długookresowe wahania poziomu wody, w tym występujące w opisywanym zdarzeniu hydrodynamicznym spiętrzenie sztormowe, stąd wynik ten nie może zaskakiwać.

W tabl. 8 ÷ 9 zawarto wyniki analizy DWT prądu wzdłużbrzegowego i poprzecznego, pomierzonego na sondzie KS. W celu pokazania charakteru analizowanych szeregów czasowych na rys. 2 przedstawiono po lewej stronie zapis z sondy KS, a po prawej gładką aproksymację A14, gdzie uwidoczniono trend zmian poziomu wody w trakcie procesu rejestracji danych. Z kolei na rys. 3 pokazano szereg czasowy prądu wzdłużbrzegowego (po lewej) oraz jego trend wyrażony przez gładką aproksymację A14 (po prawej).

Gładka aproksymacja poziomu wody (wykres po prawej stronie rys. 2) pokazuje, że sztorm rozpoczął się około 10000 s po rozpoczęciu pomiarów, osiągnął maksimum po około



Rys. 2. Zapis z sondy falowej KS (z lewej) i element A14 opisujący trend zmian zwierciadła wody (z prawej)



Rys. 3. Zapis prądu wzdłużbrzegowego na sondzie KS (z lewej) oraz element A14 opisujący trend zmian wzdłużbrzegowego przepływu wody (z prawej)



Rys. 4. Zapis prądu poprzecznego na sondzie KS (z lewej) oraz element A14 opisujący trend zmian prostopadłego do brzegu przepływu wody (z prawej)

50000 s, po czym zaczął cichnąć. Jest to związane ze spiętrzeniem sztormowym, który opisuje ta gładka aproksymacja (wzrostem poziomu morza po 10000 s i jego zanikiem po 50000 s) Dodatnia wartość trendu prądu wzłużbrzegowego pokazuje, że dominowały przepływy wody z zachodu (W) na wschód (E). Załamanie tego przepływu nastąpiło dopiero po około 70000 s, co oznacza, że prąd wzdłużbrzegowy charakteryzuje się pewną bezwładnością w stosunku do trendu poziomu wody. Podobny wniosek można wyprowadzić na podstawie rys. 4, gdzie przedstawiono zapis i trend prądu poprzecznego; ujemne wartości trendu w czasie sztormu (10000 ÷ 70000 s) informują, że sonda KS znajdowała się w strefie prądu powrotnego, gdzie dominowały odbrzegowe przepływy wody.

Dalszą część analizy poświęcono badaniom wolnozmiennych składowych poziomów wody i prądów (detale D7-D11). Ze względu na ich wolnozmienny charakter elementy te zostały "zdziesiątkowane" i do dalszych badań zachowano co dziesiątą daną, bez utraty informacji. Udowodniono to przez określenie podstawowych charakterystyk statystycznych na zdziesiątkowanych szeregach (wartość średnia, minimum, maksimum, odchylenie standardowe), które okazały się identyczne jak dla "pełnych" szeregów. Innymi słowy, częstotliwość próbkowania tych detali zmniejszono do 1 Hz.

Na rys. 5 przedstawiono funkcję gęstości widmowej detalu D7, opisującą pasmo o okresach 12,8  $\div$  25,6 s, dla czterech sond. Na sondzie KW dominuje jednorodny pik o okresie  $T_1 = 21$  s. Istnieje także szczątkowy drugi pik o okresie  $T_2 = 16$  s. Podobny obraz występuje na sondzie KN. Natomiast na sondach KS i KE oba te piki są równoważne; wydaje się, że jedynie pik widoczny na wszystkich czterech sondach, a więc mający okres  $T_1$ , można uważać za falę podgrawitacyjną. Niestety, próba rozdziału tych pików metodą SSA oraz EMD zawiodła, demonstrując granicę rozdzielczości tych metod. W tej sytuacji można wywnioskować, że wyodrębnienie piku o okresie  $T_1$  jest możliwe jedynie za pomocą tradycyjnych narzędzi filtracji sygnałów, to jest cyfrowych filtrów dolnoprzepustowych lub ich kaskad (np. filtr Butterswortha wysokiego rzędu). Należy jednak w tym przypadku



Rys. 5. Gęstości widmowe detali D7 sond falowych KW (góra z lewej), KN (góra z prawej), KS (na dole z lewej) i KE ( na dole po prawej)

liczyć się ze stratą informacji (utrata usuniętych z sygnału częstotliwości) i opracować filtr optymalny ze względu na utratę informacji, co nie jest zadaniem trywialnym i będzie wymagać wielokrotnych powtórzeń, czyli działań metodą prób i błędów.

Do detali D7 wykonano też obliczenia funkcji interkorelacji. Okazało się, że ich maksima nie przekraczają wartości 0,05, a więc są nieistotne. Na tej podstawie stwierdzono, że detali D7 nie można uważać za fale podgrawitacyjne. Ostateczne potwierdzenie tego będzie możliwe po wykonaniu ich filtracji i ponownym określeniu funkcji interkorelacji oraz wzajemnej gęstości widmowej dla odfiltrowanych sygnałów, co będzie stanowić ciekawy temat przyszłego zadania badawczego.

Na rys. 6 przedstawiono funkcję gęstości widmowej detalu D8, opisującą pasmo o okresach  $25,6 \div 51,2$  s, dla czterech sond. Z wyjątkiem płytko położonej sondy KW wszystkie pozostałe sondy pokazują istnienie składowej o okresie piku T = 35 $\div 40$  s. Nieco więcej informacji można wydobyć z ich funkcji autokorelacji zamieszczonych na rys. 7. Są one bardzo gładkie, gdyż określono je do ponad 80000 elementów każdego detalu, i przedstawiają one wykładniczo tłumione cosinusoidy, czyli funkcje autokorelacji cyklicznego procesu losowego (jakim jest falowanie) o danym okresie piku. Maksima takiej funkcji odpowiadają krotnościom podstawowego okresu oscylacji (okres piku), a szybkość tłumienia opisuje "pamięć" sygnału. Wyestymowane za ich pomocą okresy dla D8 z sond falowych są zawarte w wąskim przedziale między 28 a 36 s, wobec czego założono, że potencjalnie występująca fala podgrawitacyjna powinna mieć okres T = 34 s.

Identyfikacji długości fali podgrawitacyjnej dokonuje się za pomocą funkcji interkorelacji detali zapisów sond falowych przy znanych odległościach między sondami oraz funkcji interkorelacji między poziomem wody na sondzie KS a składową wzdłużbrzegową i poprzeczną prądów rejestrowanych na tej sondzie. Na rys. 8a pokazano funkcję interkorelacji detalu D8 na sondzie KS i odpowiadającego mu detalu prądu wzdłużbrzegowego. Występujące maksimum interkorelacji przy odstępie  $\tau = 0$  jest prawie równe 0,4 i dowodzi istotności tej korelacji. Co więcej, funkcja ta jest prawie symetryczna względem  $\tau = 0$ , co



Rys. 6. Gęstości widmowe detali D8 sond falowych KW (góra z lewej), KN (góra z prawej), KS (na dole z lewej) i KE ( na dole po prawej)

powinno zachodzić w sytuacji, gdy wymuszenie (fala - poziom wody) jest rejestrowane w tym samym miejscu co odpowiedź, czyli wzdłużbrzegowy ruch orbitalny cząsteczek wody. Jest to bardzo ważna przesłanka występowania fali podrawitacyjnej, gdyż według teorii ma się ona przemieszczać równolegle do brzegu. Istotność korelacji dowodzi, że detal D8 prądu wzdłużbrzegowego zawiera ruch orbitalny takiej fali. Taki wniosek wspierany jest w pewnym stopniu bliską zeru interkorelacją detali D8 poziomu wody i prądu poprzecznego (zob. rys. 8b); przy odstępie  $\tau = 0$  jest ona ujemna i nie przekracza -0,1, czyli wskazuje na słabo skorelowany prąd odbrzegowy przy wzroście poziomu wody. Przy fali propagującej się dobrzegowo korelacja taka powinna być także ujemna (wystąpienie prądu powrotnego), lecz o większym module ze względu na identyczne położenie rejestracji obu sygnałów. Ponadto, analizowana funkcja interkorelacji jest też silnie asymetryczna względem  $\tau = 0$ , co jest przesłanką faktycznego braku związku między dwoma wielkościami rejestrowanymi w tym samym miejscu. Bardzo silna interkorelacja rzędu 0,8, dla  $\tau = 0$ , występuje natomiast między sondami KN i KS (rys. 7c). Jest to kolejną silną przesłanką istnienia fali podgrawitacyjnej, która przemieszcza się wzdłużbrzegowo jako jednorodne zaburzenie. Bardzo wysoka jest też symetria względem  $\tau = 0$ , co jest efektem bliskiej odległości obu sond (18 m) i wysokiej jednorodności fali.

Najciekawszy obraz przedstawia jednak rys. 8d, gdzie uwidoczniono funkcję interkorelacji pomiędzy zapisami sond KE i KN. Fala podgrawitacyjna przemieszcza się z zachodu na wschód, co oznacza, że najpierw jest rejestrowana na sondzie KN, a potem na KE. Z tego względu poznawczo użyteczna informacja, jaką ma ta funkcja, znajduje się wzdłuż ujemnej części osi odciętych. Maksimum tej funkcji przypada na odstęp -66 s, równy w przybliżeniu dwóm okresom detalu D8. Sama interkorelacja jest niewielka i równa 0,12, co nie może zaskakiwać ze względu na dość znaczną odległość między sondami (191,5 m.) Odległość ta jest dystansem, na którym propaguje się i ulega zakłócaniu zaburzenie rejestrowane na KN. W takiej sytuacji uzasadnione jest przyjęcie założenia, że długość analizowanej fali jest mniej więcej równa połowie tej odległości, czyli L = 96 m. Rysunek ten oddaje ideę wyznaczania długości fali poprzez funkcję interkorelacyjną: poszukujemy maksimum tej funkcji



Rys. 7. Funkcje autokorelacji detali D8 sond falowych KW (góra z lewej), KN (góra z prawej), KS (na dole z lewej) i KE (na dole po prawej)

i określamy odstęp, gdzie ono występuje. Następnie liczymy, ile okresów zawiera ten odstęp i znając odległość między sondami, wyznaczamy długość fali przez stosunek odległości między sondami do liczby okresów piku zawartych między  $\tau = 0$  a  $\tau = \tau_{max}$ , gdzie znajduje się maksimum funkcji interkorelacji. W analizowanym przypadku odległość między sondami zawierała mniej więcej dwa okresy fali. Należy przy tym jednak pamiętać, że przedstawione rozumowanie może nie być do końca ścisłe ze względu na fakt, że rozstaw sond determinuje rozdzielczość oszacowania długości fali podgrawitacyjnej. Rozumowanie to jest równocześnie najważniejszym aspektem przedstawianej analizy, gdyż wyznacza skale przestrzenne w badaniach fal podgrawitacyjnych na połudnowym Bałtyku. Ponadto, z rys. 8d można wyprowadzić też koncepcję bardziej dokładnego oszacowania długości fal podgrawitacyjnych poprzez zwiększenie liczby sond falowych między KN i KE i wykonanie analiz interkorelacji przy zwiększonej liczbie tych sond. Pozwoli to na bardziej precyzyjną identyfikację długości zarejestrowanych fal podgrawitacyjnych.

Niemal identyczny obraz, jak interkorelacja pomiędzy sondami KN i KE, przedstawia funkcja interkorelacji pomiędzy detalami D8 z sond KE i KS (nie pokazana z braku miejsca). Bardzo słabe interkorelacje przedstawiają natomiast funkcje interkorelacji sond KW i KN oraz KW i KS. Problem ten (niejednorodność częstotliwościowa) jest podobny do sytuacji opisanej przy analizie detali D7: wymagana jest filtracja zapisów na KW w celu wyodrębnienia z niego elementu o okresie piku rzędu 33 s.

Ostatnim parametrem fali grawitacyjnej, jaki pozostaje do określenia po wyznaczeniu okresu i długości fali, jest liczba modalna *n*, czyli liczba przecięć fali podgrawitacyjnej ze średnim poziomem morza w kierunku odbrzegowym. Liczbę tę można oszacować ze związku dyspersyjnego następującym wzorem [1]:

$$\omega^2 = gk_v(2n+1)\operatorname{tg}\beta$$

Dla okresu T = 34 s, długości fali L = 96 m i średniego nachylenia dna w rejonie Lubiatowa tg  $\beta = 0,01$  otrzymuje-



Rys. 8. Funkcje interkorelacji dla detali D8: (a) poziom wody na sondzie KS i prąd wzdłużbrzegowy na sondzie KS, (b) poziom wody na sondzie KS i prąd poprzeczny na sondzie KS, (c) poziom wody na sondach KN i KS, (d) poziom wody na sondach KE i KN.

my liczbę modalną n = 2. Oznacza to, że mamy do czynienia z progresywną falą podgrawitacyjną, która dwukrotnie przecina powierzchnię średniego poziomu morza zanim zaniknie w kierunku odbrzegowym.

Kwintesencję analizy detali D9 pokazano na rys. 9, gdzie przedstawiono funkcje autokorelacji dla czterech sond falowych. Wynika z nich, że okres piku różni się bardzo pomiędzy nimi. Szczególnie rażąca rozbieżność występuje dla blisko położonych sond KN i KS, gdzie okresy te wyniosły odpowiednio 58 i 69 s. Na tej podstawie można stwierdzić, że detale D9 nie opisują jednorodnego wzorca, wobec czego brak jest podstaw do ich kwalifikacji jako fali podgrawitacyjnej.

Na rys. 10 przedstawiono funkcję autokorelacji detali D10 poziomów wody z sond falowych. Wszystkie okresy piku są do siebie bardzo zbliżone, wobec czego można założyć, że analizowany element charakteryzuje się dużą jednorodnością i przyjąć jego okres piku jako T = 130 s. Na rys. 11 pokazano funkcję interkorelacji pomiędzy zapisami na skrajnych sondach KW i KE. Maksimum tej funkcji występuje przy odstępie  $\tau = 200$ , zawierając 1,54 okresu analizowanej fali. Przy rozstawie sond KW i KE równym 376 m daje to długość fali równą około 252 m i liczbę modalną równą 0, czyli że występuje tu stojąca fala podgrawitacyjna. Ciekawy wykres przedstawia funkcja interkorelacji zapisu z sondy KS i prądu wzdłużbrzegowego. Przy  $\tau = 0$  funkcja ta ma maksimum równe jedynie 0,1. Może to świadczyć o tym, że sonda KS znajduje się w pobliżu strzałki fali, gdzie ruchy wody mają głównie pionowy charakter, a ruchy wzdłużbrzegowe są nieduże. Jest to równocześnie swego rodzaju potwierdzenie, że detal D10 przedstawia stojącą falę podgrawitacyjna. Podobnie jak w przypadku analizy detali D8 nasuwa się tu konieczność dokładniejszej estymacji długości zidentyfikowanej fali przez dodanie jeszcze jednej sondy między sondami KS i KE. W sumie, następny etap badań powinien obejmować przynajmniej 5 sond w jednej linii, obejmującej



Rys. 9. Funkcje autokorelacji detali D9 sond falowych KW (góra z lewej), KN (góra z prawej), KS (na dole z lewej) i KE ( na dole po prawej)

KW, KS i KE oraz dwie dodatkowe sondy: jedna między KW i KS i druga między KS i KE. Pozwoli to na lepszą ocenę długości fal podgrawitacyjnych, gdyż obecne badania pozwoliły na w miarę precyzyjne określenie skal przestrzennych związanych z tymi długościami.

Analizy wykonane dla detali D11 nie są przedstawione w niniejszej pracy, ponieważ wystąpienie zerowej liczby modalnej dla detali D10 stanowi kres górny okresów takiego falowania i detale D11 nie mogą przedstawiać tego rodzaju falowania. Potwierdza to w pewnym stopniu mała istotność tego detalu co do ilości przenoszonej energii, gdyż zwykle przenosi on tylko połowę energii detalu D10.

## PODSUMOWANIE

Wykonana analiza wydatnie wzbogaciła wiedzę o wolnozmiennych elementach falowania w strefach brzegowych południowego Bałtyku, na brzegach zasadniczo dyssypatywnych. Zidentyfikowano z dużo większą pewnością dwie składowe reprezentujące falowanie podgrawitacyjne: progresywną falę o okresie 34 s, długości 96 m i liczbie modalnej 2 oraz falę stojącą o okresie 130 s, długości 252 m i zerowej modzie. Jednocześnie stwierdzono, że istnienie innych wolnozmiennych składowych tego rodzaju jest mało prawdopodobne.

Opracowano i wdrożono metodę szacowania skal przestrzennych fal podgrawitacyjnych, potrzebnych do określania ich długości, przez analizę funkcji interkorelacji detali analizy falkowej z sond falowych rozmieszczonych w strefie brzegowej na małej głębokości. Względnie dokładne określenie długości tych fal pozwoliło na proste obliczenie liczb modalnych fal podgrawitacyjnych bez konieczności czynienia arbitralnych założeń co do szerokości strefy przyboju. W rezultacie, w chwili obecnej w sposób dość pewny są określone dwa wolnozmienne składniki falowania.

Znajomość rozstawu sond pozwoliła na dość precyzyjną ocenę długości występujących fal podgrawitacyjnych. Proponowane wzbogacenie aparatury pomiarowej o dodatkowe dwie sondy ma pozwolić na bardziej dokładną ich estymację. Oprócz funkcji interkorelacji będzie zastosowana również analiza funk-



Rys. 10. Funkcje autokorelacji detali D10 sond falowych KW (góra z lewej), KN (góra z prawej), KS (na dole z lewej) i KE ( na dole po prawej)



Rys. 11. Funkcja interkorelacji detalu D10 zapisów poziomów wody na KW i KE (po lewej) oraz poziomu wody i prądu wzdłużbrzegowego na KS

cji wzajemnych gęstości widmowych analizowanych detali. Będzie to tematem kolejnego projektu badawczego.

Drugą ścieżką przyszłych badań jest bardziej wysublimowana analiza detali, które charakteryzują się dwupikową funkcją gęstości widmowej. Polegać ona będzie na zaprojektowaniu optymalnego układu filtrującego takie sygnały w celu wyodrębnienia z nich "czystego sygnału", co pozwoli na precyzyjną analizę i stwierdzenie, czy w rejonie południowego Bałtyku występują również inne, mniej istotne wolnozmienne składowe falowania o charakterze fal podgrawitacyjnych.

#### LITERATURA

1. Eckart C.: Surface waves in water of variable depth. Wave Rep. 100 Scripps Inst. of Oceanography, La Jolla, CA, 99 pp, 1951.

2. Szmytkiewicz P.: Identyfikacja wolnozmiennych parametrów ruchu wody płytkowodnego obszaru strefy brzegowej. Rozprawa doktorska, IBW PAN, Gdańsk 2010.

Niniejsza publikacja powstała w ramach projektu nr 2012/05/B/ST10/00926 sfinansowanego ze środków Narodowego Centrum Nauki przyznanych na podstawie decyzji numer DEC-201/05/B/ST10/00926.