

BARBARA BOCZAR-KARAKIEWICZ

Polska Akademia Nauk  
Instytut Budownictwa Wodnego — Gdańsk

## TRANSFORMACJA FALOWANIA WIATROWEGO I PROCES KSZTAŁTOWANIA REW W PRZYBRZEŻNEJ STREFIE PRZYBOJU

**Treść:** 1. Wprowadzenie 21, 2. Własności falowania wiatrowego w przybrzeżnych strefach przyboju. Wyniki stochastycznych analiz pomiarów falowania w naturze 22, 3. Podstawowe założenia wyjściowe. Metodyka wykonanej analizy 26, 4. Struktura falowania wiatrowego w przybrzeżnej strefie przyboju 28, 5. Prognoza procesów dynamicznych w przybrzeżnej strefie przyboju 32; Summary 35; Literatura 36.

### 1. WPROWADZENIE

W niniejszej pracy przedstawiono wyniki analizy struktury falowania wiatrowego w strefie przyboju oraz podano prognozę dynamicznych oddziaływań tego procesu w obszarze jego rozprzestrzeniania się.

Analizy falowania wiatrowego dokonano opierając się na własnościach procesu, stwierdzonych w naturze i przedstawionych między innymi w pracach Drueta, Massela, Zeidlera [10, 11, 12]. Własności tego procesu są podstawą sformułowanych i omówionych w pkt. 3 założeń upraszczających, które uzasadniły metodykę wykonanej analizy. Analizy tej dokonano na modelu deterministycznym, to jest na podstawie własności regularnych ciągów falowych, rozprzestrzeniających się w obszarze małych głębokości względnych.

Własności procesu falowania wiatrowego, uzyskane i przedstawione w cytowanych pracach [10, 11, 12] stanowią również podstawę do uogólnienia wyników otrzymanych dla regularnych ciągów falowych, na wypadek reżimów falowych w płytkowodnych strefach przyboju. Własności te posłużyły również do dokonania wstępnej weryfikacji otrzymanych wniosków, dotyczących nieliniowej struktury badanego procesu.

Syntezą otrzymanych wyników jest prognoza dynamicznych efektów falowania oraz jego współoddziaływań z procesem kształtowania się profilu dna w przybrzeżnej strefie przyboju.

Przedstawiona analiza struktury falowania i proponowana metoda prognozy dotyczą obszaru przyboju, dla którego do chwili obecnej nie podano jeszcze metod predykcji procesów dynamicznych, pomimo gwał-

townego rozwoju wiedzy o falowaniu wiatrowym w ostatnim 30-leciu i pomimo nieustannie trwającego od 130 lat zainteresowania badaczy falowaniem regularnym w warunkach małych głębokości względnych [7].

## 2. WŁASNOŚCI FALOWANIA WIATROWEGO W PRZYBRZEŻNYCH STREFACH PRZYBOJU. WYNIKI STOCHASTYCZNYCH ANALIZ POMIARÓW FALOWANIA W NATURZE

Badania, analizy i obserwacje dokonywane w naturze przez wielu badaczy [2, 8, 10, 11, 12, 15, 20] wykazały, że losowy proces falowania wiatrowego, występujący w warunkach głębokiego morza, przebudowuje swą strukturę przy podejściu do stref brzegowych o ograniczonych głębokościach. Jedną z zasadniczych przyczyn tej przebudowy jest oddziaływanie spływającego się dna, które powoduje rozpad pewnych drgań składowych procesu na rzecz innych, nowo powstających. Efekt przebudowy struktury procesu uwidacznia się w zmianie kształtu jego widma energetycznego. Zmiana ta polega na skupianiu coraz większych ilości energii w pewnych ściśle określonych i ograniczonych pasmach częstotliwości. Przebudowa ta postępuje w miarę zbliżania się do linii brzegowej, to jest w miarę rozprzestrzeniania się falowania w obszarach o zmniejszającej się głębokości wody.

Falowanie nabiera tym samym wyraźnych cech okresowego ruchu o charakterze silnie nieliniowym, przy jednoczesnym zachowaniu pewnych własności losowych.

Szereg specyficznych cech procesu falowania wiatrowego, rozprzestrzeniającego się w przybrzeżnych strefach przyboju i otrzymanych z notowań falowania, dokonanych u wybrzeży południowego Bałtyku, ujawniły wyniki stochastycznych analiz, przedstawione w pracach Drueta, Massela i Zeidlera [10, 11, 12]. Potwierdziły one również ogólnie znane własności falowania w przybrzeżnych strefach, a mianowicie silną koncentrację energii procesu w stosunkowo wąskim paśmie częstotliwości jego drgań o wartości bliskiej pewnej charakterystycznej częstotliwości oznaczonej symbolem  $\omega_{\max}$  (ryc. 1). Wyniki analiz korelacyjnych, otrzymane dla drgań z pasma  $\omega_{\max}$  wykazały, że podstawowe składowe procesy, niosące przeważającą część jego całkowitej energii, odznaczają się silną okresowością w całej strefie przyboju.

Na podstawie omówionych własności, uzyskanych z analizy znacznej ilości prób losowych, pobranych w wielu rejonach przybrzeżnych południowego Bałtyku, Druet, Massel i Zeidler [10, 11, 12] stwierdzili, że proces falowania wiatrowego w przybrzeżnej strefie przyboju jest reprezentowany przez quasi-losowe drgania z pasma częstotliwości, bliskiego war-



tości  $\omega_{\max}$ . Drgania te, niosące przeważającą część całkowitej energii procesu, można przedstawić w postaci regularnej harmoniki, o amplitudzie  $a_0$ , modulowanej losową funkcją czasu  $\eta(t)$ .

$$\zeta(t) = a_0 \eta(t) \cos(\omega_{\max} t + \varepsilon)$$

gdzie  $\varepsilon$  jest losową fazą tej harmoniki.

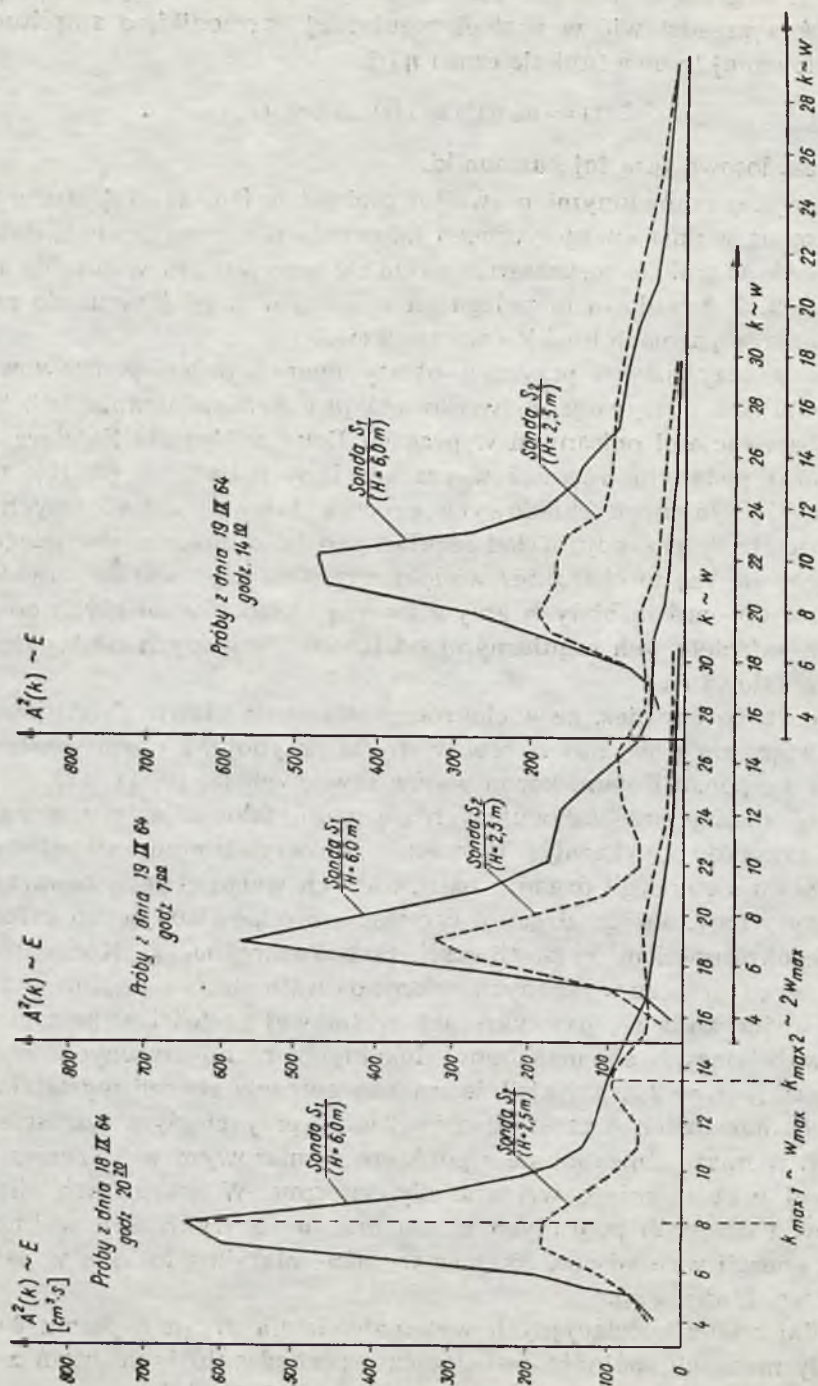
Poza wyżej omówionymi prawidłowościami  $\omega$  [10, 11, 12] stwierdzono, że kształt widma energetycznego falowania wiatrowego ulega dalszej przebudowie w trakcie rozprzestrzeniania się tego procesu w obrębie strefy przyboju. Przebudowa ta polega na znacznym zmniejszaniu się rzędnych widma w pasmach bliskich wartości  $\omega_{\max}$ .

Jedną z oczywistych przyczyn utraty energii drgań podstawowych w przyboju jest dyssypacja spowodowana procesem załamania fali. Zgodnie z obserwacjami opisanymi w pracach Drueta, Massela Zeidlera [10, 11, 12] oraz podanymi również w pracach innych badaczy [8, 15], załamywanie się głównych składowych procesu falowania, tworzących na wejściu do strefy przyboju układ regularnych fal o długich, równoległych grzbietach, ma często charakter wielokrotny. Obszary załamań, uwidaczniające się obecnością białych grzyw tworzą układ równoległych do siebie pasm, oddzielonych regularnymi odstępami, w których następuje regeneracja falowania.

Stwierdzono również, że wielokrotne załamania głównych ciągów falowych wiążą się z obecnością rew w strefie przyboju, a obszary załamań znajdują się ponad liniami koron wałów rewowych [8, 10, 11, 12].

Dalsze analizy przebudowujących się widm falowania wiatrowego w strefie przyboju wykazały jednakże, że oczywistemu stopniowemu zmniejszaniu się energii drgań z pasm bliskich wartości  $\omega_{\max}$  towarzyszy stopniowy wzrost energii drgań o częstościach odpowiadających całkowitym wielokrotnościom częstotliwości podstawowej  $\omega_{\max}$ . Koncentracja części energii procesu w rzędnych widma o częstościach  $n \omega_{\max}$  ( $n = 2, 3, \dots$ ) (ryc. 1) uwidoczniła się na wykresach widmowej gęstości w postaci wyraźnie wybijających się maksimów lokalnych rozmieszczonych w pasmach  $n \omega_{\max}$  ( $n = 2, 3, \dots$ ). Najsilniejsza koncentracja energii wystąpiła we wtórnych maksimach o częstotliwości  $2 \omega_{\max}$  przy ciągłym wzroście ich rzędnych w miarę zbliżania się z punktem pomiarowym w kierunku linii brzegowej oraz w miarę wzrostu siły sztormu. W warunkach silnych sztormów i dla prób pobranych blisko brzegu na wykresach widmowej gęstości energii wybijały się również wyraźne maksima lokalne w paśmie  $3 \omega_{\max}$  (ryc. 1, sonda  $s_2$ ).

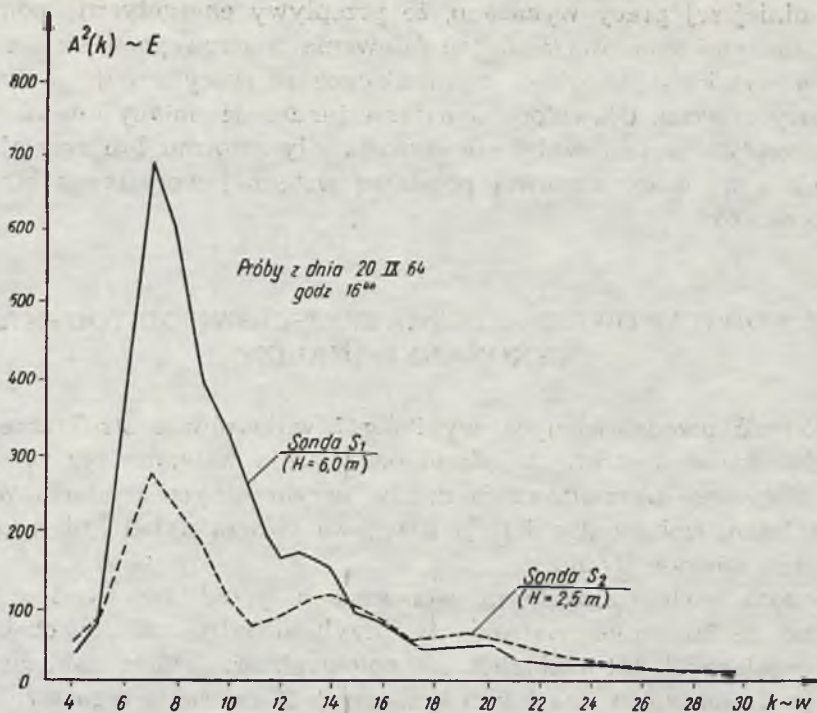
Wyniki analiz korelacyjnych wykonanych dla drgań z pasma  $2 \omega_{\max}$  wykazały małą ich spójność, świadczącą o pochodzeniu tych drgań z różnych źródeł, nie zidentyfikowanych w pracach [10, 11, 12].



Ryc. 1a. Widmo energii dla falowania wiatrowego w strefie przyboju według [10, 11, 12]

Fig. 1a. Energy spectrum of wind waves in a surf zone after [10, 11, 12]





Ryc. 1b.

Fig. 1b.

Ostatnio omówione prawidłowości ujawniają, że w nielosowym i silnie nieliniowym procesie falowania wiatrowego w strefie przyboju zachodzi nie tylko dyssypacja części energii tego procesu. W trakcie rozprzestrzeniania się falowania w strefie przyboju zachodzą jeszcze przepływy energetyczne pomiędzy podstawowymi składowymi drgań oraz drganiami o całkowitych wielokrotnościach częstości podstawowej. Przepływy te odbywają się w ramach zasobów energetycznych, wnoszonych do strefy przyboju przez drgania podstawowe i stanowią one przeważającą część całkowitej energii procesu falowania wiatrowego w tej strefie. Koncentracja energii w składowych drganiach procesu o częstotliwości  $n \omega_{\max}$  ( $n = 2, 3, \dots$ ) odbywa się zatem kosztem części energii zawartej pierwotnie w rzędnych drgań z pasma  $\omega_{\max}$ .

Prace Drueta, Massela, Zeidlera pozwoliły na stwierdzenie, że ostatnio omówiona własność reżimów falowych w strefie przyboju ma charakter ogólny. Ujawniła się ona we wszystkich badanych strefach przybrzeżnych południowego Bałtyku.

Autorzy ci nie ustalili genezy tych własności, ograniczając się jedynie do wysunięcia kilku ogólnych hipotez.

W niniejszej pracy wykazano, że przepływy energetyczne pomiędzy elementarnymi składowymi drgań falowania wiatrowego w strefie przyboju są wynikiem własności wynikających ze specyficznej, nieliniowej struktury procesu. Ujawnione w naturze tendencje zmiany intensywności tych przepływów pod wpływem wzrostu siły sztormu lub zmniejszania się głębokości wody stanowią podstawę wstępnej weryfikacji otrzymanych wniosków.

### 3. PODSTAWOWE ZAŁOŻENIA WYJŚCIOWE. METODYKA WYKONANEJ ANALIZY

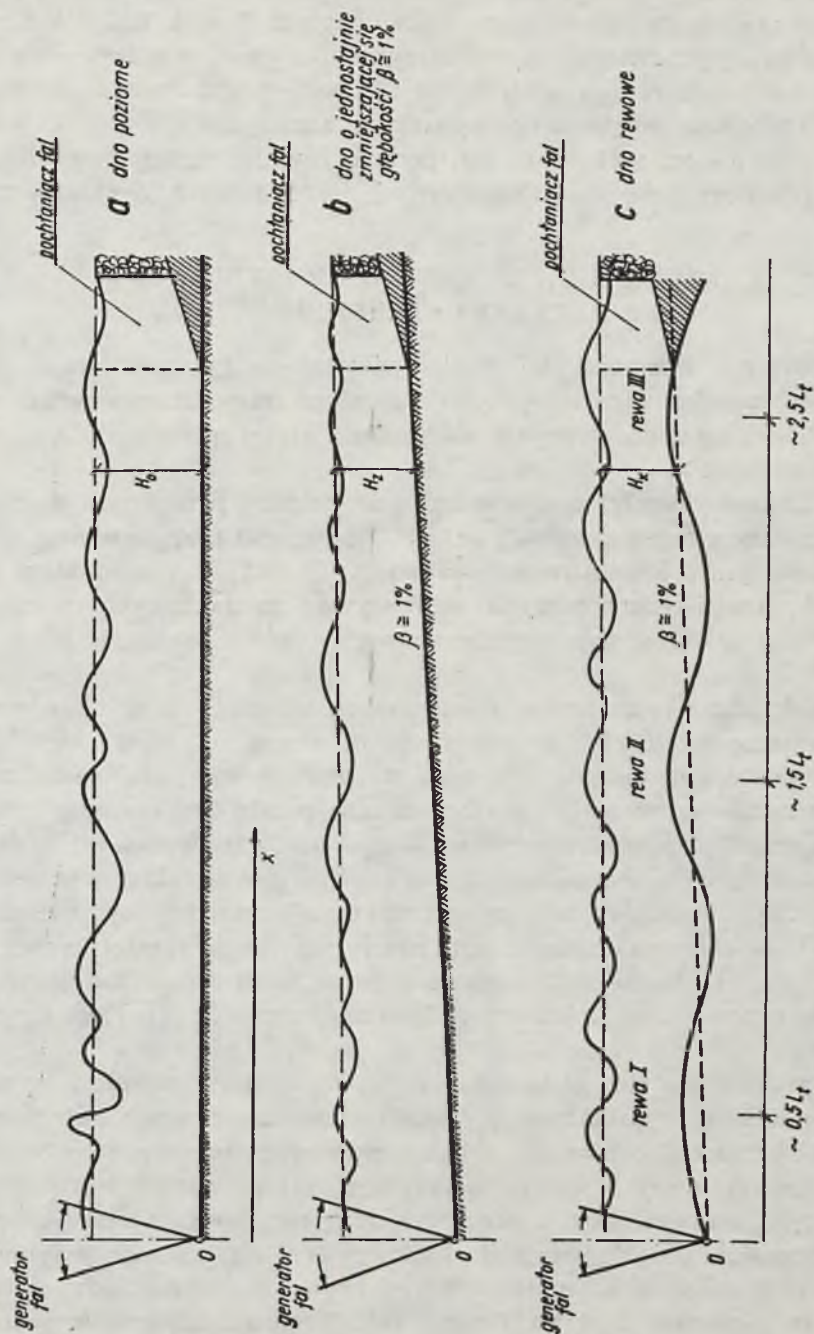
Ogólność przedstawionych wyników i wniosków o strukturze reżimów falowania w strefie przyboju ograniczają wstępnie przyjęte założenia, dotyczące ukształtowania dna w przybrzeżnych strefach. Według tych założeń, izobaty dna i linia brzegowa tworzą układ linii prostych, wzajemnie równoległych.

Ponadto zgodnie z ogólnymi własnościami przedstawionymi w pkt. 2 założono, że falowanie wiatrowe w przyboju odznacza się obecnością quasi-regularnych fal o długich, równoległych grzbietach, nabiegających prostopadle do izobat dna i linii brzegowej. Z założenia tego wynika, że procesy refrakcyjne zostały ukończone na wejściu do badanej strefy przyboju. Założono również, że strefa przyboju nie jest zabudowana konstrukcjami hydrotechnicznymi, w obecności których mogłyby zachodzić procesy dyfrakcyjne. Grupa omówionych założeń pozwala na wykonanie badań na modelu dwuwymiarowym.

Główne założenie wykonanych analiz wynika z podstawowej własności reżimów falowych w strefie przyboju, a mianowicie z nielosowości tego procesu oraz z jego okresowości. Charakter tej własności opisuje zależność [1] z pkt. 2. W myśl tego założenia, nośnik przeważającego zasobu energii procesu falowania wiatrowego, wchodzący do strefy przyboju, wymodelowano za pomocą regularnego ciągu fal sinusoidalnych o częstotliwości równej wartości  $\omega_{\max}$  oraz amplitudzie proporcjonalnej do ilości energii niesionej przez drgania podstawowe procesu falowego na wejściu do strefy przyboju. Zgodnie z powyższym założeniem, analizy struktury falowania wiatrowego w strefie przyboju dokonano na modelu deterministycznym. Własności tego procesu odwzorowują cechy regularnych ciągów falowych, rozprzestrzeniających się w obszarach o małych głębokościach względnych.

Analizy dokonano na podstawie badań hydraulicznych i rozważań teoretycznych dla modelu o trzech różnych konfiguracjach dna, przedstawionych na ryc. 2.





Ryc. 2. Badane przypadki konfiguracji dna strefy przyboju  
 Fig. 2. Investigated cases of bed configurations in a surf zone

Wyniki badań, uzyskane dla regularnych ciągów falowych, zostały już omówione w szeregu wcześniejszych prac autorki [3, 4, 5, 6, 7]. W przedstawionej pracy omówiono jedynie otrzymane wyniki, uogólnione na wypadek reżimów falowania wiatrowego w strefie przyboju (na podstawie głównego założenia wyjściowego wykonanej analizy).

Opierając się na tych wynikach podano również zasady przybliżonej metody prognozy procesów dynamicznych, zachodzących w strefie przyboju.

#### 4. STRUKTURA FALOWANIA WIATROWEGO W PRZYBRZEŻNEJ STREFIE PRZYBOJU

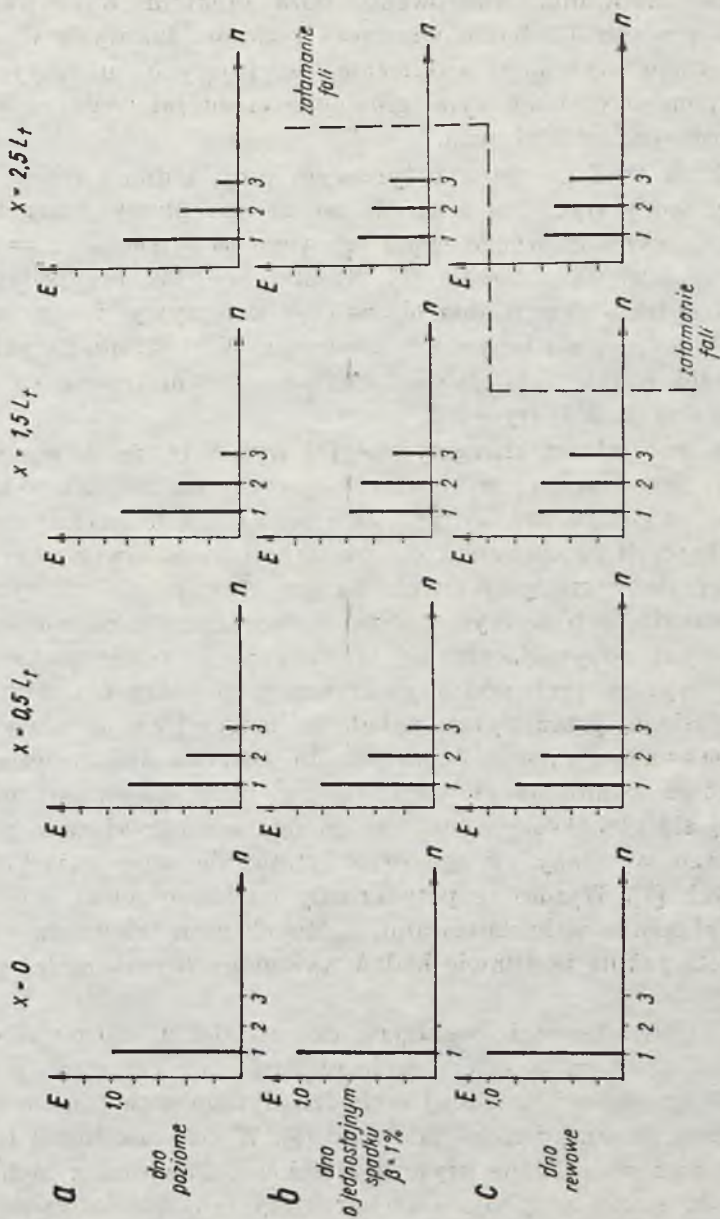
Podstawowe własności falowania wiatrowego rozprzestrzeniającego się w przybrzeżnych strefach przyboju ustalono na podstawie badań, wykonanych w wyidealizowanych warunkach stałej głębokości wody  $H$  ( $H = \text{const}$ ) (ryc. 2a).

Wyniki te wykazały, że stwierdzone w naturze przepływy energetyczne pomiędzy główną składową ( $\omega = \omega_{\max}$ ) procesu falowania oraz układem składowym o częstotliwości  $\omega = n \omega_{\max}$  ( $n = 2, 3 \dots$ ) są efektem nieliniowych, quasi-rezonansowych oddziaływań zachodzących pomiędzy harmonicznymi składowymi płytkowodnych ciągów falowych [1, 3, 11, 13, 19].

Oddziaływania te zachodzą w warunkach ośrodka o słabych własnościach dyspersyjnych, jakim jest warstwa cieczy o małej głębokości względnej. Stwierdzono ponadto, że w warunkach stałej głębokości wody zjawisko quasi-rezonansu i związane z nim przepływy energetyczne w układzie drgań o częstotliwości  $n \omega_{\max}$  ( $n = 1, 2 \dots$ ) tworzących główny ciąg falowy procesu, mają charakter cyklicznie powtarzalny w przestrzeni [3, 5, 21]. Parametr tej powtarzalności, oznaczony symbolem  $L_t$  ( $L_t > L$ ,  $L$  — klasyczna długość fali), zależy jedynie od częstotliwościowej charakterystyki głównej składowej falowania wiatrowego. Parametr ten nie zależy natomiast od ilości energii niesionej przez te składowe [3, 4, 5] (ryc. 3a).

W warunkach stałej głębokości wody stwierdzono również, że załamanie głównego ciągu falowego (składającego się z sumy składowych o częstościach  $n \omega_{\max}$ ;  $n = 1, 2 \dots$ ) nie zmienia zasadniczych cech przepływów energetycznych w strefie przyboju, to jest przestrzennej cykliczności tego procesu. Udział procesów dyssypacyjnych, towarzyszących rozprzestrzenianiu się fali w postaci załamującej się, zmienia jedynie lokalnie (tj. w obszarze załamań) stosunki energetyczne pomiędzy składowymi  $n \omega_{\max}$  ( $n = 1, 2, 3 \dots$ ). Po ich zakończeniu falowanie zregenerowane [8] podlega pierwotnie ustalonym (i omówionym powyżej) prawidłowościom przestrzennej transformacji.





Ryc. 3. Transformacja widm energetycznych (falowanie regularne)

Fig. 3. Energy spectra transformation for regular waves

W świetle powyższych wniosków, proces jedno-lub wielokrotnego załamania głównego ciągu falowego w strefie przyboju nie zmienia globalnych własności falowania wiatrowego, poza efektem wyprowadzenia części energii procesu. Globalne własności reżimów falowych w strefie przyboju są zatem wynikiem cyklicznie oscylujących energetycznych przepływów pomiędzy składowymi głównego ciągu falowego na skutek quasi-rezonansowych oddziaływań.

W warunkach stref przyboju o typowym profilu dna i zmieniającej się głębokości wody (ryc. 2b) stwierdzono, że przepływy energetyczne pomiędzy składowymi głównego ciągu falowego ( $\omega = n \omega_{\max}$ ,  $n = 1, 2 \dots$ ) tracą własności ścisłej powtarzalności przestrzennej. W przypadku nieznacznego nachylenia skarpy dna ( $\beta_{sr} = 10\%$ ) przepływy te zachowują charakter oscylacyjny, zbliżony do cyklicznego. Wartość quasi-cyklu zachowuje również wartość zbliżoną do wielkości parametru  $L_t$ , ustalonej dla poziomego dna [3, 5, 7] (ryc. 3b).

Przybliżone rozważania energetyczne [7] wykazały, że utrata ścisłej powtarzalności przestrzennej w zjawisku wymiany energii, zachodzącym pomiędzy składowymi harmonicznymi głównego ciągu falowego, jest wynikiem dodatkowych (w stosunku do warunków panujących przy  $H = \text{const.}$ ) przepływów energetycznych. Są one efektem nieliniowych oddziaływań, zachodzących w myśl prawa zachowania strumienia energii w ruchu falowym, odbywającym się w warunkach zmniejszającej się głębokości. W wyniku tych oddziaływań następuje stały przyrost średniej energii niesionej przez wyższe składowe harmoniczne głównego ciągu falowego ( $\omega = n \omega_{\max}$ ,  $n = 2, 3 \dots$ ) (ryc. 3b). Badania hydrauliczne wykazały, że proces załamania głównego ciągu falowego w warunkach zmniejszającej się głębokości wody nie zmienia quasi-cyklicznie powtarzalnego procesu wymiany energii oraz rytmicznie występujących załamań wtórnych [7]. Wyniki te potwierdziły ogólną hipotezę dotyczącą roli procesu załamania w kształtowaniu ogólnych cech falowania wiatrowego, wysuniętą już na podstawie badań wykonanych przy stałej głębokości wody [6].

Omówione prawidłowości posłużyły do uściślenia definicji strefy przyboju, określając tym pojęciem część obszarów przybrzeżnych, przyległych do linii brzegowej, w której zachodzi płytkowodna transformacja [3, 5] i załamanie głównego ciągu falowego [6]. W celu uściślenia tej definicji podano dwa przybliżone kryteria ilościowe. Pierwsze z nich uzależnia szerokość strefy przyboju od charakterystyki częstotliwościowej podstawowej składowej ( $\omega = \omega_{\max}$ ) głównego ciągu falowego, odniesionej do pewnej granicznej wartości głębokości wody  $H_0$ . Drugie kryterium uzależnia szerokość strefy przyboju od ilości energii  $E_{\max}$  niesionej przez główny ciąg falowy (gdzie  $E_{\max} \propto h_{\max}^2$ ). W dalszym ciągu założono, że



przy  $\frac{h_{\max}}{H_0} = 0,5$  i  $\frac{L_{\max}}{H_0} = 10$  (gdzie  $L_{\max} \propto \omega_{\max}$ ) granica strefy przyboju pokrywa się z przekrojem strefy przybrzeżnej, równoległym do linii brzegowej i pokrywającym się z izobatą  $H_0$ . Rozciągłość strefy przyboju mierzona od linii brzegowej i oznaczona symbolem  $x_0$  jest odległością izobaty  $H_0$  od brzegu. W przypadku gdy  $\frac{h_{\max}}{H_0} < 0,5$  przy  $\frac{H_{\max}}{H_0} = 10$  rozciągłość strefy przyboju jest mniejsza od wartości  $x = x_0$ . Zgodnie z wynikami badań hydraulicznych, przedstawionych w jednej z wcześniejszych prac autorki [7], rozległość strefy przyboju można wyznaczyć według zależności:

$$x = x_0 - k L_t \quad k = 1, 2 \dots$$

gdzie  $k$  rośnie przy malejącym stosunku  $\frac{h_{\max}}{H_0}$  (wyznaczonym dla  $H_0$ , gdzie  $\frac{L_{\max}}{H_0} = 10$ ).

Zgodnie z podaną definicją i omówionymi kryteriami ilościowymi, szerokość strefy przyboju jest pojęciem względnym. Jej wartość zależy każdorazowo od parametrów sztormu i wartości średnich spadków dna w przybrzeżnej strefie. Szerokość strefy przyboju rośnie wraz ze wzrostem siły sztormu (przy  $\beta_{sr} = \text{const}$ ).

Przy stałych warunkach sztormowych szerokość stref przyboju o różnych spadkach dna wzrasta wraz z maleniem wartości tych spadków.

Badania wykonane dla falowania, rozprzestrzeniającego się w warunkach wielorewowej konfiguracji dna (ryc. 2c) wykazały, że w procesie falowania zostaje zachowany quasi-cykliczny charakter przepływów energetycznych pomiędzy składowymi harmonicznymi głównego ciągu falowego. Obecność wałów rewowych o koronach rozmieszczonych w połowie quasi-cyklu transformacyjnego głównego ciągu falowego jest jedynie przyczyną wzrostu intensywności tych przepływów (ryc. 3c) w ramach kolejnych cykli transformacyjnych [7]. W wyniku wzrostu intensywności przepływów energetycznych (dokonując porównań z wynikami otrzymanymi przy  $\beta_{sr} = \text{const}$ ) (ryc. 3b i 3c) znaczniejsze ilości energii przemieszczają się w kierunku wyższych składowych ( $\omega = n \omega_{\max}$ ;  $n = 2, 3 \dots$ ) głównego ciągu falowego. Opisana intensyfikacja jest powodem zwielokrotnienia procesu kolejnych załamania tego ciągu (ryc. 3b i 3c).

Obszary jedno- lub wielokrotnych załamania były rozmieszczone ponad koronami wałów podwodnych. Poza nimi następowała natomiast wyraźna regeneracja regularnej fali, rozprzestrzeniającej się w obszarach leżących ponad lokalnymi przegłębieniami dna.

Na podstawie ostatnio omówionej własności płytkowodnych reżimów falowych sformułowano hipotezę o tworzeniu się rew w przybrzeżnej

strefie przyboju. Stwierdzono, że rewy są wynikiem wzajemnych oddziaływań dynamiki falowania (określając tym pojęciem procesy dynamiczne zachodzące w transformującym się płytkowodnym reżimie) oraz procesu kształtowania się profilu ruchomego dna w przybrzeżnej strefie przyboju.

Ostatnia hipoteza uzupełnia uprzednio omówione wnioski i stwarza podstawę do stwierdzenia, że wszystkie istotne procesy dynamiczne w strefie przyboju (zachodzące w ramach zasobów energetycznych, stanowiących przeważającą część całkowitej energii procesu falowego) są wynikiem płytkowodnej transformacji [5, 7] głównego ciągu falowego w procesie falowania wiatrowego.

##### 5. PROGNOZA PROCESÓW DYNAMICZNYCH W PRZYBRZEŻNEJ STREFIE PRZYBOJU

Proponowana metoda pozwala na ustalenie zasięgu (pkt. 4) przybrzeżnej strefy przyboju w zależności od panujących warunków sztormowych i w zależności od średnich spadków dna w przybrzeżnej strefie.

Metoda ta pozwala również na ustalenie lokalizacji obszarów wzmożonych oddziaływań dynamicznych w tej strefie, związanych z procesem jedno- lub wielokrotnego załamania się głównego ciągu falowego, będącym głównym nośnikiem energii procesu falowania wiatrowego w przybrzeżnej strefie przyboju.

Z ustalenia ilości i rozmieszczenia obszarów załamań wynika możliwość podania zasadniczych cech profilu dna, to jest podania ilości, odległości i rozmieszczenia koron wałów podwodnych w przybrzeżnej strefie przyboju.

Danymi wyjściowymi w proponowanej metodzie prognozy są parametry sztormu oraz wartości średnich spadków dna w przybrzeżnych obszarach.

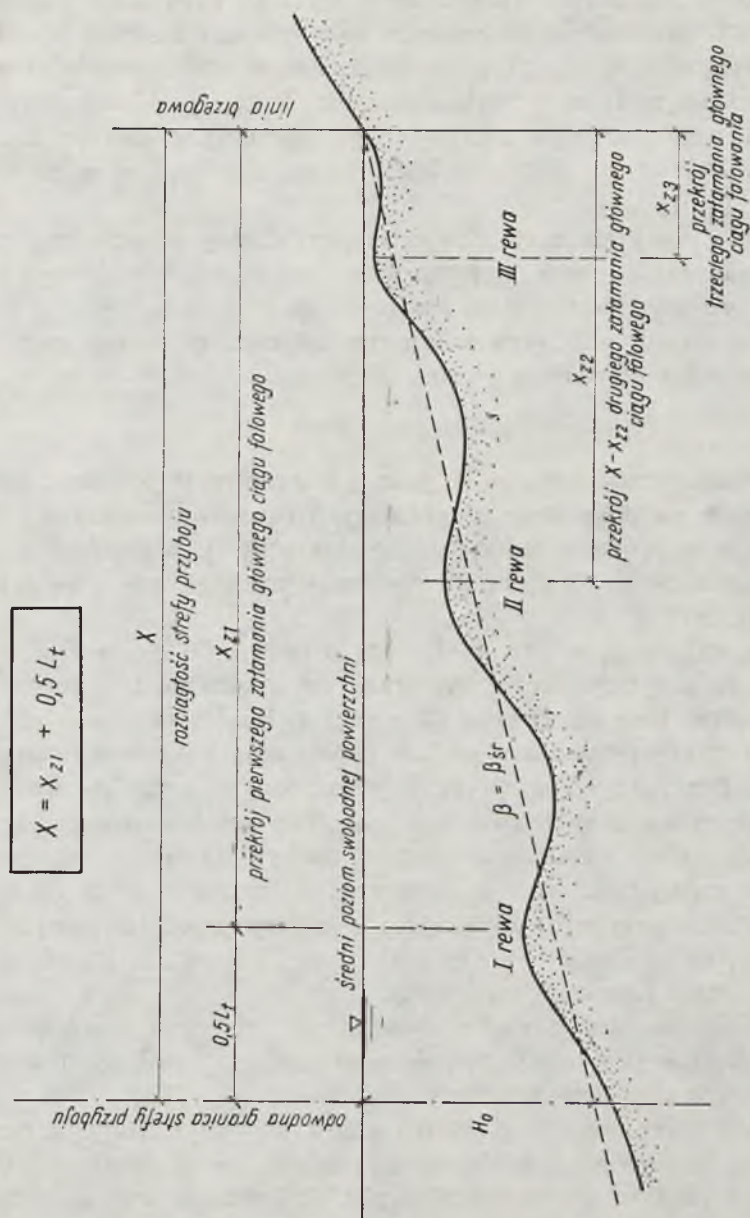
Znane metody prognostyczne, stosowane w obszarach przybrzeżnych o ograniczonych głębokościach [9, 16, 17], są podstawą do określenia charakterystyki częstotliwościowej (wartości  $\omega = \omega_{\max}$ ) oraz energetycznej ( $E_{\max} \sim h_{\max}^2$ ) głównej składowej procesu falowania wiatrowego, na wejściu do strefy jej płytkowodnej transformacji.

Ustalenia rozciągłości strefy przyboju, to jest odległości jej odwodnej granicy od linii brzegowej, oddzielającej ją od pozostałych obszarów przybrzeżnych, można dokonać na podstawie przybliżonych szacowań, omówionych w pkt. 4.

Zgodnie z przyjętymi oznaczeniami, szerokość strefy przyboju można opisać zależnością:

$$X = X_{z1} + \frac{1}{2} L_t$$





Ryc. 4. Schemat prognozy procesów dynamicznych ( $\beta_{sr} = \text{const}$ )

Fig. 4. Schema of the forecast of dynamic processes in the surf zone ( $\beta_{sr} = \text{const}$ )

gdzie  $X_{z1}$  oznacza odległość przekroju pierwszego załamania (od strefy otwartego morza) głównego ciągu falowego a  $L_t$  jest wartością quasi-cyklu jego procesu transformacyjnego [5, 6] (ryc. 4). Przyjmując, że wartość quasi-cyklu zmienia się nieznacznie ze wzrostem średnich spadków dna w przybrzeżnej strefie otrzymano, że szerokość strefy przyboju (przy  $\beta_{sr} = \text{const}$ ) rośnie wraz ze wzrostem wartości  $E_{\text{max}}$ , tj. ze wzrostem siły sztormu. Dla stref przyboju o różnych spadkach (przyjmując  $E_{\text{max}} = \text{const}$ ) szerokość strefy przyboju będzie malała szybko wraz ze wzrostem wartości  $\beta_{sr}$  (ryc. 4).

Oszacowania powyższe mają charakter przybliżony między innymi ze względu na nieuwzględnienie wpływu częściowych odbić od skarpy dna, których wpływ rośnie ze wzrostem średniego nachylenia.

Ustalenia obszarów wtórnych kolejnych załamania głównego ciągu falowego można dokonać według prostej zależności

$$X_{z,k+1} = X_{z1} - k L_t, \quad k = 1, 2 \dots$$

Wyniki badań, przedstawione w jednej z wcześniejszych prac autorki [6] pozwalają na dokonanie przybliżonych oszacowań wielkości strat energetycznych w procesie jedno- lub wielokrotnych załamania. Wynoszą one każdorazowo około 50% energii niesionej przez główny ciąg falowy przed załamaniem.

Zgodnie z wysuniętą w pkt. 4 hipotezą o tworzeniu się rew w przybrzeżnej strefie przyboju, ilość rew oraz rozmieszczenie ich koron jest bezpośrednio określona zależnością [3] z pkt. 4. Ilość wytworzonych rew dla wybranej strefy przyboju ( $\beta = \beta_{sr} = \text{const}$ ) rośnie wraz ze wzrostem siły sztormu. Dla różnych stref przyboju o różnych średnich spadkach dna (przy stałych warunkach sztormowych) ilość wałów rewowych w danej strefie rośnie wraz z maleniem wartości nachylenia dna.

Tendencje zmian ilości rew w zależności od wartości średnich spadków dna w strefie przyboju, wynikające z analizy przedstawionej w niniejszej pracy, są zgodne z omówionymi przez Zenkowicza [22] w przeglądzie krytycznym literatury światowej.

Należy nadmienić, że wszystkie wyżej omówione zasady przybliżonej predykcji są ważne przy założeniu, że czas trwania ustalonych warunków sztormowych jest nieograniczony.

Przedstawiona metoda prognozy ma charakter przybliżony. Jej uściślenie wymaga jeszcze wykonania szeregu badań doświadczalnych i teoretycznych na modelu, omówionym w pkt. 3. Jednakże wyniki dotychczasowych analiz dostarczają już wielu istotnych informacji o strefie przyboju, cechującej się obecnością złożonych procesów dynamicznych, współdziałających z dynamiką kształtowania się profilu dna.



BARBARA BOCZAR-KARAKIEWICZ

Polish Academy of Sciences  
Institute of Hydro-Engineering — Gdańsk

### TRANSFORMATION OF WAVES AND FORMATION OF SAND BARS IN SURF ZONES

#### Summary

The non-linear structure of wind waves approaching a shore has been examined in terms of a deterministic model for a regular wave train, which transforms its shape and structure in shallow-water conditions.

The concept of the method is based on conclusions resulting from Druet, Massel and Zeidler's stochastic analysis of wave records which detected a transformation of energy spectra of the wind waves and a concentration of energy in some distinct bands of its spectral frequencies. Their results have also shown that the main contribution to the energy of the wind wave process is from components of a relatively narrow frequency band  $\omega_{\max}$ . These components behave as a quasi-periodic wave train with a random coefficient modulating its amplitude and with a frequency  $\omega_{\max}$ .

On the strength of the above conclusions in the present paper the wind wave process entering the surf zone is examined on the shape of a regular, initially sinusoidal shallow water wave train  $\left(\frac{L}{H} \geq 10, L - \text{wave length, } H - \text{water depth}\right)$  of finite height  $\left(\frac{h}{H} \geq 0,1, h - \text{wave height}\right)$  propagating over three different shapes of a bed configuration.

The preliminary analysis over a bed of constant depth ( $H = \text{const}$ ) has shown that the main properties of the wind waves transformation result from an energy flux between the main component  $\omega_{\max}$  and its higher harmonics  $n\omega_{\max}$  ( $n = 2, 3, \dots$ ). This energy flux is space-periodic for  $H = \text{const}$ . It is responsible for the changes of the shape of the energy spectra of the wind waves as detected in the fields.

The mechanism of the transformation results from a quasi-resonant interaction among the components of the wave train, as predicted quantitatively by Philips.

It was found experimentally that under breaking conditions the main features of the transformation process are conserved in zones of the breaking and reformed wave profile.

The main analysis conducted for beds of uniform and non-uniform slopes has shown that the transformation of the structure of wind waves in such conditions becomes quasi-periodic in space. It means that the energy flux between the main components of the wind waves varies nearly periodically in space (with a space period  $L_t$ ;  $L_t - \text{space period for } H = \text{const}$ ). The loss of strong periodicity is connected with changing water depth in which the law of constant energy flux must be conserved.

From the non-linearity of the process an additional increase of energy arises in the components  $n\omega_{\max}$  ( $n=2,3\dots$ ). Therefore the amounts of energy in the bands of  $n\omega_{\max}$  ( $n=2,3\dots$ ) increase constantly as the waves approach the shore.

Over sloping beds it was also found that the spatial rhythm of a multiple breaking and reformation of waves is closely connected with the quasi-periodicity of the energy transfer among the main components of the wind waves. Hence the location of breaking regions can be predicted for known characteristics of the wind waves entering the surf zones.

For a bed in the form of a typical multi-bar profile the analysis showed that the transformation of the wind waves becomes more intensive in comparison with the uniform slope case. This modification results from the mutual interaction between the space-periodic wave and respective multi-bar bed configuration.

On the strength of results obtained for sloping beds a hypothesis concerning the formation of sand bars is formulated: the bars being a result of mutual bed-wave interaction according to the rhythm of the non-linear space-periodic transformation of the main wave train of the wind wave process over a movable bottom.

An approximated method is given which allows one to forecast the distribution of wave breaking and wave-reformation regions in the surf zone, as well as the respective location of bars and troughs of the bed profile for known characteristics of the wind waves entering the surf zone and for given values of the mean slope of the bed in the near-shore sea region.

## LITERATURA

### REFERENCES

1. Bryant P.I., *Periodic Waves in Shallow Water*, J. Fluid Mech. 1973, 59, 4.
2. Byrne R.J., *Field Occurrence of Induced Multiple Gravity Waves*, J. Geoph. Res., 74, 1969, 10.
3. Boczar-Karakiewicz B., *Transformation of Wave Profile in Shallow Water. Fourier Analysis*, Arch. Hydrot., XII, 1972, 2.
4. Boczar-Karakiewicz B., *Theoretical Model of Wave Profile Transformation in Shallow Water*, Rozpr. Hydrot., 1973, z. 32.
5. Boczar-Karakiewicz B., *Non-Linear Structure of Wind Waves in a Shallow Water Surf Zone*, Arch. Hydrot., XX, 1973, 1.
6. Boczar-Karakiewicz B., Oleszkiewicz M., *Zatamanie fali o dużej długości względnej*, referat na Sesji Naukowej IBW-PAN 1973, Gdańsk.
7. Boczar-Karakiewicz B., *Struktura falowania wiatrowego w strefie przyboju*, Rozpr. Hydrot., 1974, z. 34.
8. Jegorow E.M., *Niekotoryje osobienosti wołnienija i wołnowych tieczanii w zonie podwodnych wałow*, Trudy Inst. OK. A.N. SSSR, VIII, 1954.
9. Druet Cz., Kitajgorodzki S.A., Ozmidow R.M., Zilitinkiewicz S.S., *Procesy losowe w mechanice naturalnych zbiorników wodnych*, Ossolineum PAN, 1971.
10. Druet Cz., Massel S., Zeidler R., *Statystyczne charakterystyki falowania wiatrowego w przybrzeżnej strefie Zatoki Gdańskiej i otwartego Bałtyku*, Rozpr. Hydrot., 1972, z. 30.



11. Druet Cz., Massel S., Zeidler R., *The Structure of Wind Waves in the Surf Zone of the South Baltic Sea. Wave Spectra*, London 1968.
12. Druet Cz., Massel S., Zeidler R., *Struktura falowania wiatrowego w strefie przyboju w świetle analizy widmowej*, Rozpr. Hydrot., 1969 z. 22.
13. Galvin C.J., *Shapes of Unbroken Periodic Gravity Waves*, Trans. Am. Geoph. Union, 49, 1968, 1.
14. Mc Goldrick L.F., *Resonant Interaction Among Capillary — Gravity Waves*, J. Fl. Mech., 21, 1965, 2.
15. Kinsman B., *Wind Waves*, Prentice-Hall 1965.
16. Kryłow L., *Spektralnyje metody issledowanija i rozczota wietrowych wołn*, Leningrad 1966.
17. Massel S., *Widmowa prognoza poziomej prędkości orbitalnej i przyspieszenie dla falowania wiatrowego*, Rozpr. Hydrot., 1972, 31.
18. Massel S., *Falowanie wiatrowe na ograniczonych głębokościach, jego struktura i procesy współoddziaływania z budowlami hydrotechnicznymi*, Rozpr. Hydrot., 1973, 32.
19. Philips O.M., *On the Dynamics of Unsteady Gravity Waves of Finite Amplitude*, J. Fl. Mech., 1960, 9.
20. Wiegel R.L., *Oceanographical Engineering*, Prentice-Hall, 1966.
21. Zabusky N.J., Galvin C.J., *Secondary Waves as Solitons*, Trans. Am. Geoph. Union, 40, 1968, 1.
22. Zenkowicz W. P., *Podwodnyje pierczanyje wały i schodnyje obrazowania Kriticzeskij obzor*, Arch. Hydrot. II, 1962, 2.