

ANDRZEJ WRÓBLEWSKI  
Polska Akademia Nauk  
Zakład Oceanologii Instytutu Geofizyki — Sopot

## WIDMOWE GĘSTOŚCI DŁUGOOKRESOWYCH OSCYLACJI POZIOMÓW MORZA BAŁTYCKIEGO

Treść: Wstęp 33, Metoda obliczeniowa 34, Wyniki obliczeń okresowości poziomów wody 36, Wyniki badań długookresowych oscylacji zjawisk geofizycznych 41, Powiązanie długookresowych oscylacji poziomów wody z makroprocesami atmosferycznymi 42, Wnioski 47, Summary 49, Literatura 49.

### Wstęp

Długookresowe wahania zjawisk geofizycznych są tematem przyciągającym uwagę wielu badaczy, szczególnie w ostatnim dziesięcioleciu. Jednym z powodów tego zainteresowania jest rozpoznanie oscylacji o krótszych okresach. Spowodowało to konieczność określenia zmian rzędu lat będących tłem, na którym występują zbadane już elementy struktury okresowej. Szerokie użycie elektronicznej techniki obliczeniowej w połączeniu ze stosowaniem analizy harmonicznej i metody widmowych gęstości stworzyło warunki do poprawnych matematycznie metod wyodrębniania oscylacji okresowych, ukrytych w losowej zmienności zjawisk przyrodniczych. Okoliczności te przyczyniły się do opracowania i publikowania długich serii obserwacyjnych zjawisk geofizycznych będących podstawą opisanych badań.

Poziomy wody w morzu należą do najczęściej prowadzonych pomiarów oceanograficznych, ale zaledwie kilka stacji posiada serie danych przydatnych do wykazania zmian długookresowych. Dla przykładu można wymienić obserwacje w Świnoujściu (Dziadziuszko 1971) obejmujące lata 1811—1970. Notowania te, należące do najdłuższych serii pomiarów geofizycznych, zostały już wykorzystane w polskiej literaturze oceanograficznej (Kowalik, Wróblewski 1973). Drugą stacją na Bałtyku posiadającą tak długi okres obserwacji jest Kołobrzeg (Dziadziuszko 1973; *Roczniki* 1948—1969). Niestety część materiału pomiarowego związana jest z latami hydrologicznymi i w zakresie średnich rocznych poziomów wody

nie może być sprowadzona do lat kalendarzowych. Spowodowało to skrócenie dostępnej do analizy serii pomiarowej, która w niniejszej pracy uwzględniana jest od 1868 r. Przerwę w obserwacjach podczas II wojny światowej uzupełniono, przyjmując dane interpolowane ze szwedzkich stacji mareograficznych. Podstawą przeprowadzonych dalej obliczeń są rezultaty notowań poziomów wody w Świnoujściu i Kołobrzegu, obserwacje temperatury powietrza w Krakowie w latach 1826—1965 (Trepieńska 1971), oraz odpowiadające tym seriom okresy obserwacji liczb Wolfa (Mergentaler 1958; tenże 1955 i nast.).

Celem pracy jest charakterystyka długookresowych oscylacji poziomów Morza Bałtyckiego oraz próba znalezienia podobnej okresowości w innych zjawiskach hydrometeorologicznych.

#### METODA OBLICZENIOWA

Analizę wahań długookresowych przeprowadzono, stosując metodę widmowych gęstości. Podstawowe wzory charakteryzujące założenia obliczeniowe podano niżej. Szczegółowe wyjaśnienia oraz wzory numeryczne można znaleźć w literaturze (Blackman, Tukey 1958). Zastosowania widmowych gęstości w oceanografii podane są obszernie w polskich pracach dotyczących tego tematu (Druet, Kowalik 1970; Kowalik 1968).

Poprzeczną widmową gęstość dwóch procesów  $Y$  i  $Z$ , charakteryzowanych przez stacjonarną funkcję losową, określa wzór:

$$S(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} E_{Y,Z} \cos \omega \tau d\tau - \frac{i}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} F_{Y,Z} \sin \omega \tau d\tau, \quad (1)$$

gdzie:

$$E_{Y,Z}(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} C_{Y,Z}(\omega) \cos \omega \tau d\omega \quad \text{transformata Fouriera parzystej} \quad (2)$$

części widmowej gęstości, stanowiąca odpowiednią składową funkcji korelacji

$$F_{Y,Z}(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} Q_{Y,Z}(\omega) \sin \omega \tau d\omega \quad \text{transformata Fouriera nieparzystej} \quad (3)$$

części widmowej gęstości, stanowiąca odpowiednią składową funkcji korelacji,

gdzie:  $S(\omega)$  — widmowa gęstość,  $\tau$  — odstęp korelacji,  $\omega$  — częstość.

Wyglądzenie otrzymanych widmowych gęstości uzyskano, stosując filtr Hamminga. Poziom znaczący koherencji wyznaczono dla prawdopodobieństwa — 95%.

Wszystkie obliczenia przeprowadzono w Zakładzie Elektronicznej Techniki Obliczeniowej w Gdyni na maszynie ICT 1900.

Na rycinach nie uwzględniono poprzecznej widmowej gęstości, porzeczając na wykresach widmowej gęstości rozpatrywanych procesów. Wzajemne powiązanie analizowanych serii pomiarowych określano za pomocą koherencji i fazy obliczanych z parzystej i nieparzystej części funkcji określonej wzorem (1).

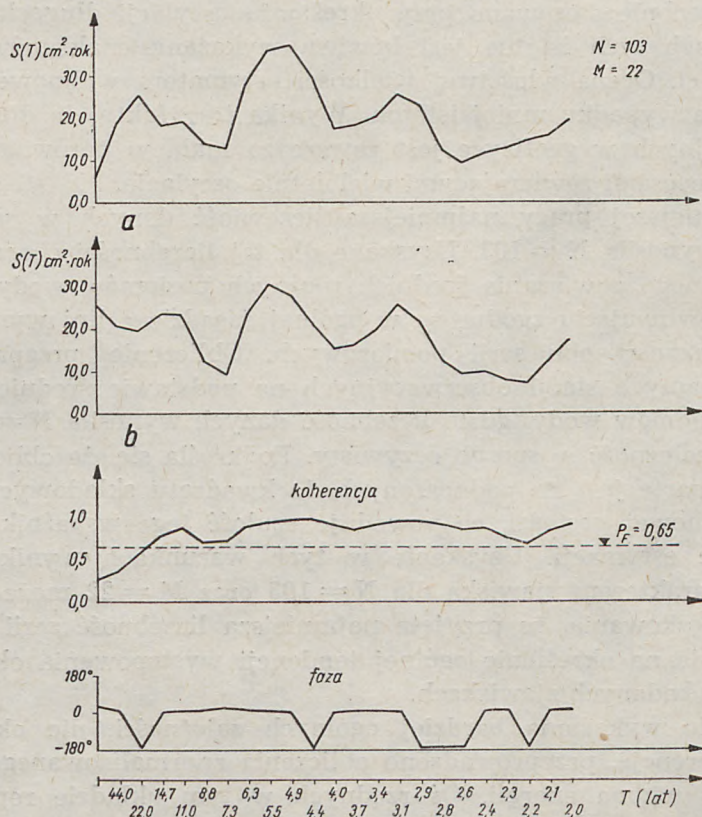
Duży wpływ na dokładność obliczeń estymatorów widmowej gęstości miało przyjęcie maksymalnego odstepu korelacji  $M = 22$  dla wszystkich serii zawierających średnie roczne wyniki pomiarów. Dla  $N = 103$  maksymalny odstep korelacji stanowi więc  $0,21 N$ . Dla większych ilości danych  $N = 140$  oraz  $N = 160$  stosunek ten jest mniejszy, co korzystnie wpływa na dokładność obliczeń. Należy jednak zaznaczyć, że przyjmowanie dużych wartości  $M$  w porównaniu z liczebnością danych jest powszechnie stosowane przy określaniu oscylacji długookresowych. W badaniach tych istotne jest bowiem wykazanie maksimum widmowej gęstości. Ocena właściwej wielkości estymatora widmowej gęstości jest w tym wypadku mniej istotna. Wynika to z faktu, że długość serii obserwacyjnych w geofizyce jest zawsze za mała w porównaniu z badanymi procesami zawierającymi wieloletnie oscylacje.

W niniejszej pracy najmniejsza liczebność danych w serii realizacyjnej wynosiła  $N = 103$ . Uzyskane dla tej liczebności charakterystyki wzajemnego powiązania średnich rocznych poziomów wody w Kołobrzegu i Świnoujściu zgodne są w ogólnej zasadzie z liniowym charakterem zależności obu serii pomiarowych. Obliczenie przeprowadzone dla tych samych stacji obserwacyjnych na podstawie średnich miesięcznych poziomów wody, gdzie liczebność danych wynosiła  $N = 888$ , wykazało tę zależność w sposób oczywisty. Podkreśla się, że obliczenie koherencji oparte jest na podnoszonych do kwadratu składowych poprzecznej widmowej gęstości, co powoduje czułość tego wskaźnika na niedokładność estymacji. Uzyskanie w tych warunkach wyników zgodnych z charakterem zjawiska dla  $N = 103$  oraz  $M = 22$  może być podstawą wnioskowania, że przyjęta najmniejsza liczebność serii pomiarowej pozwala na określenie ogólnej tendencji występowania okresowych oscylacji w badanych zjawiskach.

W celu wykazania bardziej ogólnych zależności, nie określanych przez koherencję, przeprowadzono obliczenia znormalizowanego, bezwymiarowego widma energii. Oś rzędnych w tym układzie reprezentuje bezwymiarowe wartości  $\frac{S}{T} \frac{S_m}{T_m}$ , na osi odciętych naniesione są ilorazy  $T/T_m$  w skali logarytmicznej.  $S_m$  i  $T_m$  oznaczają widmową gęstość i okres odpowiadający maksimum krzywej energetycznej.

## WYNIKI OBLICZEŃ OKRESOWOŚCI POZIOMÓW WODY

Analiza widmowych gęstości średnich rocznych poziomów wody w Kołobrzegu naniesionych na ryc. 1 potwierdza istnienie wykazanych już oscylacji w okresach 3, 5-6 oraz 11-letnich (Kowalik, Wróblewski 1973). Okresy jedenastoletnie nie występują wyraźnie. Z ryciny wynika jednak, że okresy te w Świnoujściu dla tego samego czasu pomiarów występują jeszcze słabiej. Koherencja oszacowana dla obu tych stacji wykazuje analizowany okres w sposób bardziej oczywisty, a obliczenie fazy zbliżone do zera potwierdza realność obliczeń. Obliczenia przeprowadzone dla serii ze Świnoujścia, zawierającej 160 lat obserwacji, prezentowane na ryc. 4, wykazują okres jedenastoletni w sposób wyraźny.

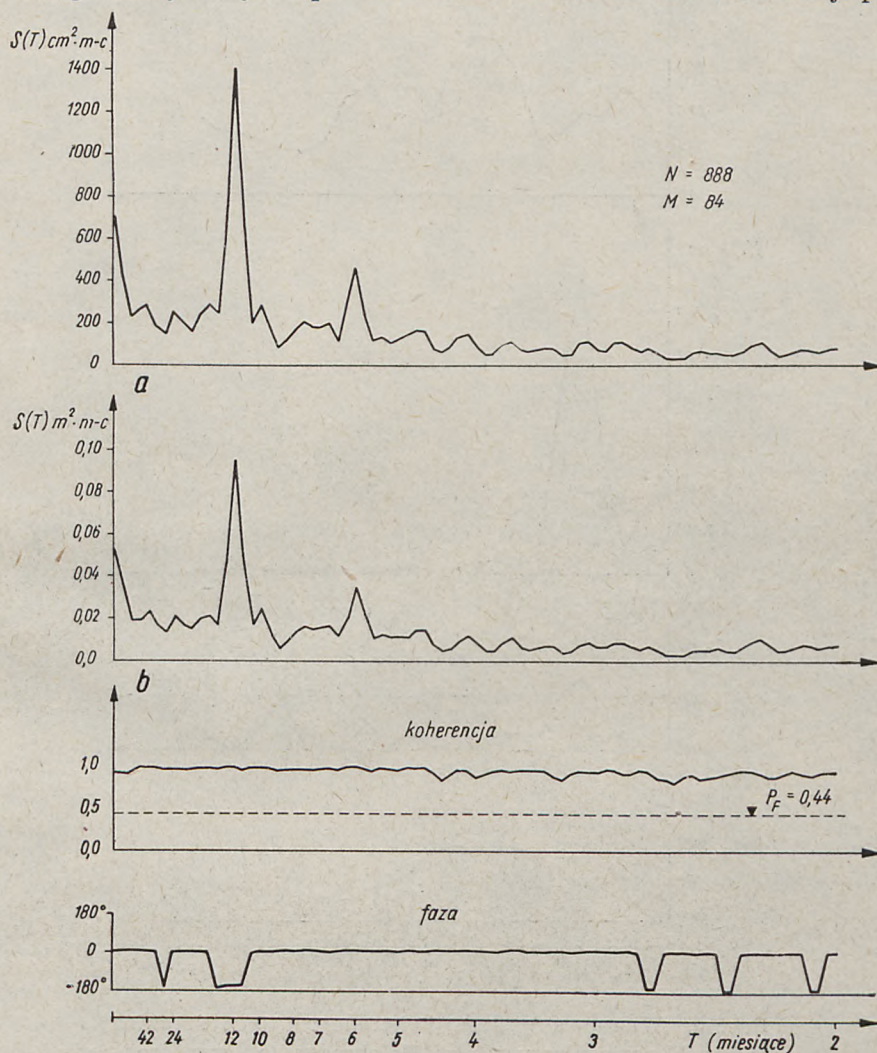


Ryc. 1. Widmowa gęstość, koherencja i faza średnich rocznych poziomów wody w Kołobrzegu (a) oraz w Świnoujściu (b) dla okresu obserwacji 1868—1970

Fig. 1. Power spectrum, coherence and phase of the annual mean water levels in Kołobrzeg (a) and Świnoujście (b) for the observation period 1868—1970

Podobny rezultat dały wyniki obliczeń koherencji pomiędzy średnimi rocznymi poziomami wody w Kołobrzegu a średnimi rocznymi liczbami Wolfa przedstawione na ryc. 3.

Na podstawie wykazanych wyników estymacji widmowych gęstości można wnioskować, że niezbyt wyraźne występowanie okresu jedenaścieletniego na ryc. 1 jest spowodowane krótkim czasem obserwacji przy-

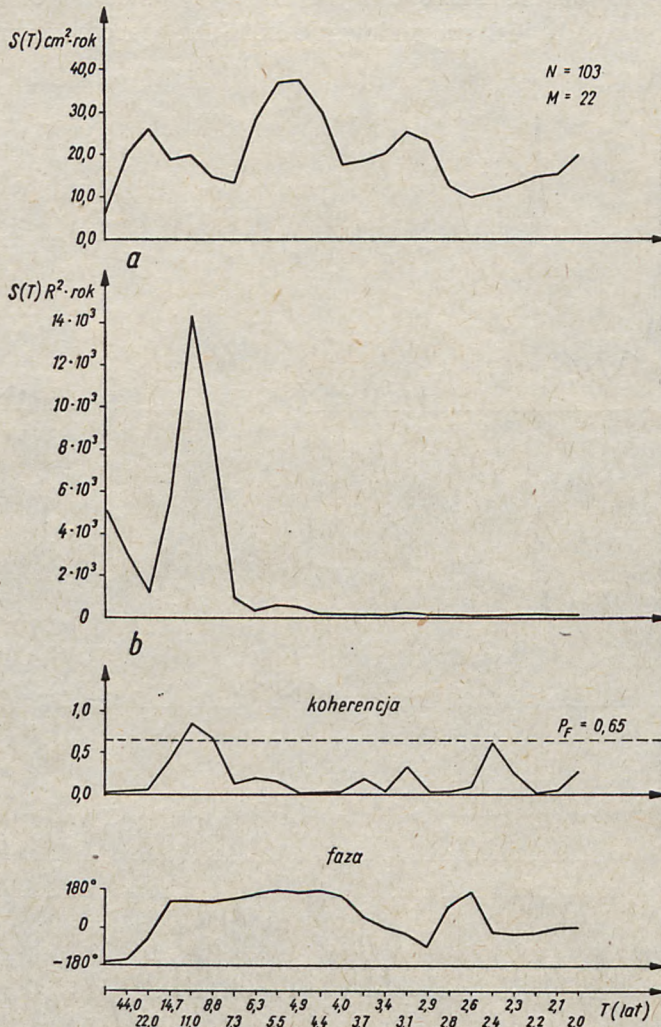


Ryc. 2. Widmowa gęstość, koherencja i faza średnich miesięcznych poziomów wody w Kołobrzegu (a) oraz w Świnoujściu (b) dla okresu obserwacyjnego 1868—1941

Fig. 2. Power spectrum, coherence and phase of the monthly mean water levels in Kołobrzeg (a) and Świnoujście (b) for the observation period 1868—1941

jętym do obliczeń oraz nieregularnym występowaniem wahań poziomów wody tego rodzaju.

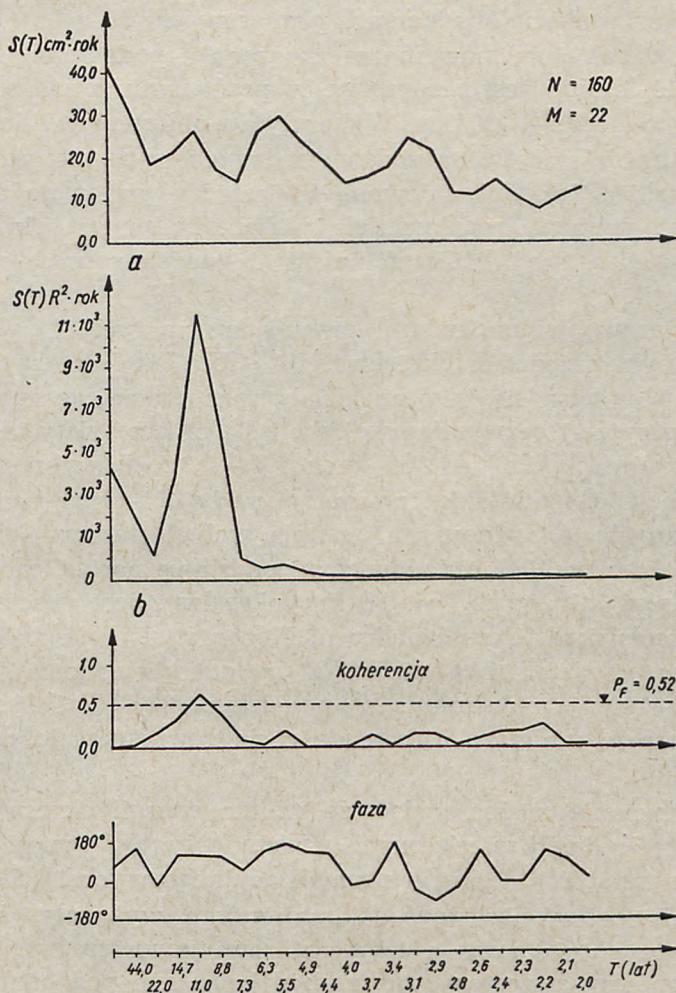
Okresy pięcio- sześćioletnie oraz okresy trzyletnie są wykazane na ryc. 1 w sposób wyraźny dla obu serii pomiarowych. Oscylacje długo-



Ryc. 3. Widmowa gęstość, koherencja i faza średnich rocznych poziomów wody w Kołobrzegu (a) oraz średnich rocznych liczb Wolfa (b) dla okresu obserwacyjnego 1868—1970

Fig. 3. Power spectrum, coherence and phase of the annual mean water levels in Kołobrzeg (a) and annual mean Wolf numbers (b) for the observation period 1868—1970

okresowe, które nie zostały ujęte obecnymi obliczeniami ze względu na zbyt krótkie serie realizacyjne, nie zaznaczają się w Kołobrzegu, występują jednak w Świnoujściu. Koherencja dla tych oscylacji jest poniżej poziomu znaczącego. Okresy dwuletnie na obu stacjach zaznaczają się niezbyt silnie poprzez podniesienie widmowej gęstości przy końcu wykresu.



Ryc. 4. Widmowa gęstość, koherencja i faza średnich rocznych poziomów wody w Świnoujściu (a) oraz średnich rocznych liczb Wolfa (b) dla okresu obserwacyjnego 1811—1970 (Kowalik, Wróblewski 1973)

Fig. 4. Power spectrum, coherence and phase of the annual mean water levels in Świnoujście (a) and annual mean Wolf numbers (b) for the observation period 1811—1970 (Kowalik, Wróblewski 1973,

Wyniki obliczeń przeprowadzonych dla średnich miesięcznych poziomów wody w Kołobrzegu i Świnoujściu (Montag 1964, Dziadziuszko 1973) na podstawie danych z okresu 1868—1941 przedstawione są na ryc. 2. Widmowe gęstości wykazują bardzo wyraźnie występujący okres roczny oraz słabiej zarysowany okres półroczny. Obliczenia koherencji i fazy pozwalają wnioskować o liniowej zależności pomiędzy analizowanymi poziomami wody na obu stacjach pomiarowych.

Energia wahań poziomów morza związana z podanymi oscylacjami 3, 5-6 oraz 11-letnimi jest nieznaczna w porównaniu z całością wahań w przedziale 8 godz. — 20 lat. Wykazały to obliczenia widma energii oparte dla długich okresów na podstawie danych ze Świnoujścia (Kowalik, Wróblewski 1973). Spowodowane to jest zarówno małą amplitudą, jak i niezbyt wyraźną regularnością wahań. Natomiast okres roczny i półroczny według tych obliczeń należą do podstawowych maksimum krzywej energii.

Bezwymiarowe widmo energii wykreślone na ryc. 8 wykazuje, że w analizowanym przedziale okresowości  $2 < T \leq 44$  lat wszystkie procesy posiadają w zasadzie trzy przedziały zaznaczania się energii oscylacyjnej. W przyjętej bezwymiarowej skali  $T/T_m$  przedziały te związane są z wartościami 1,0; 1,43 — 1,75 oraz 2,5 — 3,5. Z wykresu wynika, że dla okresu jedenastoletniego poziomów wody charakteryzowanego na podstawie danych ze Świnoujścia, energia wahań stanowi 30% energii związanej z okresem 3,1 lat stanowiącym podstawę normalizacji. Widmo energii okresów dłuższych, od 11 lat, określone jest szacunkowo ze względu na małą rozdzielczość obliczeń. Można stwierdzić, że dla poziomów wody w przedziale  $14,67 \leq T \leq 22$  lat energia zmienia się w granicach 15% — 19% maksimum. W przedziale  $22 < T \leq 44$  lat ilości energii są jeszcze mniejsze i rozkładają się równomiernie na rzędnej 10% maksimum.

Dla porównania można podać, że widmo energii okresu rocznego, obliczanego ze średnich miesięcznych poziomów wody, wynosi  $116,4 \text{ cm}^2$ . Odpowiednia wartość dla okresu normalizacyjnego wynosi  $7,7 \text{ cm}^2$ .

Obliczenia bezwymiarowego widma energii wykazały, że między wahaniami poziomów morza a temperaturami powietrza, reprezentującymi makroprocesy atmosferyczne, zachodzi znaczne podobieństwo bezwymiarowe struktury okresowej. Ten typ współzależności parametrów geofizycznych został odkryty w 1971 r. w postaci krzywej uniwersalnej (Monin, Vulis 1971).

Średnie roczne poziomy wody zarówno w Świnoujściu, jak i w Kołobrzegu wykazały występowanie liniowego trendu podnoszącego stopniowo wyniki notowań. Trend ten wynosił w Świnoujściu  $0,07 \text{ cm/rok}$  dla obserwacji prowadzonych w latach 1811—1970. W Kołobrzegu anali-



zowano krótszy okres obserwacyjny, 1868—1970, stosując metodę najmniejszych kwadratów. Uzyskana wartość wynosiła 0,12 cm/rok. W przeprowadzonych obliczeniach stosowano poprawki eliminujące wpływ trendu na obliczenia widmowej gęstości. Wyniki obliczeń trendu zgodne są ze znanym zjawiskiem obniżania się brzegu morskiego w rejonie obu stacji pomiarowych. Tendencja ta zgodna jest również z wykazywanym przez niektórych autorów podwyższaniem się poziomu wody w Bałtyku szacowanym na 2,5 cm/100 lat (Lazarenko 1961).

#### WYNIKI BADAŃ DŁUGOOKRESOWYCH OSCYLACJI ZJAWISK GEOFIZYCZNYCH

Z literatury dotyczącej tematu wymienić trzeba przede wszystkim pracę Monina i Vulisa (1971) wykonaną na podstawie 21, bardzo długich serii obserwacyjnych różnych zjawisk geofizycznych. Między innymi analizowano 8 serii pomiarów temperatury powietrza w Norwegii, Szwecji, Niemczech i ZSRR. Okres obserwacyjny tych pomiarów zawarty był w przedziale 184—215 lat. Poza tym uwzględniono liczbę dni wolnych od lodu na trzech rzekach ZSRR podczas 224, 226 i 236-letnich notowań. Pozostałe badania przeprowadzono na podstawie grubości słoju drzewnych oraz warstw osadowych reprezentujących setki i tysiące lat występowania warunków klimatycznych. Obliczenia wykonano za pomocą widmowych gęstości. Nie stwierdzono występowania okresów 22 i 11-letnich, a tylko w dwóch seriach zaznaczył się okres 5,5-letni. Podane trzy okresy są uważane za wskaźnik oddziaływania zmian aktywności słonecznej na zjawiska geofizyczne. Można uważać, że wyniki obliczeń w zakresie analizowanych elementów wpływu tego prawie nie wykazały. Maksima widmowych gęstości układały się w przedziale 3,5—7 lat.

W innej pracy, opartej na 130-letnich oraz 198-letnich obserwacjach temperatury powietrza, wykazano występowanie maksimów widmowej gęstości dla okresów 5,5 i 3 letnich (Kolesnikowa, Monin 1968).

W badaniach ciśnienia atmosferycznego, po poddaniu analizie 29 serii pomiarowych, stwierdzono występowanie okresu 11-letniego tylko w 3% obliczonego materiału (Družinin, Konovalenko, Kukušina, Kamyanova 1966). Zaznaczyć jednak należy, że składowe okresowe wykrywano na podstawie korelogramów. Przeprowadzone tą samą metodą badania opadów atmosferycznych, oparte na 70 seriach obserwacyjnych, wykazały występowanie okresu jedenastoletniego tylko dla 6% wypadków (Družinin, Konovalenko, Kukušina, Kamyanowa 1966).

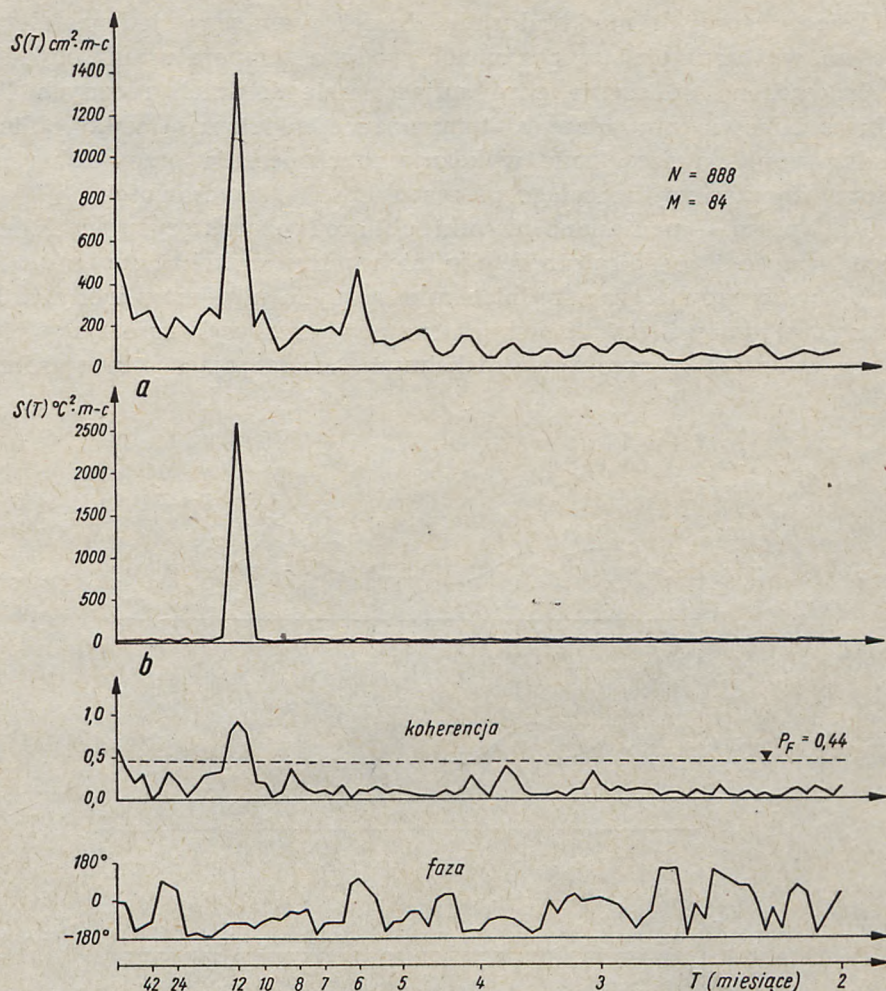
Ze zjawisk hydrologii śródlądowej najważniejsze znaczenie dla reżimu basenu bałtyckiego ma spływ wód rzecznych. Czynniki ten może być reprezentowany przez średnie roczne odpływy. Najbardziej prawdo-

podobne okresy występowania cykliczności w średnich rocznych odpływach rzek na północnej półkuli zawarte są w przedziałach 2—3, 5—7, 10—12 oraz 25—28 lat (Kalinin, Davydova 1968). Dla przykładu można podać, że widmowe gęstości średnich rocznych odpływów Renu, obliczone na podstawie 153 lat obserwacji, wykazały jedynie możliwość istnienia ukrytego okresu pięcioletniego (Siegerstetter 1971). Wisła pod Tczewem wykazuje zaznaczanie się cykliczności odpływów rocznych w okresach 2, 3 i 6 lat (Mitosek 1970). W zasadzie średnie roczne odpływy z rzek nie zawsze są zjawiskiem okresowym. W zależności od warunków lokalnych składowe okresowe mogą się zaznaczyć w sposób mniej lub bardziej wyraźny, wykazując skomplikowane oddziaływanie atmosfery na stosunki hydrologiczne dorzecza.

#### POWIĄZANIE DŁUGOOKRESOWYCH OSCYLACJI POZIOMÓW WODY Z MAKROPROCESAMI ATMOSFERYCZNYMI

Długookresowe oscylacje poziomów Morza Bałtyckiego zależne są od wielu czynników. Przede wszystkim należy wymienić: intensywność cyrkulacji atmosferycznej nad Północnym Atlantykiem, Morzem Północnym oraz Bałtykiem, dopływ wód lądowych do basenu morskiego, ruchy eustatyczne oceanu światowego, fale długookresowe, opady, parowanie i zmiany gęstości mas wodnych. Analiza wpływu wymienionych czynników na poziomy wody jest bardzo utrudniona, ponieważ brak jest dostatecznie długich serii obserwacyjnych umożliwiających przeprowadzenie odpowiednich obliczeń. Dotychczas udało się udowodnić obliczeniami stochastycznymi, że okresy jedenastoletnie związane są z cyklicznymi zmianami aktywności słonecznej (Kowalik, Wróblewski 1973). Zmiany te reprezentowane są w sposób ogólny przez liczby Wolfa. Wyniki ostatnich badań, dotyczących wpływu aktywności słonecznej na atmosferę ziemską, zdają się wskazywać, że zmiany te zaznaczają się w troposferze poprzez rozkład ciśnienia atmosferycznego. Zależności te mają jednak bardzo złożony charakter, co powoduje, że wyniki badań w tym zakresie są przeważnie hipotezami.

W niniejszej pracy przeprowadzono obliczenia pozwalające porównać długookresową zmienność poziomów wody w Świnoujściu ze średnimi rocznymi temperaturami powietrza w Krakowie. Okresy obserwacyjne w tym wypadku wynosiły 140 lat. Rezultaty obliczeń przedstawione są na ryc. 6. Obliczenia koherencji nie wykazały jednak przekroczenia poziomu znaczącego dla okresów 3, 5—6 oraz 11 lat występujących w poziomach wody. Dla długich okresów, pozostających poza rozdzielczością przeprowadzonych obliczeń ze względu na zbyt krótkie serie realizacyjne, koherencja wykazała istotną współzależność obu badanych procesów. W zakresie poziomów wody obliczenia przeprowadzone dla



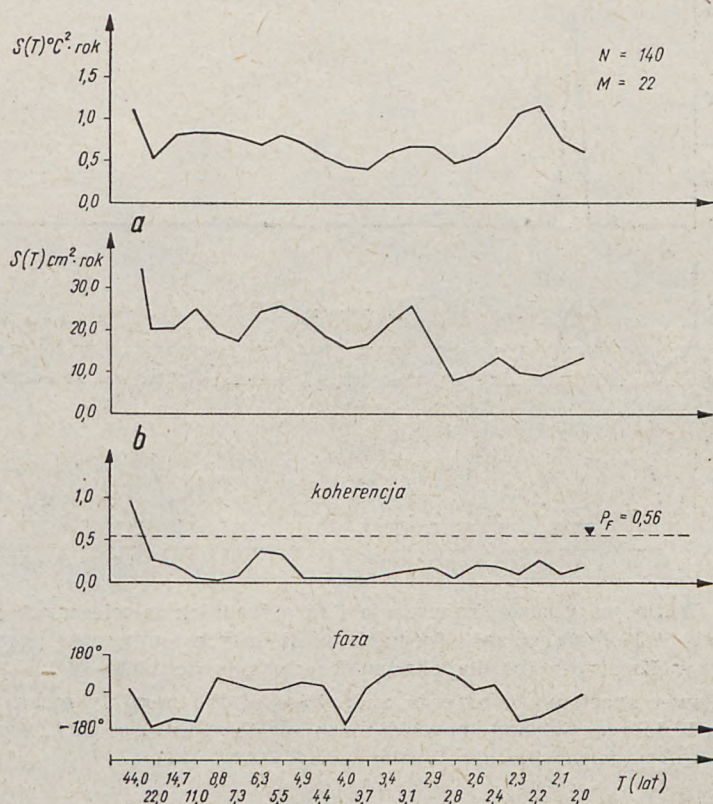
Ryc. 5. Widmowa gęstość, koherencja i faza średnich miesięcznych poziomów wody w Kołobrzegu (a) i średnich miesięcznych temperatur powietrza w Krakowie (b) dla okresu obserwacyjnego 1868—1941

Fig. 5. Power spectrum, coherence and phase of the monthly mean water levels in Kołobrzeg (a) and monthly mean air temperatures in Cracow (b) for the observation period 1868—1941

różnych  $M > 22$  na podstawie 160 lat obserwacji wykazały jedynie bardzo słabo zaznaczające się okresy 15,6 oraz 23—28 lat. Nie stwierdzono zarysowania się oscylacji w przedziale 30—45 lat. Przebieg wykresu widmowej gęstości wskazywał jednak na istnienie oscylacji o okresach jeszcze dłuższych. Obliczenia nie wykluczały więc istnienia okresu ca 80 lat, wspomnianego w literaturze, na podstawie obliczeń za pomocą średniej ruchomej.

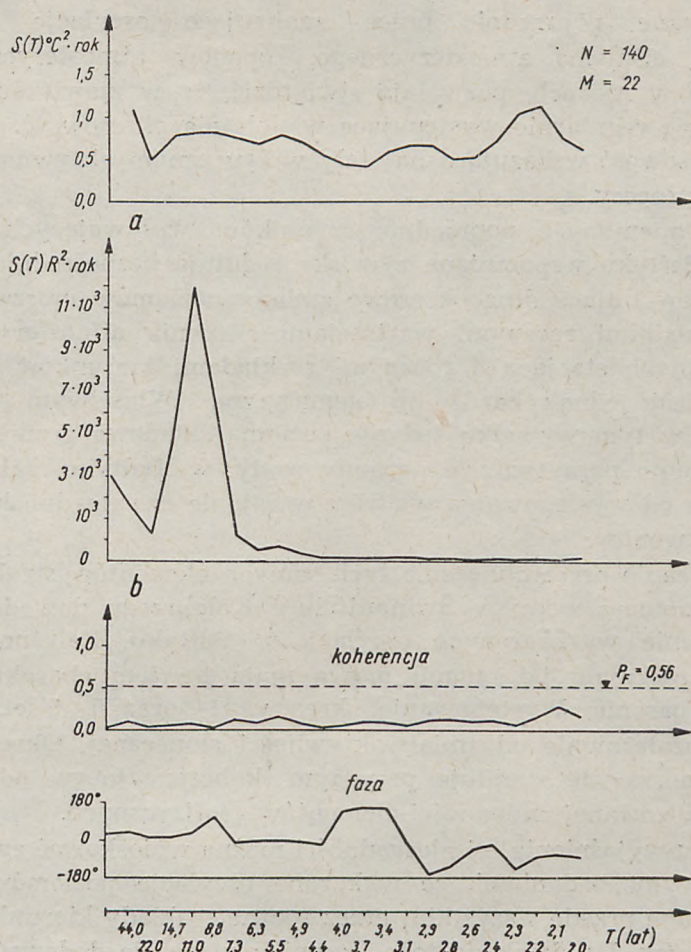
W celu sprawdzenia braku zależności pomiędzy jedenastoletnim okresem występującym w poziomach wody a temperaturami powietrza przeprowadzono obliczenie porównujące serię średnich rocznych liczb Wolfa z odpowiednimi danymi temperatur powietrza. Wyniki obliczeń przedstawione na ryc. 7 nie wykazują przekroczenia przez koherencję poziomu znaczącego dla całego pasma obliczonej okresowości.

Na rycinę 5 naniesiono wyniki obliczeń charakteryzujących widmową gęstość i współzależność średnich miesięcznych temperatur powietrza w Krakowie oraz średnich miesięcznych poziomów wody w Kołobrzegu. Widmowa gęstość temperatur powietrza wykazuje tylko jedno bardzo wyraźnie zarysowane maksimum zaznaczające okres roczny.



Ryc. 6. Widmowa gęstość, koherencja i faza średnich rocznych temperatur powietrza w Krakowie (a) oraz średnich rocznych poziomów wody w Świnoujściu (b) dla okresu obserwacyjnego 1826—1965

Fig. 6. Power spectrum, coherence and phase of the annual mean air temperatures in Cracow (a) and annual mean water levels in Świnoujście (b) for the observation period 1826—1965



Ryc. 7. Widmowa gęstość, koherencja i faza średnich rocznych temperatur powietrza w Krakowie (a) oraz średnich rocznych liczb Wolfa (b) dla okresu obserwacyjnego 1826—1965

Fig. 7. Power spectrum, coherence and phase of the annual mean air temperatures in Cracow (a) and annual mean Wolf numbers (b) for the observation period 1826—1965

Pozostała część wykresu nie ujawnia żadnego śladu występowania okresowych oscylacji. Przekroczenie przez koherencję poziomu znaczącego dla okresu rocznego należy interpretować jako wykazanie wspólnego cyklu zmian dla obu badanych procesów. Cykl ten występuje bardzo wyraźnie we wszystkich zjawiskach hydrometeorologicznych. Bezpośrednia zależność poziomów morza od temperatury powietrza wynika ze zmian gęstości mas wodnych. Pionowe ruchy mas wodnych spowodowane tym procesem wynoszą ca 2,5 cm (Wyrutki 1954).

Cytowane poprzednio prace, analizujące oscylacje temperatur powietrza, ciśnienia atmosferycznego, opadów atmosferycznych oraz odpływów w rzekach, pozwalają stwierdzić, że w zjawiskach tych nie zaznacza się regularnie występująca wieloletnia okresowość, a tym bardziej okresowość wskazująca na stały wpływ zmian aktywności słonecznej na te procesy.

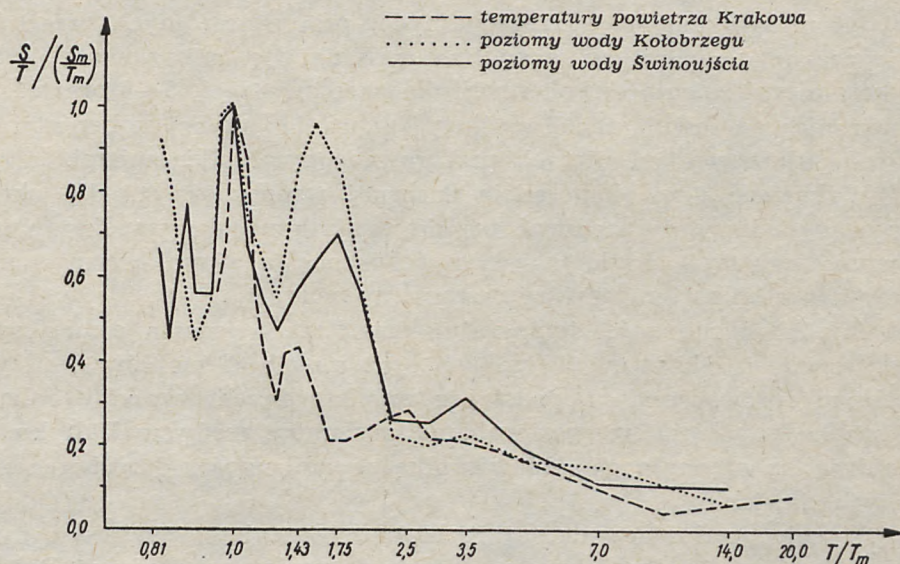
Z wymienionych poprzednio czynników wpływających na stany wody w Bałtyku wspomniane zjawiska regulują bezpośrednio wszystkie procesy powodujące długookresowe zmiany poziomów morza. Zależność między średnimi rocznymi wartościami ciśnienia atmosferycznego na poszczególnych stacjach a rocznymi rozkładami kierunków i prędkości wiatrów jest jednak bardzo problematyczna. Właściwym miernikiem może być w tym wypadku jedynie pozioma składowa gradientu ciśnienia. Wiadomo poza tym, że poziomy wody w Bałtyku zależą przede wszystkim od występowania wiatrów w rejonie cieśnin duńskich i przyległych akwenów.

Wykazanie przez obliczenia tych samych elementów struktury okresowej poziomów wody w Świnoujściu i Kołobrzegu dowodzi ogólnego występowania wyznaczonych oscylacji w Bałtyku. Zależności między średnimi rocznymi poziomami morza mają bowiem charakter liniowy w całym basenie. Występowanie okresów 11- oraz 5—6-letnich wskazuje na uzależnienie od zmian aktywności słonecznej. Okresowość poziomów morza nie znajduje przy tym koherencyjnego odpowiednika w przeanalizowanej zmienności elementów geofizycznych.

W celu wyjaśnienia tej niezgodności można wnioskować zgodnie z dotychczasowymi badaniami, że wykazane oscylacje poziomów wody są spowodowane przede wszystkim przez roczne rozkłady kierunków i prędkości wiatrów. Do działania tego czynnika mogą się dodawać inne procesy posiadające składowe okresowe. Wniosek taki jest zgodny z dynamiką zmian poziomów wody w morzu, gdzie decydująca rola wiatru jest całkowicie udowodniona. Przyjęcie tego założenia tłumaczy, dlaczego w dotychczas zbadanych zjawiskach atmosferycznych i hydrologicznych występowanie okresowości zaznaczyło się o wiele słabiej. W analizach tych nie uwzględniono bowiem oscylacji wiatru.

Badania nad zależnością średniego miesięcznego stanu wody w Bałtyku od składowej poziomej gradientu ciśnienia atmosferycznego na linii Malmö—Mariehamn przeprowadziła Lisitzin wykazując istotną współzależność między badanymi zjawiskami (Lisitzin 1963). Prace te ujmujące lata 1926—1935 udowadniają, że brak ścisłych danych anemometrycznych można zastąpić ogólnie gradientem ciśnienia wykazującym wpływ atmosfery na wymianę wód Bałtyku z Morzem Północnym poprzez Cieśniny Duńskie.

Ostateczne rozwiązanie problemu czynników dynamicznych powodujących wykazaną okresowość poziomów wody mogą dać tylko dodatkowe badania widmowych gęstości. Potrzebne jest przeprowadzenie analizy wpływu na długookresowe zmiany poziomów wody wszystkich powiązanych z tym zjawiskiem procesów atmosferycznych i hydrologicznych. Procesy te powinny być charakteryzowane przez odpowiednio długie serie obserwacyjne.



Ryc. 8. Znormalizowane, bezwymiarowe widmo energii długookresowych oscylacji poziomów wody Morza Bałtyckiego oraz temperatur powietrza w Krakowie dla przedziału okresowości  $2 < T \leq 44$  lat

Fig. 8. Standardized, non-dimensional energy spectrum of long-period oscillations in the levels of the Baltic Sea and air temperatures in Cracow for the periodicity interval  $2 < T \leq 44$  years

Wykazane podobieństwo struktury okresowej poziomów wody i temperatur powietrza wskazuje na ogólną współzależność analizowanych procesów. Na obecnym etapie rozwoju badań bardziej szczegółowe wnioski na podstawie bezwymiarowej struktury okresowej nie może być przeprowadzone.

### Wnioski

Obliczenia wykonane na podstawie kołobrzesckiej serii pomiarowej poziomów wody potwierdziły występowanie w Bałtyku oscylacji o okre-

sach 0,5, 1, 3, 5—6 oraz 11 lat. Największą amplitudę wahań wykazuje okres roczny, a następnie okres półroczny występujący jednak słabiej. Pozostałe okresy posiadają niezbyt wyraźną regularność występowania. Powiązanie okresu jedenastoletniego ze zmianami aktywności słonecznej, reprezentowanymi przez liczby Wolfa, wykazane w poprzednich badaniach, (Kowalik, Wróblewski 1973) potwierdzone zostało również przez analizę danych z Kołobrzegu.

Próba znalezienia współzależności między długookresowymi oscylacjami makroprocesów atmosferycznych, reprezentowanych przez średnie roczne temperatury powietrza w Krakowie, a poziomami wody wykazała brak znaczącej koherencji dla okresów 0,5, 3, 5—6 oraz 11 lat. Obliczenia zarysowują możliwość występowania istotnej koherencji dla okresów dłuższych od ujętych przeprowadzonymi obliczeniami.

Wykazanie przez koherencję znacznej współzależności dla okresu rocznego należy interpretować przede wszystkim jako wspólne występowanie tego typu oscylacji w obu zjawiskach, a w mniejszym stopniu jako wpływ zmian temperatury na poziomy morza.

Analiza okresowości temperatur powietrza, ciśnienia atmosferycznego, opadów, odpływów w rzekach oraz innych elementów geofizycznych, przeprowadzona na podstawie publikowanych wyników obliczeń wykazała, że długookresowe wahania poziomów wody w Bałtyku nie znajdują koherencyjnego odpowiednika w zmienności dotychczas zbędanych zjawisk.

W celu wytłumaczenia tej rozbieżności przyjęto, zgodnie z dynamiką zjawiska, że długookresowe oscylacje poziomów wody w Bałtyku zależą przede wszystkim od średnich rocznych rozkładów kierunków i prędkości wiatru w rejonie basenu morskiego i przyległych akwenów. Działanie tego czynnika uzupełniają inne elementy dynamiki poziomów wody mające znaczenie raczej drugorzędne. W celu wykazania dominującej roli wiatru w generacji długookresowych wahań, potrzebne jest jednak wykonanie dodatkowych obliczeń widmowych gęstości, opartych na odpowiednio długich obserwacjach obejmujących wszystkie istotne czynniki wpływające na zmiany analizowanego zjawiska.

Badania przeprowadzone za pomocą znormalizowanego, bezwymiarowego widma energii wykazały podobieństwo bezwymiarowej struktury okresowej poziomów wody w morzu i temperatur powietrza reprezentujących makroprocesy atmosferyczne.

W zakończeniu pracy autor składa podziękowanie Z. Dziadziuszce z Oddziału Morskiego PIHM za udostępnienie wyników notowań poziomów wody oraz za cenne uwagi dotyczące ich wykorzystania.



A. WRÓBLEWSKI

Polish Academy of Sciences Institute of Geophysics — Sopot

SPECTRAL DENSITIES OF LONG-PERIOD OSCILLATIONS  
IN THE LEVELS OF THE BALTIC SEA

Summary

Calculations based on the Kołobrzeg water level measurements, confirmed periodic oscillations of 0.5; 1; 3; 5—6 and 11 years, in the Baltic. The one-year period showed the greatest amplitude of oscillation, this being followed by the 0.5-year period, which was, however, much weaker. The remaining periods had no distinct regularity. Relationship between the 11-year period and changes in solar activity represented by Wolf numbers given in previous studies (Kowalik, Wróblewski 1973) was confirmed by the analysis of data from Kołobrzeg.

An attempt to find some correlation between long-period oscillations of atmospheric macroprocesses represented by mean annual air temperature in Cracow and water levels, showed a substantial lack of significant coherence for the 0.5; 3; 5—6 and 11-year periods. The calculations outline the possibility of the occurrence of significant coherency for periods longer than covered by the studies.

The indicating, by coherency, of an important correlation for the one-year period, should be interpreted primarily as the occurrence of this type of oscillation in both phenomena and to a lesser extent, as the direct influence, of temperature changes on water levels.

Analyses of the periodicity of temperature of the air, atmospheric pressure, rainfall, outflows in rivers, or other geophysical elements, carried out on the basis of published results of calculations, showed that no coherent equivalent was found in the oscillations of the phenomena studied so far and long-period fluctuations of water levels in the Baltic.

To explain this divergency, it was assumed in accordance with the dynamics of these phenomena, that long-period oscillations of the levels of the Baltic Sea, depend primarily, upon the mean annual distribution of wind speeds and directions above the sea basin and neighbouring waters. The action of this factor is supplemented by other elements of the dynamics of water levels which are rather of secondary importance. In order to demonstrate the dominating role of the wind in the generating of long-period oscillations, it is necessary to perform additional calculations of spectral densities based on suitably long-term observations covering all the important factors influencing the changes in the phenomena analyzed.

Studies carried out using a standard, non-dimensional energy spectrum revealed the similarity of the periodic structure of the water levels and air temperatures representing atmospheric macroprocesses.

LITERATURA

REFERENCES

- Blackman R.B. (1958), Tukey J.W., *The Measurement of Power Spectra from point of View of Communication Engineering*, Bell System Tech. Journ., 37.

- Druet C., Kowalik Z. (1970), *Dynamika morza*, Gdańsk.
- Družinin I.P., Konowalenko Z.P., Kukušina V.P., Kamyanova N.V. (1966), *Rečnyj stok i geofizičeskie processy*, Moskwa.
- Dziadziuszko Z. (1971), *Średnie roczne stany wody w Swinoujściu z okresu 1811—1970*. Maszynopis. Biblioteka Zakładu Oceanologii IG PAN. Sopot.
- Dziadziuszko Z. (1973), *Stany wody w Kołobrzegu w latach 1868—1970*. Maszynopis. Biblioteka Zakładu Oceanologii IG PAN. Sopot. (W opracowaniu wykorzystano materiały H. Króla z PIHM).
- International Association of Physical Oceanography, *Monthly and annual heights of sea level*, Publications Scientifiques N° 5, (1940); N° 10, (1950).
- Kalinin G.P., Davydova A.J. (1968), *Cikličeskie kolebanija rek severnogo polusarija. Problemy rečnogo stoka*, Moskwa.
- Kowalik Z. (1968), *Metody widmowych rozkładów energii na przykładzie zmienności niektórych parametrów w morzu*, Rozpr. hydrot., z. 22, IBW PAN.
- Kowalik Z., Wróblewski A. (1973), *Okresowe wahania stanów wody przy polskich wybrzeżach Południowego Bałtyku*, Arch. Hydrotechniki, t. 20, z. 2.
- Kowalik Z., Wróblewski A. (1973), *Long-term oscillations of annual mean sea level in the Baltic, on the basis of observations carried out in Swinoujście from 1811 to 1970*, Acta geoph. pol. vol. 21, n. 1.
- Kolesnikova V.N., Monin A.S. (1968), *O spektrach mikrometeorologicznych, sinoptycznych i klimatičeskich kolebanij meteorologicznych polej*, Meteorol. Issled. N° 16 Moskwa.
- Lazarenko N.N. (1961), *Kolebanija urovnja Baltijskogo Morja*. Trudy GOIN 65 (161).
- Lisitzin E. (1963), *Some characteristics of the variation in the water volume in the Baltic as a function of air pressure gradient changes*, Comment. phys.-math. Soc. Sci. Fennica, t. 26, nr 1—10.
- Mergentaler J. (1958), *Słońce*, Warszawa.
- Mergentaler J. (1955), *Plamy słoneczne*, Acta geoh. pol. 1955 i następne numery.
- Mitosek H. (1970), *Przebieg standaryzowanej funkcji autokorelacyjnej i funkcji widmowej gęstości średnich przepływów rocznych*, Przegląd geof. R. 15, z. 2.
- Montag H. (1964), *Die Wasserstände an den ehemaligen Pegelstationen des Geodätischen Instituts Potsdam bis 1944*. AGIP N° 5. Manuskript, Potsdam.
- Monin A.S., Vulis P.P. (1971), *On the spectra of long-period oscillations of geophysical parameters*, Tellus vol. 23, N° 4—5.
- Roczniki Hydrograficzne Morza Bałtyckiego 1948—1969, Państwowy Instytut Hydrologiczno-Meteorologiczny.
- Siegerstetter L. (1971), *Synthetic series produced by means of probability analysis as applied to the river Rhine*, Bull. of the Int. Assoc. of Scient. Hydrology, vol. 16, N° 3.
- Trepińska J. (1971), *The secular changes of air temperature in Cracow on the basis of the 140-year series of meteorological observations 1826—1965 made in the Astronomical Observatory of the Jagiellonian University*, Acta geoph. pol. vol. 19, N° 3.
- Wyrтки K. (1954) *Schwankungen im Wasserhaushalt der Ostsee*, Deutsche Hydrogr. Z, Bd. 7, H. 3/4.