

550-letnia symulacja naturalnych zmian poziomu morza w rejonie polskiego wybrzeża Morza Bałtyckiego

550-year long simulation of natural variability
of sea level along the Polish coast of the Baltic Sea

Mirosław Miętus^{1,2}

Zarys treści: W pracy przedstawiono rekonstrukcję zmian poziomu morza w sezonie zimowym w latach 1466-1990 na przykładzie Świnoujścia i Gdyni. Rekonstrukcji dokonano techniką statystycznego downscalingu wykorzystując rezultaty 550-letniej symulacji naturalnych zmian ciśnienia atmosferycznego na poziomie morza oraz statystyczno-empiryczne funkcje przejścia między regionalnym polem ciśnienia atmosferycznego a poziomem morza wzdłuż polskiego wybrzeża Morza Bałtyckiego (Miętus 1999). Serie zrekonstruowanych wartości poziomu morza cechują się statystycznie nieistotnymi dodatnimi tendencjami, gdy tymczasem serie pomiarowe wskazują na silny statystycznie istotny wzrost poziomu morza. Również analiza widmowa potwierdza odmienność głównych cech zmienności serii rekonstruowanych i pomiarowych. Zdaje się to wskazywać na fakt, że rzeczywista zmienność poziomu morza wzdłuż polskiego wybrzeża Morza Bałtyckiego jest spowodowana także innymi niż naturalne czynnikami.

Słowa kluczowe: naturalna zmienność klimatu, poziom morza, Morze Bałtyckie, statystyczny downscaling, korelacje kanoniczne

Key words: natural climate variability, sea level, the Baltic Sea, statistical downscaling, canonical correlation

Cel pracy i przyjęte metody

Podstawowym celem pracy jest rekonstrukcja naturalnej zmienności poziomu morza w rejonie polskiego wybrzeża w okresie ostatnich 550 lat oraz potwierdzenie lub zanegowanie hipotezy o nienaturalnych przyczynach obserwowanych zmian.

¹ Katedra Meteorologii i Klimatologii, Uniwersytet Gdański, ul. Dmowskiego 16a, 80-264 Gdańsk,
e-mail: mietus@univ.gda.pl

² Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej, Oddział Morski w Gdyni, ul. Waszyngtona 42, 81-342 Gdynia,
e-mail: Miroslaw.Mietus@imgw.pl

Do realizacji celu wykorzystano metody typowe dla statystycznego downscalingu, wśród których do najpopularniejszych zaliczana jest metoda korelacji kanonicznych (Barnett, Preisendorfer 1987). Statystyczny downscaling to najogólniej rzecz biorąc zespół procedur mających na celu określenie empirycznych funkcji przejścia między dwoma polami, z których jedno z zasady prezentuje zmienną wielkoskalową (globalną/regionalną), drugie zaś jest związane z polem lokalnym. Za pomocą empirycznych funkcji przejścia możliwe jest dokonanie, na podstawie modelu liniowego, rekonstrukcji zmienności pola lokalnego, jak również opracowanie scenariusza jego spodziewanej zmienności. Techniki statystycznego downscalingu zostały szeroko omówione w wielu pracach, z których warto tutaj wymienić: H. v. Storch, P. Werner (1993), M. Cui i in. (1995), H. v. Storch, E. Zorita (1997), H. v. Storch, F. Zwiers (1999). Przegląd uwarunkowań związanych ze stosowaniem statystycznego downscalingu można znaleźć m.in. w pracach Ch. Kilby i in. (2000) i F. Giorgi i in. (2001).

Rekonstrukcji dokonano na podstawie wyników symulacji numerycznej, wykonanej w DKRZ (Hamburg, Niemcy) i w GKSS (Geesthacht k. Hamburga), która opierała się na atmosferyczno-oceanicznym modelu ogólnej cyrkulacji (A-O GCM). Model atmosferyczny cechował się rozdzielczością przestrzenną $3,75^\circ \times 3,75^\circ$ (T30). W modelu tym uwzględniono procesy związane z aktywnością słoneczną i zmianami bilansu radiacyjnego atmosfery, wynikającymi z procesów naturalnych, takich jak: czynniki astronomiczne, aktywność wulkaniczna i naturalna emisja CO_2 . Model oceaniczny to trójwymiarowy model cyrkulacji oceanicznej HOPE. Między obu ośrodkami występowało sprzężenie. W przeprowadzonym eksperymencie obliczeniowym autorzy modelu symulowali naturalną zmienność klimatu w okresie ostatnich 550 lat. Przez pierwsze 25 lat symulacji system dochodził do wewnętrznej równowagi, następnie model symulował zmienność klimatu w okresie 1466-1990.

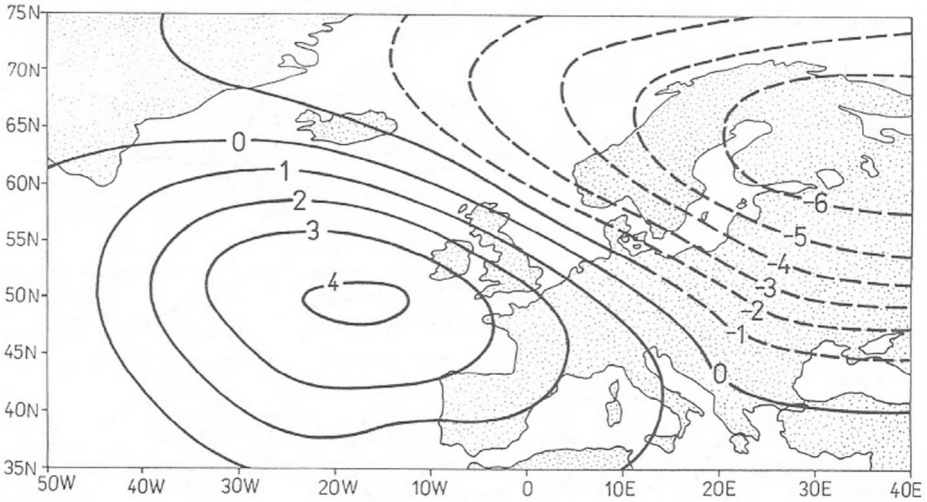
Wyniki

Empiryczne funkcje przejścia między regionalną cyrkulacją atmosferyczną a poziomem morza wzdłuż polskiego wybrzeża

Związek między regionalną cyrkulacją atmosferyczną a poziomem morza w rejonie polskiego wybrzeża wyznaczono metodą korelacji kanonicznych (Miętus 1999, 2000, 2003). Ze względu na fakt, że maksymalne wartości poziomu morza są związane z występowaniem wzbrań sztormowych, wywołanych przez sztormowe wiatry, analizę ograniczono do okresu zimy (grudzień-luty). Do zbudowania modelu statystyczno-empirycznego wybrano okres pomiarów instrumentalnych 1961-1980.

Relacje między średnim poziomem morza (H_{SR}) a regionalnym wymuszeniem atmosferycznym opisuje pierwsza para map kanonicznych, przedstawiona na rycinie 1 i w tabeli 1.

W sezonie zimowym związek między regionalnym polem barycznym a poziomem morza wzdłuż polskiego wybrzeża jest określony przez jedną parę map, z których mapa



Ryc. 1. Pierwsza mapa kanoniczna regionalnego pola barycznego (anomaliae w hPa) nad Europą i północnym Atlantykiem w zimie (Miętus 1999)

Fig. 1. The first canonical pattern of the regional mean sea level atmospheric pressure (anomalies in hPa) over Europe and North Atlantic in winter (Miętus 1999)

pola barycznego wyjaśnia 25% jego wariacji, a mapa pola lokalnego aż 98% wariacji pola lokalnego. Ponadto korelacja obu sygnałów jest bardzo silna i wynosi 0,80. Mapa pola barycznego (ryc. 1) prezentuje sytuację, w której północno-wschodnia część regionu jest pod wpływem układu barycznego z centrum na wschód od Morza Białego, podczas gdy pozostała jego część jest w zasięgu słabszego ośrodka przeciwnego znaku z centrum na południowy zachód od Irlandii. Odpowiadający takiemu polu barycznemu układ poziomu morza jest przedstawiony w tabeli 1. Zwierciadło wody jest odchylone o kilkanaście cm od stanu równowagi. Wartość odchylenia wzrasta w kierunku wschodnim. Jest to związane z wymuszeniem atmosferycznym, silnym i stabilnym splywem mas powietrza z północnego zachodu (w rejonie Kattagatu, cieśnin duńskich oraz południowego Bałtyku gradient baryczny jest silny).

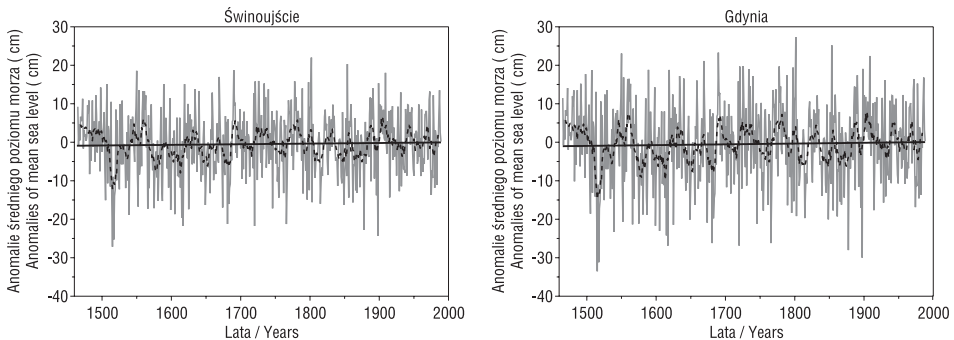
Tab. 1. Pierwsza mapa kanoniczna średniego poziomu morza wzdłuż polskiego wybrzeża (H_{SR} , anomaliae w cm) w zimie (Miętus 1999)

Table 1. The first canonical pattern of the mean sea level (H_{SR} , anomalies in cm) along the Polish coast in winter (Miętus 1999)

Stacja / Station	Zima / Winter
Świnoujście	13,03
Kołobrzeg	14,57
Ustka	15,09
Władysławowo	16,61
Hel	16,29
Gdynia	16,16
Gdańsk-Port	16,25
Ujście Wisły	18,49

Rekonstrukcja zmienności poziomu morza

Opierając się na strategii przedstawionej m.in. przez M. Cui i in. (1995) dokonano rekonstrukcji zmian poziomu morza w okresie zimy w latach 1464-1990 na podstawie symulacji naturalnej zmienności ciśnienia atmosferycznego. Wyniki tej rekonstrukcji przedstawiają ryciny 2 i 3.



Ryc. 2. Rekonstrukcja zmienności poziomu morza w Świnoujściu i w Gdyni w zimie w latach 1466-1990. Linia pogrubioną zaznaczono serie wygładzone 11-letnią średnią ruchomą. Prosta przedstawia regresję liniową dopasowaną do danych

Fig. 2. Reconstruction of sea level variability in Świnoujście and in Gdynia in winter, 1466-1990 with 11-years moving averages (thick lines) and linear regressions fitted to reconstructed data

W tabeli 2 przedstawiono wartości współczynników regresji liniowej zmian poziomu morza w latach 1466-1990, 1811-1990 i 1951-1990 dotyczące serii rekonstruowanej na podstawie modelu oraz serii pomiarowych. Jak wyraźnie widać, zmiany poziomu morza wynikające z modelu (tzw. zmiany naturalne) są wielokrotnie słabsze od zmian rejestrowanych na wodowskazach i przez mareografy.

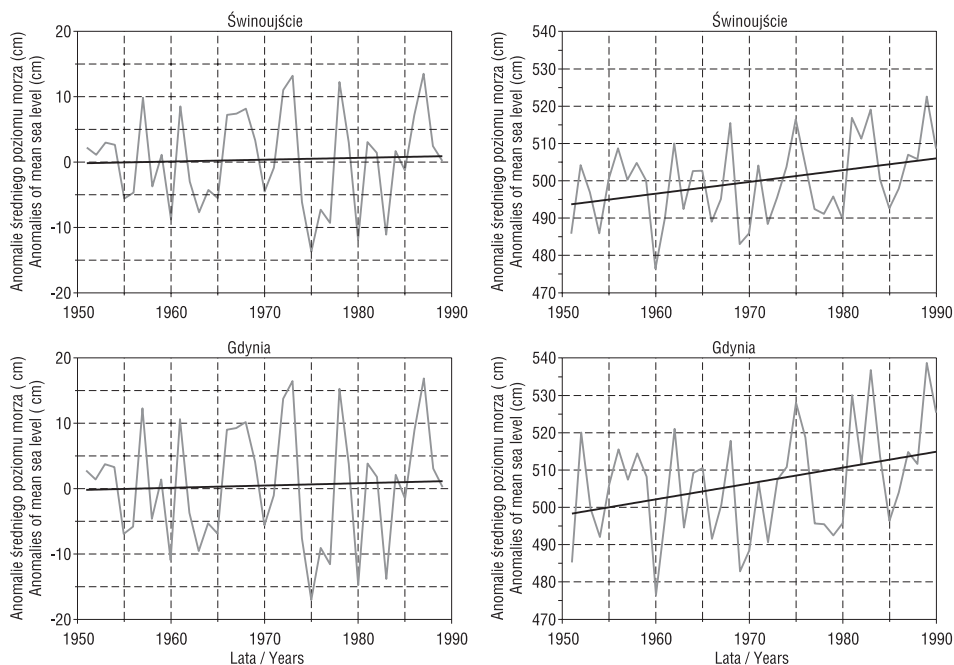
Tab. 2. Wartości współczynników regresji liniowej zmian poziomu morza w sezonie zimowym w Świnoujściu i w Gdyni ($\text{cm}\cdot\text{rok}^{-1}$) w latach 1464-1990 i innych podokresach

Table 2. Coefficients of linear regressions ($\text{cm}\cdot\text{year}^{-1}$) fitted to original sea level data (measurements) and to reconstructed sea level data (model) in winter for the period 1464-1990 and some sub-periods

Stacja Station	1466-1990		1811-1990		1951-1990	
	Model	Pomiar Measurement	Model	Pomiar Measurement	Model	Pomiar Measurement
Świnoujście	0,0016	-	0,016	0,0576 ¹	0,0280	0,3160 ²
Gdynia	0,0020	-	-	-	0,0734	0,4236 ²

¹ według K. Kożuchowskiego i J. Boryczki (1997) / according to K. Kożuchowski and J. Boryczka (1997).

² według wyników pomiarów na mareografach IMGW / according to measurements of mareographs.



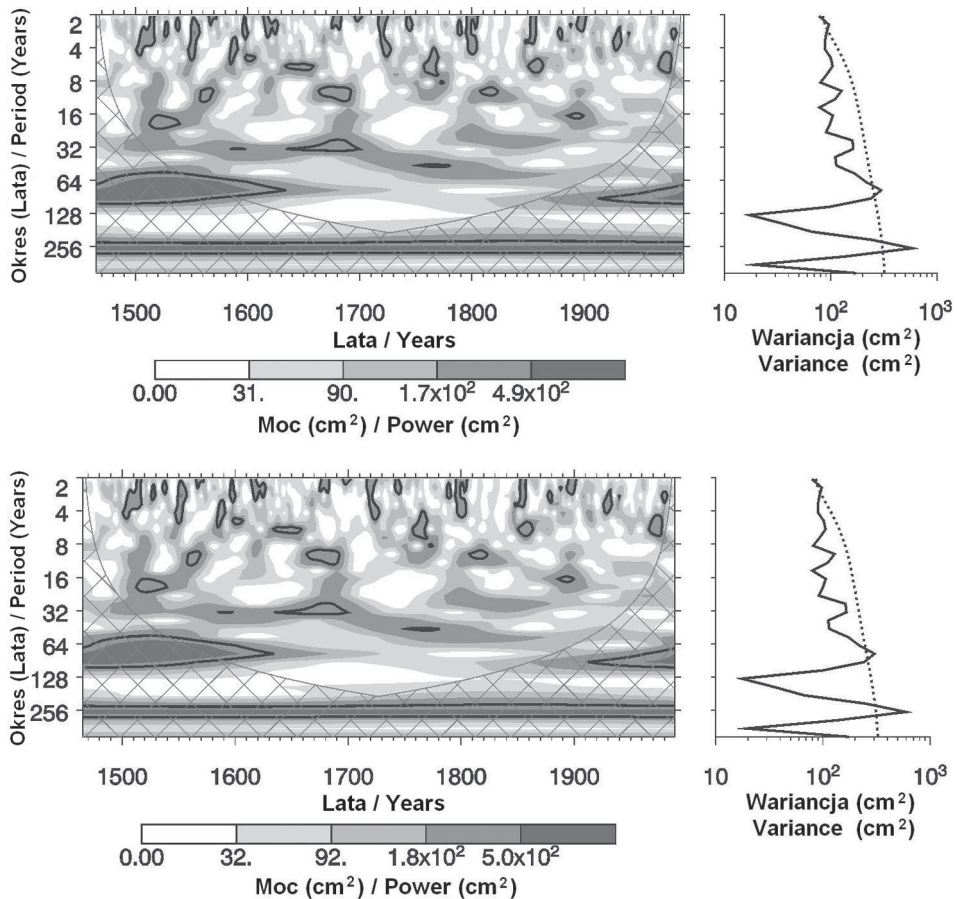
Ryc. 3. Zmienność poziomu morza w zimie w latach 1951-1990 w Świnoujściu i w Gdyni. W kolumnie prawej tego rysunku zamieszczono serie otrzymane w wyniku rekonstrukcji modelem, a więc takie serie, które opisują „naturalną” zmienność poziomu morza. W kolumnie lewej zamieszczono serie pomiarowe

Fig. 3. Variability of mean sea level in winter, 1951-1990 in Świnoujście and in Gdynia according to reconstruction (right column) and measurements (left column)

Zmienność poziomu morza w okresie współczesnych pomiarów instrumentalnych przedstawiono na rycinie 3.

Analiza ryciny 3 potwierdza dane zawarte w tabeli 2; rzeczywiste zmiany poziomu morza są dużo silniejsze niż te, które wynikają z modelu symulującego jedynie naturalną zmienność systemu klimatycznego.

K. Kożuchowski i J. Boryczka (1997) analizując widmo poziomu morza wyodrębnili następujące cykle: 1 i 3-letni, 6,3 i 11,1 lat oraz 184-letni. Analiza spektralna przeprowadzona z wykorzystaniem techniki falkowej (Torrence, Compo 1998) wskazuje na brak jakiegokolwiek dominującej pseudookresowości. Zarówno widmo falkowe, jak i widmo całkowite (ryc. 4) nie dają podstaw do stwierdzenia, że jakakolwiek pseudookresowość jest statystycznie istotna.



Ryc. 4. Widmo falkowe (lewa strona) i widmo całkowite (prawa strona) poziomu morza zimą (1466-1990). Rysunek górny odnosi się do Świnoujścia, a dolny do Gdyni

Fig. 4. Wavelet power spectrum (left) and total power spectrum (right) for sea level reconstructed data, 1466-1990 in Świnoujście (top) and in Gdynia (bottom)

Wnioski

Rezultaty rekonstrukcji potwierdzają odmienną głównych cech zmienności serii rekonstruowanej i serii pomiarowych. Zdaje się to wskazywać na fakt, że rejestrowana za pomocą mareografów i wodowskazów zmienność poziomu morza wzdłuż polskiego wybrzeża Morza Bałtyckiego jest spowodowana także innymi niż naturalne czynnikami.

Literatura

- Barnett T., Preisendorfer R., 1987, *Origins and levels of monthly and seasonal forecast skill for United States surface air temperature determined by canonical correlation analysis*, Mon. Wea. Rev., 115, 1825-1850.
- Cui M., Storch v. H., Zorita E., 1995, *Coastal Sea level and the large-scale climate state: a downscaling exercise for the Japanese islands*, Tellus, 47A, 132-144.
- Giorgi F., Hewitson B. (red.), 2001, *Regional climate information – evaluation and projections*, [w:] IPCC, *Climate Change 2001: The Scientific Basis*, Cambridge Univ. Press, 583-637.
- Heyen H., Zorita E., Storch v. H., 1996, *Statistical downscaling of monthly mean North Atlantic air-pressure to sea level anomalies in the Baltic Sea*, Tellus, 48A, 2, 312–323.
- Kilby Ch., Bardossy A., Barrow E., Beckmann B., Booij M., Brink H., Brown I., Buishand A., Dubrovsky M., Kaas E., Miętus M., Wilby R., 2000, *Downscaling – method and suitability for producing hydrological impact scenarios*, [w:] ECLAT-2 Workshop Report No. 3, *Climate Scenarios for Water-Related and Coastal Impacts*, J. Beersma, M. Agnew, D. Viner, M. Hulme (red.), KNMI, CRU, 118-123.
- Kożuchowski K., Boryczka J., 1997, *Cykliczne wahania i trendy zmian poziomu morza w Świnoujściu (1811-1990)*, Prz. Geofiz., 42, 1, 31-48.
- Miętus M., 1999, *Rola regionalnej cyrkulacji atmosferycznej w kształtowaniu warunków klimatycznych i oceanograficznych w polskiej strefie brzegowej Morza Bałtyckiego*, Mat. Bad. IMGW, Ser. Meteorologia, 29, 1-157.
- Miętus M., 2000, *Climatic and oceanographic conditions in the southern Baltic area under an increasing CO₂ concentration*, Geogr. Polonica, 73, 2, 89-97.
- Miętus M., 2003, *Long-term sea level variability along the Polish coast of the Baltic Sea*, [w:] *Probabilistic Problems in Atmospheric and Water Sciences*. K. Haman, B. Jakubiak, J. Zabczyk (red.), Proceedings of the workshop held in Będlewo Mathematical Conference Center, Będlewo k/Poznań, 16-18.12.2002, Warszawa, Wyd. ICM, Ser. Fizyka Atmosfery, 170-181.
- Storch v. H., Werner P., 1993, *Interannual variability of Central European mean temperature in January-February and its relation to large-scale circulation*, Clim. Res., 3, 195-207.
- Storch v. H., Zorita E., 1997, *A survey of statistical downscaling techniques*, J. Climate, 5-42.
- Storch v., H., Zwiers, F., 1999, *Statistical Analysis in Climate Research*, Cambridge Univ. Press.
- Torrence Ch., Compo G.P., 1998, *A Practical Guide to Wavelet Analysis*, Bull. Amer. Meteor. Soc., 79, 61-78.

Summary

Results of the reconstruction of natural sea level variability in winter in Świnoujście and in Gdynia (1466-1990) are presented. The reconstruction was performed through statistical downscaling. For these purposes the results of a 550-year long simulation of the natural variability of sea level atmospheric pressure within A-OGCM computed in DKRZ (Germany) and a statistically-empirical transfer function between regional sea level atmospheric pressure and sea level along the Polish coast (Miętus 1999) has been used. Reconstructed time series show statistically non-significant positive trends, while measurements show a statistically significant strong increase in sea level. Also the power

spectrum analysis (including wavelet spectrum) applied to the reconstructed time series confirms significant differences between the data modelled and measurements. It might prove that the true sea level variability along the Polish coast might also be caused by other non-natural factors.