

## Wpływ zimowej aktywności Golfstromu na warunki termiczne obszaru wokółbałtyckiego w XX wieku

---

The influence of Gulf Stream winter activity on thermal conditions of the region adjacent to the Baltic Sea in the 20<sup>th</sup> century

Andrzej A. Marsz<sup>1</sup>

**Zarys treści:** W pracy podjęto polemikę z tezami R. Seagera i in. (2002), którzy opierając się na badaniach modelowych stwierdzili, że przenos zasobów ciepła wraz z wodami przez Golfstrom i Prąd Północnoatlantycki nie wywiera wpływu na temperaturę powietrza w NW Europie. Wykazano istnienie zależności między zasobami ciepła transportowanymi przez Golfstrom a roczną oraz miesięczną temperaturą powietrza na obszarze wokółbałtyckim oraz określono rozkład w czasie i rozmiary tego wpływu w XX w.

**Słowa kluczowe:** klimat, NW Europa, Prąd Florydzki, Golfstrom, temperatura powietrza, temperatura zimy

**Key words:** climate, NW Europa, Florida Current, Gulf Stream, air temperature, winter air temperature

### Sformułowanie zagadnienia

O tym, że Golfstrom stanowi jedno z najważniejszych źródeł ciepła „astrefowego” dla wód Atlantyku Północnego, wiadomo od dawna. Fakt, że zmiany stanu termicznego Atlantyku Północnego wywierają znaczący wpływ na zmienność klimatu Europy, zwłaszcza w okresie zimowym, wiadomo od czasów Maury’ego i publikacji W. Meinardusa (1898). Wpływ Golfstromu na klimat NW Europy oraz Europy Środkowej jest wzmiankowany we wszystkich pracach przeglądowych i podręcznikach klimatologii, co czyni, że stwierdzenie to jest ogólnie znane i traktowane jako oczywiste czy wręcz banalne. Jednak, poza ogólnymi stwierdzeniami typu „Golfstrom ogrzewa Europę”, wcale nie jest oczywiste, jaki jest rzeczywisty rozmiar tego wpływu i jak rozkłada się on w czasie.

---

<sup>1</sup> Katedra Meteorologii i Oceanografii Nautycznej, Akademia Morska w Gdyni, ul. Sędzickiego 19, 81-374 Gdynia, e-mail: aamarsz@am.gdynia.pl

Brak oceny rozmiarów rzeczywistego wpływu Golfstromu na warunki termiczne Europy spowodował, że ostatnio pojawiła się praca kwestionująca znaczenie przenosu ciepła wraz z prądem prądowym mas wód przez Atlantyk Północny dla kształtowania dodatnich zimowych odchylenia temperatury powietrza na obszarze Europy. R. Seager i in. (2002) stwierdzają, że przenos ciepła wraz z wodami Golfstromu i Prądu Północnoatlantyckiego na obszarze Atlantyku Północnego nie jest niezbędny do tego, aby obszary zachodniej i północno-zachodniej Europy były cieplejsze od północno-wschodnich wybrzeży kontynentu Ameryki Północnej. Według R. Saegera i in. (2002) przyczyną wyższej temperatury powietrza na obszarze Europy w okresie zimowym jest dominacja wiatrów SW nad obszarem wschodniej części Atlantyku Północnego oraz NW Europą. Takiego rodzaju cyrkulacja powoduje napływ mas ciepłego powietrza morskiego nad obszar NW Europy. Powietrze to ogrzewa się od wód wschodniej części Atlantyku Północnego, a ciepło, które ocean zimą przekazuje z warstwy mieszania do atmosfery, jest ciepłem pochłoniętym w sezonie letniego nagrzewania oceanu, nie zaś ciepłem przenoszonym przez działalność prądową.

Kilka eksperymentów przeprowadzonych przez tych badaczy na modelu globalnej cyrkulacji atmosferycznej uwzględniającym warstwę mieszania oceanu (NCAR Community Climate Model Version 3) wykazało, że przenos prądowy ciepła kształtujący dodatnie odchylenia temperatury powietrza zimą może mieć jedynie niewielki wpływ na temperaturę u wybrzeży Półwyspu Skandynawskiego w najwyższych szerokościach geograficznych<sup>2</sup>. Dla obszaru NW Europy ma on być praktycznie bez znaczenia. Eksperymenty modelowania dawały praktycznie takie same rezultaty, jeśli przenos prądowy ciepła przez Atlantyk był w nich uwzględniany, jak i wtedy, jeśli działanie Golfstromu i Prądu Północnoatlantyckiego było w nich pomijane. Takie wyniki modelowania według R. Saegera i in. (2002) mają potwierdzać hipotezę sformułowaną wcześniej przez D.L. Hartmanna (1994), że to cyrkulacja atmosferyczna, nie zaś prądowy przenos ciepła jest przyczyną asymetrii klimatycznej na wybrzeżach północnego Atlantyku.

Celem tego artykułu jest przedstawienie kilku ważniejszych wyników badań, których celem była weryfikacja prawdziwości tez sformułowanych przez D.L. Hartmanna (1994) oraz R. Saegera i in. (2002). Pełne wyniki badań nad wpływem Golfstromu na warunki termiczne NW Europy zostaną przedstawione w odrębnej, obszernej pracy.

## **Dwie skale czasowe oddziaływania Golfstromu na temperaturę powietrza w NW Europy. Miara klimatycznej aktywności Golfstromu**

Rozpatrując wpływ Golfstromu<sup>3</sup> na temperaturę powietrza nad obszarami północno-zachodniej i środkowej Europy należy mieć na względzie dwa odmienne aspekty zmienności oddziaływania termicznego Golfstromu. Pierwszy – to skala krótkookresowa,

---

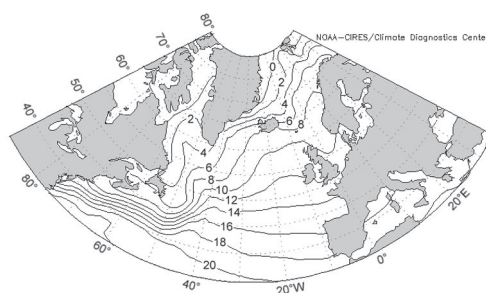
<sup>2</sup> Według R. Seagera i in. (2002) wpływ ten realizuje się w wyniku działania Prądu Norweskiego, poprzez jego termiczne oddziaływanie na wielkość pokrywy lodów morskich i nie ma związku z Golfstromem.

<sup>3</sup> Golfstrom powstaje z połączenia się na N od Grand Bahama wód Prądu Florydzkiego z Prądem Antylskim. Pływie wzdłuż załomu szelfu północnoamerykańskiego do szerokości Cape Hatteras, po czym odchodzi

związana z międzyroczną zmiennością zasobów ciepła transportowanych przez Golfstrom. O międzyrocznej zmienności zasobów ciepła przenoszonych przez Golfstrom decyduje zmienność intensywności Prądu Florydzkiego, którego wody stanowią „ciepłe jądro” (rdzeń) wód Golfstromu. Decydujące dla kształtowania zasobów ciepła, które mogą być transportowane dalej niż do delty Golfstromu, są wody wnoszone do Golfstromu przez Prąd Florydzki w okresie zimowym.

Drugi aspekt to skala długookresowa, stanowiąca efekt całkowania zmienności krótkookresowej Golfstromu i późniejszych procesów transportu jego wód przez inne prądy oraz wymiany ciepła między powierzchnią oceanu a atmosferą. Ta skala nie jest już bezpośrednio związana z samym Golfstromem, lecz stanowi pośredni skutek jego działania. Z tą skalą jest związana asymetria temperatury powierzchni oceanu po obu stronach Atlantyku Północnego.

Jest sprawą oczywistą, że przenos ciepła pobranego z powierzchni oceanu nad kontynent odbywa się za pośrednictwem cyrkulacji atmosferycznej. Masy powietrza, które przy występowaniu cyrkulacji z sektora zachodniego trafiają nad obszar Europy, nabierają swoich właściwości nad obszarem wschodniej części Atlantyku Północnego. Akweny te mają znacznie wyższą temperaturę niż akweny zachodniej części Atlantyku Północnego, przylegające do wybrzeży północnej części Stanów Zjednoczonych i Kanady. Średnia roczna temperatura powierzchni oceanu (dalej TPO) między 45 a 60°N po zachodniej stronie Atlantyku Północnego zawiera się w granicach od 8 do 2°C, gdy po wschodniej – od 15 do 9°C (ryc. 1). W szerokościach 50-65°N różnice TPO między wschodnią a zachodnią częścią Atlantyku Północnego przekraczają 8-12°C zimą i około 4-8°C latem.



Ryc. 1. Rozkład średniej rocznej (1971-2000) temperatury powierzchni Atlantyku Północnego. Źródło: NOAA-CIRES

Fig. 1. Distribution of annual mean SST of the North Atlantic (1971-2000). Source NOAA-CIRES

od wybrzeża kierując się na NE do delty Golfstromu. W delcie Golfstromu (rejon 35-45°N, 50-40°W; akwen na S-SE od Wielkich Ławic) wody Golfstromu bifurkują, dzieląc się na trzy gałęzie prądowe i jest to kres Golfstromu jako prądu o tej nazwie. Większość wód z delty Golfstromu kieruje się na SE, do NE części Morza Sargassowego, część w postaci słabo zorganizowanych strug kieruje się na E do rejonu Azorów, część kieruje się na N-NE. Wody z tej ostatniej strugi prądowej, po skomplikowanych procesach transformacji w strefie frontu hydrologicznego (kontakt z wodami labradorskimi) tworzą następnie wody atlantyckie, z których formuje się następnie Prąd Północnoatlantycki. Prąd Północnoatlantycki dochodząc do rejonu na NW od Szkocji bifurkuje; ta część jego wód, która przechodzi przez Bramę Farero-Szetlandzką, daje początek Prądowi Norweskiemu (Warren 1966, Richardson 2001). To przydługie objaśnienie wydaje się niezbędne z tego względu, że w polskiej geografii niemal każdy ciepły prąd na Atlantyku Północnym nazywany jest Golfstromem. W tej pracy mowa o Golfstromie w takim zakresie, w jakim jest on powszechnie rozumiany w literaturze światowej.

Ilość promieniowania słonecznego dostarczanego do powierzchni oceanu po obu stronach Atlantyku Północnego w okresie letniego nagrzewania oceanu, wobec braku istotnych różnic w wielkości zachmurzenia i takiej samej zmienności długości dnia, jest niemal taka sama. Gdyby więc nie funkcjonował po obu stronach Atlantyku zróżnicowany południkowy przenos ciepła związany z przenosem prądowym, należałoby oczekiwać, że TPO po wschodniej i zachodniej stronie Atlantyku Północnego byłaby podobna. Wyższa temperatura wód wschodniej części Atlantyku stanowi rezultat transportu ciepła wraz z transportem mas wód przez Golfstrom, a następnie prądy Północnoatlantycki i Norweski. Na niskie wartości TPO po zachodniej stronie Atlantyku wywiera wpływ transport silnie wychłodzonych wód Prądu Labradorskiego. W ten sposób działanie systemów prądowych stwarza po obu stronach Atlantyku odmienne tło termiczne podłoża, regulujące wyjściową temperaturę napływających z nad morza nad kontynent mas powietrza. Ten elementarny wpływ przenosu ciepła przez systemem prądów na kształtowanie się asymetrii klimatycznej umknął uwadze R. Seagera i in. (2002).

Jeśli temperaturę powietrza na danej stacji ( $T(s)$ ) potraktować jako funkcję liniową zmiennej aktywności Golfstromu, to w równaniu wartość wyrazu wolnego (stała  $a$ ) będzie charakteryzować średni wpływ czynników bezpośrednio nie uwzględnianych w analizie. W tej wartości, oprócz wpływu innych czynników, będzie również mieścić się składowa długookresowa termicznego oddziaływania Golfstromu na warunki termiczne NW Europy. Nie wydaje się, aby było możliwe drogą zwykłej analizy statystycznej oszacować precyzyjniej jej rozmiar. Składowa krótkookresowa jest możliwa do stosunkowo łatwego wyekstrahowania drogą zastosowania zwykłej analizy korelacji i analizy regresji. Udział wariacji temperatury powietrza na danej stacji objaśnionej przez międzyroczną zmienność przenoszonych przez Golfstrom zasobów ciepła pozwala oszacować rozmiar tego wpływu, niezależnie od mechanizmów, które wpływ ten przenoszą. Wykazanie istnienia statystycznie istotnych związków między międzyroczną zmiennością ilości ciepła przenoszonego przez Golfstrom a taką samą zmiennością temperatury powietrza na obszarze NW Europy wystarczy, aby odrzucić tezę o braku wpływu transportu ciepła przez Golfstrom na temperaturę powietrza.

Ilość ciepła przenoszonego przez Golfstrom stanowi funkcję iloczynu przepływu w tym prądzie i temperatury prowadzonych przez ten prąd wód. Powstaje jednak problem, jak oszacować ilość ciepła przenoszonego przez Golfstrom. Istniejące wiarygodne dane ograniczają się do temperatury wód powierzchniowych na Golfstronie<sup>4</sup>. Brak natomiast jednorodnych, ciągłych i porównywalnych informacji o zmienności przepływów Golfstromu i Prądu Florydzkiego. Te dane, które wykorzystują pomiar indukowanego napięcia na kablach podmorskich między Bahama a Florydą (Baringer, Larsen 2001) dla szacowania wielkości przepływu Prądu Florydzkiego, obejmują ostatnie 20 lat i są niepełne, mające niemal każdego roku poważne braki w szeregach obserwacyjnych.

Pośrednio o wielkościach zimowych przepływów Prądu Florydzkiego informuje odchylenie temperatury okresu styczeń-marzec nad obszarem wschodniej części Zatoki

---

<sup>4</sup> Zbiór NOAA NCDC ERSST version 2: Improved extended reconstructed global sea surface temperature data based on COADS data (Smith, Reynolds 2003, 2004)

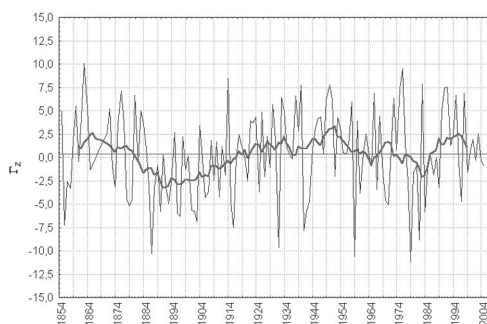
Meksykańskiej i Cieśniny Florydzkiej. Wzrost temperatury powietrza nad tym obszarem powyżej średniej sygnalizuje zwiększony ponad normę udział wiatrów z sektora południowego, a spadek temperatury świadczy o wzroście częstości napływu powietrza z sektora północnego. Działanie tych wiatrów, poprzez ich dynamiczne oddziaływanie na powierzchnię wód (przenos ekmanowski), powoduje wzrost (wiatry z sektora południowego) lub spadek (wiatry z sektora północnego) przepływów przez Cieśninę Florydzką.

Dla pośredniej charakterystyki przepływów Prądu Florydzkiego opracowano wskaźnik, nazwany dalej KWdt1-3, będący standaryzowanym odchyleniem temperatury powietrza<sup>5</sup> z okresu styczeń-marzec w Key West (WMO nr 72201, 24°33'N, 81°45'W, 6 m n.p.m.). Wskaźnik ten można obliczyć w okresie rozpoczynającym się od 1851 r., z przerwą w latach 1866-1869. KWdt1-3 wykazuje wysoce istotne korelacje z temperaturą wód Golfstromu na SE od Cape Hatteras (grid 34°N, 74°W) z okresu luty-kwiecień ( $r=0,65$ ;  $n=147$ ). Przesunięcie to jest związane z miesięcznym opóźnieniem, w czasie którego wody z Cieśniny Florydzkiej dochodzą do rejonu Przylądka Hatteras.

Można skonstruować wskaźnik charakteryzujący względną miarę zasobów ciepła wnoszonego zimą przez Prąd Florydzki do Golfstromu. Będzie to iloczyn wskaźnika KWdt1-3, charakteryzującego względne zróżnicowanie przepływów w Prądzie Florydzkim, i średniej z okresu luty-kwiecień TPO na powierzchni 2°x2° na SE od Cape Hatteras (współrzędne centrum 34°N, 74°W; oznaczenie T02-04). Dla zmniejszenia wagi temperatury wody w stosunku do wartości względnego przepływu w Prądzie Florydzkim w tym wskaźniku, zamiast surowej wartości T02-04, przyjmie się pierwiastek z T02-04, w związku z czym wskaźnik ten, oznaczony jako  $\Gamma_z$ , będzie obliczać się jako:

$$\Gamma_z = (T02-04)^{1/2} \cdot KWdt1-3.$$

Wskaźnik  $\Gamma_z$  należy traktować jako umowną miarę klimatycznej aktywności Golfstromu. Przebieg wartości  $\Gamma_z$  w okresie 1851-2005 przedstawia ryc. 2. Można sądzić, że jeżeli zmienne zasoby ciepła przenoszone zimą przez Golfstrom wywierają wpływ na temperaturę powietrza na obszarze NW Europy, to powinny również wystąpić zależności między  $\Gamma_z$  a temperaturą powietrza na obszarze NW Europy.



Ryc. 2. Przebieg wskaźnika aktywności klimatycznej Golfstromu ( $\Gamma_z$ ). Pogrubiona linia – średnia krocząca 13-punktowa, linia pozioma – średnia wieloletnia (1854-2004) wartość  $\Gamma_z$  równa 0,356

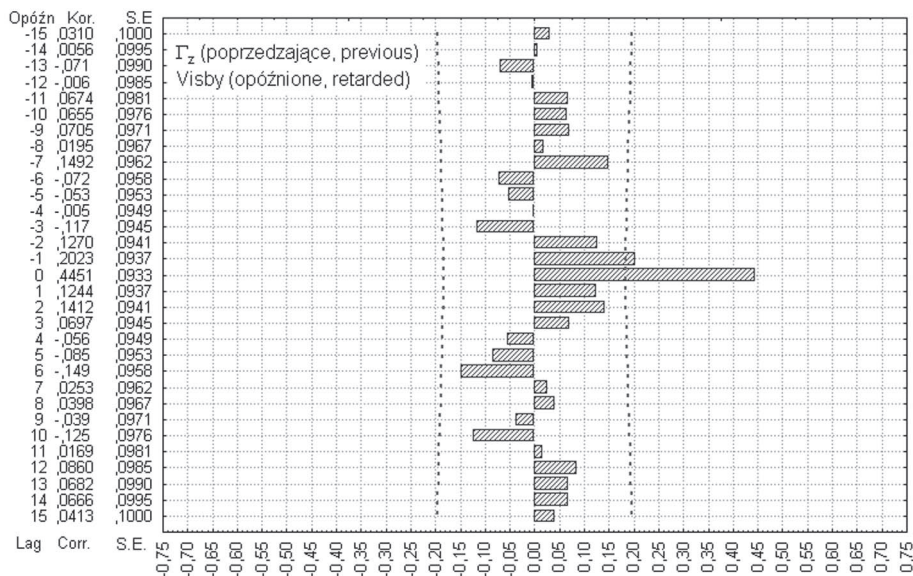
Fig. 2. The course of index of climatic activity of the Gulf Stream ( $\Gamma_z$ ). Bold line – 13-point moving average, horizontal line – many-year (1854-2004) mean value of  $\Gamma_z$ , which equals 0.356

<sup>5</sup> Odchylenie liczone względem średniej stuletniej (1881-1980) sumy temperatury powietrza okresu styczeń-marzec.

## Wyniki analizy

Ze względu na dostępność danych o temperaturze powietrza z większej liczby stacji, podstawowej analizie poddano okres 1890-2004 (115 lat) oraz jego trzy 30-letnie podokresy: 1911-1940, 1941-1970 i 1971-2000.

Pierwszym etapem analizy była próba ustalenia, czy i jakie istnieją związki między temperaturą roczną na stacjach obszaru wokółbałtyckiego a  $\Gamma_z$ . Przeprowadzono analizę korelacji wzajemnych (z przesunięciami czasowymi  $\pm 15$  lat) między szeregi temperatury rocznej z okresu 1890-2004 na wybranych stacjach a szeregiem  $\Gamma_z$ . Analiza ta wykazała, że zaznacza się występowanie podwyższonych współczynników korelacji między temperaturą roczną a  $\Gamma_z$  w przedziale od -2 do +2 lat, z tym że istotne statystycznie maksimum związku występuje z zerowym przesunięciem czasowym (w tym samym roku; ryc. 3). Na całym obszarze wokółbałtyckim znaki współczynników korelacji między  $\Gamma_z$  a roczną temperaturą powietrza na stacjach są dodatnie, co jednoznacznie wskazuje, że



Ryc. 3. Korelacje wzajemne między wskaźnikiem  $\Gamma_z$  (wartość poprzedzająca) a roczną temperaturą powietrza w Visby (Gotlandia; wartość opóźniona); okres 1891-2004. Linie przerywane – oznaczone zakresy  $\pm 2\sigma$ . Temperatura roczna na stacjach na całym obszarze wokółbałtyckim wykazuje silne i wysoce istotne skorelowanie z roczną temperaturą w Visby ( $r$  od 0,99 do 0,73;  $n=114$ ,  $p<0,000\ 000$ )

Fig. 3. Mutual correlations between  $\Gamma_z$  index (the preceding value) and annual air temperature at Visby (Gotland; delayed value); period 1891-2004. Dotted lines – defined ranges  $\pm 2\sigma$ . Annual temperature at stations all over the area near the Baltic Sea shows strong and statistically highly significant correlation with annual temperature at Visby ( $r$  from 0.99 to 0.73;  $n=114$ ,  $p<0.000\ 000$ )

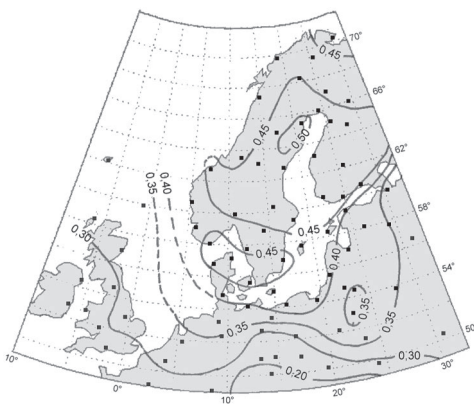
wzrost zimowej aktywności Golfstromu pociąga za sobą wzrost rocznej temperatury powietrza na tym obszarze.

Rozkład przestrzenny izokorelat między  $\Gamma_z$  a roczną temperaturą powietrza (1890-2004) przedstawia rycina 4. Można zauważyć, że nad północną częścią obszaru wokółbałtyckiego zmienność  $\Gamma_z$  w 115-letnim okresie objaśnia około 22-24% zmienności temperatury rocznej, gdy nad środkową i południową Polską stopień objaśnienia spada do 9-13%. Podobnie zauważa się spadek wartości współczynnika determinacji z zachodu (np. Kopenhaga – 20%) na wschód (St. Petersburg – 9,6%).

Analiza rozkładu współczynników korelacji między  $\Gamma_z$  a temperaturą roczną przeprowadzona w odniesieniu do odrębnych 30-leci (1911-1940, 1941-1970, 1971-2000), w których nad obszarem wokółbałtyckim zaznaczają się istotne różnice w zachowaniu się temperatury powietrza wykazały, że związki między temperaturą roczną a  $\Gamma_z$  nie są stabilne w funkcji czasu. Zauważa się stopniowy wzrost siły związku między  $\Gamma_z$  a temperaturą powietrza. Wartości współczynników korelacji w kolejnych 30-leciach na pięciu charakterystycznych stacjach zestawiono w tabeli 1.

Bardziej szczegółowa analiza rozkładów przestrzennych izokorelat pozwala stwierdzić, że na obszarze północnej i zachodniej części obszaru wokółbałtyckiego siła związków między  $\Gamma_z$  a roczną temperaturą powietrza systematycznie rośnie w kolejnych 30-leciach, przy czym związki w każdym odcinku czasu są tam statystycznie istotne. Na obszarze wschodniej części obszaru wokółbałtyckiego (ale i na obszarze Białorusi i NW części europejskiej Rosji) maksimum siły związku zaznaczyło się w 30-leciu 1941-1970, w którym charakterystyczne było występowanie ostrych zim. Na obszarach położonych na południe od południowych wybrzeży Bałtyku (Niemcy, Polska, północna Ukraina) widoczne jest narastanie siły związku wraz z upływem czasu i stopniowe przechodzenie od nieistotnych, dodatnich korelacji do korelacji istotnych. Tę zmienną, niestabilną w czasie, siłę związków między  $\Gamma_z$  a roczną temperaturą powietrza należy wiązać zarówno ze zmienną aktywnością Golfstromu w kolejnych okresach, jak i odmiennym w poszczególnych okresach charakterem cyrkulacji atmosferycznej.

Dla wyjaśnienia kwestii, jak rozkłada się wpływ zmiennej aktywności klimatycznej Golfstromu na miesięczną temperaturę powietrza, przeprowadzono analizę korelacji i analizę regresji w tych samych przekrojach czasowych. Analiza korelacji była pro-



Ryc. 4. Rozkład wartości współczynników korelacji liniowej między  $\Gamma_z$  a roczną temperaturą powietrza na obszarze wokółbałtyckim (1890-2004). Wartości współczynników korelacji  $\geq 0,35$  są istotne na poziomie  $p < 0,000\ 000$

Fig. 4. Distribution of linear correlation coefficient values between  $\Gamma_z$  and annual air temperature in the region adjacent to the Baltic Sea (1890-2004). Values of correlation coefficients  $\geq 0.35$  are significant at level  $p < 0.000\ 000$

Tab. 1. Wartości współczynników korelacji między temperaturą roczną na wybranych stacjach a  $\Gamma_z$  w 115-leciu 1890-2004 i kolejnych 30-leciach. Wartości współczynników istotnych statystycznie na poziomie  $p < 0,05$  oznaczono pogrubioną czcionką

Table 1. Correlation coefficient values of between annual temperature at some chosen stations and  $\Gamma_z$  over 115-year period 1890-2004 and the consecutive 30-year periods. Values of statistically significant coefficients with  $p < 0.05$  are marked in bold

Stacja / Station		1890-2004	1911-1940	1941-1970	1971-2000
Haparanda	r	<b>0,48</b>	<b>0,36</b>	<b>0,45</b>	<b>0,59</b>
	p	0,000	0,049	0,012	0,001
Visby	r	<b>0,44</b>	<b>0,41</b>	<b>0,51</b>	<b>0,50</b>
	p	0,000	0,024	0,004	0,005
Warszawa	r	<b>0,36</b>	0,32	0,35	<b>0,43</b>
	p	0,000	0,084	0,056	0,017
Kopenhaga	r	<b>0,45</b>	<b>0,37</b>	<b>0,46</b>	<b>0,51</b>
	p	0,000	0,042	0,011	0,004
St. Petersburg	r	<b>0,31</b>	0,35	<b>0,52</b>	<b>0,36</b>
	p	0,001	0,060	0,004	0,049

wadzona w ten sposób, że szereg czasowy wartości  $\Gamma_z$  rozpoczynający się w roku k korelowano z temperaturą miesięczną kolejnych miesięcy roku k i kolejnych miesięcy<sup>6</sup> roku k+1 na stacjach wokółbałtyckich. Prowadzona w taki sposób analiza wykazała, że pojawiają się synchroniczne oraz opóźnione w czasie istotne statystycznie korelacje między tymi szeregami. Korelacje te wykazują prawidłowe rozkłady w przestrzeni, charakterystyczne dla momentów, w których występują. Związki między  $\Gamma_z$  a miesięcznymi wartościami temperatury powietrza stają się wyraźne w tych dłuższych okresach, w których wartości  $KWdt1-4$  są większe od  $\pm 1\sigma$ , słabną zaś w okresach niewielkiej zmienności międzyrocznej zimowych przepływów Prądu Florydzkiego.

W całym 115-letnim okresie analiza wykrywa związki stanowiące efekt skumulowania zmieniających się w czasie zależności procesu niestacjonarnego. Poza stwierdzeniem, że związki między  $\Gamma_z$  a miesięcznymi wartościami temperatury powietrza są głównie asynchroniczne, nie daje ona realistycznego obrazu w odniesieniu do któregośkolwiek z podokresów.

Analiza związków między  $\Gamma_z$  a temperaturą miesięczną w okresie 1911-1940 wykazuje występowanie istotnych statystycznie dodatnich korelacji synchronicznych<sup>7</sup> w okresie od stycznia do kwietnia oraz dodatnich korelacji asynchronicznych w okresie od sierpnia do września tego samego roku. Korelacje synchroniczne osiągają maksimum w marcu i kwietniu, na wschodzie obszaru wokółbałtyckiego współczynniki korelacji

<sup>6</sup> Można przypuszczać, że związki między wartością  $\Gamma_z$  a temperaturą powietrza na obszarze NW Europy będą wykazywały opóźnienia fazowe. Wobec nieznajomości wielkości i skali tych opóźnień taki sposób badania związków pozwala na wykrycie siły oraz ich rozkładu w czasie, bez czynienia jakichkolwiek w tym względzie założeń *a priori*.

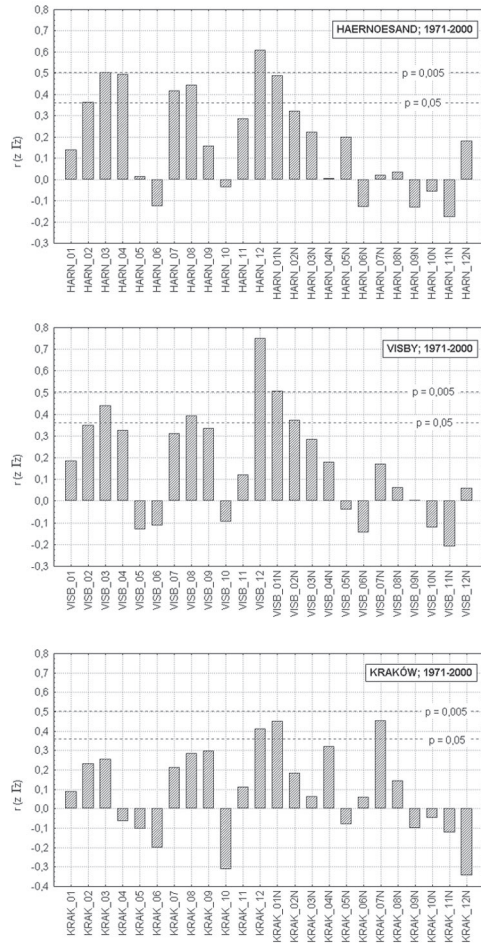
<sup>7</sup> Czyli występujących w tym samym czasie, dla którego oblicza się wartość wskaźnika  $\Gamma_z$  (KWdt1-3 okres styczeń-marzec, TW02-04 okres luty-kwiecień).



zawierają się w granicach 0,38-0,45 (zwykle w marcu), gdy w zachodniej części obszaru wokółbałtyckiego wartości współczynników korelacji są podwyższone (0,30-0,35), ale nie przekraczają progu istotności statystycznej. Korelacje asynchroniczne maksimum siły związku osiągają nad obszarem środkowego Bałtyku we wrześniu (0,5-0,6), gwałtownie słabnąc w kierunku północnym i wschodnim. W pozostałych miesiącach większość współczynników korelacji ma znak dodatni, są one nieistotne statystycznie, ale łączne działanie zarówno słabych, nie przekraczających progu istotności statystycznej, jak i silniejszych korelacji czyni, że między zmianami temperatury rocznej a  $\Gamma_z$  związki stają się istotne statystycznie.

W okresie 1941-1970 na całym badanym obszarze wszystkie istotne korelacje przybierają charakter synchroniczny, grupując się w okresie styczeń-kwiecień. Maksymalne wartości współczynniki korelacji osiągają w kwietniu (na ogół >0,5). Jedyne na północy badanego obszaru maksimum siły związku występuje w lutym, gdzie wartości współczynników korelacji przekraczają 0,6.

Więcej uwagi poświęci się związkowi  $\Gamma_z$  z miesięczną temperaturą powietrza w ostatnim, najbliższym współczesności okresie 1971-2000. Korelogramy, przedstawiające rozkłady współczynników korelacji między  $\Gamma_z$  a miesięczną temperaturą na stacjach tworzących zbliżony do południkowego profil od północnych krańców Bałtyku do przedgórz Karpat, prezentuje rycina 5. W badanym okresie zaznaczają się trzy okresy, w których związki między  $\Gamma_z$  a temperaturą stają się silne.



Ryc. 5. Korelogramy przedstawiające rozkłady wartości współczynników korelacji między  $\Gamma_z$  a miesięczną temperaturą powietrza w tym samym i następnym roku (oznaczenie zmiennych N po numerze miesiąca) na stacjach Haernoessand (Szwecja, NW wybrzeże Zatoki Botnickiej), Visby (Gotlandia, Bałtyk Środkowy) i Kraków. Oznaczone poziomy istotności  $p=0,005$  i  $p=0,05$

Fig. 5. Correlograms presenting distribution of correlation coefficient values between  $\Gamma_z$  and monthly air temperature in the same and following year (variables N named after a month) at the following stations: Haernoessand (Sweden, NW coast of the Bothnia Bay), Visby (Gotland, Central Baltic) and Cracow. Significance levels marked  $p=0,005$  and  $p=0,05$ .

Pierwszy – to okres zimowo-wiosenny, w którym występujące związki muszą być traktowane jako synchroniczne. Najsilniejsze korelacje, z maksimum przypadającym na marzec-kwiecień występują na północy obszaru wokółbałtyckiego; w miarę przechodzenia na południe związki te ograniczają się do marca, słabną, by na obszarze północnej Polski utracić istotność.

Drugi okres występowania silnych, asynchronicznych, korelacji przypada na północy obszaru wokółbałtyckiego na lipiec-sierpień, nad obszarem środkowego Bałtyku na wrzesień. Nad Bałtykiem Zachodnim i Południowym oraz obszarem południowego wybrzeża Bałtyku od Warnemünde po Kłajpedę korelacje umiarkowanej siły (0,37-0,53) utrzymują się w lipcu, sierpniu i wrześniu, maksimum siły związku obserwuje się w sierpniu (Kłajpeda – 0,40, Warnemünde, Szczecin, Elbląg – 0,42, Gdynia, Kaliningrad – 0,47, Hel – 0,49, Kołobrzeg – 0,53). W większym oddaleniu od linii brzegowej występowanie istotnych korelacji ogranicza się do sierpnia (Drezno, Berlin – 0,45, Wrocław, Poznań – 0,38, Toruń – 0,43, Warszawa – 0,39) i słabnie wraz z przemieszczaniem się na południe i wschód, tracąc istotność na wschód od Wisły i na południe od 51°N.

Trzeci okres występowania silnych, asynchronicznych korelacji przypada na początek nadchodzącej zimy i obejmuje grudzień i styczeń następnego roku. Na całym obszarze wokółbałtyckim korelacje  $\Gamma_z$  z temperaturą powietrza są istotne lub wysoce istotne statystycznie. Nad Bałtykiem Środkowym wartości współczynników korelacji przekraczają 0,7 w grudniu i 0,5 w styczniu, słabnąc powoli wraz z oddalaniem się od tego rejonu. W miarę przesuwania się na południe od tego centrum wartości współczynników korelacji grudnia i stycznia stopniowo wyrównują się, by następnie maksimum siły związku przesunęło się z grudnia na styczeń. Zmienność  $\Gamma_z$  objaśnia około 55% zmienności temperatury grudnia i 23% wariacji temperatury stycznia następnego roku w Visby, odpowiednio 47 i 17% w Jonkopping, 44 i 12% w Helsinkach, 28 i 14% w Warszawie, 14 i 21% we Wrocławiu, 14 i 18% w Krakowie, 13 i 18% we Lwowie.

Nad obszarem wschodnich Niemiec, Czech oraz środkowej i południowej Polski pojawiają się kolejne, asynchroniczne, istotne statystycznie korelacje dodatnie między  $\Gamma_z$  a temperaturą lipca następnego roku ( $r$  od 0,49 w Pradze Czeskiej do 0,40 we Lwowie; przeciętnie nieco powyżej 0,4). Tym związkom, ponieważ nie obejmują one zasadniczej części obszaru wokółbałtyckiego, nie będzie się dalej poświęcało uwagi.

## Dyskusja wyników i wnioski

Przedstawione skrótowo wyniki badań nad związkami zmiennej aktywności Golfstromu i temperatury powietrza nad obszarem części NW Europy i środkowej Europy wskazują, że działa tu kilka różnych mechanizmów przenoszących wpływ zmiennych zasobów ciepła transportowanych przez ten prąd na warunki termiczne omawianego obszaru. Świadczą o tym występujące w tych samych okresach różnej długości przesunięcia fazowe między momentem pomiaru  $\Gamma_z$  a odpowiedzią temperatury powietrza. Wyjaśnienia mechanizmów oddziaływania Golfstromu wymagałoby wkroczenia w bardziej szczegółowe zagadnienia z zakresu zarówno oceanografii, jak i cyrkulacji atmosferycznej oraz problemu bjerkniesowskiej kompensacji transportu ciepła (Bjerknes 1964;

Shaffrey, Sutton 2006), na co w tym krótkim artykule nie ma miejsca. Warto jednak tutaj wtrącić, że uwzględnienie w równaniu regresji wielokrotnej jako dodatkowej zmiennej niezależnej prostego wskaźnika cyrkulacyjnego, jakim jest np. roczny wskaźnik NAO CRU (Jones i in. 1997), oprócz  $\Gamma_z$ , natychmiast podnosi stopień objaśnienia zmienności rocznej temperatury powietrza na obszarze wokółbałtyckim od 10 do 20% w stosunku do objaśnienia tej zmienności wyłącznie przez  $\Gamma_z$ .

Niezależnie jednak od tego, jakie są mechanizmy przenoszenia wpływu zmiennych zasobów ciepła transportowanych przez Golfstrom na temperaturę powietrza w NW Europie, zauważa się, że międzyroczne zmiany w ilości ciepła transportowanego zimą przez Golfstrom znajdują swoje odbicie w odpowiednich, niezbyt silnych, ale wyraźnych zmianach temperatury miesięcznej i rocznej. W okresie 1890-2004 międzyroczna zmienność aktywności Golfstromu, bez uwzględnienia zmienności charakteru cyrkulacji atmosferycznej, objaśnia około 23% zmienności rocznej temperatury powietrza na obszarze północnej części obszaru wokółbałtyckiego, około 20% w części zachodniej, ponad 10% na obszarze środkowej Polski, podobną wartość na Białorusi (Mińsk – 12%) i około 10% w rejonie St. Petersburga. Trzeba tutaj z naciskiem zaznaczyć, że pomija się tu wpływ stałej wyższej temperatury wschodniej części Atlantyku Północnego na roczną temperaturę powietrza, uwzględniając wyłącznie międzyroczną zmienność aktywności Golfstromu.

W każdym z analizowanych trzech 30-leci zaznaczają się, choć odmiennie rozłożone w czasie, istotne statystycznie dodatnie korelacje między  $\Gamma_z$  a temperaturą powietrza miesięcy zimowych. Oznacza to, że mimo niestacjonarnego przebiegu związków między zasobami ciepła transportowanymi w Golfstromie z temperaturą powietrza w NW Europie, w badanym okresie (okresach) Golfstrom wywiera konsekwentnie wpływ na temperaturę zimy na tym obszarze. W rejonie najsilniejszych oddziaływań (Visby) zmiana wartości  $\Gamma_z$  o jedną jednostkę pociąga za sobą, zgodną ze znakiem, zmianę średniej temperatury powietrza okresu styczeń-kwiecień o 0,15°C i okresu grudzień-styczeń następnego roku o 0,09°C (1890-2004). Wpływ ten jest zgodny ze znanymi od dawna stwierdzeniami – zwiększona aktywność Golfstromu pociąga za sobą złagodzenie warunków termicznych zimy na obszarze NW Europy.

Te fakty nie pozwalają przyjąć za prawdziwą hipotezy R. Seagera i in. (2002) o braku wpływu transportu ciepła wraz z wodami Golfstromu na zimową temperaturę powietrza na obszarze NW Europy. W ostatnim 30-leciu (1971-2000) wpływ taki zaznacza się, jest stosunkowo wyraźny i objaśnia od 27 do 47% zmienności średniej temperatury powietrza z okresu grudzień-styczeń następnego roku. Wpływ na temperaturę roczną jest w tym samym okresie nieco tylko mniejszy, objaśniając od 18 do 37% jej zmienności. Choć w przebiegu wieloletnim (115 lat) wpływ zmiennej aktywności Prądu Florydzkiego na roczną temperaturę powietrza na obszarze wokółbałtyckim nie jest taki silny jak w okresie 30-lecia 1971-2000, daje się jednak bez problemu zidentyfikować i na większości badanego obszaru jest jeszcze wyraźny i wszędzie na północ od Karpat, Sudetów i Rudaw statystycznie istotny.

Nie będzie się w tym miejscu wyrażało opinii na temat możliwych przyczyn, dla których badania modelowe R. Seagera i in. (2002) nie wykryły istnienia takich związków. Jednak po raz któryś okazuje się, że nie uzyskuje się zgodności modelowanego procesu

z jego realnym przebiegiem. Osłabia to znaczenie rezultatów badań modelowych jako argumentów mających rozstrzygnąć o prawdziwości takiej czy innej hipotezy.

Dodatkowo okazuje się, o czym wcześniej nie było wiadomo, że zmiany aktywności Golfstromu na części obszaru wokółbałtyckiego wywierają wpływ na temperaturę powietrza w okresie letnim. Na obszarze północnej Polski (Koszalin) zmiana wartości  $\Gamma_z$  o jedną jednostkę pociąga za sobą zmianę o tym samym znaku średniej temperatury powietrza okresu lipiec-wrzesień o 0,07°C w całym badanym okresie (1890-2004) i o 0,11°C w ostatnim 30-leciu (1971-2000).

Występowanie w okresie danej zimy dodatniej wartości  $\Gamma_z$ , która pociąga za sobą wzrost temperatury powietrza na obszarze NW Europy, wymusza jednocześnie spadek temperatury zimy na obszarze północo-wschodniej części Stanów Zjednoczonych i na wschodnim, atlantyckim wybrzeżu Kanady<sup>8</sup>. Wzrost wartości  $\Gamma_z$  o jedną jednostkę pociąga za sobą spadek średniej temperatury powietrza okresu styczeń-marzec w St. John's (Nowa Fundlandia) o 0,15°C, odpowiednio większy na Labradorze czy nad Zatoką Św. Wawrzyńca. W ten sposób Golfstrom stanowi nie tylko o tym, że obszar NW Europy jest zimą cieplejszy, ale i o tym, że obszar NE części kontynentu północnoamerykańskiego jest zimą chłodniejszy, potęgując asymetrię klimatyczną po obu brzegach Atlantyku Północnego. Również hipoteza Hartmanna (1994) powinna zostać zrewidowana.

## Literatura

- Bjerknes J., 1964, *Atlantic air-sea interaction*, Adv. Geophys., Academic Press, 1-82.
- Baringer M.O., Larsen J.C., 2001, *Sixteen years of Florida Current transport at 27 degrees N*, Geophys. Res. Lett., 28, 16, 3179-3182.
- Hartmann D.L., 1994, *Global physical climatology*, Academic Press, San Diego, New York, Boston, London, Sydney, Tokyo, Toronto.
- Jones P.D., Jónsson T., Wheeler D., 1997, *Extension to the North Atlantic Oscillation using early instrumental pressure observations from Gibraltar and South-West Iceland*, Int. J. Climatol., 17, 1433-1450.
- Meinardus W., 1898, *Über einige meteorologische Beziehungen zwischen dem Nordatlantischen Ozean und Europa im Winterhalbjahr*, Meteor. Z., 15, 85-105.
- Richardson P.L., 2001, *Florida Current, Gulf Stream and Labrador Current*, [w:] *Encyclopedia of Ocean Sciences*, J.H. Steele (red.), Academic Press, San Diego, San Francisco, New York, Boston, London, Sydney, Tokyo, 2, 1054-1064.
- Seager R., Battisti D.S., Yin J., Gordon N., Naik N., Clement A.C., Cane M.A., 2002, *Is the Gulf Stream responsible for Europe's mild winters?* Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 128, 2563-2586.
- Shaffrey L., Sutton R., 2006, *Bjerknes compensation and the decadal variability of the energy transports in a coupled climate model*, J. Climate, 19, 7, 1167-1181.

---

<sup>8</sup> Proces ten nie jest związany z NAO (Oscylacją Północnego Atlantyku), dla którego również charakterystyczną cechą jest odwrotność przebiegu temperatury zimy między Skandynawią, czy szerzej – NW Europą, a obszarami wschodniego wybrzeża Kanady (od Labradoru po Nową Szkocję; patrz H. van Loon, J.C. Rogers 1978)

- Smith T.M., Reynolds R.W., 2003, *Extended Reconstruction of Global Sea Surface Temperatures Based on COADS Data (1854-1997)*, J. Climate, 16, 1495-1510.
- Smith T.M., Reynolds R.W., 2004, *Improved extended reconstruction of SST (1854-1997)*, J. Climate, 17, 2466-2477.
- van Loon H., Rogers J.C., 1978, *The seesaw in winter temperature between Greenland and northern Europe. Part I: General Description*, Mon. Wea. Rev., 106, 296-310.
- Warren B., 1966, *Gulf Stream*, [w:] *The Encyclopedia of Oceanography*, R.W. Fairbridge (red.), Reinhold Publishing Corporation, New York, 140-145.

## Summary

This work questions a hypothesis set forth in an article by R. Seager et al. (2002) stating that there is no correlation between heat transfer resulting from transport in water masses by the Gulf Stream and the North Atlantic Current and the temperature in Europe. The index  $\Gamma_z$  was taken as a relative measure of the heat transported by the Gulf Stream. It is a product of the KWdt1-3 index and a root of mean SST from the period February-April in the grid 34°N, 74°W (T02-04). Index KWdt1-3 is a standard deviation of air temperature from the period January-March at Key West; it gives information about the relative intensity of the Florida Current transporting warm waters to the Gulf Stream. Analysis of correlations between the  $\Gamma_z$  index and annual and monthly series of air temperatures in the regions adjacent to the Baltic Sea was carried out over four periods; 1890-2004 and over the consecutive 30-year periods: 1911-1940, 1941-1970 and 1971-2000.

The observed correlations between  $\Gamma_z$  and air temperature in the region adjacent to the Baltic Sea over the period 1890-2005 are positive and are statistically significant. The variability of the  $\Gamma_z$  index over this long period explains 22-24% of annual temperature variance in the northern and central part of the region adjacent to the Baltic Sea, 20% in the west, about 10% in the east of the region adjacent to the Baltic Sea (region of St. Petersburg) and from 9-13% in the south and central Poland region.

The results of the analysis indicate that the correlation between  $\Gamma_z$  and air temperature is unstable in time. The strongest correlation can be observed in the last 30-year period (1971-2000). There are three periods during which correlations between  $\Gamma_z$  and the air temperature become statistically significant with  $p < 0.05$ . The variability of the  $\Gamma_z$  index explains from 16% to 25% of temperature variance in the February-April period in the region adjacent to the Baltic Sea, from 14-28% of temperature variance in the July-August period and from 23% to 55% in period from December to January in the following year. The proportion of the annual temperature variance that can be explained by variability of the  $\Gamma_z$  index over the 30-year period 1971-2000 lies within a range from 37% in the north of the region adjacent to the Baltic Sea and up to 18% in the region of NW Germany, Poland and Byelorussia.

The observed correlations, clear but not strong, between the interannual variability of the amount of heat transported by the Gulf Stream and the changeability in air tem-

perature in the region adjacent to the Baltic Sea a few months later makes it possible to reject the hypothesis of R. Seager et al. (2002) and D.L. Hartmann (1994) about the lack of influence of meridian heat transport on the air temperature in NW Europe.