

## **O związkach między zmianami temperatury powierzchni Morza Sargassowego a zmianami temperatury powietrza na półkuli północnej (1880–2007)**

### **Correlations between changes in sea surface temperature of the Sargasso Sea and changes in air temperature of the Northern Hemisphere (1880–2007)**

**Andrzej A. Marsz**

*Katedra Meteorologii i Oceanografii Nautycznej, Akademia Morska w Gdyni, ul. Sędzickiego 19; 81-374 Gdynia, aamarsz@am.gdynia.pl*

**Zarys treści:** W artykule przedstawiono występowanie bardzo silnych związków między zmiennością temperatury powierzchni Morza Sargassowego a zmianami globalnych i hemisferycznych anomalii temperatury powietrza. Zmiany temperatury powierzchni Morza Sargassowego najsilniej powiązane są ze zmiennością anomalii temperatury powietrza w Arktyce (64–94°N) i w szerokościach umiarkowanych (44–64°N) półkuli północnej. Przeprowadzone analizy szeregów, z których wyeliminowano trendy, wykazują, że zmienność temperatury powierzchni Morza Sargassowego steruje hemisferycznymi anomaliami temperatury powietrza, nie wykazuje natomiast związków ze zmianami koncentracji CO<sub>2</sub> w troposferze. Zmienność temperatury powierzchni Morza Sargassowego odbija zmienność AMO (Atlantic Multidecadal Oscillation), która jest procesem naturalnym. Konkluzją jest stwierdzenie, że obserwowany obecnie wzrost hemisferycznej i globalnej temperatury powietrza stanowi w zasadniczym stopniu wynik działania procesów naturalnych.

**Słowa kluczowe:** globalne ocieplenie, AMO, Morze Sargassowe, półkula północna

**Abstract:** This article presents occurrence of very strong correlations between the changeability in sea surface temperature of the Sargasso Sea and changes in global and hemispherical anomalies in air temperature. Changes in sea surface temperature of the Sargasso Sea are correlated in the strongest way with the changeability in air temperature anomalies in the Arctic (64–94°N) and latitudes (44–64°N) of the northern hemisphere. The analysis of series, where trends have been eliminated, indicates that changeability in sea surface temperature of the Sargasso Sea has influence on hemispherical anomalies in air temperature, yet it does not show any correlation with the concentration of CO<sub>2</sub> in troposphere. Changes in sea surface temperature of the Sargasso Sea reflect AMO (Atlantic Multidecadal Oscillation) changeability, which is a natural process. A conclusion may be drawn that the currently observed increase in hemispherical and global air temperature is significantly influenced by natural processes.

**Key words:** global warming, AMO, the Sargasso Sea, Northern Hemisphere

### **Sformułowanie zagadnienia**

Postępujący od końca lat 70. XX w. wzrost temperatury powietrza w skali globalnej jest bezdyskusyjny. Pomiarzy stacyjne wykazują wyraźne ocieplenie, szczególnie silne w ostatnich latach. Wzrostowi tem-

peratury powietrza towarzyszy szereg procesów interpretowanych jako skutek globalnego ocieplenia, wyraźnych przede wszystkim w kriosferze półkuli północnej (recesja lodowców, zmniejszanie powierzchni lodów morskich w Arktyce, zwiększenie miąższości warstwy czynnej zmarzliny, redukcja

powierzchni i czasu zalegania pokrywy śnieżnej) i zmianach w zasięgach gatunków roślin i zwierząt, zwłaszcza zwierząt morskich. Tylko na niektórych obszarach (np. Antarktydzie, ale z wyjątkiem Półwyspu Antarktycznego<sup>1</sup>) obserwuje się słaby ujemny trend temperatury powietrza. Literatura dotycząca tych zagadnień jest tak bogata i (na ogół) powszechnie znana, że jej przytaczanie w tym miejscu nie wydaje się celowe.

Dyskusyjna jest natomiast geneza globalnego ocieplenia. Przyczyny globalnego wzrostu temperatury stały się niespodziewanie problemem, mającym w obecnej sytuacji doniosłe znaczenie dla rozwoju społecznego i ekonomicznego państw i warunków bytowych ich mieszkańców. W ten sposób jeden z fundamentalnych problemów współczesnej klimatologii zyskał wymiar globalnego problemu ekonomicznego, a tym samym – i politycznego.

Traktując sprawę najogólniej, poglądy na genezę globalnego ocieplenia sprowadzić można do dwu przeciwstawnych stanowisk<sup>2</sup>. Liczna grupa badaczy reprezentuje pogląd, że globalne ocieplenie ma swoją przyczynę we wzroście koncentracji CO<sub>2</sub> i innych gazów cieplarnianych w atmosferze, co jest głównie rezultatem wzrastającego zużycia (spalania) paliw kopalnych. Najbardziej znanymi publikacjami prezentującymi poglądy tej grupy badaczy są raporty IPCC (2007 i wcześniejsze; patrz załączone do nich zestawienia literatury) i publikacje z nimi związane, w których, mimo pewnych wahań co do roli i zakresu działania czynników naturalnych w kształtowaniu globalnego ocieplenia, padają dość dobitne stwierdzenia, że podstawowym czynnikiem wymuszającym globalne ocieplenie jest działanie czynnika antropogenicznego.

Szczególnie kategorycznie wnioski o antropogenicznej naturze zachodzących zmian temperatury formułuje ostatni raport IPCC (2007). W „Podsumowaniu technicznym” (TS), dotyczącym wyjaśnienia przyczyn zmian temperatury w skali globalnej w okresie obserwacji instrumentalnych (TS. 4.1), czytamy: „Antropogeniczne ocieplenie systemu klimatycznego jest szeroko rozprzestrzenione i może być wykazane przez obserwacje temperatury przyziemnej, w swobodnej atmosferze i w oceanach”. Dalej, w tej samej części raportu, następuje stwierdzenie: (...) „Skrajnie mało prawdopodobne (<5%) jest, że globalny charakter obserwowanego ocieplenia można wyjaśnić bez wpływów zewnętrznych. Te zmiany [czy-

li ocieplenie; dop. autora] zachodziły w okresie, w którym czynniki nieantropogeniczne (w tym suma oddziaływań słonecznych i wulkanicznych) prawdopodobnie spowodowałyby ochłodzenie” (patrz ryc. TS 23). W części odnoszącej się do wyjaśnienia przyczyn przestrzennych i czasowych zmian temperatury (IPCC 2007; TS 4.2) czytamy: (...) „Obserwowany charakter ocieplenia troposfery i ochładzania stratosfery najbardziej prawdopodobnie<sup>3</sup> jest uwarunkowany przez wpływ oddziaływania antropogenicznego, szczególnie tego, które jest spowodowane przez podwyższanie koncentracji gazów cieplarnianych i zniszczenia ozonu stratosferycznego. (...) Według wszelkiego prawdopodobieństwa od połowy XX wieku ma miejsce znaczny wkład antropogeniczny do wzrostu temperatury na każdym kontynencie, oprócz Antarktydy. Antarktyda jest niedostatecznie objęta siecią obserwacyjną, aby można dokonać tam oszacowania [zmian temperatury; dop. autora] (...)”. Również zmiany warunków obserwacyjnych spowodowanych przez rozrastanie się miast, występowanie miejskich wysp ciepła czy zmiany użytkowania terenu zdaniem autorów raportu, nie mają wpływu na rejestrowany wzrost temperatury powietrza. W części TS 3.1.1 znajduje się stwierdzenie: „(...) Ostatnie badania potwierdzają, że wpływ urbanizacji i zmian użytkowania terenu na wzrost temperatury globalnej jest znikomy (0,0006°C na dziesięciolecie nad lądami i zero nad oceanami), jeśli mówić o średnich wielkościach w skali kontynentów i oceanów”.

W tym ujęciu praktycznie jedyną przyczyną obserwowanego wzrostu przyziemnej temperatury powietrza (dalej SAT<sup>4</sup>) oraz zmian w wykształceniu innych elementów klimatu i powiązanych z nimi zmian komponentów środowiska jest (ma być) działanie czynnika antropogenicznego. Badacze zajmujący się modelowaniem zmian klimatu stwierdzają, że uwzględniając działanie wszystkich czynników naturalnych (czyli *de facto* ograniczonych do zmian dopływu energii słonecznej i aktywności wulkanicznej, patrz Barnett i in. 1999; IPCC 2007, ryc. TS 23), nie uzyskuje się w modelach obserwowanego wzrostu temperatury powietrza bez uwzględnienia w nich wzrastającej koncentracji CO<sub>2</sub> w troposferze. Również i to stanowi zdaniem niektórych badaczy argument przemawiający za dominującym wpływem efektu cieplarnianego na obserwowany wzrost temperatury powietrza.

<sup>1</sup> Na obszarach polarnych półkuli południowej zmiany związane z ociepleniem ograniczają się do wyraźnej recesji lodowców na obszarach lądowych i lodów szelfowych w rejonie Półwyspu Antarktycznego, gdzie rzeczywiście obserwuje się bardzo silny wzrost temperatury powietrza. Są to jednak w skali kontynentu Antarktydy zmiany lokalne. Lody morskie w Antarktyce wykazują rozwój; w roku 2007 ich powierzchnia osiągnęła rozmiary nienotowane od początku obserwacji satelitarnych (1978/79).

<sup>2</sup> Pomija się tu nieliczne, sprzeczne z empirią prace, w których zaprzecza się istnieniu globalnego wzrostu temperatury.

<sup>3</sup> Określenie „najbardziej prawdopodobnie” oznacza, że prawdopodobieństwo danego stwierdzenia jest, według autorów raportu, wyższe od 90% (patrz „wstawka” TS 1 w Raporcie).

<sup>4</sup> SAT – Surface Air Temperature. Ten anglojęzyczny skrót jest powszechnie stosowany i jednoznacznie rozumiany, dla zmniejszenia objętości tekstu będzie on używany w tym artykule.

Druga grupa badaczy formułuje tezę, że globalne ocieplenie ma swoje przyczyny głównie w działaniu mechanizmów naturalnych zmian klimatycznych, a udział pierwiastka antropogenicznego w kreowaniu współczesnych zmian SAT jest ograniczony i nie sprowadza się wyłącznie do wzrostu koncentracji gazów cieplarnianych. Globalne ocieplenie stanowi, według nich, przejaw kolejnego długookresowego wahnięcia klimatycznego, dla którego charakterystyczny jest wzrost temperatury powietrza.

Wśród badaczy, których można zaliczyć do tej grupy, nie ma zgodności poglądów na główną przyczynę, która prowadzi do obserwowanego wzrostu SAT. Najczęściej wskazywane są trzy przyczyny, które doprowadzają do wystąpienia wahań klimatycznych – jest to (ma to być) szeroko rozumiana zmienna aktywność Słońca<sup>5</sup>, działalność wulkaniczna i związana z nią zmienna przezroczystość atmosfery oraz zmiany charakteru wielkoskalowej cyrkulacji atmosferycznej. O ile zmienna aktywność słoneczna w kształtowaniu zmian klimatycznych ma charakter działania permanentnego (patrz Bond i in. 2001) i może stanowić wymuszającą przyczynę długookresowych wahań temperatury, to działalność wulkaniczna prowadzi raczej do wystąpienia krótkookresowych zakłóceń o charakterze impulsowym. Zmiany wielkoskalowej cyrkulacji atmosferycznej, wiążące się ze zmianami tak zwanych „epok cyrkulacyjnych” stanowią przejaw wewnętrznych, nieliniowych zachowań systemu klimatycznego, nie są natomiast powodem zmian klimatu.

Czwartą przyczyną, wymienianą przez znacznie mniejszą liczbę badaczy, częściej oceanografów/oceanologów niż klimatologów, jest multidekadowa oceaniczna kontrola klimatu atmosfery, związana, jak wykazują badania, głównie ze zmieniającą się intensywnością południkowego transportu ciepła przez cyrkulację oceaniczną na Atlantyku Północnym (dalej skrót MOC – Meridional Overturning Circulation). Na MOC składa się sumaryczna cyrkulacja sterowana przez wiatry oraz cyrkulacja termohalinowa na Atlantyku Północnym (Pohlmann i in. 2006). Zmiany natężenia cyrkulacji termohalinowej na Atlantyku stanowią przyczynę wielkoskalowych zmian temperatury powierzchni oceanu (SST<sup>6</sup>; np. Ruhlemann i in. 1999, Latif i in. 2004, Dima, Lohmann 2007). Ten ostatni czynnik zmienia rozmiary i lokalizację strumieni ciepła z oceanu do atmosfery, a to determinuje lokalizację centrów działania atmosfery, przez co wywiera wpływ na kształt wielkoskalowej cyrkulacji atmosferycznej. W kształtowaniu krótkookresowej zmienności SST dominującą rolę odgrywa zmienność cyrkulacji atmosferycznej, w kształtowaniu długookresowej zmienności cyrkulacji atmosferycz-

nej dominującą rolę odgrywają zmiany SST (Bjerknes 1964). Oba podsystemy są ze sobą powiązane, a występujące między nimi związki mają charakter zależności nieliniowych; szczególnie silnie nieliniowych, jeśli włączy się do tego systemu kriosferę (np. Ganopolski, Rahmstorf 2000). Multidekadowa oceaniczna kontrola klimatu atmosfery nie wyklucza wpływu na przebieg jej działania czynników solar-nych.

W grupie badaczy wskazujących na prymat czynników naturalnych w kształtowaniu obserwowanego ocieplenia panuje pod pewnym względem zgodność. Wykazują oni, opierając się na wynikach badań paleoklimatycznych, że w okresie całego holocenu występowały wahania temperatury o znacznej amplitudzie. W kilku przynajmniej okresach holocenu, w których koncentracja gazów cieplarnianych w troposferze była znacząco niższa, temperatura powietrza była wyższa niż obecnie, na przykład w niezbyt odległym od teraźniejszości okresie holocenijskiego optimum klimatycznego czy średniowiecznym okresie ciepłym. Wahania te nie miały charakteru lokalnych (regionalnych) fluktuacji klimatycznych, ale miały zasięg globalny (Kreutz i in. 1997, deMenocal, in. 2000, Esper i in. 2002, Loehle 2007, Loehle, McCulloch 2008). Tym samym stwierdzenia Jonesa i Manna (2004), że obecny, XX-wieczny wzrost temperatury „jest bezprecedensowy” w skali półkuli północnej, a może i w skali globalnej, w ciągu ostatnich co najmniej 2000 lat, poddawane są w wątpliwość. Wątpliwości te są tym bardziej zasadne, że między kolejnymi rekonstrukcjami przebiegu temperatury powietrza Manna (Mann i in. 1998, 1999, Jones, Mann 2004, Mann i in. 2008) a rekonstrukcjami temperatury powietrza opierającymi się na danych *proxy* przeprowadzonymi przez innych badaczy (patrz np. Guiot i in. 2005, Moberg i in. 2005, Loehle 2007, Loehle, McCulloch 2008, Ljungqvist 2010) rysują się poważne rozbieżności. Można tu dodać, że metoda szacowania temperatury z danych *proxy* przez Manna, i sam dobór danych *proxy* do analizy, jest kwestionowana przez niektórych badaczy.

Znaczna liczba badaczy, niezależnie od ich poglądów na główną przyczynę wzrostu temperatury, zwraca również uwagę na fakt, że część obserwowanego wzrostu temperatury powietrza wynika ze zmiany warunków pomiarów. Bardziej szczegółowe badania wykazują, że nawet na obszarach, na których, jak się powszechnie sądzi, działalność ludzka nie wpływa istotnie na zmiany temperatury (np. w wysokiej Arktyce), wzrost temperatury tworzony przez przystające („miejskie”) wyspy ciepła może być zaskakująco duży (np. Hinkel i in. 2003, Hinkel, Nelson 2007). Podobnie zmiany użytkowania terenu,

<sup>5</sup> Zarówno zmienność liczby plam słonecznych, jak i zmienność parametrów orbitalnych (teoria Milankoviča) oraz zmienność oddziaływania grawitacyjnego Słońca w stowarzyszeniu z pozostałymi ciałami Układu Słonecznego.

<sup>6</sup> SST – Sea Surface Temperature. W dalszej części pracy ten akronim będzie stosowany na oznaczenie temperatury powierzchni oceanu.

i to nie tylko w bezpośredniej bliskości punktu pomiarowego, w istotny sposób wpływają na zmiany temperatury powietrza, zazwyczaj w kierunku zmniejszenia jej amplitudy dobowej i wzrostu temperatury średniej (np. Feddema i in. 2005, Pielke 2005, Hale i in. 2006).

Trudno oczekiwać, aby zachodzące obecnie zmiany temperatury stanowiły funkcję jednej zmiennej. Nic nie przemawia za tym, że w epoce industrialnej – w czasie antropogenicznego, intensywnego wzrostu zawartości gazów cieplarnianych w atmosferze przestały nagle działać w systemie klimatycznym długookresowe procesy naturalnej ewolucji klimatu różnorodnej natury (np. cykle Bonda, patrz Bond i in. 1997). Podobnie nie da się zaprzeczyć, że zawartość gazów cieplarnianych w atmosferze wzrasta w szybkim tempie, a działalność człowieka zmieniająca właściwości radiacyjno-ciepne powierzchni lądów obejmuje coraz większe obszary, często przybierając ekstremalne formy (np. Amazonia). Jedno i drugie powinno wywierać wpływ na kształtowanie obserwowanych globalnych i hemisferycznych zmian temperatury powietrza. W takim stanie rzeczy ważną kwestią wydaje się ocena, jaki jest udział czynnika antropogenicznego w kreowaniu obserwowanego wzrostu temperatury powietrza, a jaki czynników mających charakter naturalny, czyli wymuszany przez bezpośrednie działanie sił przyrody.

Jednym z czynników mogących wywierać wpływ na zachowanie się temperatury powietrza w skali hemisferycznej i skali globalnej są zmiany zasobów ciepła w Oceanie Światowym, sygnalizowane przez zmiany temperatury powierzchni oceanu. O ile można przyjąć, że bilans radiacyjno-ciepny powierzchni lądowych zamyka się zgrubnie w cyklu rocznym, to bilans radiacyjno-ciepny Oceanu Światowego w cyklu rocznym pozostaje niezrównoważony, a pełen cykl wymiany z osiągnięciami punktów równowagi następuje, według szacunków Rossby'ego (1959), w przedziale między 400 a 4000 lat. Tym samym bilans ciepły Ziemi jako całości w krótkich okresach jest niezrównoważony. Zdaniem Rossby'ego nadwyżki ciepła mogą być gromadzone i okresowo przechowywane w oceanie, skąd po okresie od kilku dziesięcioleci do kilku stuleci ponownie zostają włączone do wymiany z atmosferą, przyczyniając się do zmian temperatury powietrza. Teza Rossby'ego (1959), przez dziesiątki lat ignorowana przez klimatologów, znajduje potwierdzenie w wynikach badań nad bilansem cieplnym Ziemi i Oceanu Światowego prowadzonych w ostatnich latach (patrz np. Hansen i in. 2005, Levitus i in. 2005<sup>7</sup>).

W przypadku niezamarzającej powierzchni morza można być pewnym, że jej właściwości fizyczne, poza zmianami temperatury, pozostają niezmiennie w funkcji czasu. Poszczególne fragmenty powierzchni Oceanu Światowego w zależności od aktualnie funkcjonujących w nich i nad nimi procesów wykazują różnokierunkowe zmiany SST. Podobnie wobec silnie zróżnicowanych zasobów ciepła w wodach, mają różny udział w transmisji ciepła z oceanu do atmosfery, tym samym ich rola w kształtowaniu zmian temperatury powietrza jest różna. Jednym z takich wielkich „grzejników” powietrza na półkuli północnej, ale i „akumulatorem” ciepła, jest Morze Sargassowe.

Celem tej pracy jest przedstawienie wyników analiz związków zachodzących między wielkoskalowymi zmianami SST na części Atlantyku Północnego – na obszarze Morza Sargassowego – a globalnymi zmianami temperatury. Powierzchnia tego trudnego do jednoznacznej delimitacji akwenu może być szacowana na około 6–7 mln km<sup>2</sup>. Analiza zależności między zmianami SAT a zmianami SST na Morzu Sargassowym pozwoli ocenić, jaki odsetek wariacji zmian SAT jest objaśniany przez zmiany SST na tym akwenu, a tym samym odnieść się do kwestii, czy głównym czynnikiem wymuszającym globalne ocieplenie jest wzrost koncentracji gazów cieplarnianych w atmosferze. Związki te zostaną rozpatrzone w skali globu, półkuli północnej i jej poszczególnych stref szerokościowych. Trzeba tu zwrócić uwagę na fakt, że zmiany SST na Morzu Sargassowym zachodzą pod wpływem procesów funkcjonujących w skali przestrzennej znacznie większej od tego akwenu. W takiej sytuacji konieczna również staje się analiza, wyjaśniająca, jaki faktycznie sygnał niesie w sobie zmienność SST na rozpatrywanym akwenu. Same zmiany SST na Morzu Sargassowym i procesy nimi sterujące stanowią nie jedyny, a jeden z wielu czynników mogących oddziaływać na obserwowane hemisferyczne i globalne zmiany temperatury powietrza.

## Dane i metody

Ponieważ rekonstrukcje warunków klimatycznych opierających się na danych typu *proxy* nie dają jednoznacznych i zgodnych wyników, celowe wydaje się ograniczenie analizy związków między SST a globalną i hemisferyczną temperaturą powietrza do okresu, dla którego dysponuje się danymi pochodzącymi z pomiarów.

Jako dane charakteryzujące stan termiczny oceanu wykorzystano zbiór ERSST v.2. (Smith, Reynolds 2004)<sup>8</sup>. Zbiór ten, mający organizację gridową,

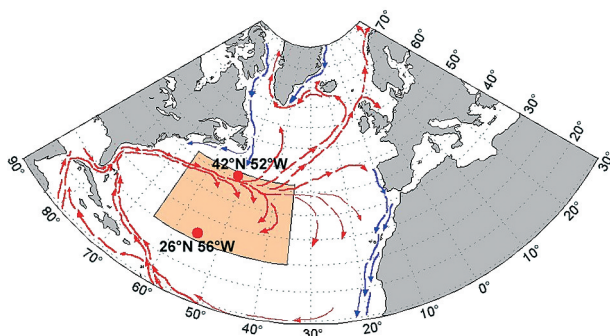
<sup>7</sup> Niezależnie od wyrażanych przez wymienionych badaczy poglądów na przyczynę braku tego zrównoważenia.

<sup>8</sup> Pełna nazwa zbioru: NOAA NCDC ERSST version2: Improved extended reconstructed global sea surface temperature data based on COADS data. Źródło: <http://iridl.ldeo.columbia.edu/SOURCES/.NOAA/.NCDC/.ERSST/.version2/>. Zbiór ERSST v.2. kończy się na roku 2009, obecnie dane SST o takiej samej rozdzielczości przestrzennej i czasowej podaje zbiór ERSST v.3b.



zawiera średnie miesięczne wartości temperatury powierzchni morza w polach  $2 \times 2^\circ$ , rozpoczynające się od roku 1854. Według Smitha i Reynoldsa (2004) dokładność danych jest zmienna, średnie miesięczne z XIX w. są oszacowane z dokładnością nie gorszą niż  $\pm 0,4^\circ\text{C}$ , z pierwszej połowy XX w. z dokładnością nie gorszą niż  $\pm 0,2^\circ\text{C}$ , dane po roku 1950 mają dokładność nie gorszą niż  $\pm 0,1^\circ\text{C}$ . Wartości średnie roczne SST w poszczególnych gridach obliczano jako średnie arytmetyczne ze średnich miesięcznych w danym roku kalendarzowym. Wobec zmieniających się okresów, względem których liczy się anomalie SST, i podawania przez różnych autorów wartości anomalii SST obliczanych względem różnych okresów odniesienia, w pracy wykorzystano surowe wartości rocznej SST.

Analizę SST prowadzono na akwenu między szerokościami  $25$  a  $43^\circ\text{N}$  i długościami  $65$  a  $35^\circ\text{W}$  (patrz ryc. 1). Tak wyznaczone granice obszaru badań na północy wykraczają poza zasięg Morza Sargassowego, obejmując również strefę kontaktu wód labradorskich z wodami tropikalnymi, deltę Golfstromu i strefę wypływu ciepłych wód tropikalnych na północ, do Prądu Północnoatlantyckiego. Wobec bardzo silnego skorelowania miesięcznych i rocznych wartości SST w sąsiadujących gridach ( $r > 0,9$ ) zmniejszono rozdzielczość danych użytych w analizie do  $4 \times 4^\circ$  (szerokości  $26, 30, 34, 38$  i  $42^\circ\text{N}$ , długości  $64, 60, 56, 52, 48, 44, 40$  i  $36^\circ\text{W}$ ; razem 40 szeregów SST).



**Ryc. 1.** Obszar objęty badaniami zmian temperatury powierzchni oceanu (SST) na tle głównych systemów cyrkulacji oceanicznej na Atlantyku Północnym. Punktami zaznaczono gridy  $26^\circ\text{N}, 56^\circ\text{W}$  (środkowa część Morza Sargassowego o względnym „bezruchu” wody) i  $42^\circ\text{N}, 52^\circ\text{W}$  (akwen w rejonie północnej części delty Golfstromu – strefa kontaktowa wód tropikalnych z chłodnymi wodami labradorskimi)

**Fig. 1.** The area analyzed for changes in sea surface temperature (SST) and the main systems of oceanic circulation in the North Atlantic. Grid  $26^\circ\text{N}, 56^\circ\text{W}$  (the central part of the Sargasso Sea where the water is relatively ‘still’) and grid  $42^\circ\text{N}, 52^\circ\text{W}$  (sea area in the north part of the Gulf Stream delta – contact zone of tropical waters with cold Labrador waters) are marked by points

Wartości rocznych anomalii temperatury powietrza względem średnich z okresu 1951–1980 dla całej Ziemi, półkul i ich stref szerokościowych zostały oszacowane przez GISS od roku 1880 i są powszechnie dostępne<sup>9</sup>. Zbiory anomalii SAT opracowane przez GISS są szeroko wykorzystywane do porównań z wynikami pracy modeli klimatycznych GCM i AOGCM symulujących efekty zmian temperatury powietrza pod wpływem zmian koncentracji  $\text{CO}_2$  w atmosferze. Metodę oszacowania wartości anomalii temperatury powietrza zawartych w tych zbiorach omawiają Hansen i in. (1999, 2001). Dane te zostały użyte w tym opracowaniu jako charakteryzujące rozmiary i przebieg globalnego ocieplenia. Wykorzystano zbiór ZonAnn.Ts.txt, w którym anomalie temperatury opracowano wyłącznie w oparciu o dane z lądowych stacji meteorologicznych. Zbiór ZonAnn.Ts podaje roczne anomalie temperatury powietrza dla całego globu, obu półkul, a na każdej półkuli w strefach szerokościowych  $0\text{--}24^\circ$ ,  $24\text{--}44^\circ$ ,  $44\text{--}64^\circ$  i  $64\text{--}90^\circ$ .

Dane opisujące zmiany koncentracji  $\text{CO}_2$  w troposferze pochodzą z dwóch źródeł, tworząc zbiór kombinowany. Dla charakterystyki zmian zawartości  $\text{CO}_2$  w atmosferze od 1880 do 1975 wykorzystano dane o koncentracji  $\text{CO}_2$  z Law Dome (1880–1978; Etheridge i in. 1998). Występujące w tym zbiorze średnie roczne wartości  $\text{CO}_2$  wyrównane są 20-punktową średnią kroczącą i stanowią rezultat analizy rdzenia lodowego z Antarktydy. Te właśnie dane są najczęściej używane przez badaczy efektu cieplarnianego. Powszechnie uważa się, że są one w pełni reprezentatywne dla charakterystyki zawartości  $\text{CO}_2$  w atmosferze w okresie preindustrialnym oraz na początku epoki industrialnej (Etheridge i in. 1996, Morgan i in. 1997). Drugim zbiorem, obejmującym okres 1959–2007, są średnie roczne zawartości  $\text{CO}_2$  rejestrowane przez obserwatorium Mauna Loa (Keeling i in. 2009). Wobec dobrej zbieżności obu ciągów we wspólnym dla obu zbiorów okresie danych (1959–1974) do obliczeń przyjęto średnią z obu szeregów. Obydwa zbiory uzyskano z bazy danych CDIAC – ORNL (Carbon Dioxide Information Analysis Center – Oak Ridge National Laboratory).

Wspólny okres obserwacyjny zbiorów anomalii SAT i SST obejmuje lata 1880–2008 (129 lat). Nieco tylko krótszy (1880–2007; 128 lat) jest szereg koncentracji  $\text{CO}_2$ . Taka długość szeregów analizowanego okresu pozwala sądzić, że przedstawione dalej związki opierają się na mocnej podstawie statystycznej. W analizie wykorzystano standardowe metody statystyczne – korelację liniową, regresję wielokrotną i analizę wariancji oraz analizę składowych głównych (PC) wraz z typowymi dla poszczególnych procedur testami określającymi istotność analizowanych związków.

<sup>9</sup> NASA Goddard Institute for Space Studies; patrz GISS Surface Temperature Analysis (<http://data.giss.nasa.gov/gistemp/>).

## Rozkład przestrzenny globalnego ocieplenia

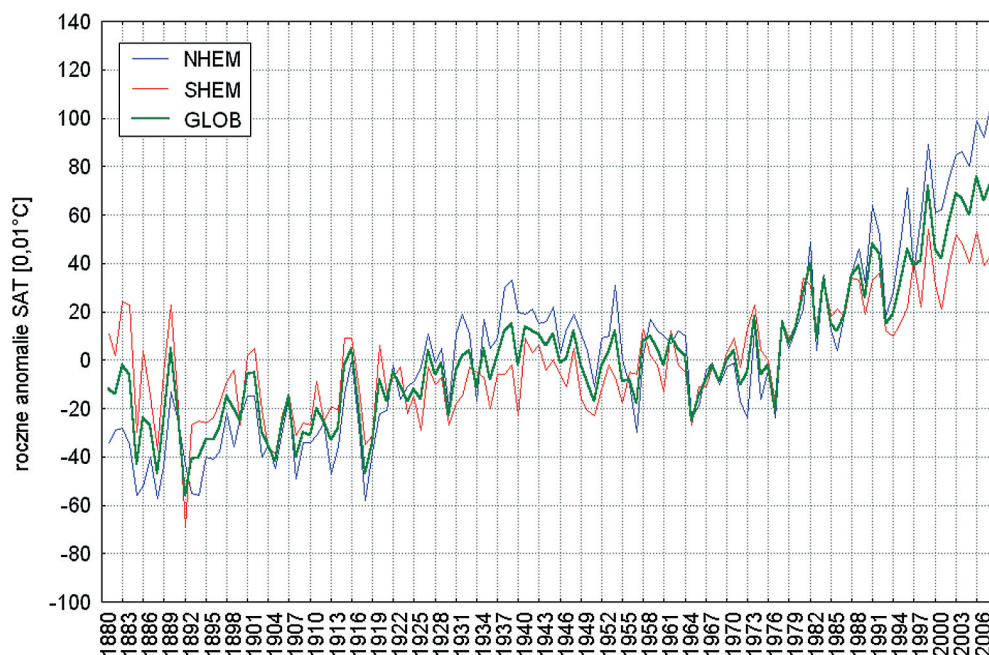
Przed przystąpieniem do analizy związków globalnych i hemisferycznych zmian temperatury ze zmianami SST na Morzu Sargassowym warto zapoznać się z pewnymi secyficznymi cechami rozkładu w czasie i przestrzeni procesów globalnego ocieplenia.

Cechą charakterystyczną globalnego ocieplenia jest jego nierównomierny rozkład przestrzenny, przejawiający się w wyraźnie szybszym i bardziej zmiennym w czasie wzroście temperatury powietrza na półkuli północnej. W równaniu regresji wielokrotnej zmienność anomalii temperatury powietrza na półkuli północnej objaśnia 93,38% globalnej zmienności anomalii temperatury powietrza, gdy półkuli południowej 6,67%. Zmienność przebiegu procesów ocieplenia globalnego na obu półkulach przedstawiono na rycinie 2. Śledząc przebieg anomalii na półkulach południowej i północnej (ryc. 2), nie trudno zauważyć, że do połowy lat 60. XX w. trend temperatury na półkuli południowej jest bliski zeru ( $+0,001(\pm 0,003)^{\circ}\text{C}\cdot\text{rok}^{-1}$ ). Wzrost temperatury, słabszy niż na półkuli północnej, rozpoczął się na półkuli południowej po roku 1970.

Cechą charakterystyczną przebiegu anomalii temperatury powietrza na półkuli północnej jest występo-

wanie słabego wzrostu temperatury od lat 20. do lat 50. XX w. Wzrost ten stanowi odbicie w średniej hemisferycznej silnego ocieplenia, jakie nastąpiło w tym czasie w Arktyce i znacznie słabszego w północnej części strefy umiarkowanej (patrz ryc. 3), a które nie znalazło odpowiednika na półkuli południowej.

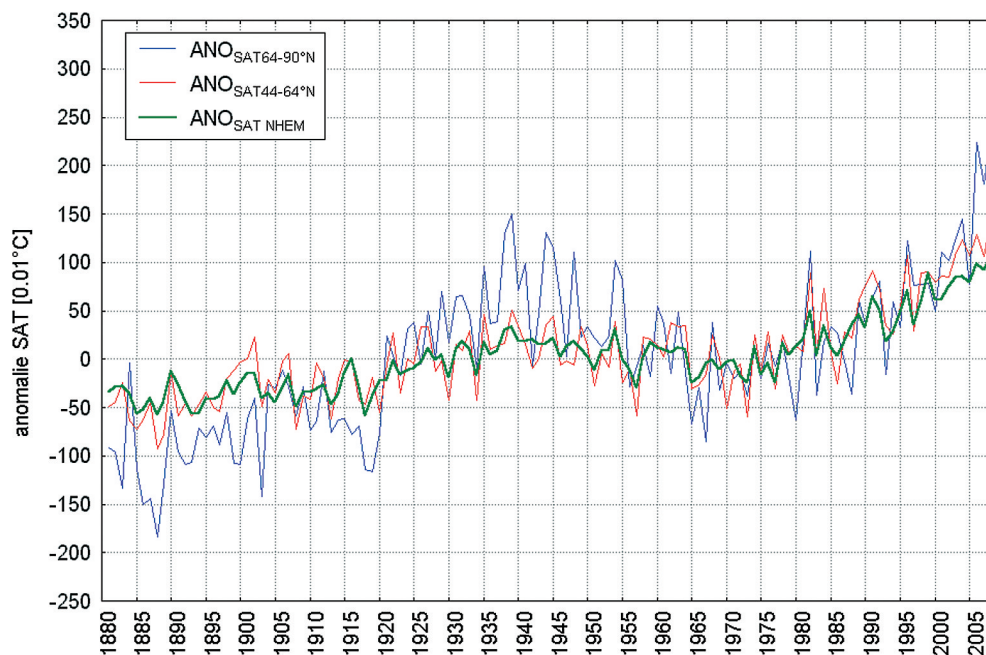
Taki rozkład przestrzenny wskazuje, że zasadnicze zmiany temperatury, które wpływają na kształt zmian globalnych (średnia ważona), lokują się na półkuli północnej. Może to stanowić efekt nierównomiernego rozkładu stacji, z których obliczano anomalie SAT, co z kolei jest odbiciem znacznie mniejszej powierzchni lądów na półkuli południowej<sup>10</sup>. Może to, jak zakładają badacze widzący w działaniu efektu cieplarnianego główną przyczynę globalnego ocieplenia, być rezultatem odmiennej reakcji (czułości) klimatów półkuli południowej od klimatów półkuli północnej na wzrost zawartości  $\text{CO}_2$  w atmosferze. Jednak taki właśnie rozkład przestrzenny anomalii może też wskazywać, że procesy, które generują ocieplenie, występują na półkuli północnej. Nie przesądzając w tym miejscu o przyczynach, które doprowadzają do opisanego rozkładu przestrzennego wzrostu temperatury, należy stwierdzić, że uzasadnione wydaje się skupienie analizy na tej półkuli, która wnosi zasadniczy wkład w kształtowanie zmienności w skali globalnej, czyli półkuli północnej.



**Ryc. 2.** Przebieg anomalii temperatury powietrza (w setnych częściach  $^{\circ}\text{C}$ ) na półkuli północnej (NHEM), półkuli południowej (SHEM) i anomalii globalnych (GLOB). Dane NASA GISS Surface Temperature Analysis (Hansen i in. 1999, 2001)

**Fig. 2.** The course of anomalies in air temperature (in hundredths of a degree Celsius) in the North Hemisphere (NHEM), in the Southern Hemisphere (SHEM) and global anomalies (GLOB). Data from NASA GISS Surface Temperature Analysis (Hansen et al 1999, 2001)

<sup>10</sup> W strefie umiarkowanej półkuli południowej niemal całkowicie brak stacji, stacje w Subantarktyce i Antarktyce rozpoczęły prace relatywnie późno.



**Ryc. 3.** Przebieg anomalii temperatury powietrza w strefie najwyższych szerokości półkuli północnej – 64–90°N ( $ANO_{SAT64-90^{\circ}N}$ ), szerokości umiarkowanych półkuli północnej – 44–64°N ( $ANO_{SAT44-64^{\circ}N}$ ) i anomalii temperatury powietrza na całą półkulę północną ( $ANO_{SAT\ NHEM}$ ). Dane NASA GISS Surface Temperature Analysis (Hansen i in. 1999, 2001)

**Fig. 3.** The course of anomalies in air temperature at the highest latitudes of the Northern Hemisphere – 64°–90°N ( $ANO_{SAT64-90^{\circ}N}$ ), at mid latitudes of the Northern Hemisphere – 44°–64°N ( $ANO_{SAT44-64^{\circ}N}$ ) and air temperature anomalies in the whole Northern Hemisphere ( $ANO_{SAT\ NHEM}$ ). Data from NASA GISS Surface Temperature Analysis (Hansen et al 1999, 2001)

Przebieg anomalii temperatury powietrza na półkuli północnej oraz w Arktyce i strefie umiarkowanej półkuli północnej przedstawiono na rycinie 3. Amplituda i zakres zmienności anomalii temperatury na półkuli północnej wykazuje duże zróżnicowanie strefowe (patrz tab. 1).

Jak nietrudno zauważyć, strefa umiarkowana (44–64°N) i strefa 64–90°N, którą dalej będzie się nazywać „Arktyką”, charakteryzują się wyraźnie większą amplitudą anomalii temperatury powietrza niż strefy tropikalna (0–24°N) i subtropikalna (24–44°N). Największy zakres zmienności (odchylenie

**Tabela 1.** Średnie strefowe wieloletnie (1880–2007) wartości anomalii temperatury powietrza (AN) w poszczególnych strefach na półkuli północnej i zakres ich zmienności (sn – odchylenie standardowe). Wartości anomalii w 0,01°C

**Table 1.** Mean multi-year (1880–2007) zonal values of anomalies in air temperature (AN) in particular zones in the Northern Hemisphere and the scope of their changeability (sn – standard deviation). Values of anomalies in 0.01°C

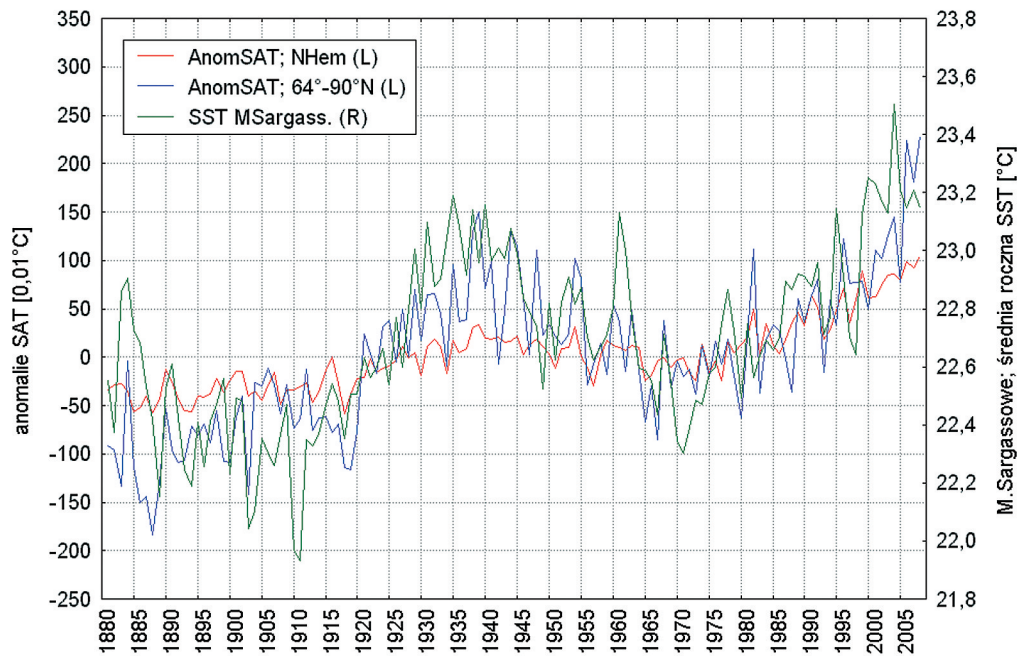
strefa	średnia AN	sn	min.	maks.
0–24°N	0,1484	30,189	–61	87
24–44°N	1,9219	33,141	–64	97
44–64°N	5,7109	48,367	–93	140
64–90°N	2,6875	78,755	–184	228

standardowe; sn) i największa amplituda anomalii temperatury występuje w Arktyce. Wyższa wartość średniej anomalii w strefie umiarkowanej półkuli północnej niż w Arktyce wynika z rozkładu wartości anomalii – te w strefie umiarkowanej, poza nielicznymi wyjątkami, są dodatnie, gdy w Arktyce duży odsetek anomalii ma znaki ujemne. Największy wkład w objaśnienie zmienności anomalii temperatury półkuli północnej wnosi natomiast zmienność anomalii w strefie podzwrotnikowej (adj.  $R^2 = 87,8\%$ ), nieco tylko mniejszy – w strefie umiarkowanej (adj.  $R^2 = 86,2\%$ ). Anomalie we wszystkich strefach półkuli północnej są ze sobą silnie skorelowane. Najśłabsza korelacja zachodzi między strefą równikową (0–24°N) a Arktyką, ale i tak współczynnik korelacji między nimi jest równy 0,65 ( $p < 0,001$ ).

## Wyniki

Przeprowadzone analizy wykazują, że między zmiennością rocznej SST na Morzu Sargassowym a zmianami globalnej i hemisferycznej rocznej SAT zachodzą bardzo silne i wysoce istotne statystycznie związki. Współczynnik korelacji średniej rocznej SST obliczonej jako średnia arytmetyczna z całej powierzchni przyjętej do analizy Morza Sargassowego (25–39°N, 65–35°W) z globalnymi anomaliaми SAT jest równy 0,70 (dokładnie 0,6988), a z ano-





**Ryc. 4.** Przebieg średniej rocznej temperatury powierzchni Morza Sargassowego (MS SST) oraz anomalii rocznej temperatury powietrza na półkuli północnej (AnomSAT; NHem) i w Arktyce – 64–90°N (AnomSAT – 64–90°N). Skale obu wielkości odmiennie

**Fig. 4.** The course of mean annual sea surface temperature of the Sargasso Sea (MS SST) and anomalies in annual air temperature of the Northern Hemisphere (AnomSAT; NHem) and in the Arctic – 64–90°N (AnomSAT – 64–90°N). Scales of both values are different

maliami SAT na półkuli północnej 0,75 (0,7463). Związki tak obliczonej rocznej SST z anomaliami w poszczególnych strefach szerokościowych półkuli północnej bardziej się różnicują, najsilniejsze są ze strefą najwyższych szerokości (Arktyka; 64–90°N;  $r = 0,72$ ), najsłabsze z anomaliami strefy umiarkowanej (44–64°N;  $r = 0,64$ ). Siła związków SST z anomaliami SAT stref tropikalnej (0–24°N) i subtropikalnej (24–44°N) jest podobna i wynosi odpowiednio 0,67 i 0,69. Przebieg średniej rocznej SST dla całego Morza Sargassowego (patrz ryc. 4) ujawnia ogólną zgodność z przebiegiem anomalii SAT na półkuli północnej, zwłaszcza dobrą zgodność z przebiegiem anomalii SAT w Arktyce. Wzrostowi SST na Morzu Sargassowym w latach 30–40. XX w. odpowiada ekwiwalentny wzrost SAT w Arktyce (okres tzw. wielkiego ocieplenia Arktyki lat 30.–40. XX w.). Tego wzrostu SAT nie reprodukuje inne modele AOGCM, poza jednym eksperymentem Delwortha i Knutsona (2000).

W ujęciu regionalnym (patrz tab. 2, 3) najsilniejsze związki rocznej SST z rocznymi anomaliami SAT na półkuli północnej i anomaliami globalnymi zaznaczają się w rejonie 26°N, 56°W, czyli w południowo-zachodniej części Morza Sargassowego. Dalej na południe (wartości nieumieszczone w tab. 2 i 3) siła związków powoli spada<sup>11</sup>.

Różnice przestrzenne w sile związków między globalnymi i hemisferycznymi szeregami anomalii SAT a SST są niewielkie, oba rozkłady przestrzenne są bardzo podobne i, jak się wydaje, niewielkie różnice między wartościami w poszczególnych polach tabel 2 i 3 nie mają znaczenia. Średnie wartości współczynników determinacji ( $r^2$ ) są jednak znacząco większe dla półkuli północnej niż globalnych anomalii SAT. Zmienność SST w rejonie najsilniejszych powiązań z anomaliami SAT objaśnia ~59% wariacji globalnych i hemisferycznych anomalii SAT w badanym okresie.

Analiza składowych głównych, które wyznaczono dla zbioru 40 szeregów rocznych wartości SST (tych samych, którymi operuje się w tab. 2 i 3), wykazuje, że szeregi czasowe czterech pierwszych PC objaśniają łącznie 92,9% wariacji SST na Morzu Sargassowym. Pierwszy PC objaśnia 65%, drugi – 18%, trzeci – 6%, a czwarty – 3,6% wariacji. Test osypiska wskazuje, że dla scharakteryzowania wariacji SST na Morzu Sargassowym wystarczające jest ograniczenie się do pierwszych trzech PC, które łącznie objaśniają 89% wariacji. Szereg czasowy pierwszego wektora empirycznych funkcji własnych jest bardzo silnie skorelowany, pod względem zasobu zmienności właściwie tożsamy, ze średnią SST z Morza Sargassowego obliczoną jako średnia arytmetyczna w

<sup>11</sup> Badania siły związków przeprowadzono do 22°N. Wobec braku, poza Bermudami, lądowych punktów odniesienia na badanym akwenu, zrezygnowano z przedstawienia związków w postaci map izokorelat, zestawiając je w postaci tabelarycznej.



**Tabela 2.** Wartości współczynników korelacji liniowej między rocznymi szeregami SST na Morzu Sargassowym a szeregiem globalnych anomalii temperatury powietrza (dane GISSTemp). Okres 1880–2007 (128 lat). Wszystkie współczynniki korelacji są istotne na poziomie  $p < 0,00001$

**Table 2.** The values of coefficients of linear correlation between annual series of SST in the Sargasso Sea and the series of global anomalies in air temperatures (data from GISSTemp). The period 1888–2007 (128 years). All correlation coefficients are at significance level  $p < 0.00001$

	64°W	60°W	56°W	52°W	48°W	44°W	40°W	36°W
42°N	0,3187	0,4105	0,4024	0,4061	0,3561	0,3104	0,3186	0,3288
38°N	0,4407	0,5545	0,5349	0,4556	0,4085	0,4052	0,4095	0,4104
34°N	0,5509	0,6250	0,5591	0,5423	0,5323	0,5547	0,5755	0,5766
30°N	0,5633	0,6638	0,6534	0,6552	0,6397	0,6624	0,6920	0,6620
26°N	0,7413	0,7677	0,7752	0,7474	0,7223	0,7063	0,6611	0,6434

**Tabela 3.** Wartości współczynników korelacji liniowej między rocznymi szeregami SST na Morzu Sargassowym a szeregiem anomalii temperatury powietrza na półkuli północnej (dane GISSTemp). Okres 1880–2007 (128 lat). Wszystkie współczynniki korelacji są istotne na poziomie  $p < 0,00001$

**Table 3.** The values of coefficients of linear correlation between annual series of SST in the Sargasso Sea and the series of anomalies in air temperatures in the Northern Hemisphere (data from GISSTemp). The period 1888–2007 (128 years). All correlation coefficients are at significance level  $p < 0.00001$

	64°W	60°W	56°W	52°W	48°W	44°W	40°W	36°W
42°N	0,3391	0,4474	0,4484	0,4470	0,4058	0,3611	0,3633	0,3727
38°N	0,5081	0,6162	0,5955	0,5252	0,4786	0,4737	0,4706	0,4682
34°N	0,6097	0,6719	0,6138	0,6058	0,5922	0,6126	0,6285	0,6275
30°N	0,6045	0,6931	0,6788	0,6936	0,6828	0,7013	0,7287	0,6933
26°N	0,7273	0,7494	0,7689	0,7453	0,7169	0,7090	0,6746	0,6503

strefie 25–39°N, 65–35°W ( $r = 0,99$ ) oraz nieco słabiej skorelowany ze średnią roczną SST z Morza Sargassowego, z której usunięto trend ( $r = 0,84$ ). Pierwsza PC wykazuje stosunkowo słabą, ale statystycznie istotną korelację z rocznym wskaźnikiem NAO Rogersa ( $r = 0,31$ ,  $p = 0,001$ ), druga PC koreluje ( $r = 0,31$ ,  $p < 0,001$ ) z rocznym wskaźnikiem SOI (Southern Oscillation), co rejestruje słaby, ale zauważalny wkład obu tych wzorców cyrkulacyjnych w kształtowanie zmienności SST na Morzu Sargassowym (lub wkład zmian SST na Morzu Sargassowym w kształtowanie zmienności NAO).

Ta sama pierwsza składowa główna wykazuje bardzo silne skorelowanie z anomaliami SAT; maksymalne z SAT półkuli północnej ( $r = 0,72$ ), Arktyki ( $r = 0,71$ ) oraz globalnymi ( $r = 0,68$ ). Najslabiej jest skorelowana z anomaliami SAT strefy umiarkowanej (44–64°N;  $r = 0,63$ ). Mimo że kolejne szeregi czasowe EOF są (z definicji) ze sobą nieskorelowane, ich przydatność jako zmiennych niezależnych w regresji wielokrotnej okazała się mniejsza od zmiennych stanowiących szeregi czasowe rocznych SST w konkretnych gridach.

Analiza regresji i analiza wariancji wykazała, że największy odsetek wariancji anomalii temperatury

globalnej, hemisferycznej oraz poszczególnych stref szerokościowych półkuli północnej objaśniają jednocześnie zmiany rocznej SST w dwu grid-boxach (patrz ryc. 1). Pierwszy z nich (26°N, 56°W) charakteryzuje zmiany SST zachodzące na najbardziej „wygrzanych” i znajdujących się we względnym „bezruchu” częściach Morza Sargassowego<sup>12</sup>, informując o zasobach ciepła w całym Morzu Sargassowym. Drugi (42°N, 52°W), znajdując się na północnym pograniczu Morza Sargassowego i delty Golfstromu, informuje o intensywności transportu ciepła wraz z transportem wód na północ, do Prądu Północnoatlantyckiego, zachodzących w takt zmian natężenia MOC. W równaniach regresji wielokrotnej, w których zmienną zależną (objaśnianą) są anomalie SAT, a zmiennymi niezależnymi (objaśniającymi) roczne SST w tych dwu gridach, stopień objaśnienia wariancji zmiennej zależnej (adj.  $R^2$ ) jest nie mniejszy niż 50% (patrz tab. 4).

Dwie zmienne niezależne, jedna z powierzchni Morza Sargassowego (zmienna [1]), druga z rejonu delty Golfstromu (zmienna [2]), objaśniają łącznie około 67–68% obserwowanej zmienności temperatury powietrza w skali globu i półkuli północnej, odpowiednio mniej w poszczególnych strefach szeroko-

<sup>12</sup> Akwen na S i SE od Bermudów, w przybliżeniu 30–25°N, 65–52°W.

**Tabela 4.** Charakterystyki statystyczne równań regresji wielokrotnej objaśniających zmienność rocznych anomalii SAT (ano SAT) w latach 1880–2007, w których zmiennymi niezależnymi są roczne wartości SST w gridach 26°N, 56°W [1] i 42°N, 52°W [2]

**Table 4.** Statistic characteristics of multiple regression equations used to explain the changeability in annual anomalies in SAT (ano SAT) in the years 1888–2007 where annual values of SST in grids 26°N, 56°W [1] and 42°N, 52°W [2] are independent variables

ano SAT	R	adj.R <sup>2</sup>	F(2,125)	p <	BSE	R <sup>2</sup> [1]	R <sup>2</sup> [2]
Globalna	0,8228	0,6718	130,9	0,00001	15,98	60,1	7,6
N półk.	0,8321	0,6875	140,7	0,00001	20,38	59,1	10,1
0–24°N	0,8051	0,6425	115,2	0,00001	18,05	59,4	5,4
24–44°N	0,7776	0,5984	95,6	0,00001	21,00	51,8	8,7
44–64°N	0,7239	0,5164	68,3	0,00001	33,63	43,5	8,9
64–90°N	0,7150	0,5034	67,4	0,00001	66,50	36,8	12,5

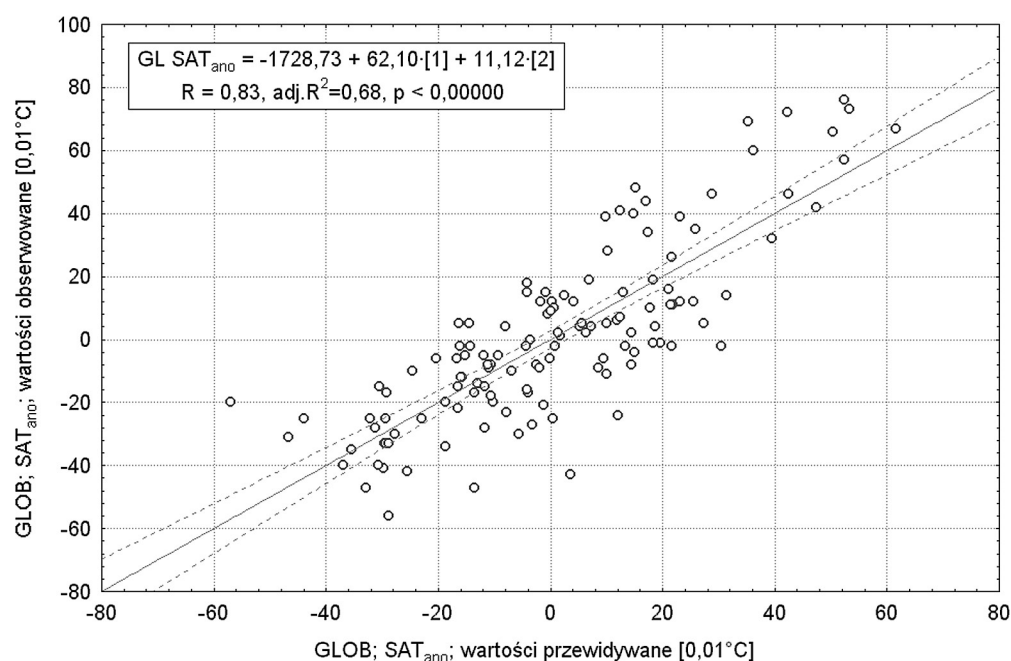
Objaśnienia: R – współczynnik korelacji wielokrotnej, adj. R<sup>2</sup> – współczynnik determinacji poprawiony na liczbę stopni swobody równania regresji, F(2,125) – wartość testu F przy danych liczbach stopni swobody, p – poziom istotności równania regresji, BSE – błąd standardowy estymacji anomalii SAT w równaniu. R<sup>2</sup> [1] i R<sup>2</sup> [2] – objaśnienie wariancji zmiennej zależnej przez pierwszą [1] i drugą [2] zmienną niezależną w równaniu (%).

Explanations: R – coefficient of multiple correlation, adj. R<sup>2</sup> – coefficient of determination adjusted to the number of degrees of freedom of the regression equation, F (2,125) – the value of test F with given numbers of degrees of freedom, p – the level of significance of regression equation, BSE – standard error of estimation of SAT anomalies in equation. R<sup>2</sup> [1] and R<sup>2</sup> [2] – explanation of variances of dependent variable by the first [1] and the second [2] independent variable in equation (%).

ściowych tej półkuli. Zauważa się, że stopień objaśnienia zmian SAT przez SST maleje od strefy najniższych szerokości do strefy arktycznej, podobnie w strefie umiarkowanej i w Arktyce wzrasta silnie błąd standardowy (BSE) estymacji SAT. Taki obraz

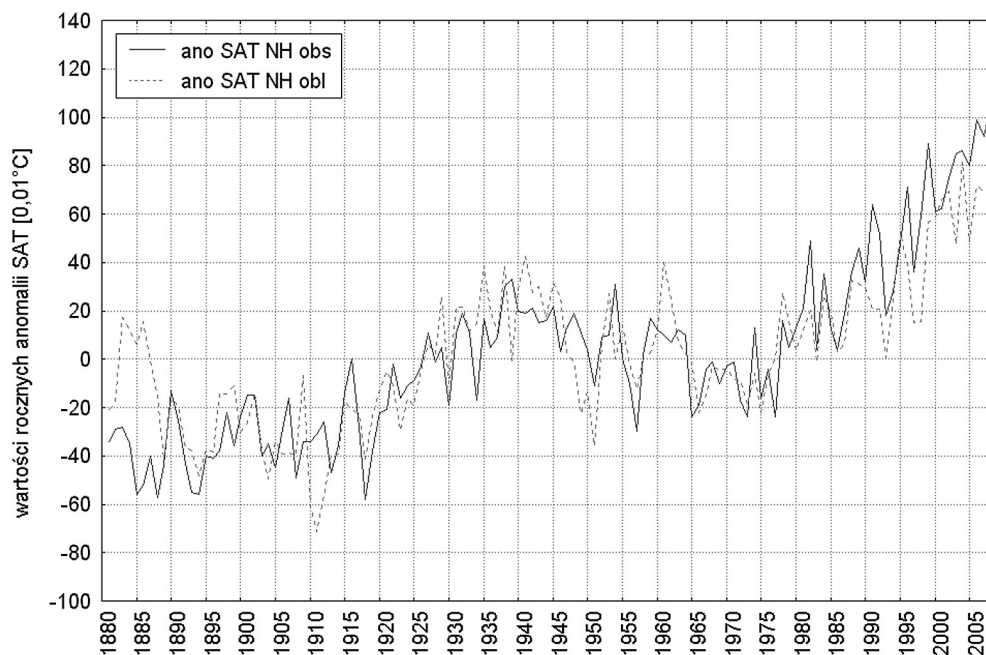
stanowi odbicie rosnącej wraz ze wzrostem szerokości geograficznej zmienności anomalii SAT w poszczególnych strefach.

Ogólnie, zależność między SST a SAT jest liniowa (patrz ryc. 5), a obliczone z równania regresji warto-



**Ryc. 5.** Związek między obliczoną z równania regresji wielokrotnej wartością globalnej anomalii temperatury w danym roku (GLOB; SAT<sub>ano</sub>; wartości przewidywane; patrz ramka: zmienna niezależna [1] – roczna wartość SST w gridzie 26°N, 56°W w danym roku, zmienna niezależna [2] – roczna wartość SST w gridzie 42°N, 052°W w danym roku) a obserwowanymi w tym samym roku globalnymi anomaliami temperatury powietrza (GLOB; SAT<sub>ano</sub>; wartości obserwowane)

**Fig. 5.** The correlation between the value of global anomalies in air temperature in a given year calculated with multiple regression equation (GLOB; SAT<sub>ANO</sub>; predicted values; see Table: independent variable [1] – the annual value of SST in grid 26°N, 056°W in a given year, independent variable [2] – the annual value of SST in grid 42°N, 052°W in a given year), and the observed global anomalies in air temperature in the same year (GLOB; SAT<sub>ANO</sub>; the observed values)



**Ryc. 6.** Przebieg obserwowanych anomalii temperatury na półkuli północnej (ano SAT NH obs) i obliczonych (ano SAT NH obl) za pomocą równania regresji wielokrotnej ze zmiennych niezależnych charakteryzujących roczną SST w dwu gridach z powierzchni Morza Sargassowego (patrz tab. 4)

**Fig. 6.** The course of the observed anomalies in temperature in the Northern Hemisphere (ano SAT NH obs) and the values calculated (ano SAT NH obl) from independent variables characterizing the annual SST in both grids from the surface of the Sargasso Sea with the help of multiple regression equation (see Table 4)

ści SAT, w których zmiennymi niezależnymi są roczne wartości SST w gridach 26°N, 56°W i 42°N, 52°W, dobrze odtwarzają przebieg obserwowany SAT (patrz ryc. 6). O ile w przebiegach krótkookresowych można lokalnie dopatrzeć się większych niezgodności, składowe długookresowe wykazują dobrą zgodność, poza początkowym okresem analizy. Tam powodem niezgodności może być nie najlepsza jakość danych, zwłaszcza anomalii SAT (niewielka liczba stacji poza Europą i Stanami Zjednoczonymi). Nie ulega jednak wątpliwości, że globalne i hemisferyczne zmiany temperatury powietrza są wyraźnie i silnie powiązane ze zmianami temperatury powierzchni Morza Sargassowego i jego północnych obrzeży (delfty Golfstromu).

### Problem wpływu zmian koncentracji CO<sub>2</sub> w troposferze na kształtowanie zmienności anomalii SAT na półkuli północnej i SST na Morzu Sargassowym

Wykazane silne związki między zmiennością SST na Morzu Sargassowym a zmiennością anomalii SAT na półkuli północnej i jej poszczególnych strefach szerokościowych stawiają kwestię, w jakiej mierze odpowiedzialną za zmiany SST i SAT może być zmieniająca się koncentracja najważniejszego z wy-

mienianych gazów cieplarnianych, za który zwolennicy antropogenicznej genezy globalnego ocieplenia uważają CO<sub>2</sub>. Jest to o tyle istotne, że szereg prac (np. Mann, Jones 2003, Levitus i in. 2005, Mann, Emanuel 2006) interpretuje obserwowany w ostatnim pięćdziesięcioleciu wzrost SST na Atlantyku Północnym jako rezultat (skutek) działania efektu cieplarnianego, a wzrost temperatury powierzchni Atlantyku Północnego traktuje jako jeden z dowodów na działanie tego efektu.

Regresja jednej zmiennej, w której zmienną zależną (objaśnianą) są anomalie SAT półkuli północnej, a zmiennymi niezależnymi (objaśniającymi) kolejno średnia roczna SST Morza Sargassowego, koncentracja CO<sub>2</sub> w troposferze oraz numer kolejny roku szeregu (rok 1880 = 0, 1881 = 1, 1882 = 2, ..., 2004 = 125, 2007 = 128), wykazuje, że zmienność SST objaśnia 55%, zmienność koncentracji CO<sub>2</sub> – 69%, a szereg monotonicznie rosnących wartości kolejnych numerów lat – 66% wariacji SAT w badanym okresie. Taka sytuacja oznacza, że w największym stopniu wariację anomalii SAT na półkuli północnej objaśnia zmienność koncentracji CO<sub>2</sub>. Koncentracja CO<sub>2</sub> jest jednak bardzo silnie powiązana z czasem; korelacja między szeregiem koncentracji CO<sub>2</sub> a szeregiem numerów kolejnych lat jest równa 0,93. W rezultacie analiza regresji wykazuje, że wpływ zmian koncentracji CO<sub>2</sub> na zmienność globalnych anomalii SAT i anomalii SAT na półkuli północnej jest (w granicach błędów estymacji) niemal taki sam, jak wpływ czasu.



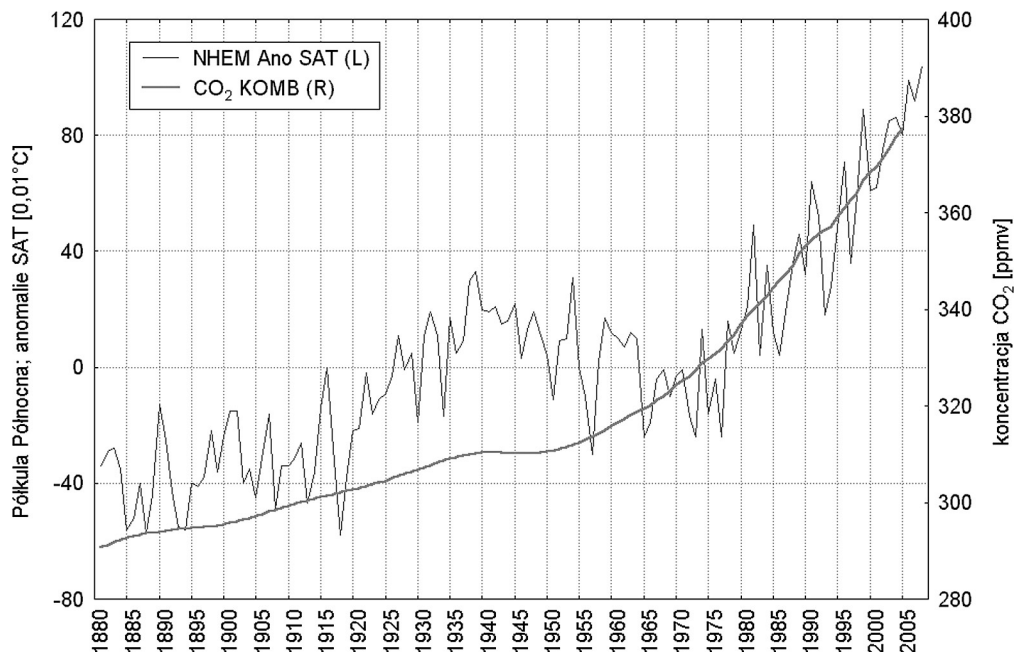
Nie ma większej różnicy (poza samymi parametrami równań), czy anomalie SAT estymuje się z koncentracji CO<sub>2</sub> w troposferze, czy też z numerów kolejnych lat, które są „czystym” trendem. Koncentracja CO<sub>2</sub> pełni tę samą rolę, co skala czasu. Tak istotne związki między SAT a koncentracją CO<sub>2</sub> stanowią efekt występowania silnych, jednoimiennych trendów w obu szeregach.

W szeregach SST na Morzu Sargassowym i anomalii SAT występuje silny trend dodatni, choć obie zmienne nie rosną monotonicznie; w poszczególnych okresach w obu przebiegach występują zgodne subtrendy o odmiennych znakach. W szeregu opisującym koncentrację CO<sub>2</sub> w troposferze również zaznacza się silny trend dodatni, ale wzrost jest niemal monotoniczny. Nie zaznacza się wzrost koncentracji CO<sub>2</sub> w okresie ocieplenia Arktyki (a co za tym idzie – i półkuli północnej) lat 30. XX w., choć w przebiegu tej wartości w latach 1940–1950 zauważalny jest pewien spadek tempa wzrostu. O względnie dobrej zgodności przebiegu koncentracji CO<sub>2</sub> i SAT można mówić dopiero od roku 1965 (patrz ryc. 7).

Jak wiadomo, występowanie trendów w szeregach czasowych może stanowić przyczynę nawet bardzo silnych korelacji między nimi. Może to być spowodowane działaniem tak zwanego „czynnika trzeciego”, sterującego zmiennością obu przebiegów i jednocześnie wymuszającego wystąpienie w nich trendów; w takim przypadku można mówić o związku przyczynowym. Występowanie trendów w

szeregach może być również dziełem przypadku, tak więc sam fakt silnego skorelowania dwu przebiegów, jak uczą podręczniki statystyki, nie przesądza o istnieniu między nimi jakichkolwiek związków przyczynowych. Dopiero wykazanie, że w szeregach będących wynikiem wymuszania i w szeregu reprezentującym czynnik wymuszający oprócz trendów występuje również liczący się ładunek zmienności wspólnej, pozwala traktować wartość współczynnika korelacji jako miarę realnych, nie tylko formalnych, związków między nimi i doszukiwać się istnienia również związków przyczynowych. Jeżeli między szeregami, prócz występowania w nich trendu, występuje zmienność wspólna, można ją wykryć bez większych problemów, przeprowadzając analizę korelacji i regresji w tych samych szeregach, w których z jednej lub obu grup (zmiennych zależnych lub/i zmiennych niezależnych) usunie się trendy liniowe.

Pozostaje więc do rozstrzygnięcia problem, czy związki między tymi wielkościami (anomaliami SAT, SST i koncentracją CO<sub>2</sub>) mają charakter związków rzeczywistych (przyczynowych) czy tylko formalnych. Z całą pewnością wzrost spalania paliw kopalnych będący przyczyną wzrostu koncentracji CO<sub>2</sub> w atmosferze nie stanowi skutków zmian SST na Morzu Sargassowym ani też wzrostu SAT, wzrost koncentracji CO<sub>2</sub> może natomiast być przyczyną wzrostu SST i wzrostu SAT. Tak więc zmiany koncentracji CO<sub>2</sub> mogą być czynnikiem wymuszającym zmiany SST i anomalii SAT. W takim przypadku w trzech wymie-



**Ryc. 7.** Przebieg rocznych anomalii temperatury powietrza na półkuli północnej (NHEM Ano SAT; dane wg NASA GISS Surface Temperature Analysis; Hansen i in. 1999, 2001) i koncentracji CO<sub>2</sub> w atmosferze (CO<sub>2</sub> KOMB; dane wg Carbon Dioxide Information Analysis Center – Oak Ridge National Laboratory)

**Fig. 7.** The course of annual anomalies in air temperatures in the Northern Hemisphere (NHEM Ano SAT; data from NASA GISS Surface Temperature Analysis; Hansen et al. 1999, 2001) CO<sub>2</sub> concentration in atmosphere (CO<sub>2</sub> KOMB; data from Carbon Dioxide Information Analysis Center – Oak Ridge National Laboratory)

nionych szeregach po usunięciu z nich trendu powinna występować istotna statystycznie zmienność wspólna. Z kolei zmiany stanu termicznego Morza Sargassowego (SST) mogą stanowić przyczynę zmian hemisferycznej czy globalnej temperatury powietrza (SAT), będąc czynnikiem wymuszającym, nie mogą natomiast być czynnikiem wymuszającym zmiany koncentracji CO<sub>2</sub>. W tym przypadku, po usunięciu trendów z szeregów, licząca się zmienność wspólna powinna wystąpić w szeregach SST i SAT, zaś nie powinno jej być w szeregu koncentracji CO<sub>2</sub>. Wreszcie, jeśli związki między anomaliami SAT, SST i koncentracją CO<sub>2</sub> są wyłącznie efektem występującego w tych szeregach trendu, po usunięciu z nich trendów istotnej statystycznie zmienności wspólnej w wymienionych szeregach być nie powinno.

Najpierw należało wyjaśnić, czy i w jaki sposób zmienne charakteryzujące SST na Morzu Sargassowym, w których występuje silny trend, są powiązane ze zmianami koncentracji CO<sub>2</sub> oraz z czasem. Z szeregów średniej rocznej SST całego Morza Sargassowego, średnich rocznych SST w gridach 26°N, 56°W i 42°N, 52°W (patrz tab. 4) oraz szeregu koncentracji CO<sub>2</sub> usunięto trendy liniowe. Rezultaty analizy związków między tymi szeregami zestawiono w tabeli 5.

Zawartość tabeli 5 wykazuje, że w przypadku usunięcia trendu z szeregów SST korelacje z szeregami koncentracji CO<sub>2</sub> i numerami lat stają się słabe i mimo dużej długości obu szeregów – nieistotne. W korelacjach między szeregami SST, z których usunięto trend, a szeregiem CO<sub>2</sub>, z którego usunięto trend, pojawia się przypadek korelacji istotnych (SST 26°N

56°W BT i CO<sub>2</sub> BT). Analiza wykresu rozrzutu wykazuje, że wzrost wartości współczynnika korelacji między tymi szeregami i przekroczenie przez niego progu istotności jest efektem wystąpienia kilku wartości odstających w końcowych odcinkach obu szeregów. Eliminacja tych 7 (na 125) przypadków powoduje, że korelacja przestaje być istotna. Między szeregami SST i koncentracji CO<sub>2</sub>, z których nie usunięto trendu (dolna część tabeli 5), korelacje są silne, istotne statystycznie, przy czym wartości współczynników korelacji między SST a koncentracją CO<sub>2</sub> oraz między SST a czasem są bardzo podobne. Oznacza to, że przyczyną występowania związków między SST na Morzu Sargassowym a koncentracją CO<sub>2</sub> jest występujący w obu szeregach silny trend dodatni, udział zmienności wspólnej poza trendem jest praktycznie zerowy.

Podobną analizę korelacji szeregów, z których usunięto trendy, przeprowadzono dla globalnych anomalii SAT oraz anomalii SAT półkuli północnej i jej stref szerokościowych z szeregami SST oraz szeregiem koncentracji CO<sub>2</sub> zawierającym trend i szeregiem numerów kolejnych lat. Rezultaty analizy są zestawione w tabeli 6.

W przypadku usunięcia trendu z szeregów anomalii SAT, tak jak można się było tego spodziewać, korelacje z zawierającymi trendy szeregami czasu (numery lat) i koncentracji CO<sub>2</sub> stały się nieistotne statystycznie. Związki między szeregami SAT bez trendów a szeregami anomalii SST, z których również usunięto trendy, choć wyraźnie osłabły, jednak w każdym przypadku pozostały statystycznie wysoce istotne. Oznacza to, że nawet po eliminacji trendów

**Tabela 5.** Korelacje liniowe między średnią roczną SST na całym Morzu Sargassowym (MSar) oraz rocznymi SST w gridach 26°N, 56°W oraz 42°N, 52°W a koncentracją CO<sub>2</sub> i numerem roku. Zmienne z rozszerzeniem BT – szeregi, z których usunięto trend liniowy. Wartości oznaczone pogrubionym drukiem – współczynniki korelacji istotne statystycznie (n = 125; okres analizy 1880–2004)

**Table 5.** Linear correlation between mean annual value of SST in the entire Sargasso Sea (MSar) and annual SST in grids 26°N, 56°W and 42°N, 52°W and concentration of CO<sub>2</sub> and the number of a year. Variables with BT extension – series where linear trend has been removed. Values marked in bold – correlation coefficients statistically significant (n = 125; analysed period 1880–2004)

	Zmienne		CO <sub>2</sub> BT	CO <sub>2</sub>	Nr roku
Bez trendu	SST; MSar BT	r	0,1179	0,0068	-0,0398
		p	0,190	0,940	0,660
	SST; 26°N, 56°W BT	r	<b>0,2699</b>	0,0540	-0,0496
		p	0,002	0,550	0,583
	SST; 42°N, 52°W BT	r	0,0831	-0,0168	-0,0513
		p	0,357	0,525	0,570
Z trendem	SST; MSar	r	0,1008	<b>0,5292</b>	<b>0,5299</b>
		p	0,263	0,000	0,000
	SST; 26°N, 56°W	r	<b>0,2085</b>	<b>0,6713</b>	<b>0,6399</b>
		p	0,020	0,000	0,000
	SST; 42°N, 52°W	r	0,0818	<b>0,2149</b>	<b>0,1988</b>
		p	0,364	0,016	0,026

**Tabela 6.** Korelacje między szeregami anomalii SAT: globalnymi, półkuli północnej i poszczególnych stref szerokościowych półkuli północnej, z których usunięto trendy liniowe, a szeregami rocznych wartości SST z Morza Sargassowego, z których usunięto trendy, oraz szeregami koncentracji CO<sub>2</sub>, w których pozostał trend, i numerami kolejnymi lat. Korelacje SAT i SST bez trendów 1880–2007 (128 lat), korelacje SAT z CO<sub>2</sub> 1880–2004 (125 lat). Istotne statystycznie współczynniki korelacji pogrubiono

**Table 6.** Correlation between series of anomalies SAT: global anomalies in the Northern Hemisphere and given latitudes of the Northern Hemisphere where linear trends have been removed and the series of annual values of SST in the Sargasso Sea where trends have been removed and series of CO<sub>2</sub> concentration with the trend and numbers of consecutive years. SAT and SST correlations without trends 1888–2007 (128 years), correlations SAT with CO<sub>2</sub> 1880–2004 (125 years). Values marked in bold – correlation coefficients statistically significant

Anomalie SAT bez trendów	SST MSar BT	SST 26°N, 56°W BT	SST 42°N, 52°W BT	CO <sub>2</sub>	Nr roku	
Globalne, BT	r	<b>0,5045</b>	<b>0,5383</b>	<b>0,3576</b>	0,1069	0,0010
	p	0,000	0,000	0,000	0,235	0,991
Półkula północna, BT	r	<b>0,6043</b>	<b>0,5215</b>	<b>0,4340</b>	0,0489	-0,0005
	p	0,000	0,000	0,000	0,588	0,996
Strefa 0–24°N, BT	r	<b>0,4513</b>	<b>0,5382</b>	<b>0,2775</b>	0,1057	-0,0001
	p	0,000	0,000	0,002	0,241	0,999
Strefa 24–44°N, BT	r	<b>0,4855</b>	<b>0,4378</b>	<b>0,3576</b>	0,0996	0,0033
	p	0,000	0,000	0,000	0,269	0,997
Strefa 44–64°N, BT	r	<b>0,4130</b>	<b>0,3348</b>	<b>0,3410</b>	0,0531	0,0005
	p	0,000	0,000	0,000	0,557	0,995
Strefa 64–90°N, BT	r	<b>0,5641</b>	<b>0,3150</b>	<b>0,4011</b>	-0,1180	0,0002
	p	0,000	0,000	0,000	0,190	0,998

w tych szeregach pozostaje znaczący ładunek zmienności wspólnej. Analiza różnic wartości  $r^2$  między związkami SAT z SST oraz SAT bez trendów z SST bez trendów pozwala stwierdzić, że zmienność SST niezwiązana z trendem objaśnia średnio 26,3% zmienności SAT, zmienność związana z występowaniem trendu w SST objaśnia około 21,9% zmienności SAT. Łącznie zmienność rocznej SST na całym Morzu Sargassowym objaśnia 48,8% wariacji globalnej SAT i 55,7% wariacji SAT na półkuli północnej. Występowanie względnie zgodnej zmienności w czasie anomalii SAT i SST na Morzu Sargassowym sugeruje, że omawiany związek jest związkiem rzeczywistym.

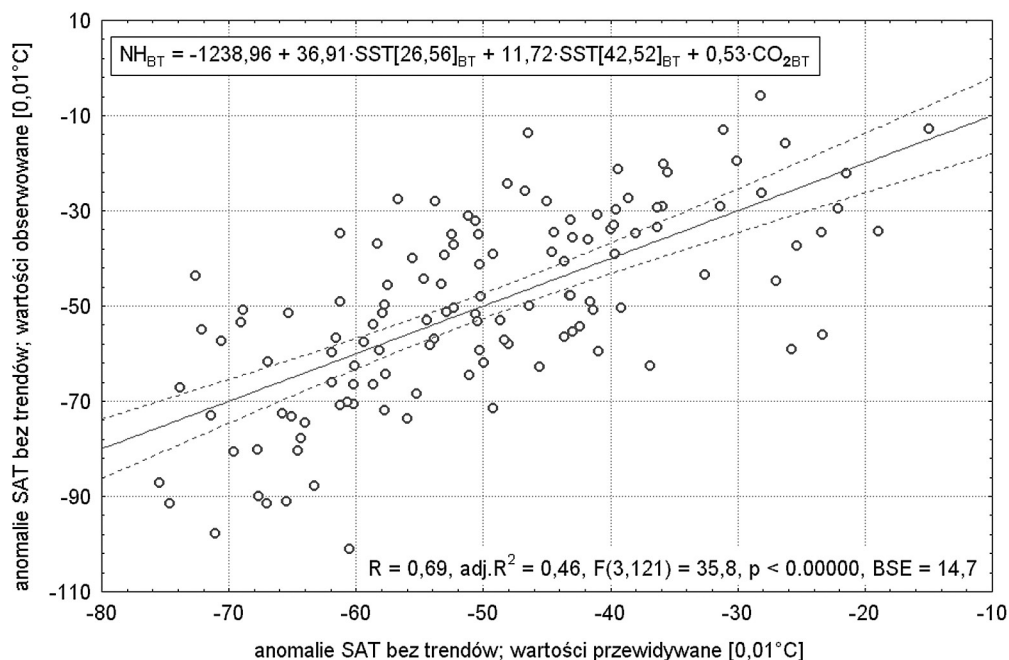
Analiza regresji wielokrotnej, w której zmienną zależną są globalne lub hemisferyczne anomalie SAT, a zmiennymi niezależnymi SST w gridach 26°N, 56°W i 42°N, 52°W oraz koncentracja CO<sub>2</sub>, wykazuje, że wymienione trzy zmienne niezależne objaśniają łącznie około 80% zmienności SAT. W największym stopniu zmienność anomalii SAT objaśnia w równaniu regresji wielokrotnej zmienność koncentracji CO<sub>2</sub>, bo aż około 70%, gdy zmienność SST zaledwie 11,5%. Jest to sytuacja diametralnie różna od analizy regresji, której wyniki przedstawiono w tabeli 4 (regresja względem 2 zmiennych niezależnych). Taka sama analiza regresji przeprowadzona w szeregach, z których wyeliminowano trendy (patrz ryc. 8), daje całkowicie inny obraz. SST w gridach 26°N, 56°W i 42°N, 52°W oraz koncentracja CO<sub>2</sub> (wszystkie zmienne bez trendów) objaśniają łącznie około 46–49% zmienności anoma-

lii SAT bez trendów, przy czym zmienność koncentracji CO<sub>2</sub> bez trendu objaśnia zaledwie niespełna 5% (4,7) wariacji SAT bez trendu.

Wyniki analizy regresji i analizy wariacji wnoszonej do zmienności SAT przez poszczególne zmienne pozwalają na stwierdzenie, że globalne i hemisferyczne anomalie SAT są realnie powiązane ze zmianami SST na Morzu Sargassowym, zarówno jeśli uwzględni się przebiegi rzeczywiste, jak i przebiegi, z których usunięto trendy (patrz ryc. 9). Brak jednak argumentów, aby uznać, że istniejące korelacje SST i SAT z koncentracją CO<sub>2</sub> odtwarzają występujące między tymi wielkościami inne związki niż wymuszone przez występujące w nich trendy (patrz ryc. 10). Potwierdza to analiza spektralna, wykazująca w szeregu koncentracji CO<sub>2</sub> występowanie jedynie jednej istotnej statystycznie okresowości równej długości ciągu (124 lata; artefakt statystyczny), gdy w szeregach SST i SAT występuje wspólna silna okresowość ~70-letnia oraz kilka wspólnych okresowości o większej częstotliwości i mniejszej amplitudzie (~21–25, ~7–9, ~5,3-letnie).

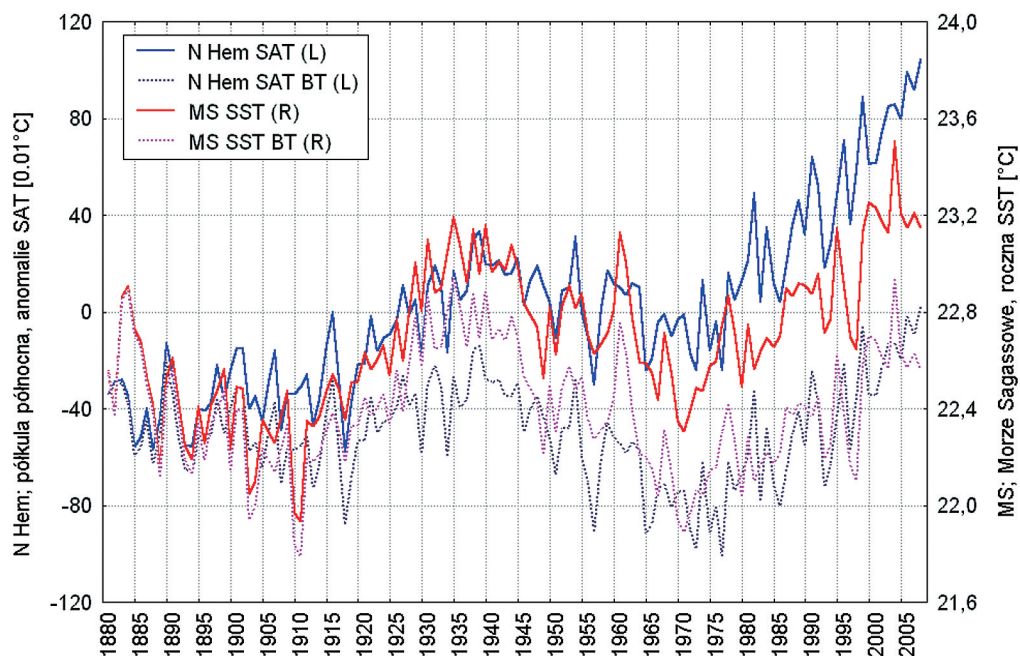
W kombinacji ze zmiennością SST na Morzu Sargassowym zmiany koncentracji CO<sub>2</sub> w atmosferze objaśniają w okresie 1880–2004 około 4–5% zmienności anomalii SAT na półkuli północnej, czyli nieco tylko powyżej poziomu szumów. Wymieniony stopień objaśnienia zmienności SAT wynika z silniejszych związków, jakie zaznaczają się między SAT a koncentracją CO<sub>2</sub> po roku 1965 (patrz ryc. 7). Rezultaty przeprowadzonej analizy wskazują, że brak jest





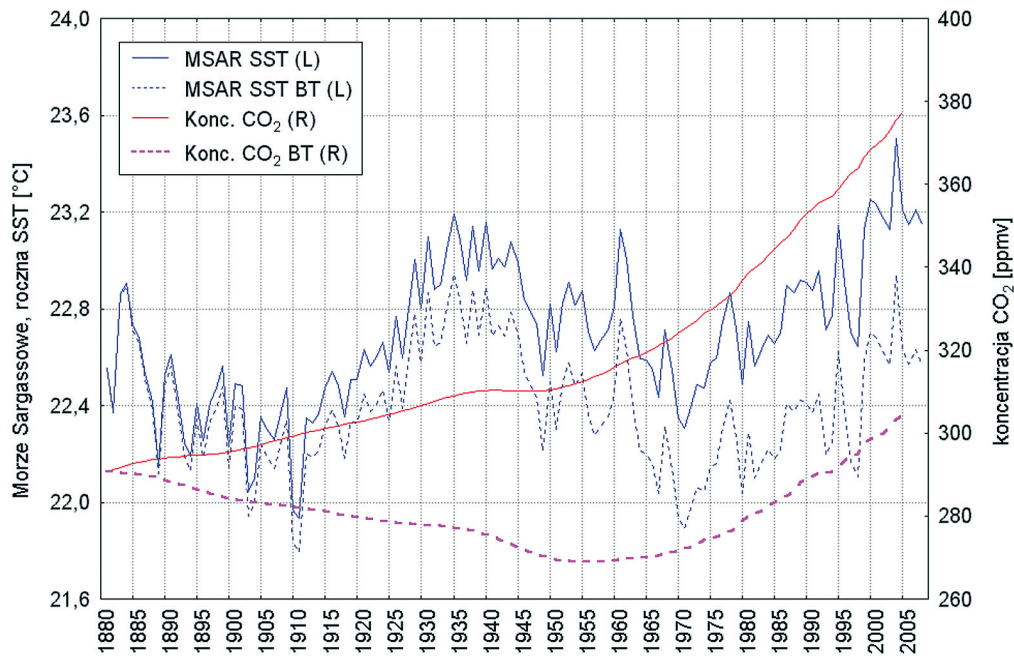
**Ryc. 8.** Wykres wartości anomalii SAT na półkuli północnej, obliczonych z szeregów zmiennych niezależnych, z których usunięto trendy liniowe ( $NH_{BT}$ ; równanie regresji wielokrotnej – patrz tab. 6), względem wartości anomalii SAT, z których szeregu wyeliminowano trend liniowy

**Fig. 8.** The course of values of SAT anomalies in the Northern Hemisphere calculated from the series of independent variables where linear trends have been removed ( $NH_{ST}$ ; multiple regression equation – see Table 6) with reference to SAT anomalies where linear trend has been removed



**Ryc. 9.** Przebieg rocznych anomalii temperatury powietrza na półkuli północnej (N Hem SAT) i średniej rocznej temperatury Morza Sargassowego (MS SST; akwen 25–39°N, 65–35°W) oraz tych samych wartości, z których usunięto trend liniowy (N Hem SAT BT i MS SST\_BT)

**Fig. 9.** The course of annual anomalies in air temperatures in the Northern Hemisphere (N Hem SAT) and mean annual temperature of the Sargasso Sea (MS SST; sea area 25°–39°N, 65°–35°W) and the same values where the linear trend has been removed (N Hem SAT\_BT and MS SST\_BT)



**Ryc. 10.** Przebieg średniej rocznej temperatury powierzchni Morza Sargassowego (MS SST; akwen 25–39°N, 65–35°W) oraz koncentracji CO<sub>2</sub> w troposferze (Konc. CO<sub>2</sub>) i tych samych wartości, z których usunięto trend liniowy (MS SST\_BT i Konc. CO<sub>2</sub>BT odpowiednio)

**Fig. 10.** The course of mean annual sea surface temperature of the Sargasso Sea (MS SST; sea area 25°–39°N, 65°–35°W) and CO<sub>2</sub> concentration in troposphere (Konc. CO<sub>2</sub>) and the same values where the linear trend has been removed (MS SST\_BT and Konc. CO<sub>2</sub>BT respectively)

podstaw do tego, aby uznać, że zmiany koncentracji CO<sub>2</sub> stanowią „czynnik trzeci”, sterujący zmianami SST na Morzu Sargassowym i hemisferycznymi zmianami SAT.

## Dyskusja i wnioski

Stwierdzenie występowania silnych związków między SST na Morzu Sargassowym a anomaliami SAT stawia kilka problemów – najważniejszym z nich jest zagadnienie, jaki sygnał niesie w sobie zmienność SST na tym akwenie?

W przebiegu SST na Morzu Sargassowym, jak już wspomniano, występuje silna okresowość około 70-letnia. Okresowość około 65-letnią w globalnym przebiegu temperatury powietrza wykryli Schlesinger i Ramankutty (1994), jej genezę wiążąc ze zmianami natężenia cyrkulacji termohalinowej. Podobnie Deser i Blackmon (1995) wyrazili opinię, że wzrost SST na Atlantyku Północnym, jaki obserwowano w latach 20. i 30. XX w. był związany ze wzrostem intensywności cyrkulacji termohalinowej. Do podobnych rezultatów prowadzą wyniki badań Delwortha i Manna (2000), którzy analizowali 330-letnią serię temperatury powietrza. W serii tej znaleziono wyraźną okresowość 70-letnią, którą następnie badacze ci odtworzyli w pracy modelu. Czynnikiem wymuszającym zmienność temperatury powietrza, jak wykazała analiza wyników modelowania, jest zmienność

południkowego transportu ciepła wraz z wodami na Atlantyku Północnym, prowadząca również do zmienności SST na Atlantyku, szczególnie silnej na północ od równika. Podstawowym czynnikiem wymuszającym długookresową zmienność MOC jest zmienność natężenia cyrkulacji termohalinowej. Dalsze badania Delwortha i Knutsona (2000) oraz Delwortha i Greatbatcha (2000) potwierdziły i uściśliły związki zmian SST na Atlantyku Północnym ze zmianami natężenia cyrkulacji termohalinowej, jednocześnie wykluczając możliwość, aby zmianami tymi sterowały zmiany atmosferyczne.

To, że zmiany SST w północno-zachodniej części Morza Sargassowego są powiązane ze zmianami natężenia konwekcji w wirze Morza Grenlandzkiego i na morzu Labrador, wykazały także wcześniejsze badania Dicksona i in. (1996). Natężenie procesów konwekcji (zapadania wód) na tych akwenach reguluje tempo cyrkulacji termohalinowej. Również Keigwin i Boyle (2000) zwracają uwagę, że długookresowe zmiany SST na Morzu Sargassowym w rejonie Bermudów stanowią rezultat zmian natężenia cyrkulacji termohalinowej. Wcześniejsze badania Keigwina (1996) nad składem izotopowym poszczególnych gatunków otwornic w profilu osadów dennych na Wyniesieniu Bermudów wykazują, że zmiany SST na Morzu Sargassowym są zgodne ze zmianami klimatycznymi zachodzącymi w skali basenu Atlantyku Północnego i skali hemisferycznej. Dobrze są tam zapisane w SST hemisferyczne zmiany temperatury po-

wietrza, w tym średniowieczny okres ciepły i mała epoka lodowa, przy czym SST w rejonie wyniesienia bermudów w średniowiecznym okresie ciepłym była wyższa niż współcześnie (w roku 1995).

Andronova i Schlesinger (2000) wykazali, że okresowość ~65–75-letnia stanowi przejaw wewnętrznej, deterministycznej zmienności systemu i nie jest wymuszona przez działanie czynników zewnętrznych. Tę długookresową zmienność SST Atlantyku Północnego określa się mianem AMO (Atlantic Multidecadal Oscillation; Kushnir 1994, Kerr 2000, Enfield i in. 2001, Gray i in. 2004, IPCC 2007). Mechanizmu prowadzącego do powstania tej multidekadowej oscylacji nie będzie się w tym miejscu omawiać. Literatura na ten temat jest dość obfita (np. Vellinga i Wu 2004), ostatnio wysoce wiarygodne wyjaśnienia funkcjonowania AMO, choć odmienne w szczegółach, przedstawione są w pracach Dima i Lohmanna (2007) oraz Hawkinsa i Suttona (2007).

AMO przez niektórych badaczy jest uważana za jeden z głównych długookresowych regulatorów zmian klimatu w skali globalnej (patrz Kerr 2000, 2005), a nie tylko w atlantyckich tropikach i atlantycko-europejskim sektorze cyrkulacyjnym, jak wykazano to wcześniej (np. Enfield i in. 2001, Sutton, Hodson 2005). Badania modelowe Knighta i in. (2005) wykazują zgodne ze znakiem wpływu AMO na temperaturę powietrza również w zachodniej części Ameryki Północnej i Azji Południowej. Podobnie zmienność AMO reguluje intensywność monsunu indyjskiego i opadów nad Sahelem (Zhang, Delworth 2006). Ostatnio Shuanglin i Bates (2007) dokumentują silny wpływ AMO na przebieg temperatury i opadów w północnych i wschodnich Chinach, wzrostowi indeksu AMO (wyższa SST) odpowiada tam wzrost temperatury powietrza.

Zmienność AMO charakteryzuje się za pomocą indeksu AMO, który nie ma znormalizowanej, ogólnie przyjętej postaci. Najogólniej, indeks AMO stanowi wartość odpowiednio zmodyfikowanej średniej rocznej anomalii SST z Atlantyku Północnego. Granice „Atlantyku Północnego”, dla których liczy się wartość anomalii, są odmiennie definiowane przez różnych badaczy (np. Dima, Lohmann 2007 oraz Sutton, Hodson 2005: 0–60°N, 75,0–7,5°W; Knight i in. 2005: 80°W – 0°, 0–80°N; IPCC: 30–65°N). Szereg anomalii jest następnie filtrowany, tak aby wytłumić zmienność międzyroczną i międzydekadową; różnice w stosowanych przez różnych badaczy filtrach są duże (np. Enfield i in. 2001 – 10-punktowa średnia krocząca; Dima, Lohmann 2007 – 25-punktowa średnia krocząca; Sutton, Hodson 2005 – 37 punktowy filtr Hendersona itd.). Co jest najistotniejsze – indeks AMO oblicza się z szeregow SST, z których wcześniej usunięto trend liniowy (np. Enfield i in. 2001, Knight i in. 2005, Sutton, Hodson 2005, Dima,

Lohmann 2007). Czyni się tak z tej przyczyny, aby AMO „nie maskowało antropogenicznych wpływów na klimat”, gdyż wahania północnoatlantyckiego SST z silnym dodatnim trendem w końcowym okresie XX w., nakładając się na antropogeniczny wzrost temperatury, „maskują go” (np. Enfield i in. 2001). Inne objaśnienie przyczyn usunięcia trendu w SST, z którego oblicza się indeks AMO<sup>13</sup>, jest takie, że „usunięcie trendu sprowadza AMO do jej czysto naturalnej postaci, pozostawiając w jej przebiegu wyłącznie składowe naturalne, wytrącając wpływ antropogeniczny na AMO” (Mann, Emanuel 2006). Nietrudno zauważyć, że objaśnienia te są niespójne – wcześniej trend AMO „maskuje” antropogeniczne ocieplenie, później ten sam trend AMO stanowi skutek efektu cieplarnianego. Nie zmienia to jednak faktu, że taka konstrukcja indeksu AMO jest obciążona apriorycznym założeniem, sprowadzającym się do tego, że AMO nie może (nie powinna?) wywierać wpływu na obserwowane w drugiej połowie XX w. ocieplenie. Założenie takie nie wydaje się ani uzasadnione, ani poprawne z logicznego punktu widzenia. Jego przyjęcie pociąga następnie za sobą, wobec zerowego długookresowego trendu indeksu AMO, „dowodne” wykazanie, że zmiany AMO nie wywierają wpływu na globalne ocieplenie, w którego przebiegu występuje silny trend dodatni. Według Manna i Emanuela (2006) zmiany AMO z tych samych przyczyn nie wywierają nawet wpływu na zmiany SST na tropikalnym Atlantyku Północnym (!). Pozwala to sprowadzić wszystkie „naturalne” oddziaływania na temperaturę powietrza do ulubionej przez klimatologów aktywności wulkanicznej, występowania aerozoli siarczanowych w atmosferze i oddziaływań solarnych, z całkowitym pominięciem wpływu zmian termiki powierzchni oceanu.

Objęcie SST na całej powierzchni Atlantyku Północnego uśrednieniem prowadzi do „zamazania” rzeczywistej amplitudy zmian SST. Nie na całej powierzchni Atlantyku odbywa się transport wód na północ, wzrost SST w przypadku wzmocnienia MOC powinien zaznaczyć się tylko na szlaku przepływu wód włączonych w ten transport. Znaczne powierzchnie, rzędu milionów kilometrów kwadratowych, w tym samym czasie ocieplają się, gdy na innych, podobnej wielkości, działają procesy prowadzące do spadku SST. Poprzez uśrednianie różnokierunkowych zmian SST tak zdefiniowany indeks AMO daje minimalną amplitudę wieloletnią, nieinformującą o rzeczywistej skali zmian. Silna filtracja dolnoprzepustowa dodatkowo prowadzi do zmniejszenia amplitudy (do ~0,4°C), a w przypadku stosowania w filtracji średnich kroczących – do przesuwania w czasie maksimów i minimów przebiegu w stosunku do ich rzeczywistego wystąpienia. Niemniej przebieg średniej rocznej SST na całym Morzu Sar-

<sup>13</sup> Patrz również definicja AMO w Wikipedii ([http://en.wikipedia.org/wiki/Atlantic\\_Multidecadal\\_Oscillation](http://en.wikipedia.org/wiki/Atlantic_Multidecadal_Oscillation)).



gassowym oraz szereg czasowy pierwszej składowej głównej (PC) pola SST na Morzu Sargassowym, bez usunięcia trendów i jakiegokolwiek filtracji, są w okresie 1880–1985 silnie i wysoce istotnie skorelowane z rekonstruowanym przez Graya i in. (2004) indeksem AMO ( $r = 0,69$ ,  $n = 106$ ,  $p < 0,001$ )<sup>14</sup>. Wysoka korelacja wynika ze zgodności składowych długookresowych w obu zbiorach. Gdyby w szeregu SST z Morza Sargassowego przeprowadzić filtrację dolnoprzepustową, wartość współczynnika korelacji znacząco by wzrosła.

Zgodność przebiegu rocznej SST całego Morza Sargassowego (oraz pierwszej PC pola SST Morza Sargassowego) z indeksem AMO wskazuje, że przebieg SST na tym akwenie odtwarza sygnał AMO, choć amplituda zmian SST jest dużo większa niż indeksów AMO, oraz w przebiegu SST występuje trend. Należy jednak pamiętać, że w indeksach AMO trend jest celowo wyeliminowany.

Gray i in. (2004), analizując ponad 400-letnią<sup>15</sup> zmienność AMO, stwierdzają, że zachowanie się jej niskoczęstotliwościowych składowych jest takie samo w okresie preindustrialnym jak obecnie. Oznacza to według tych badaczy, że wzrost zawartości gazów cieplarnianych w atmosferze nie wywiera jeszcze żadnego liczącego się wpływu na zmienność cyrkulacji termohalinowej Atlantyku Północnego. Pozwala to na stwierdzenie, że AMO, tak jak wykazały to liczne prace, stanowi przejaw działania procesów naturalnych i nie odtwarza, jak do tej pory, wzrostu koncentracji CO<sub>2</sub> w troposferze. Tę konkluzję odnieść należy również do zmienności SST na Morzu Sargassowym, będącej rezultatem działania AMO.

Przepływ ciepła z oceanu do atmosfery może w sprzyjających warunkach, przy dużych różnicach temperatury między wodą a powietrzem, osiągać gigantyczne rozmiary, przyczyniając się do szybkiego wzrostu temperatury powietrza. Przepływ ciepła z atmosfery do oceanu jest znikomo mały, niezależnie od wartości różnic temperatury powietrze–woda. Ocean nie może ogrzewać się od powietrza. Ta asymetria kierunków przepływu ciepła, związana z polaryzacją warstwy granicznej ocean–atmosfera, wskazuje jasno, że wzrost SST może pociągać za sobą wzrost temperatury powietrza, wzrost temperatury powietrza nie może pociągać za sobą wzrostu SST. Wzrost natężenia konwekcji na Morzu Grenlandzkim i na morzu Labrador, czyli wzrost intensywności cyrkulacji termohalinowej, jest spowodowany wzmocnionym wychładzaniem wód w strefie subarktycznej i arktycznej, pociągającym za sobą wzrost ich gęstości. Wychładzanie wód to nic innego jak

ogrzewanie powietrza przez ciepło pobrane z powierzchni wód.

W rzeczywistym przebiegu SST charakteryzującym AMO występują długookresowe trendy. Ich eliminacja wynikająca z takich czy innych apriorycznych założeń czyni, że bada się fikcję. Szeregi instrumentalnych pomiarów SST są stosunkowo krótkie, obejmują zaledwie dwa cykle (?) AMO. Między pierwszym minimum a drugim minimum obserwuje się wzrost SST. Może to oznaczać, że w rzeczywistym przebiegu AMO występują również okresowości, lub – co bardziej prawdopodobne – quasi-okresowości – znacznie dłuższe niż ~70 lat.

Mechanizm regulujący wpływ AMO na temperaturę powietrza w skali hemisferycznej można w najprostszy sposób, odnosząc to do zmian SST na Morzu Sargassowym, objaśnić następująco:

1. Wzrost SST na Morzu Sargassowym świadczy o wzmoczeniu intensywności cyrkulacji termohalinowej na Atlantyku Północnym. Oznacza to zwiększony przepływ wód na północ wraz z nim – wzmoczony transfer ciepła z wód Atlantyku Południowego i ogólnie – wzrost SST na Atlantyku na północ od równika.
2. Przesunięcie się strefy występowania najwyższych SST na Atlantyku bardziej na północ od równika niż przeciętnie wymusza odpowiednie przesunięcie się Międzyzwrotnikowej Strefy Zbieżności (MSZ), która lokuje się nad pasem najcieplejszych wód. MSZ sięga nad Atlantykiem dalej na północ i dłużej (w sensie odsetka czasu roku) znajduje się na półkuli północnej (Vellinga, Wu 2004, 2008). Jedno i drugie przyczynia się do wzrostu temperatury powietrza w strefie równikowej półkuli północnej. Zmiany średniej rocznej SST na całym Morzu Sargassowym (i 1 PC pola SST na tym akwenie) objaśniają 44,5% wariacji anomalii SAT w strefie między równikiem a 24°N w okresie 1880–2007. Zmiana rocznej SST o 1°C na Morzu Sargassowym pociąga za sobą zgodną ze znakiem zmian SST zmianę rocznych anomalii SAT w strefie 0–24°N o 0,67 ( $\pm 0,07$ )°C.
3. W rezultacie wzmoczonego transportu wód z półkuli południowej na północ rośnie temperatura wód w prądach: Gujańskim i Antylskim, wrażliwym również zasoby ciepła w wodach na Morzu Sargassowym, a tym samym i SST na tym akwenie. Wzrostowi entalpii na wymienionych prądach i Morzu Sargassowym towarzyszy zwiększony transfer ciepła do atmosfery, szczególnie z W, NW i N części Morza Sargassowego w okresie zimowym, co pociąga za sobą wzrost temperatury

<sup>14</sup> Zbiór: Gray S.T. i in. 2004. Atlantic Multidecadal Oscillation (AMO) Index Reconstruction. Źródło: IGBP PAGES/World Data Center for Paleoclimatology Data Contribution Series #2004-062. NOAA/NGDC Paleoclimatology Program, Boulder CO, USA. Zbiór indeksów AMO w tym zbiorze kończy się na roku 1985.

<sup>15</sup> Zrekonstruowaną na podstawie wyników analiz dendrochronologicznych w pierwszej części przebiegu i opierającą się na seriach pomiarowych w pozostałej.

powietrza w strefie zwrotnikowej i podzwrotnikowej oraz częściowo w strefie umiarkowanej. Zmiany SST na Morzu Sargassowym objaśniają 46,8% wariancji SAT w strefie 24–44°N. Zmiana rocznej SST o 1°C pociąga za sobą zgodną ze znakiem zmian SST zmianę rocznych anomalii SAT w strefie 24–44°N o 0,76 ( $\pm 0,07$ )°C.

4. W rezultacie wzrostu transportu wód w prądach: Antylskim i Gujańskim oraz wzrostu SST na Morzu Sargassowym w delcie Golfstromu dochodzi do kierowania wód tropikalnych o zwiększonej ilości ciepła do Prądu Północnoatlantyckiego.
5. W efekcie (pkt 4) następuje wzrost średniej rocznej SST na wschodniej części Atlantyku Północnego i Morzach Nordyckich; jest on szacowany przez Hawkinsa i Suttona (2007) na 0,3–0,5°C. Oznacza to zasadniczy wzrost zasobów ciepła w tych wodach. W okresie zimowym wody w rejonie funkcjonowania Prądu Północnoatlantyckiego i wody Mórz Nordyckich mogą oddać do atmosfery znacznie większe w stosunku do przeciętnych ilości ciepła, które przy wystąpieniu sprzyjających warunków cyrkulacyjnych zostaną przeniesione na wschód – nad NW Europę i północną Azję<sup>16</sup>. Zmiany SST na Morzu Sargassowym objaśniają 41% wariancji SAT w strefie 44–64°N (umiarkowanej), a zmiana SST na Morzu Sargassowym o 1°C pociąga za sobą zgodną ze znakiem zmiany SST zmianę anomalii SAT w strefie umiarkowanej o 1,03 ( $\pm 0,11$ )°C.
6. Dalsze przemieszczanie się wód atlantyckich, niosących zwiększone ilości ciepła na północ (prądy: Norweski, Zachodniospitsbergeński, Nordkapski) prowadzi do silnego wzrostu zasobów ciepła w wodach atlantyckiego sektora Arktyki, a następnie, z około 3–5-letnim opóźnieniem, prowadzi do wzrostu zasobów ciepła w Arktycznych Wodach Pośrednich<sup>17</sup>. Wzrost zasobów ciepła w wodach pozwala na dłuższą konwekcję w okresie zimowym, opóźnia tworzenie się lodów morskich, przez co strumienie ciepła z oceanu do atmosfery mogą być silniejsze i funkcjonować dłużej niż przy zmniejszonej entalpii wód. Prowadzi to do silnego wzrostu temperatury powietrza w okresie jesiennym i zimowym. Konsekwencją zmniejszenia się powierzchni lodów i opóźnienia w ich formowaniu jesienią i zimą jest silniejszy wiosenny wzrost temperatury powietrza. Szerzej mechanizm oddziaływania zwiększonego dopływu ciepłych wód atlantyckich do Arktyki i jego wpływ na

kształtowanie wzrostu temperatury powietrza w Arktyce omawiają Marsz i Styszyńska (2009). Bezpośrednie i pośrednie sterowanie procesami zmian temperatury powietrza w Arktyce przez zmienną ilość ciepła wnoszonego do Arktyki wraz z wodami atlantyckimi powoduje, że korelacje między zmianami SST na Morzu Sargassowym ( $r = 0,72$ ,  $n = 128$ ) i w delcie Golfstromu ( $r = 0,74$ ,  $n = 128$ ) a temperaturą powietrza w Arktyce są wyjątkowo silne; wyraźnie silniejsze niż z SAT w pozostałych strefach szerokościowych. Zmienność SST na Morzu Sargassowym objaśnia 51,8% wariancji anomalii SAT w Arktyce (strefa 64–90°N). Zmiana rocznej SST o 1°C na Morzu Sargassowym pociąga za sobą, zgodną ze znakiem zmian SST zmianę rocznych anomalii SAT w Arktyce aż o 1,89 ( $\pm 0,17$ )°C. Mimo niewielkiej w skali hemisferycznej powierzchni Arktyki duże międzyroczne i międzydekadowe zmiany temperatury w Arktyce wymuszane przez zmiany AMO (zapisane jako zmiany SST na Morzu Sargassowym) wywierają odpowiednio silny wpływ na zmiany anomalii SAT obliczanych dla całej półkuli.

Przedstawione wartości charakteryzujące rozmiar reakcji SAT w poszczególnych strefach szerokościowych półkuli północnej na zmiany SST na Morzu Sargassowym wskazują, że najsilniejsze zmiany temperatury wymuszane przez zmiany faz AMO zachodzą w wysokich szerokościach geograficznych – w Arktyce i w strefie umiarkowanej. Są to obszary, na których na półkuli północnej obserwuje się w ostatnich dwu dekadach najsilniejsze wzrosty temperatury powietrza. Jeśli zważyć, że obecnie AMO znajduje się w kulminacji dodatniej fazy (patrz ryc. 4), wyjaśnia to, bez uciekania się do tak zwanego „wzmocnienia arktycznego” (Arctic Amplification; patrz Serreze, Francis 2006), obserwowane obecnie bardzo silne wzrosty temperatury w Arktyce i relatywnie silne wzrosty temperatury w szerokościach umiarkowanych.

Od roku 1974–1978 AMO weszła w fazę wstępującą. Towarzyszy temu wzrost SST na Morzu Sargassowym, który osiągnął kulminację w okresie 2003–2004. Wartości SST w ostatniej dodatniej fazie AMO przekroczyły wartości SST, jakie wystąpiły w czasie kulminacji poprzedniej dodatniej fazy AMO, z którą było związane ocieplenie Arktyki lat 30. XX w. Uwzględniając 3–4-letnie opóźnienie, związane z dotarciem ciepłych wód atlantyckich do Arktyki, przedłuża to wzrost temperatury półkuli północnej do roku 2007–2008. Jeśli w przebiegu AMO rzeczy-

<sup>16</sup> Wzrost SST we wschodniej i środkowej części Atlantyku Północnego sprzyja przesunięciu się Antycyklonu Azorskiego na NE i jednocześnie prowadzi do słabego, ale istotnego statystycznie spadku ciśnienia nad rejonem konwekcji w Morzach Nordyckich (Hawkins, Sutton 2007), co zwiększa intensywność przenosu strefowego w atlantycko-europejskim sektorze cyrkulacyjnym. Wzrost rocznej SST w NW części Morza Sargassowego (~38°N, 60–52°W) prowadzi do spadku ciśnienia w Arktyce Atlantyckiej (rejon 75°N, 015°E), szczególnie silnego w okresie styczeń–marzec), co wymusza wzrost napływu cieplejszego powietrza z zachodu nad N Europę oraz nad NW i N Syberię (Marsz, Styszyńska 2007).

<sup>17</sup> Szereg temperatury Arktycznych Wód Pośrednich (Intermediate Atlantic Water in Arctic Ocean; Polyakov i in. 2004) wykazuje opóźnione (maks. 4 lata;  $r = 0,43$ ,  $p < 0,003$ ) istotne skorelowanie z pierwszym PC SST Morza Sargassowego.

wiście zaznacza się względnie stabilna okresowość około 70-letnia, można spodziewać się po roku 2008–2010 powolnego spadku temperatury na półkuli północnej. Dotychczasowy przebieg temperatury powietrza na półkuli północnej, a co za tym idzie – temperatury globalnej, dość wiernie odtwarza przebieg AMO. Z tego punktu widzenia nie jest niczym zaskakującym, że od początku lat 80. XX w. rozpoczęła się kolejna faza ocieplenia, a po roku 2000 wystąpiły najwyższe notowane w okresie obserwacji instrumentalnych średnie hemisferyczne i średnie globalne temperatury powietrza.

Jak już wspomniano wcześniej (patrz tab. 4), zmiany SST na Morzu Sargassowym, będące rezultatem działania AMO oraz procesów funkcjonujących w delcie Golfstromu, objaśniają 67% wariacji globalnych anomalii SAT i 69% wariacji anomalii SAT na półkuli północnej w okresie obserwacji instrumentalnych (1880–2007). Uwzględniając przyczyny obserwowanych zmian reżimu SAT, należy mieć na uwadze, że oprócz AMO, która wydaje się w kształtowaniu obserwowanego ocieplenia mieć znaczenie decydujące, działają jeszcze inne, mniej lub bardziej podobne naturalne procesy oceaniczno-atmosferyczne lub oceaniczne, również wywierające wpływ na kształt hemisferycznego i globalnego przebiegu temperatury powietrza. Są nimi na przykład ENSO i PDO (Pacific Decadal Oscillation). Z tej przyczyny objaśnienie zmian SAT przez zmiany SST na Morzu Sargassowym, choć o bardzo wysokim stopniu pewności, nie jest całkowite.

Multidekadowa Oscylacja Atlantyku oraz rozdział wód tropikalnych w delcie Golfstromu są rezultatem działania procesów naturalnych. W świetle powyższego można twierdzić, że obserwowane ocieplenie półkuli północnej i ocieplenie globalne jest przejawem działania procesów naturalnych, udział procesów antropogenicznych w obserwowanych zmianach klimatu jest, jak do tej pory, nieznaczny. Bez uwzględnienia procesów transmisji do atmosfery zgromadzonego wcześniej i przechowywanego w wodach oceanicznych ciepła, stanowiącego efekt akumulacji energii słonecznej, oszacowanie rzeczywistego udziału „czynnika antropogenicznego” w kształtowaniu obserwowanych zmian temperatury powietrza nie wydaje się możliwe.

## Literatura

- Andronova N.G., Schlesinger M.E. 2000. Causes of global temperature change during the 19th and 20th centuries. *Geophysical Research Letters*, 27: 2137–2140.
- Barnett T.P., Hasselmann K., Chelliah M., Delworth T., Hegerl G., Jones P., Rasmusson E., Roeckner E., Ropelewski C., Santer B., Tett S. 1999. Detection and Attribution of Recent Climate Change: A Status Report. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 80(12): 2631–2659.
- Bjerknes J. 1964. Atlantic Air-Sea Interactions. *Advances in Geophysics*, 10: 1–82.
- Bond G., Kromer B., Beer J., Muscheler R., Evans M.N., Showers W., Hoffmann S., Lotti-Bond R., Hajdas I., Bonani G. 2001. Persistent solar influence on North Atlantic climate during the Holocene. *Science*, 294(5549): 2130–2136.
- Bond G., Showers W., Cheseby M., Lotti R., Almasi P., deMenocal P., Priore P., Cullen H., Hajdas I., Bonani G. 1997. A Pervasive Millennial-Scale Cycle in North Atlantic Holocene and Glacial Climates. *Science*, 278(5341): 1257–1266.
- Delworth T.L., Greatbatch R.J. 2000. Multidecadal Thermohaline Circulation Variability Driven by Atmospheric Surface Flux Forcing. *Journal of Climate*, 13(9): 1481–1495.
- Delworth T.L., Knutson T.R. 2000. Simulation of Early 20th Century Global Warming. *Science*, 287(5461): 2246–2250.
- Delworth T.L., Mann M.E. 2000. Observed and simulated multidecadal variability in the Northern Hemisphere. *Climate Dynamics*, 16(9): 661–676.
- deMenocal P.B., Ortiz J., Guilderson T., Sarnthein M. 2000. Coherent High- and Low-Latitude Climate Variability During the Holocene Warm Period. *Science*, 288(5474): 2198–2202.
- Deser C., Blackmon M.L. 1995. Surface Climate Variations over the North Atlantic Ocean During Winter 1900–1989. W: *Natural Climate Variability on Decade-to-Century Time Scales*. National Academy Press, Washington, D.C.: 120–132.
- Dickson R., Lazier J., Meincke J., Rhines P., Swift J. 1996. Long-term co-ordinated changes in the convective activity of the North Atlantic. *Progress in Oceanography*, 38: 241–295.
- Dima M., Lohmann G. 2007. A Hemispheric Mechanism for the Atlantic Multidecadal Oscillation. *Journal of Climate*, 20(11): 2706–2719.
- Enfield D.B., Mestas-Nunez A.M., Trimble P.J. 2001. The Atlantic Multidecadal Oscillation and its Relation to Rainfall and River Flows in the Continental U.S. *Geophysical Research Letters*, 28(10): 2077–2080.
- Esper J., Cook E.R., Schweingruber F.H. 2002. Low-Frequency Signals in Long Tree-Ring Chronologies for Reconstructing Past Temperature Variability. *Science*, 295(5563): 2250–2253.
- Etheridge D.M., Steele L.P., Langenfelds R.L., Francey R.J., Barnola J.-M., Morgan V.I. 1996. Natural and anthropogenic changes in atmospheric CO<sub>2</sub> over the last 1000 years from air in Antarctic ice and firn. *Journal of Geophysical Research*, 101: 4115–4128.
- Etheridge D.M., Steele L.P., Langenfelds R.L., Francey R.J., Barnola J.-M., Morgan V.I. 1998.



- Historical CO<sub>2</sub> record from the Law Dome DE08, DE08-2, and DSS ice cores – (<http://cdiac.ornl.gov/ftp/trends/co2/lawdome.combined.dat>; 8.07.2011).
- Feddema J.J., Oleson K.W., Bonan G.B., Mearns L.O., Buja L.E., Meehl G.A., Washington W.M. 2005. The Importance of Land-Cover Change in Simulating Future Climates. *Science*, 310(5754): 1674–1678.
- Ganopolski A., Rahmstorf S. 2000. Rapid changes of glacial climate simulated in a coupled climate model. *Nature*, 409: 153–158.
- Gray S.T., Graumlich L.J., Betancourt J.L., Pederson G.T. 2004. A tree-ring based reconstruction of the Atlantic Multidecadal Oscillation since 1567 A.D. *Geophysical Research Letters*, 31: L12205, doi:10.1029/2004GL019932.
- Guiot J., Nicault A., Rathgeber C., Edouard J.L., Guibal F., Pichard G., Till C. 2005. Last-millennium summer-temperature variations in western Europe based on proxy data. *The Holocene*, 15(4): 489–500.
- Hale R.C., Gallo K.P., Owen T.W., Loveland T.R. 2006. Land use/land cover change effects on temperature trends at U.S. Climate Normals stations. *Geophysical Research Letters*, 33: L11703, doi:10.1029/2006GL026358.
- Hansen J., Nazarenko L., Ruedy R., Sato M., Willis J., Del Genio A., Koch D., Lacis A., Lo K., Menon S., Novakov T., Perlwitz J., Russel G., Schmidt G.A., Tausnev N. 2005. Earth's Energy Imbalance: Confirmation and Implications. *Science*, 308(5727): 1431–1435.
- Hansen J., Ruedy R., Glascoe J., Sato M. 1999. GISS analysis of surface temperature change. *Journal of Geophysical Research*, 104: 30997–31022, doi:10.1029/1999JD900835.
- Hansen J.E., Ruedy R., Sato M., Imhoff M., Lawrence W., Easterling D., Peterson T., Karl T. 2001. A closer look at United States and global surface temperature change. *Journal of Geophysical Research*, 106: 23947–23963, doi:10.1029/2001JD000354.
- Hawkins E., Sutton R. 2007. Variability of the Atlantic thermohaline circulation described by three-dimensional empirical orthogonal functions. *Climate Dynamics*, 29(9): 745–762.
- Hinkel K.M., Nelson F.E. 2007. Anthropogenic heat island at Barrow, Alaska, during winter: 2001–2005. *Journal of Geophysical Research*, 112: 10.1029/2006JD007837.
- Hinkel K.M., Nelson F.E., Klene A.E., Bell J.H. 2003. The urban heat island in winter at Barrow, Alaska. *International Journal of Climatology*, 23: 1889–1905.
- IPCC 2007. *Climate Change 2007. The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor, H.L. Miller (red.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom, New York, NY, USA.
- Jones P.D., Mann M.E. 2004. Climate Over Past Millennia. *Reviews of Geophysics*, 42(2): RG2002, doi:10.1029/2003RG000143.
- Keeling R.F., Piper S.C., Bollenbacher A.F., Walker S.J. 2009. Atmospheric CO<sub>2</sub> values (ppmv) derived from in situ air samples collected at Mauna Loa, Hawaii, USA (<http://cdiac.ornl.gov/ftp/trends/co2/maunaloa.co2>; 8.07.2011).
- Keigwin L.D. 1996. The Little Ice Age and Medieval Warm Period in the Sargasso Sea. *Science*, 274 (5292): 1504–1508.
- Keigwin L.D., Boyle E.A. 2000. Detecting Holocene changes in thermohaline circulation. *PNAS (Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America)*, 97(4): 1343–1346.
- Kerr R.A. 2000. A North Atlantic Climate Pacemaker for the Centuries. *Science*, 288(5473): 1984–1985.
- Kerr R.A. 2005. Atlantic Climate Pacemaker for Millennia Past, Decades Hence? *Science*, 309 (5731): 41–43.
- Knight J.R., Allan R.J., Folland C.K., Vellinga M., Mann W.E. 2005. A signature of persistent natural thermohaline circulation cycles in observed climate. *Geophysical Research Letters*, 32: L20708, doi:10.1029/2005GL024233.
- Kreutz K.J., Mayewski P.A., Meeker L.D., Twickler M.S., Whitlow S.I., Pittawala I.I. 1997. Bipolar Changes in Atmospheric Circulation During the Little Ice Age. *Science*, 227(5330): 1294–1296.
- Kushnir Y. 1994. Interdecadal variations in North Atlantic sea surface temperature and associated atmospheric conditions. *Journal of Climate*, 7(1): 141–157.
- Latif M., Roeckner E., Botzet M., Esch M., Haak H., Hagemann S., Jungclaus J., Legutke S., Marsland S., Mikolajewicz U., Mitchell J. 2004. Reconstructing, Monitoring, and Predicting Multidecadal-Scale Changes in the North Atlantic Thermohaline Circulation with Sea Surface Temperature. *Journal of Climate*, 17(7): 1605–1614.
- Levitus S., Antonov J., Boyer T. 2005. Warming of the world ocean, 1955–2003. *Geophysical Research Letters*, 32: L02604, doi:10.1029/2004GL021592.
- Ljungqvist F.C. 2010. A new reconstruction of temperature variability in the extra-tropical Northern Hemisphere during the last two millennia. *Geografiska Annaler, Series A, Physical Geography*, 92(3): 339–351.
- Loehle C. 2007. A 2000-year global temperature reconstruction based on non-treering proxies. *Energy & Environment*, 18(7+8): 1049–1058.

- Loehle C., McCulloch J.H. 2008. Correction to: A 2000-year global temperature reconstruction based on non-treering proxies. *Energy & Environment*, 19(1): 93–100.
- Mann M.E., Bradley R.S., Hughes M.K. 1998. Global-Scale Temperature Patterns and Climate Forcing Over the Past Six Centuries. *Nature*, 392: 779–787.
- Mann M.E., Bradley R.S., Hughes M.K. 1999. Northern Hemisphere Temperatures During the Past Millennium: Inferences, Uncertainties, and Limitations. *Geophysical Research Letters*, 26: 759–762.
- Mann M.E., Emanuel K.A. 2006. Atlantic Hurricane Trends Linked to Climate Change. *EOS*, 87(24): 233–244.
- Mann M.E., Jones P.D. 2003. Global surface temperatures over the past two millennia. *Geophysical Research Letters*, 30(15): 1820, doi:10.1029/2003GL017814.
- Mann M.E., Zhang Z., Hughes M.K., Bradley R.S., Miller S.K., Rutheford S., Ni F. 2008. Proxy-based reconstructions of hemispheric and global surface temperature variations over the past two millennia. *PNAS*, 105(36): 13252–13257.
- Marsz A.A., Styszyńska A. 2007. O „arktycznych” i „atlantyckich” mechanizmach sterujących zmiennością temperatury powietrza na obszarze Europy i północno-zachodniej Azji. *Problemy Klimatologii Polarnej*, 16: 47–89.
- Marsz A.A., Styszyńska A. 2009. Oceanic control of the warming processes in the Arctic – a different point of view for the reasons of changes in the Arctic climate. *Problemy Klimatologii Polarnej*, 19: 7–31.
- Moberg A., Sonechkin D.M., Holmgren K., Datsenko N.M., Karlén W. 2005. Highly variable Northern Hemisphere temperatures reconstructed from low- and high-resolution proxy data. *Nature*, 433(7026): 613–617.
- Morgan V.I., Wookey C.W., Li J., van Ommen T.D., Skinner W., Fitzpatrick M.F. 1997. Site information and initial results from deep ice drilling on Law Dome. *Journal of Glaciology*, 43: 3–10.
- Pielke R.A. 2005. Land Use and Climate Change. *Science*, 310(5754): 1625–1626.
- Pohlmann H., Sienz F., Latif M. 2006. Influence of the Multidecadal Atlantic Meridional Overturning Circulation Variability on European Climate. *Journal of Climate*, 19(23): 6062–6067.
- Polyakov I.V., Alekseev G.V., Timokhov L.A., Bhatt U., Colony R.L., Simmons H.L., Walsh D., Walsh J.E., Zakharov V.F. 2004. Variability of the intermediate Atlantic Water of the Arctic Ocean over the last 100 years. *Journal of Climate*, 17(23): 4485–4497.
- Rosby C.G. 1959. Current problems in meteorology. W: B. Bolin (red.), *The Atmosphere and the Sea in Motion*. Oxford University Press, New York: 9–50.
- Ruhlemann C., Mulitza S., Muller P.J., Wefer G., Zahn R. 1999. Warming of the tropical Atlantic Ocean and slowdown of thermohaline circulation during the last deglaciation. *Nature*, 402: 511–514.
- Schlesinger M.E., Ramankutty N. 1994. An oscillation in the global climate system of period 65–70 years. *Nature*, 367(6465): 723–726.
- Serreze M.C., Francis J.A. 2006. The Arctic Amplification Debate. *Climatic Change*, 76(3–4): 241–264.
- Shuanglin Li, Bates G.T. 2007. Influence of the Atlantic Multidecadal Oscillation on the winter climate of East China. *Advances in Atmospheric Sciences*, 24(1): 126–135.
- Smith T.M., Reynolds R.W. 2004. Improved Extended Reconstruction of SST (1854–1997). *Journal of Climate*, 17(12): 2466–2477.
- Sutton R.T., Hodson D.L. 2005. Atlantic Ocean Forcing of North American and European Summer Climate. *Science*, 309(5731): 115–118.
- Vellinga M., Wu P. 2004. Low-Latitude Freshwater Influence on Centennial Variability of the Atlantic Thermohaline Circulation. *Journal of Climate*, 17(23): 4498–4511.
- Vellinga M., Wu P. 2008. Relations between Northward Ocean and Atmosphere Energy Transports in a Coupled Climate Model. *Journal of Climate*, 21(3): 561–575.
- Zhang R., Delworth T.L. 2006. Impact of Atlantic multidecadal oscillations on India/Sahel rainfall and Atlantic hurricanes. *Geophysical Research Letters*, 33: L17712, doi:10.1029/2006GL026267.