

**ZMIANY TEMPERATURY POWIERZCHNI MORZA  
PRZY ZACHODNICH WYBRZEŻACH PÓŁWYSPU ANTARKTYCZNEGO  
(1900-2012)**

CHANGES IN SEA SURFACE TEMPERATURE  
AT THE WEST COAST OF THE ANTARCTIC PENINSULA (1900-2012)

Andrzej A. Marsz, Anna Styszyńska

Akademia Morska, Katedra Meteorologii i Oceanografii Nautycznej  
Sędzickiego 19, 82-374 Gdynia  
aamarsz@am.gdynia.pl, stysa@am.gdynia.pl

**Zarys treści.** Praca przedstawia wyniki analizy zmian temperatury powierzchni morza (SST) na akwenie rozciągającym się na NW od północnej części Półwyspu Antarktycznego w latach 1900-2012. Stwierdzono występowanie trzech okresów zmian SST. Pierwszy okres – w latach 1900-1932 – charakteryzował się względnie stabilnym zachowaniem SST (trend zerowy, niewielka zmienność międzyroczna, niska ( $\sim 0,3^{\circ}\text{C}$ ) średnia roczna SST. W drugim okresie – w latach 1932-2000 – nastąpił wzrost zmienności międzyrocznej SST i stopniowy, trójfazowy wzrost SST (trend  $+0,006(\pm 0,001)^{\circ}\text{C}\cdot\text{rok}^{-1}$ , sumaryczny wzrost rocznej SST o  $0,7$  deg do  $\sim +1^{\circ}\text{C}$ ). Najwyższą wartość średnią obszarową SST osiągnęła w roku 2000. Trzeci okres – w latach 2000-2012 – charakteryzował się gwałtownym spadkiem SST (trend  $-0,048(\pm 0,010)^{\circ}\text{C}\cdot\text{rok}^{-1}$ , spadek SST o  $\sim 1$  deg). Analiza trendów miesięcznych wykazuje, że zmiany SST stanowią rezultat adwekcji wód o odmiennych zasobach ciepła niesionych z zachodu przez Prąd Cirkumantarktyczny. Zmiany SST na badanym akwenie w ostatnim okresie nie są związane ze zmianami makroskalowej cyrkulacji atmosferycznej (SAM, Południowego Trybu Pierścieniowego, Oscylacji Antarktycznej). Opisane zmiany SST zachodzące w latach 2000-2012 mogą doprowadzić do zmiany trendu zmian temperatury powietrza na stacjach zachodniego wybrzeża Półwyspu Antarktycznego.

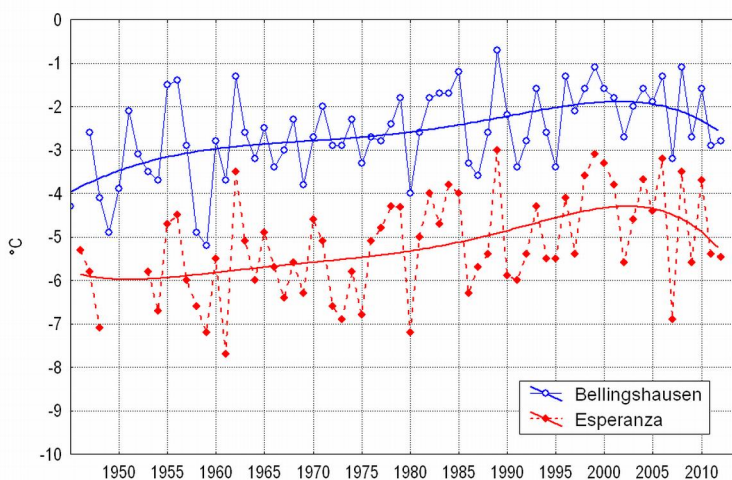
**Słowa kluczowe:** Półwysep Antarktyczny, zmiany SST, ochłodzenie, zmiany klimatu.

## 1. Sformułowanie zagadnienia

Przebieg wzrostu temperatury powietrza na stacjach leżących na zachodnich wybrzeżach Półwyspu Antarktycznego wykazuje w ostatnich kilkunastu latach załamanie. O ile w latach 1951-1999 trendy rocznej temperatury powietrza na stacjach zachodniego wybrzeża Półwyspu Antarktycznego (Bellingshausen, Esperanza, Faraday/Vernadsky, Rothera) i Orkadów Południowych (Orcadias) były dodatnie, a zachodnie wybrzeża Półwyspu Antarktycznego były uważane za obszary, na których ocieplenie zachodziło najszybciej w skali całej Antarktyki (King 1994, King i Harangozo 1998, Vaughan i in. 2003, Meredith i King 2005, Turner i in. 2005, Marshall i in. 2006, Clarke i in. 2007), to po latach 1999-2000 nastąpił wyraźny spadek rocznej temperatury powietrza na stacjach północnej części zachodniego wybrzeża Półwyspu Antarktycznego (Bellingshasen, Esperanza; ryc. 1) i na Orkadach,

a wzrosty temperatury powietrza na stacjach środkowej części Półwyspu Antarktycznego (Faraday/Vernadsky i Rothera) osłabły i są nieistotne statystycznie.

Relatywnie duże wzrosty temperatury powietrza na stacjach tego obszaru są w literaturze przedmiotu traktowane jako przejaw występowania na tym obszarze Antropogenicznego Globalnego Ocieplenia (Vaghan i in. 2003, Marshall i in. 2006, IPCC IV 2007 (część 15.6.3), Gillett i in. 2008), choć kwestia mechanizmów, które do tego prowadzą, zdaniem szeregu badaczy pozostaje jeszcze otwarta (patrz np. Vaghan i in. 2001, 2002, 2003, Arblaster i Meehl 2006). Wobec faktu, że koncentracja CO<sub>2</sub> w atmosferze rośnie nadal, a temperatura powietrza na stacjach zachodniego wybrzeża Półwyspu Antarktycznego w ostatnich latach spada lub praktycznie przestaje rosnać, Antropogenicznego Globalnego Ocieplenia jako przyczyny tego załamania wzrostu temperatury można w tym przypadku nie rozpatrywać.



Ryc. 1. Przebieg rocznej temperatury powietrza [°C] na stacjach Bellingshausen (Szetlandy Południowe) i Esperanza (Trinity Peninsula) w latach 1950-2012. Przebieg wieloletni – wyrównanie wielomianem 5 stopnia

Fig. 1. Course of annual air temperature [°C] at Bellingshausen (South Shetland Islands) and Esperanza (Trinity Peninsula) stations over the period from 1950 to 2012. Many year course of air temperature – smoothed with 5<sup>th</sup> degree polynomial.

Przyczyn zmian temperatury powietrza na zachodnim wybrzeżu Półwyspu Antarktycznego, zgodnie z powszechnie przyjmowanymi poglądami (King 1994, Styszyńska 2004, Marshall i in. 2006, Russell i McGregor 2010, Okumura i in. 2012) w pierwszym rzędzie należy doszukiwać się w działaniu dwu czynników – (1) zmianach cyrkulacji atmosferycznej i (2) zmianach temperatury powierzchni morza (dalej SST – Sea Surface Temperature). Zasoby ciepła w oceanie, charakteryzowane pośrednio przez SST, określają jaka ilość ciepła może zostać przekazana do atmosfery w procesach wymiany ciepła między oceanem a atmosferą. Tym samym zmiany SST wywierają bezpośredni wpływ na kształtowanie się zmian temperatury powietrza. Zmiany powierzchni lodów morskich, wymieniane często jako przyczyna zmian temperatury powietrza w Antarktyce (patrz np. Weatherly i in. 1991), są bezpośrednio powiązane ze zmianami SST a zmienność powierzchni pokrywy lodowej odtwarza, z rocznym-dwuletnim przesunięciem czasowym, zmiany SST.

Zasadnicze cechy cyrkulacji atmosferycznej w Antarktyce w syntetyczny sposób opisuje indeks SAM (Southern Annular Mode, Oscylacji Antarktycznej; patrz Thompson i Wallace 2000). Obie wersje tego wskaźnika – obliczanego z pola wysokości geopotencjału 850 hPa w strefie od 20 do 90°S (patrz Thompson i Wallace 2000, Thompson i Solomon 2002) i obliczanego z danych stacyjnych (patrz Marshall 2003, Visbeck 2009) są istotnie statystycznie dodatnio skorelowane z temperaturą powietrza na stacjach zachodniego wybrzeża Półwyspu Antarktycznego (Marshall i in. 2006, Marshall 2007). Przykładowo współczynniki korelacji indeksów SAM z roczną temperaturą powietrza na stacji Bellingshausen są równe odpowiednio +0,62 i +0,53 (1957-2010). Ponieważ w latach 1999/2000-2012 wartości rocznych indeksów SAM rosły nadal, można sądzić, że przyczyniła się do wzrostu temperatury powietrza na stacjach zachodniego wybrzeża Półwyspu Antarktycznego należy doszukiwać się w zmianach stanu termicznego akwenów znajdujących się w bliskości i/lub przylegających do tego wybrzeża.

Taki wniosek wskazuje, że celowym jest podjęcie bardziej szczegółowej analizy zachowania się SST na wodach tej części Oceanu Południowego, które mogą wywierać wpływ na zmiany temperatury powietrza. Celem pracy jest przedstawienie wyników analiz zmienności SST na akwenach Oceanu Południowego rozpościerających się na W i NW od zachodnich wybrzeży Półwyspu Antarktycznego. Badaniem objęto okres 1900-2012, tak, aby ostatecznie zachodzące zmiany SST móc ocenić z dłuższej perspektywy czasowej. Główną uwagę postanowiono skupić na zmianach rocznych wartości SST, analizę trendów miesięcznych SST ograniczono do drugiej połowy tego okresu (1951-2000) i do okresu, w którym nastąpiło załamanie wzrostu temperatury powietrza (2000-2012). Samymi związkami między zmiennością SST i zmianami temperatury powietrza na stacjach zachodniego wybrzeża Półwyspu Antarktycznego w tej pracy nie zajmowano się.

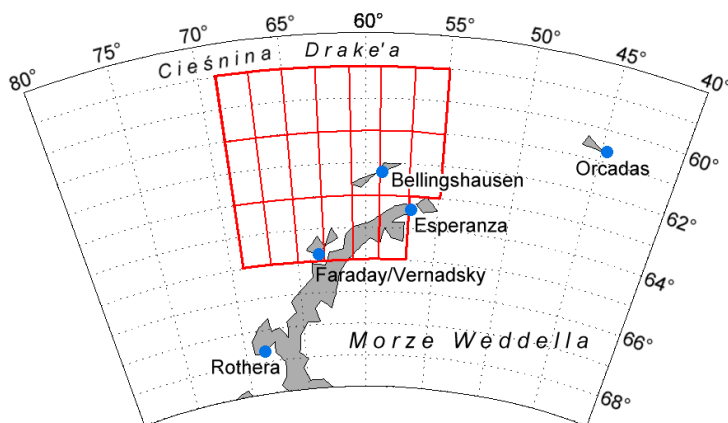
## **2. Obszar badań, materiały wyjściowe i metody analizy**

Analiza związków między roczną temperaturą powietrza na stacji Bellingshausen i rocznymi składowymi strefową i merydionalną wiatru geostroficznego na poziomach 1000, 925, 850 i 750 hPa wykazuje, że powietrze napływające nad stację leżące na zachodnich wybrzeżach Półwyspu Antarktycznego, przynoszące ciepło adwekcyjne pobrane z powierzchni morza, napływa z sektorów od W do NE. Napływy powietrza z sektorów od E do SW przyczyniają się do występowania spadków temperatury powietrza. Wyjaśnia to, że zasadnicze znaczenie dla kształtowania zmian temperatury powietrza na stacjach leżących na zachodnich i północno-zachodnich wybrzeżach Półwyspu Antarktycznego ma stan termiczny akwenów rozpościerających się na W i N od Półwyspu.

Morze Weddella, leżące po wschodniej stronie Półwyspu Antarktycznego, przez większą część roku pokryte jest zwartą pokrywą lodową. W okresie antarktycznego lata, koncentracja lodów na Morzu Weddella w niektórych latach może się wydatnie zmniejszać i ujawniają się wtedy nawet duże połacie wody wolnej od lodów, ale zmienność SST na takich akwenach jest minimalna – temperatura powierzchni morza oscyluje nieco powyżej punktu zamarzania (-1,79°C). Analiza wariancji wykazuje, że nie pozwala to traktować minimalnych zmian SST na tych akwenach jako przyczyny zmian temperatury powietrza na stacjach.

Z tego względu analizie zmian SST poddano akwen rozpościerający się na NW od północnych krańców Półwyspu Antarktycznego. Jego granice wyznaczają punkty krańcowe, których współrzędne geograficzne są następujące: 59°S, 69°W – 59°S, 55°W; 59°S, 55°W – 63°S, 55°W; 63°S, 57°W –

65°S, 57°W; 65°S, 57°W – 65°S, 69°W; 65°S, 69°W – 59°S, 69°W. Zarys granic powierzchni poddanych analizie przedstawia ryc. 2. Powierzchnia badanego obszaru w tak wyznaczonych granicach, mierzona jako płaska, wynosi niespełna 0,5 mln km<sup>2</sup> (około 465 000 km<sup>2</sup>). Powierzchnie lądowe (Półwysep Antarktyczny i przylegające do niego wyspy; patrz ryc. 2) stanowią nieznaczny odsetek całości rozpatrywanego obszaru.



Ryc. 2. Położenie akwenu, na którym analizowano zmiany SST zachodzące w latach 1900-2012. Siatka wewnątrz konturu wyznacza granice powierzchni („gridów”), dla których w zbiorze ERSST v.3b podane są szeregi czasowe wartości miesięcznych SST

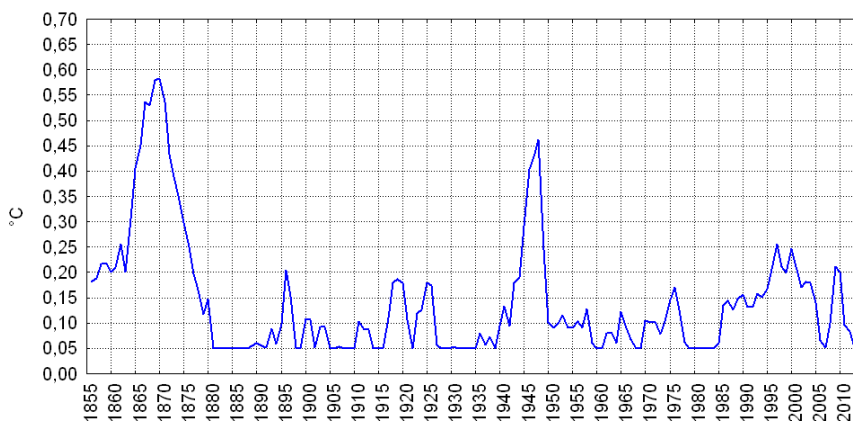
Fig. 2. Location of the sea area where SST changes occurring during 1900-2012 were analyzed. Grid inside the contour marks the limits of the area ("grids") for which the time series of monthly SST are given in the set ERSST v.3b.

Podstawowymi danymi charakteryzującymi miesięczne wartości SST na omawianych akwenach jest zbiór ERSST v.3b (Smith i in. 2008). Zbiór ten ma organizację gridową, zawiera średnie miesięczne wartości SST z powierzchni 2 x 2°, dodatkowo wartości miesięcznych anomalii SST obliczanych względem średnich z lat 1971-2000 (Xue i in. 2003) oraz błędu standardowego estymacji wartości miesięcznej SST w danym gridzie. Zbiór rozpoczyna się od stycznia 1854 roku, jednak ze względu na błędy, jakimi obarczone są miesięczne wartości SST na wodach wokółantarktycznych (patrz ryc. 3), w niniejszej pracy wykorzystano jako dane szeregi SST od roku 1900. Dane źródłowe i metody opracowania zbioru ERSST w wersji 3b, w tym drogę uzupełniania brakujących danych, rodzaje i zasady stosowanych filtracji, omawia szczegółowo praca Smitha i in. (2008).

Szeregi miesięcznych wartości SST w poszczególnych gridach wchodzących w skład analizowanego akwenu (granice gridów oznaczone są dodatkowo na ryc. 2) są ze sobą bardzo silnie ( $r$  od 0,97 do 0,86) i wysoce istotnie ( $p \ll 0,0001$ ) skorelowane. Wskazuje to, że zmiany SST zachodziły jednocześnie lub niemal jednocześnie na całym badanym akwenie.

Wartości rocznych szeregów SST z rozpatrywanych 20 gridów, na powierzchni których badano zmienność SST w latach 1900-2012 poddano analizie składowych głównych (PC). Analiza wyodrębniła tylko jeden czynnik, którego wartość własna jest większa od 1,0. Czynnik ten objaśnia w tym zbiorze gridów 92,58% wariancji rocznej SST. Szereg czasowy wartości czynnikowych pierwszej składowej głównej (1 EOF) pod względem zasobu zmienności jest praktycznie tożsamy z „obszarową” (20 gridów) średnią arytmetyczną z rocznych wartości SST ( $r = 1,00$ ). W zdecydowanej większości przypadków

niemal taka sama sytuacja występuje przy próbie wyznaczenia czynników głównych ze zbioru miesięcznych wartości SST. Wskazuje to, że równoprawnie można, zamiast składowych głównych, do analizy stosować zwykle „obszarowe” średnie arytmetyczne SST z roku kalendarzowego (dalej akronim SST<sub>20Rk</sub>) i kolejnych miesięcy, które w pełni charakteryzują zachodzące zmiany stanu termicznego badanego akwenu.



Ryc. 3. Rozkład w funkcji czasu wartości błędu standardowego estymacji średniej rocznej temperatury powierzchni morza (SST; °C) na badanym akwenu (1855-2012). Wartości obliczone z danych zbioru Estimated error standard deviation of analyzed\_ersst from NOAA NCDC ERSST version3b: ERSST.v3b: Extended Reconstructed Sea Surface Temperature Dataset, Version 3b

Fig. 3. Distribution as a function of time of standard error of estimation of the average annual sea surface temperature (SST; °C) in the analyzed sea area (1855-2012). Values calculated from data collection Estimated error standard deviation of analyzed\_ersst from NOAA NCDC ERSST version 3b: ERSST.v3b: Extended Reconstructed Sea Surface Temperature Dataset, Version 3b.

Obliczone „obszarowe” roczne wartości SST są z kolei silnie skorelowane z SST na obszarze Morza Bellingshausena oraz południowej i środkowej części Cieśniny Drake’a, przy czym, co oczywiste, siła związków maleje wraz ze wzrostem odległości od badanego akwenu. Wyjaśnia to, że zmiany rocznych SST na badanym akwenu charakteryzują zmiany zachodzące na znacznie większych akwenach Oceanu Południowego leżących na W od Półwyspu Antarktycznego.

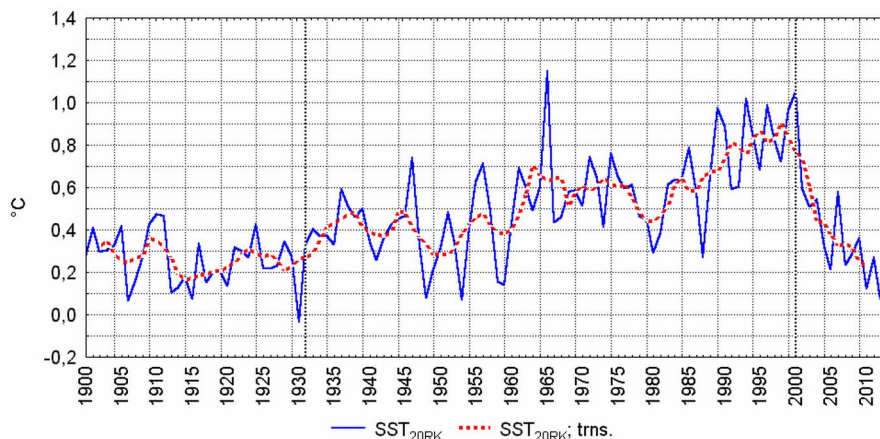
Do analiz wykorzystywano surowe wartości miesięcznych i rocznych SST, nie zaś anomalii SST. Ponieważ w literaturze wykorzystuje się anomalie SST obliczane względem średnich z różnych okresów (patrz Xue i in., 2003), przyjęcie surowych wartości SST pozwala uniknąć rozbieżności przy porównywaniu uzyskanych wyników. W analizie wykorzystano powszechnie znane metody statystyczne – analizę korelacji liniowych, regresję liniową i analizę wariancji.

### 3. Wyniki

W 113.letnim (1900-2012) przebiegu średniej rocznej „obszarowej” SST na rozpatrywanym akwenu można wyróżnić trzy fazy zmian temperatury powierzchni morza (patrz ryc. 4):

1. Okres między rokiem 1900 a 1932, w którym trend SST<sub>20Rk</sub> na rozpatrywanym akwenu jest zerowy. Jego precyzyjnie oszacowana wartość to  $+0,000\ 144(\pm 0,000\ 148)^{\circ}\text{C}\cdot\text{rok}^{-1}$ , a istotność statystyczna

żadna ( $p = 0,9227$ ). Od przełomu XIX i XX wieku do początku lat 30.XX wieku zmienność  $SST_{20RK}$ , mimo występowania niezbyt dużych zmian międzyrocznych (0,1-0,4 deg), nie wykazywała żadnych konsekwentnych zmian długookresowych, a sama średnia roczna SST utrzymywała się na stosunkowo niskim poziomie – przeciętnie  $+0,26^{\circ}\text{C}$  ( $\sigma_n = 0,12$ ).



Ryc. 4. Przebieg wartości  $SST_{20RK}$  (średnia arytmetyczna z rocznych wartości w 20 gridach; patrz ryc. 2).  
Przebieg uśredniony – wyrównanie 5 punktową średnią konsekutywną

Fig. 4. Course of  $SST_{20RK}$  of (arithmetic average of the annual values in 20 grids, see Fig. 2).  
Course of averaged – smoothed by five-point consecutive average.

2. Okres między rokiem 1932 a 2000, w którym nastąpił wyraźny wzrost  $SST_{20RK}$ . Trend  $SST_{20RK}$  w tym okresie jest dodatni, jego estymowana wartość to  $+0,006(\pm 0,001)^{\circ}\text{C}\cdot\text{rok}^{-1}$ , a istotność statystyczna tego oszacowania jest bardzo wysoka ( $p \ll 0,001$ ). W tym, niespełna 70-letnim, okresie roczna SST wzrosła o około 0,7 deg, z  $\sim -0,3$  do  $\sim 1,0^{\circ}\text{C}$ . Bardziej szczegółowy ogląd przebiegu zmian  $SST_{20RK}$  (patrz ryc. 4) pozwala zauważyć, że wzrostowi SST w tym okresie towarzyszy znaczne zwiększenie zmienności międzyrocznej, a sam wzrost rocznej SST nie zachodził jednostajnie lecz następował skokowo, w trzech podfazach:

- pierwszy skokowy wzrost  $SST_{20RK}$  nastąpił w pierwszych latach 30.XX wieku, po czym SST, wykazując znaczne zmiany międzyroczne ( $\sim 0,3$ - $0,6$  deg) utrzymywała się na przeciętnym poziomie  $+0,41^{\circ}\text{C}$  ( $\sigma_n = 0,17$ ) do pierwszych lat 60.XX wieku ( $\sim 1962$ ),
- drugi skokowy wzrost  $SST_{20RK}$  nastąpił między rokiem 1962 a 1965, w którym przeciętna wartość  $SST_{20RK}$  wzrosła do  $+0,58^{\circ}\text{C}$  ( $\sigma_n = 0,17$ ) i trwała w przybliżeniu do 1985 roku. W tym podokresie minimalne wartości rocznej SST były konsekwentnie wyższe o około 0,2 deg od minimów lokalnych w poprzednim podokresie,
- trzeci, ostatni, wzrost  $SST_{20RK}$  nastąpił między rokiem 1986 a 1989 i utrzymywał się do roku 2000. Średnia roczna SST wzrosła w tym okresie do  $+0,78^{\circ}\text{C}$  ( $\sigma_n = 0,21$ ), czyli podniosła się o kolejne 0,2 deg w stosunku do poprzedniego podokresu. W ostatnim 10-leciu tego podokresu  $SST_{20RK}$  wyraźnie wzrosła, kolejne lokalne maksima przebiegu zbliżają się do wartości  $+1,0^{\circ}\text{C}$ , a w latach 1993 i 2000 nieznacznie przekraczają tę wartość ( $+1,03$  i  $+1,05^{\circ}\text{C}$  odpowiednio), gdy lokalne minima przebiegu  $SST_{20RK}$  nie spadają poniżej  $+0,6^{\circ}\text{C}$ .

3. W 2000 roku, po osiągnięciu przez SST<sub>20Rk</sub> maksymalnej wartości w całym analizowanym okresie, rozpoczyna się gwałtowny spadek wartości SST<sub>20Rk</sub>. Zmiana następuje nagle – między rokiem 2000 a 2001 SST<sub>20Rk</sub> obniża się o 0,45 deg, w następnym roku o dalsze 0,09 deg, przekraczając tym samym spadek o 0,5 deg w ciągu dwóch lat (2001 i 2002). Spadek SST<sub>20Rk</sub> jest niejednostajny, ale konsekwentny i trwa do chwili obecnej<sup>1</sup>. Kolejne lokalne minima przebiegu SST osiągają coraz to niższe wartości. Wartość trendu SST<sub>20Rk</sub> w latach 2000-2012 jest równa  $-0,048(\pm 0,010)^{\circ}\text{C}\cdot\text{rok}^{-1}$ , a sam trend jest wysoce istotny statystycznie ( $p < 0,002$ , patrz tab. 1) i objaśnia około 60% wariacji SST<sub>20Rk</sub> w latach 2000-2012. W ciągu tego okresu SST<sub>20Rk</sub> obniżyła się z wartości +1,05 do +0,08°C, czyli niemal o 1 deg, zbliżając się do najniższych wartości z całego rozpatrywanego okresu (1930; -0,03, 1948; +0,08°C i 1953; +0,07°C). Spadek SST<sub>20Rk</sub> w latach 2000-2012 jest o rząd wielkości szybszy, niż poprzedzający go w latach 1932-2000 wzrost SST<sub>20Rk</sub>.

Tabela 1. Wartości trendów miesięcznej i rocznej SST ( $^{\circ}\text{C}\cdot\text{rok}^{-1}$ ) na badanym akwenu w latach 1951-2000 i 2000-2012

Table 1. The values of monthly and annual trends in SST ( $^{\circ}\text{C}\cdot\text{year}^{-1}$ ) in the analyzed sea area in the years 1951-2000 and 2000-2012.

Miesiąc Month	1951-2000		2000-2012	
	Wartość trendu i BSE Trend value and SSE	p	Wartość trendu i BSE Trend value and SSE	p
I	+0,009( $\pm 0,003$ )	0,0060	-0,049( $\pm 0,012$ )	0,0013
II	+0,010( $\pm 0,003$ )	0,0033	-0,049( $\pm 0,014$ )	0,0047
III	+0,012( $\pm 0,003$ )	0,0006	-0,053( $\pm 0,021$ )	0,0296
IV	+0,012( $\pm 0,003$ )	0,0007	-0,060( $\pm 0,022$ )	0,0202
V	+0,010( $\pm 0,003$ )	0,0011	-0,042( $\pm 0,018$ )	0,0443
VI	+0,008( $\pm 0,003$ )	0,0030	-0,037( $\pm 0,016$ )	0,0383
VII	+0,006( $\pm 0,003$ )	0,0292	-0,054( $\pm 0,018$ )	0,0120
VIII	+0,009( $\pm 0,003$ )	0,0041	-0,083( $\pm 0,021$ )	0,0022
IX	+0,008( $\pm 0,003$ )	0,0133	-0,079( $\pm 0,013$ )	0,0001
X	+0,007( $\pm 0,003$ )	0,0142	-0,051( $\pm 0,013$ )	0,0022
XI	+0,010( $\pm 0,002$ )	0,0001	-0,043( $\pm 0,013$ )	0,0062
XII	+0,007( $\pm 0,003$ )	0,0124	-0,035( $\pm 0,010$ )	0,0003
Rok – Year	+0,009( $\pm 0,002$ )	0,0001	-0,053( $\pm 0,012$ )	0,0012

BSE – błąd standardowy estymacji, SSE – standard error of estimation  
p – poziom istotności trendu – significance level of trend

Oszacowane trendy miesięczne w dwu okresach – wzrostu SST na tym akwenu (lata 1951-2000) i spadku SST na tym akwenu (lata 2000-2012) – zestawione są w tabeli 1. W okresie wzrostu SST<sub>20Rk</sub> dodatnie trendy, wszystkie istotne statystycznie, występują we wszystkich miesiącach roku. Nasilniejsze trendy ( $+0,012^{\circ}\text{C}\cdot\text{rok}^{-1}$ ) występują w okresie przełomu antarktycznego oceanicznego lata i antarktycznej jesieni – w marcu i kwietniu. Wskazuje to, że mimo sezonowego spadku dopływu radiacji do powierzchni morza SST nadal wzrastała. Również, mimo pewnego obniżenia wartości w stosunku do innych miesięcy, trendy najchłodniejszych miesięcy – lipca, sierpnia i września, są stosunkowo wysokie. Ich wartości nie różnią się, w sensie istotności statystycznej ich oszacowania,

<sup>1</sup> Czyli do początku marca 2013 roku, momentu w którym pisze się ten artykuł.

od trendów z okresu antarktycznego lata – stycznia i lutego (patrz tab.1). Oznacza to, że silny wzrost poboru ciepła z powierzchni morza, jaki następuje w okresie antarktycznej zimy, powodowany przez wzrost różnicy temperatury między powierzchnią wody i powietrzem oraz wzrost prędkości wiatru, przy jednoczesnym bardzo silnym ograniczeniu dopływu radiacji do powierzchni morza, nie był w stanie doprowadzić do obniżki SST. W okresie zimowym SST nadal wzrastała.

Wyjaśnia to, że zasoby ciepła w wodach rozpatrywanego akwenu rosły, przewyższając różnicę między dopływem energii promienistej do powierzchni morza i stratami ciepła na wymianę z atmosferą. Taki wzrost zasobów ciepła może mieć na tym akwenu jedynie adwekcyjną genezę. Na rozpatrywany akwen w latach 1932-2000 napływały wody o rosnących w funkcji czasu zasobach ciepła. Mając na względzie charakter cyrkulacji oceanicznej na tym akwenu, można wiązać ten wzrost zasobów ciepła w wodach z działaniem Prądu Cirkumantarktycznego (Antarctic Circumpolar Current), wnoszącego na akweny położone na W i N od Półwyspu Antarktycznego coraz cieplejsze wody (Verdy i in. 2006, Garabato i in. 2009).

W okresie 2000-2012 sytuacja całkowicie się zmienia – następuje zmiana znaków trendów – ujemne, statystycznie istotne, trendy miesięczne występują we wszystkich miesiącach roku (patrz tab. 1). Bezwzględne wartości trendów miesięcznych w tym okresie są od trzech do ponad dwunastu razy większe, niż w okresie poprzedzającym (ocieplenia).

Najsłabszy w ciągu roku spadek SST ( $-0,035 (\pm 0,010)^\circ\text{C}\cdot\text{rok}^{-1}$ ) zaznacza się w grudniu, czyli miesiącu najdłuższego dnia i największego dopływu energii promienistej do powierzchni morza. Tym nie mniej trend ten jest ujemny, a jego wartość znaczna, co oznacza, że najbardziej intensywny w ciągu roku dopływ radiacji nie kompensuje strat ciepła z powierzchni morza na wymianę z atmosferą.

Również silne i statystycznie istotne, ujemne trendy SST<sub>20Rk</sub> występują w okresie oceanicznego antarktycznego lata (w styczniu, lutym i marcu; patrz tab. 1), narastając wraz ze skracaniem się długości dnia, zmniejszaniem się wysokości Słońca i wzrostem intensywności poboru ciepła z powierzchni oceanu. Najsilniejsze trendy ujemne w ciągu roku, zbliżające się do  $-0,1^\circ\text{C}\cdot\text{rok}^{-1}$ , występują w czasie drugiej części oceanicznej antarktycznej zimy – w sierpniu i wrześniu, czyli w okresie najbardziej intensywnego poboru ciepła z powierzchni morza. Tak silne trendy ujemne wskazują, że zimowa konwekcja nie jest w stanie wyrównać strat ciepła z powierzchni oceanu.

Bardziej szczegółowa analiza przebiegu miesięcznych wartości SST<sub>20</sub> (patrz ryc. 5) wskazuje, że w niektórych miesiącach SST osiągnęła maksimum już w 1999, a nie dopiero w 2000 roku. Silny spadek miesięcznych wartości SST nastąpił między rokiem 1999-2000 a 2004-2005, późniejsze, po latach 2004 i 2005 spadki SST są niewielkie, rzędu pierwszych kilku tysięcznych deg.

W tych samych miesiącach silniejsze trendy ujemne zaznaczają się na północy badanego akwenu, tam, gdzie średnie wartości miesięcznej SST są nieco wyższe, niż na południu. Przykładowo, trend SST w grudniu, w gridzie 60°S, 62°W jest równy  $-0,040(\pm 0,015)^\circ\text{C}\cdot\text{rok}^{-1}$ , gdy w leżącym na tej samej długości, ale nieznacznie bardziej na południe gridzie 64°S, 62°W  $-0,031(\pm 0,009)^\circ\text{C}\cdot\text{rok}^{-1}$ , w sierpniu w tych samych gridach trendy wynoszą odpowiednio  $-0,096(\pm 0,028)$  i  $-0,060(\pm 0,010)^\circ\text{C}\cdot\text{rok}^{-1}$ .

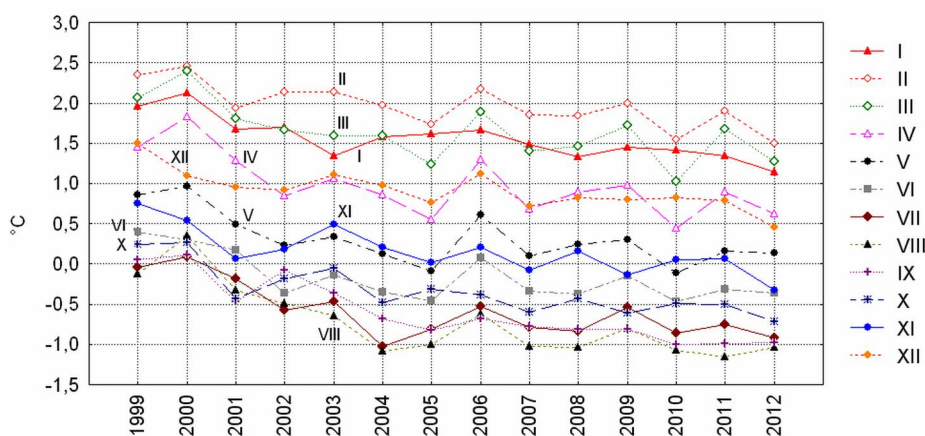
#### 4. Dyskusja wyników i wnioski

Wyniki przeprowadzonych analiz wskazują, że po okresie długotrwałego, trwającego około 68-69 lat (1932-2000) stosunkowo powolnego wzrostu zasobów ciepła w wodach i wzrostu SST na akwenach przylegających od zachodu i północy do Półwyspu Antarktycznego, w ostatnich 12 latach doszło do



bardzo silnego spadku zasobów ciepła i spadku SST. Spadek SST zaznacza się we wszystkich miesiącach, jest najsilniejszy jest w okresie antarktycznej zimy.

Zmiana zaszła nagle, główna faza spadku SST na tym akwenie wystąpiła w latach 1999/2000 – 2004/2005 (ryc. 6). Rozkład wartości trendów miesięcznych SST<sub>20</sub> w okresie ochłodzenia wskazuje na występowanie bardzo ograniczonych zasobów ciepła w kolumnie wody. Suma strat na wypromieniowanie długofalowe i pobór ciepła z powierzchni morza przewyższają na tym akwenie we wszystkich miesiącach dopływ radiacji słonecznej i dopływ promieniowania zwrotnego atmosfery do powierzchni morza, a zasoby ciepła w wodach nie są wystarczające do skompensowania tych strat energii. Spadek zasobów ciepła w wodach tego akwenu, demonstrujący się jako silny spadek SST musi doprowadzić do zmniejszenia się strumieni ciepła z oceanu do atmosfery, a tym samym powinien prowadzić do regionalnego spadku temperatury powietrza.



Ryc. 5. Przebieg miesięcznych wartości SST<sub>20</sub> w okresie ochłodzenia (lata 1999-2012). Zwraca uwagę fakt, że w niektórych miesiącach spadek SST rozpoczął się już w roku 2000

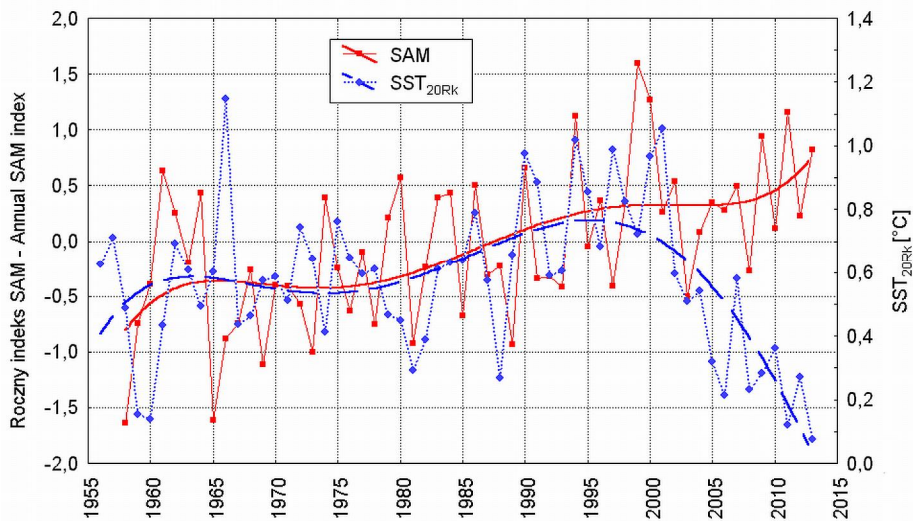
Fig. 5. The course of monthly values of SST<sub>20</sub> during cooling (period 1999-2012). Noteworthy is the fact that in some months a decrease in SST began in the year 2000.

Meredith i King (2005), analizując zachodzące w drugiej połowie XX wieku zmiany klimatyczne w rejonie zachodnich wybrzeży Półwyspu Antarktycznego, stwierdzają wzrost letniej temperatury powietrza o około 3°C i stowarzyszony z nimi wzrost SST o około 1°C. Wzrost SST o 1°C w górnej 25-metrowej kolumnie wody, według ich szacunków, odpowiada ilości energii potrzebnej do stopienia warstwy lodu o grubości 0,3 m, co stanowi znaczny odsetek typowej grubości zimowych lodów na Morzu Bellingshausena (0,5-1,0 m). W rezultacie wzrostu SST na tych akwenach, dochodzi do wymuszonego spadku powierzchni pokrywy lodowej. Z kolei, w wyniku zmniejszania się pokrywy lodowej dochodzi do zwiększonej letniej akumulacji ciepła w wodach, a przez to do dalszego wzrostu SST, temperatury powietrza i wzrostu zasolenia. To ogranicza rozwój (odtwarzanie się) pokrywy lodowej.

W wyniku działania występujących sprzężeń między tymi procesami powstaje układ z dodatnimi sprzężeniami zwrotnymi, mający prowadzić do nieustannej zmiany klimatu, prowadzącej do dalszego wzrostu temperatury powietrza i SST oraz dalszego spadku powierzchni lodów morskich. Meredith

i King (2005) wyraźnie zaznaczają (akapit [11] w cytowanej pracy), że zmiany oceanograficzne w tym procesie, a więc wzrost zasolenia i wzrost SST, stanowią ich zdaniem efekt wpływów zewnętrznych – atmosferycznego (cykulacja atmosferyczna charakteryzowana przez SAM) i kriosferycznego (zmian powierzchni lodów morskich).

Jak można zauważyć, koncepcja Mereditha i Kinga (2005), przynajmniej w odniesieniu do kierunku zmian SST po roku 2000 nie znalazła potwierdzenia. Zamiast dalszego ocieplania się, doszło do gwałtownego ochłodzenia; zmiany SST diametralnie zmieniły kierunek, mimo utrzymywania się nadal tego samego kierunku zmian w charakterze cykulacji atmosferycznej. W swojej klarownej i jasnej konstrukcji Meredith i King przyjęli niewłaściwy czynnik sterujący zmianami stanów systemu.



Ryc. 6. Przebieg wartości rocznego indeksu SAM (stacyjny, według British Antarctic Survey) i SST<sub>20Rk</sub>. Zauważalna niemal dokładna zgodność wygładzonych przebiegów od lat 60. do lat 90. XX wieku i „rozejście się” obu przebiegów w końcu lat 90. XX wieku. Wyrównania wielomianem 5 stopnia

Fig. 6. The course of the annual SAM index (at the station, according to the British Antarctic Service) and SST<sub>20Rk</sub>. Noticeable almost exact conformance of the smoothed courses from the 60-ies to the beginning of 90-ies of the 20<sup>th</sup> century and "divergence" of the two courses in the late 90-ies of the 20<sup>th</sup> century. Smoothed with 5th degree polynomial.

Zachodzące zmiany SST na omawianym akwenie należy interpretować jako wynik działania procesów adwekcyjnych funkcjonujących w oceanie, nie będących prostą, linearną odpowiedzią na wielkoskalową cykulację atmosferyczną. Można sądzić, że Antarktyczny Prąd Cirkumpolarny (Antarctic Circumpolar Current, Antarktyczny Prąd Około biegunowy) zaczął od przełomu roku 1999 i 2000 wносить na omawiany akwen wody chłodne, lub też wody, na powierzchni których znajduje się warstwa wód wychłodzonych i wysłodzonych, uniemożliwiających rozwój głębokiej konwekcji. Jeden z autorów (Marsz 2005) wcześniej zwrócił uwagę na postępujące ochładzanie wód w sektorze pacyficznym Oceanu Południowego, w rejonie położonym na zachód od Cieśniny Drake'a (60°S, z centrum na 100°W). Statystycznie istotne spadki temperatury powierzchni oceanu w okresie 1980-2004 występowały tam w miesiącach oceanicznego antarktycznego lata (styczeń, luty, marzec) i przełomu

jesieni i zimy (czerwiec, lipiec), a średnia roczna SST zaczęła obniżać się po roku 1997. Na 60°S, 80°W spadek rocznej SST nastąpił po roku 1998. Można sądzić, że Antarktyczny Prąd Cirkumpolarny „przeniósł” te chłodne wody dalej na wschód, na akwen bezpośrednio przylegający do Półwyspu Antarktycznego i po roku 2000 rozprzestrzeniły się one na całą powierzchnię badanego akwenu. Składowa równoleżnikowa propagacji granicy oddzielającej ciepłe masy wody od mas chłodnych w Antarktycznym Prądzie Cirkumpolarnym może być oszacowana na około 3-4 cm·s<sup>-1</sup>.

Nie będzie się w tym miejscu wchodzić w zagadnienie mechanizmów wymuszających adwekcję wód wraz z Antarktycznym Prądem Cirkumpolarnym i tworzenia się „anomali” w zasobach ciepła transportowanych przez ten prąd wód. Zainteresowany czytelnik znajdzie najważniejsze współczesne poglądy na ten temat na przykład w pracach Verdy i in. (2006), Garabato i in. (2009), Lee i in. (2010). Trzeba jednak zwrócić uwagę, że zmiany SST na badanym akwenu po 2000 roku nie odtwarzają zmian charakteru makroskalowej cyrkulacji atmosferycznej (patrz ryc. 6). O ile od początku lat 50. XX wieku do przełomu XX i XXI wieków można mówić o daleko posuniętej zbieżności zmian parametrów geofizycznych – SAM i SST, a w rozszerzonej interpretacji – o sterowaniu przez SAM (Southern Annular Mode) zmianami SST na tym akwenu, to później w przebiegu zmienności obu tych wielkości następuje radykalna zmiana. Jak wynika z porównania obu przebiegów, w dekadowych – multidekadowych skalach czasu zmiany SST mogą, ale nie muszą, być zgodne w fazie ze zmianami cyrkulacji atmosferycznej (patrz ryc. 6). Wzajemna kombinacja faz zmian charakteru wielkoskalowej cyrkulacji atmosferycznej i adwekcyjnych zmian SST na danym akwenu kształtować będzie główne ramy zmian klimatycznych o skali dekadowej – multidekadowej, również na obszarze zachodniej części Półwyspu Antarktycznego i jego morskiego obrzeżenia. Czy rzeczywiście obserwowane po roku 2000 zmiany SST na akwenach rozciągających się na N i W od Półwyspu Antarktycznego sygnalizują początek jakiegoś dłuższego okresu zmiany klimatu tego regionu, nie jest jasne. Nie można jednak tego wykluczyć.

## Literatura

- Arblaster J.M., Meehl G.A., 2006. Contributions of External Forcings to Southern Annular Mode Trends. *Journal of Climate*, 19 (11): 2896-2905.
- Clarke A., Murphy E.J., Meredith M.F., King J.C., Peck L.S., Barends D.K.A., Smith R.C., 2007. Climate change and the marine ecosystem of the western Antarctic Peninsula. *Philosophical Transactions of the Royal Society; B (Biological Sciences)*, 362 (1477): 149-166.
- Garabato A.C.N., Jullion L., Stevens D.P., Heywood K.J., King B.A., 2009. Variability of Subantarctic Mode Water and Antarctic Intermediate Water in the Drake Passage during the Late-Twentieth and Early-Twenty-First Centuries. *Journal of Climate*, 22 (13): 3661-3688: doi: <http://dx.doi.org/10.1175/2009JCLI2621.1>
- Gillett N.P., Stone D.A., Stott P.A., Nozawa T., Karpechko A.Yu., Hegerl G.C., Wehner M.F., Jones P.D., 2008. Attribution of polar warming to human influence. *Nature Geoscience*, 1: 750-754: doi:10.1038/ngeo338
- IPCC IV, 2007.- *Climate Change 2007*. Anisimov O.A., Vaughan D.G., Callaghan T.V., Furgal C., Marchant H., Prowse T.D., Vilhjálmsson H., and J.E. Walsh J.E., 2007. Polar regions (Arctic and Antarctic). *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, M.L. Parry, O.F. Canziani, J.P. Palutikof, P.J. van der Linden and C.E. Hanson, Eds., Cambridge University Press, Cambridge: 653-685.
- Jones, P.D., Limbert D.W.S., 1987. A data bank of Antarctic surface temperature and pressure data. Report TR038. US Department of Energy, Carbon Dioxide Research Division, Washington: 52 pp.

- King J.C., 1994. Recent climate variability in the vicinity of the Antarctic Peninsula. *International Journal of Climatology*, 14 (4): 357-369. DOI: 10.1002/joc.3370140402.
- King J.C., Harangozo S.A., 1998. Climate change in the western Antarctic Peninsula since 1945: observations and possible causes. *Annals of Glaciology*, 27: 571-575.
- Lee T., Hobbs W.R., Willis J.K., Halkides D., Fukumori I., Armstrong E.M., Hayashi A.K., Liu W.T., Patzert W., Wang Q., 2010. Record warming in the South Pacific and western Antarctica associated with the strong central-Pacific El Niño in 2009-10. *Geophysical Research Letters*, 37 (19): DOI: 10.1029/2010GL044865.
- Marshall G.J., 2003. Trends in the Southern Annular Mode from observations and reanalyses. *Journal of Climate*, 16 (24): 4134-4143.
- Marshall G.J., Orr A., van Lipzig N.P.M., King J.C., 2006. The Impact of a Changing Southern Hemisphere Annular Mode on Antarctic Peninsula Summer Temperatures. *Journal of Climate*, 19 (20): 5388-5404. DOI: <http://dx.doi.org/10.1175/JCLI3844.1>
- Marshall G.J., 2007. Half-century seasonal relationships between the Southern Annular mode and Antarctic temperatures. *International Journal of Climatology*, 27 (3): 373-383. DOI: 10.1002/joc.1407.
- Marsz A., 2005. Trendy temperatury powierzchni oceanu w sektorze pacyficznym Oceanu Południowego w ostatnim 25-leciu (1980-2004). *Problemy Klimatologii Polarnej*, 15: 17-26.
- Meredith M.P., King J.C., 2005. Rapid climate change in the ocean west of the Antarctic Peninsula during the second half of the 20th century. *Geophysical Research Letters*, 32 (19): DOI: 10.1029/2005GL024042.
- Okumura Y.M., Schneider D., Deser C., Wilson R., 2012. Decadal-Interdecadal Climate Variability over Antarctica and Linkages to the Tropics: Analysis of Ice Core, Instrumental, and Tropical Proxy Data. *Journal of Climate*: 25 (21), 7421-7441: doi: <http://dx.doi.org/10.1175/JCLI-D-12-00050.1>
- Russell A., McGregor G.R., 2010. Southern hemisphere atmospheric circulation: impacts on Antarctic climate and reconstructions from Antarctic ice core data. *Climatic Change*; 99 (1-2): 155-192. DOI 10.1007/s10584-009-9673-4
- Smith T.M., Reynolds R.W., Peterson T.C., Lawrimore J., 2008. Improvements to NOAA's Historical Merged Land-Ocean Surface Temperature Analysis (1880-2006). *Journal of Climate*, 21 (10): 2283-2296.
- Styszyńska A., 2004. The origin of coreless winter in the South Shetlands Area (Antarctica). *Polish Polar Research*, 25 (1): 45-66.
- Thompson D.W.J., Wallace J.M., 2000. Annular modes in the extratropical circulation. Part I: Month-to-month variability. *Journal of Climate*, 13 (5): 1000-1016.
- Thompson D.W.J., Solomon S., 2002. Interpretation of Recent Southern Hemisphere Climate Change. *Science*, 296: 895-899.
- Turner J., Colwell S.R., Marshall G.J., Lachlan-Cope T.A., Carleton A.M., Jones P.D., Lagun V., Reid P.J., Iagovkina S., 2005. Antarctic climate change during the last 50 years. *International Journal of Climatology*, 25: 279-294.
- Xue Y., Smith T.M., Reynolds R.W., 2003. Interdecadal changes of 30-yr SST normals during 1871-2000. *Journal of Climate*, 16 (10): 1601-1612.
- Vaughan D.G., Marshall G.J., Connolley W.M., King J.C., Mulvaney R., 2001. Devil in the Detail. *Science*, 293 (5536): 1777-1779. DOI: 10.1126/science.1065116
- Vaughan D.G., Marshall G.J., Connolley W.M., Parkinson C., Mulvaney R., Hodgson D.A., King J.C., Pudsey C.J., Turner J., 2003. Recent Rapid Regional Climate Warming on the Antarctic Peninsula. *Climatic Change*, 60 (3): 243-274. DOI: 10.1023/A:1026021217991
- Verdy A., Marshall J., Czaja A., 2006. Sea Surface Temperature Variability along the Path of the Antarctic Circumpolar Current. *Journal of Physical Oceanography*, 36 (7): 1317-1331.

Visbeck M., 2009. A Station-Based Southern Annular Mode Index from 1884 to 2005. *Journal of Climate*, 22 (4): 940–950. doi: <http://dx.doi.org/10.1175/2008JCLI2260.1>

Weatherly J.W., Walsh J.E., Zwally H.J., 1991. Antarctic sea ice variations and seasonal air temperature relationships. *Journal of Geophysical Research (Oceans)* 96 (C8): 15119–15130. DOI: 10.1029/91JC01432.

Wpłynęło: 4 kwietnia 2013 r., poprawiono: 27 września 2013 r., zaakceptowano: 10 października 2013 r.

## Summary

The paper presents the results of the analysis of changes in sea surface temperature (SST) of the sea area extending to NW from the northern part of the Antarctic Peninsula in the years 1900-2012. Three periods of SST changes were noted:

- period covering years 1900-1932 with relatively stable behaviour of the SST (zero trend, a small inter-annual variability, low average annual SST –  $\sim 0.3^{\circ}\text{C}$ ),
- period covering years 1932-2000 with an increase in inter-annual variability of SST and a gradual three-phase increase in SST (trend  $0.006 (\pm 0.001)^{\circ}\text{C}\cdot\text{yr}^{-1}$ , the total increase in annual SST of 0.7 degrees (up to  $\sim 1^{\circ}\text{C}$ ). The highest average value of the SST was noted in 2000.
- period covering years 2000-2012 – a period of rapid drop in SST (trend  $-0.048 (\pm 0.010)^{\circ}\text{C}\cdot\text{yr}^{-1}$ , SST decrease of  $\sim 1$  degree).

The analysis of monthly trends shows that the changes in SST are the result of advection of water resources with different heat carried from the west by the Antarctic Circumpolar Current. Changes in SST in the analyzed sea area in the last period are not connected with changes in macro-scale atmospheric circulation (SAM Southern Annular Mode, Antarctic Oscillation). The described changes in the SST occurring in 2000-2012 may lead to changes in the trend of temperature changes at the stations on the west coast of the Antarctic Peninsula.

**Key words:** Antarctic Peninsula, SST change, cool, climate change.