

**TRENDY TEMPERATURY POWIERZCHNI OCEANU
W SEKTORZE PACYFICZNYM OCEANU POŁUDNIOWEGO
W OSTATNIM 25-LECIU (1980–2004)**

TRENDS IN SEA SURFACE TEMPERATURE IN THE PACIFIC SECTOR
OF THE SOUTH OCEAN IN LAST 25 YEAR PERIOD (1980–2004)

Andrzej A. Marsz

Katedra Meteorologii i Oceanografii Nautycznej, Wydział Nawigacyjny, Akademia Morska
ul. Sędzickiego 19, 81–374 Gdynia
aamarsz@am.gdynia.pl

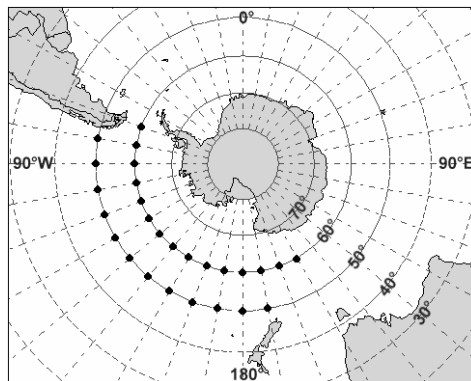
Zarys treści: Praca omawia zmiany temperatury powierzchni wody (TPO) sektora pacyficznego Oceanu Południowego w pasach szerokości 60 i 50°S, zachodzące w przekrojach miesięcznych i rocznych. Stwierdzono występowanie ujemnych trendów TPO w całym pasie 60°S, z czego ponad 1/3 współczynników trendu jest istotna i wysoce istotna statystycznie. Obszary silnego ochłodzenia powierzchni oceanu tworzą tam dwa ośrodki: pierwszy w rejonie 170°E – 140°W, drugi – 120–080°W. W obu ośrodkach najsilniejsze spadki TPO następują w miesiącach chłodnej pory roku (maj – sierpień), w drugim – dodatkowo – stosunkowo silne ochłodzenie zaznacza się w miesiącach ciepłej pory roku (styczeń – marzec). Na szerokości 50°S ochłodzenie jest znacznie słabsze – istotne statystycznie zmiany TPO zaznaczają się wyłącznie po wschodniej stronie sektora (100–080°W), gdzie również występują trendy ujemne. Kumulacja istotnych i nieistotnych statystycznie trendów miesięcznych prowadzi do zaznaczania się na obszarze około 54% powierzchni sektora pacyficznego Oceanu Południowego istotnych statystycznie, ujemnych trendów rocznej TPO. Na pozostałym obszarze badanego sektora bądź brak realnych zmian TPO, bądź występuje tendencja do słabego spadku temperatury. Przebiegi temperatury rocznej wskazują, że w ośrodku zachodnim (60°S, 170°E – 140°W) TPO konsekwentnie obniża się od początku obserwacji (1980 rok), gdy we wschodniej części sektora pacyficznego (120–080°W) cały obserwowany w 25-leciu trend stanowi konsekwencję silnego spadku rocznej TPO w ciągu ostatnich 7 lat (1997–2004).

Słowa kluczowe: temperatura powierzchni oceanu, ochłodzenie powierzchni oceanu, zmiany klimatu, Ocean Południowy, sektor pacyficzny, Antarktyka

1. Wprowadzenie

Zaznaczające się w ostatnim okresie, szczególnie wyraźnie po roku 1984–1987, ocieplenie w rejonie zachodnich wybrzeży Półwyspu Antarktycznego (Kejna i Lagun 2004, Turner i in. 2005) oraz znaczne zmiany rozmiarów pokrywy lodowej mórz Amundsena i Bellingshausena stawiają pytanie, jak zachowuje się temperatura wody powierzchniowej przyległego do tych mórz obszaru Oceanu Południowego. Zdecydowana przewaga napływu nad ten rejon mas atmosferycznych z zachodu w naturalny sposób kieruje zainteresowanie akwenami położonymi na zachód od Półwyspu Antarktycznego i wybrzeży mórz Amundsena i Bellingshausena – czyli na sektor pacyficzny Oceanu Południowego.

Celem tej notatki jest przedstawienie wyników badań nad kształtowaniem się trendów temperatury powierzchni Oceanu Południowego w okresie ostatniego 25-lecia, od 1980 do 2004 roku. Analizą objęto temperaturę powierzchni Oceanu Południowego w sektorze pacyficznym w dwu pasach równoleżnikowych: 1 – na szerokości 50°S – od długości 170°E do 80°W, 2 – na szerokości 60°S – od długości 150°E do 070°W (ryc. 1). Ten ostatni punkt znajduje się już w Cieśninie Drake'a. Wobec występowania pokrywy lodów morskich w strefie szerokości 70°S i silnie zróżnicowanej długości okresu bezlodowego na tych akwenach, zrezygnowano z przedstawiania wyników badań w tej strefie, gdyż obliczone wartości trendów są nieporównywalne, zaś dla niektórych miesięcy na danej długości – niemożliwe do wyliczenia.



Ryc. 1. Położenie gridów uwzględnionych w analizie
Fig.1. Location of grids analysed in this study

W każdym pasie równoleżnikowym badano trendy średniej miesięcznej TPO na powierzchniach (gridach) $2^\circ\varphi \times 2^\circ\lambda$, których punkty centralne odległe były od siebie o $10^\circ\lambda$ (ryc. 1). Daje to na szerokościach 50 i 60° odległości między punktami centralnymi odpowiednio 387 i 300 Mm (714 i 556 km). Przyjęta siatka jest bardzo rozrzedzona, lecz wobec niewielkiej zmienności przestrzennej temperatury powierzchni Oceanu Południowego (Atlas ... 1974) wydaje się być wystarczająca do uzyskania wyników, które z założenia mają mieć ogólny, nie zaś szczegółowy, charakter.

2. Dane źródłowe

Podstawą opracowania jest zbiór NOAA NCDC ERSST v.2. (Smith i Reynolds 2004) zawierający dane o temperaturze powierzchni oceanu w siatce gridowej $2 \times 2^\circ$. Zbiór ten, w swojej podstawowej, historycznej części bazuje na danych zbioru COADS, przetworzonych za pomocą odpowiednich technik statystycznych (EOF), przy wykorzystaniu jako materiału dodatkowego danych o temperaturze powietrza i granicy lodów (Smith i Reynolds 2002b) Z chronologicznych szeregów danych, przy wykorzystaniu specjalnej metody filtracji (Smith i Reynolds 2002a) wyeliminowano szumy.

Na obszarach wód wokółantarktycznych, gdzie żegluga była uprawiana tylko sporadycznie, a w wyższych szerokościach geograficznych ograniczona tylko do sezonu nawigacyjnego, wartość „historycznej” części tego zbioru, od roku 1854 do połowy lat 70-tych XX wieku, jest znikomo mała i posługiwanie się nim nie wydaje się być uzasadnione. Jednak od połowy lat 70-tych XX wieku na wodach wokółantarktycznych zaczęto rozmieszczać autonomiczne boje oceanograficzne, rejestrujące także wartości temperatury

powierzchni oceanu (TPO). Od przełomu lat 70-tych i 80-tych do konstrukcji map rozkładu TPO zaczęto wykorzystywać również średnio- i wysokorozdzielcze radiometry umieszczone na sztucznych satelitach. Zagadnienie kalibracji danych satelitarnych i przetworzenie ich do postaci temperatury powierzchni oceanu zostało pomyślnie rozwiązane w końcu lat 70-tych XX wieku i od roku 1981, po wprowadzeniu na orbity satelitów wyposażonych w wysokorozdzielcze radiometry, został zapewniony stały dopływ danych, pozwalających na konstrukcję 12 godzinnych oraz tygodniowych, wysoce wiarygodnych map rozkładu TPO. Przy opracowaniu tych map, oprócz danych satelitarnych wykorzystywano również dane z pomiarów wykonywanych *in situ*. Mapy te, przy zastosowaniu specjalnej techniki interpolacji (Optimum Interpolation) posłużyły do obliczenia miesięcznej temperatury powierzchni oceanu w siatce gridowej o rozdzielczości $1 \times 1^\circ$. Dane te, posiadające walor klimatycznej jednorodności, stały się materiałem zgromadzonym w zbiorze OI SST v.1., a następnie po korektach, w zbiorze OI SST v.2. (Reynolds i in. 2002).

Przy konstrukcji zbioru ERSST w wersji 2 wykorzystano również dane satelitarne, te same, które stanowiły podstawę do konstrukcji zbioru OI SST v1. i OI v.2. Zastosowano ponadto dodatkowe techniki eliminacji szumów (Smith i Reynolds 2004), chociaż zmniejszenie rozdzielczości do $2 \times 2^\circ$ w przypadku stosowania techniki interpolacji optymalnej już w znacznym stopniu szumy te wyeliminowało. Pozwala to, choć z pewnymi zastrzeżeniami¹, na wykorzystanie danych zbioru ERSST v.2. również do analizy procesów i zjawisk funkcjonujących na wodach wokółantarktycznych. Błędy, jakimi obciążona jest miesięczna temperatura powierzchni oceanu na tych akwenach w okresie po 1980 roku są stosunkowo małe. Wahają się one od 0.02 do 0.6°C , przy czym rozkład błędów wykazuje pewne zróżnicowanie sezonowe; najniższe wartości błędów szacunku TPO zaznaczają się w miesiącach jesiennych (średnio $0.1\text{--}0.2^\circ\text{C}$), największe w miesiącach wiosennych (średnio $0.2\text{--}0.4^\circ\text{C}$).

3. Wyniki

Przeprowadzona analiza wykazała, że w badanym okresie na przeważającym obszarze sektora pacyficznego Oceanu Południowego wystąpiły spadki temperatury wody powierzchniowej. Silniejsze ochłodzenie wykazują wody położone bliżej wybrzeży Antarktydy reprezentowane przez pas szerokości 60°S . Tam, na długościach od 170°E do 80°W , czyli do granicy z Cieśniną Drake'a, praktycznie wszędzie zaznacza się wyraźne ochłodzenie.

Rozkład przestrzenny i czasowy trendów temperatury na szerokości 60°S wykazuje szereg osobliwości. Rysują się dwa czaso-przestrzenne ośrodki silniejszego ochłodzenia powierzchni wód: pierwszy – rozciągający się na długościach od 170°E do 140°W , z centrum w przybliżeniu² na 180° , drugi – rozciągający się na długościach od 120° do 80°W , z centrum lokującym się na długości 100°W .

W pierwszym ośrodku silne i wyraźne ochłodzenie zaznacza się w ciągu wszystkich miesięcy roku, najsilniejsze i istotne (a nawet wysoce istotne) statystycznie trendy występują w miesiącach chłodnej pory roku – od maja do sierpnia w rejonie od 170°E do 150°W i od maja do lipca na 140°W . W tych miesiącach wartości współczynników trendu zawierają się w granicach od -0.016 do -0.028 K/rok. Zwraca uwagę konsekwentny spadek temperatury wody w całym badanym 25-leciu w centrum tego rejonu – na 180° trend objaśnia ponad 50% całej obserwowanej zmienności TPO lipca i sierpnia, w pozostałych miesiącach

¹ Zastrzeżenia dotyczą wykorzystania tej części zbioru, która obejmuje okres od przełomu lat 70-tych i 80-tych XX wieku do roku 1981, w tym przypadku będą to dane z roku 1980.

² Pas ten, sądząc po położeniu jego centrum, przypuszczalnie sięga dalej na zachód, wkraczając na wschodnie krańce sektora indyjskiego.

zimy stopień objaśnienia wariancji temperatury wody objaśnianej przez trend w tym ośrodku zawiera się w granicach od 16 do 37%, średnio 29%. Dodatkowo w tym ośrodku, na długościach 170°E – 180°, zaznaczają się istotne statystycznie ochłodzenia w pojedynczych miesiącach cieplej pory roku (patrz tab. 1).

Drugi ośrodek rozciąga się na długości od 120 do 80°W. W tym ośrodku, na tle ujemnych trendów we wszystkich miesiącach roku wyróżniają się dwa okresy, w których ochłodzenie jest na tyle konsekwentne, że staje się istotne statystycznie. Pierwszy okres spadku temperatury wody obejmuje styczeń, luty i marzec, przy czym wraz z przemieszczaniem się na wschód długość tego okresu skraca się, na długościach 90 i 80°W ograniczając się do lutego. Ochłodzenie zaznaczające się w tych miesiącach jest silne – współczynniki trendu dochodzą do -0.038 K/rok (luty, 110°W), przeciętnie wahając się około -0.030 K/rok (patrz tab. 1). Drugi okres ochłodzenia obejmuje, tak jak w pierwszym ośrodku, miesiące zimowe. Najsilniejsze ochłodzenie powierzchni wód zaznacza się tutaj w czerwcu, gdzie współczynnik trendu dochodzi do, lub przekracza wartość -0.030 K/rok (patrz tab. 1). Mimo silniejszych spadków temperatury powierzchni wody ochłodzenie w funkcji czasu na tym akwenie jest mniej konsekwentne niż w pierwszym ośrodku – największy stopień objaśnienia wariancji temperatury to 46% w lutym i 40% w czerwcu na 100°W.

Na całym łuku równoleżnika 60°S w sektorze pacyficznym Oceanu Południowego ochłodzenie powierzchni wód jest konsekwentne. Na 144 punktów pomiarowych (12 punktów x 12 miesięcy), tylko w jednym punkcie i w dwóch miesiącach (80°W; kwiecień, listopad) zaznaczyły się okołozerowe wartości trendów ze znakiem plus. Pozostałe 142 punkty pomiarowe mają współczynniki trendu ze znakiem ujemnym (98.6%), z czego 51 punktów (~35%) wykazuje trendy statystycznie istotne i wysoce istotne.

Taki stan zmienia się gwałtownie z chwilą wejścia na obszar Cieśniny Drake'a. Występujące tam trendy temperatury powierzchni wód są w przewadze bardzo słabe, nieistotne statystycznie, a ich znaki zmieniają się w czasie (dodatnie w kwietniu, październiku, listopadzie i grudniu).

W pasie szerokości 50°S rozkład przestrzenny zmian TPO jest mniej wyraźny, a skala zmian znacznie mniejsza. Wyraźne ochłodzenie powierzchni wód zaznacza się we wschodniej części pasa – tworząc ośrodek rozciągający się na długościach od 120 do 80°W, gdzie współczynniki trendu są we wszystkich miesiącach ujemne. W najdalej na wschód położonej części tego ośrodka, na długościach 100–80°W szczególnie silne spadki temperatury powierzchni wody zaznaczają się w miesiącach lata (styczeń, luty, marzec) oraz jesieni (maj, czerwiec). W tych miesiącach trend objaśnia na tych akwenach od 48 do 30% całej obserwowanej zmienności temperatury wody. Współczynniki trendu są dość wysokie, dochodząc w lutym na 80°W do -0.041 K/rok, a przeciętnie zamykają się w przedziale od -0.017 do -0.028 K/rok. W okresie zimy i wiosny na tym akwenie trendy są ujemne, ale nie przekraczają progu istotności statystycznej³ $p < 0.05$.

Drugi obszar słabego, nieistotnego statystycznie, ochłodzenia obejmuje najdalej na zachód wysuniętą część pasa szerokości pięćdziesiątych i lokuje się na długościach 170°E – 180°. Tam, współczynniki trendów wykazują silne zróżnicowanie z miesiąca na miesiąc, stając się wyraźnie silniejsze w okresie od schyłku zimy do początku lata (sierpień – styczeń; -0.014 do -0.021 K/rok).

Pomiędzy tymi dwoma ośrodkami rozciąga się (170°W – 130°W) pas, na którym występują trendy okołozerowe (wartości współczynników trendów rzędu od 0.000 do kilku tysięcznych K/rok), których znaki są różne. Na długościach 170–140°W przeważają dodatnie znaki współczynników trendów, na 130°W – ujemne. Ponieważ błędy standardowe oszacowania współczynników trendów są większe od ich wartości, nie można nawet stwierdzić, czy zaznacza się tam wzrost, czy też spadek temperatury.

³ Zdecydowana większość z nich jest istotna na poziomie ufności 90% ($p < 0.1$)

Tabela 1 – Table 1

Rozkład odsetka (%) objaśnienia przez trend obserwowanej wariacji temperatury powierzchni oceanu (górna liczba w komórce) i wartości trendów temperatury powierzchni Oceanu Południowego na szerokości 60°S (K/rok; dolna liczba) w funkcji długości geograficznej w kolejnych miesiącach roku (1980–2004). Miesiące na danej długości geograficznej, w których współczynniki trendów są istotne statystycznie na poziomie $p < 0.05$ oznaczone są przez zacieniienie pola

The distribution of the percentage (%) explained by the trend of the observed variance in the sea surface temperature (the upper number) and the values of trends in the sea surface temperature of the South Ocean in the latitude 60°S (K/year; lower number) as a function of geographical longitude in the consecutive months of a year (1980–2004).

The months at a given geographical longitude in which the trends coefficients are statistically significant $p < 0.05$ are marked by shaded cell

Miesiąc Month	170°E	180°	170°W	160°W	150°W	140°W	130°W	120°W	110°W	100°W	090°W	080°W	070°W
I	14 -0.022	18 -0.014	11 -0.010	11 -0.014	6 -0.08	6 -0.011	8 -0.019	18 -0.027	26 -0.029	25 -0.026	12 -0.019	8 -0.015	0 -0.001
II	18 -0.021	22 -0.020	7 -0.011	9 -0.017	8 -0.016	7 -0.018	7 -0.019	17 -0.029	37 -0.038	46 -0.036	32 -0.032	20 -0.028	3 -0.015
III	3 -0.013	3 -0.009	0 -0.003	3 -0.010	3 -0.009	3 -0.012	7 -0.021	7 -0.031	26 -0.036	29 -0.032	13 -0.021	6 -0.014	0 -0.000
IV	5 -0.013	5 -0.013	8 -0.005	2 -0.011	5 -0.010	4 -0.011	3 -0.013	4 -0.015	8 -0.015	10 -0.012	0 -0.002	0 +0.004	2 +0.008
V	18 -0.025	36 -0.026	23 -0.016	26 -0.021	21 -0.019	16 -0.021	11 -0.021	12 -0.022	22 -0.024	23 -0.019	8 -0.011	3 -0.007	2 -0.008
VI	17 -0.022	37 -0.024	19 -0.012	32 -0.022	34 -0.023	29 -0.027	20 -0.029	21 -0.030	32 -0.033	40 -0.031	28 -0.026	19 -0.020	15 -0.020
VII	26 -0.027	52 -0.028	27 -0.014	31 -0.022	32 -0.022	22 -0.024	10 -0.022	8 -0.020	18 -0.023	26 -0.021	18 -0.018	14 -0.016	15 -0.021
VIII	24 -0.022	58 -0.022	30 -0.010	29 -0.016	23 -0.015	13 -0.015	4 -0.013	5 -0.014	12 -0.017	19 -0.015	14 -0.011	11 -0.010	4 -0.008
IX	14 -0.019	32 -0.019	14 -0.007	15 -0.011	15 -0.011	8 -0.010	4 -0.009	3 -0.008	5 -0.009	6 -0.007	3 -0.005	1 -0.004	1 -0.006
X	4 -0.011	14 -0.012	10 -0.006	15 -0.012	12 -0.010	8 -0.010	9 -0.015	11 -0.018	14 -0.015	15 -0.014	5 -0.003	0 -0.002	0 -0.000
XI	10 -0.017	17 -0.017	14 -0.012	20 -0.017	8 -0.013	8 -0.015	7 -0.017	7 -0.017	7 -0.013	4 -0.008	0 -0.001	0 +0.003	5 +0.013
XII	18 -0.024	12 -0.017	6 -0.010	12 -0.015	7 -0.011	5 -0.013	5 -0.016	8 -0.022	10 -0.024	15 -0.019	8 -0.013	2 -0.007	1 +0.007

Ogólnie, w pasie szerokości pięćdziesiątych, na 144 pola notuje się 105 pól, na których zaznaczają się ujemne współczynniki trendu (73% ogółu) i 39 pól, na których notuje się współczynniki trendu ze znakiem plus (27%). Średnie wartości współczynników trendu ze znakiem minus są od 3 do 4 razy większe od wartości ze znakiem plus. Istotne statystycznie współczynniki trendu we wschodniej części pasa (10 pól) mają bez wyjątku znak minus. Pozwala to wysnuć wniosek, że w strefie 50°S sektora pacyficznego Oceanu Południowego, w okresie analizowanych 25 lat, przeważa tendencja do ochładzania powierzchni wód. Jest ona jednak wyraźna i istotna statystycznie jedynie we wschodniej części tego akwenu.

Znacznie bardziej klarowny obraz zachodzących zmian temperatury powierzchni wód sektora pacyficznego Oceanu Południowego uzyskuje się, gdy bada się trendy temperatury rocznej. Zestawienie wartości współczynników trendów oraz udział trendu w kształtowaniu zmienności międzyrocznej temperatury wód jest zestawiony w tabeli 2.

Tabela 2 – Table 2

Wartości współczynników trendów temperatury rocznej na powierzchniach 2x2° i stopień objaśnienia zmienności rocznej temperatury powierzchni wody przez trend. Współczynniki trendu istotne na poziomie $p < 0.05$ pogrubione

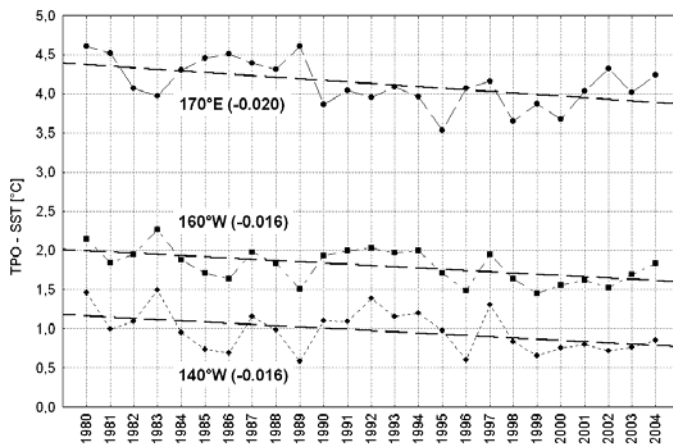
The values of coefficients of trends in annual temperature in grid 2x2° and the degree to which the changeability in annual sea surface temperature is explained by this trend. The coefficients of this trend statistically significant $p < 0.05$ are in bold

φ λ	50°S		60°S	
	współczynnik trendu trend coefficient	% objaśnienia % explanation	współczynnik trendu trend coefficient	% objaśnienia % explanation
170°E	-0.012	6	-0.020	22
180°	-0.012	10	-0.019	42
170°W	+0.006	0	-0.010	17
160°W	+0.002	0	-0.016	26
150°W	+0.005	0	-0.014	21
140°W	+0.002	0	-0.016	15
130°W	-0.005	0	-0.018	10
120°W	-0.010	1	-0.021	14
110°W	-0.010	2	-0.023	30
100°W	-0.016	19	-0.020	36
090°W	-0.016	25	-0.014	16
080°W	-0.015	14	-0.010	6
070°W	-	-	-0.004	0

Na całej długości pasa szerokości 60°S widoczny jest proces ochładzania powierzchni wód, przy czym wyraźnie zaznaczają się wspomniane dwa ośrodki – wschodni i zachodni. W pasie szerokości 50°S zauważa się, że znaczące ochłodzenie w badanym 25-leciu nastąpiło we wschodniej części sektora pacyficznego, od 100°W na wschód, gdy na pozostałej części tej strefy zmiany temperatury powierzchni wód są pomijalnie małe.

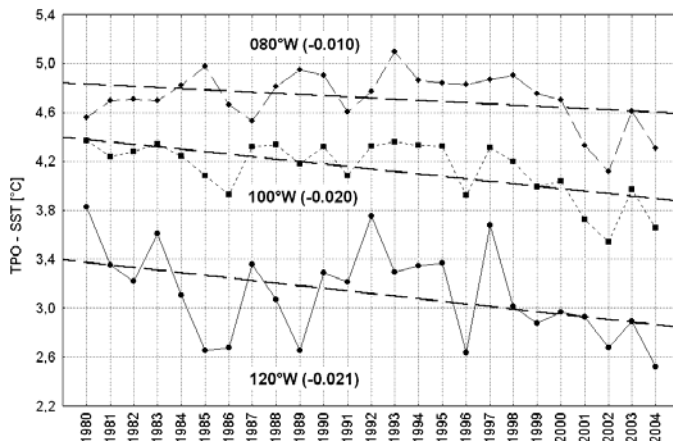
Analiza przebiegu zmian rocznej TPO na 60°S wykazuje, że w ośrodku zachodnim (170°E – 140°W) proces ochładzania następuje nieprzerwanie w ciągu całego badanego okresu (patrz ryc. 2), gdy w ośrodku wschodnim (120–80°W) w latach 1980–1997 temperatura powierzchni wód nie wykazywała zmian o zdecydowanym kierunku, natomiast po roku 1997 rozpoczął się jej gwałtowny spadek (patrz ryc. 3). Tak więc całe ochłodzenie powierzchni wschodniej części sektora pacyficznego stanowi rezultat procesów funkcjo-

nujących w okresie ostatnich 7 lat. Trend temperatury w latach 1997–2004 we wschodniej części tej strefy wynosi -0.089 K/rok na 100°W i -0.093 K/rok na 90°W , gdy w poprzednim okresie (1980–1997) trendy te były okołozerowe (odpowiednio -0.002 i $+0.007$ K/rok).



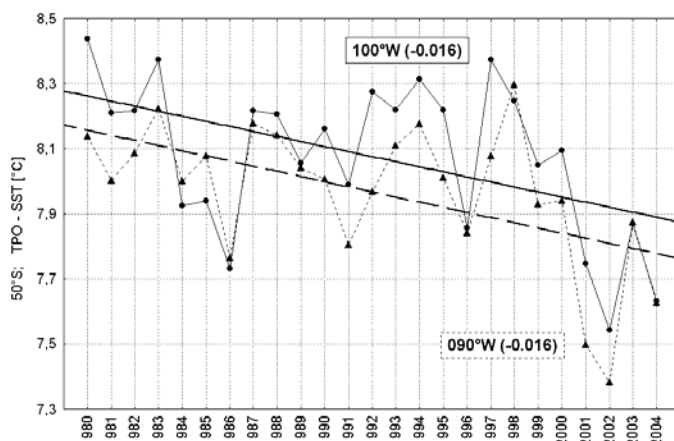
Ryc. 2. Przebieg rocznych wartości TPO na 60°S w zachodnim ośrodku ochłodzenia wód (170°E , 160°W i 140°W). Zauważalny względnie konsekwentny spadek temperatury wód w całym okresie 1980–2004. W nawiasach – wartości trendów (K/rok)

Fig. 2. The course of annual values of SST at 60°S in the western centre of water cooling (170°E , 160°W and 140°W). The visible decrease in sea temperature over the entire period 1980–2004 seems to occur relatively constantly. The values of trends (in brackets – K/year)



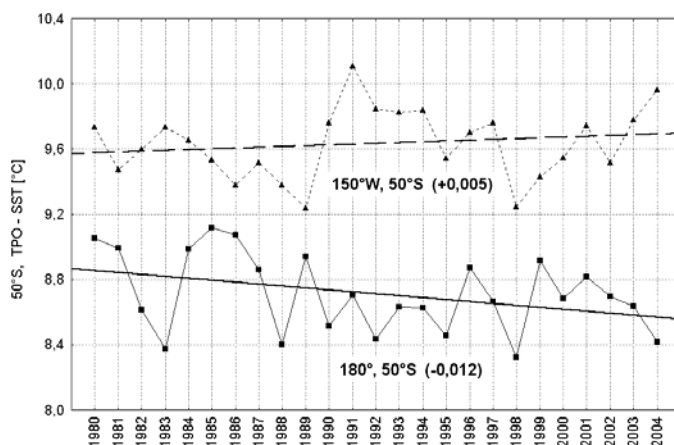
Ryc. 3. Przebieg rocznych wartości TPO na 60°S we wschodnim ośrodku ochłodzenia wód (120°W , 100°W i 80°W). Zauważalny brak konsekwentnych zmian w okresie 1980–1997–1998 i wyraźny spadek w ciągu ostatnich 6 lat. W nawiasach – wartości trendów (K/rok)

Fig. 3. The course of annual values of SST at 60°S in the eastern centre of water cooling (120°W , 100°W and 80°W). Visible lack of changes in the period 1980–1997–1998 and a clear decrease in the last 6 years. In brackets - the values of trends (K/year)



Ryc. 4. Przebieg rocznych wartości TPO we wschodnim ośrodku ochłodzenia wód na szerokości 50°S. Ujemne trendy w okresie badań stanowią efekt silnego ochłodzenia powierzchni wód, które zaznaczyło się po roku 1998. W nawiasach – wartości trendów (K/rok)

Fig. 4. The course of annual values of SST in the eastern centre of water cooling at 50°S. The negative trends in the examined period result from a strong cooling of the surface waters which was observed after the year 1998. In brackets - the values of trends (K/year)



Ryc. 5. Przebieg rocznych wartości TPO w zachodniej części sektora pacyficznego Oceanu Południowego na szerokości 50°S. Widoczne słabe, nieistotnie statystycznie wartości trendów (w nawiasach; K/rok) o odmiennych znakach

Fig. 5. The course of annual values of sea surface temperature in the western part of the Pacific sector of the South Ocean at 50°S. Visible weak, statistically non-significant values of trends (in brackets; K/year) with different signs.

Podobnie zachowują się zmiany rocznej temperatury powierzchni wód wschodniej części sektora pacyficznego na szerokości 50°S, tam, gdzie współczynniki regresji stają się istotne statystycznie (100–80°W). Również i tam (patrz ryc. 4) po roku 1997–1998 następuje gwałtowny TPO, gdy w poprzedzającym okresie trendy temperatury były okołozerowe. Na pozostałym obszarze szerokości pięćdziesiątych brak

wyraźniejszych, bardziej zdecydowanych długookresowych zmian temperatury powierzchni oceanu, mimo nieznacznej przewagi trendów ujemnych (patrz ryc. 5).

4. Dyskusja wyników i wnioski

Stwierdzone ochładzanie się powierzchni wody sektora pacyficznego Oceanu Południowego w ciągu ostatnich 25 lat jest najsilniejsze w strefie wokółantarktycznej (60°S). Jednocześnie w tej samej strefie obserwuje się wyraźny wzrost temperatury powietrza, szczególnie silny wzdłuż zachodnich wybrzeży Półwyspu Antarktycznego (Turner i in. 2005, Kejna i Lagun 2004). Tak więc oba procesy przebiegu temperatury – powierzchni oceanu i powietrza są przeciwstawne.

Występujący na przeważającej powierzchni sektora pacyficznego Oceanu Południowego spadek temperatury powierzchni wód zdaje się wskazywać, że nie rejestruje się tutaj zwiększonego dopływu radiacji do powierzchni oceanu, która mogłaby być związana z działaniem „efektu cieplarnianego”.

Występowanie stosunkowo silnych spadków temperatury powierzchni oceanu w strefie wód wokółantarktycznych sugeruje, że ich przyczyną jest wzrost natężenia poboru ciepła z powierzchni oceanu. Najprawdopodobniej związany jest on ze wzrostem prędkości wiatru w strefie szerokości sześćdziesiątych, będących efektem wzrostu natężenia procesów cyrkulacji atmosferycznej na tych obszarach (Marshall, 2002). Wzrost prędkości wiatru przyspiesza pobór ciepła z oceanu do atmosfery, co z jednej strony skutkuje wzrostem temperatury powietrza, z drugiej – spadkiem temperatury powierzchni oceanu.

Między roczną temperaturą powietrza na stacjach zachodniego wybrzeża Półwyspu Antarktycznego a temperaturą wody w szerokościach sześćdziesiątych zachodzą korelacje synchroniczne. Przykładowo, temperatura roczna na stacji Bellingshausen (Szetlandy Południowe; 62.2°S, 58.9°W) wykazuje istotne statystycznie korelacje ujemne z roczną temperaturą powierzchni wody w strefie długości od 170 do 120°W. Współczynniki korelacji wynoszą tam, zależnie od długości geograficznej, od -0.45 do -0.50. Dodatkowo, i to wysokie, współczynniki korelacji między TPO a temperaturą powietrza na stacji Bellingshausen występują już w obrębie Cieśniny Drake'a (70°W; $r = +0.63$). Taki rozkład przestrzenny współczynników korelacji zdaje się sugerować, że związki między temperaturą powierzchni oceanu a temperaturą powietrza nie mają charakteru bezpośrednich oddziaływań cieplnych, lecz związane są z funkcjonowaniem fal długich. Musi to również wywierać wpływ na lokalizację ośrodków długookresowego „ochładzania” lub „ogrzewania” powierzchni oceanu.

Tworzenie się ośrodków o większych spadkach TPO niż na wodach otaczających, wykazujących dodatkowo indywidualne rozkłady trendów w funkcji czasu, jest najprawdopodobniej związane ze zróżnicowaną częstością wypływu chłodnego powietrza z wyższych szerokości nad dany obszar oceanu. Nie wydaje się, aby w skali wieloletniej wpływ na tworzenie się takich ośrodków mogła mieć fala cirkumantarktyczna (Witthe i Peterson 1996, de Verdiere i Blanc 2001). Fala ta, będąc falą bieżącą może wprowadzać duże zmiany międzyroczne temperatury powierzchni oceanu, jednak nie powinna ona dawać jednakowo ukierunkowanych zmian wieloletnich.

W szerokościach pięćdziesiątych wzrost natężenia zachodniej cyrkulacji atmosferycznej w ostatnich latach powinien doprowadzić do wzmocnienia transportu wód z wysokich szerokości na północ. Szczególnie silnie winno to zaznaczyć się we wschodniej, przylegającej do masywu lądowego Ameryki Południowej, części Oceanu Południowego. Przepuszczalnie taka jest natura ujemnych trendów temperatury na powierzchni wschodniej części sektora pacyficznego, na długościach od 100 do 80°W. Dodatkowym argumentem przemawiającym za taką właśnie interpretacją jest synchroniczność przebiegów zmian TPO w strefie szerokości sześćdziesiątych i pięćdziesiątych po wschodniej stronie sektora pacyficznego (ryc. 3 i ryc. 4).

Literatura

- Atlas Okeanov. Tikhij Okean, 1974, Ministerstvo Oborony SSSR, Voenno-Morskoj Flot, Moskva.
- de Verdiere A.C., Blanc M.L., 2001, Thermal resonance of the atmosphere to SST anomalies. Implications for the Antarctic circumpolar wave. *Tellus*, 53A: 403–424.
- Kejna M., Lagun V.E., 2004, Porównanie warunków klimatycznych na stacjach H. Arctowskiego i Belligshausen (Wyspa Króla Jerzego, Szetlandy Pd.) w latach 1977–1999. *Polish Polar Studies*, 30: 149–165.
- Marshall G.J., 2002, Trends in Antarctic Geopotential Height and Temperature: A Comparison between Radiosonde and NCEP-NCAR Reanalysis Data. *Journal of Climate*, 15 (6): 659–674.
- Reynolds R.W., Rayner N.A., Smith T.M., Stokes D.C., Wang W., 2002, An improved in situ and satellite SST analysis. *Journal of Climate*, 15: 1609–1625.
- Smith T.M., Reynolds R.W., 2002a, Bias correction for historical sea surface temperatures based on marine air temperatures. *Journal of Climate*, 15: 1609–1625.
- Smith T.M., Reynolds R.W., 2002b, Extended reconstruction of global seas surface temperatures based on COADS data 1854–1997. *Journal of Climate*, 16: 1495–1510.
- Smith T.M., Reynolds R.W., 2004, Improved Extended Reconstruction of SST (1854–1997). *Journal of Climate*, 17 (12): 2466–2477.
- Turner J., Colwell S. R., Marshall G.J., Lachlan-Cope T.A., Carleton A.M., Jones P.D., Lagun V., Reid P.A., Jagovkina S., 2005, Antarctic climate change during last 50 years. *International Journal of Climatology*, 25: 279–294.
- White W.B., Peterson R.G., 1996, An Antarctic circumpolar wave in surface pressure, wind, temperature and sea-ice extent. *Nature*, 380: 699–702.

Summary

This work deals with monthly and annual changes in sea surface temperature (SST) of the Pacific sector of the South Ocean observed in 60°–50°S latitudinal bands. The occurrence of negative trends of SST was noted in the entire 60° band and 1/3 of the trend coefficients is statistically significant and highly significant. The regions marked by strong cooling of ocean surface are formed by two centres – one 170°–140°W and the other extending from 120° to 080°W.

The greatest decrease in sea surface temperature in both centres takes place during cold season (May – August), in the other centre there is also additional quite strong cooling in the months of warm season (January – March). In the latitude 50°S the cooling is much weaker – statistically significant changes in SST are observed only in the eastern part of the Pacific region (100°–080°W) where negative trends are also noted.

Cumulating of statistically significant and non-significant monthly trends leads to statistically significant negative trends in annual SST observed in 54% of the area in the Pacific sector of the South Ocean. In the remaining area of the Pacific sector of the South Ocean there are either no visible changes in the sea surface temperature or there is tendency of weak decrease in temperature. The courses of annual SST indicate that in the western region (60S°, 170°–140°W) the SST has been decreasing constantly since the beginning of the observational period (since the year 1980), whereas in the eastern part of the Pacific sector (120°–080°W) the whole trend observed over the 25-year period results from strong decrease in annual SST in the period of last 7 years (1997–2004).