

ZMIANY TRENDU TEMPERATURY POWIETRZA NA ANTARKTYDZIE W LATACH 1958-2000

Marek Kejna

Uniwersytet Mikołaja Kopernika w Toruniu, Zakład Klimatologii
makej@geo.uni.torun.pl

1. Wstęp

Rosnąca koncentracja gazów cieplarnianych w atmosferze powoduje wzrost globalnej temperatury powietrza. Stężenie CO₂ w powietrzu na biegunie południowym wzrosło z 313 w 1957 r. do 338 w 1981 r. (Schwerdtfeger 1984) i 367 ppm w 2000 r. Według III raportu IPCC (2001) średnia temperatura na kuli ziemskiej wzrosła od 1880 r. o 0.6°C ±0°C. Ogromną niewiadomą jest reakcja obszarów polarnych na wzrost efektu cieplarnianego (King 1991). Klimat Antarktydy wykazuje znacznie większą zmienność w porównaniu do niższych szerokości półkuli południowej. Jest to uwarunkowane interakcjami jakie zachodzą między atmosferą, oceanem i kriosferą (King i Turner 1997). Dla Antarktyki pierwszy raport IPCC (1990) prognozował nawet 10°C ocieplenie w miesiącach zimowych. Według nowszych scenariuszy temperatura w obszarach polarnych wzrośnie o 3°C latem i 4-5°C zimą (III Raport IPCC, 2001).

Badania trendów temperatury powietrza na stacjach antarktycznych nie potwierdzają tych prognoz. Średni wzrost temperatury powietrza na Antarktydzie w latach 1958-1998 wyniósł od 1.2 do 1.3°C/100 lat (Jacka i Budd 1998, van den Broeke 2000), podczas gdy średni trend na półkuli południowej osiągnął tylko 0.57°C/100 lat. (Jones i in. 1999). Jedyne w rejonie Półwyspu Antarktycznego zanotowano większe ocieplenie sięgające 2.5°C w ciągu ostatnich 45 lat (King 1994, Jacobs i Comiso 1997). Wzrost temperatury był spowodowany zmianami jakie zaszły w funkcjonowaniu systemu klimatycznego Antarktydy. Wzajemne interakcje pomiędzy poszczególnymi elementami środowiska doprowadziły do zmian temperatury wody, systemu prądów morskich, położenia lodów morskich, zasięgu lądolodu i lodowców szelfowych (Stonehouse 1997).

Problem zmian klimatu Antarktydy był analizowany w szeregu pracach, np. Limbert 1974, Budd 1975, 1982, 1991, van Loon i Williams 1976, Carleton 1981, Mayes 1981, Raper i in. 1984, Jones 1985, Jones i in. 1986, Jones i Wigley 1988, Sansom 1989, Jones 1990, Košelkov 1990, Martianov i Rakusa-Suszczewski 1990, Weatherly i in., 1991, King 1994, Stark 1994, Jones 1995, Ackley i in.

1996, Smith i in. 1996, Jacka i Budd 1998, Marsz 1999, van den Broeke 2000, Marsz i Styszyńska 2000, Marshall i in. 2002, Styszyńska i Zblewski 2002, Kejna w druku.

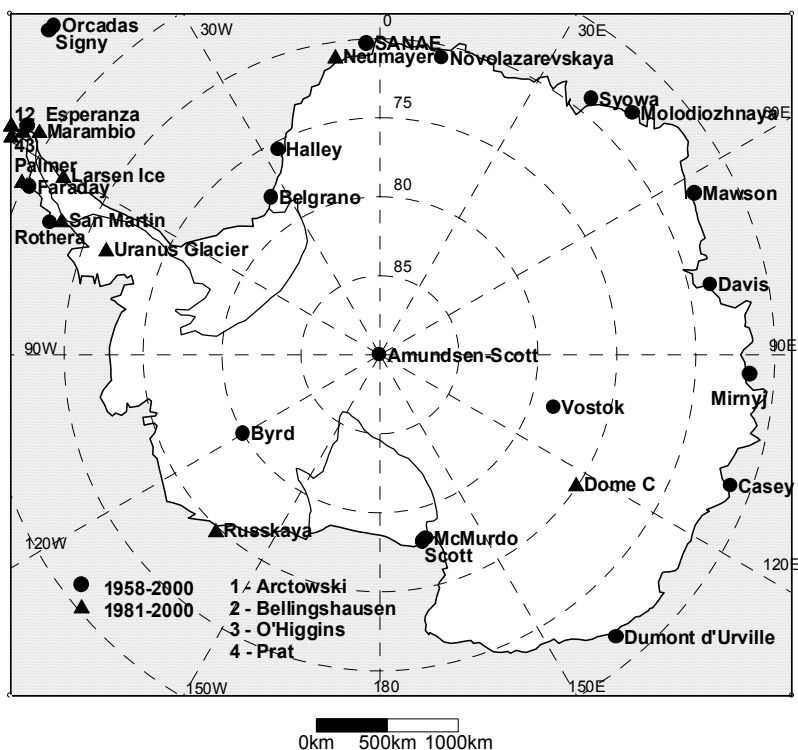
2. Materiały źródłowe i metodyka opracowania

Antarktyda jest najslabiej poznanym kontynentem na kuli ziemskiej. Pierwsze systematyczne pomiary meteorologiczne w Antarktyce przeprowadzono w czasie wypraw pod koniec XIX i na początku XX wieku, np. badania geofizyczne H. Arctowskiego i A. B. Dobrowolskiego w ramach belgijskiej wyprawy na statku „Belgica” (Wójcik i Marciniak 2002). Badania te wykazały, że początek XX wieku był znacznie chłodniejszy w porównaniu do drugiej połowy tego wieku (Jones 1990). Najdłuższą serię pomiarową (od 1903 r.) posiada stacja Orcadas na Orkadach Pd., jednak warunki jakie panują na tej subantarktycznej stacji nie odzwierciedlają zmian klimatu na Antarktydzie (Raper i in. 1984). Po założeniu szeregu stacji w ramach Międzynarodowego Roku Geofizycznego (1957-1959), w tym we wnętrzu kontynentu (Amundsen-Scott i Byrd w 1957 r. oraz Wostok w 1958 r.), możliwe stało się rozpoznanie warunków klimatycznych Antarktydy.

W opracowaniu wykorzystano średnie miesięczne wartości temperatury powietrza z 21 stacji działających na Antarktydzie w latach 1958-2000 oraz dla 34 stacji wykonujących pomiary w latach 1981-2000 (rys. 1). Dane pochodzą z różnych źródeł, np. Sprawochnik po klimatu Antarktydy t. 1 i 2, Monthly Climatic Data, opracowania Jonesa i Limberta 1987 oraz z baz danych dostępnych w Internecie z następujących instytucji: National Climatic Data Center, British Antarctic Survey, University of East Anglia, Australian Antarctic Division, Arktičesko-Antarktičeskij Issledovatelnyj Institut, NOAA-Environmental Research Laboratories oraz dane z automatycznych stacji meteorologicznych (AWS) z University of Wisconsin. Część danych uzyskano bezpośrednio w instytucjach narodowych państw prowadzących badania w Antarktyce.

Gęstość sieci stacji pomiarowych na Antarktydzie jest niedostateczna. We wnętrzu kontynentu obecnie funkcjonują dwie stałe stacje badawcze: Amundsen-Scott i Wostok uzupełniane przez sieć stacji automatycznych, z których tylko kilka posiada kilkunastoletnią serię pomiarową, np. Dome C i Byrd. Mimo to jednorodność śnieżno-lodowcowego podłoża wnętrza Antarktydy, pozwala ekstrapolować uzyskane wyniki na znaczne obszary (King i Turner 1997).

Analiza warunków klimatycznych na danym obszarze wymaga zastosowania danych homogenicznych, nie obciążonych błędami natury metodycznej, czy też zmieniającymi się warunkami otoczenia miejsca pomiarów. Niejednorodność serii pomiarowych w Antarktyce wynika z oddziaływania ekstremalnych warunków pogodowych, które powodują częste awarie i konieczność wymiany przyrządów pomiarowych. Coraz częściej termometry rtęciowe czy alkoholowe wymieniane są na elektryczne, a zamiast standardowych pomiarów wprowadza się pomiary automatyczne (King i Turner 1997). Zmianie ulega metodyka, terminy i częstość wykonywania pomiarów. W różny sposób wylicza się średnie wartości dobowe temperatury powietrza. Ponadto niektóre stacje antarktyczne ciągle przemieszczają się wraz z lodolodem lub lodowcami szelfowymi, a w przypadku zagrożenia są przenoszone w bezpieczniejsze miejsce. Jednorodności serii pomiarowych nie sprzyja również ciągła wymiana obserwatorów (Jones i Reid 2001). W porównaniu do innych obszarów serie antarktyczne są jednak wolne od bezpośrednich wpływów antropogenicznych, co znacznie podnosi ich wartość w zakresie badania zmienności klimatu.



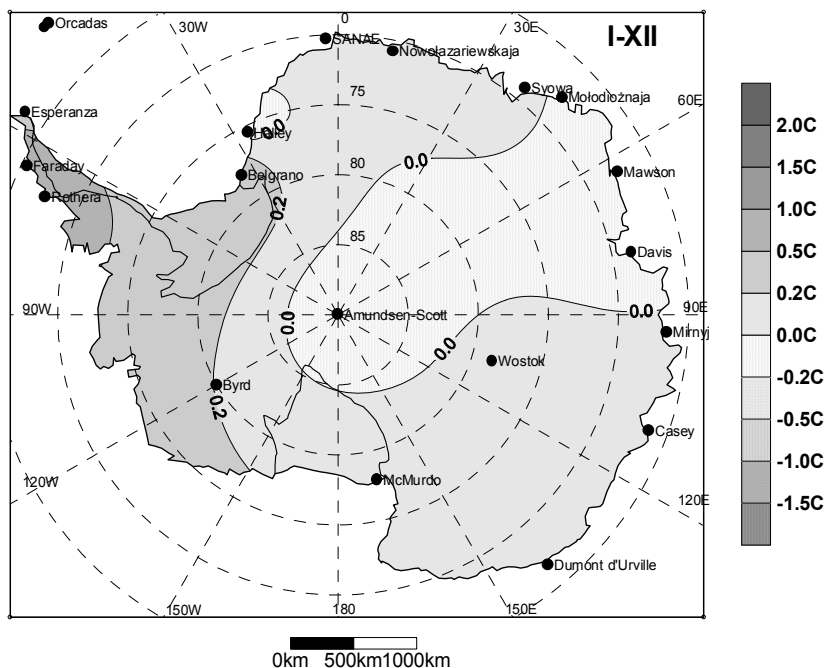
Rys. 1. Stacje antarktyczne wykorzystane w opracowaniu

Fig. 1. Antarctic stations used in this study

Serie pomiarowe posiadające braki uzupełniono stosując metodę regresji liniowej z sąsiednimi stacjami, obliczenia przeprowadzono dla każdego miesiąca oddzielnie. Uzupełnione serie poddano procedurze sprawdzenia homogeniczności. Jednorodna czasowo seria danych klimatycznych w porównaniu do sąsiednich stacji jest ciągiem wartości, któremu towarzyszą stale synchroniczne czasowo jednorodne serie referencyjne (Miętus 1996). W sprawdzeniu jednorodności danych serii ze stacji antarktycznych zastosowano test Alexanderssona (1986). Szczegółowy opis zastosowanych procedur omówiono w opracowaniu (Kejna, w druku). Po przeanalizowaniu homogeniczności serii danych średnich rocznych temperatur powietrza stwierdzono, że z 34 opracowanych stacji, aż w 16 wystąpiło zerwanie homogeniczności, spowodowane przeniesieniem stacji, zmianą aparatury lub metodyki pomiarowej. Po przywróceniu jednorodności analizowanym ciągom danych przeanalizowano zmiany temperatury powietrza na Antarktydzie w latach 1958-2000.

3. Trend temperatury powietrza na Antarktydzie w latach 1958-2000

Analizę trendów temperatury powietrza na Antarktydzie przeprowadzono dla okresu od Międzynarodowego Roku Geofizycznego, to jest od 1958 r. do 2000 r. (rys. 2 i 3).

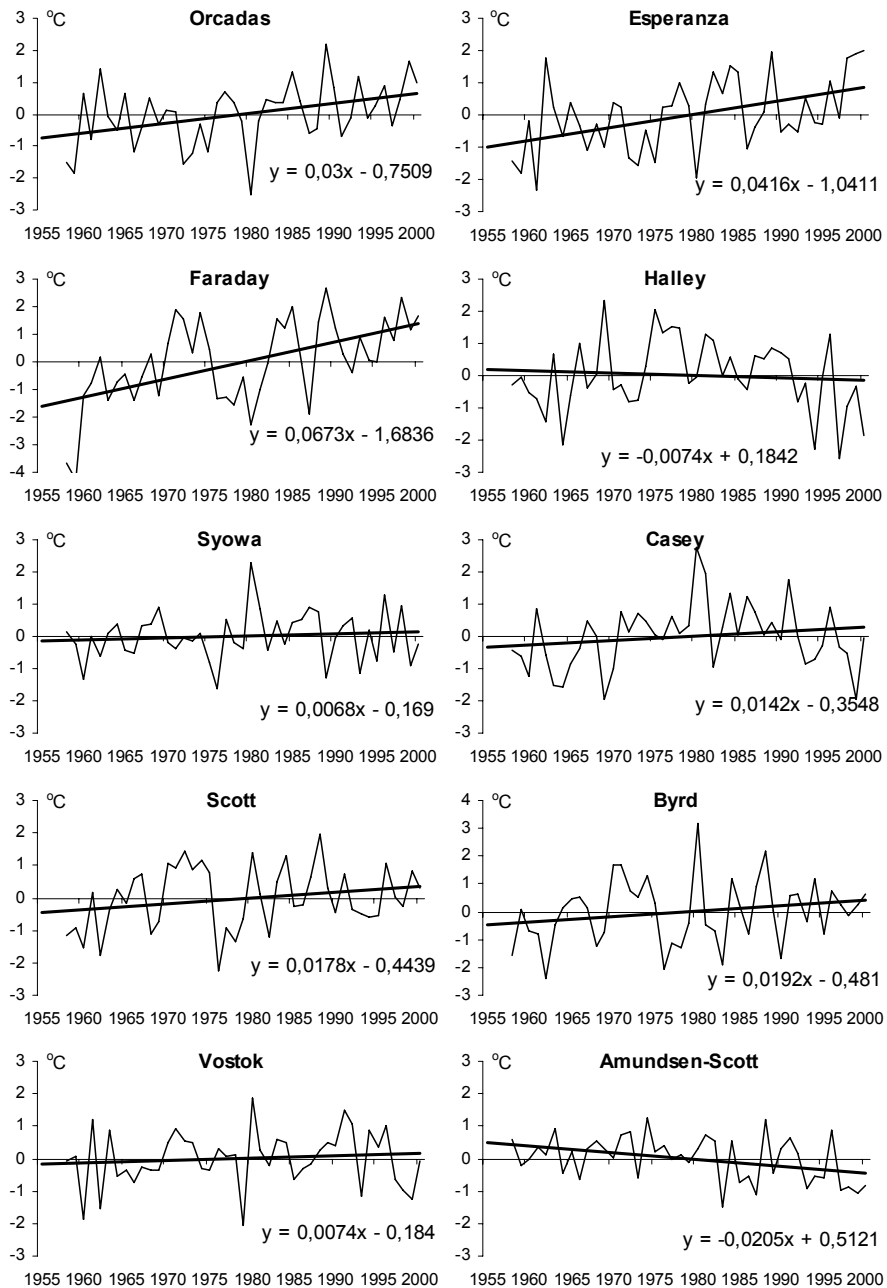


Rys. 2. Trendy temperatury powietrza (w °C/10 lat) na Antarktydzie w latach 1958-2000

Fig. 2. Trends of air temperature (in °C/10 years) on Antarctica in the years 1958-2000

Na Antarktydzie trend temperatury powietrza wykazuje znaczne zróżnicowanie terytorialne. Różnice te są związane z bilansem radiacyjnym zależnym od zmienności zachmurzenia i albedo powierzchni ziemi oraz od transformacji pola ciśnienia i zmian cyrkulacji atmosferycznej (King i Turner 1997). Istotny statystycznie (na poziomie 0.05) wzrost temperatury powietrza zanotowano jedynie w rejonie Półwyspu Antarktycznego (Faraday – 0.67°C/10 lat, Esperanza – 0.42°C/10 lat). Jest to obszar o największym wzroście temperatury na południowej półkuli w ostatnich 50. latach (Marshall i Lagun 2000). Ocieplenie sięgające 2.9°C od 1958 r. jest związane z nasileniem zachodniej cyrkulacji atmosferycznej i adwekcją cieplejszych oceanicznych mas powietrza (Schwerdtfeger 1975). Zmiana cyrkulacji powoduje wzrost zachmurzenia i opadów atmosferycznych w tym rejonie (King 1994). Występuje tu silne sprzężenie zwrotne: wzrastająca temperatura powietrza wpływa na zmniejszenie powierzchni lodów morskich na M. Bellingshausena, co zwiększa wymianę ciepła między powierzchnią oceanu a atmosferą, szczególnie w okresie zimowym (Jacobs i Comiso 1997). W rejonie zachodniego wybrzeża Półwyspu Antarktycznego szczególne znaczenie w kształtowaniu temperatury powietrza ma energoaktywna strefa jaka funkcjonuje na M. Bellingshausena (Styszyńska 2002). Wzrasta również oceanizm klimatu (Styszyńska i Zblewski 2002), wyraźnie zmniejsza się amplituda roczna temperatury powietrza (King 1994, Kejna w druku).

Istotny wzrost temperatury zanotowano również na stacji McMurdo nad Morzem Rossa (0.30°C/10 lat) oraz na południowym wybrzeżu M. Weddella na stacji Belgrano (0.42°C/10 lat). W pobliskiej stacji Halley w latach 1960-99 na poziomie 850 hPa temperatura wzrosła o 1.4°C/40 lat (Marshall 2002). Natomiast niewielkie ochłodzenie nastąpiło na wybrzeżu Antarktydy w sektorze



Rys. 3. Przebieg z roku na rok anomalii temperatury powietrza i ich trendy na wybranych stacjach antarktycznych w latach 1958-2000

Fig. 3. Year-to-year course of air temperature anomalies and their trends at selected Antarctic stations in the years 1958-2000

indyjskim (Davis – $-0.08^{\circ}\text{C}/10$ lat, Mawson – $-0.04^{\circ}\text{C}/10$ lat). Tendencje do ochładzania w tym regionie sygnalizowali już Jones i Wigley (1988) oraz Jacka (1990). We wnętrzu kontynentu na stacjach Byrd i Wostok w latach 1958-2000 stwierdzono niewielkie tendencje do wzrostu temperatury, nie są one jednak istotne statystycznie. Natomiast na biegunie południowym (Amundsen-Scott) temperatura powietrza obniżyła się znacznie ($-0.21^{\circ}\text{C}/10$ lat). Już w 1988 r. Jones (1985) donosił o ochłodzeniu na biegunie południowym sięgającym $-0.25^{\circ}\text{C}/\text{dekadę}$).

4. Zmiany trendu temperatury powietrza w latach 1958-1980 i 1981-2000

Wyraźnym punktem zwrotnym w przebiegu temperatury powietrza na Antarktydzie był początek lat 80-tych XX wieku. W wielu pracach przyjmuje się tą datę za początek zmian jakie zaszły w systemie klimatycznym Antarktydy (van den Broeke 1998b, 2000). Marshall i King 1998 uważają, że zmiana ta wystąpiła zimą 1983 r. po ekstremalnie silnym El Niño.

W przebiegu temperatury powietrza na Antarktydzie zaznaczyły się istotne zmiany na przełomie lat 70 i 80-tych XX wieku (rys. 3). W rejonie Półwyspu Antarktycznego po silnym ochłodzeniu w 1980 r. nastąpił znaczny wzrost temperatury powietrza, natomiast na wybrzeżu i w centralnych rejonach Antarktydy Wschodniej rozpoczęło się wyraźne ochłodzenie.

Przyczyn tej zmiany można doszukiwać się w pojawieniu się ozonowej anomalii stratosferycznej nad Antarktydą (Farman i in. 1985). Wraz z ubytkiem ozonu temperatura powietrza w stratosferze zaczęła się obniżać (Aleksandrov i Majstrova 1998). Od końca lat 70-tych temperatura w stratosferze obniżyła się w tempie $1-2^{\circ}\text{C}/10$ lat, głównie w okresie wiosennym (Trenberth i Olson 1989, Košelkov i in. 1993). Zaburzenia w stratosferze i troposferze spowodowały zmianę wysokości powierzchni geopotencjalnych (Marshall 2002) oraz przebudowę systemu cyrkulacji powietrza w rejonie Antarktydy. Po 1976 r. w szerokościach umiarkowanych nastąpiła zmiana struktury pola ciśnienia z 2 na 3-falową (Swanson i Trenberth 1981). W pobliżu Antarktydy ciśnienie obniżyło się (Hurrell i van Loon 1994), wielkość spadku ciśnienia w osi bruzdy niskiego ciśnienia sięga 4-8 hPa (Lubin i in. 1998). Największe spadki ciśnienia zanotowano w rejonie Półwyspu Antarktycznego (Jones i Wigley 1988). Wzrosły gradienty ciśnienia między umiarkowanymi a wysokimi szerokościami geograficznymi. Indeks Oscylacji Antarktycznej (AAOI) wykazywał niskie wartości w latach 60-tych i wczesnych 70-tych, by znacznie wzrosnąć od początku lat 80-tych XX wieku (Gong i Wang 1998).

Trajektorie niżów w szerokościach umiarkowanych półkuli południowej sięgają coraz bardziej na południe (Burnett i McNicoll 2000). Wzrosła liczba cyklonów w szerokościach umiarkowanych (Mo i White 1985), co powoduje również nasilenie wiatrów zachodnich (Raper i in. 1984). Napływ wilgotnych mas powietrza oceanicznego przejawia się wzrostem temperatury i zwiększonym zachmurzeniem na zachodnim wybrzeżu Półwyspu Antarktycznego (King 1994).

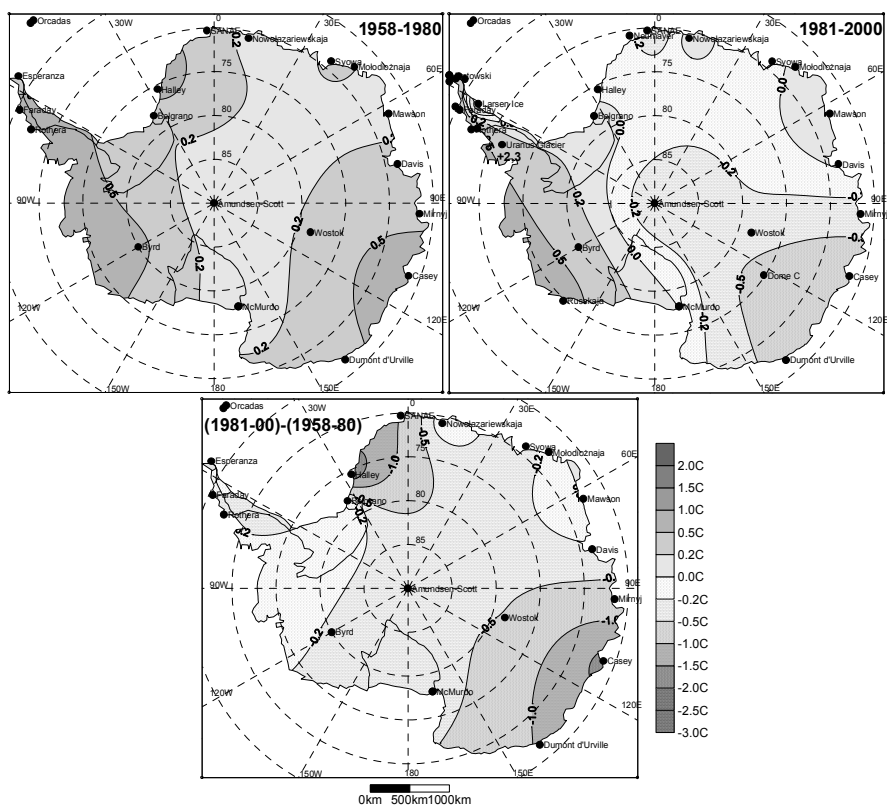
Począwszy od lat 80-tych XX wieku na południowym Pacyfiku antycyklon podzwrotnikowy nie rozbudowuje się w kierunku wyższych szerokości poza 40°S (Sinclair 1996). Spowodowało to osłabienie półrocznych oscylacji ciśnienia (SAO - Semiannual Oscillation), zwłaszcza po 1976 r. (van Loon 1993, Hurrell i van Loon 1994, Mo 2000), a w konsekwencji zmniejszenie południkowej wymiany mas powietrza między Antarktydą a niższymi szerokościami półkuli południowej. Nasilenie strefowej cyrkulacji atmosferycznej, a osłabienie wymiany południkowej (osłabienie SAO), prowadzi do obniżenia temperatury na kontynencie, np. na biegunie południowym temperatura wykazuje ujemną korelację z prędkością wiatrów zachodnich (van Loon i Williams 1976). W niektórych

rejonach Antarktydy zanotowano znaczne spadki temperatury w ostatnich latach (van den Broeke 2000). Zmiany te mogą być spowodowane transformacjami wyżu antarktycznego (Astapenko 1960).

Na Antarktydzie dla dłuższego okresu większość stacji wykazuje pozytywny trend temperatury powietrza, jednak w ostatnim 20-leciu przeważają trendy negatywne. Jest to znaczne zaskoczenie, wzięwszy pod uwagę globalne ocieplenie, które nasiliło się w ostatnich latach (Jones i in. 1999).

1958-1980

W latach 1958-1980 na Antarktydzie dominowały dodatnie trendy temperatury powietrza (tab. 1, rys. 4). Największy wzrost temperatury wystąpił na zachodnim wybrzeżu Półwyspu Antarktycznego (Faraday – $0.76^{\circ}\text{C}/10$ lat) oraz w niektórych stacjach na wybrzeżu Antarktydy Wschodniej (Casey – $0.84^{\circ}\text{C}/10$ lat, McMurdo – $0.49^{\circ}\text{C}/10$ lat) i w basenie M. Weddella (Halley – $0.69^{\circ}\text{C}/10$ lat). Na stacji Dumont d'Urville w latach 1957-89 wystąpił istotny trend sięgający $0.26^{\circ}\text{C}/10$ lat (Periard i Petre 1993). We wnętrzu kontynentu również zanotowano wzrost temperatury, a szczególnie na Antarktydzie Zachodniej (Byrd $0.58^{\circ}\text{C}/10$ lat), mniejsze ocieplenie wystąpiło na Antarktydzie Wschodniej (Wostok – $0.26^{\circ}\text{C}/10$ lat). Na biegunie południowym trend był zbliżony do zerowego.



Rys. 4. Trendy (w $^{\circ}\text{C}/10$ lat) średniej rocznej temperatury powietrza na Antarktydzie w latach 1958-1980 i 1981-2000 oraz różnica trendu pomiędzy tymi okresami

Fig. 4. Trends ($^{\circ}\text{C}/10$ years) of mean annual temperature on Antarctica in the years 1958-1980 and 1981-2000 and the differences between these periods

Tabela 1 – Table 1

Trendy temperatury powietrza (w °C/10 lat) na Antarktydzie w latach 1958-1980 i 1981-2000

Trends of air temperature (in °C/10 years) on Antarctica in the years 1958-1980 and 1981-2000

Stacja Station	1958 - 1980					1981 - 2000				
	XII-I	III-V	VI-VIII	IX-XI	I-XII	XII-I	III-V	VI-VIII	IX-XI	I-XII
Amundsen-Scott	0.23	0.86*	-1.06*	0.12	0.04	-0.49	-1.14*	-0.23	0.12	-0.42
Arctowski						0.37	0.95*	0.09	-0.14	0.32
Belgrano II	0.64*	0.33	-0.06	0.92	0.19	-0.01	-0.70*	-1.43	1.54*	0.16
Bellingshausen						0.26	0.81*	0.07	-0.02	0.23
Byrd	0.42	0.56*	1.01*	0.35	0.58*	0.38	-0.70	1.31*	0.45	0.37
Casey	0.54*	0.53	0.71	0.67*	0.84*	-0.92*	-1.93*	-0.22	-0.19	-0.82*
Davis	0.56*	-0.10	0.14	0.43	0.26	-0.19	-0.56	1.06	0.64	0.02
Dome C						-0.02	-1.82*	-0.70	-0.28	-0.71*
Dumont d'Urville	0.47*	-0.26	0.99*	0.41*	0.40*	-0.78	-1.18*	-0.73	0.15	-0.64*
Esperanza	-0.03	0.53	0.19	0.08	0.19	0.48	1.62*	-0.63	-0.36	0.28
Faraday	0.36*	1.21*	-0.26	-0.44	0.76*	0.05	0.30	1.13*	0.73*	0.56
Frei						0.25	0.60	0.18	-0.36	0.06
Halley	0.55*	1.46*	0.29	0.86*	0.69*	-0.57	-1.71*	-1.91*	-0.32	-1.13*
Larsen Ice						-0.05	0.15	-0.45	-3.22*	-0.89
Marambio						0.05	2.09*	-1.00	-0.32	0.40
Mawson	0.47*	-0.21	0.37	0.46*	0.15	-0.57	-0.21	1.27*	0.16	0.16
McMurdo	0.06	0.92*	0.67	-0.27	0.49*	0.77	-1.36*	-0.47*	0.92*	0.20
Mirnyj	0.42*	0.36	0.72	0.48	0.37*	-0.66	-1.09*	0.47	0.04	-0.31
Mołodiożnaja	0.23	-0.20	-0.01	0.78*	0.20	-0.11	-0.20	0.66*	0.39	0.18
Neumayer						-0.23	-1.28*	0.31	0.00	-0.03
Nowożarijewskaja	0.59*	1.17*	-0.27	0.77*	0.09	-0.57	-0.87	0.27	0.01	0.12
O'Higgins						0.26	0.71*	0.09	-0.27	0.26
Orcadas	0.20	0.06	-0.16	-0.35	-0.06	0.17	0.53	0.56	-0.30	0.24
Palmer						0.27	0.98*	0.92*	0.33	0.63
Prat						0.39	0.83*	0.29	0.01	0.38
Rothera						0.13	0.68*	0.24	0.45	0.38
Russkaja						1.64	0.40	0.87	-0.33	0.64
STANAE	0.83*	1.27*	-0.43	0.24	0.43	-0.59	-0.73	-0.30	-0.61	-0.56
San Martin						0.35	0.75*	0.53	0.64*	0.66
Scott	0.30	0.89*	0.55	-0.08	0.04	-0.12	-1.36	0.34	1.14*	0.00
Signy	0.28	0.66*	0.46	0.12	-0.01	-0.11	0.17	0.17	-0.41	-0.04
Syowa	0.19	0.25	-0.02	0.49*	0.23*	-0.12	-1.21*	-0.03	0.09	-0.25
Uranus Glacier						1.67*	3.61*	2.10*	1.76*	2.29*
Wostok	0.26	0.36	0.24	-0.10	0.26*	-0.40	-0.75	0.21*	-0.56	-0.26

* - istotne statystycznie na poziomie 0.05 – statistically significant at the level 0.05

Jedynie na Orkadach Południowych stwierdzono nieznaczne ochłodzenie (stacje Orcadas i Signy). W 1984 r. Schwerdtfeger analizując dane ze stacji Orcadas stwierdził, że w latach 1908-1930 wystąpiło ochłodzenie, a od 1931 tendencja uległa odwróceniu aż do 1956 r., potem ponownie rozpoczęło się ochłodzenie.

1981-2000

W latach 1981-2000 wzrost temperatury powietrza na zachodnim wybrzeżu Półwyspu Antarktycznego był kontynuowany, jednak jego tempo uległo nieznacznemu osłabieniu (Jones 1995, Timofeyev i in. 2002). Największy wzrost temperatury zanotowano na stacjach w środkowej części Półwyspu (Palmer – $0.63^{\circ}\text{C}/10$ lat Faraday – $0.56^{\circ}\text{C}/10$ lat, Rothera – $0.38^{\circ}\text{C}/10$ lat), mniejszy zaś w jego części północnej (Bellingshausen – $0.22^{\circ}\text{C}/10$ lat, Esperanza – $0.28^{\circ}\text{C}/10$ lat, Arctowski – $0.32^{\circ}\text{C}/10$ lat) – patrz tabela 1, rysunek 4. W rejonie tym na wartości trendu wpłynęły wyjątkowo chłodne zimy w latach 1991, 1992 i 1995 i chłodne wiosny 1994, 1995 i 1997 i 1998 r. związane z adwekcją mroźnych mas powietrza z południa i południowego-wschodu (Kejna 1999), które napływają wzdłuż wschodnich wybrzeży Półwyspu Antarktycznego w postaci wiatrów barierowych (Schwerdtfeger 1984).

Nadal ocieplaniu podlegała Antarktyda Zachodnia (Byrd 0.45°C). W niektórych rejonach zmiany są dramatyczne, np. stacja Uranus Glacier wykazuje ocieplenie $2.29^{\circ}\text{C}/10$ lat wzrost ten może być jednak uwarunkowany czynnikami lokalnymi, np. cofaniem się lodowców i rozpadem lodowców szelfowych (Vaughan i Doake 1996)

Na Antarktydzie Wschodniej, za wyjątkiem Ziemi Enderby, notuje się znaczne ochłodzenie w ostatnich latach. Największy spadek temperatury zanotowano na Ziemi Wilkesa (Casey – $-0.82^{\circ}\text{C}/10$ lat, Dumont d'Urville – $-0.64^{\circ}\text{C}/10$ lat) oraz w basenie M. Weddella (Halley – $-1.13^{\circ}\text{C}/10$ lat) i na wschodnich wybrzeżach Półwyspu Antarktycznego (Larsen Ice – $-0.89^{\circ}\text{C}/10$ lat). Jest to spowodowane zmianami jakie nastąpiły w systemie cyrkulacyjnym w rejonie Antarktydy. Wokółantarktyczna bruzda niskiego ciśnienia nie przemieszcza się tak daleko na południe (osłabienie SAO) stąd też wybrzeże kontynentu znalazło się pod silniejszym wpływem mroźnych mas powietrza z głębi kontynentu (van den Broeke 2000). Wielkość ochłodzenia wywołanego redukcją południkowej wymiany mas powietrza i osłabieniem północnej oscylacji ciśnienia szacuje się na -0.26°C . Ujemny trend temperatury powietrza w latach 1979-1998 sięga dla całej Antarktydy $-0.008^{\circ}\text{C}/\text{rok}$ (van den Broeke 1998). Nastąpiły również zmiany systemu drenujących spływów mas powietrza z wnętrza kontynentu (Lubin i in. 1998). W centrum kontynentu w latach 1981-2000 ochłodzenie się nasiliło i wyniosło na stacji Dome C $-0.71^{\circ}\text{C}/10$ lat, Amundsen-Scott $-0.42^{\circ}\text{C}/10$ lat, Wostok $-0.26^{\circ}\text{C}/10$ lat. Potwierdzają to dane satelitarne, które w Antarktydzie Wschodniej dla okresu 1979-98 wykazały spadek temperatury o -0.34°C na dekadę (Comiso 1994).

Porównując trendy w latach 1958-1980 i 1981-2000 należy stwierdzić, że nastąpiło wyraźne zmniejszenie tempa wzrostu temperatury na Antarktydzie Zachodniej, np. na stacji Faraday z 0.76 do $0.56^{\circ}\text{C}/10$ lat, na stacji Byrd z 0.58 do $0.37^{\circ}\text{C}/10$ lat, natomiast na Antarktydzie Wschodniej dodatnia tendencja temperatury uległa odwróceniu i w ostatnim 20-leciu notuje się obniżenie się temperatury powietrza na większości stacji. Największe zmiany wystąpiły na Ziemi Wilkesa (np. na stacji Casey trend się zmienił z 0.84 na $-0.82^{\circ}\text{C}/10$ lat, na Dumont d'Urville z 0.40 na $-0.64^{\circ}\text{C}/10$ lat). Przyczyną tak silnego ochłodzenia jest lokalne wzmoczenie adwekcji z wnętrza kontynentu (van den Broeke 2000).

Ochłodzeniu uległ też cały basen Morza Weddella, np. na stacji Halley nastąpiła zmiana znaku trendu z $0.69^{\circ}\text{C}/10$ lat w latach 1958-1980 do $-1.13^{\circ}\text{C}/10$ lat w latach 1981-2000. Jeszcze w latach 1957-1990 na stacji Halley przeważał trend ocieplający, sięgający $0.32^{\circ}\text{C}/10$ lat (King 1994), natomiast w latach 90-tych nastąpiło znaczne ochłodzenie z najzimniejszym 1994 rokiem kiedy to średnia roczna temperatura wyniosła -21.0°C . W okresie tym nastąpiło wyraźne zmniejszenie prędkości wiatru i zachmurzenia (van den Broeke 2000).

Na biegunie południowym w latach 1958-1980 nie stwierdzono istotnego trendu ($0.04^{\circ}\text{C}/10$ lat), natomiast w ostatnim okresie wystąpiło tam znaczące ochłodzenie ($-0.42^{\circ}\text{C}/10$ lat). Między 1976 a 1985 r. na stacji Amundsen-Scott wystąpił wyraźny spadek insolacji w miesiącach letnich (styczeń-luty) związany ze wzrostem zachmurzenia (Dutton i in 1991).

5. Zmiany trendu temperatury w poszczególnych porach roku

Skrajnie nierównomierny dopływ energii słonecznej w ciągu roku (Maršunova 1980), zmiany powierzchni lodów morskich oraz zmiany w systemie cyrkulacyjnym atmosfery powodują, iż na Antarkydzie występuje znaczne zróżnicowanie trendów temperatury powietrza w zależności od pór roku. Trend w okresie zimowym jest 2.5 razy większy niż latem (Stark 1994).

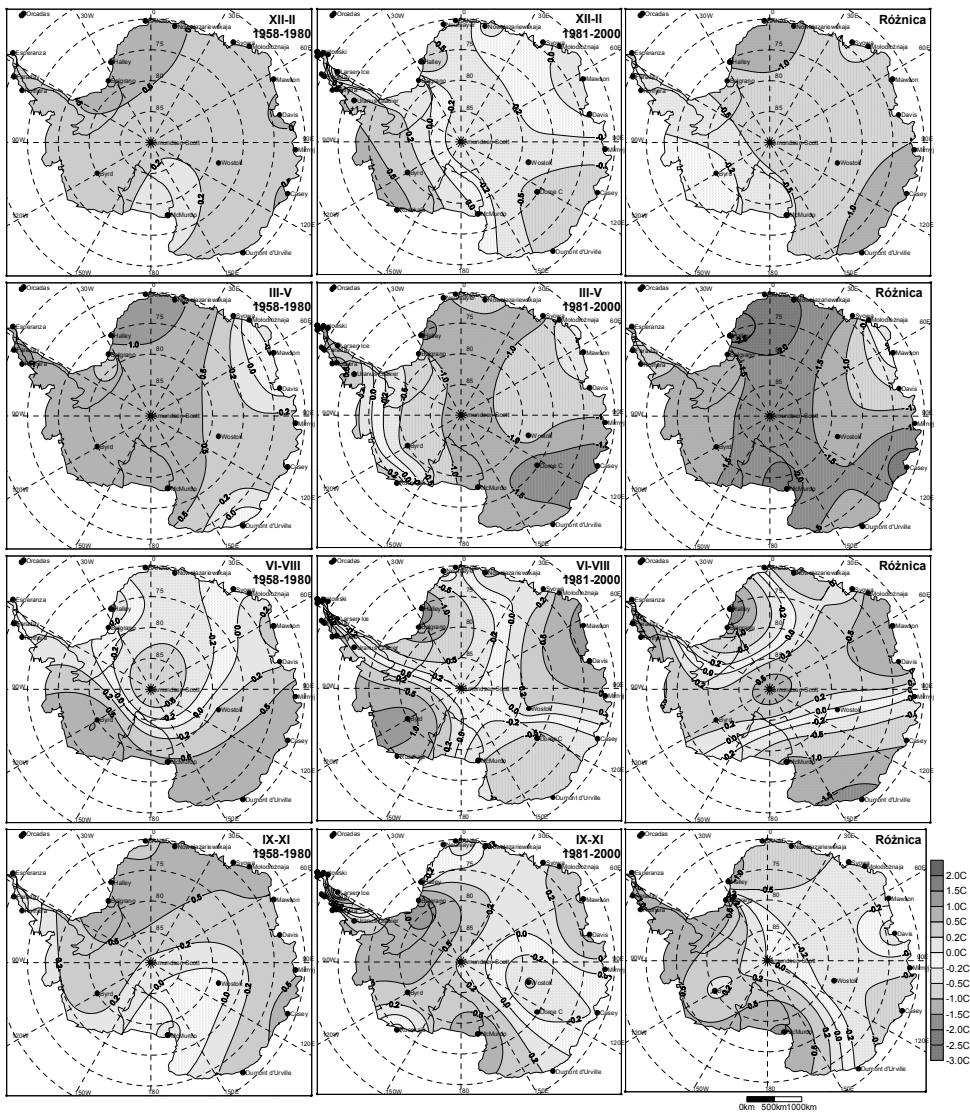
Lato

W okresie letnim w latach 1958-1980 na całej Antarkydzie dominowały trendy rosnące temperatury powietrza (tab. 1, rys. 5). Największe zmiany wystąpiły na wybrzeżu kontynentu, np. SANAE – $0.83^{\circ}\text{C}/10$ lat, Belgrano – $0.64^{\circ}\text{C}/10$ lat, Nowożariwskaja – $0.59^{\circ}\text{C}/10$ lat, Halley – $0.55^{\circ}\text{C}/10$ lat, mniejsze zaś we wnętrzu Antarktydy (np. Amundsen-Scott – $0.23^{\circ}\text{C}/10$ lat). Na Półwyspie Antarktycznym zanotowano nieznaczny wzrost temperatury w środkowej części zachodniego wybrzeża (Faraday – $0.36^{\circ}\text{C}/10$ lat). W lecie kiedy morze jest wolne od lodu zmienność temperatury jest mała (Stark 1994). Natomiast na północnym krańcu Półwyspu (Marambio) i na Orkadach Pd. wystąpiły ujemne tendencje temperatury powietrza.

W latach 1981-2000 w okresie letnim na większości obszaru Antarktydy Wschodniej zaznaczyły się tendencje do ochłodzenia, zarówno na wybrzeżu (Casey – $-0.92^{\circ}\text{C}/10$ lat, Mirnyj – $-0.66^{\circ}\text{C}/10$ lat, SANAE – $-0.59^{\circ}\text{C}/10$ lat), jak i we wnętrzu kontynentu (Amundsen-Scott – $-0.49^{\circ}\text{C}/10$ lat, Wostok – $-0.40^{\circ}\text{C}/10$ lat). Wzrost temperatury zanotowano jedynie na NW wybrzeżu Półwyspu Antarktycznego (Esperanza – $0.48^{\circ}\text{C}/10$ lat, Arctowski – $0.37^{\circ}\text{C}/10$ lat). Na stacji Bellingshausen w okresie od 1968 do 2000 r. największy wzrost temperatury zanotowano w styczniu $0.36^{\circ}\text{C}/10$ lat (Lagun i Marshall 2001). W środkowej części Półwyspu letnie ocieplenie się nie zaznaczyło (Faraday – $0.05^{\circ}\text{C}/10$ lat). Znaczny wzrost temperatury wystąpił na Antarktyce Zachodniej (Byrd $0.38^{\circ}\text{C}/10$ lat i Russkaja (wzrost o 1.6°C w latach 1980-1990), a szczególnie na stacji Uranus Glacier ($1.67^{\circ}\text{C}/10$ lat).

Jesień

W latach 1958-1980 w jesieni dominowała tendencja rosnąca temperatury powietrza. Bardzo znaczny wzrost temperatury wystąpił na Półwyspie Antarktycznym (Faraday – $1.21^{\circ}\text{C}/10$ lat) oraz w basenie Morza Weddella (Halley – $1.46^{\circ}\text{C}/10$ lat, SANAE – $1.27^{\circ}\text{C}/10$ lat). Košelkov (1990) ocenia, że średni trend dla stacji Bellingshausen, Faraday i Halley wyniósł w jesieni $0.51^{\circ}\text{C}/10$ lat.



Rys. 5. Trendy (w °C/10 lat) temperatury powietrza w poszczególnych porach roku na Antarktydzie w latach 1958-1980 i 1981-2000 oraz różnice trendu pomiędzy tymi okresami

Fig. 5. Trends (°C/10 years) of air temperature in separate seasons on Antarctica in the years 1958-1980 and 1981-2000 and the differences between these periods

Ujemne tendencje zanotowano natomiast na Ziemi Wilkesa (Dumont d'Urville, Mawson). W centralnych rejonach kontynentu wystąpił znaczny wzrost temperatury (np. Amundsen-Scott – 0.86 °C/10 lat).

W latach 1981-2000 wystąpiły bardzo znaczne spadki temperatury wzdłuż całego wybrzeża Antarktydy od stacji Belgrano (-0.70°C/10 lat) i Halley (-1.71°C/10 lat) poprzez Casey (-1.93°C/10 lat) i Dumont d'Urville (-1.82°C/10 lat) aż po Scott (-1.36°C/10 lat). We wnętrzu kontynentu obniżenie

temperatury w jesieni również było bardzo duże (Dome C – $-1.82^{\circ}\text{C}/10$ lat, Amundsen-Scott – $-1.14^{\circ}\text{C}/10$ lat i Wostok – $-0.75^{\circ}\text{C}/10$ lat). Natomiast na Półwyspie Antarktycznym w jesieni zanotowano znaczny wzrost temperatury, np. Esperanza – $1.62^{\circ}\text{C}/10$ lat, Marambio – $2.09^{\circ}\text{C}/10$ lat, Palmer – $0.98^{\circ}\text{C}/10$ lat i rekordowy wzrost na stacji Uranus Glacier – $3.61^{\circ}\text{C}/10$ lat.

Zima

Zimowe temperatury powietrza są bardziej wrażliwe na niewielkie zmiany cyrkulacji, ze względu na większy południkowy gradient między Antarktydą a otaczającym oceanem (van Loon 1972). Okres zimowy na Antarktydzie w latach 1958-1980 charakteryzował się zróżnicowanymi trendami temperatury powietrza. We wnętrzu kontynentu silne obniżenie temperatury wystąpiło na biegunie południowym (Amundsen-Scott – $-1.06^{\circ}\text{C}/10$ lat), a wzrost w pozostałych stacjach wewnątrz kontynentalnych (np. Byrd – $1.01^{\circ}\text{C}/10$ lat). Na Półwyspie Antarktycznym dominowały spadki temperatury (Faraday – $0.26^{\circ}\text{C}/10$ lat), chociaż jeszcze w latach 1956-1973 dominował tu trend dodatni, a temperatura wzrosła o 0.35°C (van Loon i Shea 1988). Na wybrzeżu Antarktydy Wschodniej trendy były bardzo zróżnicowane: od $0.99^{\circ}\text{C}/10$ lat na stacji Dumont d'Urville do $-0.43^{\circ}\text{C}/10$ lat na stacji SANAE. Generalnie jednak na wybrzeżu między 40°E a Lodowcem Szelfowym Ronne i wschodnią częścią Półwyspu Antarktycznego dominują ujemne trendy temperatury powietrza (Raper i in. 1984).

W ostatnich latach XX wieku znaczny wzrost temperatury powietrza w okresie zimowym wystąpił na zachodnim wybrzeżu Półwyspu Antarktycznego (Faraday – $1.13^{\circ}\text{C}/10$ lat, Palmer – $0.92^{\circ}\text{C}/10$ lat). Ekstremalnie wysokie zmiany zanotowano na Wyspie Aleksandra, na stacji Uranus Glacier trend wyniósł $2.10^{\circ}\text{C}/10$ lat. Ciepłe zimy w tym rejonie są związane ze wzrostem aktywności cyklonalnej na M. Bellingshausena, która indukuje anomalną południkową cyrkulację, z adwekcją ciepłych mas powietrza z północy (Marshall i King 1998) oraz wzrostem wymiany ciepła w energoaktywnej strefie na M. Bellingshausena (Styszyńska 2002). Wzrost temperatury zanotowano również na Ziemi Marii Byrd (Byrd – $1.31^{\circ}\text{C}/10$ lat, Russkaja – $0.87^{\circ}\text{C}/10$ lat) na Antarktydzie Zachodniej oraz na Ziemi Enderby (Mawson – $1.27^{\circ}\text{C}/10$ lat, Mołodiożnaja – $0.66^{\circ}\text{C}/10$ lat) i w zachodniej części Ziemi Wilkesa (Davis – $1.06^{\circ}\text{C}/10$ lat, Mirnyj – $0.47^{\circ}\text{C}/10$ lat).

Wyraźne ochłodzenie wystąpiło w basenie M. Weddella (Belgrano II – $-1.43^{\circ}\text{C}/10$ lat, Halley – $-1.91^{\circ}\text{C}/10$ lat) oraz na wschodnim wybrzeżu Półwyspu Antarktycznego (Marambio – $-1.0^{\circ}\text{C}/10$ lat, Larsen Ice – $-0.45^{\circ}\text{C}/10$ lat). Różnice w trendach temperatury w analizowanych okresach mogą być związane z rozległą połynią jaka utworzyła się na M. Weddella w latach 1974-1976, jej zanik w latach 1978-87 spowodował ochłodzenie w latach 80-tych w tym rejonie (Simmonds i Jacka 1995). Ochłodzenie objęło również wschodnią część Ziemi Wilkesa (Dumont d'Urville ($-0.73^{\circ}\text{C}/10$ lat) i Ziemię Wiktorii. W centrum kontynentu nie wystąpiły istotne zmiany temperatury ze względu na stabilizujący wpływ głębokiej przypowierzchniowa inwersji temperatury (Connolley 1996). Jedynie w maju i czerwcu zanotowano wyraźny spadek temperatury związany z osłabieniem SAO od początku lat 80-tych (van den Broeke 1998).

Wiosna

Na wiosnę w latach 1958-1980 ochłodzenie zanotowano na Półwyspie Antarktycznym i na Orkadach Południowych, a w pozostałych rejonach wystąpiły dość znaczne wzrosty temperatury, np. w basenie M. Weddella (Belgrano – $0.92^{\circ}\text{C}/10$ lat, Halley – $0.86^{\circ}\text{C}/10$ lat). W centrum kontynentu nie zanotowano istotnie statystycznych zmian temperatury powietrza.

W latach 1981-2000 ochłodzenie wystąpiło w najwyższych partiach lodowcowego plateau Antarktydy (Dome C – $-0.28^{\circ}\text{C}/10$ lat, Wostok – $-0.56^{\circ}\text{C}/10$ lat) oraz na wschodnim wybrzeżu Półwyspu Antarktycznego (Larsen Ice – $-3.22^{\circ}\text{C}/10$ lat). Ujemny trend temperatury na wiosnę zaznaczył się również w północnej części Półwyspu, np. na stacji Bellingshausen (Marshall i Lagun 2000). Ochłodzenie zanotowano również na stacji (SANAE – $-0.41^{\circ}\text{C}/10$ lat) i na Orkadach Południowych. W pozostałych rejonach Antarktydy zanotowano wzrost temperatury (Belgrano II o $1.54^{\circ}\text{C}/10$ lat, Faraday – $0.73^{\circ}\text{C}/10$ lat, Scott – $1.14^{\circ}\text{C}/10$ lat. Na stacji Syowa w latach 1961-1990 wiosną notowano ochłodzenie (Jones 1995), jednak w ostatnich latach trend był w tej porze roku zbliżony do zerowego.

6. Podsumowanie i dyskusja wyników

Na Antarktydzie występuje znaczne zróżnicowanie regionalne trendów temperatury powietrza. Zróżnicowanie to wynika z funkcjonowania dwóch mechanizmów w obrębie systemu klimatycznego Antarktydy. Pierwszy z nich związany jest z bilansem energii słonecznej podlegającym zmienności wywołanej zachmurzeniem lub albedem powierzchni. Drugi natomiast wynika ze zmienności cyrkulacji atmosferycznej, adwekcji ciepłych bądź chłodnych mas powietrza (King i Turner 1997).

Dane z lat 1958-2000 potwierdzają sygnalizowany we wcześniejszych pracach wzrost temperatury powietrza w Zachodniej Antarktyce. Badania rdzeni lodowych na Półwyspie Antarktycznym wykazały, że ostatnie 2 dekady były najcieplejszymi od 5 stuleci (Thomson i in. 1994). Jednak w pozostałych rejonach Antarktydy, w tym na biegunie południowym, zaznacza się tendencja ku ochłodzeniu klimatu.

Porównując lata 1958-1980 i 1981-2000 stwierdzono istotne zmiany w kierunku i wartościach trendów temperatury powietrza. O ile w latach 1958-2000 na większości obszaru kontynentu przeważały wzrosty temperatury, o tyle w ostatnich 20 latach XX wieku zanotowano na Antarktydzie zróżnicowane trendy temperatury powietrza. Na Antarktydzie Zachodniej utrzymywał się rosnący trend temperatury, natomiast na Antarktydzie Wschodniej, zarówno na wybrzeżu, jak i w głębi kontynentu dominował trend ku ochłodzeniu klimatu. Zmiany te wykazywały znaczne zróżnicowanie w poszczególnych porach roku.

Na Orkadach Pd. ocieplenie zanotowano we wszystkich porach roku, za wyjątkiem wiosny. Największy wzrost temperatury wystąpił w okresie jesienno-zimowym, jest on związany z zasięgiem i długością utrzymywania się pokrywy lodowej (Raper i in. 1984). W ostatnich latach nastąpiły również istotne zmiany w systemie cyrkulacyjnym w rejonie Orkadów Południowych opisywane przez półroczną oscylację ciśnienia (SAO) (Weatherly i in. 1991, van den Broeke 1998).

Zachodnie wybrzeże Półwyspu Antarktycznego jest szczególnie wrażliwe na zmiany klimatu (van den Broeke 2000). Silny mechanizm zwrotny jaki występuje między temperaturą powietrza a lodami na morzach Amundsena i Bellingshausena, jak również zmiany w cyrkulacji atmosferycznej spowodowały znaczne ocieplenie w ostatnich 50-latach, sięgające 2.5°C (King 1994, 1998, King i Harangozo 1998, Kejna w druku). Zmiany te są również związane z przemieszczaniem się wokółantarktycznej bruzdy niskiego ciśnienia (Enmoto i Ohmura 1990). Temperatura w rejonie Półwyspu Antarktycznego jest negatywnie skorelowana (-0.6 do -0.8) z zasięgiem i powierzchnią lodów morskich (Weatherly i in. 1991), które poprzez wysokie albedo, ograniczają ilość energii słonecznej absorbowanej przez podłoże oraz redukują wymianę ciepła między oceanem a atmosferą (King

1984). Znaczna zmienność zasięgu lodów morskich wpływa na duże oscylacje warunków klimatycznych z roku na rok. Tendencja do zmniejszania powierzchni lodów morskich w rejonie Morza Bellingshausena oraz wydłużenie o miesiąc okresu z wodami wolnymi od lodów (Jacobs i Comiso 1997) powoduje wzrost temperatury powietrza na Półwyspie Antarktycznym, szczególnie w okresie zimowym i na wiosnę (Weatherly 1991). Na podstawie zdjęć satelitarnych z lat 1979-98 stwierdzono, że temperatura powierzchni oceanu w tym rejonie wzrosła o $0.54^{\circ}\text{C}/\text{dekadę}$ (Comiso 1994).

Na wschodnim wybrzeżu Półwyspu Antarktycznego następuje obniżenie temperatury, jest ono spowodowane głównie ochłodzeniem w okresie zimowym i wiosennym. Na temperaturę powietrza w tym rejonie wpływa zlodzenie i obecność połyńi na M. Weddella (Simmonds i Jacka 1995) oraz zmiany w cyrkulacji atmosferycznej. Znaczne ochłodzenie wystąpiło w okresie od lata aż do zimy, jedynie na wiosnę w niektórych stacjach zanotowano kontynuację wzrostu temperatury powietrza z lat 1958-1980. Ochłodzeniu temu sprzyja nasilenie wiatrów w obrębie wokółantarktycznej bruzdy niskiego ciśnienia. Pogłębiony gradient baryczny powoduje zwiększony spływ mroźnego powietrza z głębi kontynentu ku wybrzeżom i w konsekwencji obniżenie temperatury (Hurrell i van Loon 1994). Nasilenie strefowej cyrkulacji atmosferycznej i ograniczenie frekwencji cieplejszych mas powietrza z północy, przejawia się osłabieniem SAO, a w konsekwencji prowadzi do obniżenia temperatury na kontynencie (van den Broeke 1998a i b).

W głębi Antarktydy Wschodniej występuje większa stabilność temperatury z roku na rok. (Allison i in. 1993). Jednak i tu zaznacza się postępujące ochłodzenie. Na stacji Amundsen-Scott największe ujemne trendy temperatury wystąpiły na jesieni ($-1.14^{\circ}\text{C}/10$ lat) i w lecie ($-0.49^{\circ}\text{C}/10$ lat), są one związane ze wzrostem zachmurzenia i osłabieniem insolacji. Podobny trend zanotowano na stacji Wostok (jesienne ochłodzenie $-0.75^{\circ}\text{C}/10$ lat) i Dome C ($-1.93^{\circ}\text{C}/10$ lat).

Dodatковым czynnikiem komplikującym jednoznaczny charakterystykę zmian temperatury powietrza na Antarktydzie jest oddziaływanie wielkoskalowych zjawisk oceaniczno-atmosferycznych. Na Pacyfiku funkcjonuje w rytmie kilkuletnim ENSO (El Niño-Southern Oscillation). Savage i in. (1988) stwierdzili zależność statystyczną między fazami Oscylacji Południowych a temperaturą na biegunie południowym. Sygnał ENSO można znaleźć również w temperaturze wód oceanu, częstotści wiatrów południkowych i zasięgu lodów morskich (Simmonds, Jacka 1995). Zaburzenia tworzące się w tropikalnych szerokościach Pacyfiku są przenoszone w kierunku Antarktydy za pośrednictwem komórek cyrkulacyjnych w troposferze oraz poprzez Wokółpolarną Falę Antarktyczną (ACW - Antarctic Circumpolar Wave) dobrze wyrażoną w temperaturze powierzchni Oceanu Południowego (White i Peterson 1996). Zmiany w polu ciśnienia na południowym Pacyfiku nie pozostają bez wpływu na wokółantarktyczną bruzdę niskiego ciśnienia, a w dalszej kolejności na cyrkulację atmosferyczną, szczególnie na wybrzeżu kontynentu. Przemieszczenia bruzdy niskiego ciśnienia oraz podzwrotnikowych klinów wysokiego ciśnienia zaznacza się na Antarktydzie w postaci półrocznej oscylacji ciśnienia (SAO).

Wzrost temperatury powietrza w Antarktyce Zachodniej, a szczególnie na Półwyspie Antarktycznym spowodował szereg skutków przyrodniczych. Nastąpiło wyraźne nasilenie topnienia śniegów (Enmoto 1991), ablacji lodowców i lądolodów (Bintanja i van den Broeke 1995), postępuje deglacjacja, cofają się lodowce (Doake 1982, Kejna i in. 1998, Battke i in. 2001, Birkenmajer 2002), odsłaniają się tereny wolne od lodu, następuje rozpad lodowców szelfowych (Jacobs i in. 1992, Vaughan i Doake 1996). Zmniejsza się zasięg i grubość lodów morskich Cavallieri i in. 1997). Zmiany

te prowadzą do znacznych zaburzeń w funkcjonowaniu ekosystemu antarktycznego (Rakusa-Suszczewski 1999, 2002, Harris i Stonehouse 1991).

Literatura

- Ackley S., Bentley C., Foldvik A., Clarke A., King J., Priddle J., Goodwin I., 1996, Seasonal to interannual climate variability in Antarctica, Antarctic Global Change Research, Newsletter of the SCAR Global Change Programme, 2: 3-15.
- Aleksandrov E.I., Majstrova V.V., 1998, Sravnenie izmenenij temperatury atmosfery poljarnych oblastej, Antarktika, 34: 60-71.
- Alexandersson H., 1986, A homogeneity test applied to precipitation data, J. Climat., 6: 661-675.
- Allison I., Wendler G., Radok U., 1993, A climatology of the East Antarctic icesheet (100E to 140E) derived from automatic weather stations, J. Geophys. Res. (atmospheres), 98: 8815-8823.
- Astapenko P.D., 1960, Atmosferyne processy v vysokich širotach južnogo polušarja - Izdat. AN SSSR, Moskva: 282 s.
- Batke Z., Marsz A.A., Pudelko R., 2001, Procesy deglacjacji na obszarze SSSI No. 8 i ich uwarunkowania klimatyczne oraz hydrologiczne (Zatoka Admiralicji, Wyspa Króla Jerzego, Szetlandy Południowe, Probl. Klimat. Polarnej, 11: 121-135.
- Bintanja R., Van Den Broeke M.R., 1995, The surface energy balance of Antarctic snow and blue ice, J. Appl. Meteorology, 34: 902-926.
- Birkenmajer K., 2002, Retreat of Ecology Glacier, Admiralty Bay, King George Island (South Shetland Islands, West Antarctica) 1956-2001, Bull. Polish Acad. Sci., 50, 1: 15-29.
- Budd W.F., 1975, Antarctic sea-ice variations from satellite in relation to climate, J. Glaciol., 15: 417-427.
- Budd W.F., 1982, The role of Antarctica in Southern Hemisphere weather and climate, Austral. Meteorol. Magaz., 30 (3): 265-272.
- Budd W.F., 1991, Antarctica and global change, Climate Change, 18: 271-299.
- Burnett A.W., McNicoll A.R., 2000, Interannual variations in the Southern Hemisphere winter circumpolar vortex: Relationships with the Semiannual Oscillation, J. Climate, 13: 991-999.
- Carleton A.M., 1981, Monthly variability of satellite-derived cyclonic activity for the Southern Hemisphere winter, J. Climat., 1: 21-38.
- Comiso J.C., 1994, Surface temperatures in the polar regions from Nimbus 7 temperature humidity infrared radiometer, J. Geophys. Res., 99, C3: 5181-5200.
- Connolley W.M., 1996, The Antarctic temperature inversion, Int. J. Climatol., 16: 1333-1342.
- Doake C.S.M., 1982, State of balance of the ice sheet in the Antarctic Peninsula, Ann. Glaciol., 3: 77-82.
- Dutton E.G., Stone R.S., Nelson D.W., Mendonca B.G., 1991, Recent interannual variations in solar radiation, cloudiness, and surface temperature at the South Pole, J. Climate, 4: 848-858.
- Enmoto H., Ohmura A., 1990, Influences of atmospheric half-yearly cycle on the sea ice extent in the Antarctic, J. Geophys. Res., 95 (C6): 9497-9511.
- Enmoto H., 1991, Fluctuations of snow accumulation in the Antarctic and sea level pressure in the Southern Hemisphere in the last 100 years, Climate Change 18: 67-87.
- Farman J.C., Gardiner B.G., Shankin J.D., 1985, Large losses of total ozone in Antarctica reveal seasonal CClO_x/NO_x interaction, Nature 315: 207-210.

- Gong D-Y., Wang S-W., 1998, Antarctic Oscillation: concept and applications, *Chinese Sci. Bull.*, 43: 734-738.
- Harris C.M., Stonehouse B. (ed.), 1991, *Antarctica and Global Climatic Change*, London, Belhaven Press: 189 s.
- Hurrell J.W., van Loon H., 1994, A modulation of the atmospheric annual cycle in the Southern Hemisphere, *Tellus*, 46A: 325-338.
- IPCC, 1990, *Climate Change*, WMO/UNEP, [eds.] Houghton J.T., Jenkins G.J., Ephraums J.J., Cambridge Univ. Press, Cambridge, 365 s.
- IPCC THIRD ASSESSMENT REPORT - CLIMATE CHANGE, 2001, <http://www.ipcc.ch/>.
- Jacka T.H., 1990, Antarctic and Southern Ocean sea-ice and climate trends, *Ann. Glaciol.*, 14: 127-130.
- Jacka T.H., Budd W.F., 1998, Detection of temperature and sea-ice-extent changes in the Antarctic and Southern Ocean, 1949-1996, *Ann. Glaciol.*, 27: 553-559.
- Jacobs S.S., Comiso J.C., 1997, Climate variability in the Amundsen and Bellingshausen Seas, *J. Climate*, 10: 697-709.
- Jacobs S.S., Helmer H.H., Doacke C.S.M., Jenkins A., Frolich R.M., 1992, Melting of ice shelves and mass balance of Antarctica, *J. Glaciol.*, 38, 130: 375-387.
- Jones P.D., 1985, Southern hemisphere temperatures 1951-1985, *Climate Monitor*, 14 (5): 132-141.
- Jones P.D., 1990, Antarctic temperatures over the present century - a study of the early expedition record, *J. Climate*, 3, 11: 1193-1203.
- Jones P.D., 1995, Recent variations in mean temperature and the diurnal temperature range in the Antarctic, *Geophys. Res. Letters*, 22, 11: 1345-1348.
- Jones P.D., Limbert W.S., 1987, A data bank of Antarctic surface temperature and pressure data. U.S. Dept. of Energy Tech. Rep: 55 s.
- Jones P.D., New M., Parker D.E., Martin S., Rigor I.G., 1999, Surface air temperature and its changes over the past 150 years, *Rev. Geophys.*, 37: 173-199.
- Jones P.D., Raper S.C., Wigley T.M.L., 1986, Southern hemisphere surface air temperature variations: 1851-1984, *J. Climate and App. Meteorology*, 25: 1213-1230.
- Jones P.D., Reid P., 2001, A Databank of Antarctic surface temperature and pressure data, ORNL/CDIAC, NDP-032, Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, U.S. Department of Energy, Oak Ridge, Tennessee.
- Jones P.D., Wigley T.M.L., 1988, Antarctic girded sea level pressure data: an analysis and reconstruction back to 1957, *J. Climate*, 3: 1193-1203.
- Kejna M., Láska K., Caputa Z., 1998, Recession of the Ecology Glacier (King George Island, Antarctica) in the period 1961-1996, [in] *Polish Polar Studies. 25th International Polar Symposium*, Warszawa: 121-128.
- Kejna M., 1999, Air temperature in the Admiralty Bay region (King George Island, Antarctica), in the period 1977-1996 according to meteorological data from the Arctowski Station, *Wyd. Uniwersytetu Mikołaja Kopernika w Toruniu*: 128 s.
- Kejna M., Trends of air temperature on the Antarctic in the period 1958-2000, *Pol. Polar Res.* (w druku).
- King J.C., 1991, Global warming and Antarctica, *Weather*, 46, 4: 115-120.
- King J.C., 1994, Recent climate variability in the vicinity of the Antarctic Peninsula, *Int. J. Climatol.*, 14: 357-369.
- King J.C., Turner J., 1997, *Antarctic meteorology and climatology*, Cambridge Univ. Press: 409 s.
- Košelkov J.P., 1990, Temperaturnye trendy v Antarktike i snežnych rajonach, *Meteorol. i Gidrol.*, 5: 111-112.
- Košelkov J.P., Kovšova E.N., Voskresenskij A.I., 1993, O temperaturnych trendach v nižnej stratosfere nad Antarktikoj, *Antarktika. Nauka*, 30: 9-12.

- Lagun V.E., Marshall G.J., 2001, Archiv utočnennych srednemesačnych zmačenij prizemnoj temperatury na antarktičeskoj stanciji Bellingshausen [w:] Sostojane prirodnoj sredy Antarktiki, Sankt-Peterburg: 37-43.
- Limbert D.W.C., 1974, Variations in the mean annual temperature for the Antarctic Peninsula, 1904-1972, *Polar Rec.*, 17, 108: 303-306.
- Lubin D., Chen B., Bromwich D.H., Somerville R.C., Lee W.-H., Hines K.M., 1998, The impact of Antarctic cloud radiative properties on GCM climate simulation, *J. Climate*, 11: 447-462.
- Marshall G.J., 2002, Trends in Antarctic geopotential height and temperature: A comparison between radiosonde and NCEP-NCAR reanalysis data, *J. Climate*, 15: 659-674.
- Marshall G.J., King J.C., 1998, Southern Hemisphere circulation anomalies associated with extreme Antarctic Peninsula winter temperatures, *Geoph. Res. Letters*, 25, 13: 2437-2440.
- Marshall G.J., Lagun V., Lachlan-Cope T.A., 2002, Changes in Antarctic Peninsula tropospheric temperatures from 1956-1999: A synthesis of observations and reanalysis data, *Int. J. Climatol.*, 22: 291-310.
- Marsz A. A., 1999, Negative trend of annual precipitation sum at the Arctowski Station, [w:] Repelewska-Pękalowa J. (red.), *Polish Polar Studies*, 26th Internat. Polar Symp., Lublin, 161-170.
- Marsz A.A., Styszyńska A. (red.), 2000, Główne cechy klimatu rejonu Polskiej Stacji Antarktycznej im. H. Arctowskiego, *Wyższa Szkoła Morska*, Gdynia: 264 s.
- Maršunova M.S., 1980, Uslovija formirovanija i radiacionnyj klimat Antarktity, *Gidrometeoizdat*, Leningrad: 214s.
- Martianov V., Rakusa-Suszczewski S., 1990, Ten years of climate observations at the Arctowski and Bellingshausen station (King George Is., South Shetlands, Antarctica), [in] A. Brejmeier (ed.) *Global Change Regional Research Centres*, Inst. Geogr. Spatial Organ. PAS: 80-87.
- Mayes P.R., 1981, Recent trends in Antarctic temperature, *Climate Monitor*, 10, 4: 96-100.
- Miętus M., 1996, Zmienność temperatury i opadów w rejonie polskiego wybrzeża Morza Bałtyckiego i jej spodziewany przebieg do roku 2030, *Mat. Bad. IMGW, Meteorologia*, 26: 72 s.
- Mo K.C., 2000, Relationships between low-frequency variability in the Southern Hemisphere and sea surface temperature anomalies, *J. Climate*, 13, 10: 3599-3610.
- Mo K.C., White G.H., 1985, Teleconnections in the Southern Hemisphere, *Mon. Weath. Rev.*, 113 (1): 22-37.
- Rakusa-Suszczewski S., 1999, *Ekosystem morskiej Antarktyki*, PWN, Warszawa, 137 s.
- Rakusa-Suszczewski S., 2002, King George Island – South Shetland Islands, Maritime Antarctic, [in] L. Beyer, M. Bolter (eds.) *Geoecology of Antarctic Ice-Free Coastal Landscapes*, Springer Verlag, Berlin-Heidelberg: 23-39.
- Raper S.C.B., Wigley P.R., Mayes P.R., Jones P.D., Salinger M.J., 1984, Variations in surface air temperatures. Part 3: The Antarctic, 1957-1982, *Mon. Weather Rev.*, 112: 1341-1353.
- Sansom J., 1989, Antarctic surface temperature time series, *J. Climate*, 2: 1164-1172.
- Schwerdtfeger W., 1975, The effect of the Antarctic Peninsula on the temperature regime of the Weddell Sea, *Mon. Weath. Rev.*, 103: 45-51.
- Schwerdtfeger W., 1984, *Weather and Climate of the Antarctic*, Elsevier, Amsterdam-Oxford-New York-Tokyo: 261 s.
- Simmonds I., Jacka T.H., 1995, Relationships between the interannual variability of Antarctic sea ice and the Southern Oscillation, *J. Climate*, 8: 637-647.
- Sinclair M.R., 1996, A climatology of anticyclones and blocking for the Southern Hemisphere, *Mon. Wea. Rev.*, 124: 245-263.
- Smith R.C., Stammerjohn, Baker K.S., 1996, Surface air temperature variations in the western Antarctic Peninsula region, *Foundations for ecological research west of the Antarctic Peninsula*, *Antarctic Res. Series*, 70: 105-121.

- Spravočnik po klimatu Antarktydy, 1974, Maršunova M.S., Pietrov L.S., (eds.) 1, AANII, Leningrad: 214 s.
- Spravočnik po klimatu Antarktydy, 1977, Dolgin I.M., Pietrov L.S., (eds.) 2, AANII, Leningrad: 492 s.
- Stark P., 1994, Climate warming in the central Antarctic Peninsula area, *Weather*, 49: 215-220.
- Stonehouse B., 1997, Animal responses to climate. [in] R.D. Thompson, A. Perry (eds.) *Applied Climatology*, London-New York: 141-151.
- Styszyńska A., 2002, Związki między temperaturą wody w energoaktywnej strefie M. Bellingshausena a temperaturą powietrza na Stacji Arctowskiego, *Probl. Klimat. Polarnej*, 8: 25-46.
- Styszyńska A., Zblewski S., 2002, Przebieg wskaźnika oceanizmu na Sztelandach Południowych według zweryfikowanych danych połączonego ciągu Deception-Bellingshausen (1944-2000), *Probl. Klimat. Polarnej*, 12: 21-32.
- Timofeyev V., Skrypnik V., Popov Y.I., Ukrainsky V.V., 2002, Meteorological anomalies at Vernadsky Base during summer seasons of 2000, *Polish Polar Studies*, Poznań: 323-336.
- Trenberth K.E., Olson J.G., 1989, Temperature trends at the South Pole and McMurdo Sound, *J. Climate*, 2: 1196-1206.
- van den Broeke M.T., 1998a, The semi-annual oscillation and Antarctic climate. Part 1: influence on near surface temperatures (1957-79), *Antarctic Sci.*, 10 (2): 175-183.
- van den Broeke M.T., 1998b, The semi-annual oscillation and Antarctic climate. Part 2: Recent changes, *Antarctic Sci.*, 10 (2): 184-191.
- van den Broeke M.T., 2000, On the interpretation of Antarctic temperature trends, 2000, *J. Climate*, 13, 11: 3885-3889.
- van Loon H., 1972, Wind in the Southern Hemisphere, *Meteorology of the Southern Hemisphere*, Newton C.W. [ed.], Meteor. Monogr., 35, Amer. Meteor. Soc.: 87-99.
- van Loon H., Williams J., 1976, The connection between trends of mean temperature and circulation at the surface - Month. *Weath. Rev.*, 104 (4): 636-647.
- van Loon H., Shea D.J., 1988, A survey of the atmospheric elements at the ocean's surface south of 40°S, *Antarctic Ocean and Resources Variability*, (ed.) Sahrhage D., Springer-Verlag Berlin Heidelberg, New York, London, Paris, Tokyo: 3-20.
- Vaughan D.G., Doake C.S.M., 1996, Recent atmospheric warming and retreat of ice shelves on Antarctic Peninsula, *Nature*, 379: 328-330.
- Weatherly J.W., Walsh J.E., Zwally H. J., 1991, Antarctic sea ice variations and seasonal air temperature relationships, *J. Geophys. Res.*, 96, C8: 15119-15130.
- White W.B., Peterson R.G., 1996, An Antarctic circumpolar wave in surface pressure, wind, temperature and sea-ice extent, *Nature*, 390: 699-702.
- Wójcik G., Marciniak K., 2002, 100-lecie Antarktycznej Wyprawy "Belgiki" (1897-1899), *Probl. Klimat. Polarnej*, 8: 13-24.

CHANGE OF AIR TEMPERATURE TRENDS ON THE ANTARCTIC IN THE YEARS 1958-2000

Summary

The progressive increase in the concentration of greenhouse gases in the atmosphere in consequence leads to the rise of the global air temperature. According to the III Report of IPCC

(2001) from 1880 the mean temperature on the Earth has grown by $0.6^{\circ}\text{C} \pm 0.2^{\circ}\text{C}$. The reaction of polar regions to the greenhouse effect is unknown. The Antarctic climate shows a considerably greater variability in comparison with the lower latitudes of the Southern Hemisphere. This is conditioned by interactions between the atmospheric circulation, the ocean, and the cryosphere. According to the scenarios of global greenhouse effect the temperature at the polar regions should grow by 3°C in summer and $4\text{-}5^{\circ}\text{C}$ in winter. However, these model researches are not confirmed in reality. This shows that our knowledge concerning the functioning of climate system of the polar regions is insufficient.

In the paper we have used monthly mean air temperature values for 21 stations being in operation on the Antarctic in the years 1958-2000 and for 34 stations making observations in the years 1981-2000. After checking the homogeneity of the series by the Alexandersson's (1986) test we have counted the trends of air temperature. The average trend for annual and seasonal values were expressed by temperature change per 10 years.

In the years 1958-2000 on the Antarctic the trend of the mean annual values of the air temperature shows great spatial differentiation. These differences are connected with the radiation balance depending on the variability of cloudiness and the albedo of the surface, and on the transformation of pressure fields and changes of the atmospheric circulation. Statistically significant (on 0.95 significance level) air temperature increase occurred on the western coast of the Antarctic Peninsula (for example Faraday $0.67^{\circ}\text{C}/10$ years) and at the stations Belgrano and McMurdo. A negative air temperature trend occurred on the South Pole ($-0.21^{\circ}\text{C}/10$ years) and on the Droning Maud Land. The temperature changes in the region of the Antarctic Peninsula are correlated with the extension and surface of sea ice, especially in winter.

There are considerable differences of air temperature trends on the Antarctic between the periods 1958-1980 and 1981-2000. The period 1958-1980 is characterized by an increase of air temperature, especially on the shore of continent (Casey $0.84^{\circ}\text{C}/10$ years, Faraday $0.76^{\circ}\text{C}/10$ years, Halley $0.69^{\circ}\text{C}/10$ years). The interior of the continent is distinguished by stability of weather conditions. Year-to-year temperature changes are smaller, then at the coast (the trend at the Amundsen-Scott station average $0.26^{\circ}\text{C}/10$ years).

During the last years (1981-2000) significant changes took place in the tendency of air temperature on the Antarctic. In many regions of the Antarctic cooling began, on the coast of East Antarctica the temperature decreases, on the coasts of the Wilkes Land (Casey $-0.82^{\circ}\text{C}/10$ years) and the Weddell Sea (Halley $-1.13^{\circ}\text{C}/10$ years, Larsen Ice $-0.89^{\circ}\text{C}/10$ years), especially in the autumn-winter period. In the interior of the continent also lower and lower temperatures occurred (Amundsen-Scott $-0.42^{\circ}\text{C}/10$ years, Dome C $-0.71^{\circ}\text{C}/10$ years). The cooling can be observed in all seasons, but it is the greatest in summer and autumn, when the decrease of solar radiation was observed in connection with the growing cloudiness. Vostok situated at the highest parts of ice dome does not show statistically significant trend. An increase of the temperature was observed in the interior of West Antarctica (Byrd $0.37^{\circ}\text{C}/10$ years). The warming rate of the climate became weaker on the Antarctic Peninsula (Faraday $0.56^{\circ}\text{C}/10$ years). The largest temperature changes occurred in the autumn-winter season when in the Antarctic Peninsula region the temperature increased, while in the interior and at the coast of East Antarctica considerably fell.

Climate changes during the last 20 years of the 20th century showed the weakening of the warming rate on the Antarctic Peninsula and distinct cooling on the East Antarctica. The lack of

warming, or even cooling, on the East Antarctica, is favourable to maintain the present climate system in this region. The increasing air temperature on the West Antarctic, especially on the Antarctic Peninsula caused many natural consequences. The ablation of glaciers clearly intensified, deglaciation takes place, glaciers retreat. The environmental changes lead to disturbances in the functioning of the Antarctic ecosystem.