

ZMIENNOŚĆ TEMPERATURY POWIETRZA W ARKTYCE KANADYJSKIEJ W OKRESIE 1951–2005

VARIABILITY OF AIR TEMPERATURE IN THE CANADIAN ARCTIC FROM 1951 TO 2005

Rajmund Przybylak, Rafał Maszewski

Zakład Klimatologii, Instytut Geografii, Uniwersytet Mikołaja Kopernika
ul. Gagarina 9, 87-100 Toruń
rp11@geo.uni.torun.pl; rafmasz@geo.uni.torun.pl

Zarys treści. W artykule przedstawiono szczegółową charakterystykę warunków termicznych na obszarze Arktyki Kanadyjskiej w okresie 1951–2005. Do tego celu wykorzystano średnie miesięczne, sezonowe i roczne wartości temperatury powietrza. Omówiono zarówno średnie rozkłady przestrzenne, jak też ich zmienność w badanym okresie czasu. Na podstawie uśrednionych obszarowo wartości temperatury powietrza dla całej Arktyki Kanadyjskiej, dla poszczególnych miesięcy i dla roku, ukazano ich zmienność w okresie 1951–2005 wykorzystując klasyfikacje termiczną zaproponowaną przez Miętusa i in. (2002).

Słowa kluczowe: temperatura powietrza, Arktyka Kanadyjska, klasyfikacja termiczna, trendy temperatury powietrza

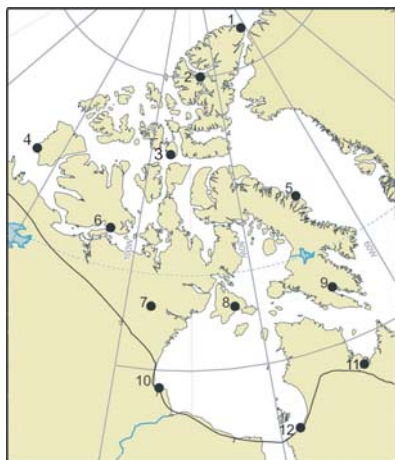
1. Wstęp

W dobie potęgującego się globalnego ocieplenia klimatu, bardzo duże znaczenie mają badania klimatu obszarów polarnych, głównie ich zmienności. Z uwagi na fakt, że obszary polarne dużo szybciej i silniej reagują na zmiany klimatu, pozwala to nam prognozować ich wystąpienie w niższych szerokościach geograficznych, wykorzystując do tego celu istniejące relacje między klimatami tych obszarów (Przybylak 1996, 2002). Stan wiedzy dotyczącej współczesnej zmienności klimatu na badanym obszarze został omówiony m.in. we wspomnianych dwóch pracach Przybylaka, a dla okresu XIX wieku w pracy Przybylaka i Vizi (2005). Celem niniejszego artykułu jest m.in. ocena wielkości zmian temperatury powietrza w Arctyce Kanadyjskiej w badanym okresie, w tym szczególnie w jego ostatnich latach, w których obserwuje się znaczący jej wzrost w całej Arctyce (Przybylak 2007a, b).

2. Obszar badań, dane i metody

W pracy szczegółowo przeanalizowano pod względem termicznym obszar Arktyki Kanadyjskiej, której południową granicę poprowadzono wg Atlasa Arktiki (1985). Szczegółowe informacje dotyczące położenia 12 stacji meteorologicznych wykorzystanych w opracowaniu i ich rozmieszczenie na ana-

lizowanym obszarze przedstawia ryc. 1. Dane meteorologiczne z okresu 1951–2005 (średnie miesięczne, sezonowe i roczne) potrzebne do opracowania, pobrano ze strony internetowej Kanadyjskiej Służby Meteorologicznej: http://www.climate.weatheroffice.ec.gc.ca/Welcome_e.html.



Numer Number	Stacje Stations	h (m n.p.m.) h (m a.s.l.)	φ	λ
1	Alert	30.5	82.5°N	62.3°W
2	Eureka	10.4	80.0°N	85.9°W
3	Resolute	67.4	74.7°N	95.0°W
4	Sachs Harbour	85.6	72.0°N	125.3°W
5	Clyde	26.5	70.5°N	68.5°W
6	Cambridge Bay	27.4	69.1°N	105.1°W
7	Baker Lake	18.0	64.3°N	96.1°W
8	Coral Harbour	64.0	64.2°N	83.4°W
9	Iqaluit	33.5	63.8°N	68.6°W
10	Churchill	28.7	58.7°N	94.1°W
11	Kuujuuaq	39.3	58.1°N	68.4°W
12	Kuujuarapik	10.4	55.3°N	77.8°W

Ryc. 1. Położenie stacji meteorologicznych (kropki) ujętych w opracowaniu. Linia ciągła – granica Arktyki wg Atlasu Arktiki (1985)

Fig. 1. Location of meteorological stations used (indicated by dots). Solid line – the boundary of the Arctic after Atlas Arktiki (1985)

W opracowaniu zastosowano standardowe metody wykorzystywane w opracowaniach klimatologicznych. Istotność statystyczną obliczonych trendów sprawdzono za pomocą testu t-Studenta. Średnie obszarowe różnych parametrów termicznych zostały obliczone wykorzystując do tego celu zwykłą średnią arytmetyczną wartości wziętych z 12 stacji badanych w niniejszym opracowaniu. Nowum w niniejszej pracy jest wykonanie klasyfikacji termicznej miesięcy i lat przy zastosowaniu do tego celu metody zaproponowanej przez Miętusa i in. (2002). Podstawą tej klasyfikacji był szereg empirycznych kwantyli średniej miesięcznej i rocznej temperatury powietrza wyznaczony dla każdej stacji dla okresu 1951–2000. Zastosowana klasyfikacja termiczna pozwoliła na ocenę średniej temperatury każdego miesiąca i roku w stosunku do wspomnianej wieloletniej normy.

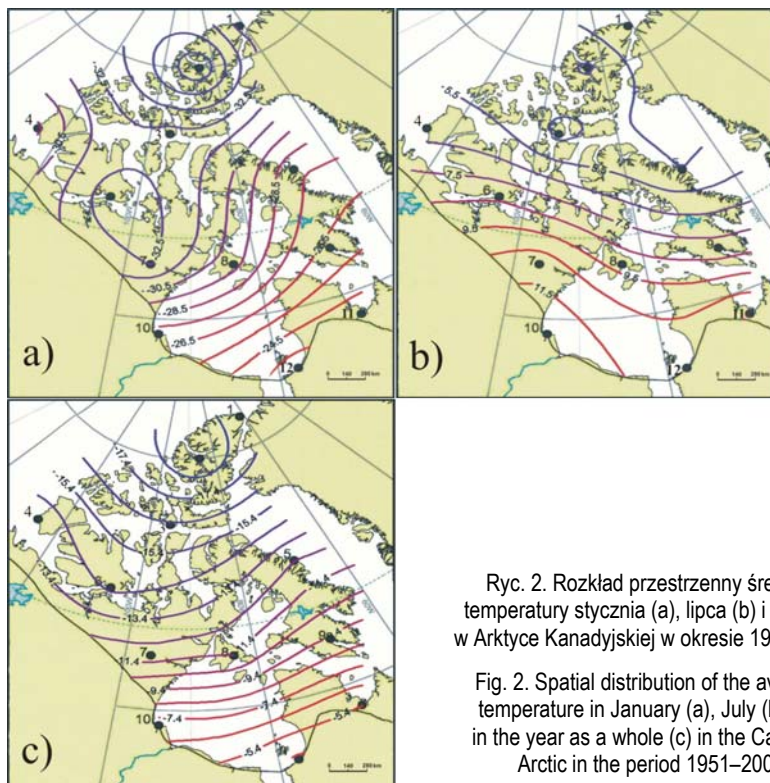
3. Wyniki

3.1. Średnia temperatura powietrza i jej rozkład przestrzenny

Średnia temperatura stycznia w Arktyce Kanadyjskiej w okresie 1951–2005 najniższe wartości wykazała w jej północnej części, od stacji Alert do stacji Baker Lake, z wyraźnym minimum na stacji Eureka (-36.5°C). Natomiast jej najwyższe wartości wystąpiły w południowo-wschodniej części Arktyki Kanadyjskiej (Kuujuarapik -22.8°C) – ryc. 2a. Średnia temperatura lipca (podobnie jak w styczniu) najniższe wartości posiada na północy badanego obszaru (Alert 3.5°C), natomiast najwyższe są obserwowane na południu i południowym zachodzie (Churchill 12.2°C) – ryc. 2b, a więc są przesunięte na zachód w stosunku do temperatur stycznia. W styczniu przebieg izoterm odbiega znacząco

od przebiegu równoleżnikowego, podczas gdy w lipcu (z wyjątkiem wschodnich krańców) jest on niemal równoleżnikowy (ryc. 2a, b).

Izotemy roczne temperatury powietrza mają wyraźny przebieg równoleżnikowy (ryc. 2c). Najwyższe temperatury występują na południu analizowanego obszaru (Kuujjuarapik, -4.2°C), a najniższe – na północ od linii łączącej stacje Sachs Harbour i Clyde z minimalną wartością -19.4°C na stacji Eureka.

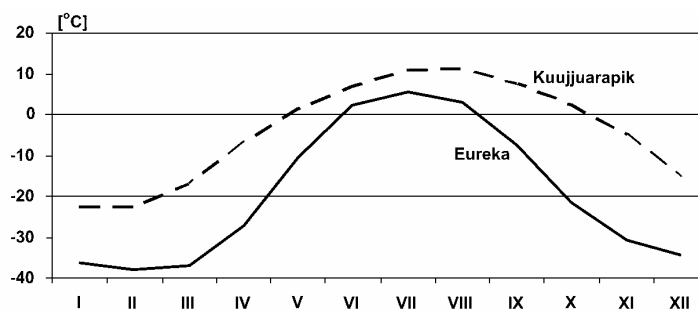


Ryc. 2. Rozkład przestrzenny średniej temperatury stycznia (a), lipca (b) i roku (c) w Arktyce Kanadyjskiej w okresie 1951–2005

Fig. 2. Spatial distribution of the average temperature in January (a), July (b) and in the year as a whole (c) in the Canadian Arctic in the period 1951–2005

Przebieg roczny temperatury powietrza na stacji najchłodniejszej (Eureka) i najcieplejszej (Kuujjuarapik) prezentuje ryc. 3. Na stacji Eureka najchłodniejszym miesiącem roku jest luty (-37.9°C), a na stacji Kuujjuarapik miesiące styczeń i luty (-22.8°C). W marcu na stacji Kuujjuarapik widoczny jest wyraźny wzrost temperatury. Najcieplejsze miesiące to lipiec (Eureka) i sierpień (Kuujjuarapik), co jest zgodne z wielkościami stopnia kontynentalizmu klimatu na ww. stacjach. Pomiędzy analizowanymi stacjami widoczna jest znacznie większa różnica temperatury w zimie w porównaniu z latem (ryc. 3).

Amplituda roczna temperatury powietrza jest silnie związana ze stopniem kontynentalizmu klimatu (Okolowicz 1969). Najwyższe jej wartości stwierdzono w części południowo-zachodniej Arktyki Kanadyjskiej (45.7°C , Baker Lake) i w okolicy stacji Eureka (45.5°C) – tab. 1. Te części badanego obszaru są najbardziej oddalone od ciepłych, otwartych wód Oceanu Atlantyckiego, wolnych od lodu morskiego. Zachodnie, a szczególnie wschodnie krańce Arktyki Kanadyjskiej, charakteryzują się najniższymi amplitudami (np. Clyde 35.5°C), co związane jest w ostatnim przypadku z bliskością Morza Baffina i Morza Labradorskiego.



Ryc. 3. Przebieg roczny temperatury powietrza na stacjach meteorologicznych Eureka i Kuujjuarapik w okresie 1951–2005

Fig. 3. Annual course of air temperature at the Eureka and Kuujjuarapik meteorological stations in the period 1951–2005

Tabela 1 – Table 1

Średnie sezonowe i roczne wartości parametrów termicznych (Ti, Tmax, Tmin i A, °C) w okresie 1951–2005

Mean seasonal and annual values of temperature parameters (Ti, Tmax, Tmin i A, °C) in the period 1951–2005

Numer Number	Stacje Stations	Ti				Rok / Year			
		XII–II DJF	III–V MAM	VI–VIII JJA	IX–XI SON	Ti	Tmax	Tmin	A
1	Alert	-31.7	-22.9	1.3	-18.3	-17.9	-14.7	-21.3	38.4
2	Eureka	-36.2	-25.0	3.7	-20.0	-19.4	-16.1	-22.7	45.5
3	Resolute	-31.3	-21.6	2.0	-14.4	-16.3	-13.2	-19.3	38.8
4	Sachs Harbour	-28.5	-18.2	4.0	-11.5	-13.5	-10.2	-16.8	37.9
5	Clyde	-26.9	-17.7	3.2	-8.1	-12.4	-8.7	-16.2	35.5
6	Cambridge Bay	-32.1	-20.5	5.6	-11.6	-14.6	-11.1	-18.1	43.6
7	Baker Lake	-30.8	-17.0	8.4	-8.2	-11.9	-8.0	-15.8	45.7
8	Coral Harbour	-28.3	-16.1	6.4	-7.7	-11.4	-7.3	-15.5	41.3
9	Iqaluit	-24.9	-13.7	6.1	-4.9	-9.4	-5.6	-13.2	36.9
10	Churchill	-24.8	-10.4	10.1	-2.7	-6.9	-2.8	-11.0	40.7
11	Kuujjuaq	-21.8	-8.8	9.8	-0.9	-5.4	-0.9	-9.9	37.3
12	Kuujjuarapik	-20.3	-7.6	9.5	1.7	-4.2	0.1	-8.6	36.0
m	Canadian Arctic	-28.1	-16.6	5.8	-8.9	-11.9	-8.2	-15.7	39.8

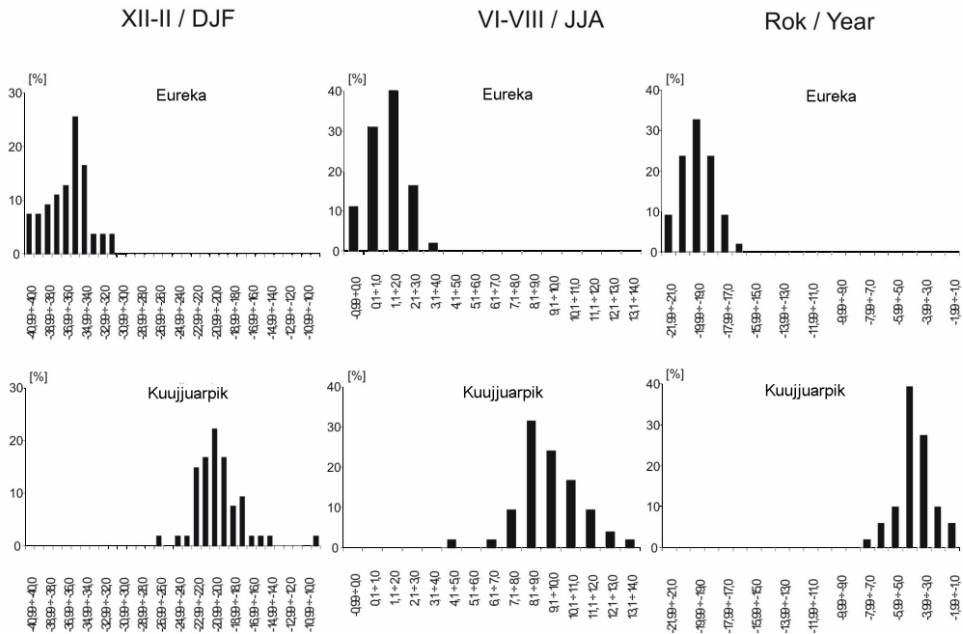
Objaśnienia: m – średnia obszarowa – Explanation: m – area mean

Wartości najniższych temperatur minimalnych i najwyższych temperatur maksymalnych uzależnione są głównie od położenia geograficznego stacji, ale również od warunków lokalnych. Najniższą temperaturę minimalną (-55.3°C) w okresie 1951–2005 zmierzono dwukrotnie na stacji Eureka w dniach 15 lutego 1979 r. i 18 lutego 1987 r. Z kolei, najwyższa temperatura maksymalna (37.0°C) wystąpiła na południu badanego obszaru na stacji Kuujjuarapik w dniu 12 lipca 2005 roku.

3.2. Rozkłady częstotliwości

Rycina 4 przedstawia częstotliwość względną występowania średnich rocznych wartości temperatury powietrza na stacjach najcieplejszej (Kuujjuarapik) i najchłodniejszej (Eureka). Na stacji Kuujjuarapik

wartości roczne temperatury mieściły się w przedziałach od $-7.99\pm-7.0^{\circ}\text{C}$ do $-1.99\pm1.0^{\circ}\text{C}$, czyli obejmowały siedem przedziałów jednostopniowych. Z największą częstością (39.2%) występowały wartości z przedziału $-4.99^{\circ}\text{C}\pm-4.0^{\circ}\text{C}$. Stację Eureka charakteryzowały wartości obejmujące sześć przedziałów jednostopniowych od $-21.99\pm-21.0^{\circ}\text{C}$ do $-16.99\pm-16.0^{\circ}\text{C}$. Najczęściej występowały wartości z przedziału $-19.99\pm-19.0^{\circ}\text{C}$ (32.7%) – ryc. 4.



Ryc. 4. Częstość względna (%) występowania średnich temperatur zimy (XII–II), lata (VI–VIII) i roku (I–XII) według klas jednostopniowych w wybranych stacjach Arktyki Kanadyjskiej w okresie 1951–2005

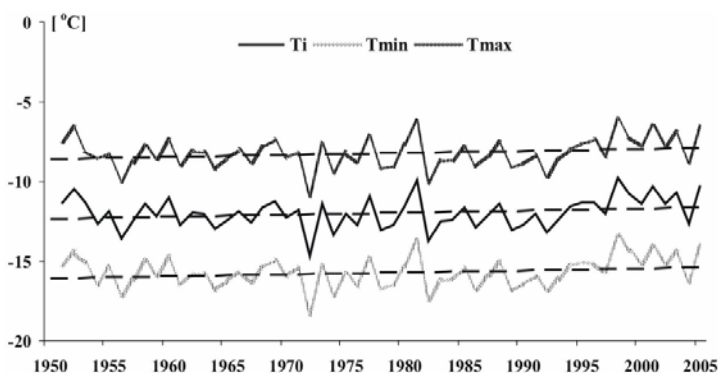
Fig. 4. Relative frequency of occurrence of average temperatures in winter (DJF), summer (JJA) and for the year as a whole according to one-degree intervals in selected stations in the Canadian Arctic in the period 1951–2005

Na analizowanym obszarze średnie temperatury lata mieściły się w przedziałach od $-0.99\pm0.0^{\circ}\text{C}$ na stacji Eureka (10.9%) do $13.1\pm14.0^{\circ}\text{C}$ na stacji Kuujuaupik (1.9%). Na stacji Eureka obejmowały one pięć przedziałów jednostopniowych (z największą częstością 40% występowała temperatura z przedziału $1.1\pm2.0^{\circ}\text{C}$), natomiast na południu – w Kuujuaupik – oscylowały one w zakresie dziewięciu przedziałów jednostopniowych (z największą częstością 31.5% występowała temperatura w przedziale $8.1\pm9.0^{\circ}\text{C}$) – ryc. 4.

Zakres zmian średniej temperatury zimy (XII–II), zarówno na północy jak i na południu Arktyki Kanadyjskiej, jest znacznie większy niż podczas lata (VI–VIII). Na stacji Eureka obejmował on dziesięć, a w Kuujuaupik trzynaście przedziałów jednostopniowych. Wartości temperatury zimy obejmowały przedziały od $-40.99\pm-40.0^{\circ}\text{C}$ (Eureka 7.3%) do $-9.99\pm-9.0^{\circ}\text{C}$ (Kuujuaupik 1.9%). Na stacji Eureka najczęściej (25%) występowały temperatury z przedziału $-35.99\pm-35.00^{\circ}\text{C}$, a na stacji Kuujuaupik temperatury z przedziału $-20.99\pm-20.00^{\circ}\text{C}$ (22.2%) – ryc. 4.

3.3. Zmienność temperatury powietrza

Przebieg z roku na rok uśrednionych obszarowo wartości rocznych T_i (średnich dobowych), T_{min} (minimalnych dobowych), T_{max} (maksymalnych dobowych) prezentuje ryc. 5. W Arktyce Kanadyjskiej widoczna jest coroczna zmienność wartości temperatury zwiększona nieco w okresie 1971–1983 i po 1997 roku. Najwyższe wartości T_i , także T_{max} i T_{min} , wystąpiły w roku 1998 (T_i : -9.7°C) a najniższe w 1972 (T_i : -14.7°C) – ryc. 5. Największa zmienność z roku na rok T_i rocznej występowała w południowo-wschodniej części analizowanego obszaru (Iqaluit 1.7°C). Natomiast najmniejszą zmienność odnotowano na krańcach północnych (Alert 1.0°C) – tabela 2.



Ryc. 5. Przebiegi z roku na rok średnich rocznych T_i , T_{max} i T_{min} oraz ich trendów (linie przerywane) w Arktyce Kanadyjskiej w okresie 1951–2005

Fig. 5. Year-to-year courses of mean annual T_i , T_{max} , T_{min} and their trends (dashed lines) in the Canadian Arctic in the period 1951–2005

Tabela 2 – Table 2

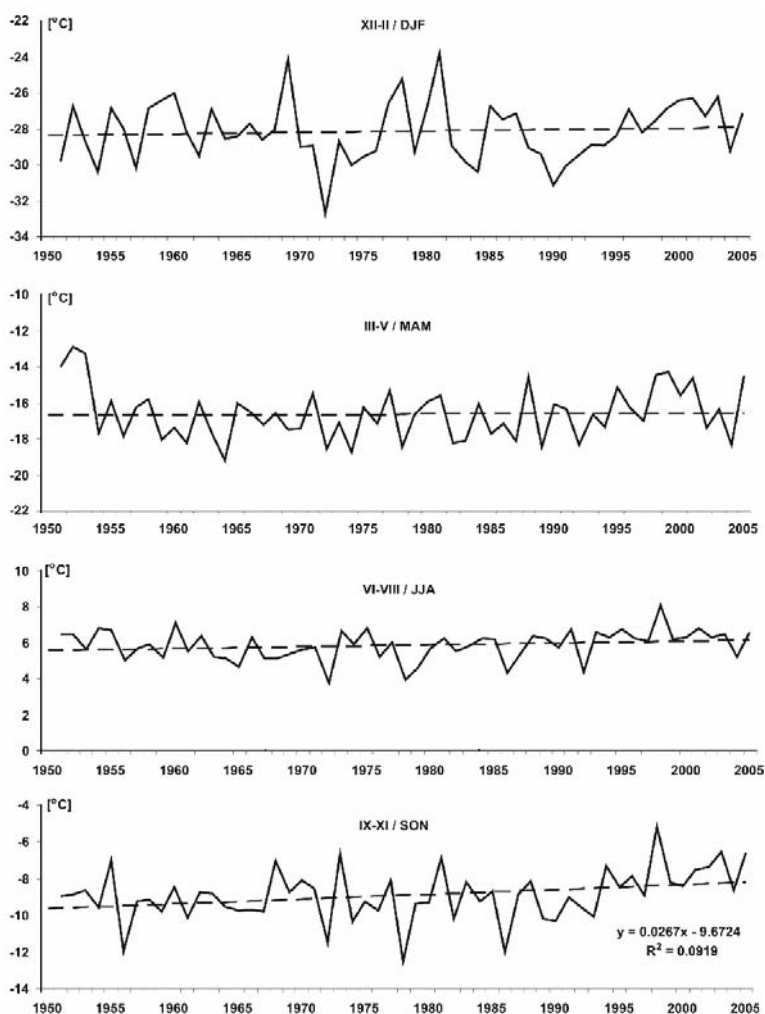
Przeciętna zmienność średnich sezonowych i rocznych T_i ($^{\circ}\text{C}$) z roku na rok w okresie 1951–2005

Average year-to-year variability of mean seasonal and annual T_i ($^{\circ}\text{C}$) in the period 1951–2005

Numer Number	Stacje Stations	XII–II DJF	III–V MAM	VI–VIII JJA	IX–XI SON	Rok Year
1	Alert	2.1	1.6	1.1	1.4	1.0
2	Eureka	2.4	2.1	1.2	2.2	1.3
3	Resolute	1.8	1.7	1.3	1.8	1.2
4	Sachs Harbour	2.4	2.5	1.9	2.1	1.5
5	Clyde	2.5	1.8	1.0	2.2	1.3
6	Cambridge Bay	1.7	1.8	1.6	2.0	1.2
7	Baker Lake	2.2	2.0	1.4	2.3	1.2
8	Coral Harbour	2.5	2.0	1.4	2.5	1.5
9	Iqaluit	3.2	2.1	1.1	2.1	1.7
10	Churchill	2.2	2.3	1.3	2.0	1.2
11	Kuujuaq	2.5	2.4	0.9	1.7	1.3
12	Kuujuarapik	2.5	2.4	1.2	1.6	1.4
m	Canadian Arctic	1.7	1.6	0.9	1.6	1.1

Objaśnienie: m – średnia obszarowa – Explanation: m – area mean

Średnie sezonowe wartości T_i charakteryzowały się również dużą zmiennością z roku na rok (tab. 2, ryc. 6). Podobnie zachowywały się także temperatury ekstremalne. Spośród czterech sezonów średnia obszarowa T_i zimy charakteryzowała się największą zmiennością (1.7°C) – tab. 2. Największej zmiany z roku na rok miały miejsce od 1968 do 1984 roku (ryc. 6). Najcieplejsza zima na obszarze Arktyki Kanadyjskiej wystąpiła w 1981 r., kiedy to wartość T_i wyniosła -23.8°C , natomiast w 1972 r. zanotowano najchłodniejszą zimę o wartości T_i wynoszącej -32.7°C . Największą zmienność T_i zimy osiągała w części południowo-wschodniej Arktyki Kanadyjskiej (Iqaluit 3.2°C). Najmniejszą zmiennością charakteryzował się obszar pomiędzy stacjami Resolute (1.8°C) i Cambridge Bay (1.7°C), a także stacja Alert (2.1°C) – tab. 2.



Ryc. 6. Przebieg z roku na rok średnich wartości temperatury zimy, wiosny, lata i jesieni oraz ich trendów (linia przerywana) w Arktyce Kanadyjskiej w okresie 1951–2005

Fig. 6. Year-to-year courses of winter, spring, summer and autumn temperatures and their trends (dashed lines) in the Canadian Arctic in the period 1951–2005

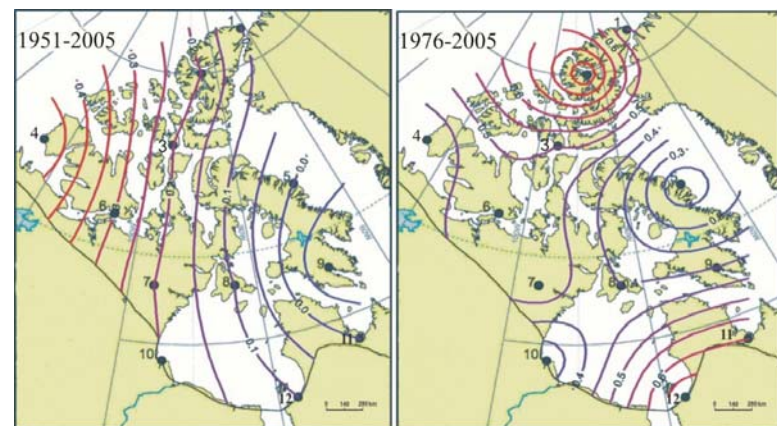
Wiosna charakteryzowała się nieco mniejszą zmiennością średniej temperatury obszarowej z roku na rok (1.6°C) – tab. 2, ryc. 6. Duża zmienność T_i wiosny cechowała stacje położone najdalej na południe badanego obszaru, to jest Kuujuaq i Kuujuarapik (2.4°C) oraz Churchill (2.3°C). Mniejsza zmienność występowała na stacji Alert (1.6°C) i w obszarze położonym pomiędzy stacjami Resolute (1.7°C), Clyde (1.8°C) i Cambridge Bay (1.8°C) – tab. 2. Najcieplejszą wiosnę odnotowano w roku 1952 (-12.9°C), a trochę niższe jej wartości wystąpiły w latach 1951 i 1953. Najchłodniejsza wiosna (-19.2°C), z kolei, była odnotowana w 1964 roku (ryc. 6).

Średnie obszarowe wartości T_i lata charakteryzowały się najmniejszą zmiennością (0.9°C) spośród wszystkich badanych sezonów (tab. 2, ryc. 6). Największa zmienność (1.9°C) wystąpiła na południowym-zachodzie Arktyki Kanadyjskiej (Sachs Harbour), natomiast najmniejsza – w jej wschodniej części. Najwyższa wartość T_i lata (8.1°C) wystąpiła w 1998 r., a najniższa (3.8°C) w 1972 roku (ryc. 6).

Jesienią widoczny był wzrost corocznej zmienności średniej obszarowej T_i (1.6°C), która była taka sama jak wiosną (tab. 2). Najwyższe wartości wystąpiły na stacji Coral Harbour (2.5°C) i Baker Lake (2.3°C). Najmniejsza zmienność notowana była na krańcach północnych (Alert 1.4°C) i południowych (Kuujuarapik 1.6°C i Kuujuaq 1.7°C). Najwyższa wartość średniej sezonowej temperatury powietrza (-5.1°C), podobnie jak w przypadku lata, wystąpiła w 1998 roku (ryc. 6).

3.4. Rozkłady przestrzenne trendów temperatury powietrza

Trendy T_i rocznej w Arktyce Kanadyjskiej w okresie 1951-2005 prezentuje tabela 3 i rycina 7. Widoczny jest wyraźny wzrost wartości trendów ze wschodu (Iqaluit $-0.1^{\circ}\text{C}/10$ lat) na zachód obszaru (Sachs Harbour $0.5^{\circ}\text{C}/10$ lat), gdzie trendy były wzrostowe i istotne statystycznie. W środkowej części obszaru trendy były lekko wzrostowe ($0.2^{\circ}\text{C}/10$ lat). T_i roczna Arktyki Kanadyjskiej charakteryzuje się trendem lekko wzrostowym ($0.1^{\circ}\text{C}/10$ lat) i nie istotnym statystycznie (tab. 3). W okresie 1976–2005, czyli w czasie największego ocieplenia na kuli ziemskiej, zauważalne jest silne wzmocnienie trendów wzrostowych. Na 6 stacjach były one istotne statystycznie np. Eureka $0.83^{\circ}\text{C}/10$ lat (tab. 3, ryc. 7).



Ryc. 7. Rozkład przestrzenny trendów (w $^{\circ}\text{C}/10$ lat) T_i rocznej w Arktyce Kanadyjskiej w okresach 1951–2005 i 1976–2005

Fig. 7. Spatial distribution of mean annual temperature trends ($^{\circ}\text{C}/10$ years) in the Canadian Arctic in the periods 1951–2005 and 1976–2005

Tabela 3 – Table 3

Trendy średnich sezonowych i rocznych wartości T_i ($^{\circ}\text{C}/10$ lat) w Arktyce Kanadyjskiej
 Seasonal and annual trends of air temperature ($^{\circ}\text{C}/10$ years) in the Canadian Arctic

Numer Number	Stacje Stations	1951–2005					1976–2005				
		XII–II	III–V	VI–VIII	IX–XI	Rok	XII–II	III–V	VI–VIII	IX–XI	Rok
		DJF	MAM	JJA	SON	Year	DJF	MAM	JJA	SON	Year
1	Alert	0.09	0.14	0.14	0.26*	0.13	0.01	0.59	0.27	0.95*	0.46*
2	Eureka	0.13	0.09	0.06	0.39	0.17	0.30	0.90*	0.44*	0.70*	0.83*
3	Resolute	0.16	0.31*	-0.04	0.41*	0.21*	-0.05	0.71*	0.10	1.18*	0.47*
4	Sachs Harbour	0.59*	0.40	0.06	0.52*	0.45*	0.40	0.70	-0.01	0.58	0.44
5	Clyde	-0.29	-0.27	0.18*	0.19	-0.04	-0.53	0.11	0.78*	0.76*	0.22
6	Cambridge Bay	0.44*	0.14*	0.17	0.15	0.30*	0.16	0.31	0.69*	0.82*	0.49*
7	Baker Lake	0.36*	0.10	0.17	0.22	0.18	0.23	0.35	0.57*	0.87*	0.51
8	Coral Harbour	-0.01	-0.16	0.21	0.39*	0.10	-0.27	0.50	0.62*	0.81	0.43
9	Iqaluit	-0.10	-0.35	0.04	0.33*	-0.06	0.25	0.07	0.28	1.21*	0.37
10	Churchill	0.27	0.21	0.24*	0.07	0.20*	0.26	-0.03	0.63*	0.52	0.35
11	Kuujuaq	-0.21	0.10	0.12	0.26*	0.04	0.04	0.57	0.52*	1.12*	0.56*
12	Kuujuarapik	-0.22	-0.08	0.37*	0.26	0.15	0.82	0.49	0.73*	0.75*	0.70*
m	Canadian Arctic	0.10	0.00	0.10	0.30*	0.10	0.11	0.44	0.47*	0.91*	0.50*

Objaśnienia: m – średnia obszarowa, * – trend istotny statystycznie na poziomie 0.05
 Explanations: m – area mean, * – trend statistically significant at the level of 0.05

Podobny rozkład trendów średniej temperatury wystąpił podczas zimy. Na wschodzie obszaru dominowały trendy lekko ujemne i nieistotne statystycznie (Clyde $-0.3^{\circ}\text{C}/10$ lat), a na zachodzie trendy wzrostowe i istotne statystycznie (Sachs Harbour $0.6^{\circ}\text{C}/10$ lat) – tab. 3. W badanym okresie T_i obszarowa zimy charakteryzowała się trendem lekko wzrostowym, lecz nieistotnym statystycznie ($0.1^{\circ}\text{C}/10$ lat). W latach 1976–2005 uległy wzmocnieniu trendy ujemne i nieistotne statystycznie na stacjach Resolute ($-0.05^{\circ}\text{C}/10$ lat), Coral Harbour ($-0.27^{\circ}\text{C}/10$ lat) oraz Clyde ($-0.53^{\circ}\text{C}/10$ lat). Natomiast silne wzrostowe trendy pojawiły się na stacjach Iqaluit ($0.25^{\circ}\text{C}/10$ lat) i Kuujuarapik ($0.82^{\circ}\text{C}/10$ lat) – tabela 3.

Wiosną w rozkładzie przestrzennym trendów wzmocnieniu i rozprzestrzenieniu (w porównaniu do warunków w zimie) uległy trendy ujemne i nieistotne statystycznie na wschodzie obszaru (Iqaluit i Clyde ok. $-0.3^{\circ}\text{C}/10$ lat). Na krańcach zachodnich i w środkowej części obszaru trendy wzrostowe uległy osłabieniu (Sachs Harbour $0.4^{\circ}\text{C}/10$ lat) – tab. 3. Dla średniej obszarowej T_i wiosny nie zanotowano trendu. W okresie 1976–2005 trend średniej obszarowej T_i w tym sezonie stał się silnie wzrostowy ($0.44^{\circ}\text{C}/10$ lat), lecz wciąż był nieistotny statystycznie (tab. 3). Na wszystkich stacjach, oprócz Churchill ($-0.03^{\circ}\text{C}/10$ lat), pojawiły się głównie silne wzrostowe trendy temperatury powietrza np. Resolute ($0.71^{\circ}\text{C}/10$ lat) i Eureka ($0.90^{\circ}\text{C}/10$ lat), na których to stacjach były one istotne statystycznie (tab. 3).

Podczas lata rozkład przestrzenny i wartości trendów uległy, w stosunku do wiosny, pewnym zmianom (tab. 3) – tzn. na całym obszarze były one lekko wzrostowe (w tym na stacjach Kuujuarapik, Churchill, Clyde były istotne statystycznie). Jedynie na stacji Resolute wystąpił trend lekko ujemny ($-0.04^{\circ}\text{C}/10$ lat), nieistotny statystycznie. Obliczony trend średniej obszarowej T_i lata dla Arktyki Kanadyjskiej był lekko wzrostowy ($0.10^{\circ}\text{C}/10$ lat) i nieistotny statystycznie. W okresie 1976–2005 na ośmiu stacjach trend T_i lata był silnie wzrostowy i istotny statystycznie, największy był on na stacji

Clyde ($0.78^{\circ}\text{C}/10$ lat). Trend średniej T_i obszarowej stał się również silnie wzrostowy ($0.47^{\circ}\text{C}/10$ lat) i istotny statystycznie (tab. 3).

Jesienią dominowały istotne statystycznie trendy wzrostowe występujące w części północno-zachodniej Arktyki Kanadyjskiej (Sachs Harbour, $0.5^{\circ}\text{C}/10$ lat) i w południowo-wschodniej (Coral Harbour, $0.4^{\circ}\text{C}/10$ lat), jedynie w centralnych rejonach trendy były lekko dodatnie i nieistotne statystycznie (tab. 3). Również T_i obszarowa charakteryzowała się silnym trendem wzrostowym ($0.30^{\circ}\text{C}/10$ lat) istotnym statystycznie (tab. 1, ryc. 6). Silne wzmocnienie trendów wzrostowych stwierdzono w okresie 1976–2005 na wszystkich stacjach (na dziewięciu z nich trendy były istotne statystycznie). Szczególnie duże ocieplenie wystąpiło na północy Arktyki Kanadyjskiej (Eureka, $1.70^{\circ}\text{C}/10$ lat i Resolute, $1.18^{\circ}\text{C}/10$ lat). Również trend T_i obszarowej był silnie wzrostowy ($0.91^{\circ}\text{C}/10$ lat) i istotny statystycznie (tab. 3).

Charakterystyczną cechą zmian temperatury w Arktyce Kanadyjskiej jest ich największy wzrost jesienią w porównaniu do pozostałych pór roku, a szczególnie do zimy, w której był on zdecydowanie najslabszy. Zachowanie to jest niezgodne z projekcjami modelowymi, które niemal wszystkie sugerują, iż zima powinna się najbardziej ocieplić wraz z rosnącą zawartością dwutlenku węgla w atmosferze.

3.5. Klasyfikacja termiczna

Analizując ryc. 8, która prezentuje zmienność warunków termicznych miesięcy i lat na obszarze Arktyki Kanadyjskiej, widoczne jest wyraźne ocieplenie po roku 1993. Prawie wszystkie miesiące ekstremalnie chłodne (z najniższą średnią temperaturą w analizowanym okresie) wystąpiły przed rokiem 1980. Szczególnie miesiące od lipca do grudnia po roku 1997 charakteryzowały się średnią temperaturą powyżej normy. Również T_i roczna znajdowała się znacznie powyżej normy (lata 1998 i 2005 ekstremalnie ciepłe). W roku 1998 aż pięć miesięcy było ekstremalnie ciepłych. Miesiące i lata ekstremalnie chłodne występowały głównie w okresie 1972–1980 (ryc. 8).

Na podstawie klasyfikacji termicznej przeanalizowano również warunki termiczne poszczególnych lat na 12 stacjach meteorologicznych. Z ich analizy wynika, że lata ekstremalnie chłodne lub ciepłe nie występują na wszystkich stacjach równocześnie. Rok 1954 został sklasyfikowany na stacji Clyde jako ekstremalnie chłodny, a na pozostałych stacjach był on normalny pod względem termicznym. Podobnie było z rokiem 1993, który zapisał się na wschodzie Arktyki Kanadyjskiej (Iqaluit, Clyde) jako ekstremalnie chłodny, podczas gdy na zachodzie i północy był on lekko ciepły (Eureka, Sachs Harbour, Resolute). Podobnie jak lata ekstremalnie chłodne tak i lata ekstremalnie ciepłe mogą wystąpić tylko na jednej lub dwóch stacjach równocześnie. Dobrym przykładem jest rok 1980, kiedy to na stacji Clyde był on ekstremalnie ciepły a na pozostałym obszarze w normie lub lekko ciepły.

Występowały również lata ekstremalnie chłodne lub ciepłe, które były obserwowane prawie na całym analizowanym obszarze. Przykładem może być rok 1972, który okazał się być na 9 z 12 stacji rokiem ekstremalnie chłodnym. Natomiast rok 1998 był sklasyfikowany jako ekstremalnie ciepły również na 9 stacjach meteorologicznych.

Ryc. 8. Zmienność warunków termicznych miesięcy i lat na obszarze Arktyki Kanadyjskiej, według przyjętej klasyfikacji (wg Miętusa i in. 2002) w latach 1951–2005

Fig. 8. Variability of monthly and yearly temperature conditions in the Canadian Arctic, according to classification (according to Miętus *et al.* 2002) in the period 1951–2005

Lata Years	I JAN	II FEB	III MAR	IV APR	V MAY	VI JUN	VII JUL	VIII AUG	IX SEP	X OCT	XI NOV	XII DEC	Rok Year
1951													
1952					-0,9								
1953				-10,5									
1954								8,8					
1955										-4,3			
1956					-10,1								
1957	-33,7												
1958													
1959													
1960													
1961													
1962			-21,4										
1963													
1964			-30,7										
1965													
1966													
1967													
1968													
1969		-24,1											
1970													
1971													
1972						0,3	6,0		-2,3			-30,7	-14,7
1973												-14,9	
1974													
1975	-33,7												
1976													
1977	-23,4												
1978						0,3				-14,4			
1979		-36,4						4,9					
1980													
1981													
1982													
1983													
1984													
1985													
1986													
1987												-22,5	
1988													
1989													
1990													
1991													
1992				-20,6									
1993													
1994													
1995													
1996													
1997													
1998						6,2	9,6		3,6			-12,9	-9,7
1999													
2000													
2001												-19,4	
2002													
2003													
2004													
2005													

Objaśnienia: -4,3 -33,7 odpowiednio najwyższa i najniższa Ti miesiąca lub roku w okresie 1951–2005
 Explanations: -4,3 -33,7 highest and lowest monthly or annual Ti in the period 1951–2005, respectively

K	Charakter termiczny miesięcy i lat Thermal character of months and years	Skala barw Scale of colours	K	Charakter termiczny miesięcy i lat Thermal character of months and years	Skala barw Scale of colours
>95	ekstremalnie ciepły extremely warm		30.01-40	lekko chłodny slightly cold	
90.01-95	anomalnie ciepły abnormally warm		20.01-30	chłodny cold	
80.01-90	bardzo ciepły very warm		10.01-20	bardzo chłodny very cold	
70.01-80	ciepły warm		5.01-10	anomalnie chłodny abnormally cold	
60.01-70	lekko ciepły slightly warm		<5	Ekstremalnie extremely cold	
40.01-60	normalny normal			chłodny	

K – Rząd kwantyli (%) dla lat 1951–2000 – Percentiles (%) for years 1951–2000

4. Podsumowanie i wnioski

Najcieplejszy w Arktyce Kanadyjskiej był 1998 rok (-9.7°C), natomiast najchłodniejszym okazał się 1972 rok ze średnią temperaturą -14.7°C (ryc. 5). Najniższa zanotowana temperatura powietrza w analizowanym okresie (-55.3°C) wystąpiła w stacji Eureka w 1979 i 1987 roku, a najwyższa (37.0°C) została zarejestrowana na stacji Kuujuarapik w 2005 roku.

Na analizowanym obszarze średnie wartości roczne temperatury mieściły się w przedziałach od -7.99°C – -7.0°C (Kuujuarapik) do -21.99°C – -21.0°C (Eureka) – ryc. 4.

Średnie wartości temperatury lata mieściły się w przedziałach od -0.99°C w stacji Eureka (10.9%) do 13.1°C – 14.0°C w stacji Kuujuarapik (1.9%). Zakres średnich wartości temperatury zimy, zarówno na północy jak i na południu Arktyki Kanadyjskiej, był znacznie większy niż podczas lata i zawierał się w przedziałach od -40.99°C – -40.0°C (Eureka 7.3%) do -9.99°C – -9.0°C (Kuujuarapik 1.9%) – ryc. 4.

Część południowo-zachodnia badanego obszaru charakteryzowała się największymi amplitudami rocznymi temperatury powietrza (45.7°C – Baker Lake), natomiast najmniejsze amplitudy były charakterystyczne dla zachodniej i wschodniej części Arktyki Kanadyjskiej (35.5°C – Clyde) – tab. 3.

Największą zmiennością średniej obszarowej temperatury powietrza z roku na rok charakteryzował się sezon zimowy (1.7°C), a najmniejszą sezon letni (0.9°C) – tab. 4. Największa zmienność temperatury rocznej (1.7°C) występowała na południowym-wschodzie Arktyki Kanadyjskiej (Iqaluit).

Zaobserwowano nieistotne statystycznie słabe trendy wzrostowe średniej rocznej T_i , T_{max} , T_{min} w okresie 1951–2005 (tab. 5). Spośród trendów sezonowych najsilniejsze istotne statystycznie trendy wzrostowe wystąpiły jesienią na stacji Sachs Harbour ($0.5^{\circ}\text{C}/10$ lat). Niewielkie trendy spadkowe nieistotne statystycznie zaobserwowano zimą na wschodzie Arktyki Kanadyjskiej. W okresie 1976–2005 zaobserwowano silne wzmocnienie trendów wzrostowych temperatury powietrza (tab. 5.). Największy wzrost temperatury występował jesienią ($0.91^{\circ}\text{C}/10$ lat) i obejmował wszystkie stacje (na dziewięciu z nich był istotny statystycznie) a najmniejszy zimą ($0.11^{\circ}\text{C}/10$ lat). Również temperatura roczna wykazywała w tym okresie silny trend wzrostowy istotny statystycznie ($0.50^{\circ}\text{C}/10$ lat) – tab. 5.

Zastosowana klasyfikacja termiczna (tab. 2.) uwidacznia wzrost częstości występowania miesięcy i lat anomalnie i ekstremalnie ciepłych po roku 1993 (ryc. 8). Lata ekstremalnie chłodne lub ciepłe nie występują najczęściej na wszystkich stacjach równocześnie. Zaobserwowano jednak lata ekstremalnie chłodne lub ciepłe, które wystąpiły prawie na całym analizowanym obszarze (1972 i 1998 r.).

Literatura

Atlas Arktiki, 1985. Głównoje Uprawlenije Geodezii i Kartografii pri Sowietie Ministrow, Moskwa: 204 s.

Miętus M., Owczarek M., Filipiak J., 2002, Warunki termiczne na obszarze Wybrzeża i Pomorza w świetle wybranych klasyfikacji. IMGW Warszawa: 56 s.

Okolowicz W., 1969, Klimatologia ogólna. PWN Warszawa: 395 s.

Przybylak R., 1996, Zmienność temperatury powietrza i opadów atmosferycznych w okresie obserwacji instrumentalnych w Arktyce. Wydawnictwo Uniwersytetu M. Kopernika, Toruń: 280 s.

Przybylak R. 2002, Variability of air temperature and atmospheric precipitation in the Arctic. Atmospheric and Oceanographic Sciences Library, 25, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht/Boston/London: 330 s.

Przybylak R., 2007a, Recent air-temperature changes in the Arctic. Annals Glaciology, 46: 316–324.

Przybylak R., 2007b, Współczesne zmiany klimatu w Arktyce. [w:] A. Styszyńska, A.A. Marsz (red.), Zmiany klimatyczne w Arktyce i Antarktyce w ostatnim pięćdziesięcioleciu XX wieku i ich implikacje środowiskowe, Akademia Morska, Gdynia: 93–110.

Przybylak R., Vizi Z., 2005, Air temperature changes in the Canadian Arctic from the early instrumental period to modern times. *International Journal of Climatology*, 25: 1507–1522.

Summary

This paper presents a detailed characterisation of thermal conditions in the Canadian Arctic from 1951 to 2005. For this purpose, monthly data (average, maximum and minimum temperatures) for 12 meteorological stations have been used (Table 1, Figure 1). Basic climatological characteristics have been calculated (Tables 3 and 4) and their spatial distributions are shown on maps (Figure 2). For seasonal and annual mean air temperature, the frequency of their occurrence in 1-degree intervals (Figure 4) as well as year-to-year changes (Table 4) have been calculated. For two time periods (1951–2005 and 1976–2005) air temperature trends for seasonal and annual means have also been presented (Table 5 and Figure 7). In both periods, areally averaged trends for the Canadian Arctic are positive. The greatest temperature trends were noted in autumn: 0.30°C/decade and 0.91°C/decade, respectively. From the period 1951–2005 to the period 1976–2005 a significant rise in trend values was observed, with the exception of winter. In the latter period, trends were statistically significant in summer, autumn and for the year as a whole. In the period 1951–2005, statistically significant trends occurred only in autumn (see Table 5).

Thermal classifications of each month and year of the study period have been made according to the proposals of Miętus *et al.* (2002) (see Table 2 and Figure 8). The results of this classification show that after 1993 a significant increase in the number of months and years, classified as abnormally or extremely warm, was noted.