

## WPŁYW CYRKULACJI ŚRODKOWOTROPOSFERYCZNEJ NA TEMPERATURĘ POWIETRZA W PÓŁNOCNEJ KANADZIE I NA ALASCE

THE INFLUENCE OF THE MID-TROPOSPHERIC ATMOSPHERIC CIRCULATION  
ON THE AIR TEMPERATURE IN NORTHERN CANADA AND ALASKA

Andrzej A. Marsz, Anna Styszyńska, Sławomir Zblewski

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

**Zarys treści.** Praca omawia wpływ zmian frekwencji „pacyficzno-amerykańskich” makrotypów cyrkulacji środkowotroposferycznej Wangengejma-Girsa na kształtowanie się temperatury powietrza na obszarze północnej Kanady i Alaski ( $> 60^\circ\text{N}$ ). Związki te analizowano w przekrojach miesięcznych i rocznych, w latach 1986-2010. Stwierdzono występowanie na ogół słabych związków, wykazujących dodatkowo wyraźne zróżnicowanie sezonowe i regionalne. Te na ogół słabe w przekrojach miesięcznych związki wynikają z niewielkiego zróżnicowania kierunków adwekcji stowarzyszonych z występowaniem poszczególnych makrotypów. Na obszarze leżącym na E od  $125^\circ\text{W}$  dla każdego z występujących makrotypów charakterystyczna jest dominacja napływów z północy.

Związki temperatury rocznej z cyrkulacją środkowotroposferyczną różnicują się w zależności od rozmiarów zmian temperatury. W badanym okresie na obszarze położonym na W od  $125^\circ\text{W}$  temperatura roczna nie wykazuje statystycznie istotnego trendu ( $+0,022(\pm 0,020)^\circ\text{C}\cdot\text{rok}^{-1}$ ), a na E od tej długości występuje silny i istotny trend ( $+0,135(\pm 0,025)^\circ\text{C}\cdot\text{rok}^{-1}$ ). Na całym obszarze zmiany temperatury rocznej objaśnia zmienność frekwencji makrotypu Z w styczniu, przy czym na obszarze na W od  $125^\circ\text{W}$  objaśnienie to jest niewielkie ( $\sim 31\%$  zmienności), na E od  $125^\circ\text{W}$  zmienność frekwencji tego makrotypu objaśnia  $\sim 49\%$  rocznej wariacji temperatury rocznej. W równaniu regresji wielokrotnej, które zmiennymi niezależnymi są frekwencje makrotypu Z w styczniu oraz makrotypu M1 w lipcu i wrześniu, zmienność frekwencji wymienionych makrotypów objaśnia 69% wariacji temperatury rocznej, jaka występuje na wschód od  $125^\circ\text{W}$ . Analiza wykazuje, że wzrost temperatury na całym obszarze jest związany z ujemnym trendem występującym we frekwencji makrotypu Z w styczniu i zastępowaniem go przez makrotyp M2, a na środkowej i wschodniej części obszaru dodatkowo z dodatnim trendem frekwencji makrotypu M1 w lipcu i wrześniu.

Spadek frekwencji makrotypu Z w styczniu nie jest monotoniczny, gwałtowny spadek frekwencji tego makrotypu zaznaczył się w latach 1995-1996. Spadkowi frekwencji tego makrotypu odpowiada wzrost temperatury powietrza na wschód od  $125^\circ\text{W}$  o 2 deg. Najbardziej prawdopodobną przyczyną tej zmiany cyrkulacji środkowotroposferycznej jest występujący w tym samym czasie spadek powierzchni lodów morskich na Zatoce Baffina. Ogólnie, zmiany temperatury rocznej na obszarze Alaski i północnej Kanady w latach 1986-2010 są niemal całkowicie objaśnione przez zachodzące w tym samym czasie zmiany cyrkulacji środkowotroposferycznej.

**Słowa kluczowe:** Alaska, Arktyka Kanadyjska, Zatoka Baffina, temperatura powietrza, cyrkulacja atmosferyczna, makrotypy Wangengejma-Girsa.

### 1. Wprowadzenie

Częścią Arktyki, w obrębie której w ostatnich latach obserwuje się wyjątkowo silny wzrost temperatury powietrza (np. Johannessen i in. 2004, Przybylak 2007, Alekseev i in. 2010) są również północne krańce kontynentu amerykańskiego. Tam, zwłaszcza w rejonie Zatoki Hudsona, zasięg klimatu

arktycznego sięga najdalej na południe, do 59-60°N (patrz Atlas Arktiki 1985). Na południe od granicy klimatycznej Arktyki Kanadyjskiej i granicy klimatu arktycznego na Alasce rozciąga się strefa klimatu subarktycznego, na której procesy zmian klimatycznych zachodzą równie intensywnie, jak w strefie klimatu arktycznego, przyczyniając się do zachodzących tam z dużą intensywnością zmian środowiska (Arctic Climate Issues 2011).

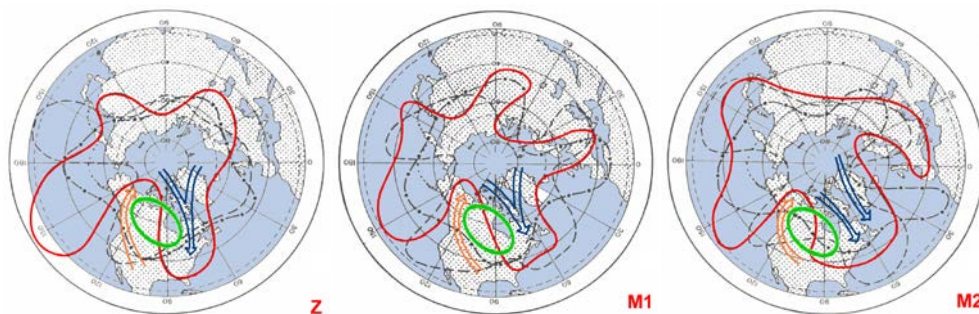
Poznanie procesów doprowadzających do zmian klimatu Arktyki ma duże znaczenie w wyjaśnieniu mechanizmów ocieplenia klimatu na półkuli północnej. W kształtowaniu tego ocieplenia uczestniczy cyrkulacja atmosferyczna, której chwilowe wykształcenie w dolnej troposferze określa kierunek napływu powietrza z danego obszaru źródłowego, co znajduje odbicie w przebiegu elementów meteorologicznych w przyziemnej warstwie powietrza. Dotyczy to również, a może przede wszystkim, zmian temperatury powietrza. Znajomość wpływu cyrkulacji atmosferycznej na zmiany temperatury powietrza w Arktyce jest nierównomierna. Znacznie lepiej poznana jest w Sektorze Atlantyckim Arktyki oraz nad obszarami Morza Arktycznego, niż nad obszarami lądowymi. Zwłaszcza słabo poznany jest wpływ cyrkulacji atmosferycznej na kształtowanie się zmienności temperatury powietrza nad północnymi krańcami Ameryki Północnej. Współczesne prace na ten temat, bazujące na materiale empirycznym, są mniej niż nieliczne (Slonosky i Graham 2005), dominują prace o bardzo ogólnym charakterze (skala półkuli) przedstawiające takie czy inne projekcje uzyskane z obliczeń modelowych.

W umiarkowanych i wysokich szerokościach procesami dolnej cyrkulacji atmosferycznej steruje układ fali długiej w środkowej troposferze (fale Rossby'ego). Po wschodniej stronie górnego klina lokuje się quasistacjonarny wyż, na pograniczu zachodniej części górnego klina ze wschodnią częścią górnej zatoki występuje strefa cyklonogenezy, w której układy niżowe rozwijają się i kierują w stronę wierzchołka fali (Fortak 1971). Jeśli górny klin lub zatoka często lokować się będzie w danym położeniu, to w tym rejonie, w dolnej troposferze również często rozwijać się będzie określony układ baryczny, z czym wiąże się adwekcje mas powietrza z nad określonych obszarów (Marsz 2012).

Dla półkuli północnej, w atlantycko-europejskim sektorze umiarkowanych i wysokich szerokości geograficznych, istnieje klasyfikacja rozkładu przestrzennego górnych klinów i zatok znana jako typologia makrotypów cyrkulacji środkowotroposferycznej (500 hPa) Wangengejma-Girsa (Wangengejm 1952, Girs 1981). Wyróżnia się w niej 3 typy układów fal długich: jeden makrotyp charakteryzujący się występowaniem intensywnej cyrkulacji strefowej (W; zachodniej) oraz dwa makrotypy cyrkulacji południkowej (E i C). Częstość występowania makrotypu W jest silnie ujemnie skorelowana z częstością występowania makrotypu E, częstość makrotypu C jest słabo ujemnie skorelowana z frekwencją makrotypu E i nie wykazuje istotniejszego skorelowania z częstością makrotypu W (Marsz 2012). Z każdym z makrotypów związany jest określony rozkład przestrzenny górnych klinów i zatok powodując występowanie określonych rozkładów przestrzennych form dolnej cyrkulacji atmosferycznej.

Dla pacyficzno-amerykańskiego sektora cyrkulacyjnego umiarkowanych i wysokich szerokości geograficznych istnieje podobna klasyfikacja makrotypów cyrkulacji atmosferycznej (Girs 1964). Wyróżnia się w niej również 3 makrotypy: jeden – cyrkulacji strefowej (zachodniej) oznaczany jako Z i dwa makrotypy cyrkulacji południkowej oznaczane jako M1 (południkowy) i M2 (wschodni) odpowiadające odpowiednio makrotypom C i E w sektorze atlantycko-europejskim (King i in. 1998). W chłodnej porze roku, dla każdego z tych makrotypów, charakterystyczne jest występowanie górnego klina nad zachodnią i środkową częścią Ameryki Północnej oraz górnej zatoki – nad jej częścią wschodnią, czego wynikiem jest intensywna cyrkulacja południowa nad kontynentem północnoamerykańskim (ryc. 1). Takie ułożenie fali długiej w sektorze amerykańsko-pacyficznym wymusza bariera orograficzna. Góry

Skaliste „kotwiczą” położenie środkowotroposferycznej fali długiej w tym rejonie (m.in. Lamb 1964, Hartmann 1994, Chen i Yoon 2002, Hartmann i Wendler 2005). Wyraźniejsze różnice w położeniu i zasięgu górnych zatok zaznaczają się nad Pacyfikiem (ryc. 1).



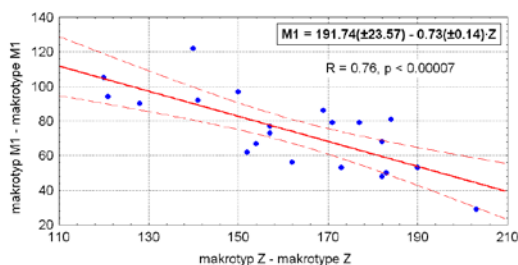
Ryc. 1. Położenie głównych górnych klinów i zatok w makrotypach Z, M1 i M2. Zieloną elipsą zaznaczono położenie quasistacjonarnego antycyklonu, a strzałkami kierunki napływu mas powietrza (na podstawie Girs 1981)

Fig. 1. The position of main upper troughs and ridges in the macro-types Z, M1 and M2. The position of the Canadian High-pressure area is marked with green ellipse and directions of the influx of air masses with arrows (on the basis Girs 1981).

W ujęciu rocznym, w sektorze amerykańsko-pacyficznym, między frekwencją makrotypów zachodzą związki odmienne do tych, jakie obserwuje się między frekwencją makrotypów w sektorze atlantycko-europejskim. W ostatnich 25. latach (1986-2010) frekwencja makrotypu Z jest silnie ujemnie skorelowana z frekwencją makrotypem M1 ( $r = -0,76$ ,  $p < 0,000$ ; patrz ryc. 2) i jednocześnie nie wykazuje istotnego związku z frekwencją makrotypu M2 ( $r = -0,40$ ,  $p > 0,07$ ). Między roczną frekwencją makrotypów M1 i M2 brak związków istotnych statystycznie ( $r = -0,30$ ,  $p > 0,186$ ) W przekrojach miesięcznych i sezonowych związków między frekwencją makrotypów pojawiają się w amerykańsko-pacyficznym sektorze cyrkulacyjnym znaczne różnice w stosunku do atlantycko-eurazjatyckiego sektora cyrkulacyjnego. Będą one omówione w dalszej części pracy.

Ryc. 2. Związek między liczbą dni z makrotypem Z w roku a liczbą dni z występowaniem makrotypu M1 w tym samym czasie. Lata 1986-2010

Fig. 2. Correlation between the number of days with the circulation macro-type Z in year and the number of days with circulation macro-type M1 in the same period (1986-2010).

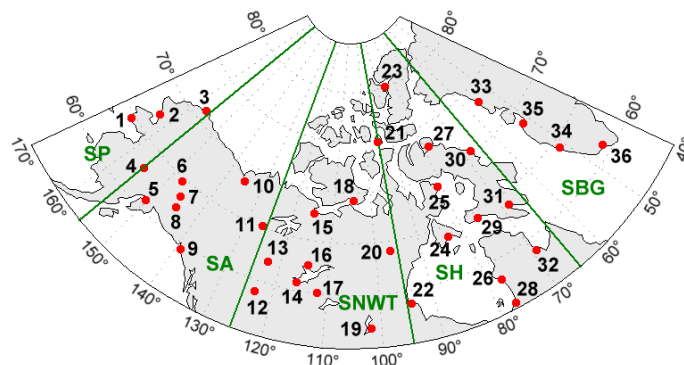


Związki temperatury powietrza z frekwencją dni z określonymi makrotypami cyrkulacji środkowotroposferycznej stwierdzono na wielu obszarach półkuli północnej (Kozuchowski i Marciniak 1998, Kozuchowski 1989, Przybylak 2000, Marsz 2005) i południowej (Marsz 2004). Na Pacyfiku Północnym stwierdzono występowanie silnych, długookresowych związków procesów oceanicznych z frekwencją poszczególnych makrotypów (King i in. 1998).

Wcześniejsze badania autorów (Zblewski i Marsz 2010) wykazały, że w rejonie Arktyki Kanadyjskiej i obszarach przyległych temperatura powietrza kształtuje się pod wpływem działania dwóch mód cyrkulacyjnych: NAO (North Atlantic Oscillation) i PNA (Pacific-North American Oscillation). Na zachód od linii Cambridge Bay – Baker Lake, czyli około 105-108°W, głównym czynnikiem sterującym zmianami temperatury powietrza jest PNA, a na wschód od niej – NAO. Podobne wnioski znaleźć można w pracy Maszewskiego (2011). Obie mody pozostają pod wpływem cyrkulacji środkowotroposferycznej (m.in. Wallace i Gutzler 1981, Strong i Magnúsdóttir 2008, 2009). W związku z tym celem tej pracy jest zbadanie czy, i w jakim stopniu, cyrkulacja środkowotroposferyczna charakteryzowana przez frekwencję makrotypów według klasyfikacji Wangenejma-Girsa, ma wpływ na kształtowanie się temperatury powietrza na obszarze północnej części Ameryki Północnej. Pozwoli to udzielić odpowiedzi na pytanie, w jakim stopniu zachodzące na tym obszarze zmiany temperatury powietrza można wyjaśnić działaniem procesów naturalnych.

## 2. Obszar badań, źródła danych i metody badawcze

Obszar badań obejmuje trzy regiony klimatyczne Arktyki wyróżniane przez Atlas Arktyki (1985): "Zatokę Baffina", "Arktykę Kanadyjską" (rejon północny i południowy) oraz wschodni fragment „Rejonu Pacyficznego”. Pozostałe obszary przylegające od zachodu do "Arktyki Kanadyjskiej", leżące w pobliżu jezior Niewolniczego i Athabasca oraz obszary Alaski i Terytorium Yukonu (Yukon Territory) nie wchodzące w skład „Arktyki”, leżące w strefie klimatu subarktycznego określono umowną nazwą "Subarktyki Północnoamerykańskiej" (ryc. 3). Najdalej na zachód wysuniętymi stacjami objętymi badaniami są leżące na Alasce Kotzebue i Nome, na wschód – stacje położone na zachodnich wybrzeżach Grenlandii.



Ryc. 3. Położenie stacji, których dane wykorzystano w opracowaniu. Oznaczone umowne granice sektorów cyrkulacyjnych: SP – pacyficzny (>155°W), SA – alaskański (125-155°W), SNWT – Northwest Territory (95-125°W), SH – hudsonski (65-95°W), SBG – baffino-grenlandzki (<65°W)

Fig. 3. Meteorological stations whose data were used in the study. The boundaries of circulation sectors are marked as follows: SP – Pacific (> 155°W), SA – Alaska (125-155°W), SNWT – Northwest Territory (95-125°W), SH – Hudson (65-95°W), SBG – Baffin-Greenland (<65°W)

Okres objęty analizą obejmuje ostatnie 25 lat (1986-2010), w których zmiany klimatyczne w Arktyce są szczególnie silne (Przybylak 2007, Hansen i in. 2010), a dane źródłowe są dostępne i pewne. Do analizy wybrano 36 stacji posiadających komplet danych (tab. 1). Na ryc. 3 położenie stacji oznaczono

liczbami (zgodnymi z numerami kolejnymi stacji w tab. 1). Ciągi danych średnich miesięcznych wartości temperatury powietrza dla tych stacji pochodzą ze zbioru HCCD – Historical Adjusted Climate Database for Kanada (Vincent i Gullett 1999), z DMI (Danish Meteorological Institute) oraz Monthly Timeseries Data Alaska zestawionych przez Alaska Climate Research Center.

Tabela 1. Stacje, z których temperatury miesięczne i roczne zostały wykorzystane w opracowaniu. Kolejność stacji w tabeli uszeregowana jest względem malejącej długości geograficznej. Oznaczenia literowe – nazwy sektorów: SA – alaskański (> 125°W), SNWT – Northwest Territory (95-125°W), SH – hudsonski (65-95°W), SBG – baffino-grenlandzki (< 65°W)

Table 1. Stations used in the study. The order of stations in the table corresponds to the decreasing longitude. The letters – the name of sectors: SP – Pacific (> 155°W), SA – Alaska (125-155°W), SNWT - Northwest Territory (95-125°W), SH – Hudson (65-95°W), SBG – Baffin-Greenland (<65°W). Boundaries of sectors are marked with lines.

Nr No	Stacja Station	$\lambda$ °W	$\varphi$ °N	Sektor Sector	Nr No	Stacja Station	$\lambda$ °W	$\varphi$ °N	Sektor Sector
1	Nome	165,5	63,5	SP	19	Lynn Lake	101,1	56,9	SNWT
2	Kotzebue	162,6	66,9	SP	20	Baker Lake	96,1	64,3	SNWT
3	Barrow	156,8	71,3	SP	21	Resolute	95,0	74,7	SH
4	McGrawth	155,6	62,9	SP	22	Churchill	94,1	58,7	SH
5	Anchorage	150,0	61,2	SA	23	Eureka	85,9	80,0	SH
6	Fairbanks	147,5	64,8	SA	24	Coral Harbour	83,4	64,2	SH
7	Big Delta	145,7	64,0	SA	25	Hall Beach	81,3	68,8	SH
8	Gulkana	145,4	63,0	SA	26	Inukjuak	78,1	58,5	SH
9	Yakutat	139,4	59,5	SA	27	Pond Inlet	78,0	72,7	SH
10	Inuvik	133,5	68,3	SA	28	Kuujuarapik	77,8	55,3	SH
11	Norman Wells	126,8	65,3	SA	29	Cape Dorset	76,5	64,2	SH
12	Fort Nelson	122,6	58,8	SNWT	30	Clyde A	68,5	70,5	SH
13	Fort Simpson	121,2	61,8	SNWT	31	Iqaluit	68,5	63,8	SH
14	Hay River	115,8	60,8	SNWT	32	Kuujuaq	68,4	58,1	SH
15	Kugluktuk	115,1	67,8	SNWT	33	Upernavik	56,2	72,8	SGB
16	Yellowknife	114,4	62,5	SNWT	34	Nuuk	51,8	64,1	SGB
17	Fort Smith	112,0	60,0	SNWT	35	Ilulisaat	51,1	69,2	SGB
18	Cambridge Bay	105,1	69,1	SNWT	36	Narsarsuaq	45,7	61,3	SGB

Podstawowe zainteresowanie autorów budzą związki między frekwencją makrotypów cyrkulacji środkowotroposferycznej a temperaturą na obszarach Ameryki Północnej leżących powyżej 60°N, jednak ze względu na nierównomierne rozmieszczenie stacji w przestrzeni i brak ciągłości danych na wielu stacjach<sup>1</sup>, dla uzyskania ciągłości obrazu przestrzennego związków zaszała potrzeba wykorzystania danych z kilku stacji położonych na szerokości mniejszej od 60°N.

Jako wskaźnik charakteryzujący cyrkulację środkowotroposferyczną wykorzystano miesięczne i roczne dane o frekwencji dni z występowaniem makrotypów cyrkulacji atmosferycznej Wangejgejma-Girsa. Dla sektora amerykańsko-pacyficznego są to, wprowadzone przez Girsa (1964), makrotypy Z, M1 i M2. Wykorzystano dane dostępne w publikacjach Arctic and Antarctic Research Institute (AARI, www.aari.ru). Brakuje w nich danych z: IX i X1993; XII 2004; I-XII 2005 oraz I-IX 2006.

Do ustalenia związków temperatury powietrza z cyrkulacją atmosferyczną posłużono się analizą korelacji liniowych oraz analizą regresji i analizą wariancji. Wobec obliczania bardzo wielu współczyn-

<sup>1</sup> Wykorzystano jedynie te stacje, które mają kompletne serie obserwacji temperatury w latach 1986-2010.

ników korelacji<sup>2</sup> i jednocześnie stosunkowo krótkich korelowanych ze sobą szeregów, można sądzić, że znaczna część istotnych statystycznie ( $p < 0,05$ ) wartości współczynników korelacji stanowi dzieło przypadku. Z tego względu w analizie wyników brano pod uwagę jako odtwarzające rzeczywistość tylko takie sytuacje, w których istotne współczynniki korelacji tworzyły „bloki”, spójne pod względem czasowym i przestrzennym. Występujące pojedyncze, istotne współczynniki korelacji, zwłaszcza te, które nie tworzyły względne logicznej całości z otaczającymi daną stację związkami między cyrkulacją a temperaturą, ignorowano (patrz np. wartość współczynnika korelacji frekwencji makrotypu M2 z temperaturą czerwca na stacji Nome (tab. 7).

### 3. Wyniki

#### 3.1. Rozkład frekwencji makrotypów w ciągu roku i ich zmienność długookresowa

Rozkład w czasie frekwencji makrotypów cyrkulacji środkowotroposferycznej funkcjonującej w pacyficzno-amerykańskim sektorze cyrkulacyjnym odbiega od prawidłowości typowych dla atlantycko-eurazjatyckiego sektora cyrkulacyjnego. Przeciętnie w latach 1986-2010 w sektorze pacyficzno-amerykańskim najczęściej, bo przez 161,7 dni w roku, występował makrotyp Z (strefowy, zachodni), co stanowi 44,3% czasu roku. Na drugim miejscu lokuje się frekwencja makrotypu M2 (południkowy wschodni), który występuje przez 129,2 dnia w roku (35,4% czasu roku), najrzadziej występującym makrotypem jest M1 (południkowy), którego średnia roczna frekwencja wynosi 74,3 dnia (20,3% czasu roku). W sektorze atlantycko-eurazjatyckim dominującym w ciągu roku jest makrotyp E, którego odpowiednikiem w sektorze pacyficzno-amerykańskim jest makrotyp M2.

W pacyficzno-amerykańskim sektorze cyrkulacyjnym w badanym okresie znacznie silniej niż w sektorze atlantycko-eurazjatyckim zaznacza się sezonowość występowania poszczególnych makrotypów. Zestawienie przeciętnej w latach 1986-2010 miesięcznej frekwencji makrotypów przedstawia tabela 2.

Tabela 2. Średnia wieloletnia (1986-2010) frekwencja makrotypów cyrkulacji środkowotroposferycznej w poszczególnych miesiącach i roku w pacyficzno-amerykańskim sektorze cyrkulacyjnym (dni)

Table 2. Many-year average (1986-2010) of attendance of mid-tropospheric circulation macro-types in each month and year in the Pacific-American circulation sector (days).

Makrotyp Macro-type	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Rok Year
Z	11,3	9,8	13,5	14,3	12,7	11,5	12,8	14,0	13,8	16,0	16,2	13,6	161,7
M1	3,7	4,3	5,9	5,8	8,6	8,3	11,2	10,3	6,7	5,3	2,8	2,7	74,3
M2	16,0	14,2	11,6	9,9	9,7	10,1	7,0	6,0	9,5	9,7	11,0	14,7	129,2

Frekwencja makrotypu Z (strefowego) w ciągu całego roku jest wysoka. Tylko w lutym średnia częstość występowania tego makrotypu jest nieznacznie mniejsza od 10 dni, w pozostałych miesiącach jest większa od 10 dni w miesiącu. Największą frekwencję dni z występowaniem makrotypu Z obserwuje się w październiku i listopadzie (tab. 2), kiedy stanowi ponad 50% czasu miesiąca, najmniejszą – w styczniu i lutym, kiedy jej udział spada do ~35-36% czasu miesiąca. Jej zmienność, na tle zmien-

<sup>2</sup> W przypadku korelacji danych stacyjnych z poszczególnym makrotypem uzyskiwano 468 współczynników korelacji (36 stacji x 12 miesięcy + średnia roczna).

ności pozostałych makrotypów jest stosunkowo mała – iloraz przeciętnego maksimum (listopad) i minimum (luty) jest mniejszy od 2 (~ 1,7). Za wyjątkiem zimy (grudzień-luty), przez pozostałą część roku (9 miesięcy) frekwencja makrotypu Z dominuje nad frekwencją makrotypów M1 i M2. (patrz tab. 2). Najsilniejszą zmienność sezonową wykazuje frekwencja najmniej liczego makrotypu M1 (cyrkulacji południkowej), którego średnia częstość występowania w chłodnej porze roku jest ponad 3-krotnie mniejsza niż w cieplej porze roku (iloraz maksimum do minimum ~4,1). Najwyższą frekwencję tego makrotypu obserwuje się w najcieplejszych miesiącach – lipcu i sierpniu (33-35% czasu miesiąca), najniższą na przełomie jesieni i zimy – w listopadzie i grudniu, kiedy stanowi mniej niż 10% czasu tych miesięcy (patrz tab. 2). Frekwencja makrotypu M2 stanowi niezbyt konsekwentną odwrotność frekwencji makrotypu M1. Najwięcej dni w miesiącu z występowaniem makrotypu M2 odnotowuje się w okresie zimy (grudniu, styczniu i lutym; 47-51% czasu miesiąca), wyraźne minimum przypada na lipiec i sierpień, kiedy frekwencja tego makrotypu stanowi tylko ~20-22% czasu miesiąca. W porównaniu do zmienności frekwencji rocznej makrotypu M1 zmienność frekwencji makrotypu M2 jest jednak znacznie mniejsza (iloraz ~2,7).

Liczba dni w miesiącu jest stała, stąd spadek lub wzrost liczby dni z wystąpieniem określonego makrotypu w danym miesiącu musi za sobą pociągnąć odpowiednio wzrost lub spadek frekwencji pozostałych makrotypów. Stanowi to przyczynę wystąpienia korelacji ujemnych między frekwencjami poszczególnych makrotypów. Gdyby „zastępowanie” makrotypów miało charakter przypadkowy (chaotyczny), w sytuacji dużej zmienności frekwencji makrotypów w czasie, należałoby spodziewać się wystąpienia słabych korelacji. Występowanie istotnych i wysoce istotnych współczynników korelacji w kilkunastoletnich i dłuższych szeregach czasowych miesięcznych frekwencji makrotypów wskazuje jednak, lub może wskazywać, że w przypadku spadku frekwencji jednego makrotypu w danym miesiącu zastępowanie go przez inny makrotyp, silnie z nim skorelowany, nie jest przypadkowe.

Tabela 3. Współczynniki korelacji między frekwencją poszczególnych makrotypów cyrkulacji śródokwotroposferycznej w pacyficzno-północnoamerykańskim sektorze cyrkulacyjnym w kolejnych miesiącach (1986-2010). Współczynniki korelacji statystycznie istotne ( $p < 0,05$ ) oznaczono pogrubionym drukiem, współczynniki istotne na poziomie  $p < 0,001$  oznaczono dodatkowo \*

Table 3. Coefficients of correlation between the frequencies of the macro-types of tropospheric circulation in the Pacific-North American circulation sector in the following months (1986-2010). Statistically significant correlation coefficients ( $p < 0.05$ ) are marked in bold, coefficients significant at  $p < 0.001$  are additionally marked with\*.

Makrotypy Macro-types	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Z & M1	<b>-0,48</b>	-0,30	<b>-0,54</b>	<b>-0,57</b>	<b>-0,59</b>	-0,29	<b>-0,54</b>	<b>-0,71*</b>	-0,33	<b>-0,60</b>	-0,35	-0,31
Z & M2	<b>-0,77*</b>	<b>-0,63</b>	-0,40	-0,39	-0,51	-0,39	<b>-0,49</b>	-0,30	<b>-0,50</b>	<b>-0,64</b>	<b>-0,75*</b>	<b>-0,87*</b>
M1 & M2	-0,19	<b>-0,54</b>	<b>-0,55</b>	<b>-0,54</b>	-0,40	<b>-0,77*</b>	<b>-0,46</b>	<b>-0,46</b>	<b>-0,65*</b>	-0,23	-0,35	-0,20

Najsilniejsze korelacje i obejmujące największą liczbę miesięcy (8) występują między makrotypami o największej frekwencji – Z i M2, które obejmują zwarty odcinek czasu – od września do lutego. Maksimum siły związku między frekwencją tych makrotypów zaznacza się od listopada do stycznia, co oznacza że w tych miesiącach zmiana frekwencji makrotypu Z będzie najprawdopodobniej kompensowana zmianą, z przeciwnym znakiem, na cyrkulację o charakterze makrotypu M2. W grudniu taka kompensacja (Z → M2 lub odwrotnie) jest niemal całkowicie pewna. Z frekwencją makrotypu Z powiązana jest słabiej (7 miesięcy) frekwencja makrotypu M1. Silniejsza powiązana między tymi makrotypami

rysują się latem, w lipcu i sierpniu, wtedy, kiedy średnia frekwencja makrotypu M1 jest największa (tab. 2). Korelacje między makrotypami Z i M1 osiągają maksimum w sierpniu (patrz tab. 3). Wiosną – w marcu, kwietniu i maju, tworzą zwarty pod względem czasu blok, ale siła związku nie jest wysoka. Między frekwencją makrotypów cyrkulacji południkowej M1 i M2 statystycznie istotne korelacje występują w dwu okresach – na przełomie zimy i wiosny (luty, marzec, kwiecień) oraz w cieplej porze roku – od czerwca do września – gdzie na początku i końcu tego okresu współczynniki korelacji osiągają największe wartości i najwyższą istotność. W czerwcu, przy zmianie makrotypów cyrkulacji południkowej, najbardziej prawdopodobną jest przejście makrotypu M2 w M1 lub odwrotnie, a bardzo mało prawdopodobne przejście któregoś z tych makrotypów w cyrkulację opisaną przez makrotyp Z.

W badanym okresie w sektorze pacyficzno-północnoamerykańskim frekwencja makrotypów cyrkulacji atmosferycznej nie jest stabilna, ale wykazuje występowanie długookresowej zmienności. Jest ona stosunkowo słaba, przeważają niskie, statystycznie nieistotne wartości miesięcznych trendów frekwencji poszczególnych makrotypów (patrz tab. 4), na dodatek trendy miesięczne tych samych makrotypów zmieniają w poszczególnych miesiącach lub sezonach znaki. Mimo występowania w niektórych okresach dość silnych trendów miesięcznych jednego znaku, w innych miesiącach trend frekwencji tego samego makrotypu zmienia znak na przeciwny. Najlepszym przykładem takiej zmienności są trendy makrotypu M2, którego frekwencja jest relatywnie duża (patrz tab. 2). Istotnie statystycznie, ujemne trendy tego makrotypu występują w czerwcu, lipcu i sierpniu. Te spadki frekwencji makrotypu M2 są kompensowane istotnymi wzrostami frekwencji (dodatnie trendy, statystycznie istotne) w lutym i grudniu. Zmiany te wzajemnie się znoszą i w rezultacie trendy roczne frekwencji makrotypów są słabe, i poza trendem rocznym makrotypu Z, statystycznie nieistotne.

Tabela 4. Trendy frekwencji makrotypów cyrkulacji środkowotroposferycznej w pacyficzno-północnoamerykańskim sektorze cyrkulacyjnym (1986-2010). Tr – wartość trendu (mianowanie – liczba dni w miesiącu i dni w roku (w nawiasie – błąd standardowy oszacowania wartości trendu), p – poziom istotności statystycznej.

Wartości trendu statystycznie istotne ( $p < 0,05$ ) dodatkowo oznaczone pogrubionym drukiem

Table 4. Frequency trends of macro-types of mid-tropospheric circulation in the Pacific-North American circulation sector (1986-2010). Tr – value of trend (designation – the number of days in the month and days of the year (in brackets - standard error of the estimate for the trend), p – level of statistical significance.

Values of the trend statistically significant ( $p < 0.05$ ) are additionally marked in bold.

Miesiąc Month	Trendy makrotypu – Trends of macro-type					
	Z		M1		M2	
	Tr	p	Tr	p	Tr	p
I	<b>-0,365(±0,136)</b>	0,014	+0,088(±0,099)	0,383	-0,247(±0,138)	0,059
II	-0,186(±0,157)	0,249	-0,211(±0,139)	0,145	<b>+0,400(±0,151)</b>	0,015
III	-0,078(±0,130)	0,555	-0,008(±0,149)	0,958	+0,086(±0,138)	0,538
IV	-0,269(±0,138)	0,065	-0,032(±0,162)	0,848	+0,301(±0,134)	0,040
V	-0,262(±0,175)	0,149	-0,131(±0,171)	0,452	+0,131(±0,160)	0,422
VI	+0,054(±0,129)	0,679	<b>+0,385(±0,170)</b>	0,034	<b>-0,439(±0,170)</b>	0,017
VII	-0,052(±0,170)	0,762	+0,340(±0,171)	0,060	<b>-0,288(±0,126)</b>	0,033
VIII	-0,105(±0,169)	0,541	<b>+0,439(±0,151)</b>	0,008	<b>-0,334(±0,113)</b>	0,007
IX	+0,183(±0,151)	0,237	+0,189(±0,170)	0,281	-0,372(±0,180)	0,052
X	+0,128(±0,149)	0,398	-0,081(±0,125)	0,523	-0,047(±0,127)	0,715
XI	<b>-0,355(±0,165)</b>	0,043	-0,009(±0,129)	0,947	+0,363(±0,160)	0,034
XII	-0,322(±0,193)	0,109	-0,025(±0,104)	0,810	<b>+0,347(±0,180)</b>	0,069
Rok – Year	<b>-1,594(±0,604)</b>	0,016	+1,208(±0,619)	0,066	+0,384(±0,474)	0,427



Analizując znaki i wartości poszczególnych trendów miesięcznych można dojść do wniosku, że w szeroko rozumianym okresie chłodnym (listopad-kwiecień) spadek frekwencji makrotypu Z jest kompensowany głównie przez wzrost frekwencji makrotypu M2, zaś w okresie ciepłym (czerwiec-wrzesień) spadek frekwencji makrotypu M2 jest kompensowany głównie przez wzrost frekwencji makrotypu M1 (patrz tab. 4). Te długookresowe zmiany frekwencji makrotypów w poszczególnych miesiącach wyjaśniają w dużej części występujące skorelowanie między makrotypami (patrz tab. 3).

## **3.2. Związki między frekwencją makrotypów cyrkulacji środkowotroposferycznej w pacyficzno-północnoamerykańskim sektorze cyrkulacyjnym a temperaturą powietrza**

### **3.2.1. Związek frekwencji makrotypów Wangengejma-Girsa z temperaturą powietrza w poszczególnych miesiącach**

Takiego rodzaju, jak wyżej opisane, zmiany sezonowe frekwencji i związków między makrotypami w ciągu roku wywierają wpływ na wykształcenie się i przekształcenia dolnego pola barycznego, które następnie steruje intensywnością i czasem trwania adwekcji mas powietrza nad poszczególne części rozpatrywanego wielkiego obszaru północnej części Ameryki Północnej. Intensywność, kierunek oraz czas trwania adwekcji mas atmosferycznych regulują zmiany temperatury powietrza. Obszar, nad którym analizuje się związki między frekwencją makrotypów cyrkulacji środkowo-troposferycznej a temperaturą jest bardzo duży, na dodatek stacje leżą na różnych wysokościach nad poziom morza<sup>3</sup>, stąd dla poznania występujących zależności niezbędne jest uwzględnienie ich zmienności regionalnej. Dla poznania tej zmienności przeprowadzono analizę rozkładu przestrzennego i czasowego współczynników korelacji między kolejnymi makrotypami a temperaturą powietrza na poszczególnych stacjach (tab. 5, 6 i 7).

Przeprowadzone analizy wykazały występowanie relatywnie słabych związków między frekwencją makrotypów a miesięczną temperaturą powietrza na rozpatrywanym obszarze. Związki te wykazują dość duże zróżnicowanie regionalne. Jest ono znacznie większe w funkcji długości geograficznej, niż szerokości. Z tej przyczyny, dla uczytelnienia tablic 5, 6 i 7, zestawienia wartości współczynników korelacji dokonano, według długości geograficznej. Dodatkowo wprowadzono umowny podział badanego obszaru na sektory długościowe o nazwach analogicznych do wprowadzonych wcześniej przez Marsza i Styszyńską (2012). Są nimi sektory: beryngii albo pacyficzny (długości > 155°W), alaskański (125-155°W), Northwest Territory (95-125°W), hudsonski (65-96°W) i baffino-grenlandzki (< 65°W).

### **3.2.2. Frekwencja makrotypu Z a temperatura powietrza**

Związki między frekwencją makrotypu Z (strefowego)<sup>4</sup> a temperaturą powietrza na rozpatrywanym obszarze są słabe. Zdecydowanie przeważają niskie i statystycznie nieistotne współczynniki korelacji charakteryzujące te związki (patrz tab. 5). W trzech miesiącach roku (kwietniu, maju i październiku) nie stwierdzono występowania statystycznie istotnych korelacji na żadnej ze stacji leżącej w granicach

---

<sup>3</sup> Wpływu wysokości nad poziom morza na temperaturę powietrza na poszczególnych stacjach nie uwzględniano.

<sup>4</sup> Określenie „strefowy” dotyczy ogólnego charakteru tego makrotypu w całym pacyficzno-północnoamerykańskim sektorze cyrkulacyjnym. Nie oznacza to, że wystąpienie tego makrotypu nad Alaską i północną Kanadą generuje przepływy strefowe *sensu stricto*.

Tabela 5. Wartości współczynników korelacji między frekwencją makrotypu Z („strefowy”; liczba dni w miesiącu i roku) a miesięczną i roczną temperaturą powietrza (°C) na poszczególnych stacjach. Istotne statystycznie ( $p < 0,05$ ) wartości współczynników oznaczono pogrubionym drukiem

Table 5. Correlation coefficients between the frequency of the macro-type Z ("zonal", the number of days in the month and year) and monthly and annual air temperature (°C) on particular stations. Statistically significant values of the coefficients ( $p < 0.05$ ) marked in bold.

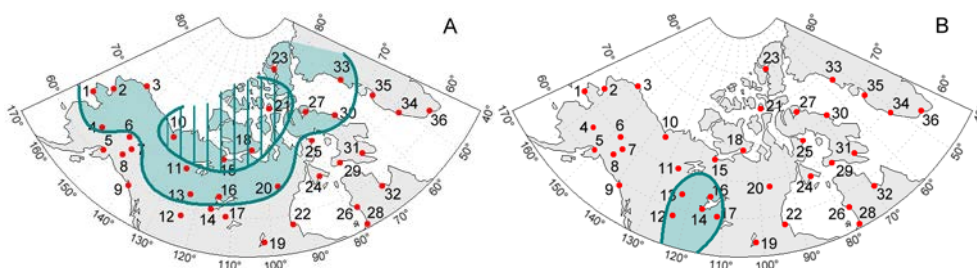
Nr No	Stacja Station	Sektor Sector	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Rok Year
1	Nome	SP	-0,39	-0,26	-0,24	-0,01	0,16	0,04	-0,03	-0,23	-0,04	-0,15	<b>-0,47</b>	-0,36	-0,24
2	Kotzebue	SP	-0,31	-0,33	-0,27	-0,16	0,22	0,27	-0,18	-0,15	0,00	-0,14	<b>-0,44</b>	-0,29	-0,35
3	Barrow	SP	-0,39	-0,39	-0,28	-0,10	0,14	0,40	-0,20	-0,21	-0,00	0,20	<b>-0,43</b>	-0,32	<b>-0,47</b>
4	McGrawth	SP	-0,38	-0,37	0,01	-0,07	0,10	0,05	0,31	-0,35	-0,13	-0,02	-0,16	0,22	-0,27
5	Anchorage	SA	-0,22	-0,12	0,16	0,33	0,08	-0,03	<b>0,45</b>	-0,37	-0,20	-0,04	-0,25	0,11	-0,15
6	Fairbanks	SA	-0,19	-0,27	0,19	0,25	0,26	-0,10	-0,06	-0,17	-0,15	-0,07	-0,13	0,17	-0,10
7	Big Delta	SA	-0,28	-0,22	0,27	0,16	0,17	-0,21	-0,05	-0,15	-0,20	-0,12	-0,25	0,10	-0,24
8	Gulkama	SA	0,03	0,02	0,40	0,25	0,09	-0,03	0,12	-0,32	-0,17	0,03	-0,18	0,29	0,00
9	Yakutat	SA	-0,06	0,23	<b>0,44</b>	0,43	-0,07	0,12	0,11	-0,41	-0,02	-0,19	-0,12	0,29	0,09
10	Inuvik	SA	<b>-0,65</b>	<b>-0,48</b>	0,10	-0,26	0,30	0,02	-0,16	-0,09	-0,16	0,02	-0,39	0,06	-0,32
11	Norman Wells	SNWT	-0,40	-0,26	0,28	-0,04	0,35	-0,40	-0,01	-0,04	-0,29	-0,10	-0,28	0,32	-0,23
12	Fort Nelson	SNWT	-0,02	0,11	<b>0,53</b>	0,23	0,39	-0,14	-0,19	0,06	-0,07	0,06	-0,18	<b>0,58</b>	0,21
13	Fort Simpson	SNWT	-0,37	-0,03	<b>0,43</b>	0,20	0,25	-0,21	-0,12	0,05	-0,21	0,08	-0,10	<b>0,52</b>	-0,02
14	Hay River	SNWT	-0,32	0,12	<b>0,51</b>	0,24	0,09	-0,02	-0,04	0,26	-0,22	0,12	-0,05	<b>0,55</b>	0,01
15	Kugluktuk	SNWT	<b>-0,46</b>	-0,32	0,16	0,11	0,01	-0,04	-0,00	0,06	-0,16	-0,02	-0,10	0,24	-0,16
16	Yellowknife	SNWT	-0,34	0,13	<b>0,45</b>	0,24	0,05	0,14	-0,08	0,21	-0,25	0,12	-0,06	<b>0,48</b>	-0,06
17	Fort Smith	SNWT	-0,27	0,18	<b>0,49</b>	0,29	0,16	0,16	-0,06	0,31	-0,13	0,17	0,05	<b>0,52</b>	0,01
18	Cambridge Bay	SNWT	<b>-0,53</b>	-0,33	0,22	0,05	-0,00	0,14	-0,14	0,04	-0,04	0,05	-0,02	0,14	-0,25
19	Lynn Lake	SNWT	-0,16	0,29	<b>0,50</b>	0,18	0,21	0,01	-0,03	<b>0,44</b>	0,03	0,06	0,24	<b>0,58</b>	0,05
20	Baker Lake	SNWT	-0,36	0,08	0,19	0,02	-0,08	0,33	-0,06	0,14	-0,06	0,00	0,04	0,11	-0,37
21	Resolute	SH	<b>-0,44</b>	-0,05	<b>0,46</b>	0,10	0,11	0,27	-0,14	-0,05	-0,11	-0,08	-0,12	-0,10	-0,23
22	Churchill	SH	-0,31	0,15	0,40	0,03	0,04	<b>0,13</b>	-0,26	0,41	-0,02	0,08	0,17	0,31	-0,10
23	Eureka	SH	-0,34	-0,27	0,29	-0,02	0,22	<b>0,46</b>	0,06	-0,01	0,22	-0,37	-0,16	-0,16	-0,25
24	Coral Harbour	SH	-0,14	0,16	0,14	0,24	0,01	0,36	-0,03	-0,05	-0,24	-0,18	-0,12	-0,06	-0,40
25	Hall Beach	SH	-0,26	0,05	0,19	0,29	0,01	0,39	-0,01	-0,03	-0,27	-0,23	-0,28	-0,19	<b>-0,44</b>
26	Inukjuak	SH	-0,31	0,30	0,04	0,33	0,31	<b>0,54</b>	0,23	0,07	-0,15	-0,07	-0,08	-0,04	-0,27
27	Pond Inlet	SH	-0,41	0,09	0,38	0,18	0,19	0,38	-0,12	-0,25	-0,27	-0,29	-0,31	-0,15	-0,31
28	Kuujuarapik	SH	-0,42	0,23	0,10	0,22	0,35	<b>0,45</b>	0,05	0,36	0,16	0,10	-0,05	0,07	-0,26
29	Cape Dorset	SH	-0,25	0,02	0,01	0,31	-0,04	0,39	0,11	-0,19	-0,24	-0,20	-0,29	-0,16	<b>-0,52</b>
30	Clyde A	SH	-0,33	-0,01	0,15	0,15	0,16	0,38	-0,01	-0,28	-0,34	0,26	-0,29	-0,18	-0,31
31	Iqaluit	SH	-0,20	0,01	0,12	0,38	-0,05	0,40	0,08	-0,04	-0,13	-0,13	-0,34	-0,22	<b>-0,47</b>
32	Kuujuaq	SH	-0,01	0,14	0,08	0,41	0,24	<b>0,51</b>	-0,11	0,14	-0,18	-0,07	-0,19	-0,15	-0,39
33	Upernavik	SGB	-0,33	0,05	0,14	0,26	0,05	0,22	-0,11	-0,16	-0,21	-0,26	-0,17	-0,26	-0,32
34	Nuuk	SGB	-0,23	0,12	0,19	0,21	-0,23	0,18	0,06	-0,13	-0,35	0,12	-0,27	-0,22	-0,30
35	Ilulisaat	SGB	-0,27	0,13	0,19	0,20	-0,03	-0,12	-0,38	-0,16	-0,37	-0,14	-0,26	-0,16	-0,21
36	Narsarsuaq	SGB	-0,36	0,36	0,21	0,05	-0,03	0,27	0,22	-0,34	<b>-0,54</b>	0,26	0,02	-0,12	-0,29

objętych analizą, w trzech kolejnych miesiącach (lipcu, sierpniu, wrześniu) na całym obszarze odnotowano po jednym istotnym współczynniku korelacji. W czerwcu stwierdzono wystąpienie na trzech stacjach istotnych statystycznie współczynników korelacji, stacje te są jednak znacznie oddalone od siebie (na ryc. 3 i w tab. 1 mają one numery: Eureka – 23, Inukjuak – 26, Kuujuarapik – 28). Pozwala to przypuszczać, że wszystkie istotne korelacje między frekwencją makrotypu Z a temperaturą powietrza w czerwcu, lipcu, sierpniu i wrześniu są przypadkowe. Przyjęcie takiej interpretacji pozwala

na sformułowanie wniosku, że wiarygodne związki między frekwencją makrotypu Z a temperaturą powietrza ograniczają się do chłodnego okresu roku – od listopada do marca, w pozostałej części roku takich związków brak.

Rozkład w czasie znaków współczynników korelacji, niezależnie od ich istotności statystycznej, jest zróżnicowany. W okresie od lutego do sierpnia zdecydowanie dominują na całym obszarze dodatnie współczynniki korelacji (patrz tab. 4), co sugeruje, że wzrost / spadek frekwencji makrotypu Z w tych miesiącach pociąga za sobą słaby wzrost / spadek temperatury albo brak zmian temperatury powietrza. W okresie od września do stycznia znaki współczynników korelacji stają się na zdecydowanej większości rozpatrywanego obszaru ujemne, co wskazuje, że wraz ze wzrostem frekwencji makrotypu Z temperatura powietrza obniża się.

W ciągu roku na badanym obszarze pojawiają się trzy zwarte przestrzenie „bloki” jednoimiennych, statystycznie istotnych współczynników korelacji. W styczniu, ujemne, statystycznie istotne współczynniki korelacji między frekwencją makrotypu Z a temperaturą powietrza występują w centralnej części Arktyki Kanadyjskiej, w rejonie stacji Inuvik (nr 10;  $r = -0,65$ ), Kugluktuk (nr 15;  $r = -0,46$ ), Cambridge Bay (nr 18;  $r = -0,53$ ) i Resolute (nr 21;  $r = -0,44$ ). Na tym obszarze wzrost frekwencji makrotypu Z pociąga za sobą spadek temperatury powietrza (patrz ryc. 4 A). W marcu, poza stacjami leżącymi przy zlodzonych wschodnich i północnych wybrzeżach Alaski (sektor pacyficzny; Nome, Kotzebue, Barrow), na których korelacje z makrotypem Z są ujemne, ale statystycznie nieistotne, na całym pozostałym obszarze występują dodatnie współczynniki korelacji o niskich, chaotycznie zmieniających się w przestrzeni wartościach. Na tle słabych i nieistotnych współczynników korelacji, zwracają uwagę istotne dodatnie współczynniki korelacji ( $r$  od 0,43 do 0,53) na stacjach Fort Nelson (nr 12), Fort Simpson (13), Hay River (14), Yellowknife (16), Fort Smith (17). Są to stacje położone w zachodniej części sektora Northwest Territory, po wschodniej stronie Gór Skalistych, na ich przedgórzach lub u ich wschodnich podnóży, stanowiącego północne przedłużenie pasa prerii (patrz ryc. 4 B).



Ryc. 4. A – obszary, na których wzrost/spadek frekwencji makrotypu Z w styczniu pociąga za sobą statystycznie istotny spadek/wzrost temperatury (zaszraflowane) oraz silniejsze, ale nieistotne zmiany temperatury miesięcznej stycznia z takim samym znakiem, B – obszar, na którym między frekwencją makrotypu Z w marcu i grudniu a temperaturą powietrza w tych miesiącach występują statystycznie istotne związki dodatnie, mające najprawdopodobniej uwarunkowania orograficzne (efekt fenuy)

Fig. 4. A – areas where the increase / decrease in the frequency of macro-type Z in January entails a statistically significant decrease / increase in temperature (crosshatched) and stronger but insignificant changes in monthly temperature in January of the same sign, B – an area where statistically significant positive correlations, between the attendance of macro-type Z in March and December and the air temperature in these months are observed, caused probably by 'orographic lifting' (foehn effect).

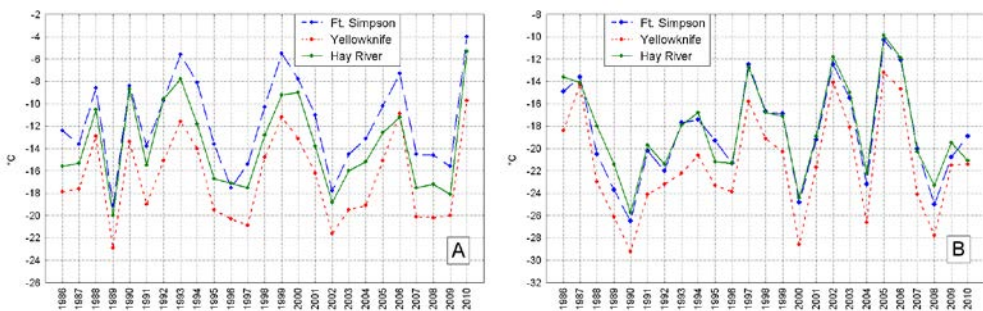
Niemal dokładnie takie same związki między frekwencją makrotypu Z a temperaturą na tym samym obszarze występują w grudniu (patrz tab. 5), z tą różnicą, że wokół wymienionych stacji współczynniki korelacji temperatury powietrza z frekwencją makrotypu Z są w tym miesiącu ujemne. Trudno przypuszczać, że takie zgrupowanie w przestrzeni istotnych, choć nie najsilniejszych współczynników korelacji wskazujących na regionalne wzrosty temperatury przy występowaniu makrotypu Z w tych miesiącach, stanowi dzieło przypadku.

Występowanie silniejszych związków między frekwencją makrotypu Z a temperaturą powietrza tylko po jednej stronie gór może sugerować działanie czynnika orograficznego. Jednak taki efekt może występować przy przepływie powietrza przez masę Gór Skalistych z zachodu na wschód; tylko wtedy wymienione stacje znajdowałyby się „po zawietrznej” łańcucha górskiego. Mając na względzie, że układy niżowe tworzą się po zachodniej stronie górnego klina i wędrują w kierunku jego wierzchołka, można objaśnić współdziałanie cyrkulacji z orografią w kształtowaniu tej osobliwości. W makrotypie Z górna zatoka jest przesunięta nad wschodnią część Pacyfiku, a jej amplituda jest bardzo duża. Zachodnia granica górnego klinaznaczona jest relatywnie blisko zachodnich wybrzeży Ameryki, a jego wierzchołek sięga 80°N (patrz ryc. 1; makrotyp Z). Oznacza to, że w takiej sytuacji jak przedstawia ją schemat, centrum Niżu Aleuckiego przesunie się na wschód – będzie się znajdowało w przybliżeniu na linii brzegowej Zatoki Alaska lub w jej pobliżu gdzieś między 140 a 145°N, a niż będzie miał odpowiednio dużą średnicę. Po jego północnych i zachodnich peryferiach wychłodzone powietrze z Arktyki będzie przemieszczać się na południe, wychodząc nad wolny od lodu Pacyfik. Tam przepływając nad relatywnie ciepłym morzem szybko przetransformuje się w Powietrze Arktyczno-morskie lub Polarno-morskie z północnej granicy zasięgu, stając się powietrzem zawierającym już liczące się zasoby pary wodnej. Przepływając nad morzem stopniowo zmienia kierunek na wschodni i w konsekwencji w szerokościach 50-65°N napływa nad Góry Skaliste, które przekracza, dając na ich zawietrznych stokach i u ich podnóża wzrost temperatury powietrza.

Za taką interpretacją przemawia kilka faktów. Po pierwsze – w tym samym czasie i przy tym samym charakterze przepływu, na szlaku splotu powietrza z centralnych części Arktyki powinien nastąpić spadek temperatury powietrza. I następuje – współczynniki korelacji między frekwencją makrotypu Z a temperaturą są na stacjach Barrow, Kotzebue i Nome w marcu i grudniu ujemne (patrz tab. 5). Można sądzić, że powietrze wynoszone z Arktyki przez Niż Aleucki przepływa, przed jego wyniesieniem na Pacyfik, po peryferiach Niżu Aleuckiego właśnie wzdłuż zachodnich krańców Alaski. Po wtóre – odnotowuje się wystąpienie dodatniego, przekraczającego próg istotności statystycznej współczynnika korelacji między frekwencją makrotypu Z a temperaturą w marcu na stacji Yakutat ( $r = 0,44$ ; patrz tab. 5, nr stacji 9). Można to interpretować jako wynik napływu przy tym typie cyrkulacji dolnej, wymuszonej przez cyrkulację środkowotroposferyczną, cieplejszego powietrza nad wybrzeże Alaski. Zanim ciepłe powietrze przepłynie góry, musi nad nie skądś napłynąć. Po trzecie – opisany rozkład współczynników korelacji, zgrupowanych po wschodniej stronie Gór Skalistych nie jest odnotowywany w cieplej porze roku. Jeśli przedstawiona hipoteza wyjaśniająca cyrkulacyjno-orograficzną genezę wzrostów temperatury powietrza po zawietrznej Gór Skalistych jest prawdziwa, to proces o takim przebiegu nie może występować w cieplej porze roku, w której Niż Aleucki nie istnieje. Wreszcie temperatura powietrza na wymienionych stacjach w marcu i grudniu jest ujemnie i statystycznie istotnie powiązana ze wskaźnikiem NPI (North Pacific Index; Trenberth i Hurrell 1994). Wskaźnik NPI informuje o głębokości i rozmiarach Niżu Aleuckiego. Im ciśnienie w Niżu Aleuckim jest niższe i obszar niskiego ciśnienia jest większy (niska wartość wskaźnika), tym silniejszy jest wpływ powietrza

z Arktyki, intensywniejsze nagrzewanie tego powietrza nad Pacyfikiem i bardziej intensywny jego przepływ przez Góry Skaliste i Góry Mackenzie, a w rezultacie i wzrost temperatury powietrza po wschodniej stronie gór. Nie jest jasne, z jakiej przyczyny występowanie opisanej zależności ograniczone jest tylko do grudnia i marca, a nie występuje ona także w styczniu i lutym, czyli miesiącach, w których Niż Aleucki również jest aktywny.

Zmiany temperatury powietrza w marcu i grudniu na obszarze wschodniej części sektora Northwest Territory zachodzące pod wpływem zmian frekwencji makrotypu Z w małym stopniu stanowią wynik adwekcji cieplejszych mas powietrza, a większym – działania efektu orograficznego, który wzmacnia wzrosty temperatury powietrza przy jego napływie z zachodu (patrz ryc. 4B). To czyni, że zmiany temperatury w marcu i grudniu na tym obszarze, zachodzące w takt nasilania się i słabnięcia częstości występowania makrotypu Z, są odpowiednio duże. To ostatnie powoduje, że związki te stają się statystycznie istotne, czego nie obserwuje się na pozostałych obszarach. Przynajmniej ten czynnik powoduje, że zmiany temperatury w marcu i grudniu na wymienionych stacjach wykazują bardzo silne skorelowanie ( $r$  od 0,86 do 0,94; patrz ryc. 5).



Ryc. 5. Przebieg miesięcznej temperatury powietrza [°C] na stacjach Fort Simpson, Yellowknife i Hay River w marcu (A) i grudniu (B). Za bardzo silne skorelowanie tych przebiegów odpowiedzialna jest zmienność frekwencji makrotypu Z w tych miesiącach

Fig. 5. The course of monthly air temperature at stations Fort Simpson, Yellowknife and Hay River in March (A) and December (B). The variability in the frequency of macro-types Z in these months is responsible for the very strong correlation of these courses.

### 3.2.3. Frekwencja makrotypu M1 a temperatura powietrza

Makrotyp M1 występuje z najmniejszą częstością. Szczególnie w okresie chłodnej pory roku jego przeciętna frekwencja jest bardzo mała, co może rzutować na wartości współczynników korelacji i ich istotność, oraz generalnie – na rozkład współczynników korelacji w czasie.

Związki między frekwencją makrotypu M1 (południkowy) a temperaturą powietrza na rozpatrywanym obszarze kształtują się dość osobliwie. W okresie od stycznia do maja na niemal całym obszarze znaki współczynników korelacji są ujemne (tab. 6). W czerwcu sytuacja się odwraca, na niemal całym obszarze znaki współczynników korelacji stają się dodatnie. W pozostałej części roku znaki współczynników korelacji wyraźnie różnicują się w funkcji długości geograficznej, przy czym linia graniczna przebiega w przybliżeniu zgodnie z granicą sektora Northwest Territory (dalej NWT) z sektorem hudsonskim, między 95 a 100°W. W sektorach pacyficznym, alaskańskim i NWT od lipca do grudnia znaki współczynników korelacji są ujemne, gdy w sektorach hudsonskim i baffino-grenlandzkim stają się dodatnie.

Tabela 6. Wartości współczynników korelacji między frekwencją makrotypu M1 („południkowy 1”; liczba dni w miesiącu i roku) a miesięczną i roczną temperaturą powietrza (°C) na poszczególnych stacjach. Istotnie statystycznie ( $p < 0,05$ ) wartości współczynników oznaczone pogrubionym drukiem

Table 6. Correlation coefficients between the frequency of the macro-type M1 (“meridional 1”, the number of days in the month and year) and monthly and annual air temperature (°C) on particular stations. Statistically significant values of the coefficients ( $p < 0.05$ ) marked in bold.

Nr No	Stacja Station	Sektor Sector	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Rok Year
1	Nome	SP	-0,34	-0,07	-0,06	-0,30	<b>-0,48</b>	<b>-0,57</b>	-0,24	0,08	-0,30	-0,34	0,02	-0,25	-0,14
2	Kotzebue	SP	-0,36	-0,06	-0,08	-0,33	-0,42	-0,15	-0,21	-0,01	-0,36	-0,34	-0,09	-0,29	-0,10
3	Barrow	SP	-0,07	-0,05	-0,12	-0,21	-0,05	-0,04	0,09	-0,04	-0,13	<b>-0,58</b>	0,03	-0,11	0,29
4	McGrawth	SP	-0,27	-0,30	-0,42	<b>-0,48</b>	-0,39	-0,01	<b>-0,44</b>	0,08	-0,40	-0,34	-0,14	-0,06	-0,15
5	Anchorage	SA	<b>-0,47</b>	<b>-0,54</b>	<b>-0,53</b>	<b>-0,69</b>	-0,22	0,34	-0,41	0,15	-0,41	<b>-0,48</b>	-0,41	<b>-0,47</b>	-0,23
6	Fairbanks	SA	<b>-0,47</b>	<b>-0,47</b>	<b>-0,51</b>	<b>-0,71</b>	<b>-0,51</b>	-0,18	-0,29	-0,09	-0,41	-0,40	-0,28	<b>-0,43</b>	-0,35
7	Big Delta	SA	<b>-0,45</b>	<b>-0,53</b>	<b>-0,61</b>	<b>-0,73</b>	<b>-0,46</b>	0,25	-0,28	-0,17	-0,40	-0,40	-0,39	<b>-0,51</b>	-0,19
8	Gulkama	SA	<b>-0,50</b>	<b>-0,59</b>	<b>-0,62</b>	<b>-0,83</b>	-0,38	0,38	-0,22	-0,01	<b>-0,45</b>	<b>-0,59</b>	-0,35	<b>-0,48</b>	-0,42
9	Yakutat	SA	<b>-0,51</b>	<b>-0,74</b>	<b>-0,67</b>	<b>-0,51</b>	-0,34	<b>0,46</b>	-0,02	0,26	-0,39	-0,41	<b>-0,46</b>	<b>-0,54</b>	-0,25
10	Inuvik	SA	0,21	0,03	<b>-0,50</b>	-0,30	-0,37	-0,29	-0,30	-0,28	<b>-0,52</b>	-0,43	-0,14	-0,10	0,06
11	Norman Wells	SNWT	-0,09	-0,24	<b>-0,60</b>	<b>-0,47</b>	<b>-0,47</b>	0,05	-0,36	<b>-0,43</b>	-0,41	-0,35	-0,30	-0,31	-0,11
12	Fort Nelson	SNWT	<b>-0,45</b>	<b>-0,56</b>	<b>-0,67</b>	<b>-0,64</b>	<b>-0,54</b>	0,16	-0,10	-0,40	<b>-0,51</b>	<b>-0,51</b>	<b>-0,46</b>	<b>-0,48</b>	<b>-0,45</b>
13	Fort Simpson	SNWT	-0,12	-0,34	<b>-0,65</b>	<b>-0,64</b>	-0,42	<b>0,50</b>	-0,12	-0,41	-0,35	-0,34	<b>-0,47</b>	-0,22	-0,09
14	Hay River	SNWT	-0,11	-0,38	<b>-0,63</b>	<b>-0,45</b>	-0,23	0,22	0,12	<b>-0,51</b>	-0,12	-0,27	<b>-0,52</b>	-0,18	-0,12
15	Kugluktuk	SNWT	0,09	0,21	-0,43	<b>-0,53</b>	-0,11	-0,02	-0,28	-0,28	-0,02	-0,27	-0,08	0,20	0,12
16	Yellowknife	SNWT	-0,09	-0,25	<b>-0,57</b>	<b>-0,51</b>	-0,16	0,34	-0,01	-0,42	0,13	-0,18	-0,42	-0,09	0,01
17	Fort Smith	SNWT	-0,15	-0,37	<b>-0,52</b>	<b>-0,49</b>	-0,24	0,37	0,09	<b>-0,45</b>	-0,05	-0,14	<b>-0,54</b>	-0,11	-0,05
18	Cambridge Bay	SNWT	0,07	0,22	-0,29	<b>-0,47</b>	0,10	0,12	0,09	0,04	0,33	-0,16	-0,11	0,11	0,22
19	Lynn Lake	SNWT	-0,22	-0,33	<b>-0,44</b>	-0,17	-0,12	0,22	0,23	-0,38	-0,04	0,02	-0,37	-0,11	-0,19
20	Baker Lake	SNWT	-0,01	-0,09	-0,31	-0,32	0,09	<b>0,47</b>	0,24	0,12	0,42	-0,01	-0,16	0,18	0,38
21	Resolute	SH	-0,23	-0,13	-0,40	<b>-0,46</b>	-0,15	0,15	<b>0,45</b>	0,14	0,08	0,19	0,27	0,07	0,13
22	Churchill	SH	-0,08	-0,28	-0,40	-0,09	0,02	0,27	0,31	-0,28	0,28	0,14	-0,22	0,01	0,03
23	Eureka	SH	-0,31	0,01	-0,22	-0,39	-0,38	0,12	0,34	0,06	-0,11	0,01	0,02	-0,05	0,13
24	Coral Harbour	SH	-0,22	-0,06	-0,15	-0,31	0,01	0,27	0,28	<b>0,44</b>	<b>0,60</b>	0,02	0,15	-0,02	0,29
25	Hall Beach	SH	-0,18	-0,21	-0,03	-0,43	-0,08	0,13	0,04	0,14	0,37	0,13	0,28	0,10	0,32
26	Inukjuak	SH	0,11	-0,32	-0,17	-0,24	-0,15	0,11	0,26	0,34	0,26	-0,02	0,06	0,03	0,13
27	Pond Inlet	SH	-0,02	-0,29	-0,25	<b>-0,47</b>	-0,31	0,17	<b>0,46</b>	<b>0,53</b>	0,08	0,19	-0,27	0,07	0,13
28	Kuujuarapik	SH	0,33	-0,41	-0,23	-0,15	0,03	0,17	0,34	0,18	0,25	0,09	-0,12	0,12	0,15
29	Cape Dorset	SH	-0,11	-0,08	-0,13	-0,34	-0,01	0,28	0,16	<b>0,52</b>	<b>0,47</b>	-0,04	0,28	0,01	0,40
30	Clyde A	SH	-0,10	-0,22	-0,31	<b>-0,46</b>	-0,15	0,21	0,14	<b>0,55</b>	0,13	0,07	0,20	-0,05	0,12
31	Iqaluit	SH	-0,17	-0,02	-0,14	-0,35	-0,07	0,19	0,10	0,29	0,27	-0,08	0,39	-0,05	0,37
32	Kuujuaq	SH	0,10	-0,16	-0,16	-0,25	-0,16	0,24	0,35	0,35	0,43	0,04	0,19	0,00	0,33
33	Upernavik	SGB	0,03	-0,33	-0,27	-0,32	-0,32	0,20	<b>0,47</b>	<b>0,48</b>	-0,11	-0,14	0,12	-0,12	0,06
34	Nuuk	SGB	-0,13	-0,23	<b>-0,55</b>	-0,29	0,09	0,19	0,32	0,40	0,20	-0,22	0,36	-0,26	0,18
35	Ilulisaat	SGB	0,05	-0,35	-0,37	-0,25	-0,24	0,18	<b>0,50</b>	0,30	-0,01	-0,08	0,33	-0,14	0,01
36	Narsarsuaq	SGB	-0,06	-0,23	<b>-0,52</b>	-0,13	-0,05	-0,04	0,07	<b>0,46</b>	0,41	-0,41	0,38	-0,41	0,21

Oznacza to, że wzrost frekwencji makrotypu M1 w okresie od lipca do maja na obszarach leżących na zachód od 95-100°W pociąga za sobą spadek temperatury lub brak zmian temperatury. Tylko w czerwcu wzrost frekwencji makrotypu M1 pociąga za sobą, na ogół słaby, wzrost temperatury. Na obszarach położonych na wschód od strefy 95-100°W wzrost frekwencji makrotypu M1 w okresie od stycznia do maja pociąga za sobą spadek temperatury, na ogół słaby, a wzrost frekwencji tego samego makrotypu od czerwca do grudnia pociąga za sobą różnych rozmiarów wzrosty temperatury miesięcznej. Ta odmienna reakcja temperatury powietrza na spadek lub wzrost frekwencji makrotypu M1 na

obszarach leżących na wschód i zachód od strefy rozgraniczenia powinna powodować występowanie „huśtawki” miesięcznej temperatury powietrza nad tymi obszarami. „Huśtawka” ta, czyli wystąpienie ujemnych korelacji między szeregami temperatury powietrza między stacjami leżącymi na zachód od 95-100°W a stacjami położonymi na wschód od tej długości geograficznej powinna występować w okresie od lipca do grudnia, ale najwyraźniej w tych miesiącach, w których współczynniki korelacji między frekwencją M1 a temperaturą są najsilniejsze (patrz tab. 6). Sprawdzenie tej hipotezy dla dwu miesięcy – lipca i sierpnia – czyli miesięcy, w których korelacje temperatury powietrza z frekwencją makrotypu M1 są najsilniejsze (tab. 6) wykazało, że daleko nie na wszystkich stacjach taka „huśtawka” w ogóle istnieje, a tam gdzie występuje jest słaba i w zdecydowanej większości przypadków statystycznie nieistotna.

Wyraźne związki temperatura powietrza z frekwencją makrotypu M1 wykazuje w sektorach alaskańskim i NWT w okresie zimy i wiosny. W sektorze alaskańskim statystycznie istotne korelacje ujemne z frekwencją makrotypu M1 rozpoczynają się w grudniu i trwają do kwietnia, na niektórych stacjach (Fairbanks, Big Delta) do maja. Najsilniejsze korelacje występują w marcu i kwietniu, kiedy na niektórych stacjach (Anchorage (nr 5), Fairbanks (nr 6), Big Delta (nr 7), Gulkana (nr 8) wartości współczynników korelacji przekraczają  $|0.7|$  (patrz tab. 6). Na tych stacjach sektora alaskańskiego, na których w maju korelacje nie przekraczają progu istotności statystycznej, wartości bezwzględne współczynników korelacji są wyraźnie podwyższone. W sektorze NWP, za wyjątkiem obszarów najdalej wysuniętych na wschód, występowanie istotnych statystycznie związków ogranicza się do marca i kwietnia, przy czym siła związku również osiąga maksimum w kwietniu. W pozostałych sektorach, czyli hudsonskim i baffino-grenlandzkim, w chłodnej porze roku (październik-luty) wystąpienia istotnych korelacji nie odnotowuje się.

W okresie od marca do września statystycznie istotne współczynniki korelacji między frekwencją makrotypu M1 a temperaturą nie tworzą zwartych bloków. Przeważają zdecydowanie niskie, nieistotne wartości współczynników. Można się w tym chaosie dopatrywać jedynie jakichś realnych związków między frekwencją makrotypu M1 a temperaturą w sierpniu na obszarze sektorów hudsonskiego i baffino-grenlandzkiego (patrz tab. 6), gdzie wraz ze wzrostem frekwencji tego makrotypu powinien następować słaby wzrost temperatury.

### 3.2.4. Frekwencja makrotypu M2 a temperatura powietrza

Związki temperatury powietrza z frekwencją makrotypu M2 stanowią w przybliżeniu odwrócenie związków, jakie zachodzą między temperaturą a frekwencją makrotypu M1. Takie zachowanie się rozkładu współczynników korelacji jest podobnie do rozkładu w czasie frekwencji obu tych makrotypów (patrz tab. 2). Zdecydowanie przeważają związki słabe i statystycznie nieistotne, w dwu miesiącach, maju i lipcu, między frekwencją tego makrotypu a temperaturą powietrza praktycznie statystycznie istotnych związków brak (patrz tab. 7).

W okresie od stycznia do maja znaki współczynników korelacji między frekwencją makrotypu M2 a temperaturą powietrza są dodatnie. Wzrost frekwencji tego makrotypu powinien pociągać za sobą w tym okresie słabe wzrosty temperatury powietrza lub brak zmian temperatury. W styczniu zwarty obszar dodatnich, istotnych korelacji między frekwencją makrotypu M2 a temperaturą obejmuje północną część Arktyki Kanadyjskiej, obszar Subarktyki Północnoamerykańskiej oraz Alaskę (ryc. 6). Wzrost / spadek frekwencji makrotypu M2 o 1 dzień zmienia, stosownie do znaku zmian frekwencji

temperaturę miesięczną stycznia na tym obszarze od 0,1 do 0,3°C. Zmiany frekwencji makrotypu M2 w lutym i marcu nie wnoszą, poza wnętrzem Alaski, istotnych zmian temperatury powietrza na rozpa-trywanym obszarze.

Tabela 7. Wartości współczynników korelacji między frekwencją makrotypu M2 („południkowy 2”; liczba dni w miesiącu i roku) a miesięczną i roczną temperaturą powietrza (°C) na poszczególnych stacjach. Istotne statystycznie ( $p < 0,05$ ) wartości współczynników oznaczono pogrubionym drukiem

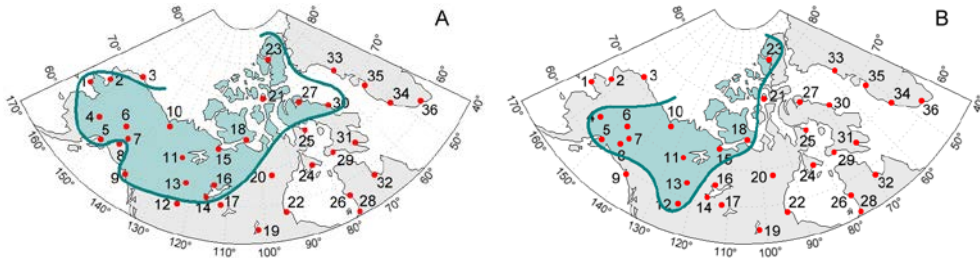
Table 7. Correlation coefficients between the frequency of the macro-type M2 (“meridional 2”, the number of days in the month and year) and monthly and annual air temperature (°C) on particular stations. Statistically significant values of the coefficients ( $p < 0.05$ ) marked in bold.

Nr No	Stacja Station	Sektor Sector	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Rok Year
1	Nome	SP	<b>0,68</b>	0,27	0,31	0,35	0,33	<b>0,52</b>	0,28	0,18	0,31	<b>0,52</b>	<b>0,46</b>	<b>0,51</b>	<b>0,55</b>
2	Kotzebue	SP	<b>0,61</b>	0,33	0,35	<b>0,53</b>	0,20	-0,04	0,40	0,21	0,33	<b>0,50</b>	<b>0,50</b>	<b>0,45</b>	<b>0,65</b>
3	Barrow	SP	<b>0,48</b>	0,37	0,41	0,34	-0,11	-0,22	0,12	0,32	0,12	0,32	0,42	0,39	0,27
4	McGrawth	SP	<b>0,63</b>	<b>0,67</b>	<b>0,45</b>	<b>0,61</b>	0,29	-0,02	0,12	0,33	<b>0,47</b>	0,36	0,26	-0,20	<b>0,60</b>
5	Anchorage	SA	<b>0,58</b>	<b>0,54</b>	0,42	<b>0,44</b>	0,15	-0,31	-0,05	0,26	<b>0,54</b>	<b>0,51</b>	<b>0,54</b>	0,14	<b>0,54</b>
6	Fairbanks	SA	<b>0,55</b>	<b>0,61</b>	<b>0,45</b>	<b>0,54</b>	0,25	0,24	0,36	0,33	<b>0,50</b>	<b>0,48</b>	0,33	0,05	<b>0,63</b>
7	Big Delta	SA	<b>0,64</b>	<b>0,62</b>	0,40	<b>0,66</b>	0,29	-0,10	0,34	0,43	<b>0,53</b>	<b>0,53</b>	<b>0,53</b>	0,17	<b>0,61</b>
8	Gulkama	SA	0,32	<b>0,47</b>	0,27	<b>0,67</b>	0,30	-0,35	0,11	0,42	<b>0,55</b>	<b>0,54</b>	<b>0,43</b>	-0,05	<b>0,58</b>
9	Yakutat	SA	<b>0,43</b>	0,41	0,29	0,13	0,43	<b>-0,52</b>	-0,09	0,17	0,38	<b>0,63</b>	<b>0,45</b>	-0,01	0,21
10	Inuvik	SA	<b>0,58</b>	0,40	<b>0,45</b>	<b>0,60</b>	0,05	0,27	<b>0,48</b>	<b>0,49</b>	<b>0,60</b>	0,39	<b>0,49</b>	-0,01	0,38
11	Norman Wells	SNWT	<b>0,51</b>	0,43	0,38	<b>0,57</b>	0,10	0,22	0,39	<b>0,64</b>	<b>0,61</b>	<b>0,46</b>	<b>0,49</b>	-0,17	<b>0,49</b>
12	Fort Nelson	SNWT	0,35	0,37	0,21	<b>0,48</b>	0,13	-0,06	0,31	<b>0,46</b>	<b>0,53</b>	0,42	<b>0,51</b>	-0,35	0,32
13	Fort Simpson	SNWT	<b>0,49</b>	0,30	0,28	<b>0,51</b>	0,16	-0,35	0,26	<b>0,49</b>	<b>0,49</b>	0,24	<b>0,43</b>	-0,42	0,15
14	Hay River	SNWT	<b>0,44</b>	0,20	0,18	0,26	0,14	-0,20	-0,07	0,37	0,29	0,11	0,41	<b>-0,47</b>	0,14
15	Kugluktuk	SNWT	<b>0,45</b>	0,11	0,30	<b>0,47</b>	0,10	0,05	0,28	0,30	0,15	0,28	0,15	-0,36	0,06
16	Yellowknife	SNWT	<b>0,45</b>	0,08	0,17	0,32	0,12	-0,42	0,09	0,30	0,08	0,04	0,36	<b>-0,45</b>	0,06
17	Fort Smith	SNWT	0,40	0,13	0,07	0,25	0,07	<b>-0,47</b>	-0,03	0,22	0,15	-0,08	0,34	<b>-0,49</b>	0,04
18	Cambridge Bay	SNWT	<b>0,54</b>	0,11	0,10	<b>0,45</b>	-0,10	-0,21	0,05	-0,10	-0,27	0,10	0,10	-0,20	0,05
19	Lynn Lake	SNWT	0,33	0,02	-0,01	0,00	-0,11	-0,21	-0,21	-0,04	0,01	-0,09	0,03	<b>-0,55</b>	0,04
20	Baker Lake	SNWT	0,41	-0,00	0,15	0,34	-0,00	<b>-0,67</b>	-0,18	-0,35	-0,33	0,00	0,07	-0,21	0,00
21	Resolute	SH	<b>0,65</b>	0,15	-0,02	0,41	0,03	-0,32	-0,33	-0,13	-0,16	0,14	0,01	0,06	0,12
22	Churchill	SH	0,41	0,10	0,04	0,07	-0,06	-0,35	-0,05	-0,14	-0,25	-0,24	-0,01	-0,33	0,09
23	Eureka	SH	<b>0,60</b>	0,26	-0,05	<b>0,46</b>	0,15	-0,42	-0,42	-0,07	-0,08	<b>0,44</b>	0,14	0,20	0,19
24	Coral Harbour	SH	0,31	-0,10	0,03	0,11	-0,02	<b>-0,50</b>	-0,26	<b>-0,53</b>	-0,36	0,20	0,01	0,08	0,16
25	Hall Beach	SH	0,42	0,12	-0,15	0,18	0,07	-0,38	-0,02	-0,16	-0,13	0,16	0,09	0,14	0,20
26	Inukjuak	SH	0,27	-0,01	0,15	-0,06	-0,19	<b>-0,46</b>	<b>-0,51</b>	<b>-0,55</b>	-0,12	0,11	0,04	0,03	0,20
27	Pond Inlet	SH	<b>0,48</b>	0,17	-0,10	0,34	0,12	-0,41	-0,35	-0,40	0,14	0,17	0,12	0,11	0,28
28	Kuujuarapik	SH	0,23	0,13	0,16	-0,05	-0,43	<b>-0,46</b>	-0,40	<b>-0,70</b>	-0,36	-0,21	0,13	-0,13	0,16
29	Cape Dorset	SH	0,36	0,04	0,14	0,06	0,06	<b>-0,53</b>	-0,29	<b>-0,47</b>	-0,24	0,28	0,09	0,16	0,20
30	Clyde A	SH	<b>0,44</b>	0,20	0,19	0,36	-0,03	<b>-0,45</b>	-0,13	-0,40	0,16	0,26	0,15	0,21	0,29
31	Iqaluit	SH	0,34	0,00	0,003	-0,00	0,13	<b>-0,45</b>	-0,18	-0,34	-0,14	0,23	0,06	0,25	0,17
32	Kuujuaq	SH	0,03	-0,00	0,10	-0,14	-0,11	-0,57	-0,24	<b>-0,66</b>	-0,25	0,04	0,05	0,15	0,11
33	Upernavik	SGB	0,35	0,22	0,15	0,09	0,28	-0,34	-0,37	<b>-0,46</b>	0,27	0,45	0,09	0,33	0,38
34	Nuuk	SGB	0,35	0,07	0,41	0,12	0,17	-0,30	-0,39	-0,38	0,10	0,12	0,01	0,37	0,19
35	Ilulisaat	SGB	0,27	0,17	0,22	0,07	0,28	-0,26	-0,12	-0,21	0,31	0,25	0,03	0,24	0,30
36	Narsarsuaq	SGB	<b>0,45</b>	-0,14	0,35	0,10	0,10	-0,14	-0,30	-0,21	0,06	0,07	-0,29	0,33	0,13

W kwietniu na zmiany frekwencji makrotypu M2 temperatura powietrza statystycznie istotnie reaguje na obszarze rozciągającym się od wnętrza Alaski, przez Yukon Territory po północo-wschodnie krańce Arktyki Kanadyjskiej (patrz ryc. 6). Wzrost / spadek frekwencji makrotypu M2 o jeden dzień



w miesiącu w stosunku do średniej pociąga tam za sobą odpowiednio wzrost / spadek temperatury miesięcznej kwietnia od 0,15 do 0,30°C. Niemal na tym samym obszarze, jednak bez obszarów położonych na wschód od 115°W, podobne związki między frekwencją makrotypu M2 a temperaturą zachodzą we wrześniu.



Ryc. 6. Obszar na którym wzrosty / spadki frekwencji makrotypu M2 pociągają za sobą statystycznie istotne wzrosty/spadki temperatury powietrza w styczniu (A) i kwietniu (B)

Fig. 6. The area where the increases / decreases in the frequency of macro-type M2 entail statistically significant increases / decreases in air temperature in January (A) and April (B)

W czerwcu znaki współczynników korelacji między frekwencją makrotypu M2 a temperaturą zmieniają się na całym obszarze na ujemne, by od lipca do września włącznie różnicować się na dodatnie w części zachodniej omawianego obszaru i ujemne w jego części wschodniej. Granica zmiany znaku związku przebiega w przybliżeniu wzdłuż 100-105°W, przez wschodnią część sektora NWT. Jest to sytuacja odwrotna do tej, jaką wykazują związki frekwencji makrotypu M1 z temperaturą powietrza. Również i w przypadku zmian frekwencji makrotypu M2 powinna występować „huśtawka” temperatury powietrza między stacjami leżącymi na wschód i zachód od linii rozgraniczenia. Sprawdzenie, czy zjawisko to występuje wykazało, że tylko w sierpniu, i tylko między niektórymi stacjami (np. Norman Wells – Kuujjuarapik, Kuujjuuak, Inuvik – Kuujjuarapik, Fort Simpson – Kuujjuuak) te ujemne korelacje są istotne. W większości przypadków występują słabe i bardzo słabe korelacje ujemne, statystycznie nieistotne.

Zmiany rocznej frekwencji makrotypu M2 wykazują statystycznie istotne powiązanie dodatnie z temperaturą roczną na większości stacji leżących w sektorach pacyficznym i alaskańskim, za wyjątkiem stacji położonych na brzegu Morza Beauforta (Barrow, Inuvik). Współczynniki korelacji mieszczą się w przedziale od 0,49 (Norman Wells) do 0,65 (Kotzebue). Na pozostałym obszarze zmiany rocznej frekwencji tego makrotypu nie wykazują istotnych związków z roczną temperaturą powietrza, choć wszystkie współczynniki korelacji są dodatnie (patrz tab. 6). Jest to jedyny, zwarty obszar w granicach opracowania (ryc. 7 B), na którym obserwuje się statystycznie istotny związek rocznej temperatury powietrza z roczną zmiennością frekwencji frekwencji makrotypu.

#### 4. Rola zmian frekwencji makrotypów cyrkulacji środkowotroposferycznej w kształtowaniu zmian temperatury powietrza w północnej Kanadzie i na Alasce (1985-2010)

Próba ustalenia związków między zachodzącymi zmianami frekwencji makrotypów cyrkulacji środkowotroposferycznej a zmianami temperatury wcześniej wymaga określenia znaku i rozmiaru zmian temperatury na badanym obszarze. Przyjęto do analizy roczną temperaturę powietrza, stano-

wiącą (jak się powszechnie przyjmuje) syntetyczną miarę zmienności klimatu. Dla wszystkich stacji obliczono wartość trendu rocznej temperatury powietrza i określono jego istotność statystyczną. Wartości trendów i błędów standardowych ich oszacowania są zestawione w tabeli 8.

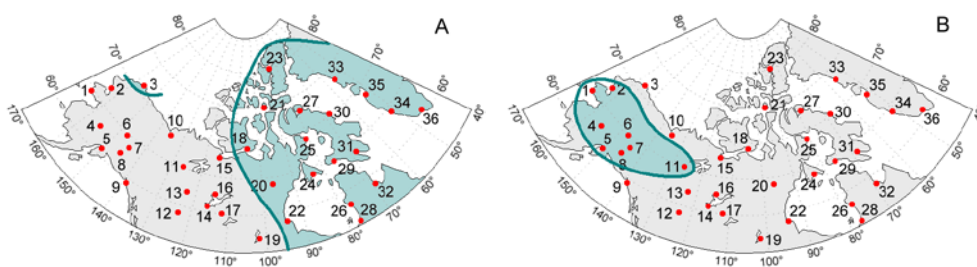
Tabela 8. Trendy rocznej temperatury powietrza ( $^{\circ}\text{C}\cdot\text{rok}^{-1}$ ) na stacjach w latach 1986-2010 i stopień objaśnienia wariacji rocznej temperatury powietrza na danej stacji przez zmienność rocznej frekwencji poszczególnych makrotypów (adj. $R^2\cdot 100\%$ ). Wartości statystycznie istotne ( $p < 0,05$ ) oznaczone pogrubionym drukiem

Table 8. The value of annual air temperature trends ( $^{\circ}\text{C}\cdot\text{yr}^{-1}$ ) at the stations in 1986-2010 and the degree of variance explanations of annual air temperature at particular station by the variability of annual frequency of particular macro-types (adj. $R^2 \cdot 100\%$ ). Values statistically significant ( $p < 0.05$ ) marked in bold.

Nr No	Stacja Station	Sektor Sector	Trend ( $^{\circ}\text{C}\cdot\text{rok}^{-1}$ ) Trend ( $^{\circ}\text{C}\cdot\text{yr}^{-1}$ )	Objaśnienie wariacji temperatury rocznej (%) Variance explanations of annual air temperature (%)		
				Z	M1	M2
1	Nome	SP	-0,004( $\pm 0,033$ )	0,00	0,00	<b>26,52</b>
2	Kotzebue	SP	+0,035( $\pm 0,031$ )	7,57	0,00	<b>38,63</b>
3	Barrow	SP	<b>+0,154(<math>\pm 0,024</math>)</b>	<b>18,17</b>	3,79	2,64
4	McGrawth	SP	+0,023( $\pm 0,030$ )	2,56	0,00	<b>32,80</b>
5	Anchorage	SA	+0,005( $\pm 0,023$ )	0,00	0,00	<b>25,61</b>
6	Fairbanks	SA	+0,013( $\pm 0,029$ )	0,00	7,72	<b>35,97</b>
7	Big Delta	SA	+0,013( $\pm 0,036$ )	0,00	0,00	<b>34,04</b>
8	Gulkama	SA	-0,016( $\pm 0,027$ )	0,00	13,19	<b>29,59</b>
9	Yakutat	SA	+0,011( $\pm 0,017$ )	0,00	1,26	0,00
10	Inuvik	SA	+0,063( $\pm 0,032$ )	5,59	0,00	9,91
11	Norman Wells	SA	+0,015( $\pm 0,025$ )	0,00	0,00	<b>20,07</b>
12	Fort Nelson	SNWT	-0,000( $\pm 0,024$ )	0,00	<b>16,10</b>	5,52
13	Fort Simpson	SNWT	+0,017( $\pm 0,027$ )	0,00	0,00	0,00
14	Hay River	SNWT	+0,037( $\pm 0,033$ )	0,00	0,00	0,00
15	Kugluktuk	SNWT	+0,054( $\pm 0,033$ )	0,00	0,00	0,00
16	Yellowknife	SNWT	+0,056( $\pm 0,037$ )	0,00	0,00	0,00
17	Fort Smith	SNWT	+0,052( $\pm 0,035$ )	0,00	0,00	0,00
18	Cambridge Bay	SNWT	<b>+0,091(<math>\pm 0,033</math>)</b>	1,08	0,00	0,00
19	Lynn Lake	SNWT	+0,029( $\pm 0,033$ )	0,00	0,00	0,00
20	Baker Lake	SNWT	<b>+0,123(<math>\pm 0,033</math>)</b>	9,00	9,90	9,90
21	Resolute	SH	+0,126( $\pm 0,029$ )	0,00	0,00	0,00
22	Churchill	SH	<b>+0,078(<math>\pm 0,036</math>)</b>	0,00	0,00	0,00
23	Eureka	SH	<b>+0,123(<math>\pm 0,028</math>)</b>	1,15	0,00	0,00
24	Coral Harbour	SH	<b>+0,145(<math>\pm 0,031</math>)</b>	11,21	3,89	0,00
25	Hall Beach	SH	<b>+0,126(<math>\pm 0,031</math>)</b>	<b>15,52</b>	5,66	0,00
26	Inukjuak	SH	<b>+0,156(<math>\pm 0,040</math>)</b>	2,83	0,00	0,00
27	Pond Inlet	SH	<b>+0,124(<math>\pm 0,029</math>)</b>	5,05	0,00	2,73
28	Kuujuarapik	SH	<b>+0,139(<math>\pm 0,035</math>)</b>	1,75	0,00	0,00
29	Cape Dorset	SH	<b>+0,147(<math>\pm 0,028</math>)</b>	<b>23,63</b>	11,47	0,00
30	Clyde A	SH	<b>+0,143(<math>\pm 0,028</math>)</b>	4,97	0,00	3,53
31	Iqaluit	SH	<b>+0,159(<math>\pm 0,032</math>)</b>	<b>17,72</b>	8,79	0,00
32	Kuujuaq	SH	<b>+0,160(<math>\pm 0,030</math>)</b>	11,06	5,98	0,00
33	Upernavik	SBG	<b>+0,186(<math>\pm 0,034</math>)</b>	5,40	0,00	9,62
34	Nuuk	SBG	<b>+0,124(<math>\pm 0,028</math>)</b>	4,25	0,00	0,00
35	Ilulisaat	SBG	<b>+0,146(<math>\pm 0,030</math>)</b>	0,00	0,00	4,03
36	Narsarsuaq	SBG	<b>+0,126(<math>\pm 0,032</math>)</b>	3,87	0,00	0,00

Zachodzące na badanym obszarze zmiany temperatury powietrza w latach 1986-2010 charakteryzują się znaczną zmiennością regionalną. Analiza trendów rocznej temperatury powietrza na bada-

nych stacjach wykazuje, że obszar objęty opracowaniem jest dwudzielny pod względem zmian temperatury (tab. 8). W sektorach pacyficznym, alaskańskim i NWT, w przybliżeniu do długości  $\sim 100\text{-}105^\circ\text{W}$  nie obserwuje się występowania statystycznie istotnego trendu temperatury w badanym okresie. Trendy są tam w przewadze dodatnie, ale bardzo słabe, a błąd ich oszacowania jest najczęściej większy od samej wartości trendu (tab. 8). Wyjątkiem jest najdalej na północy położona stacja Barrow (sektor pacyficzny), na której występuje silny i wysoce istotny trend dodatni. Trudno zatem mówić o ocieplaniu się tego obszaru. Na obszarze leżącym na wschód od  $100\text{-}105^\circ\text{W}$ , czyli w sektorach hudsonskim i baffino-grenlandzkim na wszystkich stacjach w badanym 25. leciu (1986-2010) występuje statystycznie istotny, dodatni trend rocznej temperatury powietrza (patrz ryc. 7A). Za wyjątkiem stacji Churchill, gdzie wartość trendu rocznej temperatury powietrza jest mniejsza od  $+0,1^\circ\text{C}\cdot\text{rok}^{-1}$  ale statystycznie istotna ( $0,078(\pm 0,036)^\circ\text{C}\cdot\text{rok}^{-1}$ ), trendy są silne. Na wszystkich pozostałych stacjach tych sektorów trendy rocznej temperatury powietrza są większe od  $0,12^\circ\text{C}\cdot\text{rok}^{-1}$ , miejscami przekraczając  $0,15^\circ\text{C}\cdot\text{rok}^{-1}$  (patrz tab. 8). Jest to bardzo szybki wzrost rocznej temperatury powietrza.



Ryc. 7. A – obszar, na którym występuje statystycznie istotny, dodatni trend temperatury rocznej, B – obszar, na którym międzyroczne zmiany frekwencji makrotypu M2 są powiązane istotnie z międzyrocznymi zmianami temperatury powietrza, objaśniając od 29 do 36% ich wariancji. Na tym obszarze brak statystycznie istotnego trendu temperatury powietrza

Fig. 7. A – an area where there is a statistically significant, positive trend in annual temperature (darker in color), B – the area where the changes in the frequency of macro-type M2 are significantly correlated with inter-annual changes in air temperature, explaining between 29 to 36% of their variance. In this area, no statistically significant trend in air temperature is observed.

Wydaje się, że warto w tym miejscu zwrócić uwagę na fakt, że granica między obszarami na których obserwuje się statystycznie istotny wzrost temperatury rocznej a obszarami, na których wzrostu takiego brak, pokrywa się w przybliżeniu ze strefą rozgraniczającą występowanie zmiany znaku korelacji między frekwencją makrotypu M1 a temperaturą powietrza od lipca do maja ( $90\text{-}95^\circ\text{W}$ ) i M2 od lipca do września ( $100\text{-}105^\circ\text{W}$ ).

Taki rozkład trendów temperatury powietrza na badanym obszarze jest w pewnym sensie zaskakujący. Przybylak (2000), analizując zmiany rocznej temperatury powietrza w Arktyce w latach 1951-1995 stwierdzał występowanie dość silnego ochłodzenia (ujemnego trendu temperatury rocznej) na obszarze odpowiadającym w przybliżeniu sektorowi hudsonskiemu i baffino-grenlandzkiemu. To ochłodzenie utrzymywało się, jako silniejsze od przeciętnego (średniej z lat 1951-1990), w ostatnim badanym przez niego 5. leciu 1991-1995. Ujemna wartość trendu w regionie Zatoki Baffina w latach 1951-1995 i niższa od średniej wieloletniej średnia temperatura roczna lat 1991-1995, jaką wykrył Przybylak (2000) jest rezultatem gwałtownych spadków temperatury powietrza związanych z wystąpieniem

ekstremalnie silnych, dodatnich faz NAO w latach 1989, 1990, 1992, 1993, 1994 i 1995. Wystąpienie dodatniej fazy NAO w okresie zimowym wymusza masywne i szybkie adwekcje mas Powietrza Arktycznego i zimowego Powietrza Polarno-kontynentalnego nad te obszary. Roczna temperatura powietrza spadła w latach 1990-1995 na tym obszarze do wartości typowych dla minimum Małej Epoki Lodowej (Grumet i in. 2001, Drinkwater 2004). W sektorze pacyficznym i NWT Przybylak (2000) stwierdzał występowanie istotnie statystycznych dodatnich trendów rocznej temperatury powietrza w całym okresie 1951-1995, a pięciolecie 1991-1995 i tam miało średnią temperaturę wyższą od przeciętnej. Porównanie nieodległych w czasie wyników badań Przybylaka (2000) z wynikami badań autorów (1986-2010) wskazuje na odwrotny, w stosunku do panującego w okresie lat 1951-1995 rozkład tendencji zmian temperatury na omawianym obszarze. To porównanie wykazuje również, jak zmienny i mało stabilny jest „długookresowy” trend temperatury powietrza w Arktyce i jak kiepskim narzędziem do badań zmian klimatu jest analiza trendów.

Najprostszą metodą analizy wpływu zmian frekwencji makrotypów cyrkulacji środkowo-troposferycznej na zmiany temperatury powietrza wydaje się być analiza regresji. Przyjmując za zmienną zależną (objaśnianą) wartość rocznej temperatury powietrza na danej stacji, za zmienną niezależną (objaśniającą) roczną frekwencję danego makrotypu, i szacując parametry regresji liniowej jednej zmiennej, można następnie określić wartość współczynnika korelacji wielokrotnej ( $R$ ), i kolejno, jego poprawiony kwadrat (adjusted  $R^2$ ) oraz wartości testów istotności regresji i współczynnika regresji. Stopień objaśnienia zmiennej zależnej (temperatury rocznej na stacji  $n$ ) przez zmienną niezależną (frekwencję makrotypów kolejno  $Z, M1, M2$ ) określa wartość współczynnika determinacji (poprawionego  $R^2$ ), istotność związku – wartość testu  $t$ . Sama wartość współczynnika regresji w tej analizie nie jest specjalnie do niczego potrzebna, natomiast wartość poprawionego  $R^2$  objaśnia jaki odsetek wariacji rocznej temperatury powietrza na stacji  $n$  jest objaśniany przez wariację frekwencji danego makrotypu, a wartość testu  $t$  wyjaśnia jednoznacznie czy dana zależność jest statystycznie istotna. Analizę mającą na celu określenie, w jakim stopniu zmienność rocznej frekwencji każdego z makrotypów ( $Z, M1, M2$ ) wyjaśnia zmienność rocznej temperatury powietrza przeprowadzono dla wszystkich stacji. Wyniki tej analizy zestawione są w tabeli 8.

Rezultaty analizy wskazują, że roczna zmienność frekwencji makrotypów cyrkulacji środkowo-troposferycznej praktycznie nie wyjaśnia zachodzących zmian rocznej temperatury powietrza na rozpatrywanym obszarze jakie zachodziły w latach 1986-2010. Jedynym wyjątkiem jest obszar sektorów pacyficznego i alaskańskiego (bez ich północnych części), gdzie zachodzącą zmienność temperatury wyjaśnia w niezbyt dużym odsetku (od ~25 do ~38%) zmienność frekwencji makrotypu  $M2$  (patrz tab. 7, ryc. 7B). Można zatem sformułować tezę, że rola rocznej zmienności frekwencji makrotypów cyrkulacji środkowotroposferycznej w kształtowaniu zmian rocznej temperatury powietrza na obszarze północnej części Ameryki Północnej jest – podobnie, jak i rozkład trendów temperatury rocznej – dwudzielna. Nad obszarem zachodniej części Ameryki Północnej lokalnie wpływ ten, niezbyt silny, jest zauważalny i wymierny. Nad obszarem środkowej i wschodniej części omawianego obszaru wpływu takiego praktycznie brak. Co paradoksalne – zmienność rocznej frekwencji makrotypów cyrkulacji środkowotroposferycznej sektora pacyficznego-północnoamerykańskiego nie wyjaśnia zmian rocznej temperatury na obszarach, na których trendy temperatury rocznej w badanym okresie są silne i wysoce istotne statystycznie (sektory hudsonski i baffino-grenlandzki) – objaśnia natomiast zmienność rocznej temperatury powietrza nad częścią tych obszarów, nad którymi trendy są słabe i statystycznie nieistotne.

Roczne trendy frekwencji makrotypów cyrkulacji środkowotroposferycznej są w rozpatrywanym okresie słabe. Jak już wspomniano (rozdział 3.1, tab. 4) tylko roczny trend makrotypu Z jest statystycznie istotny ( $-1,594(\pm 0,604)$  dnia-rok<sup>-1</sup>), dodatnie trendy pozostałych makrotypów są statystycznie nieistotne. Oszacowania ich wartości są następujące; dla makrotypu M1  $+1,208(\pm 0,619)$  dnia-rok<sup>-1</sup>, a dla makrotypu M2  $+0,384(\pm 0,474)$  dnia-rok<sup>-1</sup>. Suma algebraiczna oszacowanych wartości trendów, tak jak być to powinno, niemal dokładnie się równoważy, różna od zera jest na poziomie 2 tysięcznych dnia. Wskazuje to, że oszacowania wartości trendów frekwencji makrotypów, mimo braku istotności dwu z nich, są formalnie poprawne. Ogólnie, w okresie 25 lat udział cyrkulacji strefowej zmniejszył się o około 40 dni w roku, a w to miejsce wchodziła cyrkulacja południkowa, typ M1 w wymiarze ~30 dni w roku i typ M2 ~10 dni w roku. Fakt, że zmienność rocznej frekwencji makrotypów nie wyjaśnia, poza sektorami pacyficznym i alaskańskim, zmienności temperatury rocznej na rozpatrywanym obszarze wskazuje, że przyczyną takiego stanu rzeczy mogą być różne znaki trendów frekwencji makrotypów w poszczególnych miesiącach i związane z nimi zjawisko „kompensacji” frekwencji danego makrotypu w skali rocznej (patrz rozdział 3.1). Można sądzić, że zmianami temperatury rocznej, w tym występowaniem istotnych trendów temperatury na tym obszarze steruje sezonowa, a nie roczna zmienność frekwencji makrotypów. Oznacza to, że podobna analiza, mająca na celu wyjawienie wpływu zmiennej frekwencji makrotypów na zmienność temperatury powietrza musi być przeprowadzona na poziomie wartości miesięcznych.

Analizę taką przeprowadzono również przy zastosowaniu analizy regresji i analizy wariancji, ale w nieco innej postaci – wykorzystując regresję wielokrotną „krokową w przód”<sup>5</sup>. Zmienną zależną była temperatura roczna na stacji, zespołem zmiennych niezależnych (objaśniających) wszystkie wartości frekwencji poszczególnych makrotypów ze wszystkich miesięcy (36 zmiennych). Ze względu na ograniczoną długość szeregu (25 lat) i wymogu, aby współczynniki regresji równania regresji wielokrotnej, dla ich stabilności, obliczać z nie mniej niż 7 przypadków na jedną zmienną niezależną, ograniczono się do oszacowania współczynników regresji dla trzech pierwszych zmiennych niezależnych, przy F do wprowadzenia równym 1 i tolerancji 0,001. Stosując tę procedurę program „sam” określa kolejne zmienne, które w największym stopniu objaśniają zmienność temperatury rocznej na danej stacji. Zmienna objaśniająca największy odsetek wariancji zmiennej zależnej stoi na pierwszym miejscu w równaniu, następne zmienne niezależne w kolejności zgodnej z malejącym objaśnieniem wariancji zmiennej zależnej. Wyniki tych operacji obliczeniowych są zestawione w tabeli 9. Oznaczenie zmiennych w tabeli 9 kolejno wymienia makrotyp, którego frekwencja w danym miesiącu [numer miesiąca w nawiasie kwadratowym] stoi na pierwszym, drugim i trzecim miejscu w równaniu regresji wielokrotnej, wartość po średniku – wartość współczynnika regresji stojąca przed daną zmienną w równaniu regresji wielokrotnej, ostatnia wartość – odsetek (%) objaśnionej wariancji zmiennej zależnej przez zmienność danej zmiennej. Przykładowo na stacji Churchill (nr 22 w tab. 1 i na ryc. 3) jako pierwsza (kolumna oznaczona jako 1 w tab. 9) stoi zespół wartości M1[07]; +0,21; 56, co oznacza, że zasadniczy

---

<sup>5</sup> Regresja wielokrotna „krokowa w przód” jest procedurą statystyczną, w której program, spośród wielu zmiennych niezależnych, objaśniających zmienność zmiennej zależnej wybiera kolejno jako pierwszą zmienną niezależną tą, która objaśnia maksymalny udział wariancji zmiennej zależnej, następnie drugą zmienną niezależną, która wespół z pierwszą zmienną niezależną objaśnia maksymalny udział wariancji, i tak kolejno, do momentu, w którym n-ta kolejna zmienna nie osiągnie progu zadeklarowanej tolerancji. Analiza wariancji pozwala z kolei na określenie, jaki jest udział każdej zmiennej niezależnej wprowadzonej do równania regresji wielokrotnej w objaśnieniu wariancji zmiennej zależnej. Pełne objaśnienie procedury – patrz np. Stanisiz (2007).

Tabela 9. Rola miesięcznej frekwencji makrotypów cyrkulacji środkowotroposferycznej w objaśnieniu zmian rocznej temperatury powietrza na stacjach północnej Kanady i Alaski. \* - oznaczono zmienne, których oszacowane wartości współczynników regresji były w równaniu regresji wielokrotnej (3 zmienne niezależne) statystycznie nieistotne. Adj. R<sup>2</sup> – łączne objaśnienie wariancji przez trzy wymienione zmienne

Table 9. The role of the monthly frequency of mid-tropospheric macro-type circulation in the explanation of changes in the annual air temperature at the stations of northern Canada and Alaska. The variables whose estimated values of regression coefficients were in the multiple regression equation (3 independent variables) statistically insignificant are marked with \*. Adj. R<sup>2</sup> – total explanation of the variance by the three mentioned variables.

Nr No	Stacja Station	Zmienne (miesięczna frekwencja danego makrotypu), kolejno objaśniające największy udział wariancji rocznej temperatury powietrza na stacjach północnej Kanady i Alaski						Adj. R <sup>2</sup>			
		1		2		3					
		Variables (monthly frequency of a particular macro-type) consecutively explaining the largest part of the variance of annual air temperature at the stations of northern Canada and Alaska									
1	Nome	*M1[12];	-0,10;	17	Z[09];	-0,12;	14	M1[05];	-0,09;	17	38,11
2	Kotzebue	M2[02];	+0,08;	23	M1[05];	-0,12;	13	M2[11];	+0,09;	21	49,06
3	Barrow	M2[08];	-0,18;	24	*Z[04];	-0,09;	15	Z[02];	-0,07;	5	34,96
4	McGrawth	M2[01];	+0,12;	34	Z[08];	-0,08;	18	M1[07];	-0,08;	13	58,63
5	Anchorage	M2[01];	+0,10;	33	M2[06];	+0,05;	15	Z[08];	-0,06;	17	58,10
6	Fairbanks	M2[01];	+0,09;	29	M1[05];	-0,10;	19	Z[09];	-0,07;	12	52,30
7	Big Delta	M2[01];	+0,10;	38	Z[08];	-0,09;	18	Z[05];	-0,06;	11	62,06
8	Gulkana	Z[08];	-0,11;	50	M2[06];	+0,06;	21	M2[01];	+0,06;	10	77,13
9	Yakutat	M1[02];	-0,08;	33	M2[05];	+0,05;	16	*M2[03];	-0,04;	9	51,00
10	Inuvik	M2[02];	+0,12;	30	M1[05];	-0,08;	11	*M1[12];	+0,11;	11	42,60
11	Norman Wells	Z[01];	-0,10;	33	*M1[05];	-0,05;	10	*M1[12];	-0,07;	8	42,42
12	Fort Nelson	M2[10];	+0,07;	22	M1[05];	-0,06;	12	M1[07];	+0,08;	20	45,33
13	Fort Simpson	Z[01];	-0,08;	26	M1[07];	+0,08;	11	M1[06];	-0,04;	9	32,27
14	Hay River	M1[07];	+0,11;	29	M1[02];	-0,14;	19	*M1[12];	+0,11;	10	51,30
15	Kugluktuk	M1[12];	+0,18;	22	Z[01];	-0,11;	34	*M1[04];	-0,05;	8	57,62
16	Yellowknife	M1[07];	+0,13;	29	M1[02];	-0,15;	12	M1[12];	+0,17;	18	52,06
17	Fort Smith	M1[07];	+0,13;	33	M1[02];	-0,16;	17	M1[12];	+0,16;	18	62,24
18	Cambridge Bay	M2[02];	+0,13;	22	Z[07];	-0,14;	20	M2[09];	-0,08;	18	52,59
19	Lynn Lake	M1[07];	+0,11;	29	M1[02];	-0,15;	19	M1[12];	-0,15;	16	57,00
20	Baker Lake	M1[07];	+0,19;	44	M2[02];	+0,10;	21	M1[09];	+0,08;	11	72,18
21	Resolute	M2[08];	-0,16;	36	Z[06];	+0,12;	10	*M2[01];	+0,10;	11	49,33
22	Churchill	M1[07];	+0,21;	56	M1[02];	-0,09;	13	*M1[05];	-0,06;	6	71,06
23	Eureka	Z[01];	-0,16;	33	M2[04];	+0,15;	19	M1[09];	+0,08;	12	58,30
24	Coral Harbour	Z[01];	-0,15;	44	M1[07];	+0,13;	16	M1[09];	+0,09;	13	68,96
25	Hall Beach	Z[01];	-0,19;	45	M1[09];	+0,11;	16	M2[04];	+0,10;	12	68,71
26	Inukjuak	Z[01];	-0,19;	50	M2[07];	+0,20;	24	M1[03];	-0,09;	6	76,41
27	Pond Inlet	M2[08];	-0,14;	40	M2[02];	+0,09;	11	*M1[04];	-0,07;	8	52,84
28	Kuujuarapik	M1[07];	60,20;	55	Z[01];	-0,15;	21	M1[03];	-0,08;	6	79,24
29	Cape Dorset	Z[01];	-0,17;	48	M1[07];	+0,12;	12	M1[09];	+0,08;	12	67,28
30	Clyde A	Z[01];	-0,18;	38	M2[04];	+0,13;	11	M1[09];	+0,10;	17	59,27
31	Iqaluit	Z[01];	-0,20;	44	M1[09];	+0,11;	13	M2[04];	+0,11;	12	63,36
32	Kuujuaq	M1[07];	+0,18;	48	M2[08];	-0,12;	21	M2[02];	-0,08;	9	74,36
33	Upernavik	Z[01];	-0,21;	42	M2[12];	+0,09;	9	M1[09];	+0,09;	8	51,89
34	Nuuk	Z[01];	-0,14;	42	M1[09];	+0,08;	12	M1[07];	+0,09;	11	59,31
35	Ilulisaat	M1[02];	-0,19;	45	M2[08];	-0,13;	12	M2[04];	+0,07;	4	53,80
36	Narsarsuaq	M2[01];	+0,19;	42	M1[09];	+0,10;	16	M1[07];	+0,12;	15	68,72

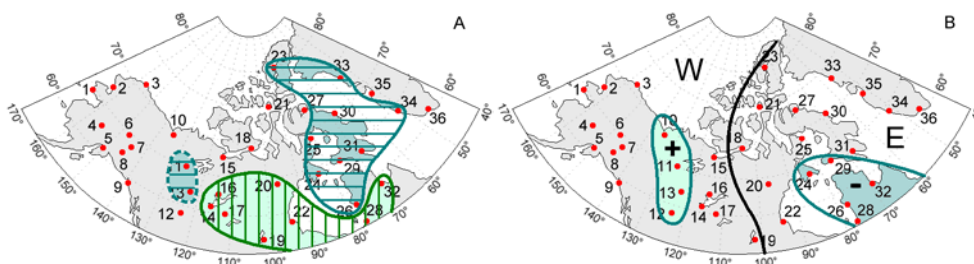
wpływ na roczną temperaturę na tej stacji wywiera zmienność frekwencji makrotypu M1 w lipcu [07], którego zmiana o 1 dzień w stosunku do przeciętnej pociąga za sobą zgodną ze znakiem zmianę temperatury rocznej o  $0,21^{\circ}\text{C}$ , i której zmienność w badanym okresie 1986-2010 objaśnia 56% wariacji temperatury rocznej na tej stacji. Na drugim miejscu w stopniu objaśnienia zmienności temperatury rocznej (kolumna oznaczona jako 2) pasuje się zmienność frekwencji makrotypu M1 w lutym [02], której zmiana frekwencji o 1 dzień w stosunku do średniej pociąga za sobą przeciwną do znaku zmianę temperatury rocznej o  $0,09^{\circ}\text{C}$ , i której zmienność w badanym okresie objaśnia 13% wariacji temperatury rocznej na stacji Churchill w badanym okresie.

Przeprowadzona w taki sposób estymacja parametrów regresji (łącznie z wyborem zmiennych objaśniających) dała w zdecydowanej większości oszacowania statystycznie istotne lub wysoce istotne. Nie uzyskano statystycznie istotnego wskazania pierwszej zmiennej na jednej stacji (Nome, nr 1), drugiej zmiennej na jednej stacji (Norman Wells, nr 11) i trzeciej zmiennej na 10 stacjach (patrz tab. 9). Z tego względu dalsza analiza ograniczy się do oceny roli pierwszych dwu zmiennych.

Z rozkładu frekwencji makrotypów stojących na pierwszym miejscu równań regresji wielokrotnej wynika, że główną rolę w kształtowaniu zmian rocznej temperatury powietrza na badanym obszarze odgrywa zmienność frekwencji makrotypu Z w styczniu (11 przypadków) i makrotypu M1 w lipcu (8 przypadków). Stacje, na których wymienione dwie frekwencje makrotypów zdają się decydować o zmianach rocznej temperatury powietrza (patrz tab. 9) lokują się na obszarze sektorów NWT, hudsonskiego i baffino-grenlandzkiego. W zależności od lokalizacji stacji zmiany frekwencji makrotypu Z w styczniu, jeśli zmienna ta lokuje się na pierwszym miejscu, objaśniają od 26 (Norman Wells; nr 11) do 50% (Inukjuak, nr 26) wariacji rocznej temperatury powietrza. Zmienność frekwencji makrotypu M1 w lipcu, jeśli lokuje się ona na pierwszym miejscu w równaniu regresji, objaśnia od 29 (Hay River nr 14; Yellowknife, nr 16; Lyn Lake, nr 19) do 56% (Churchill, nr 22) wariacji rocznej temperatury powietrza. Ogólnie, stopień objaśnienia wariacji rocznej temperatury powietrza przez te zmiennie rośnie ku wschodowi, osiągając maksimum w sektorze hudsonskim. Dominacja obu tych zmiennych tworzy dwa zwarte obszary. Pierwszy – na którym główną rolę w kształtowaniu zmian temperatury rocznej odgrywa zmienność frekwencji makrotypu Z w styczniu – rozciąga się na obszarach północnych i środkowych części sektora hudsonskiego i baffino-grenlandzkiego (patrz ryc. 8), jego dłuższa oś ma orientację zbliżoną do południkowej. Na tym obszarze zmiany temperatury rocznej zachodzą odwrotnie w stosunku do zmian frekwencji makrotypu Z w styczniu – wraz ze wzrostem frekwencji tego makrotypu temperatura powietrza się obniża. Na pograniczu sektorów alaskańskiego i NWT, na dwu stacjach (Norman Wells (nr. 11) i Fort Simpson (nr 13) również ujawnia się niewielki obszar, na którym zmiany frekwencji makrotypu Z w styczniu zdają się wywierać zasadniczy wpływ na kształtowanie się zmian rocznej temperatury powietrza. Jednak w równaniu regresji dla stacji Norman Wells tylko pierwsza zmienna jest istotna, a statystyki całego równania wskazują, że nie należy przywiązywać do jego oszacowań większej wagi. Z tego względu obszar ten pomija się w rozważaniach. Drugi zwarty obszar, na którym w kształtowaniu temperatury rocznej główną rolę odgrywa zmienność frekwencji makrotypu M1 w lipcu lokuje się na południowych częściach sektora NWT i sektora hudsonskiego, jego dłuższa oś rozciąga się równoleżnikowo. Tu temperatura roczna rośnie wraz ze wzrostem frekwencji tego makrotypu (patrz ryc. 8A).

Zmienne niezależne stojące w równaniu regresji wielokrotnej na drugim miejscu, i które odgrywają mniejszą rolę w objaśnieniu wariacji temperatury rocznej na poszczególnych stacjach (przeciętnie kilkunastoprocentową; patrz tab. 9), wykazują znacznie większy rozrzut spektrum. Brak tu wyraźniej

zaznaczonego maksimum siły oddziaływania, jednak najczęściej w równaniach na drugim miejscu stoją frekwencje makrotypu M1 – z lutego i maja po 5 przypadków oraz tego samego makrotypu z lipca i września po 4 przypadki (razem 18 przypadków). Łączna analiza rozkładu wyłonionych istotnych statystycznie pierwszych i drugich zmiennych wskazuje, że główną rolę w kształtowaniu zmian rocznej temperatury powietrza na omawianym obszarze odgrywa zmienność frekwencji najmniej licznego (patrz tab. 2) makrotypu M1 i najliczniej występującego makrotypu Z.



Ryc. 8. A – obszary, na których dominującą rolę w kształtowaniu zmienności temperatury rocznej odgrywają zmiany frekwencji makrotypu Z w styczniu (kreskowanie poziome) i makrotypu M1 w lipcu (kreskowanie pionowe). B – granice obszarów dla których obliczono średnie „obszarowe” temperatury roczne. W – obszar zachodni, E – obszar wschodni

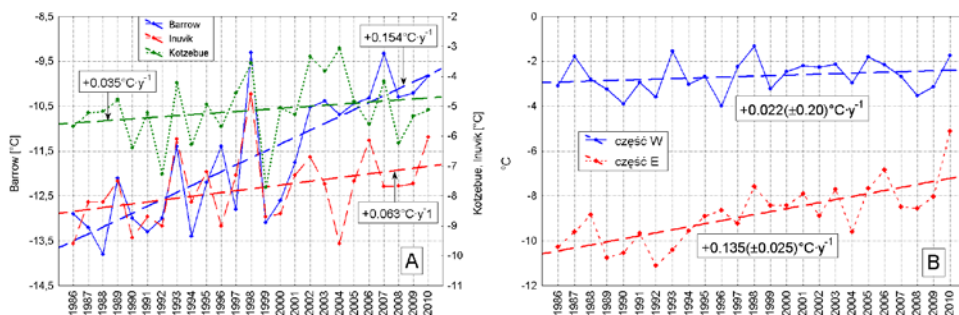
Fig. 8. A – areas where changes in the frequency of macro-type Z in January (horizontal hatching) and in the frequency of macro-type M1 in July (vertical hatching) play predominant role in determining variability of annual temperature. B – the boundaries of areas for which mean “area” annual temperatures were the calculated. W – West area, E – East area.

Przegląd treści tablicy 9 i konfrontacja rozkładu zmiennych niezależnych z wartościami rocznych trendów temperatury powietrza na poszczególnych stacjach (tab. 8) wskazują na wyraźne regionalne zróżnicowanie rozkładu zmiennych decydujących o zmianach temperatury powietrza. Zespoły zmiennych objaśniających zmienność temperatury rocznej wykazują również powiązanie z wartościami i stopniem istotności trendów temperatury rocznej na stacjach. Poza rejonem stacji Barrow (nr 3), rozkład przestrzenny trendów temperatury rocznej tworzy dwa zwarte obszary (patrz ryc. 7A). Pierwszy, na którym trendy są słabe i nieistotne (stacje sektorów pacyficznego, alaskańskiego i większej części sektora NWT) oraz drugi, na którym trendy są silne i statystycznie istotne (stacje sektora hudsonskiego, baffino-grenlandzkiego i część stacji ze wschodniej części sektora NWT; patrz ryc. 8 B). Dla obu tych obszarów obliczono „średnie obszarowe” temperatury roczne. Dla części zachodniej taką średnią obszarową utworzono z 17 stacji (numery stacji: 1-2, 4-17 i 19). Wyłączono z obliczania średniej stację Barrow, na której wzrost temperatury jest o rząd wielkości silniejszy niż na stacjach otaczających (patrz tab. 8, nr 3, ryc. 9A), co, jak wynika z precyzyjnych badań (Hinkel i in. 2003, Hinkel i Nelson 2007), stanowi efekt występowania wokół tej osady „miejskiej wyspy ciepła”. Dla części wschodniej wartość średniej obszarowej obliczono z 18 stacji (stacje 20-36 oraz 18). Zbiór stacji części wschodniej pokrywa się niemal dokładnie ze stacjami sektora hudsonskiego i baffino-grenlandzkiego, do których dołączono stacje Cambridge Bay (nr 18) i Baker Lake (nr 20) z sektora NWT (patrz tab. 8). Obie średnie obszarowe, pod względem ich „mocy” (obliczenia z liczby przypadków) są równoważne.

Przebieg obu średnich obszarowych przedstawia ryc. 9B. W przebiegu temperatury obszarowej części zachodniej praktycznie brak trendu. Trend jest słaby ( $+0,022^{\circ}\text{C}\cdot\text{rok}^{-1}$ ), statystycznie nieistotny



( $p = 0,284$ ), a uwzględniając błąd standardowy jego oszacowania ( $\pm 0,020$ ) nie można wykluczyć, że może być on bliski zero. W przebiegu temperatury części wschodniej zaznacza się silny i wysoce istotny ( $p = 0,000\ 022$ ) trend dodatni, prawdziwa jego wartość zawiera się w granicach od  $+0,110$  do  $0,160^{\circ}\text{C}\cdot\text{rok}^{-1}$ . Przebieg obliczonej temperatury obszarowej części wschodniej wykazuje wszystkie charakterystyczne dla rejonu Zatoki Baffina i Zatoki/Cieśniny Hudsona regionalne elementy zmiany temperatury – silne jej spadki w latach 1989, 1990 i 1992 (wystąpienie ekstremalnie silnych dodatnich faz NAO), stopniowy wzrost w latach 1995-2006, spadek w latach 2007-2009 i raptowny wzrost w roku 2010 (efekt ekstremalnie silnej negatywnej fazy NAO<sup>6</sup>).



Ryc. 9. A – przebieg rocznej temperatury powietrza i wartości jej trendów na stacjach położonych na północnych wybrzeżach Alaski – stacje Barrow, Inuvik i Kotzebue. Zauważalny gwałtowny wzrost temperatury na stacji Barrow w latach 2000-2003, stanowiący przyczynę występowania silnego i wysoce istotnego trendu. B – przebieg „obszarowej” średniej rocznej temperatury powietrza nad zachodnią (W) i wschodnią (E) częścią północnej części Ameryki Północnej. Oznaczone wartości trendów rocznej temperatury powietrza wraz z wartościami błędów estymacji (w nawiasach (SEE))

Fig. 9. A – course of annual air temperature and the values of its trends at stations located at the northern coast of Alaska – Barrow, Inuvik and Kotzebue stations. A noticeable rapid rise in temperature at the Barrow station in 2000-2003, which is the cause of a strong and highly significant trend. B – The course of „area” average annual air temperature over the western part (W) and eastern (E) part of the northern part of North America. The values of annual air temperature trends and the values of estimation error are marked (in parentheses (SEE)).

Szeregi średnich rocznej temperatury obu części poddano analizie regresji wielokrotnej, starając się znaleźć zmienne (miesięczne frekwencje makrotypów), które w największym stopniu objaśnia ich zmienność. Zastosowano do tego metodę regresji „krokowej w przód”. Wynikiem przeprowadzonej analizy, dla części zachodniej ( $\text{Trk}_{(W)}$ ) jest równanie, które jednak zawiera<sup>7</sup> tylko jedną istotną zmienną niezależną:

$$\text{Trk}_{(W)} = -1,84(\pm 0,32) - 0,08(\pm 0,02) \cdot Z[01], \quad [1]$$

kórego charakterystyka statystyczna jest następująca:  $R = 0,59$ ,  $\text{adj. } R^2 = 0,31$ ,  $F(1,20) = 10,2$ ,  $p < 0,005$ , a standardowy błąd estymacji (SEE) wartości  $\text{Trk}_{(W)}$  jest równy  $\pm 0,59$ . Równanie [1] objaśnia dla całego

<sup>6</sup> Wskaźnik NAO J.Hurrella (1995) osiągnął w roku 2010 wartość  $-4,64$ . Jest to druga w historii (1864-2012) najniższa wartość wskaźnika. Najniższa do tej pory znana wartość wskaźnika NAO to  $-4,89$ , której wystąpienie odnotowano w roku 1969.

<sup>7</sup> Przy estymacji równania o 3 zmiennych niezależnych, oszacowanie parametrów ostatniej zmiennej było nieistotne. Jej usunięcie spowodowało utratę istotności przez drugą zmienną i wyraz wolny.

obszaru części zachodniej większy odsetek zmienności temperatury rocznej (31%), niż zmienność rocznej frekwencji makrotypu M2 (23%), która daje z kolei dość wysokie objaśnienie zmienności rocznej temperatury powietrza na obszarze Alaski (patrz ryc. 7B, tab. 8).

Dla części wschodniej ( $Trk_{(E)}$ ) otrzymano równanie regresji, w którym zarówno oszacowanie wyrazu wolnego, jak i wszystkich trzech zmiennych niezależnych jest wysoce istotne:

$$Trk_{(E)} = -8,70(\pm 0,64) - 0,15(\pm 0,03) \cdot Z[01] + 0,11(\pm 0,04) \cdot M1[07] + 0,08(\pm 0,03) \cdot M1[09], \quad [2]$$

i które objaśnia 69% wariancji szeregu  $Trk_{(W)}$  ( $R = 0,86$ ,  $adj.R^2 = 0,69$ ,  $F(3,18) = 15,6$ ,  $p = 0,00004$ ,  $BSE = 0,73$ ). W równaniu tym zmienność  $Z[01]$  (frekwencja makrotypu Z w styczniu) objaśnia 48,8%, zmienność  $M1[07]$  (frekwencja makrotypu M1 w lipcu) – 12,5%, a zmienność  $M1[09]$  (frekwencja makrotypu M1 we wrześniu) 12,1% wariancji  $Trk_{(W)}$ .

Przeprowadzona analiza regresji i analiza wariancji potwierdzają zatem istnienie w rozpatrywanym okresie dwoistości w generalnych cechach wpływu cyrkulacji atmosferycznej na kształtowanie temperatury powietrza nad północną częścią Ameryki Północnej. Mając na względzie to, że cyrkulacja atmosferyczna stanowi przyczynę zmian temperatury, a nie odwrotnie, można postawić tezę, że wspomnianą dwoistość w przestrzennym rozkładzie trendów rocznej temperatury powietrza<sup>8</sup> wymusza cyrkulacja atmosferyczna.

Nad obu obszarami główną rolę w regulacji temperatury rocznej odgrywa zmienność frekwencji makrotypu Z w styczniu, z tym, że nad wschodnią częścią wpływ ten jest silniejszy. O ile nad zachodnią częścią zmienność frekwencji makrotypu  $Z[01]$  objaśnia zaledwie 31% wariancji przebiegu temperatury rocznej, to nad częścią wschodnią niemal połowę (48,8%) obserwowanej tam zmienności temperatury. Również nad obu obszarami wpływ zmienności frekwencji makrotypu Z w styczniu realizuje się z takim samym znakiem – ujemnym, co oznacza, że spadek frekwencji tego makrotypu pociąga za sobą wzrost temperatury rocznej. Reakcja temperatury rocznej nad obu obszarami na zmiany frekwencji makrotypu Z w styczniu jest jednak różna. Wzrost lub spadek frekwencji makrotypu Z o jeden dzień w styczniu daje nad wschodnią częścią niemal dwukrotnie większą zmianę temperatury rocznej ( $0,15(\pm 0,03)^\circ\text{C}$ ) niż nad częścią zachodnią ( $0,08(\pm 0,02)^\circ\text{C}$ ), a zmiany frekwencji każdego makrotypu są takie same nad całym obszarem Alaski i północnej Kanady.

Dodatkową różnicą między częścią zachodnią a wschodnią rozpatrywanego obszaru jest to, że nad obszarem zachodniej części statystycznie istotny wpływ cyrkulacji na temperaturę roczną zaznacza się tylko w styczniu, gdy nad obszarem części wschodniej zaznacza się taki wpływ nie tylko w styczniu, ale również w lipcu i wrześniu. Tu główną rolę odgrywa zmiana frekwencji makrotypu M1, dodatnio powiązana z temperaturą na obszarze wschodniej części obszaru, a ujemnie na obszarze części zachodniej (patrz tab. 6). Uzyskane wyniki, choć wydają się być jednoznaczne, wymagają jednak szerszej dyskusji.

## 5. Dyskusja i wnioski

Rezultaty badania związków między cyrkulacją środkowotroposferyczną a roczną temperaturą powietrza nad północną Kanadą i Alaską wykazują dowodnie, że zmienność cyrkulacji, zapisana

---

<sup>8</sup> Także nie omawianego tutaj przestrzennego zróżnicowania temperatury rocznej na obu obszarach.

w zmienności frekwencji makrotypów, stanowi przyczynę czytelnych i wymiernych zmian rocznej temperatury powietrza nad tymi obszarami. Uzyskany obraz, ze względu na małą gęstość stacji i krótki, bo zaledwie 25-letni okres analizy, należy traktować jako pierwsze, silnie zgeneralizowane w przestrzeni, przybliżenie.

Jednym z ważnych wniosków, które nasuwają się z przeprowadzonych analiz jest stwierdzenie na ogół słabych i nieistotnych korelacji między temperaturą powietrza a frekwencją makrotypów cyrkulacji środkowotroposferycznej w skalach miesięcznej i rocznej (patrz tab. 5, 6, 7). Dopiero zmienność frekwencji niektórych makrotypów, ale tylko w niektórych – skrajnych pod względem termiki miesiącach – objaśnia w zadawalający sposób zmienność temperatury rocznej. Jest to odmienny obraz od tego, jaki uzyskuje się w podobnych analizach na obszarze środkowej i północnej Europy, gdzie związki takie są na ogół silne. Jedną z przyczyn występowania silnych związków między temperaturą powietrza a frekwencją makrotypów nad Europą jest wyraźne zróżnicowanie kierunku napływu mas powietrza nad dany obszar w zależności od makrotypu i wyraźne zróżnicowanie sezonowe temperatury napływającego powietrza w zależności od kierunku napływu.

W przypadku rozpatrywania związków między cyrkulacją środkowotroposferyczną a temperaturą powietrza nad obszarem północnej części Ameryki Północnej napotyka się na poważne problemy, związane z niewielkim zróżnicowaniem kierunków napływu mas powietrza w przypadku występowania różnych makrotypów. Związki między zróżnicowaniem makrotypów a temperaturą powietrza komplikuje dodatkowo orografia, wywierająca silny wpływ na modyfikację kierunków przenosu w przyziemnej warstwie troposfery i procesy transformacji mas powietrza przy ich przepływie nad obszarami gór. Dopływ powietrza z zachodu, znad Pacyfiku, nad obszary Arktyki i Subarktyki Kanadyjskiej jest blokowany przez szeroki (500-700 km) łańcuch Gór Skalistych, podobnie dopływ tego powietrza z południa nad interior Alaski jest blokowany przez wysokie Góry Św. Eliasza i Góry Alaski (Alaska Range). Jedynie napływy z kierunków północnych nie są blokowane na całym obszarze, a na jego wschodniej części – również z sektora od wschodu do południa.

Ze schematów ideowych rozkładu przestrzennego górnych klinów i górnych zatok nad Ameryką Północną (ryc. 1) według klasyfikacji Girsy (1964) wynika, że w każdym z makrotypów nad zachodnią częścią Ameryki Północnej lokuje się górny klin, nad wschodnią – górna zatoka. Taka lokalizacja górnego klina i stowarzyszonej z nim od wschodu górnej zatoki, ma, jak już wspomniano, uwarunkowania orograficzne (patrz Wprowadzenie). Położenie i nachylenie osi górnego klina w każdym z makrotypów jest bardzo podobne, jak również ich zasięg w kierunku północnym – wierzchołek klina na schemacie, w każdym z makrotypów lokuje się między 70 a 80°N. Większe, choć niezbyt duże różnice zachodzą między lokalizacją osi, nachyleniem i przede wszystkim amplitudą górnych zatok. W związku z tym, stałą tendencją nad środkową częścią północnej części Ameryki Północnej jest tworzenie się układów wysokiego ciśnienia związanych z górnym klinem.

Różnice w położeniu osi górnych klinów są jednak na tyle małe, że położenie centrum antycyklonu lokującego się nad środkową częścią kontynentu północnoamerykańskiego wykazuje jedynie nieznaczne przesunięcia równoleżnikowe<sup>9</sup>. W wyniku tego, z każdym z makrotypów występujących nad północną część Ameryki Północnej w dolnej troposferze związane jest występowanie silnego strumienia powietrza z

---

<sup>9</sup> Przy założeniu, że występujące fale długie są falami stacjonarnymi. W rzeczywistości fale te przemieszczają się w przestrzeni (niekiedy odcinając górną zatokę bądź górny klin), a z nimi, na różne odległości i w różnym kierunku, również antycyklony.

północy. Strumienie takie, patrząc na schemat Girsy (1964, 1981), częściej występują we wschodniej i środkowej, rzadko w zachodniej części omawianego obszaru. Ogólnie – rejon Alaski (za wyjątkiem jej skrajnie zachodnich partii – sektora pacyficznego) znajduje się w strumieniu powietrza z południa, pozostałe rejony, czyli sektor NWT i hudsonski, w strumieniu napływu z północy. Występowanie nad Alaską przepływów z północy jest związane nie z antycyklonami towarzyszącymi wschodnim granicom górnych klinów, ale z działaniem wschodnich partii Niżu Aleuckiego w sytuacji, gdy ten przesunięty jest nad Zatokę Alaski. Wtedy napływy z północy obejmują głównie sektor pacyficzny i zachodnią część sektora alaskańskiego. Taki rozkład głównych strumieni napływu mas powietrza sprzyja występowaniu relatywnie niskiej temperatury powietrza przez cały rok. Jedynie w rejonach, nad którymi latem występują układy wysokiego ciśnienia, temperatura powietrza silnie rośnie.

W rezultacie, poza sektorem alaskańskim, na całym obszarze w okresie chłodnej pory roku przeważa niska i bardzo niska temperatura powietrza. Jej silniejsze spadki odnotowuje się na linii splotu powietrza z wysokiej Arktyki. Powietrze to, trafiając w niższe szerokości, nad podłoże pokryte śniegiem, nie transformuje się, w związku z czym, niezależnie od kierunku w którym jest następnie przenoszone, ma niską temperaturę. W takich warunkach zmiana kierunku napływu nie będzie skutkowała większymi zmianami temperatury, a więc i wartości współczynników korelacji między frekwencją makrotypu a temperaturą będą niskie, nie przekraczając progu istotności statystycznej.

W okresie ciepłym temperatura powietrza wyraźniej różnicuje się w zależności od kierunków napływu. Z adwekcjami z północy, zwłaszcza z wysokich szerokości, wiąże się ochłodzenie, z adwekcjami z południa – ocieplenie, przepływ strefowy nie jest sygnalizowany przez zmianę temperatury napływającego powietrza. Cyrkulacja w układzie barycznym, np. stacjonarnym wyżu związanym z danym makrotypem, da na jego wschodnich peryferiach ochłodzenie, na zachodnich – ocieplenie. Tego rodzaju prawidłowości w związkach temperatury z frekwencją makrotypów M1 i M2 wykrywa się nad badanym obszarem jako dodatnie skorelowanie jednej grupy stacji i ujemne skorelowanie drugiej grupy stacji w danym miesiącu z frekwencją danego makrotypu (patrz tab. 5, 6, 7, części 3.2.3 i 3.3.4.). Jednak i takie, choć dość czytelne związki, są na omawianym obszarze stosunkowo słabe.

To małe zróżnicowanie kierunków napływu nad omawianym obszarem i dominację napływów z północy w ciągu całego roku nad sektory hudsonski i NWT potwierdzają badania Slonosky i Grahama (2005). Przeprowadzili oni, stosując empiryczne funkcje własne (EOF), analizę miesięcznych szeregów pomiarów ciśnienia atmosferycznego (SLP) na stacjach kanadyjskich i grenlandzkich oraz szeregów SLP w siatce gridowej 2,5x2,5° (dane z UK Hadley Center's) z szeroko rozumianych obszarów Kanady. Analiza ta miała na celu wykrycie występujących nad Kanadą typów (wzorców) cyrkulacji atmosferycznej. W rezultacie tych badań wykryto zaledwie trzy typy cyrkulacji (Slonosky i Graham, 2005, ryc. 4):

1. układ z grzbietem wysokiego ciśnienia nad północno-zachodnią Kanadą, po zawiętrznej Gór Skalistych z centrum nad basenem MacKenzie, o orientacji NW – SE i obszarem obniżonego ciśnienia z centrum nad Cieśniną Davisa, wyciągniętym od Ziemi Baffina wzdłuż wschodniego wybrzeża. W okresie zimowym wystąpienie tego typu (wzorca) cyrkulacji powoduje „wtargnięcia” bardzo wychłodzonego powietrza nad obszary środkowej Kanady i USA. W okresie zimowym typ ten dominuje w miesięcznym polu ciśnienia. Główny szlak splotu powietrza z północy na południe biegnie łukiem od Archipelagu Kanadyjskiego przez obszar Zatoki Hudsona i zachodnią część Labradoru ku Wielkim Jeziorom. Ciepłe powietrze płynie wzdłuż wybrzeża pacyficznego i zachodnich stoków Gór Skalistych ku wybrzeżom Alaski,

2. układ wysokiego ciśnienia rozciągający się wielkim łukiem od Alaski przez Góry Skaliste, rejon jezior Manitoba i Winnipeg, rejon Wielkich Jezior do wschodniego wybrzeża i obszar niskiego ciśnienia z centrum nad północną Grenlandią i północną częścią Zatoki Baffina. Ten układ przez Slonosky i Grahama (2005) traktowany jest jako „strefowy”, jednak powyżej 60°N główny szlak spływu powietrza prowadzi z nad Morza Beauforta i zachodniej części Archipelagu Kanadyjskiego w kierunku Zatoki Hudsona, a następnie już jako strefowy, nad północną i środkową część Labradoru, skąd dalej nad Morze Labrador i południową Grenlandię,
3. układ wysokiego ciśnienia lokujący się nad Pacyfikiem i zachodnią częścią Gór Skalistych stowarzyszony z rozległym układem niskiego ciśnienia obejmującym rejon od Ziemi Baffina przez Zatokę Hudsona po Wielkie Jeziora i dalej w kierunku Nowej Szkocji. Centrum tego układu niskiego ciśnienia lokuje się w centralnej części Półwyspu Labrador. Ten układ stwarza pole ciśnienia wymuszające masywny spływ powietrza z północy na południe, od NE Alaski i Archipelagu Kanadyjskiego w kierunku środkowych stanów USA – i słabszy strumień – od rejonu Ziemi Baffina, przez Zatokę Hudsona ku rejonowi ujścia rzeki Św. Wawrzyńca. Od SW i W Alaski, nad którą napływa powietrze morskie z nad Pacyfiku i Morza Beringa, wzdłuż zachodniego wybrzeża i nad zachodnimi częściami Gór Skalistych kształtuje się strumień powietrza płynący na południe.

Te trzy typy (wzorce) objaśniają łącznie około 65% zmienności pola ciśnienia nad Kanadą w latach 1948-1998, z czego typ 1 objaśnia 28,4, typ 2 –19,4 a typ 3 – 17,6% wariancji pola ciśnienia w tym okresie.

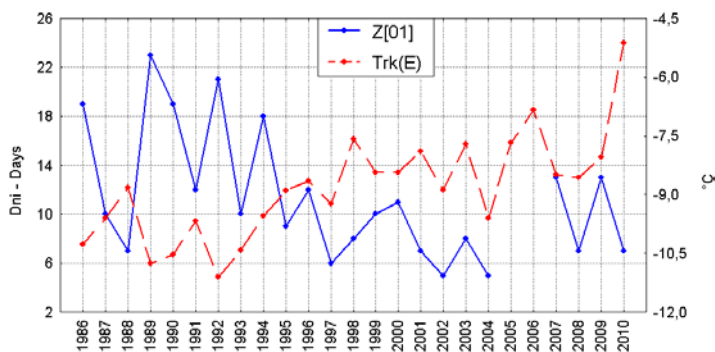
Autorzy nie dokonują tu prób powiązania typologii Slonosky i Grahama (2005) z typologią cyrkulacji środkowotroposferycznej Wangengejma-Girsa, brak do tego danych. Trzeba jednak zwrócić uwagę, że według klasyfikacji typów cyrkulacji Slonosky i Grahama (2005), poza Alaską, nad pozostałą częścią Ameryki Północnej (do 60°N) w każdym z tych wzorców występuje silny strumień powietrza z północy, w żadnym nie występuje, poza strefą zachodniego wybrzeża, strumień dający adwekcję z południa.

Przeprowadzona analiza wykazuje, że tam, gdzie zachodzą nad obszarami północnej części Ameryki Północnej istotne statystycznie zmiany rocznej temperatury powietrza, wykazują one istotne statystycznie związki ze zmianą frekwencji makrotypów cyrkulacji środkowotroposferycznej według klasyfikacji Wangengejma-Girsa dla pacyficzno-północnoamerykańskiego sektora cyrkulacyjnego. Ocieplenie, które w latach 1986-2010 wystąpiło nad wschodnią częścią rozpatrywanego obszaru, a którego rozmiar można oszacować z wielkości trendu temperatury rocznej na około 3,2 deg (prawdziwe w granicach 2,6-3,8 deg) jest związane ze zmianą frekwencji makrotypu Z w styczniu oraz frekwencji makrotypu M1 w lipcu i wrześniu. Zmiany frekwencji tych makrotypów w rozpatrywanym okresie objaśniają 69% obserwowanej wariancji rocznej temperatury powietrza (patrz formuła [2]).

Upraszczając sprawę można stwierdzić, że odsetek wariancji wprowadzony do zmienności temperatury powietrza przez inne, niż cyrkulacja czynniki, czyli nieobjaśniony przez zależność [2], pozostaje stosunkowo niewielki bo ~31%. Mało miejsca zatem pozostaje na działanie innych czynników niż cyrkulacja atmosferyczna w kreowaniu ocieplenia na tym obszarze. Oczywiście, ciepło przynieszone wraz z napływającym nad ten obszar powietrzem musi się „skądś” wziąć. W tym konkretnym przypadku, ocieplenia nad północną częścią Ameryki Północnej, nie napływ ciepła okazuje się istotny, ale ograniczenie „napływu chłodu”, skutkujące wzrostem temperatury powietrza.

Najważniejszą rolę w kształtowaniu obserwowanych zmian temperatury na całym badanym obszarze odgrywa zmienność frekwencji makrotypu Z. Ten makrotyp jest jedynym, w którego frek-

wencji rocznej zaznacza się statystycznie istotny, choć niezbyt duży ( $\sim -1,6$  dnia-rok $^{-1}$ ) trend (tab. 4). Podobnie, statystycznie istotny ujemny trend tego makrotypu zaznacza się w styczniu i listopadzie, jego wartość to  $\sim -0,35$  dnia w roku. Nad wschodnią częścią omawianego obszaru wystąpieniu makrotypu Z w styczniu towarzyszą adwekcje powietrza z północy, z centralnych partii Arktyki. Świadczą o tym, między innymi, istotne skorelowanie frekwencji tego makrotypu ze wzmożeniem północnych przepływów międzystrefowych (Styszyńska i Marsz 2012) w okresie zimy (12-02) w strefie długości 95-125°W (sektor hudsonski) i nieistotne, ale podwyższone współczynniki korelacji ze wskaźnikiem przepływu międzystrefowego w sektorach sąsiednich (NWT i baffino-grenlandzkim). Z ujemnego trendu makrotypu Z w styczniu można zgrubnie oszacować, że w badanym 25-leciu frekwencja tego makrotypu zmniejszyła się o około 8,4 dnia, co powinno stanowić przyczynę wzrostu rocznej temperatury powietrza nad zachodnią częścią obszaru o około 0,5-0,8 deg i około 1,0-1,5 deg nad częścią wschodnią. Choć nie należy przywiązywać nadmiernej wagi do tak szacowanych wartości, warto jednak zwrócić uwagę na to, że już sam występujący trend makrotypu Z w styczniu jest zgodny z trendem zmian temperatury zachodzącej nad tym obszarem oraz wyczerpuje w całości obserwowany wzrost temperatury nad częścią zachodnią i objaśnia od 1/3 do 1/2 wzrostu temperatury obszarowej nad częścią wschodnią.

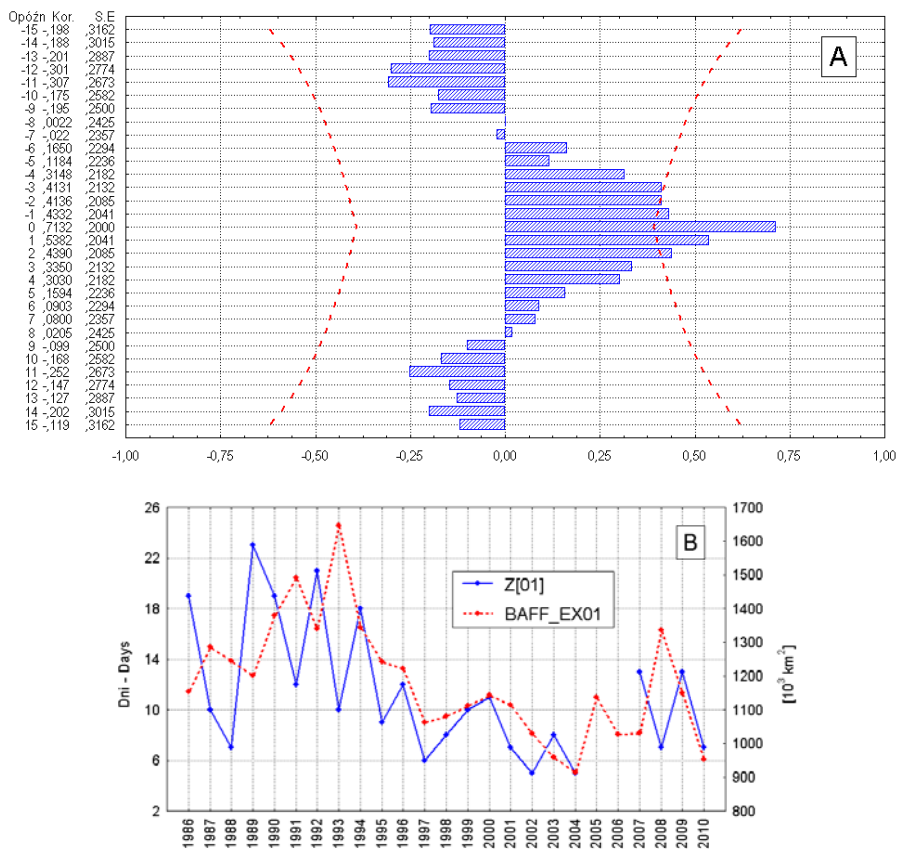


Ryc. 10. Zmiany frekwencji makrotypu Z w styczniu (Z[01]; dni) i rocznej temperatury powietrza (Trk(E); °C) nad obszarami północnej części Ameryki Północnej, położonymi na wschód od 100-105°W

Fig. 10. Changes in the frequency of macro-type Z in January (Z[01]; days) and the annual air temperature (Trk(E); °C) over the northern areas of North America, East of 100-105°W.

Spadek frekwencji makrotypu Z w styczniu nie był liniowy. W latach 1994-1996 nastąpiło załamanie frekwencji makrotypu Z, z przeciętnej frekwencji  $\sim 15,4$  dnia w latach 1986-1994 frekwencja makrotypu Z spadła do przeciętnej wartości 8,6 dnia w styczniach lat 1995-2010. Spadek frekwencji tego makrotypu w styczniu znajduje odbicie w przebiegu podobnie gwałtownej zmiany średniej obszarowej temperatury rocznej nad wschodnią częścią rozpatrywanego obszaru (ryc. 10). Stowarzyszony z tym spadkiem frekwencji makrotypu Z w styczniu był wzrost rocznej temperatury obszarowej z  $-10,1^{\circ}\text{C}$  w latach 1986-1994 do  $-8,1^{\circ}\text{C}$  w latach 1995-2010. Spadek frekwencji makrotypu Z tym samym czasie został zrekompensowany przez wzrost frekwencji makrotypu M2 (patrz tab. 3). Ze wzrostem frekwencji makrotypu M2 w styczniu na całym badanym obszarze, ze stacjami sektora alaskańskiego włącznie, związany jest wzrost rocznej temperatury powietrza  $+0,07(\pm 0,03)^{\circ}\text{C}\cdot\text{rok}^{-1}$  na obszarze części zachodniej i  $+0,11(\pm 0,05)^{\circ}\text{C}\cdot\text{rok}^{-1}$  na obszarze części wschodniej).

Co stanowiło przyczynę tej dość istotnej zmiany charakteru cyrkulacji środkowotroposferycznej jest obecnie sprawą otwartą. Overland i Wang (2010) dopatrują się przyczyn ostatnich zmian cyrkulacji atmosferycznej w Arktyce w uruchamianiu dodatkowych strumieni ciepła do atmosfery z rosnącą powierzchnią mórz wolnych od pokrywy lodów morskich. Szczególnie silny wpływ, zdaniem tych badaczy ma opóźnienie się formowania lodów jesienią, czyli w warunkach, kiedy strumienie ciepła z oceanu do atmosfery mogą być szczególnie duże. Prowadzi to do szybkiego wzrostu grubości warstwy 1000-500 hPa (Overland i Wang 2010), a tym samym i wysokości geopotencjału 500 hPa nad i w pobliżu źródeł ciepła. W rezultacie tego rodzaju przekształcenia pola temperatury w dolnej (1000-500 hPa) troposferze nie zapisują się bezpośrednio w dolnym polu ciśnienia, ale wywierają wpływ na rozkład (położenie) górnych klinów i zatok, które następnie sterują cyrkulacją dolną.



Ryc. 11. A – rozkład korelacji wzajemnych między powierzchnią zlodzoną na Zatoce Baffina w grudniu (zmienna poprzedzająca) a frekwencją makrotypu Z w styczniu (zmienna opóźniona). Oznaczone granice istotności statystycznej korelacji (wartość współczynnika korelacji < 2 SE). B – zmiany frekwencji makrotypu Z w styczniu i powierzchni zlodzonej (extent) w styczniu (lata 1986-2010)

Fig. 11. A – course of correlations between the ice extent in the Gulf of Baffin in December (variable preceding) and the frequency of macro-type Z in January (variable delayed). Marked boundaries of the statistical significance of the correlation (correlation coefficient < 2 SE). B – changes in the frequency of macro-type Z in January and ice extent in January (years 1986-2010).

Na lądowych obrzeżach północnej części Ameryki Północnej jedynym akwenem, na którym może dojść do silnego opóźnienia formowania się lodów i utrzymywaniu się większych powierzchni „czystej” wody jesienią, a zwłaszcza z początkiem zimy, jest akwen Zatoki (Morza) Baffina<sup>10</sup>. Między powierzchnią zlodzoną na tym akwenu w listopadzie, grudniu, styczniu i lutym występują silne autokorelacje. Wystąpienie mniejszej powierzchni lodów w listopadzie czy grudniu informuje z niemal 100% pewnością o tym, że i w styczniu powierzchnia zlodzenia będzie tam mniejsza. Między powierzchnią zlodzoną na Zatoce Baffina w grudniu, a frekwencją makrotypu Z w styczniu następnego roku zachodzi bardzo silna korelacja dodatnia (patrz ryc. 11A). Zmniejszona w styczniu powierzchnia zlodzona na Zatoce Baffina, pozwalająca na wystąpienie w tym miesiącu silnych strumieni ciepła z powierzchni morza do atmosfery, może być pośrednią przyczyną formowania się w tym rejonie sięgającego głęboko na północ górnego klina. Taki, częściej odtwarzający się w styczniu, układ zaburza przepływy strefowe w środkowej troposferze i wymusza przepływy południkowe w tym rejonie. O wiarygodności takiej hipotezy świadczy istotne skorelowanie styczniowej powierzchni zlodzonej na Zatoce/Morzu Baffina bezpośrednio z frekwencją makrotypu Z w tym miesiącu. Nie można zatem wykluczyć, że gwałtowne zmniejszenie się pokrywy lodów morskich w Arktyce Amerykańskiej, zwłaszcza na Morzu Baffina, mogło stanowić przyczynę równie silnego, obserwowanego w latach 1995-1996, spadku frekwencji makrotypu Z w styczniu, a w konsekwencji wzrostu temperatury rocznej na wschodniej, przylegającej do Zatoki Baffina, części rozpatrywanego obszaru (sektory hudsonski, baffino-grenlandzki i wschodnia część sektora NWT).

#### Literatura:

- Alekseev G.V., Ivanov N.E., Pnyushkov A.V., Balakin A.A., 2010. Izmeneniya klimata v morskoi Arktike v nachale XXI veka. AANII, Problemy Arktiki i Antarktyki, 3 (86): 22-34.
- Arctic Climate Issues, 2011. Changes of Arctic snow, water, ice and permafrost. Arctic Monitoring and Assessment Programme, 2012: 98 s.
- Atlas Arktiki, 1985. Głównie Uprawnienie Geodezji i Kartografii pri Sowietie Ministrow, Moskwa: 204 s.
- Chen T., Yoon J., 2002. Interdecadal variation of the North Pacific wintertime blocking. *Monthly Weather Review*, 130: 3136-3143.
- Drinkwater K.F., 2004. Atmospheric and Sea-Ice Conditions in the Northwest Atlantic During the Decade, 1991-2000. *Journal of Northwest Atlantic Fishery Sciences*, 34: 1-11.
- Fortak H., 1971. *Meteorologie*. Carl haberl, Verlag: 287 s.
- Girs A.A., 1964. O sozdanii iedinoi klassifikacii makrosinopticheskikh orecossov severnogo polushariya. *Meteorologia i Hidrologiya*, 4: 43-47.
- Girs A.A., 1981. K voprosu o formakh atmosfernoj cirkulacii i ikh prognostičeskom ispolzovanii. *Trudy AANII*, 373: 4-13.
- Grumet N.S., Wake C.P., Mayewski P.A., Zielinski G.A., Whitlow S.L., Koerner R.M., Fisher D.A., Woollett J.M., 2001. Variability of sea-ice extent in Baffin Bay over the last millennium. *Climatic Change*, 49: 129-145.
- Hansen J., Ruedy R., Sato M., Lo K., 2010. Global surface temperature change. *Reviews of Geophysics*, 48, RG4004, doi:10.1029/2010RG000345.

---

<sup>10</sup> Powierzchnia Zatoki i Cieśniny Hudsona oraz cieśnin Archipelagu Kanadyjskiego jest przeciętnie zamrznięta już w listopadzie, akweny mórz Beauforta i Czukockiego również pokrywają się w tym czasie zwarłą pokrywą lodową. Nie mogą one zatem stanowić w styczniu źródła ciepła dla procesów atmosferycznych. Powierzchnia zlodzona – pokryta lodem o koncentracji 15-100%.



- Hartmann D.L., 1994. *Global Physical Climatology*. Academic Press, San Diego, New York, Boston, ..., Toronto: 408 s.
- Hartmann B., Wendler G., 2005. The Significance of the 1976 Pacific Climate Shift in the Climatology of Alaska. *Journal of Climate*, 18: 4824-4839.
- Hinkel K.M., Nelson F.E., Klene A.E., Bell J.H., 2003. The urban heat island in winter at Barrow, Alaska. *International Journal of Climatology*, 23: 1889-1905; DOI: 10.1002/joc.971.
- Hinkel K.M., Nelson F.E., 2007. Anthropogenic heat island at Barrow, Alaska, during winter: 2001-2005. *Journal of Geophysical Research (Atmosphere)*, 112 (D6); DOI: 10.1029/2006JD007837.
- Hurrell J.W., 1995. Decadal trends in the North Atlantic Oscillation: Regional temperatures and precipitation. *Science*, 269: 676-679:
- Johannessen O.M., Bengtsson L., Miles M.W., Kuzmina S.I., Semenov V.A., Alekseev G.V., Nagurnyi A.P., Zakharov V.F., Bobylev L.P., Pettersson L.H., Hasselmann K., Cattle H.P., 2004. Arctic climate change: observed and modelled temperature and sea-ice. variability. *Tellus A*, 56: 328-341.
- King J.R., Ivanov V.V., Kurashov V., Beamish R.J., McFarlane G.A., 1998. General circulation of the atmosphere over the North Pacific and its relationship to the Aleutian Low. NPAFC (North Pacific Anadromous Fish Commission) Document No. 318, Nanaimo, BC, Canada: 18 s.
- Kożuchowski K., 1989. Makrotypy ogólnej cyrkulacji atmosfery a temperatura powietrza w Polsce. *Przegląd Geofizyczny*, 34 (4): 427-435.
- Kożuchowski K., Marciniak K., 1998. Variability of mean monthly temperatures and semiannual precipitation totals in Europe in relation to hemispheric circulations patterns *Journal of Climatology*, 8: 191-199.
- Lamb H.H., 1964. Climatic changes and variations in the atmospheric and ocean circulations. *International Journal of Earth Sciences*, 54 (1): 486-504.
- Marsz A.A., 2004. Makrotypy cyrkulacji atmosferycznej a temperatura powietrza na Sztetlandach Południowych i zachodnim wybrzeżu Półwyspu Antarktycznego. *Polish Polar Studies, XXX Międzynarodowe Sympozjum Polarne*, Gdynia: 225-236
- Marsz A.A., 2005. O oceanicznych uwarunkowaniach cyrkulacyjnego i termicznego charakteru zimy w Polsce i środkowej Europie. *Wyd Uczenie AM*, Gdynia: 63 s.
- Marsz A.A., 2012. Cyrkulacja atmosferyczna w atlantycko-eurazjatyckim sektorze cyrkulacyjnym – schemat uwarunkowań i mechanizmów działania. [w:] Bielec-Bąkowska Z., Łupikasa E., Widawski A. (red.), *Rola cyrkulacji atmosfery w kształtowaniu klimatu*. Uniwersytet Śląski, Sosnowiec: 101-118.
- Maszewski R., 2011. Współczynniki korelacji między wybranymi wskaźnikami cyrkulacji atmosferycznej a temperaturą powietrza w Arktyce Kanadyjskiej w latach 1951-2010. *Problemy Klimatologii Polarnej*, 21: 77-90.
- Przybylak R., 2000. Temporal and spatial variation of surface air temperature over period of instrumental observations in the Arctic. *International Journal of Climatology*, 20: 587-614.
- Przybylak R., 2007. Recent air-temperature changes in the Arctic, *Annals of Glaciology*, 46: 316-324.
- Overland J.E., Wang M., 2010. Large-scale atmospheric circulation changes are associated with the recent loss of Arctic sea ice. *Tellus 69A*: 1-9; DOI: 10.1111/j.1600-0870.2009.00421.x.
- Slonosky V.C., Graham E., 2005. Canadian pressure observations and circulation variability: links to air temperature. *International Journal of Climatology* 25(11): 1473-1492.
- Stanisz A., 2007. *Przystępny kurs statystyki z zastosowaniem STATISTICA PL na przykładach z medycyny, t.2. Modele liniowe i nieliniowe*, wyd. StatSoft, Kraków: 866 s.
- Strong C., Magnusdottir G., 2008. How Rossby wave breaking over the Pacific forces the North Atlantic Oscillation. *Geophysical Research Letters*, 35; L10706; doi:10.1029/2008GL033578.

- Strong C. i Magnúsdóttir G., 2009. The Role of Tropospheric Rossby Wave Breaking in the Pacific Decadal Oscillation. *Journal of Climate*, 22 (7): 1819-1833.
- Styszyńska A., Marsz A.A., 2012. Międzystrefowe przepływy powietrza między Arktyką a strefą umiarkowaną (1951-2010). [w:] Bielec-Bąkowska Z., Łupikasza E., Widawski A. (red.), *Rola cyrkulacji atmosfery w kształtowaniu klimatu*. Uniwersytet Śląski, Sosnowiec: 345-360.
- Trenberth K.E., Hurrell J.W., 1994. Decadal atmosphere-ocean variations in the Pacific. *Climate Dynamics*, 9: 303-319.
- Vincent L.A., Gullett D.W., 1999. Canadian historical and homogeneous temperature datasets for climate change analyses. *International Journal of Climatology*, 19: 1375-1388.
- Vangengejm G.Ya., 1952. Osnovy makrociklucionnogo metoda dolgosochnykh meteorologičeskikh prognozov dlya Arktiki. *Trudy AANII*, 34: 314 s.
- Wallace J.M., Gutzler D.S., 1981. Teleconnections in the geopotential height field during the Northern Hemisphere Winter. *Monthly Weather Review*, 109: 784-812.
- Zblewski S., Marsz A.A., 2010. Zmiany klimatyczne w Arktyce Kanadyjskiej w ostatnim ćwierćwieczu XX i na początku XXI wieku. *Problemy Klimatologii Polarej*, 20: 45-62.

Wpłynęło: 19 sierpnia 2012 r., poprawiono: 4 grudnia 2012 r.

### Summary

The paper discusses the influence of the frequency of "Pacific-American" Wangengejma-Girs macro-types of mid-tropospheric circulation on the air temperature in the area of northern Canada and Alaska (> 60°N). These correlations were analyzed monthly and annually, the period of analysis covered the years of 1986-2010. Generally weak correlations were found which also showed clear seasonal and regional variations. Generally weak links between the monthly frequency of macro-types and the air temperature result from a slight variation in directions of advection above the described area associated with the occurrence of the particular macro-types. In the area located to the E of 125°W the dominance of the inflows from the north is characteristic for each of the observed macro-types.

Relationships of annual temperature with the mid-tropospheric circulation vary depending on the temperature changes in the analyzed area. In the area located W of 125° annual temperature during the examined period does not show a statistically significant trend ( $0.022 (\pm 0.020)^\circ\text{C} \cdot \text{year}^{-1}$ ), E of this longitude there is a strong and significant trend ( $0.135 (\pm 0.025)^\circ\text{C} \cdot \text{year}^{-1}$ ). Changeability in the frequency of the macro-type Z in January explains the changes in the annual temperature in the entire area but in the area W of 125°W the explanation is small (~31% of the variation), in the area E of 125°W the changeability in the frequency of that macro-type explains ~49% of the annual variation of annual temperature. In the multiple regression equation where the frequencies of the macro-type Z in January and the macro-type M1 in July and September are the independent variables, the variability of frequency of the said macro-types explains 69% of the annual temperature variation which is observed east of 125°W. The analysis shows that the temperature rise in the whole area is associated with a negative trend in the frequency of the macro-type Z in January and its replacement by the macro-type M2, and in the central and eastern part of the area it is also associated with the positive trend in the frequency of the macro-type M1 in July and September.

The decrease in the frequency of the macro-type Z in January is not monotonic, the sudden drop in the frequency of this macro-type was observed in 1995-1996. The decrease in the frequency of this macro-type is accompanied by the visible increase in the air temperature by 2 degrees E of 125° at the same time. The most likely cause of this change in the mid-tropospheric circulation is, the observed at the same time, decrease in sea ice in the Baffin Bay. Generally, the changes in the annual temperature in the region of Alaska and Northern Canada in the years 1986-2010 are almost entirely explained by the changes in the mid-tropospheric circulation observed at the same time.