

## ZMIANY NIEKTÓRYCH CECH KLIMATU W ARKTYCE KANADYJSKIEJ W OSTATNIM ĆWIERĆWIECZU XX I NA POCZĄTKU XXI WIEKU

CHANGES IN SOME FEATURES OF THE CLIMATE IN THE CANADIAN ARCTIC IN THE LAST  
25-YEAR PERIOD OF 20TH CENTURY AND IN THE FIRST YEARS OF 21ST CENTURY

Sławomir Zblewski, Andrzej A. Marsz

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

**Zarys treści.** Praca omawia zmiany temperatury powietrza na obszarze Subarktyki i Arktyki Kanadyjskiej oraz otaczających je akwenów oraz podejmuje próbę ustalenia roli cyrkulacji atmosferycznej w kształtowaniu tych zmian. Analizie poddano temperaturę powietrza, temperaturę powierzchni morza oraz koncentrację lodów morskich w latach 1982-2009. Stwierdzono występowanie dodatnich trendów temperatury rocznej powietrza na całym obszarze. Wyniki badań wskazują, że zmianami temperatury powietrza, temperatury powierzchni morza i koncentracji lodów morskich w rejonie wschodniej części Arktyki Kanadyjskiej (Zatoka Baffina, Ziemia Baffina, Wyspa Devon, Półwysep Bothia i Basen Foxe'a) steruje NAO. Kierunki zmian wymienionych elementów są odwrotne do fazy NAO (ujemna faza NAO – wzrost temperatury powietrza i morza, spadek koncentracji lodów, dodatnia faza NAO – odwrotnie). Oddziaływanie NAO na temperaturę powietrza jest najsilniejsze w okresie zimowym, oddziaływanie zimowego NAO na temperaturę powierzchni morza i koncentrację lodów jest asynchroniczne (najsilniejsze latem) i realizuje się poprzez działanie ogniwa pośredniego, jakim jest grubość lodów morskich. Na zachód od linii Cambridge Bay – Baker Lake głównym czynnikiem sterującym zmianami temperatury powietrza jest układ telekonekcyjny PNA. Jego działanie jest najsilniejsze w końcu jesieni i początku zimy, najwyraźniej działanie PNA zaznacza się na obszarze Kanadyjskiej Subarktyki i słabnie w kierunku N i NE. Zmienność PNA wywiera niewielki wpływ (tylko w sierpniu) na koncentrację lodów i temperaturę wody Morza Beauforta. Dodatnim fazom PNA odpowiada wzrost temperatury powietrza. Wystąpienie wzrostu rocznej temperatury powietrza na całym obszarze Arktyki i Subarktyki Kanadyjskiej wymaga wystąpienia w tym samym roku ujemnej fazy NAO i dodatniej fazy PNA. Jeśli w danym roku wystąpią jednoimienne fazy obu oscylacji, stosownie do znaków obu oscylacji na części badanego obszaru zaznaczy się występowanie dodatnich, a na części – ujemnych anomalii temperatury powietrza. Ponieważ w badanym okresie w zmienności NAO zaznacza się trend ujemny, w przebiegu PNA słaby trend dodatni, można uważać, że obserwowany wzrost temperatury powietrza nad obszarem Arktyki i Subarktyki Kanadyjskiej w dużej części jest rezultatem długookresowych zmian warunków cyrkulacyjnych.

**Słowa kluczowe:** Morze Beauforta, Zatoka Hudsona, Morze Baffina, Arktyka Kanadyjska, zmiany klimatu, cyrkulacja atmosferyczna, NAO, PNA.

### 1. Wprowadzenie

W dobie wyraźnego ocieplenia klimatu na półkuli północnej duże znaczenie ma poznanie procesów doprowadzających do zmian klimatu Arktyki. Ocieplenie klimatu Arktyki przejawia się między

innymi wzrostem temperatury powietrza i temperatury powierzchni morza oraz degradacją pokrywy lodów morskich, zmianą długości zalegania pokrywy śnieżnej, zmianami miąższości warstwy czynnej zmarzliny, zmianą reżimu wiatru (Hinzman i in. 2005), które pociągają za sobą liczne zmiany środowiskowe. W kształtowaniu ocieplenia Arktyki, mimo różnic w poglądach na zasadniczy mechanizm (Overpeck i in. 1997, Overland i in. 2008, Marsz i Styszyńska 2009), istotną rolę odgrywa cyrkulacja atmosferyczna. Celem tej pracy jest określenie, jak kształtują się w ostatnich latach zmiany wybranych elementów klimatu atmosfery i oceanu w Arktyce Kanadyjskiej i obszarach przyległych oraz w jakim stopniu są one powiązane ze zmianami cyrkulacji atmosferycznej.

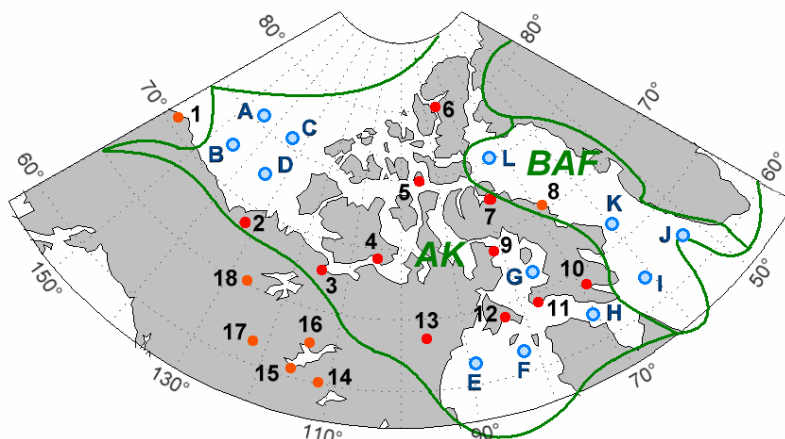
## 2. Obszar badań, źródła danych i metody badawcze

W pracy przeanalizowano wybrane elementy charakteryzujące zmiany klimatu w Arktyce Kanadyjskiej i jej otoczeniu. Zmiany klimatu na obszarach lądowych charakteryzują zmiany temperatury powietrza (TP), na obszarach morskich – zmiany temperatury powierzchni morza (SST) i koncentracji lodów morskich (LM). Granice Arktyki przyjęto według rosyjskiego Atlasu Arktyki (Atlas Arktiki 1985). Analizom poddano zmiany temperatury powietrza na wybranych stacjach meteorologicznych, zaś zmiany SST i LM na wodach otaczających lądowe obszary Arktyki Kanadyjskiej – na Morzu Beauforta, Zatoce i Cieśninie Hudsona, w Basenie Foxa oraz na Zatoce (Morzu) Baffina. Oprócz samej charakterystyki zmian w czasie wymienionych elementów, istotną kwestią jest działanie czynnika sprawczego, czyli wyjaśnienie pod wpływem działania jakich czynników zachodzą zmiany tych elementów. W tej pracy ograniczono się do analizy wpływu cyrkulacji atmosferycznej, która, poprzez kierowanie ruchem mas powietrza może być traktowana jako czynnik wymuszający zmiany TP i SST oraz zasięgu i koncentracji lodów morskich na omawianym obszarze.

Ciągi średnich miesięcznych wartości temperatury powietrza z okresu 1982-2009 dla wybranych stacji pochodzą ze zbioru HCCD – Historical Adjusted Climate Database for Kanada (Vincent i Gullett 1999). Do analizy wybrano 18 stacji (z tego kilka położonych poza granicami Arktyki) posiadających komplet danych. Na ryc. 1 położenie stacji oznaczono liczbami: 1 – Barrow (71,3°N, 156,8°W), 2 – Inuvik (68,3°N, 133,5°W), 3 – Kugluktuk (67,8°N, 115,1°W), 4 – Cambridge Bay (69,1°N, 105,1°W), 5 – Resolute (74,7°N, 095,0°W), 6 – Eureka (80,0°N, 085,9°W), 7 – Pond Inlet (72,7°N, 078,0°W), 8 – Clyde (70,5°N, 068,5°W), 9 – Hall Beach (68,8°N, 081,2°W), 10 – Iqaluit (63,8°N, 068,6°W), 11 – Cape Dorset (64,2°N, 076,5°W), 12 – Coral Harbour (64,2°N, 083,4°W), 13 – Baker Lake (64,3°N, 096,1°W), 14 – Fort Smith (60,0°N, 112,0°W), 15 – Hay River (60,8°N, 115,8°W), 16 – Yellowknife (62,5°N, 114,5°W), 17 – Fort Simpson (61,8°N, 121,2°W) i 18 – Norman Wells (65,3°N, 126,8°W).

Temperatura powierzchni morza, jako istotna z klimatycznego punktu widzenia cecha powierzchni podścielającej, wywiera wpływ na kształtowanie zmian temperatury powietrza oraz określa moment rozpoczęcia procesów zamarzania. Ciągi miesięcznych wartości SST w gridach o rozdzielczości  $1^\circ\varphi \times 1^\circ\lambda$  z okresu 1982-2009 pochodzą ze zbioru NOAA NCEP EMC CMB GLOBAL Reyn\_Smith O1 v2 monthly sea surface temperature (Reynolds i in. 2002; zbiór źródłowy: [http://iridl.ldeo.columbia.edu/SOURCES/.NOAA/.NCEP/.EMC/.CMB/.GLOBAL/.Reyn\\_SmithO1v2/.monthly/](http://iridl.ldeo.columbia.edu/SOURCES/.NOAA/.NCEP/.EMC/.CMB/.GLOBAL/.Reyn_SmithO1v2/.monthly/)). Ze względu na zmniejszanie się długości łuku równoleżnika w funkcji szerokości geograficznej wartości SST uśredniono z 3 sąsiadujących równoleżnikowo gridów (siatka  $1^\circ\varphi \times 3^\circ\lambda$ ). Dla wybranych gridów roczne wartości SST obliczono jako zwykle średnie arytmetyczne. Na ryc. 1 położenie gridów na obszarze Morza Beauforta oznaczono literami A-D. Współrzędne środka tych gridów są następujące: A – [75,5°N,

144,5°W], B – [72,5°N, 144,5°W], C – [75,5°N, 134,5°W], D – [72,5°N, 134,5°W]. Współrzędne środka gridów leżących w obszarze Zatoki i Cieśniny Hudsona oraz Basenu Foxe'a to: E – [61,5°N, 089,5°W], F – [61,5°N, 081,5°W], G – [66,5°N, 075,5°W], H – [61,5°N, 070,5°W]. Współrzędne środka gridów leżących na Morzu Baffina to: I – [62,5°N, 061,5°W], J – [62,5°N, 052,5°W], K – [66,5°N, 059,5°W], L – [75,5°N, 074,5°W].



Ryc. 1. Obszar badań, stacje (1-18) i punkty gridowe na powierzchni morza (A-L) wybrane do analizy. Objasnienia w tekście. Linie ciągłe – granice klimatycznych regionów Arktyki za "Atlasem Arktyki" (1985). AK – region klimatyczny "Arktyka Kanadyjska", BAF – region klimatyczny Zatoki Baffina. Obszar, na którym znajdują się stacje 14-18 określono w tekście mianem "Subarktyki Kanadyjskiej"

Fig. 1. The research area, stations (1-18) and grid points at the sea surface (A-L) chosen for the analysis. Explanation in the article. Continuous line – borders of climatic regions in the Arctic following 'The Arctic Atlas' (1985). AK – climatic region of 'The Canadian Arctic', BAF – climatic region of Baffin Bay. The region where 14-18 stations are located, is named 'The Canadian Subarctic' in the text

Ciągi danych zawartość lodu morskiego (dalej ZLM) w gridach o rozdzielczości  $1^\circ\varphi \times 1^\circ\lambda$  z okresu 1982-2009 pochodzą ze zbioru NOAA NCEP EMC CMB GLOBAL Reyn\_Smith OI v2 monthly sea ice (Reynolds i in. 2002; zbiór źródłowy: [http://iridl.ldeo.columbia.edu/SOURCES/.NOAA/.NCEP/.EMC/.CMB/.GLOBAL/.Reyn\\_SmithOIv2/.monthly/](http://iridl.ldeo.columbia.edu/SOURCES/.NOAA/.NCEP/.EMC/.CMB/.GLOBAL/.Reyn_SmithOIv2/.monthly/)). Wartości ZLM, podobnie jak SST uśredniono z 3 sąsiadujących gridów (siatka  $1^\circ\varphi \times 3^\circ\lambda$ ). Dla poszczególnych gridów obliczono zawartości roczne. Wybrane do oceny zmian ZLM gridy są tymi samymi, dla których zestawiano wartości SST.

W badaniach, jako wskaźniki charakteryzujące cyrkulację atmosferyczną wykorzystano: NAO CRU (North Atlantic Oscillation; Jones i in. 1997) i PNA (Pacific-North American; Wallace i Gutzler 1981). Wskaźnik NAO CRU stanowi standaryzowaną różnicę ciśnienia atmosferycznego między Gibraltarem, znajdującym się w strefie oddziaływania Wyżu Azorskiego a SW Islandią (Stykkisholmur/Reykjavik). W przypadku, gdy ciśnienie atmosferyczne w Niżu Islandzkim jest niższe od średniego, a w Wyżu Azorskim wyższe od średniego, faza NAO jest dodatnia (pozytywna). Jeśli ciśnienie w rejonie Islandii jest wyższe od średniego, a w rejonie Azorów niższe od średniego faza NAO jest ujemna (negatywna). Oscylacja Północnego Atlantyku funkcjonuje przez cały rok, jednak szczególnie duża amplituda zmienności jej przebiegów zaznacza się zimą.

Wskaźnik PNA (Pacific-North American; pacyficzno-północnoamerykański) jest jednym z układów telekonekcyjnych na półkuli północnej, ważnym dla półkuli zachodniej. Opisuje symetryczne wahania ciśnienia na wysokości 500 hPa między subpolarnymi, umiarkowanymi i subtropikalnymi szerokościami geograficznymi. Wahania między północnym a południowym rejonem centralnego Pacyfiku Północnego przypominają Oscylację Północnego Pacyfiku. PNA określają znormalizowane wartości anomalii z 4 centrów działania atmosfery: okolic Hawajów [20°N, 160°W] i rejonu Niżu Aleuckiego [45°N, 165°W], oraz rejonu zachodniej Kanady [55°N, 115°W] i południowo-wschodnich Stanów Zjednoczonych [30°N, 85°W]. Wskaźnik nie działa z jednakową intensywnością w ciągu roku – istotny jego wpływ zaznacza się od sierpnia do maja. Pozytywną fazę PNA cechują wyższe od średniej wartości geopotencjału w pobliżu Hawajów i nad środkową Kanadą oraz niższe od przeciętnych – w rejonie na południe od Aleutów i obszarami SW części Stanów Zjednoczonych (anomalie przeciwnego znaku). W negatywnej fazie PNA rozkład anomalii jest odwrotny. Bardziej szczegółowe informacje na temat PNA można znaleźć na stronie NWS CPC (<http://www.cpc.noaa.gov/data/teledoc/pna.shtml>).

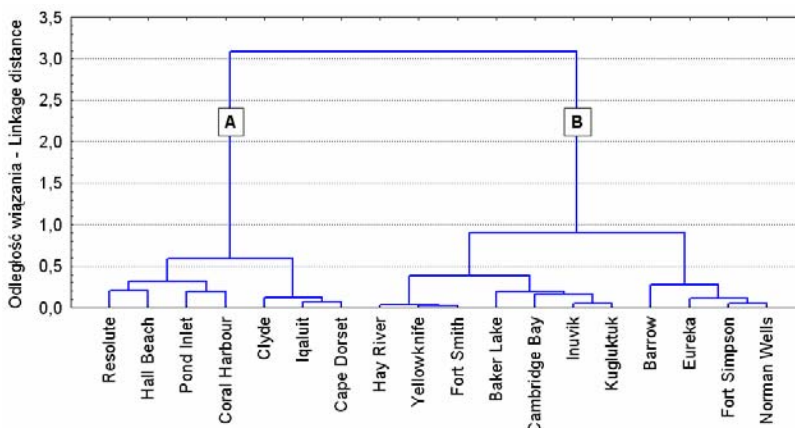
Miesięczne i roczne wartości trendów TP, SST i ZLM wyznaczono za pomocą analizy regresji, a ich istotność statystyczną sprawdzono testem t-Studenta i testem F Fishera-Snedecora. W celu poznania regionalnych różnic zmian trendów tych elementów zastosowano grupowanie metodą Warda. Ponieważ w regionalizacji rozkładu trendów istotne były podobieństwa i różnice w ich rozkładzie przestrzennym, jako miarę odległości w grupowaniu przyjęto odległości wiązań opisane przez 1-r Pearsona. Do ustalenia związków zmienności badanych elementów z cyrkulacją atmosferyczną wykorzystano również analizę korelacyjną. W pracy przedstawiono jedynie te wyniki, w których zależności są istotne statystycznie ( $p < 0,05$  albo inaczej – poziom ufności jest  $\geq 95\%$ ).

### 3. Wyniki

#### 3.1. Trendy temperatury powietrza i ich rozkład przestrzenny

Chronologiczne ciągi średnich miesięcznych wartości temperatury powietrza na wybranych stacjach poddano analizie trendów. Wykazała ona, że na wszystkich 18 stacjach w okresie 1982-2009 występuje dodatni trend temperatury rocznej, z czego tylko na dwóch w Kanadyjskiej Subarktyce – Norman Wells i Fort Simpson – trendy te są statystycznie nieistotne (patrz tab. 1). Na pięciu stacjach – Barrow, Cape Dorset, Clyde, Eureka i Iqaluit – trendy temperatury rocznej przekraczają  $0,1^{\circ}\text{C}\cdot\text{rok}^{-1}$ , na pozostałych stacjach, na których trendy są istotne mieszczą się one w przedziale między  $+0,099$  do  $+0,058^{\circ}\text{C}\cdot\text{rok}^{-1}$ .

Dla uzyskania obrazu regionalnego zróżnicowania zmian temperatury powietrza przeprowadzono analizę grupowania stacji według występujących na nich trendów. Podstawą grupowania były szeregi trendów miesięcznych dla każdej stacji. Procedura grupowania wykazuje, że rozkłady miesięcznych trendów występujących w czasie roku na rozpatrywanych stacjach tworzą dwie wielkie grupy, w których z kolei występują wyraźne podgrupy (ryc. 2). W obrębie podgrup trendy wykazują zbliżone rozkłady w czasie i podobne do siebie wartości. Grupy oznaczono jako A i B, a podgrupy w obrębie grup kolejnymi numerami. Taki podział powierzchni badanego obszaru (patrz ryc. 3), dokonany na podstawie rozkładu trendów temperatury powietrza, nie nawiązuje nawet w ogólnych zarysach do regionalizacji klimatycznej obszaru wyspowego Arktyki Kanadyjskiej przeprowadzonej przez Maxwella (1981).



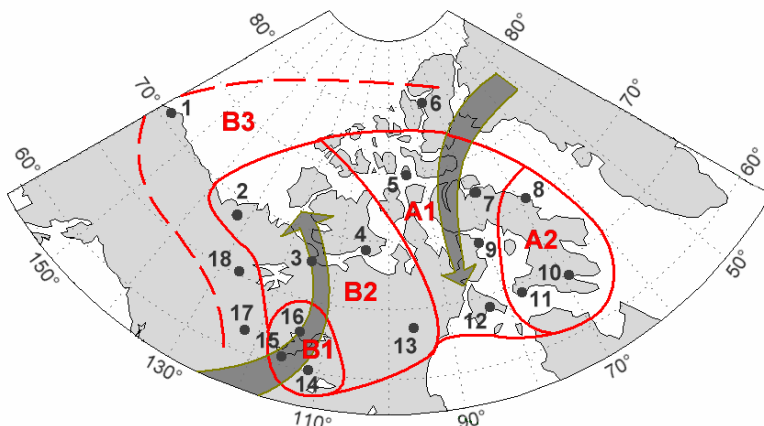
Ryc. 2. Wyniki grupowania trendów miesięcznych temperatury powietrza na stacjach przyjętych do analizy  
 Fig. 2. The result of the clustering monthly trends of air temperature at the analyzed stations

Tabela 1 – Table 1

Trendy średnich miesięcznych i rocznych wartości temperatury powietrza ( $^{\circ}\text{C rok}^{-1}$ ) w okresie 1982-2009.  
 Współczynniki trendu istotne na poziomie  $p < 0,05$  pogrubione.  
 Stacje ustawione według wyników grupowania (patrz ryc. 2)

Trends of mean monthly and yearly air temperature ( $^{\circ}\text{C year}^{-1}$ ) over the period 1982-2009.  
 The coefficients of this trend statistically significant  $p < 0.05$  are in bold.  
 Stations placed according to results of the clustering method (see Fig. 2)

Stacja Station	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Rok Annul
Podgrupa A1 – Subgroup A1													
Resolute	0,099	0,079	0,070	<b>0,164</b>	0,067	0,015	0,025	<b>0,081</b>	0,045	<b>0,182</b>	<b>0,206</b>	0,124	<b>0,096</b>
Hall Beach	0,112	<b>0,158</b>	0,074	<b>0,175</b>	0,105	-0,010	-0,001	<b>0,051</b>	0,045	<b>0,143</b>	0,135	0,143	<b>0,094</b>
Pond Inlet	0,060	0,084	0,117	<b>0,129</b>	0,111	0,033	<b>0,071</b>	<b>0,097</b>	0,054	<b>0,165</b>	0,124	0,135	<b>0,097</b>
Coral Harbour	0,072	0,082	0,098	<b>0,113</b>	<b>0,114</b>	0,033	0,057	<b>0,081</b>	0,061	<b>0,122</b>	<b>0,177</b>	<b>0,182</b>	<b>0,099</b>
Podgrupa A2 – Subgroup A2													
Clyde	0,143	0,168	<b>0,169</b>	<b>0,112</b>	<b>0,124</b>	0,002	0,040	<b>0,090</b>	0,058	<b>0,115</b>	<b>0,180</b>	<b>0,196</b>	<b>0,116</b>
Iqaluit	0,043	0,168	<b>0,185</b>	<b>0,126</b>	<b>0,142</b>	0,003	0,036	<b>0,044</b>	<b>0,050</b>	<b>0,130</b>	<b>0,144</b>	<b>0,241</b>	<b>0,111</b>
Cape Dorset	0,092	<b>0,144</b>	<b>0,163</b>	<b>0,149</b>	<b>0,122</b>	0,013	<b>0,061</b>	<b>0,078</b>	<b>0,057</b>	<b>0,098</b>	<b>0,177</b>	<b>0,208</b>	<b>0,115</b>
Podgrupa B1 – Subgroup B1													
Hay River	0,131	0,054	-0,021	0,038	-0,020	0,024	0,056	-0,004	0,036	0,047	<b>0,219</b>	0,126	<b>0,058</b>
Yellowknife	0,125	0,076	-0,002	0,026	-0,002	0,035	0,030	0,000	0,045	0,070	<b>0,241</b>	0,164	<b>0,066</b>
Fort Smith	0,146	0,084	-0,003	0,005	-0,023	0,046	0,050	0,025	0,058	0,056	<b>0,240</b>	0,153	<b>0,070</b>
Podgrupa B2 – Subgroup B2													
Baker Lake	<b>0,175</b>	0,064	0,063	<b>0,106</b>	0,045	0,053	<b>0,076</b>	<b>0,084</b>	0,049	0,084	<b>0,184</b>	<b>0,179</b>	<b>0,098</b>
Cambridge Bay	<b>0,178</b>	0,037	-0,033	0,084	0,032	0,011	0,042	<b>0,078</b>	0,039	<b>0,103</b>	0,138	0,096	<b>0,067</b>
Inuvik	<b>0,211</b>	0,124	-0,120	0,138	0,039	-0,009	-0,029	-0,013	0,022	<b>0,131</b>	<b>0,299</b>	<b>0,164</b>	<b>0,081</b>
Kugluktuk	<b>0,189</b>	0,072	-0,022	0,105	0,027	0,036	0,026	0,046	0,050	0,076	<b>0,245</b>	0,150	<b>0,083</b>
Podgrupa B3 – Subgroup B3													
Barrow	0,051	0,078	0,013	0,014	0,061	0,017	0,039	0,064	<b>0,100</b>	<b>0,276</b>	<b>0,275</b>	<b>0,130</b>	<b>0,147</b>
Eureka	0,077	<b>0,158</b>	0,043	0,115	0,070	0,053	<b>0,060</b>	0,065	0,086	<b>0,183</b>	<b>0,287</b>	0,133	<b>0,111</b>
Fort Simpson	0,083	0,078	-0,070	0,014	0,013	0,016	0,026	0,011	0,027	0,086	<b>0,200</b>	0,091	0,048
Norman Wells	0,031	0,097	-0,123	0,041	0,030	0,002	-0,012	-0,009	0,020	0,095	<b>0,240</b>	0,078	0,041



Ryc. 3. Przestrzenny rozkład wyników procedury grupowania stacji według rozkładów ich miesięcznych trendów temperatury powietrza w roku. Strzałkami zaznaczono schematyczne kierunki adwekcji w przypadku jednoczesnego wystąpienia dodatnich faz NAO i PNA

Fig. 3. Spatial distribution of the results of stations' clustering according to the distribution of their monthly trends of air temperature during the year. The arrows mark schematically the directions of advection in case positive phases of both NAO and PNA are observed at the same time

Do pierwszej podgrupy (A1) należą stacje położone w pasie od Zatoki Hudsona, przez Basen Foxe'a, Zatokę Boothia i północne skraje Ziemi Baffina po Wyspę Devon: Resolute (5), Pond Inlet (7), Hall Beach (9) i Coral Harbour (12). Na wszystkich stacjach istotne statystycznie, dodatnie trendy temperatury powietrza występują w kwietniu, sierpniu i październiku – patrz tab. 1. Pojawiają się także pojedyncze, istotne trendy w różnych miesiącach na poszczególnych stacjach. Najwyższa wartość trendu TP zaznacza się w listopadzie  $+0,206^{\circ}\text{C}/\text{rok}$  w Resolute. Na wszystkich stacjach tej podgrupy występują również dodatnie i istotne statystycznie trendy rocznej TP. Najwyższa wartość trendu wystąpiła w Coral Harbour osiągając  $+0,099^{\circ}\text{C}/\text{rok}$ , średnia wartość trendu rocznej TP dla tej podgrupy stacji jest tylko nieznacznie niższa od  $+0,1^{\circ}\text{C}$  – równa  $0,096(\pm 0,002)^{\circ}\text{C}$ .

Podgrupę drugą (A2) tworzą stacje leżące na środkowych i południowych częściach Ziemi Baffina: Clyde (8), Iqaluit (10) i Cape Dorset (11). Istotne statystycznie, dodatnie trendy TP zaznaczają się tutaj wiosną (marzec-maj) oraz od sierpnia do grudnia, a najsilniejsze trendy występują na początku zimy (grudzień). Najwyższą wartość trendu odnotowano w Iqaluit:  $+0,241^{\circ}\text{C}/\text{rok}$  w grudniu. Na wszystkich stacjach tej podgrupy występują również silne, dodatnie i istotne trendy rocznej temperatury powietrza, przekraczające  $+0,1^{\circ}\text{C}$ .

Podgrupa trzecia (B1) to stacje leżące na obszarach wewnątrzkontynentalnych, na zachód od środkowej części Zatoki Hudsona: Fort Smith (14), Hay River (15) i Yellowknife (16). Na wszystkich tych stacjach jedynie w listopadzie pojawiają się silne, dodatnie i istotne statystycznie trendy TP. Najwyższa wartość trendu w listopadzie występuje w Yellowknife, jest to  $+0,241^{\circ}\text{C}/\text{rok}$ . We wszystkich pozostałych miesiącach trendy TP w tej podgrupie stacji są nieistotne, dodatkowo zmieniają znaki (w marcu i maju ujemne). Istotne statystycznie, choć stosunkowo słabe, są na tych stacjach także trendy rocznej TP. W tej podgrupie stacji temperatura roczna po roku 2006 konsekwentnie spada, co stanowi przyczynę relatywnie słabych trendów temperatury rocznej w rozpatrywanym okresie.

Do podgrupy czwartej (B2) należą stacje: Inuvik (2), Kugluktuk (3), Cambridge Bay (4) i Baker Lake (13), lokujące się na obszarze rozciągającym się od wybrzeży Morza Beauforta po NW wybrzeża Zatoki Hudsona. Istotne statystycznie, dodatnie trendy TP zaznaczają się w styczniu na wszystkich stacjach tego obszaru i od października do grudnia na prawie wszystkich stacjach tej grupy. Najsilniejsze trendy TP występują w styczniu i listopadzie. Najwyższą wartość trendu w listopadzie zanotowano na stacji Inuvik:  $+0,299^{\circ}\text{C}/\text{rok}$ , co w całym badanym okresie daje wzrost TP o  $8,37^{\circ}\text{C}$ . Spośród wszystkich analizowanych 18 stacji jest to największy wzrost miesięcznej temperatury powietrza. Trendy rocznej TP na wszystkich stacjach tej podgrupy są dodatnie i istotne statystycznie, a najwyższa wartość trendu ( $+0,098(\pm 0,025)^{\circ}\text{C}\cdot\text{rok}^{-1}$ ) pojawiła się w najdalej położonej na południe stacji Baker Lake.

Podgrupę piątą (B3) tworzą stacje leżące na zachodnich i północnych obrzeżach badanego obszaru: Barrow (1), Eureka (6), Fort Simpson (17) i Norman Wells (18). Brak stacji między Barrow a Eureka nie pozwala na kategoryczne stwierdzenie, że ten długi pas o dość dziwnym kształcie, jest rzeczywiście ciągły. Nie można wykluczyć, że procedura grupowania "dołączyła" do podgrupy Fort Simpson i Norman Wells stacje Barrow i Eureka. Na wszystkich stacjach podgrupy B3 statystycznie istotne, dodatnie i najsilniejsze trendy temperatury powietrza występują w listopadzie. Najwyższą wartość trendu zanotowano na stacji Eureka:  $+0,287(\pm 0,067)^{\circ}\text{C}/\text{rok}$ , co w całym badanym okresie daje wzrost TP listopada aż o  $8,04^{\circ}\text{C}$ . W podgrupie B3 istotne statystycznie trendy rocznej TP zaznaczają się jedynie na stacjach leżących najdalej na północy: Eureka i Barrow. Na tej ostatniej, spośród wszystkich 18 stacji, trend rocznej TP osiąga najwyższą wartość:  $+0,147^{\circ}\text{C}/\text{rok}$ , co w ciągu 28 badanych lat daje wzrost rocznej temperatury powietrza o  $4,12^{\circ}\text{C}$ . Nie można jednak wykluczyć, że wzrost rocznej temperatury powietrza na tej stacji stanowi w części efekt występującej tam w okresie zimowym bardzo silnej "miejskiej wyspy ciepła" (Hinkel i Nelson 2007).

Najwyższe jednostki grupowania stacji – grupy A i B tworzą odrębne jednostki przestrzenne (patrz ryc. 3). Stacje grupy A zajmują obszar rozciągający się wokół Wyspy Devon, Ziemi Baffina i Basenu Foxe'a, stacje grupy B przylegają do tego obszaru od północy i zachodu. Uogólniając – na wszystkich stacjach grupy A istotne statystycznie trendy miesięcznej TP występują w kwietniu, sierpniu i październiku, a trendy temperatury rocznej są wysokie ( $\sim +0,1^{\circ}\text{C}\cdot\text{rok}^{-1}$ ) i wykazują niewielkie zróżnicowanie co do ich wartości, na wszystkich stacjach grupy B statystycznie istotne trendy miesięcznej TP występują w listopadzie, a trendy temperatury rocznej wykazują znaczne zróżnicowanie co do ich wartości. Takie różnice w rozkładzie statystycznie istotnych trendów TP w czasie między oboma grupami stacji zdaje się wskazywać, że ich reżim termiczny kształtowany jest przez odmienne czynniki.

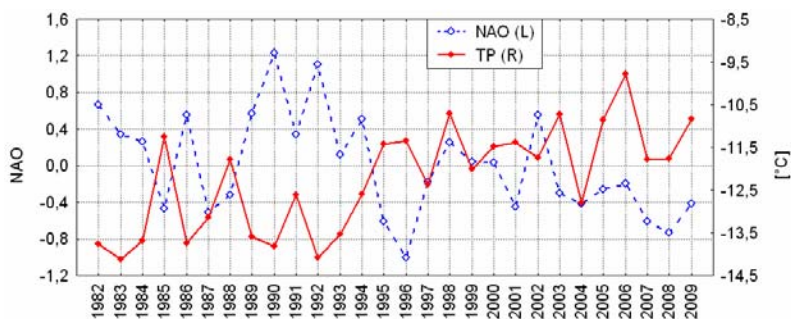
### 3.2. Związki TP z cyrkulacją atmosferyczną

Dla wyjaśnienia, czy występują i jaki mają charakter związki zmian temperatury powietrza ze zmianami cyrkulacji atmosferycznej przeprowadzono analizę rozkładu współczynników korelacji między miesięcznymi średnimi obszarowymi TP obliczonymi dla poszczególnych podgrup i grup stacji, a różnymi wskaźnikami cyrkulacyjnymi. W tym miejscu przedstawi się związki jakie zachodzą między TP w grupach stacji, a wybranymi wskaźnikami.

Na stacjach zaliczonych do grupy A wykrywa się istnienie silnych związków synchronicznych temperatury powietrza w szeregu miesiącach ze wskaźnikiem NAO CRU. Istotne związki między TP a wartościami wskaźników NAO występują od października do maja, osiągając największą siłę (i wysoką istotność statystyczną) zimą. Na poszczególnych stacjach grupy A maksimum siły związku z NAO nie

występuje jednocześnie, przypada na grudzień, styczeń bądź luty. Związki mają charakter ujemny – dodatniej fazie NAO odpowiada spadek temperatury powietrza.

Ta sama grupa stacji wykazuje silne skorelowanie rocznej TP z rocznym wskaźnikiem NAO CRU (patrz ryc. 4). Zwraca jednak uwagę, że silny do roku 2003 związek średniej rocznej obszarowej TP stacji grupy A z rocznym wskaźnikiem NAO, po roku 2003 zdecydowanie słabnie. Na stacjach położonych w bezpośrednim pobliżu Morza (Zatoki) Baffina i Cieśniny Hudsona siła związków między roczną TP a rocznym wskaźnikiem NAO jest największa – współczynniki korelacji są tam większe od  $|0,6|$ . Na stacji Baker Lake, należącej do grupy B (podgrupa B2) położonej w pobliżu NW brzegu Zatoki Hudsona zaznaczają się również statystycznie istotne związki między roczną TP, a rocznym wskaźnikiem NAO CRU ( $r = -0,48$ ,  $p < 0,010$ ), co stanowi wyjątek wśród stacji grupy B.



Ryc. 4. Przebieg rocznej wartości wskaźnika NAO CRU i rocznej temperatury powietrza [°C] na stacjach grupy A (TP; średnia obszarowa). Zwraca uwagę zmiana charakteru związku po roku 2003

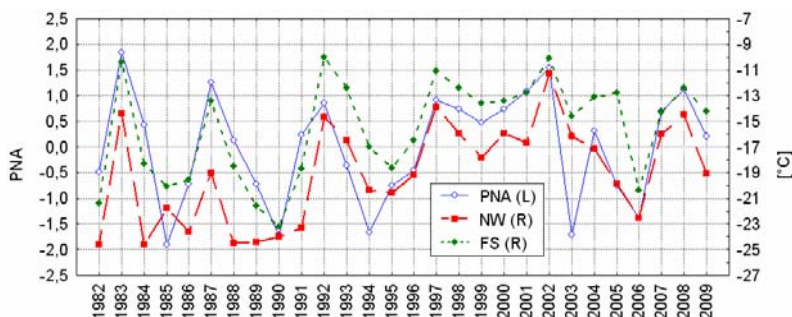
Fig. 4. Course of annual value of NAO CRU index and annual air temperature [°C] at the stations of A group (TP; mean regional). Note the change in the character of the correlation after 2003

W rozpatrywanym okresie 1982-2009 zmienność rocznego wskaźnika NAO CRU objaśnia 37% wariacji uśrednionej ze wszystkich stacji grupy A rocznej temperatury powietrza ( $p < 0,0004$ ). Z kolei na stacjach należących do tej grupy zmienność wskaźników PNA nie objaśnia konsekwentnie zmienności temperatury miesięcznej. Pojawiające się w niektórych miesiącach na niektórych stacjach istotne współczynniki korelacji o różnych znakach można uznać za dzieło przypadku. Podobnie zmienność rocznego wskaźnika PNA nie objaśnia zmienności rocznej temperatury powietrza na stacjach grupy A. Wartości współczynników korelacji są bardzo niskie, z reguły poniżej 0,1, w przewadze dodatnie.

Na stacjach grupy B, za wyjątkiem wspomnianej stacji Baker Lake, nie wykrywa się statystycznie istotnych związków między TP a miesięcznymi i rocznymi wskaźnikami charakteryzującymi zmienność AO i NAO, występują natomiast związki ze wskaźnikiem PNA. Istotne, dodatnie związki TP z PNA występują od października do stycznia oraz w marcu i kwietniu, największą siłą osiągając w październiku, listopadzie lub grudniu. Rozkład przestrzenny współczynników korelacji zmienia się w poszczególnych miesiącach – najsilniejsze związki w październiku, listopadzie i grudniu lokują się na stacjach wewnątrzkontynentalnych (Subarktyka Kanadyjska: Fort Smith, Hay River, Norman Wells i Yellowknife; patrz ryc. 5), gdzie korelacje TP ze wskaźnikiem PNA w danym miesiącu mieszczą się w przedziale od 0,64 do 0,74. Od tego "centrum korelacji" siła związków w poszczególnych miesiącach



spada z różną prędkością ku północy i północo-wschodowi, praktycznie stając się nieistotna na linii Cambridge Bay – Baker Lake, a więc wzdłuż granicy między stacjami grupy A i B. Związki między rocznym wskaźnikiem PNA, a roczną TP na stacjach grupy B, poza dwoma stacjami (Fort Smith, Hay River) są nieistotne.



Ryc. 5. Przebieg wartości wskaźnika PNA i temperatury powietrza [°C] na stacjach Norman Wells (NW) i Fort Simpson (FS) w listopadzie (1982-2009)

Fig. 5. The course of annual value of PNA and air temperature at the Norman Wells (NW) and Fort Simpson (FS) stations in November (1982-2009)

Temperatura powietrza na stacjach Eureka i Barrow nie wykazuje statystycznie istotnego skorelowania z miesięcznymi i rocznymi wartościami wskaźnika PNA. Zdaje się to potwierdzać, że ich włączenie do podgrupy B3 stanowi wynik procedury grupowania (podobieństwa rozkładu wartości trendów w poszczególnych miesiącach), nie zaś występowania wspólnych cech w przebiegu procesów.

### 3.3. Trendy temperatury powierzchni morza

Chronologiczne ciągi średnich miesięcznych wartości temperatury powierzchni morza poddano analizie trendów. Wyniki tej analizy zestawione są w tabeli 2. Na Morzu Beauforta istotne dodatnie trendy SST zaznaczają się od sierpnia do października. Jest to okres, w którym wody wolne są od lodu morskiego. Najwyższe wartości trendów na tym akwenie odnotowano w jego południowej części w sierpniu:  $+0,093^{\circ}\text{C}\cdot\text{rok}^{-1}$  w gridzie B i  $+0,081^{\circ}\text{C}\cdot\text{rok}^{-1}$  w gridzie D.

W rejonie Zatoki Hudsona rozkład dodatnich i istotnych trendów SST jest zróżnicowany. W Basenie Foxe'a istotne trendy występują we wszystkich miesiącach, w Cieśninie Hudsona zaznaczają się w pierwszej, a na Zatoce Hudsona – w drugiej połowie roku. Na tym ostatnim akwenie trendy temperatury powierzchni morza są najsilniejsze. Najwyższą wartość trendu odnotowano w sierpniu w gridzie F leżącym w NE części Zatoki Hudsona, jest to  $+0,118^{\circ}\text{C}\cdot\text{rok}^{-1}$ , co w ciągu 28 badanych lat daje wzrost rocznej temperatury powierzchni morza o  $3,3^{\circ}\text{C}$ .

Najslabsze, ale istotne statystycznie trendy temperatury powierzchni morza zaznaczają się na Morzu Baffina. W południowej części tego akwenu istotne trendy SST pojawiają się w prawie wszystkich miesiącach, a w części środkowej i północnej pod koniec lata i jesienią. Najwyższą wartość trendu odnotowano w sierpniu w gridzie J leżącym w nurcie ciepłego Prądu Zachodniogrenlandzkiego:  $+0,073^{\circ}\text{C}\cdot\text{rok}^{-1}$ .

Tabela 2 – Table 2

Trendy średnich miesięcznych i rocznych wartości temperatury powierzchni morza [ $^{\circ}\text{C rok}^{-1}$ ] w okresie 1982-2009. Współczynniki trendu istotne na poziomie  $p < 0,05$  pogrubione

Trends of mean monthly and yearly values of SST [ $^{\circ}\text{C year}^{-1}$ ] over the period 1982-2009. The coefficients of this trend statistically significant  $p < 0.05$  are in bold

Gridy Grids	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Rok Annuał
Morze Beauforta – Beaufort Sea													
A	0,000	-0,0001	0,000	0,0002	-0,0002	-0,002	0,016	<b>0,065</b>	<b>0,078</b>	<b>0,013</b>	-0,001	0,0001	<b>0,014</b>
B	0,0003	-0,002	-0,0001	0,001	0,004	<b>0,025</b>	0,056	<b>0,093</b>	<b>0,078</b>	<b>0,038</b>	0,005	0,002	<b>0,025</b>
C	0,0001	-0,001	-0,0002	0,0003	0,004	0,013	0,049	<b>0,081</b>	<b>0,063</b>	<b>0,021</b>	0,001	0,0002	<b>0,019</b>
D	0,0002	<b>0,0002</b>	0,0002	-0,00003	0,0001	-0,002	0,009	<b>0,042</b>	<b>0,024</b>	<b>-0,001</b>	0,0001	<b>0,0005</b>	<b>0,006</b>
Zatoka Hudsona – Hudson Bay													
E	0,001	0,001	-0,001	<b>0,009</b>	0,018	<b>0,049</b>	<b>0,091</b>	<b>0,113</b>	<b>0,085</b>	<b>0,059</b>	<b>0,046</b>	<b>0,012</b>	<b>0,040</b>
F	0,0001	<b>0,002</b>	0,001	0,002	0,008	0,013	0,020	<b>0,118</b>	<b>0,099</b>	<b>0,053</b>	<b>0,042</b>	<b>0,021</b>	<b>0,032</b>
Basen Foxe'a – Foxe Basin													
G	<b>0,005</b>	<b>0,007</b>	<b>0,007</b>	<b>0,009</b>	<b>0,017</b>	<b>0,016</b>	<b>0,035</b>	<b>0,039</b>	<b>0,056</b>	<b>0,047</b>	<b>0,029</b>	<b>0,013</b>	<b>0,023</b>
Cieśnina Hudsona – Hudson Strait													
H	<b>0,013</b>	<b>0,012</b>	<b>0,011</b>	<b>0,014</b>	<b>0,025</b>	<b>0,061</b>	<b>0,029</b>	0,002	-0,004	-0,007	0,017	<b>0,037</b>	<b>0,017</b>
Morze Baffina – Baffin Bay													
I	<b>0,028</b>	<b>0,021</b>	<b>0,026</b>	<b>0,030</b>	0,023	<b>0,033</b>	<b>0,050</b>	<b>0,057</b>	0,032	<b>0,051</b>	<b>0,055</b>	<b>0,039</b>	<b>0,037</b>
J	<b>0,039</b>	<b>0,032</b>	<b>0,035</b>	<b>0,030</b>	<b>0,028</b>	<b>0,058</b>	<b>0,063</b>	<b>0,073</b>	<b>0,054</b>	<b>0,049</b>	<b>0,058</b>	<b>0,049</b>	<b>0,047</b>
K	0,006	0,002	0,001	0,003	0,0001	0,008	0,017	<b>0,054</b>	<b>0,058</b>	<b>0,047</b>	<b>0,024</b>	0,014	<b>0,019</b>
L	0,001	0,002	0,001	0,003	0,016	0,022	0,003	0,004	0,004	<b>0,024</b>	<b>0,013</b>	0,004	0,008

Analizie trendów poddano również średnie roczne wartości temperatury powierzchni morza (tab. 2). Wykazała ona, że w prawie wszystkich badanych gridach pojawiają się istotne statystycznie i dodatnie trendy średniej rocznej SST. Wyjątek stanowi grid L położony najdalej na północy M. Baffina, w którym wartość trendu jest dodatnia, ale nieistotna statystycznie. Najwyższa wartość trendu zaznaczyła się w SE części M. Baffina (grid J):  $+0,047^{\circ}\text{C rok}^{-1}$ , co w całym badanym okresie 1982-2009 daje wzrost rocznej temperatury powierzchni morza o  $1,32^{\circ}\text{C}$ . Można stwierdzić, że tendencje zmian SST na Morzu Baffina, zwłaszcza w obrębie działania Prądu Zachodniogrenlandzkiego, konsekwentnie utrzymują się w całym badanym okresie (Zblewski 2004).

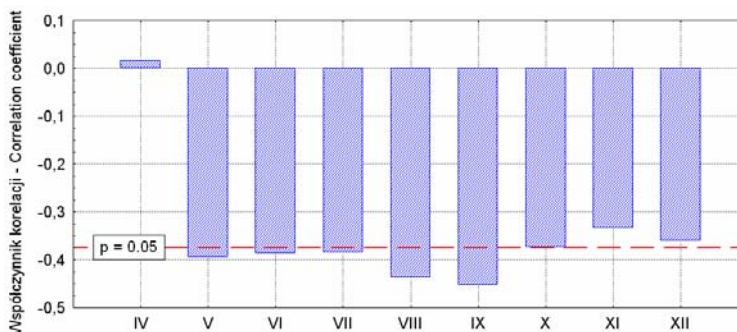
Analiza grupowania według rozkładu trendów wykazała, że istnieją trzy grupy gridów. Pierwszą grupę tworzą gridy A, B, C i D leżące na M. Beauforta oraz grid E położony w NW części Z. Hudsona. Grupa druga to gridy F (NE część Z. Hudsona) i G (Basen Foxe'a) oraz gridy I, J, K (południowa i środkowa część M. Baffina). Do grupy trzeciej należą gridy H (C. Hudsona) i L (północna część M. Baffina). Analiza ta wykazała, że w tych samych grupach, podobnie jak dla ZLM, znalazły się obok siebie gridy leżące na różnych akwenach i brak jest synchronicznych zmian temperatury powierzchni morza między tymi gridami. W rozkładach trendów dla poszczególnych grup gridów nie wykryto cech wspólnych.

Trzeba w tym miejscu zwrócić uwagę na fakt bardzo silnego skorelowania rocznej temperatury powietrza z roczną temperaturą powierzchni wód na Morzu Baffina. Szczególnie silne korelacje TP zaznaczają się z SST akwenów położonych na początkowym (południowym) odcinku Prądu Zachodniogrenlandzkiego (grid J). Najsilniejsze korelacje zaznaczają się z temperaturą powietrza stacji położonych w bezpośrednim pobliżu Morza Baffina (Clyde, Iqaluit, Cape Dorset, Hall Beach, Pond

Inlet; patrz Zblewski 2005). Relatywnie silne i statystycznie istotne korelacje zachodzą także w odniesieniu do tak oddalonych stacji jak Barrow ( $r = +0,60$ ), Fort Simpson ( $+0,45$ ) i Inuvik ( $+0,39$ ).

### 3.4. Związki SST z cyrkulacją atmosferyczną

Przeprowadzona analiza korelacji wykazała, że w rejonie Zatoki Hudsona i południowej części Morza Baffina istotny wpływ na kształtowanie się rocznej temperatury powierzchni morza ma zmienność NAO. Związki te jednak są asynchroniczne – temperatura powierzchni morza reaguje z opóźnieniem na zmiany wartości wskaźnika NAO. Przykładem takiej zależności może być zmienność SST w gridzie F (N część Zatoki Hudsona), gdzie reakcja na zmienność NAO w marcu, w przebiegu SST ujawnia się w okresie od kwietnia do września, wykazując największą siłę związku w sierpniu i wrześniu ( $r = -0,44$  i  $-0,45$  odpowiednio; patrz ryc. 6). Podobnie, na tym samym akwenie zaznaczają się silniejsze związki między zmiennością wskaźnika NAO z maja a SST w czerwcu ( $r = -0,44$ ) i lipcu ( $r = -0,51$ ). Taki rozkład związków w czasie wyjaśnia, że nie mogą to być związki bezpośrednie, przyczyną ich występowania musi być działanie ogniwa inercyjnego. Występowanie związków tego rodzaju można objaśnić występowaniem określonej kolejności zdarzeń, wymuszonych przez znak i wartość wskaźnika NAO w marcu.



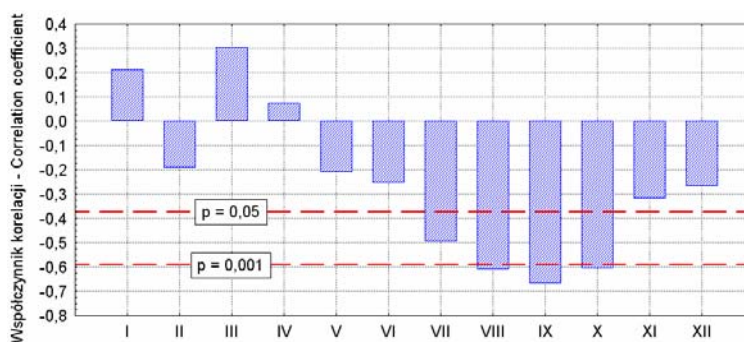
Ryc. 6. Rozkład współczynników korelacji między wskaźnikiem NAO CRU z marca, a miesięcznymi wartościami SST w gridzie F (61,5°N, 81,5°W; N część Zatoki Hudsona) w okresie od kwietnia do końca roku. Zwraca uwagę 5-6. miesięczne opóźnienie wystąpienia najsilniejszych korelacji między NAO a SST

Fig. 6. Distribution of coefficients of correlation between NAO CRU from March and monthly values of SST in F grid (61.5°N, 81.5°W; N part of the Hudson Bay) in the period from April till the end of the year. Note 5-6 month delay of the time when the strongest correlation between NAO and SST was observed

Wystąpienie ujemnego wskaźnika NAO w marcu, powoduje wzrost temperatury powietrza nad Zatoką Hudsona (patrz poprzedni podrozdział). Rezultatem wzrostu temperatury powietrza w marcu jest ograniczenie przyrostu grubości lodu morskiego na tym akwenie. Cieńszy lód szybciej topnieje, przez co na akwenie dochodzi szybciej do zmniejszenia zawartości lodu i wcześniej rozpoczyna się proces akumulacji ciepła słonecznego w wodach. Akumulowane w wodach ciepło przyspiesza topnienie lodu, stąd dochodzi do wcześniejszego rozrzedzenia lodu w północnej części Zatoki Hudsona i wzrost SST powiązany z marcowym NAO zaczyna zaznaczać się już w maju. Ponieważ powierzchnia morza "całkuje" dopływającą energię, skutki wcześniejszego rozpoczęcia nagrzewania powierzchni wody

osiągną maksimum w końcowej fazie letniego nagrzewania powierzchni morza (wrzesień). Odwrotna sytuacja, z wystąpieniem dodatniej fazy NAO w marcu, będzie skutkowałą spadkiem temperatury powietrza, wzrostem grubości lodu w marcu, opóźnieniem początków zmniejszenia zwarcia powierzchni lodów dryfujących i w rezultacie niższą SST w okresie od maja do września.

Wartości wskaźników NAO miesięcy zimowych wykazują największą zmienność, stąd ich odchylenia wywierają silny wpływ na roczną wartość wskaźnika NAO. Zmienność wskaźnika NAO w okresie zimowym reguluje na obszarze wschodniej części Arktyki Kanadyjskiej temperaturę powietrza, ta zaś grubość zimowych lodów morskich. W rezultacie, między rocznym wskaźnikiem NAO na akwenach Zatoki Baffina, Zatoki i Cieśniny Hudsona, Basenu Foxe'a a roczną SST występują statystycznie istotne związki. Przykładowo, w gridzie F, zmienność rocznego wskaźnika NAO objaśnia ~38% rocznej zmienności SST ( $r = -0,64$ ,  $p < 0,001$ ). To pośrednie działanie cyrkulacji atmosferycznej na SST doskonale uwidacznia się przy korelacji rocznego wskaźnika NAO z miesięcznymi wartościami SST (patrz ryc. 7). Współczynniki korelacji rocznego wskaźnika NAO z SST w lipcu, sierpniu, wrześniu i październiku są wysoce istotne statystycznie, a siła związków jest wyraźnie wyższa od wcześniej omawianych związków między wartością wskaźnika NAO w poszczególnych miesiącach a późniejszą miesięczną temperaturą powierzchni morza.



Ryc. 7. Rozkład współczynników korelacji między rocznym wskaźnikiem NAO CRU a miesięcznymi wartościami SST na północnej części Zatoki Hudsona (grid F)

Fig. 7. Distribution of coefficients of correlation between annual NAO CRU index and monthly values of SST in the northern part of the Hudson Bay (F grid)

Można przypuszczać, że inny jest charakter wpływu NAO na kształtowanie się SST na niezamarzających wodach Prądu Grenlandzkiego (na przykład grid J). Tam intensywny napływ cieplejszego powietrza z południa, jaki występuje w czasie ujemnej fazy NAO będzie aktywizował Prąd Zachodniogrenlandzki i jednocześnie ograniczał straty ciepła z powierzchni wód, co będzie skutkowało wzrostem SST (Zblewski 2004)

Na prawie całym obszarze M. Beauforta (za wyjątkiem części SE) na kształtowanie sierpniowej SST pewien wpływ wywiera zmienność PNA w sierpniu. Najsilniejszy związek ( $r = +0,45$ ) zaznacza się w gridzie C, tam jednak zmienność sierpniowego PNA objaśnia jedynie 17% zmienności SST w tym samym miesiącu. W tym przypadku, jak można sądzić, rola termiczna adwekcji z południa dla kształtowania zmienności SST na Morzu Beauforta jest ograniczona, większą rolę zdaje się grać

dynamiczne działanie napływu powietrza. Napływ powietrza z południa ograniczając możliwość dryfu lodu na południe przyczynia się do wzrostu SST na wodach o mniejszej koncentracji lodu. Znacznie większą rolę od PNA w kształtowaniu SST na Morzu Beauforta w sierpniu, w ciągu całego okresu letniego odgrywa inna moda cyrkulacyjna – Dipol Arktyczny (zDA, patrz Marsz 2008) – również głównie poprzez działanie dynamiczne, a nie termiczne.

### 3.5. Trendy zwartości lodów morskich

Chronologiczne ciągi średnich miesięcznych wartości zwartości lodów morskich w wybranych gridach poddano analizie trendów. Wykazała ona, że we wszystkich badanych gridach występują istotne statystycznie, ujemne trendy miesięcznej ZLM – tab 3. Jedyne w gridach B, C położonych na Morzu Beauforta i w gridzie H leżącym we wschodniej części Cieśniny Hudsona w lutym oraz na przełomie lata i jesieni pojawiają się słabe, dodatnie i istotne statystycznie trendy ZLM.

Tabela 3 – Table 3

Trendy średniej miesięcznej i rocznej zwartości pokrywy lodowej [% rok<sup>-1</sup>] w okresie 1982-2009.  
Współczynniki trendu istotne na poziomie  $p < 0,05$  pogrubione. W – brak lodu

Trends of mean monthly and yearly values of sea ice concentration [% year<sup>-1</sup>] over the period 1982-2009.  
The coefficients of this trend statistically significant  $p < 0.05$  are in bold. W – ice free

Gridy Grids	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Rok Annul
Morze Beauforta – Beaufort Sea													
A	-0,020	0,014	0,012	-0,008	-0,042	-0,046	-0,208	<b>-1,380</b>	<b>-2,775</b>	<b>-0,304</b>	0,027	-0,0004	<b>-0,394</b>
B	0,065	<b>0,137</b>	0,097	-0,019	-0,093	-0,434	-0,771	<b>-1,462</b>	<b>-2,285</b>	<b>-1,382</b>	-0,035	0,002	<b>-0,515</b>
C	0,015	0,052	0,019	-0,022	-0,032	-0,174	-0,629	<b>-1,391</b>	<b>-1,739</b>	-0,445	-0,005	0,032	-0,360
D	0,016	0,022	0,022	0,014	0,0002	0,029	-0,136	<b>-0,863</b>	-0,420	<b>0,100</b>	0,028	-0,005	-0,099
Zatoka Hudsona – Hudson Bay													
E	-0,047	-0,062	0,008	<b>-0,268</b>	-0,369	<b>-1,166</b>	<b>-0,463</b>	W	W	W	<b>-1,485</b>	-0,327	<b>-0,348</b>
F	-0,036	<b>-0,141</b>	-0,062	-0,232	-0,252	-0,281	-0,303	W	W	-0,002	<b>-1,067</b>	<b>-0,760</b>	<b>-0,261</b>
Basen Foxe'a – Foxe Basin													
G	-0,042	<b>-0,061</b>	<b>-0,049</b>	<b>-0,119</b>	<b>-0,386</b>	-0,390	<b>-1,096</b>	-0,331	0,005	<b>-0,502</b>	<b>-1,043</b>	-0,140	<b>-0,346</b>
Cieśnina Hudsona – Hudson Strait													
H	<b>-0,363</b>	<b>-0,421</b>	<b>-0,346</b>	<b>-0,431</b>	<b>-0,620</b>	<b>-1,713</b>	<b>-0,844</b>	<b>0,096</b>	<b>0,105</b>	<b>0,194</b>	<b>-0,635</b>	<b>-1,354</b>	<b>-0,528</b>
Morze Baffina – Baffin Bay													
I	-0,552	-0,573	-0,902	-0,664	-0,883	-0,168	0,039	W	W	W	<b>-0,269</b>	<b>-0,964</b>	<b>-0,411</b>
J	<b>-0,621</b>	<b>-0,612</b>	-0,462	-0,073	-0,010	-0,010	W	W	W	W	W	-0,017	<b>-0,150</b>
K	-0,033	-0,150	-0,015	<b>-0,328</b>	-0,008	0,060	-0,187	-0,078	-0,137	-0,026	<b>-0,547</b>	-0,252	-0,142
L	-0,018	-0,064	0,019	-0,040	<b>-0,778</b>	<b>-1,413</b>	-0,599	0,001	0,004	<b>-1,163</b>	-0,238	-0,074	<b>-0,364</b>

Na Morzu Beauforta istotne ujemne trendy koncentracji lodów zaznaczają się od sierpnia do października i są znacznie silniejsze niż na pozostałych akwenach. Najwyższą wartość trendu odnotowano we wrześniu w gridzie A leżącym w NW części morza:  $-2,78\%$  rok<sup>-1</sup>, co w całym badanym okresie 1982-2009 daje spadek zwartości lodów morskich o 77,8%.

W rejonie Zatoki Hudsona (razem z Cieśniną Hudsona i Basenem Foxe'a) ujemne i istotne trendy ZLM zaznaczają się w prawie wszystkich miesiącach, w czasie których na powierzchni morza występuje pokrywa lodowa. Trendy w tym obszarze są nieco słabsze niż na Morzu Beauforta. Najsilniejsze trendy

występują na początku lata oraz na przełomie jesieni i zimy. Najwyższe wartości trendów zaznaczają się w czerwcu w gridzie H leżącym w Cieśninie Hudsona:  $-1,71\% \text{ rok}^{-1}$  oraz w listopadzie w gridzie E położonym w NW części Z. Hudsona:  $-1,49\% \text{ rok}^{-1}$ .

Najslabsze, ale istotne statystycznie trendy koncentracji lodów, zaznaczają się na Morzu Baffina. Najwyższą wartość trendu odnotowano w początku ciepłej pory roku – czerwcu w gridzie L położonym w północnej części badanego akwenu – jest to  $-1,41\% \text{ rok}^{-1}$ . Taki rozkład trendów wskazuje, że na obszarze Morza Baffina i powiązanych z nim akwenach zaznacza się tendencja do wcześniejszego zaniku lodów morskich i opóźnienia w tworzeniu się zwartej pokrywy lodowej.

Analiza średnich rocznych wartości ZLM wykazała, że w prawie wszystkich badanych gridach pojawiają się istotne statystycznie, ujemne trendy (tab. 3). Wyjątek stanowią gridy C i D położone we wschodniej części M. Beauforta oraz grid K leżący w Cieśninie Davisa, w których wartości trendów również są ujemne, ale nieistotne statystycznie. Najwyższe wartości trendów zaznaczają się w Cieśninie Hudsona (grid H):  $-0,53\% \text{ rok}^{-1}$  i SW części M. Beauforta (grid B):  $-0,52\% \text{ rok}^{-1}$ , co w całym badanym okresie 1982-2009 daje spadek koncentracji lodów morskich odpowiednio o 14,8 i 14,6%.

Przeprowadzona analiza grupowania według rozkładu trendów wykazała istnienie trzech grup gridów. Do pierwszej grupy należą gridy B i D leżące w południowej części Morza Beauforta oraz gridy E i H położone w rejonie Zatoki Hudsona. Grupę drugą tworzą gridy A (NW część M. Beauforta), G (Basen Foxe'a) i L (północna część M. Baffina). Grupa trzecia to gridy C (NE część M. Beauforta), F (NE część Z. Hudsona) oraz I, J, K (południowa i środkowa część M. Baffina). Analiza wykazuje, że w tych samych grupach znalazły się gridy leżące na różnych akwenach i brak jest synchronicznych przebiegów zlodzenia między tymi gridami. Analiza grupowania nie ujawniła wspólnych cech w rozkładach w czasie trendów ZLM dla poszczególnych grup gridów.

Na tych samych akwenach bardzo wyraźnie związki wykazują zmiany rocznej koncentracji lodów ze zmianami rocznej SST. Na Morzu Beauforta (gridy A, B, C, D) współczynniki korelacji ZLM z SST mieszczą się w granicach od  $-0,92$  do  $-0,98$ , co wskazuje, że zachodzące zmiany SST i ZLM są synchroniczne i zachodzą z podobną siłą. Praktycznie SST na Morzu Beauforta jest funkcją koncentracji lodów na tym akwenie. Na Morzu Baffina i powiązanych z nim akwenach związki rocznej ZLM z roczną SST są wszędzie statystycznie istotne, ale słabsze niż na Morzu Beauforta. W północnej części Morza Baffina (grid L) współczynnik korelacji jest równy  $-0,82$ , podobnej siły są związki na akwenach wzdłuż wschodnich brzegów Ziemi Baffina (gridy K, I). Najslabsze związki między ZLM a SST ( $r = -0,56$ ; grid J) występują wzdłuż zachodnich wybrzeży Grenlandii, w strefie przepływu ciepłych wód Prądu Zachodniogrenlandzkiego. W Zatoce Hudsona i Basenie Foxe'a siła korelacji wykazuje duże zróżnicowanie; współczynniki korelacji zawierają się w przedziale od  $-0,66$  do  $-0,93$ . Zmniejszenie siły związków między SST a ZLM w rejonie Morza Baffina i powiązanych z nim akwenów można tłumaczyć większą niż na Morzu Beauforta rolą czynnika dynamicznego – dryfem lodów – będącym obok czynnika termicznego drugim czynnikiem istotnie wpływającym na koncentrację lodów morskich.

### 3.6. Związki ZLM z cyrkulacją atmosferyczną

Analiza korelacji wykazała, że między miesięcznymi wartościami wskaźnika NAO CRU a zwarością lodu morskiego zachodzą związki synchroniczne polegające na jednoczesnych zmianach NAO i ZLM o tych samych znakach. Związki te ograniczają się do SE części badanego obszaru (S część Morza Baffina, Cieśnina Hudsona i Basen Foxe'a) i największą siłę osiągają w lutym. Przykładem

może być związek pomiędzy NAO a ZLM w gridzie K, gdzie pojawia się najwyższy współczynnik korelacji  $r = 0,58$ . Zmienność NAO CRU objaśnia 32% obserwowanej zmienności zawartości lodu morskiego w lutym w tym gridzie. Na kształtowanie się rocznej koncentracji lodu wpływ wywiera także roczna zmienność NAO. Na przykład w gridzie H (Cieśnina Husona) obserwowana zmienność rocznej zawartości lodu jest w 21% objaśniona przez roczną zmienność NAO, ale w 86% objaśniana jest przez zmienność SST.

Taki obraz zależności wskazuje, że na Morzu Baffina, Cieśninie i Zatoce Hudsona oraz Basenie Foxe'a czynnikiem jednocześnie regulującym koncentrację lodów morskich i temperaturę powierzchni morza jest NAO. W czasie wystąpienia dodatniej fazy NAO nad północną część Morza Baffina napływa chłodne powietrze z sektora północnego, które następnie wzdłuż Ziemi Baffina, wybrzeży Labradoru i Zatoki Hudsona spływa na południe. To prowadzi do spadku temperatury powietrza, tworzenia się lodów morskich i jednocześnie intensyfikuje prądy Ziemi Baffina i Labradorski, które nasilają dryf lodów w kierunku południowym. W rezultacie dochodzi do jednoczesnego spadku SST i wzrostu koncentracji lodu morskiego w południowej części Morza Baffina.

Na Morzu Beauforta wykrywa się niezbyt silne związki synchroniczne między zawartością lodu morskiego, a miesięcznymi wartościami wskaźnika PNA. Istotnie statystycznie, ujemne korelacje ograniczają się do sierpnia i września, a więc okresu, w którym koncentracja lodów jest najmniejsza, a SST najwyższa. Tu wpływ cyrkulacji wydaje się mieć głównie charakter dynamiczny – w dodatniej fazie PNA napływające z sektora południowego powietrze prowadzi do dryfu lodów w kierunku północnym, a tym samym do spadku koncentracji na akwenach bliższych linii brzegowej. Jednoczesny wzrost SST stanowi skutek zmniejszania się koncentracji lodów, w znacznie mniejszym stopniu wzrostu temperatury powietrza.

#### 4. Wnioski

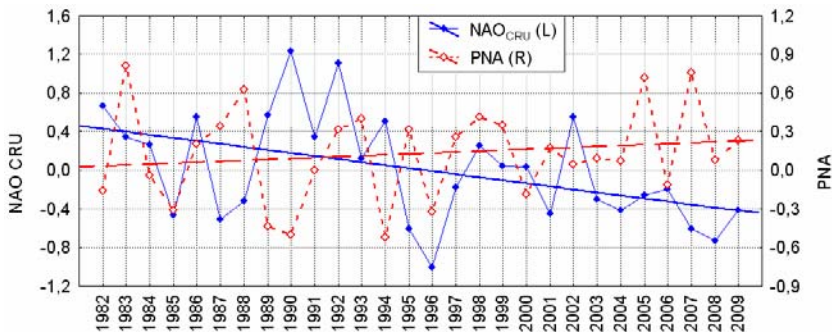
W badanym okresie 1982-2009 nastąpił wyraźny wzrost rocznej temperatury powietrza na stacjach wschodniej części badanego obszaru. W ciągu 28 badanych lat jest to wzrost o  $3,2^{\circ}\text{C}$  w Clyde i Cape Dorset. Jednocześnie w tym rejonie zaznaczył się także wzrost rocznej SST, zwłaszcza w południowej części Morza Baffina – o  $1,2^{\circ}\text{C}$ , jak i spadek zawartości lodów morskich. Wpływ na kształtowanie się tych elementów ma cyrkulacja atmosferyczna charakteryzowana przez NAO.

W czasie wystąpienia pozytywnej fazy NAO nad wschodnią część badanego obszaru napływa zimą bardzo zimne powietrze (Arktyczno-kontynentalne), a latem – chłodne znad pokrytego lodem Morza Arktycznego oraz północnych części Kanady i Grenlandii. Powietrze to przemieszczając się na S i SE przynosi ze sobą silne ochłodzenie. Napływające z północy zimne i suche powietrze pobiera z powierzchni morza bardzo duże ilości ciepła. Prowadzi to do obniżenia SST. Jednocześnie uruchamiany jest dryf lodów morskich z północnej części Morza Baffina w kierunku południowym.

Podczas wystąpienia ujemnej fazy NAO nad obszar Morza i Ziemi Baffina napływa ciepłe powietrze z sektora południowego co skutkuje wzrostem TP na badanych stacjach oraz wzrostem SST (ustaje pobór ciepła z wody). Związki NAO z TP zaznaczają się w chłodnej porze roku (od października do maja). Najsilniejsze ( $r$  od  $-0,54$  do  $-0,64$ ) są na stacjach leżących na Ziemi Baffina, gdzie zmienność NAO objaśnia od 26 do 38% obserwowanej zimą zmienności temperatury powietrza. Równie silny wpływ mają zmiany rocznego NAO na kształtowanie się rocznej SST ( $r$  od  $-0,50$  do  $-0,64$ ). Nieco słabsze związki zaznaczają się między NAO a zmiennością koncentracji lodów morskich.

Występujące w badanym okresie bardzo silne dodatnie trendy temperatury powietrza na tym obszarze oraz dodatnie trendy temperatury powierzchni morza i ujemne trendy koncentracji lodów morskich na Morzu Baffina i jego akwenach pobocznych w dużej części wynikają z tego, że w początkowej części rozpatrywanego okresu doszło na tym obszarze do bardzo silnego ochłodzenia. Było ono związane z wystąpieniem w roku 1983 oraz w latach 1989-1995 zim z bardzo wysokimi wartościami wskaźników NAO. Spowodowało to głębokie spadki temperatury zim (i temperatury rocznej) oraz intensywny rozwój lodów morskich na tych akwenach. Grunet i in. (2001) piszą, że rozwój lodów morskich na Morzu Baffina i wzdłuż wybrzeży Labradoru był w tych latach największy od czasów Małej Epoki Lodowej.

W zachodniej części badanego obszaru również wystąpił wyraźny wzrost rocznej temperatury powietrza. W badanym okresie 1982-2009 jest to wzrost o 4,1°C w Barrow i 2,0°C w Fort Smith. Na Morzu Beauforta zaznaczył się słaby wzrost rocznej temperatury powierzchni morza – do 0,7°C w SW części akwenu, jak i wyraźny wzrost SST na przełomie lata i jesieni. Istotny spadek rocznej zawartości lodu morskiego nastąpił jedynie w zachodniej części morza, znajdującej się pod wpływem cieplejszych wód wnikających do Morza Czukockiego przez Cieśninę Beringa. Analizy wykazały, że zmiany te pociąga za sobą cyrkulacja atmosferyczna charakteryzowana przez zmienność PNA. Podczas wystąpienia dodatniej fazy PNA nad zachodnią Kanadę napływa cieplejsze powietrze z sektora południowo-zachodniego (z nad Pacyfiku). Przyczynia się to do wzrostu temperatury powietrza na stacjach tej części badanego obszaru, zwłaszcza silnego na stacjach Subarktyki Kanadyjskiej (NW Territory).



Ryc. 8. Przebieg rocznych wskaźników NAO CRU i PNA w latach 1982-2009 i ich trendy

Fig. 8. Course of annual values of NAO CRU and PNA indices in the period 1982-2009 and their trends

Dodatnie trendy temperatury rocznej, choć o różnej sile, zaznaczają się na całym rozpatrywanym obszarze. Obie mody cyrkulacyjne, aby stanowiły przyczynę wzrostu temperatury powietrza na całym obszarze Arktyki Kanadyjskiej powinny występować w odmiennych fazach – NAO w fazie ujemnej, a PNA w fazie dodatniej. W rozpatrywanym okresie 1982-2009 NAO wykazuje trend spadkowy, PNA – słaby trend dodatni (patrz ryc. 8). Takie długookresowe trendy cyrkulacji atmosferycznej są zgodne z trendem rocznej temperatury powietrza na rozpatrywanym obszarze. Łączne działanie NAO i PNA objaśnia w badanym okresie około 24% zmienności średniej rocznej "obszarowej" temperatury powietrza (obliczonej jako średnia arytmetyczna ze wszystkich 18 analizowanych stacji). Taki odsetek



objaśnienia zmienności temperatury wskazuje, że cyrkulacja atmosferyczna jest jednym z czynników istotnie wpływających na wzrost temperatury, ale nie najważniejszym. Analiza regresji wskazuje, że uwzględnienie drugiej zmiennej, jaką jest temperatura powierzchni Morza Baffina (grid K), podnosi stopień objaśnienia zmienności temperatury "obszarowej" do 65%.

## Literatura

- Atlas Arktiki, 1985. Glavnoje Upravlenie Gieodezii i Kartografii pri Sovietie Ministrov, Moskva: 204 s.
- Grumet N.S., Wake C.P., Mayewski P.A., Zielinski G.A., Whitlow S.I., 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 (1–2): 129–145.
- Hinkel K.M., Nelson F.E., 2007. Anthropogenic heat island at Barrow, Alaska, during winter: 2001–2005. *Journal of Geophysical Research* 112: 10.1029/2006JD007837.
- Hinzman L.D., Bettez N.D., Bolton W.R., Chapin F.S., Dyurgerov M.B., Fastie C.L., Griffith B., Hollister R.D., Hope A., Huntington H.P., Jensen A.M., Jia G.I., Jorgenson T., Kane D.L., Klein D.R., Kofinas G., Lynch A.H., Lloyd A.H., McGuire A.D., Nelson F.E., Oechel W.C., Osterkamp T.E., Racine C.W., Romanovsky V.E., Stone R.S., Stow D.A., Sturm M., Tweedie C.E., Vourlitis G.L., Walker M.D., Winkler K.S., Yoshikawa K., 2005. Evidence and Implications of Recent Climate Change in Northern Alaska and Other Arctic Regions. *Climatic Change*, 72 (3): 251–298; DOI: 10.1007/s10584-005-5352-2.
- Jones P.D., Jónsson T., Wheeler D., 1997. Extension to the North Atlantic Oscillation using early instrumental pressure observations from Gibraltar and South-West Iceland. *International Journal of Climatology*, 17 (13): 1433–1450.
- Marsz A.A., 2008. Zmiany pokrywy lodów morskich Arktyki na przełomie XX i XXI wieku i ich związek z cyrkulacją atmosferyczną. *Problemy Klimatologii Polarnej*, 18: 7–33.
- Marsz A.A., Styszyńska A., 2009. Oceanic control of the warming processes in the Arctic – a different point of view for the reasons of changes in the Arctic climate. *Problemy Klimatologii Polarnej*, 19: 7–31.
- Maxwell J.B., 1981. Climatic Regions of the Canadian Arctic Islands. *Arctic*, 34 (3): 225–240.
- Overland J.E., Wang M., Salo S., 2008. The recent Arctic warm period. *Tellus*, 60A: 587–597. DOI: 10.1111/j.1600-0870.2008.00327.x
- Overpeck J., Hughen K., Hardy D., Bradley R., Case R., Douglas M., Finney B., Gajewski K., Jacoby G., Jennings A., Lamoureux S., Lasca A., MacDonald G., Moore J., Retelle M., Smith S., Wolfe A., Zielinski G., 1997. Arctic Environmental Change of the Last Four Centuries. *Science*, 278: 1251–1256.
- Reynolds R.W., Rayner N.A., Smith T.M., Stokes D.C., Wang W., 2002. An Improved In Situ and Satellite SST Analysis for Climate. *Journal of Climate*, 15 (13): 1609–1625.
- Vincent L.A., Gullett D.W., 1999. Canadian historical and homogeneous temperature datasets for climate change analyses. *International Journal of Climatology*, 19 (12): 1375–1388.
- 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., 2004. Zmiany temperatury wody na Prądzie Zachodniogrenlandzkim w okresie 1982–2003. *Problemy Klimatologii Polarnej*, 14: 29–37.
- Zblewski S., 2005. Wpływ zmian temperatury wody na Prądzie Zachodniogrenlandzkim na zmiany temperatury powietrza na Ziemi Baffina i Labradorze (1982–2002). *Problemy Klimatologii Polarnej*, 15: 41–51.

Wpłynęło: 21 września 2010; poprawiono: 12 grudnia 2010

## Summary

This work describes changes in air temperature in the region of Subarctic and Canadian Arctic and in the sea area adjacent to them and is an attempt to define the influence of atmospheric circulation on these changes. The analysis covered the air temperature, sea surface temperature and sea ice concentration. The analyzed period lasted from 1982-2009.

Positive trends in air temperature were noted over the whole area. The results of the research indicate that NAO is responsible for the changes in the air temperature, sea surface temperature and the concentration of sea ice in the region of the eastern part of the Canadian Arctic (the Baffin Bay, Baffin Island, Devon Island, the Bothnia Peninsula and Foxe Basin).

The direction of changes is opposite to the phase of NAO (negative phase of NAO – increase in sea and air temperatures, decrease in ice concentration, positive phase of NAO – just the other way round). The strongest impact of NAO on air temperature is observed in winter. The influence of winter NAO on sea surface temperature and on ice concentration is asynchronous (the strongest in summer) and employs action of an indirect factor, i.e. the thickness of ice.

West of Cambridge Bay – Baker Lake line the main factor responsible for the changes in air temperature is teleconnection pattern of PNA (Pacific-North American). Its impact is the strongest at the end of autumn and the beginning of winter (October-December). Most clearly the influence of PNA is marked in the region of the Canadian Subarctic (southern and central party of Northwest Territories), its influence becomes weaker northwards and north-eastward. Changeability of PNA has little influence on sea surface temperature of the Beaufort Sea and on its ice concentration. Positive phases of PNA are associated with the increase in air temperature.

The observed increase in annual air temperature over the entire area of the Canadian Arctic and Subarctic must be accompanied by negative phase of NAO in the same year and by positive phase of PNA. If in a given year there are the same phases of both oscillations, following the signs of these oscillations, positive anomalies in air temperature are observed in the Subarctic region and in the Canadian Arctic and negative anomalies in some parts. As in the analyzed period of NAO variability a negative trend is marked and in PNA a weak positive trend is noted, it may be assumed that the observed increase in air temperature over the Subarctic region and in the Canadian Arctic results, to a great extent, from long term changes in conditions of circulation.

**Key words:** Beaufort Sea, Hudson Bay, Baffin Bay, Canadian Arctic, climate change, atmospheric circulation, NAO, PNA.