

Współczesne zmiany klimatu w Arktyce

Rajmund Przybylak

Zakład Klimatologii UMK
ul. Danielewskiego 6, 87–100 Toruń

Wstęp

W ostatnich latach niemal w lawinowym tempie rośnie zainteresowanie klimatem i jego zmiennością w obszarach polarnych, w tym w Arktyce. Niewątpliwie do tego przysłużyła się rosnąca świadomość, wśród klimatologów i badaczy z pokrewnych dyscyplin, że procesy i zmiany zachodzące w polarnych systemach klimatycznych są kluczowe dla zidentyfikowania najważniejszych mechanizmów rządzących „pracą” globalnego systemu klimatycznego. Tempo badań wzrosło także w związku z ogłoszeniem w czerwcu 2003 r. idei organizacji IV Międzynarodowego Roku Polarnego 2007–2009. Fakt ten świadczy także dobitnie o tym, iż międzynarodowe forum naukowe, reprezentowane przez różne organizacje międzynarodowe, uznało za niewystarczający istniejący stan wiedzy o środowisku naturalnym obszarów polarnych. Wreszcie nie mniej ważną przyczyną obserwowanego wyraźnego wzrostu zainteresowania się obszarami polarnymi jest postępujące ocieplenie klimatu globalnego, szczególnie w okresie ostatnich 30 lat. Większość modeli klimatycznych sugeruje bowiem, iż w obszarach polarnych ocieplenie to powinno być powiększone (ang. polar amplification) i powinno wystąpić wcześniej. Analiza serii obserwacyjnych nie jest jednak już tak jednoznaczna (np. Przybylak 2000, Polyakov i in. 2003, Styszyńska 2005).

Prostym miernikiem rosnącego zainteresowania się klimatem Arktyki jest m.in. powiększająca się z roku na rok liczba organizowanych workshopów, konferencji, czy też wydawanych różnorodnych publikacji. W ostatnich latach ukazało się wiele publikacji (artykułów i książek) podsumowujących stan naszej wiedzy dotyczącej klimatu i szerzej środowiska naturalnego Arktyki (definiowanej jednak w różny sposób). Dlatego też nie ma potrzeby tutaj powtarzać tych informacji, które czytelnik może znaleźć m. in. w następujących pracach: Przybylak (1996, 2000, 2002, 2003), Serreze i in. (2000), Bobylev i in. (2003), ACIA (2004), Serreze i Barry (2005), Styszyńska (2005), Turner i in. (w druku).

W niniejszym opracowaniu w sposób jak najbardziej syntetyczny przedstawiona jest współczesna zmienność klimatu Arktyki, głównie jednak dla okresu drugiej połowy XX wieku. Najbardziej szczegółowo zostały omówione dwa najważniejsze elementy klimatyczne (temperatura powietrza i opad atmosferyczny), dla których dostępnych jest najwięcej opracowań. Dla większości pozostałych elementów klimatycznych dostępność informacji jest dużo mniejsza, a jej zakres mniej kompletny.

Dane i metody

W niniejszym podsumowaniu stanu wiedzy dotyczącej klimatu Arktyki wykorzystano przede wszystkim istniejącą literaturę. Niemniej w przypadku najważniejszego elementu klimatycznego, czyli temperatury powietrza (T), istniejąca i opracowana seria pomiarowa obejmująca lata 1951–2000 (Przybylak 2002, 2003) została zaktualizowana do 2004 roku. Wykorzystano w tym celu te same źródła danych i metody badawcze, które zostały opisane we wspomnianych wcześniej publikacjach, jak również w bardziej dostępnej publikacji Przybylaka (1996).



Rys. 1. Lokalizacja stacji meteorologicznych z których wykorzystano dane do niniejszej pracy

Pojęcie obszaru Arktyki (w opracowaniu nazwany Arktyka 1) i regionów klimatycznych jest przyjęte według Atlasu Arktyki (Atlas Arktiki 1985). Wielu innych autorów stosuje dla wydzielenia Arktyki różne inne kryteria. Najczęściej z przyczyn praktycznych, za Arktykę przyjmuje się obszar leżący powyżej np. 60°N (w opracowaniu nazwany Arktyka 3), 62°N , 65°N (w opracowaniu – Arktyka 2), czy 70°N . Brak uzgodnień dotyczących kryteriów wyróżniania południowej granicy Arktyki jest często głównym powodem uzyskiwania odmiennych wyników badań w przypadku konstruowania średnich wartości obszarowych. Więcej szczegółów na ten temat znaleźć można w pracach Przybylaka (1996, 2002, 2003). Na rysunku 1 przedstawiono lokalizację stacji meteorologicznych, z których wzięto dane meteorologiczne dotyczące temperatury powietrza i opadów atmosferycznych.

Wyniki

Zachmurzenie i promieniowanie słoneczne

Przegląd literatury poświęconej długookresowym zmianom zachmurzenia w Arktyce wykazał, że tego typu prac jest niezwykle mało. W zasadzie istnieją tylko 4 opracowania: Raatz 1981, Mokhov 1991 i Przybylak 1996, 2002. W pierwszym z nich, korzystając z danych zaledwie 5 stacji arktycznych z okresu 1921–1978, nie stwierdzono istnienia trendów w zachmurzeniu. W drugiej pracy,

opierającej się na danych satelitarnych z okresu 1971–1985, analizuje się głównie relacje między zachmurzeniem w Arktyce a temperaturą półkuli północnej. Niestety autor nie podaje jaka była tendencja zachmurzenia w badanym okresie. Przybylak (1996, 2002) na podstawie danych z 19 stacji arktycznych wykazał istnienie dodatnich trendów średnich rocznych wartości zachmurzenia w okresie 1961–1990 na Grenlandii, w Arktyce Norweskiej i Rosyjskiej (z wyjątkiem półwyspu Czukotka). Ujemne trendy stwierdzono, oprócz wspomnianego półwyspu Czukotka, także na Alasce oraz w Arktyce Kanadyjskiej, z wyjątkiem jej wschodnich fragmentów. Nad większością z analizowanych stacji wzrost zachmurzenia wystąpił w zimie, a szczególnie wiosną. Latem i jesienią był on notowany odpowiednio jedynie w 8 i 9 stacjach.

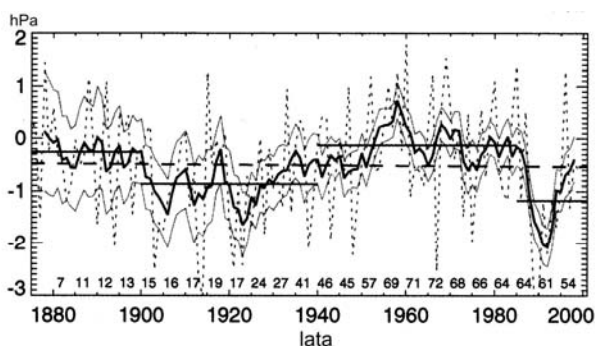
W przypadku oceny tendencji zmian w dopływie promieniowania słonecznego i bilansu radiacyjnego istnieje wciąż praktycznie tylko jedno opracowanie (Stanhill 1995). Badania prowadzone przez tego badacza dowiodły, iż w okresie 1950–1994 wystąpił w Arktyce istotny spadek dopływu promieniowania słonecznego; promieniowanie całkowite obliczone na podstawie danych z 22 stacji zmniejszało się w tym czasie w tempie 0.36 W/m^2 na rok $\pm 0.05 \text{ W/m}^2$. Było ono największe w okresie wiosennym, szczególnie w zachodniej części Arktyki, gdzie powietrze arktyczne jest najbardziej zanieczyszczone i gdzie w związku z tym często występuje zamglenie określane w literaturze angielskiej terminem *Arctic haze*. Stanhill (1995) nie dysponując danymi o zmienności zachmurzenia, za przyczynę tego spadku promieniowania w Arktyce uważał jedynie wzrost transportu zanieczyszczeń na jej obszar. Warto w tym miejscu jednak zauważyć, iż jak wcześniej wspomniano, na większości obszaru Arktyki obserwowany jest wzrost zachmurzenia, który zapewne w pewnym stopniu jest związany ze wzrostem zanieczyszczenia powietrza, ale też w nie mniejszym stopniu, może być efektem naturalnych jego fluktuacji. Zatem wydaje się prawdopodobne, że oprócz wzrostu zanieczyszczeń powietrza także wzrost zachmurzenia przyczynił się do ujemnego trendu promieniowania słonecznego występującego w Arktyce w okresie 1950–1994. Rozkład istotnych statystycznie trendów średnich miesięcznych wartości bilansu radiacyjnego w analizowanych 22 stacjach arktycznych był podobny, jak w przypadku omówionego promieniowania całkowitego. Znaczna część tych przypadków wystąpiła w marcu i kwietniu (29%) oraz w okresie luty-maj (50%).

Ciśnienie, wiatr i cyrkulacja atmosferyczna

W okresie 1880–2000 średnie roczne ciśnienie atmosferyczne na obszarze powyżej 62°N obliczone na podstawie danych pochodzących ze stacji meteorologicznych wykazuje istotny statystycznie spadek wynoszący $-0.05 \text{ hPa}/100$ lat (Polyakov i in. 2003). Duży wzrost ciśnienia atmosferycznego odnotowano w okresie 1920–1960, a jego znaczny spadek w ostatnich 40 latach, z wyraźnym minimum na początku lat 1990-tych (rys. 2). W tym czasie średnie roczne ciśnienie było najniższe (2 hPa poniżej normy wieloletniej) w całym omawianym okresie. Przedstawiony na rysunku 2 wieloletni przebieg średnich rocznych wartości ciśnienia zależy głównie od jego zmian w okresie zimowym (zobacz rys. 4 w Polyakov i in. 2003). W okresie 1880–2000, w poszczególnych porach roku trendy były następujące: zima (0.04 hPa/10 lat), lato ($-0.01 \text{ hPa}/10$ lat), jesień ($-0.10 \text{ hPa}/10$ lat). Opisany znaczny spadek ciśnienia atmosferycznego w ostatnich 40 latach był jednak spowodowany bardzo dużym (o 6 hPa) spadkiem średniego ciśnienia w zimie.

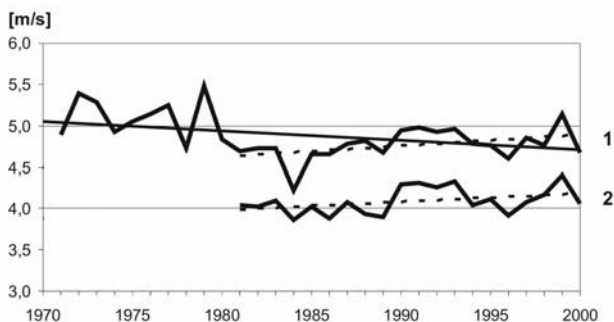
Inne opracowania, oparte na danych pochodzących z krótszych okresów i z innych źródeł, dają wyniki zgodne z wyżej przedstawionymi wynikami Polyakova i in. (2003). Walsh i in. (1996) wykorzystując dane z pomiarów przeprowadzonych na pływających bojach stwierdzili w okresie

1987–1994 spadek ciśnienia atmosferycznego nad obszarem Oceanu Arktycznego w porównaniu z okresem 1979–1986. Z kolei Cullather i Lynch (2003) wykorzystując dane z reanalizy NCEP/NCAR wykazali istnienie spadkowego trendu ciśnienia nad biegunem północnym w okresie 1949–2000. Podobnie jak w poprzednich opracowaniach najniższe ciśnienie atmosferyczne wystąpiło na przełomie lat 1980/1990. Omawiani autorzy wykazali także, iż ciśnienie atmosferyczne na biegunie północnym jest silnie ujemnie skorelowane z Oscylacją Arktyczną (AO) oraz Oscylacją Północno-atlantycką (NAO). W przypadku obydwu indeksów cyrkulacji najsłabsze korelacje zachodzą jesienią (odpowiednio -0.575 i -0.042). W pozostałych porach roku i średnio dla roku są one znacznie silniejsze (<-0.8 dla AO i <-0.4 dla NAO).



Rys. 2. Anomalie średnich rocznych wartości ciśnienia atmosferycznego uśrednionych dla obszaru powyżej 62°N. Linia przerywana krótka – średnie roczne; linia ciągła gruba – średnie 6-letnie ruchome; linie ciągłe cienkie – zakresy przedziału ufności $\alpha = 95\%$ (Polyakov i in. 2003, zmienione)

Wieloletnia zmienność warunków anemologicznych w Arktyce nie doczekała się do tej pory żadnego opublikowanego opracowania. Dlatego też dla celów niniejszego przeglądu przytoczono niektóre ważniejsze wyniki badań dla obszaru Arktyki Norweskiej uzyskane w ramach realizacji pracy doktorskiej (Araźny 2005). Średnia prędkość wiatru (na wysokości 2 m n.p.t. – nad poziomem terenu) obliczona na podstawie danych z 3 stacji meteorologicznych (Jan Mayen, Björnøya, Hopen) wykazała w okresie 1971–2000 ujemne trendy we wszystkich porach roku z wyjątkiem zimy. Statystycznie istotne trendy na poziomie 0.05 średnich prędkości wiatru stwierdzono dla wiosny (-0.14 m/s na 10 lat), lata (-0.16 m/s na 10 lat) i roku (-0.11 m/s na 10 lat). Jak widać na rysunku 3, ujemne trendy wartości średnich rocznych, i zapewne sezonowych, zostały spowodowane wyraźnie większymi prędkościami wiatru w latach 1970-tych. Dla całej Arktyki Norweskiej (obejmującej także stacje spitsbergeńskie: Ny Ålesund, Svalbard Lufthavn i Hornsund) ze względu na późny czas rozpoczęcia w tym rejonie obserwacji meteorologicznych dostępne są dane dla krótszego okresu (1981–2000). W okresie tym trendy średnich sezonowych i rocznych prędkości wiatru obliczane zarówno z 3, jak i z 6 stacji są już dodatnie (rys. 3). W przypadku średnich rocznych wynoszą one odpowiednio 0.14 oraz 0.12 m/s na 10 lat i są statystycznie istotne na poziomie 0.05. Prezentowane serie są ze sobą ściśle skorelowane ($r = 0.83$), a zatem można stwierdzić, iż średnie ich wartości obliczane z 3 stacji dobrze reprezentują zmiany warunków anemologicznych także w całej Arktyce Norweskiej. Wyniki uzyskane dla okresu 1981–2000 dobrze korespondują z obserwowanymi zmianami ciśnienia atmosferycznego i cyrkulacji atmosferycznej w Arktyce.



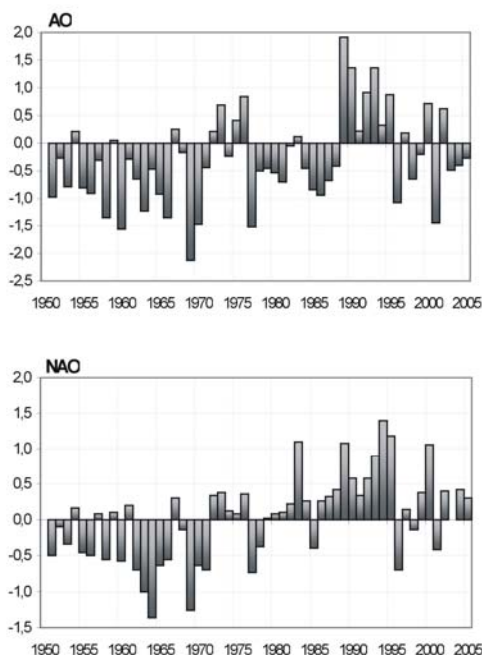
Rys. 3. Uśrednione obszarowo średnie roczne prędkości wiatru na wysokości 2 m nad poziomem terenu w Arktyce Norweskiej w okresie 1971–2000. 1 – Jan Mayen, Björnøya i Hopen, 2 – Jan Mayen, Björnøya, Hopen, Ny Ålesund, Svalbard Lufthavn i Hornsund

Opisanym zmianom ciśnienia atmosferycznego towarzyszą także odpowiednie zmiany aktywności synoptycznej stwierdzone już przez Serreze'go i in. (1993). Wykazali oni, że w okresie 1952–1989 wzrosła w Arktyce zarówno liczba cyklonów, jak i antycyklonów. Liczebność tych pierwszych powiększyła się w zimie, wiosną i latem, podczas gdy antycyklonów – wiosną, latem i jesienią. W kolejnym swoim artykule (Serreze i in. 1997) badacze ci potwierdzili wzrost aktywności cyklonalnej na obszarze powyżej 60°N w okresie od połowy lat 1960-tych, zarówno w okresie zimowym, jak i letnim. Jednocześnie wykazali oni także, że wzrost ten jest największy na obszarze o największym spadku ciśnienia atmosferycznego. Nowsze badania (Turner i in., w druku) dowiodły także wzrostu intensywności głównych ośrodków barycznych, które chociaż są zlokalizowane w Subarktyce, to wywierają istotny wpływ na klimat Arktyki. Średnie ciśnienie atmosferyczne w okresie 1970–1999 względem 1945–1969 znacznie zmalało w niżach Islandzkim i Aleuckim, a wzrosło w Wyżu Syberyjskim.

Kończąc omawianie współczesnej zmienności ciśnienia atmosferycznego, wiatru i cyrkulacji atmosferycznej w Arktyce nie można nie wspomnieć o tendencjach obserwowanych w wielkościach zmian indeksów AO i NAO, które wyjaśniają około 20–30% zmienności ciśnienia atmosferycznego i do około 50% zmienności temperatury powietrza w Arktyce (Przybylak 2000, Rigor i in. 2000, ACIA 2004). Krótko charakteryzując wspomniane indeksy należy podać, iż AO i NAO są odpowiednio dominującymi wzorami zmienności cyrkulacji atmosferycznej na półkuli północnej powyżej 20°N i w regionie Atlantyku Północnego oraz, że są ze sobą ściśle skorelowane, szczególnie w zimie. Dlatego też często obydwa indeksy używane są zamiennie. Więcej szczegółów na temat indeksów AO i NAO można znaleźć w bogatej już literaturze polskiej (np. Marsz i Styszyńska 1999, 2000; Wibig 2000, 2001; Przybylak i in. 2003) lub zagranicznej (np. Wanner i in. 2001, Hurrell i in. 2003).

Wpływ AO/NAO na klimat jest największy w zimie, dlatego też dla tej pory roku, rozszerzonej o listopad i marzec (XI–III) przedstawiono tendencje ich zmian. W okresie 1951–1988 wyraźnie przeważały ujemne wartości indeksów AO/NAO, z maksimum w latach 1960. W okresie 1989–1995 występowały wyłącznie ich dodatnie wartości, a od 1996 do 2004 roku z mniej więcej równą częstotliwością występowały zarówno wartości dodatniej, jak i ujemne (rys. 4). Warto zauważyć, że wysokim wartościom AO/NAO odpowiadają niskie wartości ciśnienia atmosferycznego w Arktyce, co szczególnie dobrze jest widoczne w okresie 1989–1995. Dodatnie wartości AO/NAO powodują również wzmocnienie wiru polarnego i spadek temperatury w stratosferze (Turner i in., w druku) oraz prze-

sunięcie na północ obszaru o największej aktywności cyklonalnej (Serreze i in. 1997). Problem przyczyn występowania w ostatnich latach dodatnich trendów AO/NAO nie jest do tej pory wyjaśniony. Modele klimatyczne wykazują bowiem możliwość istnienia takiego trendu, zarówno po uwzględnieniu rosnącej koncentracji gazów cieplarnianych (efekt cieplarniany), jak i przy niezmiennych warunkach radiacyjnych w atmosferze.



Rys. 4. Średnie zimowe (XI–III) wartości indeksów cyrkulacji AO i NAO w okresie 1951–2005.

Źródło: http://www.cpc.noaa.gov/products/precip/CWlink/all_index.html

Jak wspomniano wcześniej AO/NAO wyjaśnia tylko część stwierdzonej zmienności ciśnienia atmosferycznego w Arktyce. Dla sektora pacyficznego Arktyki ważna jest zmienność cyrkulacji atmosferycznej na Pacyfiku Północnym, którą ocenia się korzystając najczęściej z dwóch indeksów: Pacyfik-Ameryka Północna (PNA) i Pacyficzna Oscylacja Dekadowa (PDO). Pierwsza wielkość jest drugim najważniejszym wzorem cyrkulacji atmosferycznej na półkuli północnej powyżej 20°N (Quadrelli i Wallace 2004), natomiast PDO jest dominującym rozkładem występującym w polu temperatury powierzchni wody na Pacyfiku Północnym powyżej 20°N i wg Turnera i in. (w druku) reprezentuje ona długookresowe wahania PNA w regionie Pacyfiku Północnego. Średnie roczne wartości wskaźnika PDO wykazują brak trendu i bardzo niskie wartości w okresie od 1950 roku do około połowy lat 1970-tych. Na przełomie lat 1970/1980 wystąpił znaczny wzrost wartości indeksu, który utrzymywał się do końca XX wieku na wysokim poziomie. W ostatnich kilku latach wartości PDO ponownie zmalały (rys. 8 w pracy Turnera i in., w druku). Warto dodać, iż w przeciwieństwie do AO/NAO, indeks PDO na przełomie lat 1980/1990-tych nie był najwyższy w ciągu XX wieku. Podobne jego wartości wystąpiły także na przełomie lat 1930/1940.

Podsumowując trzeba podkreślić, iż w ostatnich kilkudziesięciu latach wystąpiły znaczne zmiany ciśnienia atmosferycznego, prędkości wiatru i cyrkulacji atmosferycznej reprezentowanej przez różne indeksy (AO, NAO, PNA i PDO) oraz inne charakterystyki (aktywność synoptyczna, cyklonalna, antycyklonalna).

Temperatura powietrza

Szczegółowe badania zmienności temperatury powietrza w Arktyce w okresach 1936–1990 i 1951–1990 (Przybylak 1996, 2002), jak również dla okresu 1951–1995 (Przybylak 2000) wykazały dominację ujemnych trendów, które jednak w większości nie były statystycznie istotne. Nieznaczny wzrost temperatury (T) był obserwowany tylko po 1975 r. (druga faza współczesnego ocieplenia globalnego). Jednakże wzrost uśrednionej obszarowo temperatury Arktyki w latach 1976–1995 był aż 4-krotnie mniejszy niż analogicznej serii temperatury dla półkuli północnej (łąd+ocean). Na tej podstawie można stwierdzić, że do ok. połowy 1990. lat wpływ efektu cieplarnianego na T Arktyki był nieznaczny lub też, jak sugeruje Przybylak (2000, 2002), był redukowany przez antycieplarniany efekt aerozolu siarczanowego i wpływ czynników naturalnych.

Przybylak (2002) wykazał, iż w połowie lat 1990. wystąpił skokowy wzrost T w Arktyce wynoszący ok. 1C, który utrzymywał się do końca XX wieku. Dla celów niniejszego opracowania seria ta została przedłużona do 2004 roku. Wyniki obliczeń przedstawione w tabelach 1-3 i na rysunkach 5 i 6 wyraźnie dowodzą, iż wysokie wartości temperatury powietrza wciąż występują w Arktyce. W tabeli 1 prezentowane są ich anomalie za okresy 1995–2004 i 2001–2004 w porównaniu do okresu 1951–1990. Widać z niej, że średnie roczne wartości anomalii dla rzeczywistej Arktyki (Arktyka 1, Arktyka 4, granice wg Atlasu Arktyki 1985) są nieco większe niż dla Arktyki definiowanej w inny sposób (Arktyka 2 i Arktyka 3) i około 2 razy większe niż dla półkuli północnej.

Tabela 1

Anomalie średnich sezonowych i rocznych temperatury powietrza (w °C) w Arktyce względem 1951–1990

Sezon	XII–II		III–V		VI–VIII		IX–XI		Rok	
Okres	1995–2004	2001–2004	1995–2004	2001–2004	1995–2004	2001–2004	1995–2004	2001–2004	1995–2004	2001–2004
Region atlantycki	0.50	0.58	1.25	1.03	0.53	1.07	0.97	1.17	0.82	1.02
Region syberyjski	0.29	–0.60	0.96	0.90	0.45	0.71	0.88	1.01	0.60	0.53
Region pacyficzny	0.90	2.34	2.31	2.94	0.87	1.70	1.92	2.42	1.56	2.34
Region kanadyjski	1.30	1.50	1.13	0.24	0.76	0.47	1.75	1.86	1.21	0.93
Region M. Baffina	0.99	2.23	0.86	1.29	0.57	0.93	1.12	1.80	0.90	1.46
Arktyka 1	0.87	1.20	1.27	0.99	0.65	0.84	1.38	1.60	1.04	1.13
Arktyka 2	0.89	0.92	1.16	1.10	0.64	0.91	1.06	1.33	0.93	1.07
Arktyka 3	1.06	1.16	1.10	1.10	0.67	0.94	0.92	1.22	0.94	1.10
Arktyka 4	0.95	1.08	1.36	1.16	0.75	0.92	1.32	1.58	1.10	1.20
NH (łąd + ocean)	0.57	0.62	0.50	0.57	0.47	0.53	0.46	0.61	0.50	0.58

Arktyka 1 – średnia temperatura obliczona z 33-35 stacji arktycznych

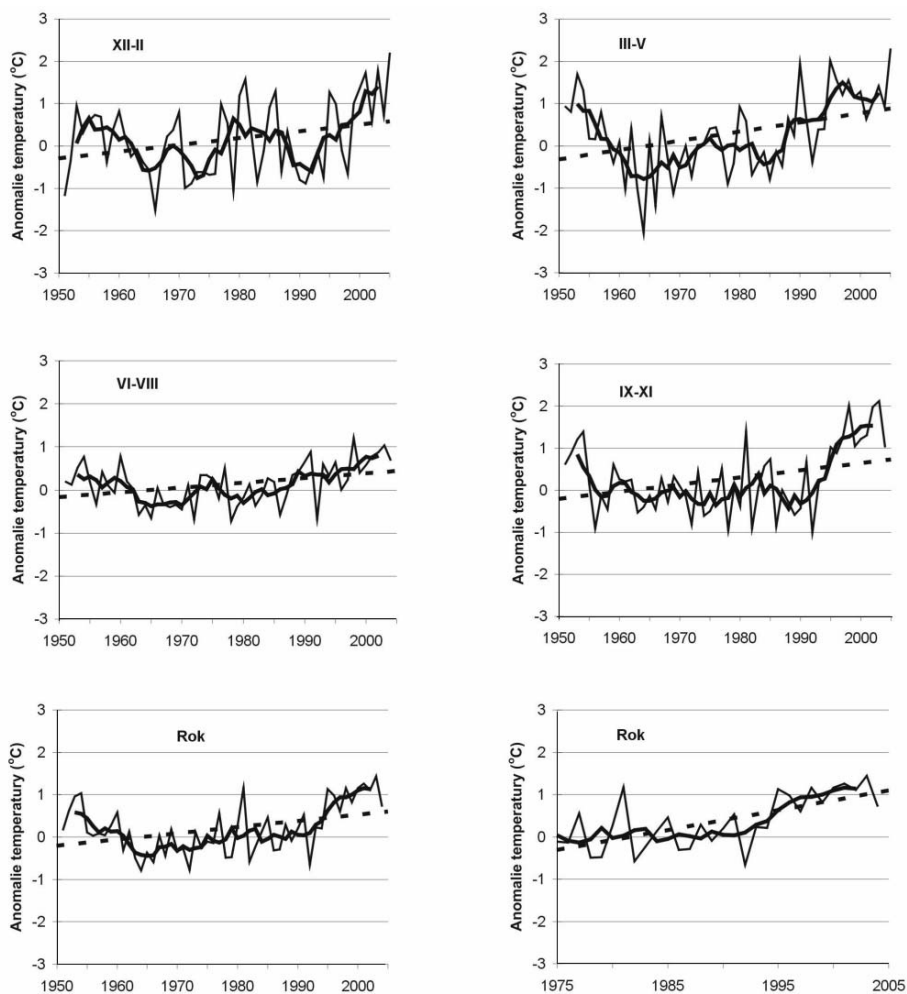
Arktyka 2 – średnia temperatura strefy 65-90°N (źródło: Jones i in. 1999, uaktualnione)

Arktyka 3 – średnia temperatura strefy 60-90°N (źródło: Jones i in. 1999, uaktualnione)

Arktyka 4 – średnia temperatura obliczona z 18-19 stacji posiadających długie serie

NH (łąd+ocean) – średnia temperatura Półkuli Północnej (źródło: Jones i in. 1999, uaktualnione)

Wytłuszczono najwyższe wartości anomalii na danym obszarze i w rozpatrywanym okresie



Rys. 5. Anomalie średnich sezonowych i rocznych wartości temperatury powietrza i ich trendy w Arktyce w okresie 1951–2004 (obliczone na podstawie 33–35 stacji).

Objaśnienia: cienkie linie ciągłe – przebiegi z roku na rok, grube linie ciągłe – średnie ruchome 5-letnie, linie przerywane – trendy liniowe

W Arktyce rzeczywistej anomalia średniej rocznej temperatury powietrza w okresie 1995–2004 wyniosła 1.04°C . W przebiegu rocznym największe ocieplenie wystąpiło jesienią (1.38°C) i wiosną (1.27°C), a najmniejsze latem (0.65°C). Ocieplenie największe było w regionach pacyficznym (1.56°C) i kanadyjskim (1.21°C), a najmniejsze w regionie syberyjskim (0.60°C). Jeszcze cieplejsze były ostatnie 4 lata. W porównaniu z okresem 1951–1990 średnia roczna T była wyższa o 1.13°C (tab. 1). W tym czasie znaczne ocieplenie zanotowano w regionach pacyficznym (2.34°C) i Morza Baffina (1.46°C). Wciąż najmniejszym ociepleniem charakteryzuje się region syberyjski (0.53°C). W przypadku wszystkich 35 analizowanych stacji, większość z nich była w ostatnich latach (2001–2004) cieplejsza niż w którymkolwiek z wcześniejszych okresów 5-letnich począwszy od 1951 roku.

Trendy temperatury powietrza

1936–2004. W okresie 1936–2004 statystycznie istotne trendy T w Arktyce wystąpiły wiosną ($0.10^{\circ}\text{C}/10$ lat) i latem ($0.07^{\circ}\text{C}/10$ lat). W pozostałych dwóch porach roku trendy T były nieznacznie ujemne ($-0.02^{\circ}\text{C}/10$ lat). Ujemne i statystycznie istotne trendy T były notowane w stacjach zlokalizowanych w regionie syberyjskim i na Grenlandii. Na pozostałym obszarze Arktyki trendy temperatury były dodatnie, lecz w większości nieistotne statystycznie (tab. 2).

Tabela 2

Sezonowe (XII–II, III–V, VI–VIII, IX–XI) i roczne (Rok) trendy temperatury powietrza ($^{\circ}\text{C}/10$ lat) w Arktyce w okresie 1936–2004

Stacja/region	XII–II	III–V	VI–VIII	IX–XI	Rok
Angmagssalik	-0.01	-0.16	-0.15 #	-0.02	-0.09
Jan Mayen	0.01	0.11	0.03	-0.02	0.03
Svalbard Lufthavn	-0.31	0.26 *	0.14 #	-0.03	0.02
Björnöya	-0.17	0.25 *	0.08	-0.06	0.03
Naryan Mar	-0.23	0.23	0.03	-0.25 *	-0.03
Ostrov Dikson	-0.40 *	0.00	-0.07	-0.26	-0.18*
Khatanga	-0.20	0.14	0.03	-0.10	-0.03
GMO E. K. Fedorova	-0.50 **	0.05	-0.03	-0.38 **	-0.21 **
Ostrov Kotelný	-0.14	0.09	-0.01	-0.24 *	-0.08
Mys Shmidta	0.03	0.30 *	0.18 **	0.05	0.14 *
Ostrov Vrangel ^a	0.12	0.13	-0.01	-0.01	0.06
Barrow	0.22	0.30 **	0.16 *	-0.04	0.16 *
Inuvik	0.51 #	0.22	0.22 **	0.14	0.26 #
Coppermine A ^a	0.26	0.06	0.16	0.08	0.14
Cambridge Bay A	0.27 *	-0.00	0.11	0.19	0.14
Churchill A	0.22	0.15	0.12	0.04	0.13
Coral Harbour A	0.02	-0.12	0.21 **	0.21	0.07
Kuujuarapik A	0.06	0.05	0.23 **	0.14	0.11
Godthab	-0.21	-0.29 **	-0.21 #	0.01	-0.18 **
Arktyka 2	0.00	0.11 *	0.06 *	-0.05	0.03
Arktyka 3	0.08	0.15 #	0.07 **	-0.02	0.07 *
Arktyka 4	-0.02	0.10 *	0.07 *	-0.02	0.03
NH (ląd+ocean)	0.09 #	0.08 #	0.06 #	0.04 #	0.07 #

*, **, # – trendy statystycznie istotne odpowiednio na poziomach 0.05, 0.01 oraz 0.001

^a – dane z okresu 1936–2002. Pozostałe objaśnienia jak w tabeli 1

1951–2004. Trendy uśrednionej obszarowo T Arktyki (Arktyka 1) były w okresie 1951–2004 dodatnie we wszystkich porach roku i średnio dla roku (tab. 3, ryc. 5). Z wyjątkiem zimy były one też istotne statystycznie. Po uwzględnieniu obszarów leżących w niższych szerokościach geograficznych (Arktyka 2 i Arktyka 3) trendy T są większe i statystycznie istotne także w zimie. Trendy uśrednionej T dla półkuli północnej ($0.11^{\circ}\text{C}/10$ lat) dla średnich rocznych są nieznacznie niższe niż dla rzeczywistej Arktyki ($0.15^{\circ}\text{C}/10$ lat). Charakterystyczną cechą zmian temperatury w Arktyce jest ich większy wzrost wiosną ($0.19^{\circ}\text{C}/10$ lat) i jesienią ($0.17^{\circ}\text{C}/10$ lat) niż w pozostałych porach roku, w tym szczególnie w zimie (tab. 3).

Statystycznie istotne pozytywne trendy średniej rocznej T uśrednionej obszarowo stwierdzono dla regionów pacyficznego ($0.37^{\circ}\text{C}/10$ lat) i kanadyjskiego ($0.16^{\circ}\text{C}/10$ lat). Ujemne trendy wystąpiły

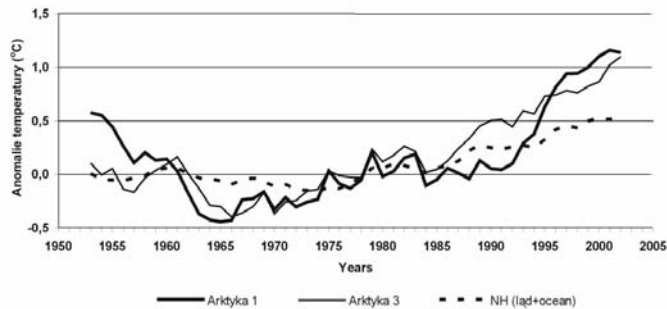
tylko w regionie M. Baffina ($-0.03^{\circ}\text{C}/10$ lat). W pozostałych dwóch regionach (atlantyckim i syberyjskim) statystycznie istotne dodatnie trendy zanotowano tylko wiosną (tab. 3).

Tabela 3

Sezonowe (XII–II, III–V, VI–VIII, IX–XI) i roczne (Rok) trendy temperatury powietrza ($^{\circ}\text{C}/10$ lat) w Arktyce

Obszar	1951–2004					1976–2004				
	XII–II	III–V	VI–VIII	IX–XI	Rok	XII–II	III–V	VI–VIII	IX–XI	Rok
R. atlantycki	-0.01	0.29**	0.08	0.06	0.10	0.43	0.61*	0.41#	0.47*	0.49**
R. syberyjski	0.08	0.27*	0.03	0.10	0.12	-0.05	0.65*	0.25	0.42	0.37
R. pacyficzny	0.45**	0.48**	0.28#	0.27	0.37#	0.09	1.20**	0.36	0.72	0.60*
R. kanadyjski	0.18	0.09	0.12	0.28*	0.16*	0.28	0.44	0.48**	0.91**	0.49*
R. M. Baffina	-0.04	-0.18	-0.02	0.13	-0.03	0.28	0.40	0.48**	0.79**	0.46
Arktyka 1	0.13	0.19*	0.11**	0.17*	0.15**	0.28	0.62#	0.40#	0.68#	0.48#
Arktyka 2	0.20**	0.28#	0.14#	0.14*	0.19#	0.32	0.60#	0.40#	0.51#	0.45#
Arktyka 3	0.28#	0.30#	0.14#	0.13**	0.21#	0.41*	0.52#	0.41#	0.42#	0.43#
NH (ląd+ocean)	0.13#	0.12#	0.10#	0.10#	0.11#	0.28#	0.24#	0.24#	0.24#	0.25#

*, **, # – trendy statystycznie istotne odpowiednio na poziomach 0.05; 0.01 oraz 0.001
Pozostałe objaśnienia jak w tab. 1



Rys. 6. Średnie roczne 5-letnie ruchome anomalie temperatury powietrza w Arktyce (Arktyka 1 i Arktyka 3) i na półkuli północnej (NH (ląd+ocean)) w okresie 1951–2004.

Objaśnienia: Arktyka 1 – uśredniona obszarowo temperatura powietrza (T) z 33–35 stacji arktycznych (zobacz rys. 1); Arktyka 3 – uśredniona obszarowo T dla strefy 60–90°N (za Jones i in. 1999, uaktualniona); NH (ląd+ocean) – uśredniona obszarowo T dla półkuli północnej (za Jones i in. 1999, uaktualniona)

1976–2004. W okresie 1976–2004 wystąpił znaczny wzrost temperatury powietrza w Arktyce, szczególnie, jak wcześniej wspomniano, w ostatnich 10 latach (ryc. 5 i 6). W rezultacie uśrednione obszarowo trendy T są w Arktyce wyraźnie większe niż w dwóch wcześniej opisanych okresach. Podobnie jak w okresie 1951–2004, statystycznie istotne trendy T wystąpiły we wszystkich porach roku, z wyjątkiem zimy (tab. 3). Ponownie największe trendy temperatury powietrza były odnotowane wiosną ($0.62^{\circ}\text{C}/10$ lat) i jesienią ($0.68^{\circ}\text{C}/10$ lat). Dodatkowo trendy uśrednionej obszarowo średniej T rocznej wystąpiły we wszystkich regionach. Są one też statystycznie istotne, z wyjątkiem regionów syberyjskiego i Morza Baffina. Największy wzrost średniej rocznej T zanotowano w regionie pacyficznym ($0.60^{\circ}\text{C}/10$ lat), a najmniejszy w regionie syberyjskim ($0.37^{\circ}\text{C}/10$ lat). W żadnym regionie nie wystąpiły statystycznie istotne trendy w zimie.

Podsumowując należy stwierdzić, że znaczące ocieplenie w Arktyce (o ok. 1°C) rozpoczęło się z około 20-letnim opóźnieniem w stosunku do globalnego ocieplenia, które uwidoczniło się w połowie lat 1970-tych (rys. 6). Ponadto wystąpiło ono w sposób skokowy. Z rysunku 6 wynika też wyraźnie, iż dopiero w połowie lat 1990-tych anomalie średniej T Arktyki stały się większe niż anomalie średnich T strefy 60–90°N i półkuli północnej. Można stwierdzić też, że obecnie sytuacja jest pod tym względem podobna do tej z lat 1950-tych, które kończyły okres ocieplenia Arktyki rozpoczęty w latach 1920-tych. Wielkości temperatury powietrza obserwowanej po 1995 roku są porównywalne z notowanymi T w Arktyce w latach 1930-tych i 1940-tych. Wiosny i lata są obecnie nawet cieplejsze, a jesienie i zimy tylko nieznacznie chłodniejsze. Jednak rozkład przestrzenny wielkości zmian T był w obydwu okresach odmienny. W latach 1930-tych i 1940-tych najbardziej ocieplili się region atlantycki, podczas gdy obecnie największe wzrosty T odnotowano w regionach pacyficznym i kanadyjskim. Niezgodność istnieje także gdy analizujemy wielkości zmian T w cyklu rocznym. W latach 1930-tych i 1940-tych ocieplenie najsilniejsze było zimą, podczas gdy współcześnie jest ono największe w porach przejściowych. Zachowanie się temperatury powietrza zimą w ostatnich kilkudziesięciu latach jest niezgodne z prognozami jej zmian symulowanymi przez modele klimatyczne.

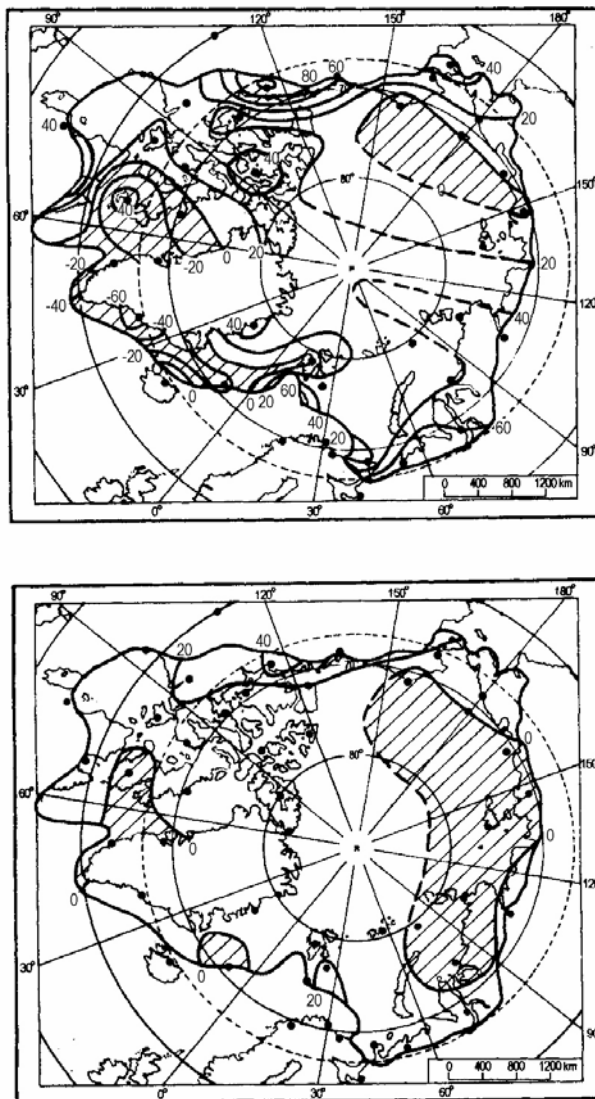
Opady atmosferyczne

Opady atmosferyczne (P) są niezwykle ważnym elementem klimatycznym, wciąż niedostatecznie zbadanym w Arktyce. Fakt ten wynika przede wszystkim z trudności pomiarowych tego elementu, szczególnie w warunkach panującej tu długotrwałej zimy (przewaga opadów stałych) i występujących silnych wiatrów. Zmierzone P jak się ocenia mogą być nawet do ok. 40% niższe niż P rzeczywiste. Ponadto niemal wszystkie stacje arktyczne leżą na wybrzeżach, na wysokościach nie przekraczających 200 m n.p.m. Tymczasem pomiary opadów na lodowcach wykazały, iż są one tam kilkakrotnie większe niż na tundrze (Kosiba 1960, Baranowski 1968, Marciniak i Przybylak 1985). Trudności te nie zachęcają do opracowywania tego elementu i powodują, że nasza o nim wiedza nie jest w pełni wiarygodna. Wydaje się też, że wciąż nie w pełni doceniana jest rola opadów w różnorodnych procesach fizycznych, w tym szczególnie ich wpływu na zachowanie się kriosfery. Jak wiadomo, wiedza na ich temat jest niezbędna m.in. do prawidłowego oszacowania bilansu masy lodowców i lodolodu grenlandzkiego. Również scenariusze tego bilansu na przyszłość będą bardziej wiarygodne, jeśli oprócz tendencji zmian temperatury uwzględnimy także tendencje zmian P, a te z kolei zależą od prawidłowego rozpoznania ich współczesnych wielkości i zmian.

Pełny przegląd opublikowanych prac dotyczących opadów i ich zmienności w Arktyce znaleźć można we wcześniejszych publikacjach autora (Przybylak 1996, 2002). Wynika z niego, że niezwykle mało jest szczególnie opracowań podejmujących temat współczesnej zmienności opadów. Dlatego też w wymienionych publikacjach został on podjęty i przedstawiony w sposób szczegółowy. W niniejszym przeglądzie zostaną omówione tylko niektóre ważniejsze wyniki w nich zaprezentowane.

Przybylak (1996) analizując trendy opadów w okresie 1951–1990 stwierdził iż zmalały one na nieznacznie większym obszarze Arktyki. W przypadku rocznych sum opadów ujemne trendy wystąpiły głównie w Arktyce Rosyjskiej, wschodniej części Alaski, SE części Arktyki Kanadyjskiej i na znacznej części Oceanu Arktycznego. Statystycznie istotne spadki zanotowano jednak jedynie w Arktyce Rosyjskiej. Rozkład przestrzenny trendów opadów zimowych jest podobny do opisanego rozkładu P rocznych. Różnica polega jedynie na tym, iż w zimie spadki P wystąpiły na nieco

większym obszarze. Objęły one dodatkowo niemal całą południową część Arktyki Kanadyjskiej. W pozostałych porach roku też zanotowano wyraźne spadki P w Arktyce Rosyjskiej, a jesienią także na obszarze Grenlandii i otaczających ją mórz. Wiosna jest jedyną porą roku, w której dominowały w Arktyce trendy dodatnie. Zdecydowana większość trendów opadów (zarówno sum sezonowych, jak i rocznych) w Arktyce, w okresie 1951–1990, jest jednak statystycznie nieistotna.



Rys. 7. Rozkład przestrzenny wielkości trendów rocznych opadów (w mm/10 lat, dolna mapa) w okresie 1951–2000 i anomalii średnich rocznych 10-letnich (1991–2000) opadów względem średnich z okresu 1951–1990 (w mm, górna mapa) w Arktyce.

Objaśnienia: ujemne trendy (anomalie) są zasraflowane; linie przerywane na Oceanie Arktycznym oznaczają, iż dane zostały ekstrapolowane ze stacji nadbrzeżnych

Dekada 1991–2000 była w Arktyce nie tylko wyraźnie cieplejsza, ale także dużo wilgotniejsza (Przybylak 2002). Anomalie P w tej dekadzie w porównaniu do P w wieloleciu 1951–1990 były znacząco wyższe. W przypadku sum rocznych (ryc. 7, góra) dodatnie anomalie dominowały niemal w całej Arktyce z wyjątkiem obszarów leżących wokół południowej Grenlandii (i prawdopodobnie też południowej Grenlandii) oraz niewielkiego obszaru między Alaską i Syberią. Dodatnie anomalie największe były w SW części Arktyki Kanadyjskiej i w zachodniej części Arktyki Rosyjskiej gdzie przekraczały 60, a nawet 80 mm. Duże (>40 mm) były one też w południowej części regionu pacyficznego. Podobnie jak w przypadku P rocznych, również P w poszczególnych porach roku były znacząco większe. W dekadzie 1991–2000 na największym obszarze Arktyki dominowały dodatnie anomalie wiosną, natomiast najmniej rozprzestrzenione były one latem (zobacz ryc. 9.9 w Przybylak 2002). We wszystkich sezonach (za wyjątkiem lata) najwyższe anomalie (> 20 mm) występowały w SW części Arktyki Kanadyjskiej, a jesienią i latem także w zachodniej części Arktyki Rosyjskiej. Z wyjątkiem zimy, ujemne anomalie opadów w tej dekadzie występowały zawsze wokół Grenlandii. Przez cały rok anomalie te obecne były wyspowo na Oceanie Arktycznym między Alaską i Syberią, a w lecie także w północnej części Arktyki Kanadyjskiej i w znacznej części regionu atlantyckiego.

Tabela 4

Sezonowe (XII–II, III–V, VI–VIII, IX–XI) i roczne (Rok) trendy opadów atmosferycznych (mm/10 lat) w Arktyce

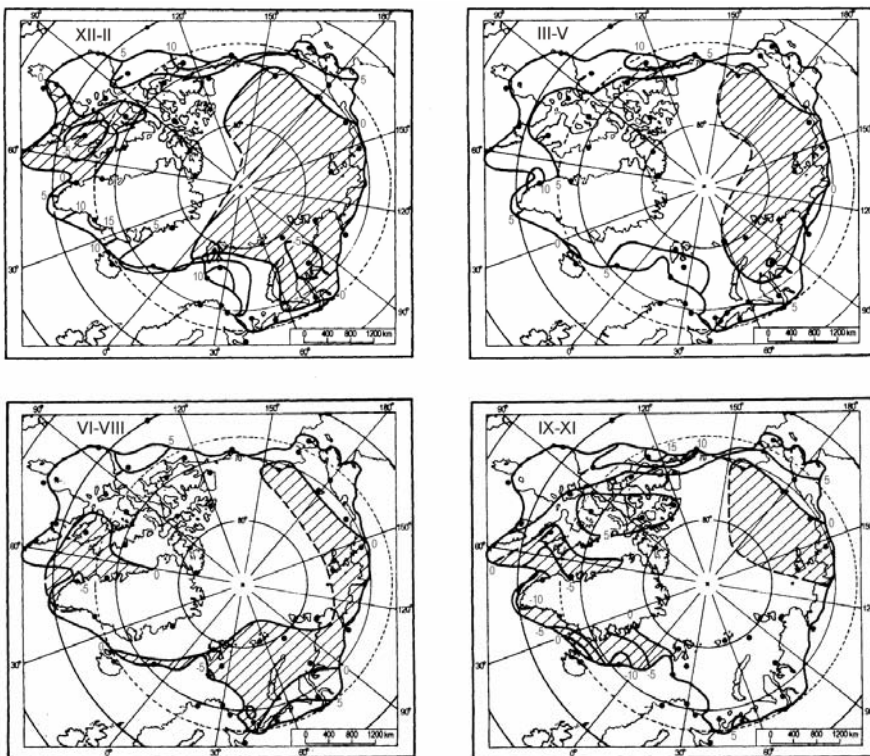
Stacja	1951–2000					1976–2000				
	XII–II	III–V	VI–VIII	IX–XI	Rok	XII–II	III–V	VI–VIII	IX–XI	Rok
Angmagssalik	15.79	1.51	3.69	-8.43	8.86	-35.66	-25.14	-28.17	-12.50	-110.00
Danmarkshavn	2.76	4.37*	3.46	0.98	10.89	17.10*	2.72	2.93	7.39	27.60
Jan Mayen	2.18	6.24	-0.07	-14.25*	-6.22	3.84	2.53	-13.10	-18.03	-27.75
Svalbard Lufthavn	-1.51	1.63	0.40	0.59	0.62	2.03	-3.87	-2.04	9.72	4.15
Björnöya	11.84**	8.30#	-6.97*	2.88	17.41**	22.97	19.04**	-5.12	18.37*	58.60#
Hopen	12.29*	9.27*	-1.49	2.10	22.51*	0.17	3.50	-5.90	-15.23	-20.76
Kanin Nos	2.89	1.77	-6.03	3.76	3.11	7.98	4.12	1.25	1.94	18.80
Naryan Mar ^a	1.40	0.00**	10.16	5.24	25.40*	0.24	12.11	20.38	13.29	45.28
Ostrov Dikson	-7.24	-5.29	-3.25	1.99	-14.66	16.13	9.44	-2.28	30.42*	53.76*
Chokurdakh	-2.82*	-1.73	-0.06	-3.43	-8.00	1.12	5.30	8.76	14.85#	30.33*
Nome	8.89#	3.47	1.82	8.65	23.42*	10.82	7.69	12.04	-0.73	29.97
Barrow	-2.23**	-1.69	-0.65	-2.11	-6.76	-0.02	0.90	12.23	-0.91	11.57
Coppermine A	13.76#	13.25#	2.66	17.72#	48.03#	12.57	-8.03	3.05	18.29	25.40
Cambridge Bay A ^b	1.94	2.95	0.24	2.54	7.46	4.96	1.13	0.60	10.73	17.08
Baker Lake A	6.79#	7.40#	5.55	10.16**	29.65#	5.00	-7.54	1.87	2.49	0.36
Resolute A	2.49**	4.22**	3.12	8.46**	18.20#	3.81	2.63	9.32	8.76	24.52
Eureka	1.34*	2.82#	3.68	2.72*	10.75#	-0.92	3.00	7.52	-1.42	8.24
Coral Harbour A	1.34	3.75	2.97	4.18	12.70	8.73*	7.98	-14.72	8.56	11.17
Hall Beach A ^c	-1.74	3.36	2.25	8.07	11.63	-1.53	5.53	-15.24	14.94	4.77
Clyde A	4.16	3.90	1.82	4.76	15.42	-7.63	-36.61*	-19.32	-19.22	-82.1**
Iqaluit A ^d	-11.26*	3.51	-2.91	-1.63	-10.25	-21.10	-27.00	-18.26	-26.79	-90.7**
Kuujuuaq A	-0.76	5.83	3.18	8.65	19.45	-8.32	6.34	2.42	22.16	30.66
Alert	2.23	5.42#	3.61	4.82	16.35**	1.02	8.14	11.75	10.57	31.81*
Egedesminde	1.16	0.51	-3.07	-3.79	-6.10	-5.33	-12.32	2.29	-6.95	-23.97
Godthab ^e	-0.67	12.26	-5.17	-11.96	-5.84	9.18	7.06	-54.3**	11.47	-23.16

*, **, # – trendy statystycznie istotne odpowiednio na poziomach 0.05; 0.01 oraz 0.001;

^a – dane od 1958 r.; ^b – dane dla okresu 1951–1999; ^c – dane od 1957 r.; ^d – dane bez lat 1997 i 1998;

^e – dane dla okresu 1951–1998

Po uwzględnieniu opadów z dekady 1991–2000, rozkład przestrzenny trendów opadów za okres 1951–2000, w porównaniu z omówionym wcześniej ich rozkładem w okresie 1951–1990 (Przybylak 1996), znacząco się zmienił. Zarówno trendy sum rocznych, jak i sezonowych opadów, podobnie jak też analogiczne trendy temperatury powietrza, są w omawianym okresie wyraźnie dodatnie (tab. 4, rys. 7 i 8). W przypadku sum rocznych, ujemne trendy (jednak tylko nieznacznie poniżej 0 mm/10 lat) wystąpiły głównie w Arktyce Rosyjskiej (w okresie 1951–1990 były one tu statystycznie istotne) oraz na małych obszarach wokół wyspy Jan Mayen i między południową Grenlandią a Ziemią Baffina (rys. 7, dół). Z drugiej strony zarówno obszar, jak i wielkość dodatnich trendów opadów (>20, a nawet 40 mm/10 lat) powiększyły się w SW części Arktyki Kanadyjskiej. Z tabeli 4 możemy odczytać, że wzrost opadów na tym obszarze, jak również w północnej części Arktyki Kanadyjskiej, był statystycznie istotny. Na pozostałym obszarze Arktyki trendy te nie są istotne statystycznie.



Rys. 8. Rozkład przestrzenny wielkości trendów sezonowych sum opadów (w mm/10 lat) w Arktyce w okresie 1951–2000. Objasnienia jak na rys. 7

Podobnie do sum rocznych, dodatnie trendy sezonowych sum opadów w Arktyce, w okresie 1951–2000, dominują we wszystkich sezonach roku, z wyjątkiem zimy, kiedy obszary zajęte przez dodatnie i ujemne trendy są podobne pod względem wielkości (rys. 8). W porównaniu do okresu 1951–1990, przestrzenny rozkład obszarów z ujemnymi i dodatnimi trendami opadów w badanym okresie zmienił się najmniej w zimie i wiosną, a najbardziej w pozostałych dwóch sezonach, w któ-

rych powierzchnia z dodatnimi trendami znacząco wzrosła. W zimie ujemne trendy (jednak rzadko spadające poniżej -5 mm/10 lat) wyraźnie dominują na obszarze Arktyki Rosyjskiej, obejmując także oblewające je morza i Ocean Arktyczny aż po biegun północny. Tej samej wielkości trendy są jeszcze notowane na obszarze SW części Arktyki Kanadyjskiej. W pozostałej części Arktyki trendy są dodatnie, rzadko jednak przekraczają wielkość 10 mm/10 lat (tylko na małych obszarach leżących w regionie atlantyckim oraz w SW części Arktyki Kanadyjskiej) (rys. 8). W pozostałych porach roku, rozkład przestrzenny trendów opadów atmosferycznych jest z grubsza podobny do występującego w zimie, z tym że obszar ujemnych anomalii w Arktyce Rosyjskiej i w jej otoczeniu jest znacząco ograniczony (szczególnie jesienią), a wiosną nie występują też trendy ujemne w SW części Arktyki Kanadyjskiej.

W porównaniu do okresu 1951–2000, rozkład przestrzenny sezonowych i rocznych trendów opadów w okresie 1976–2000 nie uległ znaczącym zmianom, szczególnie gdy analizujemy wielkość obszarów zajętych przez dodatnie i ujemne trendy. Jak widać z tabeli 4, w tym okresie również wyraźnie dominują dodatnie trendy opadów, chociaż w mniejszej liczbie stacji są one statystycznie istotne. Zanik ujemnych trendów P w Arktyce Rosyjskiej należy uznać za najistotniejszą zmianę w tym czasie. We wszystkich sezonach oraz dla roku zanotowano wzrost opadów na większym obszarze Arktyki. Sumy roczne obniżyły się jedynie na wybrzeżach oraz wokół południowej Grenlandii (włącznie z Ziemią Baffina, gdzie były statystycznie istotne, i wyspą Jan Mayen). W cyklu rocznym natomiast największy wzrost opadów odnotowano jesienią, kiedy w trzech stacjach był on nawet statystycznie istotny.

Wnioski i uwagi końcowe

1. Z przeprowadzonego przeglądu dotyczącego obserwowanych zmian klimatu w Arktyce, w ostatnich kilkudziesięciu latach, należy stwierdzić, iż praktycznie do około połowy lat 1990-tych były one niewielkie i były średnio dużo mniejsze niż na półkuli północnej (NH). Gwałtowne ocieplenie się Arktyki rozpoczęło się w połowie lat 1990-tych, a więc mniej więcej 20 lat później niż w niższych szerokościach geograficznych, kiedy wystąpił skokowy wzrost jej temperatury (o około 1°C w porównaniu ze średnią wieloletnią z okresu 1951–1990). Te wysokie temperatury utrzymują się do dnia dzisiejszego. Ich przyczyny nie są w pełni wyjaśnione. Przypuszcza się jednak, że jedną z nich może być znaczące zmniejszenie się powierzchni i grubości lodów morskich, które szczególnie duże są w regionie pacyficznym, gdzie zanotowano największe ocieplenie się atmosfery. Z pewnością do tych czynników zaliczyć należy także obserwowany wzrost temperatury powierzchni wody w Arktyce (występujący też wyraźnie właśnie w połowie lat 1990-tych, zobacz np. Kruszewski 2004, Zblewski 2004) będący efektem większego napływu do Arktyki ciepłych wód atlantyckich.

Wielkość temperatury powietrza notowana w okresie 1995–2004 jest porównywalna do tych występujących w najcieplejszym okresie XX wieku, czyli w latach 1930-tych i 1940-tych. Różnice są jednak widoczne w przestrzennym i czasowym rozkładzie zmian. Obecnie ociepla się najbardziej zachodnia Arktyka, poprzednio – wschodnia (głównie jej część atlantycka). W cyklu rocznym największe ocieplenie jest obecnie obserwowane wiosną i jesienią, podczas gdy ocieplenie w pierwszej połowie XX wieku największe było w zimie. Ponadto było ono ograniczone tylko do wysokich szerokości geograficznych, natomiast współczesne ocieplenie obejmuje niemal całą kulę ziemską. Na tej podstawie niektórzy sądzą, że ocieplenie lat 1930-tych było wywołane czynnikami naturalnymi, a obecne jest w większym stopniu efektem działalności antropogenicznej człowieka (Johannessen i in. 2004; ACIA 2004). Są jednak też badacze, którzy przypisują wciąż większą rolę

czynnikiem naturalnym niż antropogenicznym (np. Przybylak 2000, Polyakov i in. 2003; Soon 2005, Styszyńska 2005).

2. Znaczącemu ociepleniu się Arktyki w ostatniej dekadzie XX wieku towarzyszył także wyraźny wzrost opadów, który spowodował, że w okresie 1951–2000 w Arktyce przeważały już ich trendy dodatnie. W porównaniu do okresu 1951–1990, w ostatniej dekadzie XX wieku wzajemne relacje między temperaturą powietrza i opadami stały się bardziej wyraźne. Z wyjątkiem Arktyki Rosyjskiej (w której tylko nieznaczne ocieplenie wystąpiło w tym czasie, a w ostatnich 5 latach XX wieku w ogóle nie było widoczne) z reguły wzrostom/spadkom temperatury powietrza towarzyszyły wzrosty/spadki opadów. Jednak są wciąż obszary, szczególnie gdy bierzemy pod uwagę wielkości sezonowe, gdzie te relacje są odwrotne.

3. Kierunki zmian temperatury powietrza i opadów obserwowane w ostatnich kilkunastu latach są już dużo bardziej zgodne z wynikami uzyskiwanymi z modeli klimatycznych, które przewidują wzrost temperatury powietrza i opadów w Arktyce wraz z globalnym ociepleniem się klimatu. Jednocześnie jednak wszystkie modele klimatyczne (IPCC 2001) prognozują, iż największe ocieplenie powinno być w zimie. Przyczyny tej niezgodności z obserwacjami powinny być jak najszybciej wyjaśnione. Prawdopodobnie wciąż wiele procesów i zjawisk (w tym różnych sprzężeń zwrotnych) występujących w Arktycznym Systemie Klimatycznym jest w niewłaściwy sposób reprezentowanych w modelach klimatycznych.

4. W ostatnich dekadach wystąpiły znaczne zmiany ciśnienia atmosferycznego i cyrkulacji atmosferycznej reprezentowanej przez różne indeksy (AO, NAO, PNA i PDO) oraz inne charakterystyki (aktywność synoptyczna, cyklonalna, antycyklonalna). Jednak zmiany te nie tłumaczą skokowego wzrostu temperatury powietrza w połowie lat 1990-tych, ani też nie są znaczącą przyczyną powodującą utrzymywanie się ich na wysokim poziomie aż do chwili obecnej. Fragmentaryczne informacje dostępne w przypadku dopływu promieniowania słonecznego i zachmurzenia pozwalają nam przypuszczać, że warunki radiacyjne w Arktyce pogorszyły się w badanym okresie, na co wpływ wywarł między innymi obserwowany wzrost zachmurzenia, warunkowany z kolei najprawdopodobniej zarówno czynnikami naturalnymi, jak też powiększającym się zanieczyszczeniem powietrza w Arktyce.

5. Zmieniający się klimat w Arktyce, w tym szczególnie wyraźne ocieplenie trwające od około połowy lat 1990-tych, przejawia się w nasilaniu się zmian w środowisku naturalnym Arktyki: między innymi redukcji grubości i powierzchni lodowców kontynentalnych i lodów morskich oraz wieloletniej zmarzliny i pokrywy śnieżnej, zmniejszeniu się obszaru zajmowanego przez tundrę o ok. 20–30%, na którą wkracza roślinność krzaczasta. Dlatego też coraz większego znaczenia nabiera monitoring wszelkich zmian zachodzących w środowisku naturalnym Arktyki. Temu między innymi służyć będą liczne projekty badawcze proponowane do realizacji w ramach zbliżającego się IV Międzynarodowego Roku Polarnego 2007–2009.

Podziękowania

Praca została wykonana w ramach grantu zamawianego Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego PBZ-KBN-108/P04/2004 – „Struktura, ewolucja i dynamika litosfery, kriosfery i biosfery w europejskim sektorze Arktyki oraz w Antarktyce” oraz grantu nr 518 JM Rektora UMK.

Literatura

- ACIA, 2004, Impacts of a Warming Arctic, Arctic Climate Impact Assessment. Cambridge University Press, United Kingdom: 130 s.
- Arażny A., 2005, Bioklimat Arktyki Norweskiej i jego zmienność w okresie 1971–2000. Maszynopis rozprawy doktorskiej, Zakład Klimatologii UMK, Toruń: 182 s.
- Atlas Arktyki, 1985, Glavnoye Upravlenye Geodezii i Kartografii, Moskwa: 204 s.
- Baranowski S., 1968, Termika tundry peryglacialnej SW Spitsbergen. Acta Universitatis Wratislavenensis, 68: 74 s.
- Bobylev L.P., Kondratyev K.Y., Johannessen O.M. (red.), 2003, Arctic Environment Variability in the Context of Global Change. Praxis Publishing Ltd, Chichester: 471 s.
- Cullather R.I., Lynch A.H., 2003, The annual cycle and interannual variability of atmospheric pressure in the vicinity of the North Pole. International Journal of Climatology, 23: 1161–1183.
- Hurrell J.W., Kushnir Y., Ottersen G., Visbeck M. (red.), 2003, The North Atlantic Oscillation: Climatic Significance and Environmental Impact. Geophysical Monograph 134, American Geophysical Union: 279 s.
- Jones P.D., New M., Parker D.E., Martin S., Rigor I.G., 1999, Surface air temperature and its changes over the past 150 years. Review of Geophysics, 37 (2): 173–199.
- IPCC, 2001, Houghton J.T, Ding Y., Griggs D.J., Noguera M., van der Linden P.J., Dai X., Maskell K., Johnson C.A. (red.), Climate Change 2001: The Scientific Basis. Cambridge University Press, Cambridge: 881 s.
- Johannessen O.M., Bengtsson L., Miles W.M., Kuzmina S.I., Semenov A., Alekseev G.V., Nagurny 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, 56A: 328–341.
- Kosiba A., 1960, Some results of glaciological investigations in SW Spitsbergen. Zeszyty Naukowe Uniwersytetu Wrocławskiego, Seria B Nauki Przyrodnicze, 4: 30 s.
- Kruszewski G., 2004, Zmienność temperatury powierzchni morza w rejonie Spitsbergenu (1982–2002) jako przejaw współcześnie zachodzących zmian klimatycznych. Problemy Klimatologii Polarnej, 14: 79–86.
- Marciniak K., Przybylak R., 1985, Atmospheric precipitation of the summer season in the Kaffiöyra region (North-West Spitsbergen). Polish Polar Research, 6: 543–559.
- Marsz A.A., Styszyńska A., 2001, Oscylacja Północnego Atlantyku a temperatura powietrza nad Polską. Wydawnictwo WSM, Gdynia: 107 s.
- Marsz A.A., Styszyńska A. (red.), 2002, Oscylacja Północnego Atlantyku i jej rola w kształtowaniu zmienności warunków klimatycznych i hydrologicznych Polski. Akademia Morska, Gdynia: 222 s.
- Mokhov I.I., 1991, Trends in global and polar cloudiness from satellite data. [w:] Weller G., Wilson C.L., Severin B.A.B. (red.), International Conference on the Role of the Polar Regions in Global Change: Proceedings of a Conference held June 11–15, 1990 at the University of Alaska, Fairbanks, vol. I, University of Alaska, 176–183.
- Polyakov I.V., Bekryaev R.V., Alekseev G.V., Bhatt U.S., Colony R.L., Johnson M.A., Maskhtas A.P., Walsh D., 2003, Variability and trends of air temperature and pressure in the Maritime Arctic, 1875–2000. Journal of Climatology, 16 (12): 2067–2077.
- Przybylak R., 1996, Zmienność temperatury powietrza i opadów atmosferycznych w okresie obserwacji instrumentalnych w Arktyce. Wydawnictwo Uniwersytetu M. Kopernika, Toruń: 280 s.
- Przybylak R., 2000, Temporal and spatial variation of air temperature over the period of instrumental observations in the Arctic. International Journal of Climatology, 20: 587–614.
- Przybylak R. 2002, Variability of air temperature and atmospheric precipitation in the Arctic. Atmospheric and Oceanographic Sciences Library, 25, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht/Boston/London: 330 s.

- Przybylak R., 2003, *The Climate of the Arctic*, Atmospheric and Oceanographic Sciences Library, 26, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht/Boston/London: 288 s.
- Przybylak R., Wójcik G., Marciniak K., 2003, Wpływ Oscylacji Północnoatlantyckiej oraz Arktycznej na warunki termiczne chłodnej pory roku w Polsce w XVI–XX wiekach. *Przegląd Geofizyczny*, 1–2: 61–74.
- Quadrelli R., Wallace J.M., 2004, A simplified linear framework for interpreting patterns of northern hemisphere wintertime climate variability. *Journal of Climate*, 17 (19): 3728–3744.
- Raatz W.E., 1981, Trends in cloudiness in the Arctic since 1920. *Atmospheric Environment*, 15: 1503–1506.
- Rigor I.G., Colony R.L., Martin S., 2000, Variations in surface air temperature observations in the Arctic, 1979–1997. *Journal of Climate*, 13 (5): 896–914.
- Serreze M.C., Barry R.G., 2005, *The Arctic Climate System*. Cambridge University Press: 424 s.
- Serreze M.C., Box R.G., Barry R.G., Walsh J.E., 1993, Characteristics of Arctic synoptic activity, 1952–1989. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 51: 147–164.
- Serreze M.C., Carse F., Barry R.G., Rogers J.C., 1997, Icelandic low cyclone activity: Climatological features, linkages with the NAO, and relationships with recent changes in the Northern Hemisphere circulation. *Journal of Climate*, 10 (3): 453–464.
- Serreze M.C., Walsh J.E., Chapin III F.S., Osterkamp T., Dyrugerov M., Romanovsky V., Oechel W.C., Morison J., Zhang T., Barry R.G., 2000, Observational evidence of recent change in the northern high-latitude environment. *Climatic Change*, 46: 159–207.
- Soon W.W.-H., 2005, Variable solar irradiance as a plausible agent for multidecadal variations in the Arctic-wide surface air temperature record of the past 130 years. *Geophysical Research Letters*, 32, L16712, doi:10.1029/2005GL023429, 2005.
- Stanhill G., 1995, Solar irradiance, air pollution and temperature changes in the Arctic. *Philosophical Transactions: Mathematical, Physical and Engineering Science*, The Royal Society, London, A, 352: 247–258.
- Styszyńska A., 2005, Przyczyny i mechanizmy współczesnego (1982–2002) ocieplenia atlantyckiej Arktyki. *Akademia Morska*, Gdynia: 109 s.
- Turner J., Overland J.E., Walsh J.E., w druku, An Arctic and Antarctic perspective on recent climate change. *International Journal of Climatology*.
- Walsh J.E., Chapman W.L., Shy T.L., 1996, Recent decrease of sea level pressure in the central Arctic. *Journal of Climate*, 9 (2): 480–486.
- Wanner H., Brönnimann S., Casty C., Gyalistras D., Luterbacher J., Schmutz Ch., Stephenson D.B., Xoplaki E., 2001, North Atlantic Oscillation – Concepts and Studies. *Surveys in Geophysics*, 22: 321–382.
- Wibig J., 2000, Oscylacja Północnoatlantycka i jej wpływ na kształtowanie pogody i klimatu. *Przegląd Geofizyczny*, 2: 121–137.
- Wibig J., 2001, Wpływ cyrkulacji atmosferycznej na przestrzenny rozkład anomalii temperatury i opadów w Europie. *Rozprawy habilitacyjne Uniw. Łódzkiego*, Łódź: 208 s.
- Zblewski S., 2004, Zmiany temperatury wody na Prądzie Zachodniogrenlandzkim w okresie 1982–2002. *Problemy Klimatologii Polarnej*, 14: 29–37.