

OPADY CAŁKOWITE I STAŁE W ARKTYCE KANADYJSKIEJ I ICH ZMIENNOŚĆ W OKRESIE 1950–1995

Rajmund Przybylak

Uniwersytet Mikołaja Kopernika
Instytut Geografii, Zakład Klimatologii, Toruń

Wstęp

Znajomość wielkości i tendencji zmienności opadów atmosferycznych w Arktyce nabiera coraz większego znaczenia, szczególnie w ostatnim okresie, w którym obserwuje się globalne ocieplenie (Przybylak 1996). Jest to związane z bezpośrednim wpływem tego elementu klimatycznego na bilans masy lodowców lądowych i lądolodu grenlandzkiego. Zachowanie tych ostatnich jest niezmiernie istotne dla przyszłej ewolucji globalnego systemu klimatycznego. Współ z lodem morskim wydatnie zmieniają one bowiem albedo Ziemi, a same, także w znaczącym stopniu są odpowiedzialne za wahania poziomu oceanu światowego. Nie tylko naukowcy reprezentujący różne dyscypliny przyrodnicze czy z zakresu nauk o Ziemi, ale także różnego szczebla decydenci polityczni są zainteresowani w coraz większym stopniu wynikami badań dotyczącymi współczesnych zmian wszelkich rodzajów lodów w Arktyce oraz ich prognoz. Sformułowanie wiarygodnych prognoz zachowania się kriosfery nie jest jednak łatwe, m.in. dlatego że nie są proste i jednoznaczne relacje między jej różnymi składnikami a elementami klimatycznymi, w tym szczególnie jej podstawowym elementem, tj. temperaturą powietrza (zobacz np. Foster i in. 1996). Sprawę dalej komplikuje fakt, iż także nie są proste i jednoznaczne relacje między temperaturą powietrza a opadem w Arktyce (np. Karl i in. 1993; Przybylak 1995, 1996; Curtis i in. 1998). Doświadczenia

wspomnianych badaczy dowiodły, że niemal powszechnie przyjmowane założenie, także przez większość modelarzy klimatycznych, iż wzrost temperatury prowadzi do wzrostu opadów w Arktyce często się nie sprawdza. Nie jest ustalony także wpływ wzrostu temperatury w chłodnym okresie roku na udział opadów stałych i ciekłych w opadzie całkowitym (np. Karl i in. 1993; Zhang i in. 2000). W ostatniej pracy wykazano na podstawie analizy danych z Kanady, iż w sezonach z przewagą ujemnych temperatur udział opadów stałych do całkowitych (dalej S/C) na większości jej obszaru powiększył się w ostatnich dekadach. W pn.-wsch. Kanadzie był on związany ze spadkiem temperatury, natomiast w pozostałej jej części przede wszystkim ze wzrostem temperatury.

Głównym celem niniejszego artykułu jest określenie trendu zmian udziału S/C w Arktyce Kanadyjskiej oraz ustalenie wpływu temperatury powietrza oraz czynników cyrkulacyjnych (cyrkulacji atmosferycznej i oceanicznej) na ten udział. Aby to zadanie zrealizować niezbędne było także przebadanie istniejących trendów zmian opadów stałych i całkowitych w Arktyce Kanadyjskiej w badanym okresie. Dodatkowo, podobnie jak w przypadku udziału S/C, określono także ich zależność od temperatury powietrza i czynników cyrkulacyjnych.

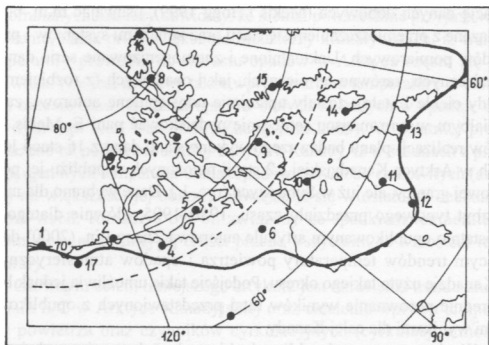
Obszarem badań jest Arktyka Kanadyjska, której południową granicę wydzielono wg propozycji autorów *Atlasa Arktiki* (1985).

DANE I METODY

Problem badawczy podjęty w niniejszym opracowaniu jest możliwy do wykonania jedynie dla Arktyki Kanadyjskiej i Alaski, dla których istnieją pomiary opadów z rozbiciem na opady stałe i ciekłe. Warunkiem koniecznym dla uzyskania wiarygodnych wyników badań jest posiadanie wysokiej jakości danych. W przypadku Arktyki uzyskanie tego typu danych jest niezwykle trudne, gdyż panujące tam warunki atmosferyczne (niskie temperatury i silne wiatry) powodują, iż błędy pomiaru opadów są wysokie, dochodząc nawet do ok. 40% (Groisman, Easterling 1994; Przybylak 1996). Do tej pory niewielu badaczy podjęło się próby usunięcia tych błędów. Dla analizowanego w niniejszym artykule obszaru Arktyki Kanadyjskiej zrobili to niedawno pracownicy Kanadyjskiego Centrum Klimatycznego. Dodatkowo przeprowadzili oni także homoge-

nizację danych dobowych (Mekis i Hogg 1999), usuwając m.in. błędy związane z przemieszczaniem się stacji oraz zmianami systemów i przyrządów pomiarowych. Uaktualnione i zhomogenizowane serie danych miesięcznych, zarówno termicznych, jak i opadowych (z rozbićciem na opady ciekłe i stałe), zostały uprzejmie udostępnione autorowi, za co chciałbym w tym miejscu serdecznie podziękować pani E. Mekis. Do celów realizacji planu badawczego wykorzystano dane z 16 stacji leżących w Arktyce Kanadyjskiej i 2 stacji położonych w pobliżu jej południowej granicy, ale już w Subarktyce (ryc. 1). Dane wybrano dla może niezbyt typowego przedziału czasu, 1950–1995, głównie dlatego, iż w ostatnio opublikowanym artykule autorstwa Zhang i in. (2000) dotyczącym trendów temperatury powietrza i opadów atmosferycznych w Kanadzie użyto takiego okresu. Podejście takie umożliwia jednak bezpośrednie porównanie wyników tutaj przedstawionych z opublikowanymi wynikami dla całej Kanady.

W pierwszym etapie obliczeń zbiory danych termicznych i opadowych zostały przetworzone na wartości sezonowe (zima – grudzień – luty, wiosna – marzec – maj etc.) i roczne. Następnie obliczono średnie obszarowe, sezonowe i roczne wartości temperatury powietrza i opadów atmosferycznych, korzystając z danych z 16 stacji. Zastosowano do tego celu zwykle matematyczne uśrednianie, które jest wystarczająco dobrą metodą w przypadku, gdy rozmieszczenie stacji jest w miarę równomierne. Uzyskana w ten sposób seria średniej temperatury powietrza w Arktyce Kanadyjskiej za okres 1950–1995 została wykorzystana do wyboru 10 najcieplejszych i 10 najchłodniejszych niekonsekwentnych i konsekwentnych sezonów i lat. W następnym etapie zbadano relacje między temperaturą powietrza a opadem, obliczając dla każdej z 16 analizowanych stacji różnice opadu całkowitego, stałego oraz udziału S/C między zbiorami najcieplejszych i najchłodniejszych sezonów i lat. Wyniki obliczeń zostały przedstawione w formie kartograficznej, w postaci mapek, na których izolinie jednakowych różnic wykreślono stosując zwykłą interpolację matematyczną. Ze względu na brak miejsca, w niniejszym artykule przedstawiono jedynie wyniki dla sum rocznych. Metodyka tego typu jest stosowana często w opracowaniach klimatologicznych, szczególnie tych, które mają na celu ukazanie scenariuszy zmian wybranego elementu klimatycznego wraz ze wzrostem temperatury (np. Palutikof i in. 1984;



— A • B

Ryc. 1. Obszar badań wraz z lokalizacją wykorzystanych w pracy stacji meteorologicznych. Objaśnienia: A – granica Arktyki wg Atlasu Arktyki (1985), B – lokalizacja stacji meteorologicznych wykorzystanych w opracowaniu

1 – Komakuk (H = 14 m), 2 – Cape Parry (H = 17 m), 3 – Mould Bay (H = 15 m), 4 – Coppermine (H = 24 m), 5 – Cambridge Bay (H = 27 m), 6 – Baker Lake (H = 13 m), 7 – Resolute A (H = 67 m), 8 – Eureka (H = 10 m), 9 – Hall Beach (H = 8 m), 10 – Coral Harbour A (H = 64 m), 11 – Inukjuak (H = 3 m), 12 – Kuujjuarapik (H = 21 m), 13 – Kuujjuaq (H = 37 m), 14 – Iqaluit A (H = 34 m), 15 – Clyde A (H = 25 m), 16 – Alert (H = 63 m), 17 – Inuvik (H = 59 m), 18 – Fort Smith A (H = 203 m)

Fig. 1. Study area and location of meteorological stations used. Key: A – the border of the Arctic after Atlas Arktiki (1985), B – location of meteorological stations used

1 – Komakuk (H = 14 m), 2 – Cape Parry (H = 17 m), 3 – Mould Bay (H = 15 m), 4 – Coppermine (H = 24 m), 5 – Cambridge Bay (H = 27 m), 6 – Baker Lake (H = 13 m), 7 – Resolute A (H = 67 m), 8 – Eureka (H = 10 m), 9 – Hall Beach (H = 8 m), 10 – Coral Harbour A (H = 64 m), 11 – Inukjuak (H = 3 m), 12 – Kuujjuarapik (H = 21 m), 13 – Kuujjuaq (H = 37 m), 14 – Iqaluit A (H = 34 m), 15 – Clyde A (H = 25 m), 16 – Alert (H = 63 m), 17 – Inuvik (H = 59 m), 18 Fort Smith A (H = 203 m)

Palutikof 1986; Przybylak 1995, 1996). Dla poszukiwań relacji między temperaturą a opadami, szczególnie jego różnymi rodzajami, lepiej jest zejść na poziom pojedynczych stacji meteorologicznych. A więc do wyboru 10 najcieplejszych i 10 najchłodniejszych niekonsekwentnych i konsekwentnych sezonów i lat użyć nie serii średnich temperatur obszarowych, ale serii temperatury z danej stacji. Przy takim podejściu zostają wyeliminowane sytuacje, w których średnio najcieplejsze lub najchłodniejsze w całej Arktyce Kanadyjskiej lata lub sezony w pewnych jej fragmentach mogą posiadać całkiem odmienne warunki termiczne. Również w przypadku stosowania zbiorów sezonów i lat konsekwentnych popełnia się mniejsze błędy.

Badania wpływu cyrkulacji atmosferycznej i oceanicznej na opady w Arktyce Kanadyjskiej pod względem metodycznym wykonano analogicznie, jak w przypadku wyżej omówionym. Różnice opadów zostały obliczone między zespołami lat z wysokimi i niskimi wartościami indeksów charakteryzującymi cyrkulację atmosferyczną bądź też, w przypadku cyrkulacji oceanicznej, między latami o różnym jej reżimie w Oceanie Arktycznym. Więcej szczegółów podano w rozdziale opisującym wyniki badań.

ŚREDNIE WIELOLETNIE OPADY W ARKTYCE KANADYJSKIEJ I ICH ZMIENNOŚĆ

Skorygowane wartości średnich sezonowych i rocznych sum opadów z rozbiciem na opady stałe i ciekłe w Arktyce Kanadyjskiej prezentuje tabela 1. Sumy roczne największe są w najcieplejszej pd.-wsch. części badanego obszaru, gdzie też najsilniej przejawia się działalność cyklonalna. Jej wartości przekraczają tu znacznie sumę 500 mm (Kuujuaq – 776,2 mm; Kuujuaq – 658,4 mm; Iqaluit – 544,3 mm). Najniższe sumy opadów rocznych występują na skrajnej północy, gdzie notowane są najniższe temperatury (Przybylak 1996), wahając się w granicach od ok. 100 do 200 mm (Eureka – 99,8 mm; Mould Bay 156,1 mm; Alert 208,9 mm). W porównaniu z dotychczas stosowanymi nieskorygowanymi seriami danych (Przybylak 1996) prezentowane wartości w tabeli 1 są przeciętnie od 26 do 58% wyższe (tab. 2).

W Arktyce Kanadyjskiej najwyższe sumy opadów są notowane albo latem w regionach, gdzie klimat jest bardziej kontynentalny (10 sta-

cji), albo jesienią, szczególnie na obszarach objętych intensywną działalnością cyklonalną (6 stacji). Podobnie najniższe sumy występują albo w zimie (11 stacji), albo wiosną (5 stacji).

Tabela 1. Opady atmosferyczne (w mm) w Arktyce (1–16) i Subarktyce (17–18) Kanadyjskiej w okresie 1951–1990

Table 1. Atmospheric precipitation (in mm) in the Canadian Arctic (1–16) and sub-Arctic (17–18), 1951–1990

Lp.	Stacja Station	Parametr Parameter	Zima Winter	Wiosna Spring	Lato Summer	Jesień Autumn	Rok Year
1	2	3	4	5	6	7	8
1	Komakuk	1	20,0	16,2	87,3	59,1	193,8
		2	19,9	15,1	10,4	46,9	100,0
		3	0,1	1,1	76,9	12,2	93,8
2	Cape Parry*	1	43,6	50,6	77,1	92,4	259,4
		2	43,2	47,5	9,1	73,6	171,8
		3	0,4	3,1	68,0	18,8	87,6
3	Mould Bay	1	21,3	27,5	60,2	50,0	156,1
		2	21,3	27,0	24,0	46,5	114,7
		3	0,0	0,5	36,2	3,5	41,4
4	Coppermine	1	48,0	54,8	98,7	93,7	294,6
		2	47,2	49,0	4,5	61,9	160,4
		3	0,8	5,8	94,2	31,8	134,2
5	Cambridge Bay	1	28,8	39,5	77,8	66,2	212,1
		2	28,7	36,8	8,2	50,0	123,5
		3	0,1	2,7	69,6	16,2	88,6
6	Baker Lake	1	40,6	57,8	117,9	119,1	337,5
		2	40,5	49,8	6,5	72,2	168,8
		3	0,1	8,0	111,4	46,9	168,7
7	Resolute A	1	23,8	34,7	89,4	67,0	215,6
		2	23,8	34,2	30,2	60,3	149,3
		3	0,0	0,5	59,2	6,7	66,3
8	Eureka	1	15,2	13,7	39,7	32,9	99,8
		2	15,2	13,6	9,2	31,9	68,6
		3	0,0	0,1	30,5	1,0	31,2
9	Hall Beach*	1	44,0	64,3	109,7	100,7	317,9
		2	44,0	62,5	14,7	81,8	201,1
		3	0,0	1,8	95,0	18,9	116,8

Tabela 1. cd. – Table 1. cont.

1	2	3	4	5	6	7	8
10	Coral Harbour A	1	48,0	68,2	133,5	121,3	372,2
		2	47,8	64,3	14,3	83,6	210,4
		3	0,2	3,9	119,2	37,7	161,8
11	Inukjuak	1	66,7	74,1	175,4	194,4	508,6
		2	66,0	56,9	7,0	96,7	230,2
		3	0,7	17,2	168,4	97,7	278,4
12	Kuujjuarapik	1	135,7	119,5	252,0	272,0	776,2
		2	133,1	83,1	9,0	116,4	344,2
		3	2,6	36,4	243,0	155,6	432,0
13	Kuujjuaq	1	149,1	116,8	189,8	193,5	658,4
		2	147,2	94,3	7,4	109,2	364,2
		3	1,9	22,5	182,4	84,3	294,2
14	Iqaluit A	1	94,5	107,3	181,2	158,8	544,3
		2	93,8	103,1	14,9	110,3	324,7
		3	0,7	4,2	166,3	48,5	219,6
15	Clyde A	1	40,4	54,5	85,3	126,4	309,2
		2	40,3	54,0	34,6	116,3	249,3
		3	0,1	0,5	50,7	10,1	59,9
16	Alert	1	31,3	35,6	72,1	68,9	208,9
		2	31,2	35,6	49,6	68,3	185,0
		3	0,1	0,0	22,5	0,6	23,9
17	Inuvik*	1	67,4	61,7	112,3	101,5	342,1
		2	66,9	53,2	7,7	79,8	206,9
		3	0,5	8,5	104,6	21,7	135,2
18	Fort Smith A	1	76,3	69,7	157,4	114,5	418,4
		2	74,9	36,7	0,4	55,4	167,5
		3	1,4	33,0	157,0	59,1	250,9

Objaśnienia: 1 – opad całkowity, 2 – opad stały, 3 – opad ciekły, * – 1961–1990

Key: 1 – total precipitation, 2 – solid precipitation, 3 – liquid precipitation, * – 1961–1990

Opady stałe występują we wszystkich porach roku z wyraźną jednak dominacją jesienią. Jedynie na dwóch stacjach leżących tuż przy południowej granicy Arktyki (Kuujjuarapik, Kuujjuaq) opady stałe są wyższe zimą. Drugie maksimum opadów śnieżnych w przebiegu rocz-

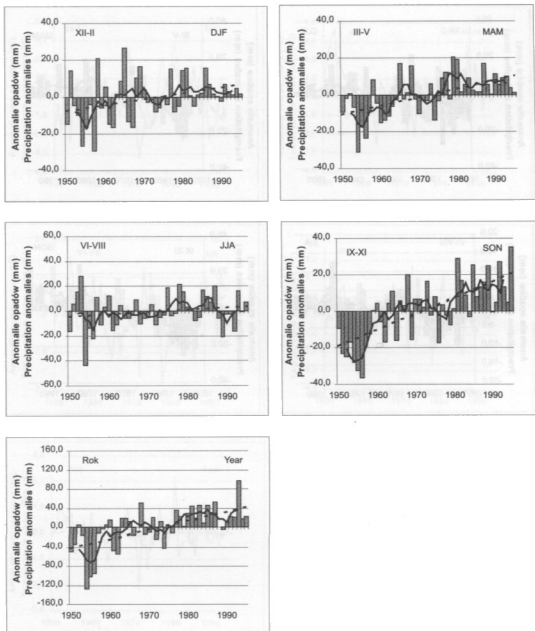
nym na większości analizowanych stacji występuje wiosną. Opady ciekłe zgodnie z oczekiwaniami wyraźnie dominują w okresie lata polarnego. Dość duże są jeszcze jesienią, natomiast wiosną, a szczególnie zimą zdarzają się niezwykle rzadko.

Tabela 2. Porównanie zmierzonych i skorygowanych rocznych sum opadów (w mm) w wybranych stacjach Arktyki Kanadyjskiej, 1951–1990

Table 2. Comparison of measured and corrected annual precipitation (in mm) in selected stations of the Canadian Arctic, 1951–1990

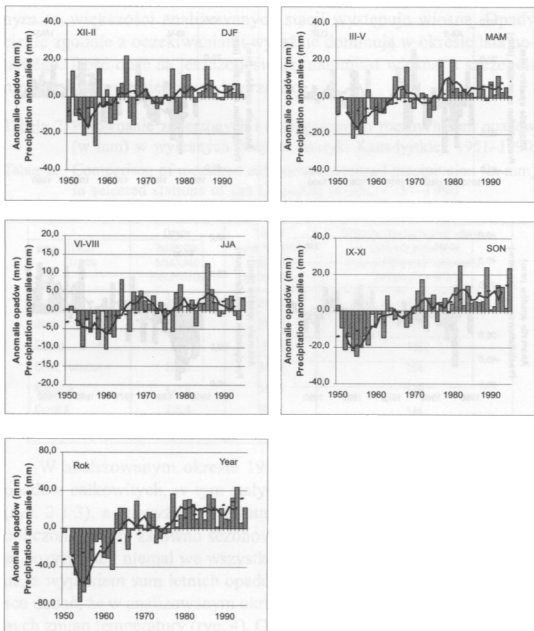
STACJA STATION	OPADY ZMIERZONE MEASURED PRECIPITATION	OPADY SKORYGOWANE CORRECTED PRECIPITATION	STOSUNEK OPADÓW SKORYGOWANYCH DO ZMIERZONYCH W % RATIO OF CORRECTED TO MEASURED PRECIPITATION IN %
COPPERMINE	219,6	294,6	134
RESOLUTE A	136,8	215,6	158
EUREKA	67,3	99,8	148
CORAL HARBOUR A	278,0	372,2	134
IQALUIT A	431,8	544,3	126
CLYDE A	215,4	309,2	144
ALERT	152,5	208,9	137

W analizowanym okresie 1950–1995 wyraźnie najniższe sumy opadów całkowitych, w tym stałych, wystąpiły w dekadzie lat 1950. (ryc. 2 i 3), a najwyższe w ostatnich kilkunastu latach. W rezultacie obliczone trendy zarówno sezonowych, jak i rocznych zmian opadów są pozytywne i niemal we wszystkich przypadkach statystycznie istotne, z wyjątkiem sum letnich opadów całkowitych. Warto w tym miejscu dodać, że w analizowanym okresie nie odnotowano natomiast istotnych zmian temperatury (ryc. 4). Co więcej, w dekadzie lat 1950. przeżywały dodatnie anomalie we wszystkich porach roku, z wyjątkiem zimy. Po 1980 r., spośród wszystkich pór roku, najbardziej ochłodziła się w Arktyce Kanadyjskiej jesień i zima, a mimo to opady w tym czasie wykazały anomalie dodatnie, szczególnie duże (do 30 mm) jesienią. W okresie letnim relacje między temperaturami a opadami są również nietrwałe (por. ryc. 2 z ryc. 4). Powyższe wyniki dowodzą, że wzrost opadów w Arktyce Kanadyjskiej w analizowanych okresach został wywołany innymi – niż termiczne – czynnikami, najprawdopodobniej zmianami cyrkulacji atmosferycznej.



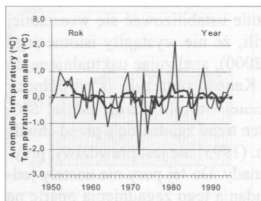
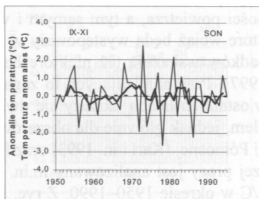
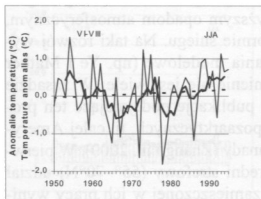
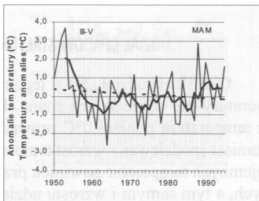
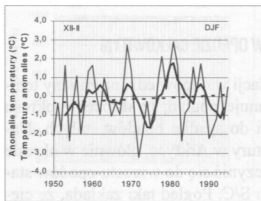
Ryc. 2. Przebieg z roku na rok średnich sezonowych i rocznych anomalii opadów całkowitych i ich trendów w Arktyce Kanadyjskiej w okresie 1950–1995. Objaśnienia: słupki – przebieg z roku na rok, linie ciągłe – 5-letnie średnie ruchome, linie przerywane – trendy liniowe

Fig. 2. Year-to-year courses of mean seasonal and annual anomalies of total atmospheric precipitation and their trends in the Canadian Arctic over the period 1950–1995. Key: bars = year-to-year courses, solid lines = running 5-year mean, and dashed lines = linear trends



Ryc. 3. Przebieg z roku na rok średnich sezonowych i rocznych anomalii opadów stałych i ich trendów w Arktyce Kanadyjskiej w okresie 1950–1995. Objaśnienia: słupki – przebieg z roku na rok, linie ciągłe – 5-letnie średnie ruchome, linie przerywane – trendy liniowe

Fig. 3. Year-to-year courses of mean seasonal and annual anomalies of solid atmospheric precipitation and their trends in the Canadian Arctic over the period 1950–1995. Key: bars = year-to-year courses, solid lines = running 5-year mean, and dashed lines = linear trends



Ryc. 4. Przebieg z roku na rok średnich sezonowych i rocznych anomalii temperatury powietrza i ich trendów w Arktyce Kanadyjskiej w okresie 1950–1995. Objaśnienia: linie ciągłe cienkie – przebieg z roku na rok, linie ciągłe grube – 5-letnie średnie ruchome, linie przerywane – trendy liniowe

Fig. 4. Year-to-year courses of mean seasonal and annual anomalies of air temperature and their trends in the Canadian Arctic over the period 1950–1995. Key: solid lines = year-to-year courses, heavy solid lines = running 5-year mean, and dashed lines = linear trends