

**WIELOLETNIA ZMIENNOŚĆ WYSTĘPOWANIA
EKSTREMÓW OPADOWYCH W HORNSUNDZIE (SPITSBERGEN)
I ICH ZWIĄZEK Z CYRKULACJĄ ATMOSFERY**

LONG-TERM VARIABILITY OF EXTREME PRECIPITATION IN HORNSUND (SPITSBERGEN)
AND THEIR RELATION WITH ATMOSPHERIC CIRCULATION

Ewa Łupikasza

Katedra Klimatologii, Wydział Nauk o Ziemi, Uniwersytet Śląski
ul. Będzińska 60, 41–200 Sosnowiec
ewa.lupikasza@us.edu.pl

Zarys treści. Celem opracowania jest określenie charakteru wieloletnich zmian i zmienności ekstremów opadowych w okresie obserwacji instrumentalnych w Hornsundzie oraz zbadanie synoptycznych przyczyn ich występowania. Badania przeprowadzono na podstawie dobowych sum opadów atmosferycznych z okresu lipiec 1978 – grudzień 2006. Za ekstremalne zjawisko opadowe uznano dobową sumę opadów przekraczającą wartość progową opadu, zdefiniowaną jako 90 i 95 percentyl. Ogólne tendencje w przebiegu czasowym wskaźników opadów ekstremalnych zbadano stosując analizę trendów metodą Mann-Kendala. Związki pomiędzy ekstremalnymi zdarzeniami opadowymi i cyrkulacją atmosferyczną zbadano poprzez obliczenie częstości opadów ekstremalnych oraz prawdopodobieństwa warunkowego ich wystąpienia w poszczególnych typach cyrkulacji według T. Niedźwiedzia.

Słowa kluczowe: opady ekstremalne, cyrkulacja atmosferyczna, tendencje i zmienność opadów, Hornsund

1. Wstęp

W badaniach dotyczących detekcji zmian klimatu szczególne miejsce zajmują ekstremalne zjawiska meteorologiczne oraz klimatyczne. Oczekuje się, że wraz ze zmianą wartości średnich elementów klimatu zmianie podlegać może również częstość występowania jak i nasilenie zdarzeń ekstremalnych. Analiza czasowego przebiegu ekstremów klimatycznych jest jednym z wyzwań współczesnej klimatologii. Największym utrudnieniem związanym z badaniem wieloletniej zmienności ekstremów jest brak wystarczająco długich i homogenicznych ciągów danych meteorologicznych (Easterling i in. 2000). W Arktyce do wspomnianych trudności dochodzi również problem dokładności pomiarowej opadów atmosferycznych, która w szczególny sposób wpływa na wartości ekstremalne. Z drugiej strony analiza zmian czy też zmienności warunków klimatycznych w obszarach, gdzie wpływy antropogeniczne są stosunkowo najsłabsze, tak jak w Arktyce, może być pewnym przyczynkiem w poszukiwaniach dotyczących naturalnej zmienności klimatu. Ponadto, w chwili obecnej długość ciągu chronologicznego

dobowych sum opadów atmosferycznych w Hornsundzie obejmuje 28.5 lat i pozwala na poprawną metodycznie analizę zmian klimatu, w tym wypadku ekstremalnych opadów atmosferycznych.

Zasadniczym celem opracowania jest określenie charakteru wieloletnich zmian i zmienności ekstremów opadowych w okresie obserwacji instrumentalnych w Hornsundzie oraz zbadanie synoptycznych przyczyn ich występowania.

Początki badań opadów atmosferycznych na Spitsbergenie sięgają lat 70. W najstarszych pracach opad atmosferyczny był jednym z wielu rozpatrywanych elementów klimatu (Baranowski 1977, Markin 1975, Pereyma 1983, Rodzik i Stepko 1985, Kierzkowski 1996, Głowacki i Niedźwiedź 1997). Szeroką analizę już tylko opadów atmosferycznych, bądź opadów wraz z temperaturą powietrza, w okresie obserwacji instrumentalnych w Arktyce, a tym samym również na Spitsbergenie odnaleźć można w opracowaniach R. Przybyłaka (1996, 1997, 2002, 2003). Kolejną grupę stanowią pozycje, w których dynamikę opadów na Spitsbergenie starano się wyjaśnić cyrkulacją atmosferyczną (Niedźwiedź i Ustrul 1988, Przybylak i Marciniak 1992, Łupikasza i Niedźwiedź 2002, Niedźwiedź 2002). Wśród wymienionych prac problematyka opadów ekstremalnych z punktu widzenia częstości ich występowania oraz związku z cyrkulacją atmosfery podejmowana była przez E. Łupikaszę (2002) i T. Niedźwiedzia (2002). Część wyników znalazła się w monografii klimatycznej Hornsundu (Marsz i Styszyńska 2007).

2. Metody i materiały

Badania przeprowadzono na podstawie dobowych sum opadów atmosferycznych (lipiec 1978 – grudzień 2006) pochodzących ze stacji w Hornsundzie zlokalizowanej na zachodnim wybrzeżu Spitsbergenu. Tworząc bazę danych korzystano z roczników meteorologicznych Hornsund za lata 1978/79 – 1980/81, 1982/83 – 1999/2000, wykonanych w Oddziale Morskim IMGW w Gdyni pod kierunkiem M. Miętusa (IMGW, 2000-2001). Kolejne dwa roczniki za okres 2000/2001 oraz 2001/2002 opublikowano w Instytucie Geofizyki PAN pod kierunkiem Kawczyńskiego i Nowosielskiego (Institute of Geophysics 2001, 2003). Dane za okres od sierpnia 1981 do sierpnia 1982 pochodzą ze zbiorów dr M. Sobika z Zakładu Meteorologii i Klimatologii Uniwersytetu Wrocławskiego. Ponadto zbiory danych dobowych i terminowych co 3 godziny od stycznia 2001 r. zostały udostępnione w formie elektronicznej przez Instytut Geofizyki PAN w Warszawie. W celu powiązania danych opadowych z cyrkulacją atmosfery korzystano z kalendarza typów sytuacji synoptycznych T. Niedźwiedzia (2006). Zebrany materiał liczbowy nie jest kompletny. Braki zarówno w danych dobowych jak i terminowych pojawiają się w okresie od 01 do 26 lipca 1981 roku. Ponadto, dla dni 04, 07, 09 i 18 lipca 1979 roku nie zmierzono sum dobowych opadu.

Ekstremalne zjawiska klimatyczne w literaturze definiowane są na wiele sposobów w zależności od celów badawczych. W badaniach dotyczących wieloletniej zmienności ekstremów najczęściej wykorzystuje się definicję odnoszącą się do rozkładu statystycznego funkcji gęstości prawdopodobieństwa lub przyjmuje się stałe wartości progowe. W niniejszym opracowaniu, za ekstremalne zjawisko opadowe uznano dobową sumę opadów przekraczającą wartość progową opadu, zdefiniowaną jako 90 i 95 percentyl, które określono na podstawie dystrybuanty rozkładu dobowych sum opadów atmosferycznych w okresie 1979–2005. Wysokości opadów odpowiadające wartości 90 i 95 percentyla, zgodnie ze stosowaną w literaturze metodyką, wyznaczono na podstawie dobowych sum opadów ≥ 0.1 mm (Wibig 2006) i ≥ 1.0 mm (Klein-Tank i Können 2003) i zestawiono w tabeli 1. Okazało się, że obliczone progowe wysokości opadów odpowiadające 95 percentylowi wyznaczonemu na podstawie dni z opadem

Tabela 1 – Table 1

Suma opadów odpowiadająca wartościom 90 i 95 percentyla wyznaczonych na podstawie dni z opadem ≥ 0.1 mm i ≥ 1.0 mm w okresie 1979–2005

The 90th and 95th percentile of daily precipitation calculated based on days with precipitation ≥ 0.1 mm and ≥ 1.0 mm in the period 1979–2005

Okres – Period	90 $p_{\geq 0.1}$	95 $p_{\geq 0.1}$	90 $p_{\geq 1.0}$	95 $p_{\geq 1.0}$
Rok – Year	7.0 mm	10.6 mm	10.6 mm	14.2 mm
A	6.5 mm	9.8 mm	10.2 mm	13.7 mm
P.C	7.9 mm	11.6 mm	11.5 mm	16.5 mm
P.CH	6.2 mm	9.6 mm	9.7 mm	13.0 mm

A – okres akumulacyjny (IX–V), P.C – półrocze ciepłe (IV–IX), P.CH – półrocze chłodne (X–III).
A – accumulation period (September–May), P.C – warm half-year (April–September),
P.CH – cold half-year (October–March).

≥ 0.1 mm (95 $p_{\geq 0.1}$) i 90 percentylowi wyznaczonemu na podstawie dni z opadem ≥ 1.0 mm (90 $p_{\geq 1.0}$) nie różnią się znacząco. Dla tak zdefiniowanych ekstremów, obliczono chronologiczne ciągi następujących charakterystyk opadów ekstremalnych: liczba dni z opadem ekstremalnym, suma opadów generowana przez zdarzenia ekstremalne oraz udział opadów ekstremalnych w ogólnej sumie opadów rocznych (R), w okresie akumulacyjnym (A: wrzesień–maj), w półroczu ciepłym (P.C: kwiecień–wrzesień) oraz w półroczu chłodnym (P.CH: październik–marzec). Ogólne tendencje w przebiegu czasowym wskaźników opadów ekstremalnych zbadano stosując analizę trendów metodą Mann-Kendala. Związki pomiędzy ekstremalnymi zdarzeniami opadowymi oraz cyrkulacją atmosferyczną zbadano poprzez obliczenie częstości opadów ekstremalnych oraz prawdopodobieństwa warunkowego ich wystąpienia w poszczególnych typach cyrkulacji według T. Niedźwiedzia (2006).

3. Ogólne tendencje opadów ekstremalnych

Stosując metodę trendu liniowego do analizy zmian czasowych elementów klimatu należy wyraźnie zaznaczyć, że dostarcza ona najogólniejszych informacji na temat kierunku oraz siły zmian, w tym wypadku opadów ekstremalnych, i istotnie zależy od wartości badanego parametru na początku oraz na końcu przyjętego okresu badawczego. Zmiana okresu badawczego może znacząco wpłynąć na rezultaty analizy trendów. Z tego względu badania tendencji przejawiających się w czasowym przebiegu opadów ekstremalnych w Hornsundzie przeprowadzone zostały dla 7 przedziałów czasowych. Na okres pierwszy składają się lata pomiarów instrumentalnych, przypadające na końcówkę XX wieku (1979–2000). Każdy kolejny przedział czasowy jest o 1 rok dłuższy od poprzedniego: 1979–2001, 1979–2002, ..., 1979–2006. Uzyskane w ten sposób rezultaty pozwolą w pewnym stopniu ocenić trwałość tendencji opadów ekstremalnych w Hornsundzie. Wyniki analizy trendów opadów ekstremalnych dla opisanych powyżej wieloletni zestawiono w tabelach 2, 3, 4. W Hornsundzie wszystkie z rozpatrywanych wskaźników wskazują na wzrost zarówno liczby dni z opadem ekstremalnym, ich wysokości jak i ich udziału procentowego w ogólnej sumie opadów w badanych przedziałach czasowych. Najsilniejsze i najtrwalsze zmiany stwierdzono w przypadku udziału opadów ekstremalnych w sumach całkowitych. Opady ekstremalne, wyznaczone na podstawie wszystkich uwzględnionych kryteriów ($>90_{\geq 0.1}$, $>90_{\geq 1.0}$, $>95_{\geq 1.0}$) w istotny statystycznie sposób stanowią coraz to większą część opadów całkowitych w okresie akumulacyjnym oraz rocznym. W okresie akumulacyjnym poziom istotności

wzrostu udziału opadów $>90_{\geq 0.1}$ i $>90_{\geq 1.0}$ w sumie ogólnej zwykle nie przekracza 0.01 (tab. 4). Wzrost udziału opadów ekstremalnych w sumie opadów półrocza chłodnego był istotny statystycznie w ostatnich trzech analizowanych wieloletniach (1979–2004, 1979–2005 i 1979–2006). Najslabsze tendencje stwierdzono w przypadku udziału tych opadów w sumach półrocza ciepłego, który był istotny statystycznie tylko dla ekstremów wyznaczonych na podstawie słabo restrykcyjnego kryterium $>90_{\geq 0.1}$ (tab. 2).

Tabela 2 – Table 2

Charakterystyka tendencji liczby dni z opadem ekstremalnym w Hornsundzie (1979–2006)
Trend characteristics for number of days with extreme precipitation in Hornsund (1979–2006)

Wskaż. Index	Okres Period	1979–2000		1979–2001		1979–2002		1979–2003		1979–2004		1979–2005		1979–2006	
		p	Z [dni]	p	Z [dni]	p	Z [dni]	p	Z [dni]	p	Z [dni]	p	Z [dni]	p	Z [dni]
$90_{\geq 0.1}$	R	+	4.0		3.3		3.0	+	3.1	*	3.0	*	3.0	*	2.8
	A		3.3		3.6		3.5		2.7		3.3		3.0	+	2.7
	P.C	+	2.5		2.2	+	2.2	+	2.0	*	2.2	+	1.9		1.4
	P. CH		1.4		1.7		1.3		1.4		1.2		1.5	+	1.8
$90_{\geq 1.0}$	R	*	3.3	*	3.0	*	2.9	*	2.7	*	2.9	*	2.5	*	2.3
	A	+	1.9	*	2.2	*	2.0	*	1.8	*	1.9	**	2.0	*	1.8
	P.C		0.0		0.6		0.7		0.7		1.0		0.5		0.5
	P. CH		0.7		0.7		0.5		0.8		0.8	+	1.1		0.9
$95_{\geq 1.0}$	R	+	1.7	+	1.5		1.3		1.2	*	1.5	*	1.5	*	1.3
	A	+	1.5	+	1.4	*	1.3		0.9	*	1.1	*	1.4	*	1.3
	P.C		0.0		0.0		0.0		0.0		0.0		0.0		0.0
	P. CH	+	0.6		0.0		0.0		0.0	+	0.0	*	0.6	*	0.6

R – rok, A – okres akumulacyjny, P.C – półrocze ciepłe, P.CH – półrocze chłodne,
p – poziom istotności statystycznej: + – 0.1; * – 0.05, ** – 0.01, *** – 0.001, Z – zmiana na 10 lat

R – year, A – accumulation period, P.C – warm half-year, P.CH – cold half-year,
p – statistical significance level: + – 0.1; * – 0.05, ** – 0.01, *** – 0.001, Z – change in no. of days per 10 years

Wysokość opadów powstałych podczas zdarzeń ekstremalnych istotnie i trwale wzrastała w okresie rocznym (dla ekstremów $>90_{\geq 0.1}$ i $>90_{\geq 1.0}$) i akumulacyjnym (dla ekstremów $90_{\geq 1.0}$ i $>95_{\geq 1.0}$). Zmiany sum opadów ekstremalnych w półroczu chłodnym, podobnie jak w przypadku ich udziału w sumach całkowitych, były zwykle istotne tylko dla ostatnich trzech wieloleci. Wyjątek stanowią opady najwyższe z badanych ($>95_{\geq 1.0}$), których wysokość w półroczu chłodnym istotnie wzrastała także podczas wieloleci 1979–2000, 1979–2001 i 1970–2002, przy czym poziom istotności statystycznej był <0.1 . W półroczu ciepłym sumy opadów ekstremalnych nie wykazują istotnych statystycznie tendencji (tab. 3).

W Hornsundzie do najslabszych zalicza się tendencje liczby dni z opadem ekstremalnym. Trwałym zmianom, istotnym statystycznie we wszystkich badanych wieloletniach podlegała liczba dni z opadem $>90_{\geq 1.0}$ w okresie rocznym i akumulacyjnym lecz poziom istotności stwierdzonych tendencji zwykle był $p < 0.1$ lub $p < 0.05$ (tab. 4).

4. Wieloletnia zmienność opadów ekstremalnych

Analiza trendów, jak wspomniano powyżej, dostarcza ogólnych informacji na temat ewentualnych kierunków oraz „siły” zmian wartości badanego parametru. W celu szczegółowego poznania zmienności wieloletniej należy także prześledzić tendencje krótkookresowe.

Tabela 3 – Table 3

Charakterystyka tendencji wysokości opadów ekstremalnych w Hornsundzie (1979–2006)

Trend characteristics for extreme precipitation totals in Hornsund (1979–2006)

Wskaż. Index	Okres Period	1979–2000	1979–2001	1979–2002	1979–2003	1979–2004	1979–2005	1979–2006
		p Z [mm]	p Z [mm]	p Z [mm]	p Z [mm]	p Z [mm]	p Z [mm]	p Z [mm]
90≥0.1	R	** +76.5	* +52.9	* +49.0	* +45.5	** +52.2	** +49.5	** +45.1
	A	+43.1	+ +45.0	+ +44.6	+33.4	+ +36.3	* +38.7	* +36.3
	P.C	+37.4	+32.5	+32.4	+26.1	+ +32.2	+25.3	+20.9
	P. CH	+17.8	+21.5	+17.7	+18.4	+ +17.3	* +20.9	* +21.9
90≥1.0	R	* +60.8	* +47.4	* +45.3	* +40.1	* +45.3	* +39.4	* +37.5
	A	+ +42.0	* +46.4	* +42.8	* +32.5	* +35.4	** +42.0	* +34.9
	P.C	+20.2	+20.6	+19.9	+13.6	+20.0	+12.8	+13.1
	P. CH	+8.3	+12.5	+9.1	+11.4	+ +12.8	* +16.5	* +14.5
95≥1.0	R	+ +34.3	+ +29.7	+19.5	+16.9	+ +24.9	+ +22.3	+19.5
	A	+ +32.1	+ +27.8	* +28.4	+ +21.6	* +24.9	* +29.1	* +27.0
	P.C	+9.8	+9.8	+2.3	+0.8	+4.4	+2.3	+6.0
	P. CH	+10.3	+ +12.9	+ +10.3	+7.8	* +11.8	* +16.0	* +15.5

R – rok, A – okres akumulacyjny, P.C – półrocze ciepłe, P.CH – półrocze chłodne,
p – poziom istotności statystycznej: + – 0.1; * – 0.05, ** – 0.01, *** – 0.001, Z – zmiana na 10 lat

R – year, A – accumulation period, P.C – warm half-year, P.CH – cold half-year,
p – statistical significance level : + – 0.1; * – 0.05, ** – 0.01, *** – 0.001, Z – change in mm per 10 years

Tabela 4 – Table 4

Charakterystyka tendencji udziału opadów ekstremalnych w całkowitych sumach rocznych i sezonowych opadów w Hornsundzie (1979–2006)

Trend characteristics for extreme precipitation share in the overall annual and seasonal precipitation totals in Hornsund (1979–2006)

Wskaż. Index	Okres Period	1979–2000	1979–2001	1979–2002	1979–2003	1979–2004	1979–2005	1979–2006
		p Z [%]	p Z [%]	p Z [%]	p Z [%]	p Z [%]	p Z [%]	p Z [%]
90≥0.1	R	** +10.2	* +8.3	* +8.1	** +8.1	** +8.2	** +7.7	** +6.7
	A	** +12.9	** +14.0	** +12.5	** +10.7	** +11.1	*** +11.1	** +10.3
	P.C	* +10.3	* +9.6	* +10.3	* +9.0	* +9.4	+ +7.2	+ +6.0
	P. CH	+7.0	+ +8.0	+ +6.8	* +7.1	* +7.3	** +8.4	** +7.6
90≥1.0	R	* +11.9	* +10.5	* +9.6	* +9.0	** +9.5	** +8.2	* +7.2
	A	* +10.0	** +11.2	** +10.4	* +9.1	** +9.3	** +10.5	** +9.1
	P.C	+7.1	+7.7	+7.4	+6.4	+7.0	+5.8	+5.8
	P. CH	+3.7	+4.0	+3.8	+4.1	+ +5.9	* +7.7	+ +5.8
95≥1.0	R	+ +9.0	* +8.7	+ +6.8	+ +5.9	* +7.1	* +6.7	+ +5.7
	A	+ +9.9	+ +9.5	* +8.7	+6.0	* +7.7	* +8.6	* +7.9
	P.C	+6.0	+5.8	+3.0	+1.3	+3.7	+2.1	+2.6
	P. CH	+7.8	+ +8.0	+6.7	+5.5	+ +6.7	* +8.4	* +7.4

R – rok, A – okres akumulacyjny, P.C – półrocze ciepłe, P.CH – półrocze chłodne,
p – poziom istotności statystycznej: + – 0.1; * – 0.05, ** – 0.01, *** – 0.001, Z – zmiana na 10 lat

R – year, A – accumulation period, P.C – warm half-year, P.CH – cold half-year,
p – statistical significance level : + – 0.1; * – 0.05, ** – 0.01, *** – 0.001, Z – change in % per 10 years

W Hornsundzie wszystkie badane charakterystyki opadów ekstremalnych, do których zalicza się ich wysokość oraz udział w sumach ogólnych oraz liczbę dni występowania, cechują się podobnym przebiegiem czasowym. Najmniejsze zróżnicowanie zmienności wieloletniej tych wskaźników obserwowane jest w okresie akumulacyjnym (tab. 5) oraz półroczu ciepłym, o czym świadczą wysokie wartości współczynników korelacji (R-Spearmana) obliczone pomiędzy charakterystykami ekstremów opadowych wyznaczonych na podstawie wszystkich uwzględnionych wartości progowych. Największym zróżnicowaniem odznacza się z kolei półrocze chłodne, przy czym również w tym sezonie współczynniki korelacji były wysokie i statystycznie istotne (tab.6).

Tabela 5 – Table 5

Współczynniki korelacji pomiędzy wskaźnikami ekstremalnych opadów w okresie akumulacyjnym
Correlation coefficient between extreme precipitation indices for accumulation period

Wskaźniki Indices		Liczba dni – Number of days (A)			Suma – Total (B)			Udział w sumach całkowitych Share in overall precipitation total (C)		
		≥90(≥0.1)	≥90(≥1.0)	≥95(≥1.0)	≥90(≥0.1)	≥90(≥1.0)	≥95(≥1.0)	≥90(≥0.1)	≥90(≥1.0)	≥95(≥1.0)
A	≥90(≥0.1)		0.852*	0.606*	0.916*	0.769*	0.583*	0.759*	0.573*	0.423*
	≥90(≥0.1)	0.852*		0.767*	0.945*	0.949*	0.764*	0.870*	0.870*	0.658*
	≥90(≥0.1)	0.606*	0.767*		0.800*	0.874*	0.986*	0.831*	0.853*	0.956*
B	≥90(≥0.1)	0.916*	0.945*	0.800*		0.932*	0.797*	0.882*	0.790*	0.671*
	≥90(≥0.1)	0.769*	0.949*	0.874*	0.932*		0.898*	0.900*	0.938*	0.817*
	≥90(≥0.1)	0.583*	0.764*	0.986*	0.797*	0.898*		0.825*	0.874*	0.961*
C	≥90(≥0.1)	0.759*	0.870*	0.831*	0.882*	0.900*	0.825*		0.881*	0.780*
	≥90(≥0.1)	0.573*	0.870*	0.853*	0.790*	0.938*	0.874*	0.881*		0.862*
	≥90(≥0.1)	0.423*	0.658*	0.956*	0.671*	0.817*	0.961*	0.780*	0.862*	

* statystycznie istotne współczynniki korelacji na poziomie $p < 0.05$

* statistically significant coefficients at $p < 0.05$

Tabela 6 – Table 6

Współczynniki korelacji pomiędzy wskaźnikami ekstremalnych opadów w półroczu chłodnym
Correlation coefficient between extreme precipitation indices for cold half-year

Wskaźniki Indices		Liczba dni – Number of days (A)			Suma – Total (B)			Udział w sumach całkowitych Share in overall precipitation total (C)		
		≥90(≥0.1)	≥90(≥1.0)	≥95(≥1.0)	≥90(≥0.1)	≥90(≥1.0)	≥95(≥1.0)	≥90(≥0.1)	≥90(≥1.0)	≥95(≥1.0)
A	≥90(≥0.1)		0.815*	0.439*	0.942*	0.736*	0.377*	0.747*	0.495*	0.170
	≥90(≥0.1)	0.815*		0.659*	0.901*	0.944*	0.594*	0.815*	0.837*	0.435*
	≥90(≥0.1)	0.439*	0.659*		0.618*	0.750*	0.913*	0.612*	0.736*	0.845*
B	≥90(≥0.1)	0.942*	0.901*	0.618*		0.887*	0.595*	0.889*	0.711*	0.409*
	≥90(≥0.1)	0.736*	0.944*	0.750*	0.887*		0.784*	0.873*	0.922*	0.639*
	≥90(≥0.1)	0.377*	0.594*	0.913*	0.595*	0.784*		0.682*	0.801*	0.940*
C	≥90(≥0.1)	0.747*	0.815*	0.612*	0.889*	0.873*	0.682*		0.846*	0.582*
	≥90(≥0.1)	0.495*	0.837*	0.736*	0.711*	0.922*	0.801*	0.846*		0.744*
	≥90(≥0.1)	0.170	0.435*	0.845*	0.409*	0.639*	0.940*	0.582*	0.744*	

* statystycznie istotne współczynniki korelacji na poziomie $p < 0.05$

* statistically significant coefficients at $p < 0.05$

4.1. Okres roczny

W Hornsundzie średnio w roku notuje się około 17.1 dni z opadem $\geq 90p_{(\geq 0.1)}$, 8.5 dni z opadem $\geq 90p_{(\geq 1.0)}$ i tylko 4.3 dnia z opadem $\geq 95p_{(\geq 1.0)}$ (tab. 7). W rozpatrywanym wieloleciu opady ekstremalne pojawiały się najrzadziej w połowie lat 80. W 1984 i 1987 roku tylko dwa razy odnotowano opad $\geq 90p_{(\geq 1.0)}$, natomiast opady $\geq 95p_{(\geq 1.0)}$ nie pojawiły się w ogóle. W połowie lat 80. rzadko notowano także opady $\geq 90p_{(\geq 0.1)}$, chociaż ich najniższa liczba, tj. 5 dni przypadła na rok 1979. Dni z opadem przekraczającym wszystkie uwzględnione w pracy wartości progowe najczęściej występowały w drugiej połowie lat 90. Maksymalną liczbę dni z opadem przekraczającym $90p_{(\geq 0.1)}$ zanotowano w 1997 roku (26 dni). W przypadku opadów $\geq 90p_{(\geq 1.0)}$ równorzędne maksima wynoszące 15 dni pojawiły się w 1994 i 1999 roku, niemal równie wysoka liczba dni (14 dni) z opadem przekraczającym omawianą wartość progową wystąpiła w roku 1996. Opady ekstremalne wyznaczone na podstawie najsurowszego kryterium ($95p_{(\geq 1.0)}$) z największą częstością (11 dni) zdarzały się w 1994 i 2004 roku, ich spora liczba pojawiła się także w latach 1996 (9 dni) i 1999 (10 dni). Do najbardziej charakterystycznych cech czasowego przebiegu rocznej liczby dni z opadem ekstremalnym w Hornsundzie zalicza się jej wyraźną tendencję rosnącą od połowy lat 80. do połowy lat 90. oraz podział badanego wielolecia na dwa podokresy: 1979 – około 1993 i 1994 – 2006. W latach 1979-1993 średnia liczba dni z opadem ekstremalnym ($90p_{(\geq 0.1)}$: 14.9 dni, $\geq 90p_{(\geq 1.0)}$: 6.7 dni, $\geq 95p_{(\geq 1.0)}$: 2.7 dni) była wyraźnie niższa niż w drugim z wymienionych podokresów ($90p_{(\geq 0.1)}$: 19.6 dni, $\geq 90p_{(\geq 1.0)}$: 11.0 dni, $\geq 95p_{(\geq 1.0)}$: 6.0 dni).

Tabela 7 – Table 7

Średnie (śr), maksymalne (max) oraz minimalne (min) wartości wskaźników ekstremalnych zdarzeń opadowych w okresie rocznym

Average (śr), maximum (max) and minimum (min) annual values of extreme precipitation indices

Wskaźnik Index	Liczba dni Number of days					Suma [mm] Total [mm]					Udział w sumie rocznej [%] Share in annual total [%]				
	śr	max	R	min	R	śr	max	R	min	R	śr	max	R	min	R
$\geq 90p_{(\geq 0.1)}$	17.1	26	1997	5	1979	216.9	394.8	1994	57.4	1979	48.6	65.8	1994 1999	22.1	1979
$\geq 90p_{(\geq 1.0)}$	8.6	15	1994 1999	2	1985 1987	143.8	331.1	1994	23.9	1987	32.2	55.3	1999	9.7	1985
$\geq 95p_{(\geq 1.0)}$	4.3	11	1994 2004	0	1984 1987	91.8	285.4	1994	0.0	1984 1987	19.7	47.6	1994	0.0	1984 1987

R – rok wystąpienia – year of occurrence

W Hornsundzie sumy opadów powstałych podczas zdarzeń ekstremalnych występujących w ciągu całego roku wynoszą średnio 216.9 mm (opady $\geq 90p_{(\geq 0.1)}$), 143.8 mm (opady $\geq 90p_{(\geq 1.0)}$) i 91.8 mm (opady $\geq 95p_{(\geq 1.0)}$) – tab. 7. Najwyższe roczne wartości wszystkich omawianych wskaźników zanotowano w 1994 roku i były one zdecydowanie wyższe od wartości średnich, osiągając odpowiednio 394.8 mm (opady $\geq 90p_{(\geq 0.1)}$), 331.1 mm (opady $\geq 90p_{(\geq 1.0)}$) oraz 285.4 mm (opady $\geq 95p_{(\geq 1.0)}$). Biorąc pod uwagę liczbę dni, podczas których w 1994 roku w Hornsundzie notowano zdarzenia ekstremalne (odpowiednio: 25 dni, 15 dni i 11 dni) przytoczone powyżej sumy są zaskakująco wysokie jak na warunki pluwalne tego obszaru, gdzie średnio podczas całego roku spada tylko 433,1 mm wody.

Przebieg wieloletni sum opadów ekstremalnych nawiązuje do przebiegu liczby dni z opadem ekstremalnym. W podobnym okresie występowały lata charakteryzujące się najniższymi (druga połowa lat 80.) i najwyższymi (połowa lat 90.) wartościami omawianej charakterystyki. W tym samym okresie, to jest od połowy lat 80. do połowy lat 90., pojawia się również trend rosnący, który w przypadku sum jest jednak zdecydowanie wyraźniej zaznaczony niż w przypadku liczby dni z opadem ekstremalnym. Ponadto w przebiegu wieloletnim sum opadów ekstremalnych silniej uwidacznia się podział wielolecia na dwa podokresy (przed i po roku 1993) różniące się w tym wypadku nie tylko wartościami średnimi lecz także zakresem zmian. W latach 1979-1993 średni opad ekstremalny w zależności od wskaźnika wynosił 173.5 mm (opady $\geq 90p_{(\geq 0.1)}$), 102.3 mm (opady $\geq 90p_{(\geq 1.0)}$) i 55.7 mm (opady $\geq 95p_{(\geq 1.0)}$), podczas gdy w wieloleciu 1994–2006 był znacząco wyższy osiągając odpowiednio 267.0 mm, 193.7 mm i 133.5 mm. Również badania norweskie (Førland i Hanssen-Bauer 2000, 2003) wykazały istnienie statystycznie istotnego trendu wzrostowego sum opadów rocznych na Spitsbergenie w XX wieku.

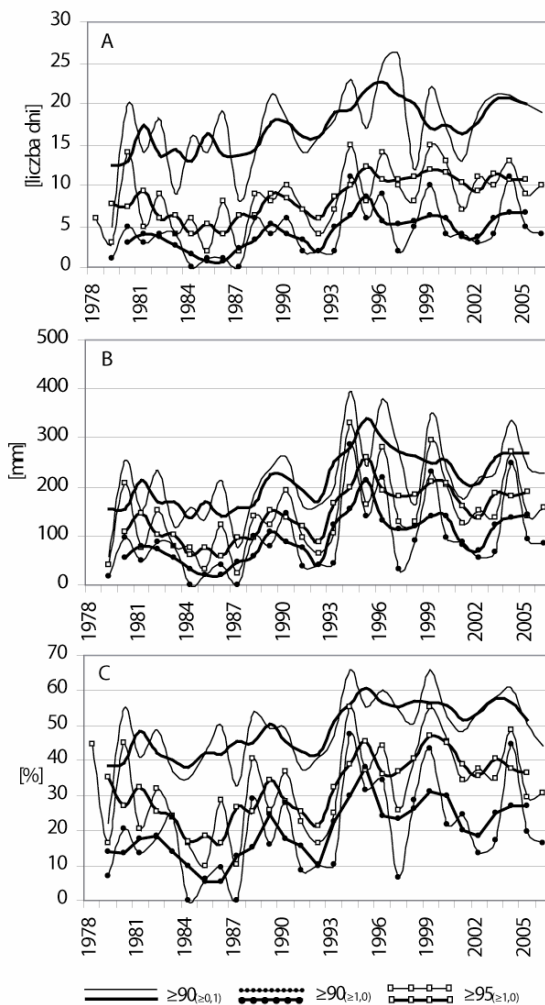
W Hornsundzie opady ekstremalne w zależności od przyjętych kryteriów stanowią średnio od 48.6% ($\geq 90p_{(\geq 0.1)}$) do 19.7% ($\geq 95p_{(\geq 1.0)}$) sumy rocznej. Do skrajnych pod względem udziału opadów ekstremalnych w całkowitej sumie rocznej zalicza się lata 1994 i 1999. W roku 1994 opady przekraczające wartość $90p_{(\geq 0.1)}$ i $95p_{(\geq 1.0)}$, które pojawiały w ciągu odpowiednio 23 dni i 11 dni dały aż 65.8% ($\geq 90p_{(\geq 0.1)}$) i 47.6% ($\geq 95p_{(\geq 1.0)}$) całkowitej sumy rocznej. W roku 1999 opady $\geq 90p_{(\geq 0.1)}$ również stanowiły 65.8% chociaż były notowane nieco rzadziej (przez 22 dni), natomiast podczas 15 dni z opadem $\geq 90p_{(\geq 1.0)}$ do powierzchni ziemi dotarło aż 47.6% sumy rocznej. W przebiegu wieloletnim udziału opadów ekstremalnych w całkowitych sumach rocznych, podobnie jak w przypadku wcześniej omówionych charakterystyk, ważnym z punktu widzenia zmian klimatu jest rok 1993, rozdzielający dwa wyraźnie różniące się od siebie podokresy. Do 1993 roku średni udział opadów ekstremalnych w sumach rocznych był niższy (42.7% dla opadów $\geq 90p_{(\geq 0.1)}$, 31.7% dla opadów $\geq 90p_{(\geq 1.0)}$ i 13.4% opadów $\geq 95p_{(\geq 1.0)}$) niż w okresie późniejszym (55.4% dla opadów $\geq 90p_{(\geq 0.1)}$, 55.3% dla opadów $\geq 90p_{(\geq 1.0)}$ i 26.9% opadów $\geq 95p_{(\geq 1.0)}$). Krótkookresowe tendencje wyraźnie zaznaczone w przebiegu czasowym udziału opadów $\geq 90p_{(\geq 0.1)}$ i $\geq 95p_{(\geq 1.0)}$, pozwalają na podział rozpatrywanego wielolecia na trzy charakterystyczne podokresy różniące się kierunkiem tendencji: 1979–1985, 1986–1994 i 1995–2006. Od początku okresu obserwacji instrumentalnych do około połowy lat 80. oraz od połowy lat 90. do roku 2006, udział opadów ekstremalnych w sumach rocznych wyraźnie malał. Malejąca tendencja przypadająca na koniec wielolecia jest silniejsza w przypadku opadów $\geq 95p_{(\geq 1.0)}$. W drugiej połowie lat 80. i w pierwszej połowie lat 90. procent opadów rocznych przypadający na zdarzenia ekstremalne silnie wzrastał (ryc. 1).

4.2. Okres akumulacyjny (IX–V)

W Hornsundzie w okresie akumulacyjnym opady ekstremalne w zależności od wskaźnika zdarzały się średnio podczas 13.0 ($\geq 90p_{(\geq 0.1)}$), 6.3 ($\geq 90p_{(\geq 1.0)}$) i 3.1 ($\geq 95p_{(\geq 1.0)}$) dni. Wspólną cechą przebiegu wieloletniego liczby dni z opadem ekstremalnym w okresie akumulacyjnym jest minimum przypadające na drugą połowę lat 80., kiedy dni z opadem $\geq 90p_{(\geq 0.1)}$ i $\geq 90p_{(\geq 1.0)}$ pojawiły się odpowiednio tylko 3 razy w 1988 rok i 2 razy w 1987 i 1988 roku. W rozpatrywanym okresie w ciągu 4 lat w ogóle nie notowano najwyższych z badanych opadów ($\geq 95p_{(\geq 1.0)}$). Warto zwrócić uwagę, że na lata 80. przypadają nie tylko niskie ale również jedne z najwyższych częstości dni z opadem $\geq 90p_{(\geq 0.1)}$. Współwystępowanie skrajnych wartości wspomnianego wskaźnika decyduje o wyjątkowo dużym zakresie jego zmian do końca lat 80. W okresie późniejszym to jest od początku lat 90. zmiany liczby dni z opadem $\geq 90p_{(\geq 0.1)}$

z roku na rok były zdecydowanie mniejsze. Wysokie wartości liczby dni z opadem $\geq 90p_{(\geq 1.0)}$ i $\geq 95p_{(\geq 1.0)}$ przypadają z kolei na ostatnie lata badanego wielolecia, z maksimum w 1999 roku (odpowiednio 12 dni i 9 dni) – tab. 8.

Sumy opadów powstałych podczas zdarzeń ekstremalnych występujących w okresie akumulacyjnym średnio wynoszą 154.5 mm ($\geq 90p_{(\geq 0.1)}$), 100.7 mm ($\geq 90p_{(\geq 1.0)}$) i 64.4 mm ($\geq 95p_{(\geq 1.0)}$). W przebiegu wieloletnim zmieniają się od 278.7 do 38.9 mm w przypadku opadów $\geq 90p_{(\geq 0.1)}$, od 241.2 mm do 25.4 mm w przypadku opadów $\geq 90p_{(\geq 1.0)}$ oraz od 204.2 do 0.0 mm dla opadów $\geq 95p_{(\geq 1.0)}$.



Ryc. 1. Wieloletnia zmienność wskaźników opadów ekstremalnych w okresie rocznym. A – liczba dni z opadem ekstremalnym, B – sumy opadów ekstremalnych, C – udział opadów ekstremalnych w sumach całkowitych. Linie pogrubione oznaczają wartości wygładzone średnią ruchomą 3-pkt

Fig. 1. Long-term variability of annual values of extreme precipitation indices. A – number of days with extreme precipitation, B – extreme precipitation total, C – extreme precipitation share in overall precipitation total. Bolded lines denote values smoothed by 3-year moving average

Tabela 8 – Table 8

Średnie (śr), maksymalne (max) oraz minimalne (min) wartości wskaźników ekstremalnych zdarzeń opadowych w okresie akumulacyjnym

Average (śr), maximum (max) and minimum(min) values of extreme precipitation indices for accumulation period

Wskaźnik Index	Liczba dni Number of days					Suma [mm] Total [mm]					Udział w sumie rocznej [%] Share in annual total [%]				
	śr	max	R	min	R	śr	max	R	min	R	śr	max	R	min	R
$\geq 90p_{(\geq 0.1)}$	13.0	21	1984 1989	3	1988	154.5	278.7	1999	38.9	1988	48.5	67.6	1999	21.6	1988
$\geq 90p_{(\geq 1.0)}$	6.3	12	1999	2	1987 1988	100.7	241.2	1999	25.4	1987	31.3	58.5	1999	13.6	1992
$\geq 95p_{(\geq 1.0)}$	3.1	9	1999	0	4 lata*	64.4	204.2	1999	0.0	4 lata*	19.4	49.5	1999	0.0	4 lata*

* 1983, 1985, 1986, 1987; R – rok wystąpienia – year of occurrence

W Hornsundzie udział opadów ekstremalnych w całkowitej sumie opadów okresu akumulacyjnego zmienia się w dosyć szerokich granicach w zależności od przyjętej wartości progowej. Opady podczas dni z sumą $\geq 90p_{(\geq 0.1)}$ stanowią średnio 48.5% wody docierającej do powierzchni ziemi w okresie akumulacji, wkład opadów $\geq 95p_{(\geq 1.0)}$ średnio wynosi 19.4% (tab. 8).

Wieloletni przebieg wszystkich wskaźników opadów ekstremalnych w okresie akumulacyjnym jest podobny. Silny wzrost zarówno liczby dni z opadem ekstremalnych, sum opadów ekstremalnych jak i ich udziału w całkowitym opadzie w okresie akumulacyjnym rozpoczyna się w połowie lat 80. i kończy się w drugiej połowie lat 90. Przeciwną tendencją, a mianowicie spadkiem wartości wskaźników opadów ekstremalnych, charakteryzują się lata przypadające na początek okresu obserwacji instrumentalnych w Hornsundzie – 1978–1985. Od drugiej połowy lat 90. kierunek tendencji jest słabo zaznaczony.

4.3. Półrocze ciepłe (IV–IX)

W Hornsundzie w półroczu ciepłym opady ekstremalnym notowane są stosunkowo rzadko, w zależności od przyjętych wartości progowych, średnio przez 8.1 ($\geq 90p_{(\geq 0.1)}$), 4.2 ($\geq 90p_{(\geq 1.0)}$) i 2.1 dnia ($\geq 95p_{(\geq 1.0)}$). W ciągu wspomnianych dni do powierzchni ziemi dociera odpowiednio 117.6, 80.8 lub 52.4 mm, co z kolei stanowi 46.6%, 30.0% lub 18.6% całkowitych opadów półrocza ciepłego. W skrajnych przypadkach, do których zalicza się rok 1996, podczas 15 dni z opadem $\geq 90p_{(\geq 0.1)}$ spadło niemal 70% opadu całkowitego. W roku 1994 przez 7 dni z opadem $\geq 95p_{(\geq 1.0)}$ spadło aż 50% opadów półrocza ciepłego (tab. 9).

Wieloletni przebieg wszystkich wskaźników opadów ekstremalnych w półroczu ciepłym nawiązuje do analogicznego ich przebiegu w okresie akumulacyjnym. W półroczu ciepłym, podobnie jak w okresie akumulacyjnym od połowy lat 80. do połowy lat 90. zauważa się wzrost wartości wszystkich charakterystyk opadów ekstremalnych. Spadkowa tendencja, widoczna w początkowych latach analizowanego okresu jest w półroczu ciepłym słabsza niż w okresie akumulacyjnym. Warto również wskazać na lata 90., w których charakterystyki opadów ekstremalnych odznaczały się znaczną zmiennością z roku na rok.

Tabela 9 – Table 9

Średnie (śr), maksymalne (max) oraz minimalne (min) wartości wskaźników ekstremalnych zdarzeń opadowych w półroczu ciepłym. Hornsund 1979-2006

Average (śr), maximum (max) and minimum (min) values of extreme precipitation indices for warm half-year

Wskaźnik Index	Liczba dni Number of days					Suma [mm] Total [mm]					Udział w sumie rocznej [%] Share in annual total [%]				
	śr	max	R	min	R	śr	max	R	min	R	śr	max	R	min	R
$\geq 90p_{(\geq 0.1)}$	8.1	15.0	1996	1.0	1987	117.6	277.3	1996	9.6	1987	46.6	69.0	1996	10.0	1987
$\geq 90p_{(\geq 1.0)}$	4.2	11.0	1999	0.0	1987	80.8	235.5	1999	0.0	1987	30.3	59.7	1999	0.0	1987
$\geq 95p_{(\geq 1.0)}$	2.1	7.0	1994 1996 2004	0.0	5 lat*	52.4	209.0	1994	0.0	5 lat*	18.6	50.9	1994	0.0	5 lat*

* – 1979, 1984, 1987, 1991, 1997; R – rok wystąpienia – year of occurrence

4.4. Półrocze chłodne (X-III)

W półroczu chłodnym wartości rozpatrywanych wskaźników opadów ekstremalnych nie odbiegają znacząco od ich wartości w półroczu ciepłym (tab. 10). W przebiegu wieloletnim, tendencje spadkowe oraz wzrostowe liczby dni z opadem ekstremalnym ich sum oraz ich udziału w opadach półrocza chłodnego pojawiają się w okresach analogicznych lub są nieznacznie przesunięte w czasie w porównaniu z wcześniej omówionym okresem rocznym i sezonami. Najniższe wartości wszystkich charakterystyk opadów ekstremalnych w Hornsundzie przypadają w półroczu chłodnym na drugą połowę lat 80. Okres charakteryzujący się tendencją wzrostową wartości wskaźników opadów ekstremalnych w półroczu chłodnym również przypada na drugą połowę lat 80. i pierwszą połowę lat 90. Warto także zauważyć, że wraz z końcem XX wieku w Hornsundzie zaznaczył się wzrost zarówno liczby dni, sum jak i udziału opadów ekstremalnych w sumach półrocza chłodnego.

Tabela 10 – Table 10

Średnie (śr), maksymalne (max) oraz minimalne (min) wartości wskaźników ekstremalnych zdarzeń opadowych w półroczu chłodnym

Average (śr), maximum (max) and minimum (min) values of extreme precipitation indices for cold half-year

Wskaźnik Index	Liczba dni Number of days					Suma [mm] Total [mm]					Udział w sumie rocznej [%] Share in annual total [%]				
	śr	max	R	min	R	śr	max	R	min	R	śr	max	R	min	R
$\geq 90p_{(\geq 0.1)}$	8.9	18	1984	2	1988	98.4	211.1	1995	22.1	1988	47.4	69.5	2004	20.2	1988
$\geq 90p_{(\geq 1.0)}$	4.4	10	1995	1	1987 1988 1992	63.1	172.4	1995	12.8	1987	30.0	57.9	2004	9.4	1992
$\geq 95p_{(\geq 1.0)}$	2.2	6	1995 2004	0	5 lat*	38.8	131.4	1995	0.0	5 lat*	18.3	44.6	2004	0.0	5 lat*

* – 1983, 1985, 1986, 1987, 1988; R – rok wystąpienia – year of occurrence

5. Synoptyczne uwarunkowania ekstremalnych opadów

W Hornsundzie związki pomiędzy opadami ekstremalnymi i cyrkulacją atmosfery w okresie rocznym oraz akumulacyjnym kształtują się podobnie. Opady ekstremalne najczęściej pojawiają się tam podczas napływu powietrza z południowego zachodu, kiedy archipelag znajduje się pod wpływem układu niżowego (sytuacja SWc). W typie tym w zależności od przyjętego kryterium wystąpiło od 32.1% (opady $\geq 90p_{(\geq 0.1)}$) do 36.6% (opady $\geq 95p_{(\geq 1.0)}$) ekstremalnych zjawisk opadowych pojawiających się w ciągu całego roku oraz od 33.5% (opady $\geq 90p_{(\geq 0.1)}$) do 37.1% (opady $\geq 95p_{(\geq 1.0)}$) opadów ekstremalnych jakie odnotowano w okresie akumulacyjnym. Sytuacją silnie sprzyjającą występowaniu ekstremów opadowych jest także napływ powietrza z południa towarzyszący niżowi barycznemu (Sc). Częstość ekstremalnych opadów osiąga wówczas w Hornsundzie od 18.6% (opady $\geq 90p_{(\geq 0.1)}$) do 26.0% (opady $\geq 95p_{(\geq 1.0)}$) w okresie rocznym i od 19.2% (opady $\geq 90p_{(\geq 0.1)}$) do 28.1% (opady $\geq 95p_{(\geq 1.0)}$) w okresie akumulacyjnym. Największe zróżnicowanie częstości pomiędzy typem SWc i Sc obserwuje się w przypadku opadów $\geq 90p_{(\geq 0.1)}$ i różnica ta zmniejsza się wraz ze wzrostem wartości progowej, na podstawie której wyznaczono ekstrema opadowe. Opady ekstremalne, co prawda już znacznie rzadziej niż przy wymienionych powyżej typach SWc i Sc, pojawiają się także z częstością przekraczającą 5% przy sytuacji SWa, Cc oraz Bc (tab. 11).

Tabela 11 – Table 11

Częstość opadów ekstremalnych w typach sytuacji synoptycznych. Hornsund 1979–2006

Frequency of extreme precipitation according to circulation types in Hornsund 1979–2006

Typ Type	R			A			P.C			P.Ch		
	≥ 90 $p_{(\geq 0.1)}$	≥ 90 $p_{(\geq 1.0)}$	≥ 95 $p_{(\geq 1.0)}$	≥ 90 $p_{(\geq 0.1)}$	≥ 90 $p_{(\geq 1.0)}$	≥ 95 $p_{(\geq 1.0)}$	≥ 90 $p_{(\geq 0.1)}$	≥ 90 $p_{(\geq 1.0)}$	≥ 95 $p_{(\geq 1.0)}$	≥ 90 $p_{(\geq 0.1)}$	≥ 90 $p_{(\geq 1.0)}$	≥ 95 $p_{(\geq 1.0)}$
Na	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
NEa	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Ea	0.2	-	-	-	-	-	0.5	-	-	-	-	-
SEa	1.2	0.4	0.8	1.1	0.6	1.1	2.2	0.7	1.3	-	-	-
Sa	3.9	4.1	3.3	2.7	3.4	3.4	5.6	5.6	3.8	1.9	2.0	2.3
SWa	8.3	9.4	10.6	6.3	6.8	9.0	10.4	10.4	12.7	5.6	8.0	6.8
Wa	1.4	1.2	0.8	1.4	1.1	1.1	1.9	1.4	1.3	0.9	1.0	-
NWa	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Ca	0.2	-	-	0.3	-	-	0.4	-	-	-	-	-
Ka	2.1	3.3	3.3	2.2	2.8	2.2	2.2	2.8	2.5	1.9	4.0	4.5
Nc	0.2	-	-	-	-	-	0.4	-	-	-	-	-
NEc	0.2	-	-	-	-	-	0.4	-	-	-	-	-
Ec	3.9	2.9	1.6	4.1	4.5	1.1	3.7	2.1	2.5	4.2	4.0	-
SEc	5.0	4.1	7.3	6.0	3.4	6.7	3.7	2.8	3.8	6.5	6.0	13.6
Sc	18.6	24.2	26.0	19.2	25.0	28.1	19.7	25.7	25.3	17.3	22.0	27.3
SWc	32.1	33.2	36.6	33.5	35.8	37.1	26.4	29.2	35.4	39.3	39.0	38.6
Wc	5.0	4.1	4.1	4.1	4.0	2.2	4.8	2.8	3.8	5.1	6.0	4.5
NWc	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Cc	7.2	3.7	1.6	7.7	4.0	2.2	7.8	4.9	2.5	6.5	2.0	-
Bc	8.7	8.2	4.1	8.8	6.8	4.5	8.9	11.1	5.1	8.4	4.0	2.3
x	1.7	1.2	-	2.5	1.7	1.1	1.1	0.7	-	2.3	2.0	-

R – okres roczny, A – okres akumulacyjny, P.C – półrocze ciepłe, P.Ch – półrocze chłodne,
„-“ oznacza częstość 0%

R – year, A – accumulation period, P.C. – warm half-year, P.Ch – cold half-year, „-“ frequency 0%

Zależność opadów ekstremalnych od cyrkulacji atmosfery wykazuje zróżnicowanie w przebiegu rocznym. Podobnie jak w przypadku okresu akumulacyjnego i rocznego, w półroczu ciepłym i chłodnym opady ekstremalne zdarzają się najczęściej przy sytuacji SWc i Sc, przy czym częstość opadów ekstremalnych określonych na podstawie każdego z zastosowanych w pracy kryteriów, w typie SWc w półroczu chłodnym jest wyraźnie większa niż w półroczu ciepłym. Odwrotną sytuację obserwuje się w odniesieniu do częstości opadów ekstremalnych w typie Sc, a mianowicie ich częstość w półroczu chłodnym jest zwykle nieco niższa niż w półroczu ciepłym, z tym że sytuacja ta dotyczy już tylko opadów $\geq 90p_{(\geq 0.1)}$ i $\geq 90p_{(\geq 1.0)}$. W rezultacie w półroczu ciepłym różnica pomiędzy częstością opadów ekstremalnych ($\geq 90p_{(\geq 0.1)}$ i $\geq 90p_{(\geq 1.0)}$) w typach SWc i Sc jest znacznie mniejsza niż w półroczu chłodnym.

Jako pewnego rodzaju prawidłowość uwidaczniającą się w półroczu ciepłym uznać można wzrost częstości opadów ekstremalnych w typie SWa oraz jej spadek w typie Cc uzależnione od kryteriów wydzielania ekstremów pluwialnych. Przy typie SWa najniższe z opadów ekstremalnych ($\geq 90p_{(\geq 0.1)}$) odznaczają się mniejszą częstością (10.4%) niż najwyższe ($\geq 95p_{(\geq 1.0)}$ – 12.7%), z kolei przy typie Cc ekstrema najniższe pojawiają się częściej (7.8%) niż najwyższe (2.5%). W półroczu ciepłym opady $\geq 90p_{(\geq 0.1)}$ i $\geq 90p_{(\geq 1.0)}$ stosunkowo często w porównaniu z pozostałymi typami, występują również podczas bruzdy niżowej (Bc) (odpowiednio 8.9% i 11.1%).

W półroczu chłodnym warto natomiast zwrócić uwagę na znaczną częstość (13.6%) opadów skrajnie wysokich ($\geq 95p_{(\geq 1.0)}$) podczas napływu powietrza z SE podczas układu niżowego (SEc).

Rozpatrując związki opadów atmosferycznych z cyrkulacją, oprócz analizy częstości występowania opadów w typach cyrkulacji warto również zwrócić uwagę na prawdopodobieństwo warunkowe ich występowania w zależności od sytuacji synoptycznej. Analiza taka niesie ze sobą informację prognozytyczną, co czyni ją szczególnie wartościową. W związku z tym, że związek opadów ekstremalnych z cyrkulacją atmosferyczną w Hornsundzie wykazuje zmienność sezonową, analizę prawdopodobieństwa warunkowego wystąpienia ekstremalnych zdarzeń opadowych przeprowadzi się tylko dla półroczy. W półroczu chłodnym opady ekstremalne są najbardziej prawdopodobne przy sytuacji SWc, zmieniając się w zależności od wskaźnika od 33.3% ($\geq 90p_{(\geq 0.1)}$) do 6.7% ($\geq 95p_{(\geq 1.0)}$). Kolejnym typem sprzyjającym ich występowaniu, podobnie jak w przypadku wcześniej omówionych częstości, jest sytuacja Sc, przy czym im wyższy opad tym mniejsza jest różnica pomiędzy prawdopodobieństwem jego wystąpienia w typie SWc i Sc. Warto natomiast zwrócić uwagę, że opady ekstremalne w typie SWa są niemalże tak samo prawdopodobne jak przy sytuacji Sc. W półroczu ciepłym z kolei ekstrema opadowe z największym prawdopodobieństwem mogą pojawić się podczas napływu powietrza z południa w sytuacji cyklonalnej (Sc), a nie tak jak w półroczu chłodnym przy typie SWc, co wyraźnie uwidacznia się w przypadku opadów $\geq 90p_{(\geq 1.0)}$ (Sc: 19,3%, SWc: 16,2%). Zasada ta zachowana jest w odniesieniu do opadów $\geq 90p_{(\geq 0.1)}$, przy czym różnica pomiędzy prawdopodobieństwem w typie SWc i Sc jest znikoma, wynosząc 0,3% (odpowiednio 27,3% i 27,6%). W półroczu chłodnym opady skrajnie wysokie w Hornsundzie są niemal tak samo prawdopodobne przy typie SWc jak i Sc (odpowiednio 10,8% i 10,4%), a także stosunkowo często mogą pojawić także przy sytuacji SWa i Sa.

5. Podsumowanie i wnioski

W Hornsundzie w okresie 1979-2006 wzrastała zarówno liczba dni z opadem ekstremalnym, sumy opadów ekstremalnych jak również ich udział procentowy w całkowitych opadach rocznych, okresu akumulacyjnego oraz półroczy ciepłego i chłodnego. Najistotniejszymi statystycznie zmianom podlega

udział opadów ekstremalnych w sumach całkowitych obliczonych na podstawie wszystkich zdarzeń opadowych. Biorąc pod uwagę rozpatrywane przedziały czasowe, najistotniejszym i równoczesnej najtrwałszym zmianom podlegają opady ekstremalne w okresie rocznym oraz okresie akumulacyjnym. Najlepsze tendencje badanych charakterystyk stwierdzono w półroczu ciepłym.

Tabela 12 – Table 12

Średnie wartości wskaźników opadów ekstremalnych w podokresach 1979–1993 i 1994–2006
Average values of extreme precipitation indices for two sub periods 1979–1993 and 1994–2006)

	Podokres Sub-period	Liczba dni z opadem ekstremalnym Number of days with extreme precipitation			Suma opadów ekstremalnych [mm] Extreme precipitation total [mm]			Udział opadów ekstremalnych w sumach całkowitych [%] Extreme precipitation share in overall precipitation total [%]		
		$\geq 90_{(\geq 0.1)}$	$\geq 90_{(\geq 1.0)}$	$\geq 95_{(\geq 1.0)}$	$\geq 90_{(\geq 0.1)}$	$\geq 90_{(\geq 1.0)}$	$\geq 95_{(\geq 1.0)}$	$\geq 90_{(\geq 0.1)}$	$\geq 90_{(\geq 1.0)}$	$\geq 95_{(\geq 1.0)}$
R	1979–93 (a)	14.9	6.7	2.7	173.5	102.3	55.7	42.7	24.6	13.4
	1994–06 (b)	19.6	11.0	6.0	267.0	193.7	133.5	55.4	39.9	26.9
	a-b	4.7	4.3	3.3	93.5	91.3	77.8	12.8	15.3	13.5
	a-b[%]	27.4	50.0	76.9	43.1	63.5	84.8	26.3	48.3	68.8
A	1979–93 (a)	11.6	4.9	2.1	124.8	72.0	38.2	41.4	23.3	12.2
	1994–06 (b)	14.8	8.1	4.6	194.1	140.4	99.3	58.0	41.8	29.0
	a-b	3.1	3.2	2.5	69.3	68.4	61.1	16.6	18.4	16.8
	a-b[%]	24.1	51.6	80.2	44.8	67.9	94.9	34.3	58.8	86.4
P.C	1979–93 (a)	6.7	3.5	1.4	91.2	59.0	33.7	40.7	25.2	14.4
	1994–06 (b)	9.6	5.2	2.8	148.0	106.0	74.1	53.3	36.1	23.4
	a-b	2.9	1.8	1.4	56.8	47.0	40.4	12.5	10.8	8.9
	a-b[%]	35.7	42.3	69.8	48.3	58.11	77.1	26.9	35.7	48.2
P.CH	1979–93 (a)	8.1	3.7	1.4	82.3	48.1	23.6	41.3	23.9	11.7
	1994–06 (b)	10.0	5.3	3.2	119.9	82.6	59.2	55.6	37.6	27.1
	a-b	1.9	1.5	1.7	37.6	34.5	35.6	14.4	13.8	15.4
	a-b[%]	21.0	35.2	79.4	38.2	54.6	91.8	30.3	45.8	84.2

R – rok, A – okres akumulacyjny, P.C. – półrocze ciepłe, P.CH – półrocze chłodne, a-b [%] – różnica pomiędzy średnimi wartościami wskaźników ekstremów opadowych w okresach 1979–1993 i 1994–2006. Wyrażona w % średniej wieloletniej 1079–2006

R – year, A – accumulation period, P.C. – warm half-year, P.CH – cold half-year, a-b [%] – difference between average values of extreme precipitation indices for two sub periods (1979–1993 and 1994–2006) as a percent of 1979–2006 average

Przebieg czasowy wskaźników opadów ekstremalnych w Hornsundzie pozwala na wyznaczenie charakterystycznych okresów, o podobnych kierunkach tendencji. W początkowych latach badanego wiekolecia, to jest od 1979 do około połowy lat 80. w Hornsundzie dominowała spadkowa tendencja wszystkich charakterystyk opadów ekstremalnych. Wyraźnie zaznaczony wzrost dni z opadem ekstremalnym, ich sum oraz udziału w sumach całkowitych przypadają na drugą połowę lat 80 i pierwszą połowę lat 90. Pod koniec XX wieku i w początkowych latach nowego stulecia w okresie rocznym, akumulacyjnym i półroczu ciepłym stwierdzono słabą tendencję spadkową. Jedynie w półroczu chłodnym kierunek zmian wskaźników opadów ekstremalnych był przeciwny, chociaż słabo widoczny.

W przypadku wszystkich badanych wskaźników opadów ekstremalnych jak również we wszystkich sezonach ważnym z punktu widzenia zmian klimatu okazał się rok 1993, który dzieli badane wielolecie na dwa podokresy różniące się istotnie wartościami średnimi, a w przypadku niektórych wskaźników również zakresem zmian (tab. 12).

W Hornsundzie opady ekstremalne najczęściej pojawiają się podczas napływu powietrza z południowego zachodu, kiedy archipelag znajduje się pod wpływem układu niżowego (sytuacja SWc). Sytuacją silnie sprzyjającą występowaniu ekstremów opadowych jest także napływ powietrza z południa towarzyszący niżowi barycznemu (Sc). Zależność opadów ekstremalnych od cyrkulacji atmosfery wykazuje zróżnicowanie w przebiegu rocznym. Podobnie jak w przypadku okresu akumulacyjnego i rocznego, w półroczu ciepłym i chłodnym opady ekstremalne zdarzają się najczęściej przy sytuacji SWc i Sc, przy czym częstość opadów ekstremalnych określonych na podstawie każdego z zastosowanych w pracy kryteriów, w typie SWc w półroczu chłodnym jest wyraźnie większa niż w półroczu ciepłym. W półroczu chłodnym opady ekstremalne są najbardziej prawdopodobne przy sytuacji SWc. W półroczu ciepłym z kolei ekstrema opadowe z największym prawdopodobieństwem mogą pojawić się podczas napływu powietrza z południa w sytuacji cyklonalnej (Sc).

Literatura

- Baranowski S., 1977, The subpolar glaciers of Spitsbergen seen against the climate of this region. *Acta Universitatis Vratislaviensis*, No 410, Results of Investigations of the Polish Scientific Spitsbergen Expedition, vol. III, Wrocław: 94 s.
- Easterling D.R., Meehl G.A., Parmesan C., Changnon S.A., Karl T.R., Mearns L.O., 2000, Climate extremes: observations, modeling, and impacts. *Science*, 289: 2068–2074.
- Førland E.J., Hanssen-Bauer I., 2000, Increased precipitation in the Norwegian Arctic: true or false. *Climatic Change*, 46: 485–509.
- Førland E.J., Hanssen-Bauer I., 2003, Climate variations and implications for precipitation types in the Norwegian Arctic, *Klima Report No 24/02*, Norwegian Meteorological Institute, Oslo: 21 s.
- Głowacki P., Niedźwiedz T., 1997, Climatological conditions in Hornsund (Spitsbergen) during succeeding Polish Polar Expeditions. *Polish Polar Studies*, 24th Polar Symposium, Warszawa: 81–94.
- IMGW, 2000-2001, *Roczniki Meteorologiczne Hornsund (pod red. M Miętusa) 1978/79 – 1980/81, 1982/83 – 1999/2000*, Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej Oddział Morski, Gdynia.
- Institute of Geophysics Polish Academy of Science, 2001, *Meteorological conditions Hornsund, Spitsbergen 2000/2001*, Publications of the Institute of Geophysics Polish Academy of Science, D-57(341), Warszawa.
- Institute of Geophysics Polish Academy of Science, 2003, *Meteorological conditions Hornsund, Spitsbergen 2001/2002*, Publications of the Institute of Geophysics Polish Academy of Science, D-60(351), Warszawa.
- Kierzkowski T., 1996, Cechy klimatu lokalnego stacji w Hornsundzie w oparciu o materiał z lat 1978-1995. *Problemy Klimatologii Polarnej*, 6: 67–82.
- Klein-Tank A.M., Können G.G. P., 2003, Trends in indices of daily temperature and precipitation extremes in Europe, 1946–99. *Journal of Climate*, 16: 3665–3680.
- Łupikasza E., 2002, Zmienność wieloletnia opadów atmosferycznych w Hornsundzie (Spitsbergen) w okresie 1978–2000. *Problemy Klimatologii Polarnej*, 12: 77–88.
- Łupikasza E., Niedźwiedz T., 2002, Wpływ cyrkulacji na opady atmosferyczne w Hornsundzie. [w:] Kostrzewski A., Rachlewicz G. (red.), *Polish Polar Studies, Funkcjonowanie i Monitoring Geosystemów Obszarów Polarnych*, Poznań: 203–216.

- Markin V.A., 1975, Klimat oblasti sovremennogo oledeneniya. [w:] Oledeneniye Spitsbergena (Svalbard), Rezultaty Issledovaniy po Mezdunarodnym Geofizicheskim Projektam, Izd. „Nauka”, Moskwa: 42–105.
- Marsz A., Styszyńska A. (red.), 2007, Klimat rejonu Polskiej Stacji Polarnej w Hornsundzie – stan, zmiany i ich przyczyny. Akademia Morska w Gdyni: 376 s.
- Niedźwiedz T., 2006, Kalendarz typów cyrkulacji nad Spitsbergenem: grudzień 1950 – grudzień 2006 (zbiór komputerowy dostępny w Katedrze Klimatologii, Wydział Nauk o Ziemi Uniwersytetu Śląskiego w Sosnowcu).
- Niedźwiedz T., 2002, Wpływ cyrkulacji atmosfery na wysokie opady w Hornsundzie (Spitsbergen). *Problemy Klimatologii Polarnej* 12: 65–75.
- Niedźwiedz T., Ustrnul Z., 1988, Wpływ sytuacji synoptycznych na stosunki opadowe w Hornsundzie (Spitsbergen). XV Sympozjum Polarne, Wydawnictwo Uniwersytetu Wrocławskiego, Wrocław: 196–202.
- Pereyma J., 1983, Climatological Problems of the Horsund area, Spitsbergen, *Acta Universitatis Wratislaviensis*, No 714, Results of Investigations of the Polish Scientific Spitsbergen Expedition, vol. V, Wrocław: 134 s.
- Przybylak R., 1996, Zmienność temperatury powietrza i opadów atmosferycznych w okresie obserwacji instrumentalnych w Arktyce, Toruń: 279 s.
- Przybylak R., 1997, Związki przestrzenne opadów atmosferycznych w Arktyce w okresie 1951-1990. *Problemy Klimatologii Polarnej*, 7: 41–54.
- Przybylak R., 2002, Variability of Air temperature and Atmospheric Precipitation in the Arctic. *Atmospheric and Oceanographic Sciences Library*, Kluwer Academic Publishers, Netherlands: 330 s.
- Przybylak R., 2003, The Climate of the Arctic. *Atmospheric and Oceanographic Sciences Library*, Kluwer Academic Publishers, Netherlands: 270 s.
- Przybylak R., Marciniak K., 1992, Opady a cyrkulacja atmosferyczna za zachodnim wybrzeżu Spitsbergenu w okresie 1979–1985. *Problemy Klimatologii Polarnej*, 2: 84–95.
- Rodzic J., Stepko W., 1985, Climatic conditions in Hornsund (1978–1983). *Polish Polar Researches*, 6 (4): 561–576.
- Wibig J., 2006, Daily precipitation totals variability in Poland (1951–2000), [w:] J. Jania and Kundzewicz W. P. (eds.), Extreme hydrometeorological events in Poland and their impacts – European context, International Conference, Warsaw, Poland, 7-9 Dec. 2006, Book of Abstracts: 86–89.

Summary

Exploration of the long-term variability of precipitation extremes and its connections with atmospheric circulation is the main goal of this study. Daily precipitation total for the period July 1979 – December 2006 measured at Hornsund station located at West coast of Spitsbergen as well as calendar of circulation types for Spitsbergen (Niedźwiedz 2006) were used. Extreme precipitation was defined as days with precipitation above the 90th and 95th percentile calculated based on days with precipitation >0.1mm and >1.0 mm in the period 1979–2005. Several indices of precipitation extremes, describing its frequency, amount and share in the overall total were calculated for year, accumulation period (September-May), both warm (April-September) and cold (October-March) half-years and submitted to further analysis. In order to research the general trends of extreme precipitation indices Mann-Kendal method was applied. Relation between extreme precipitation characteristics and atmospheric circulation were investigated by analysis of frequency of extreme precipitation and conditional probability its occurrence at each of circulation types used.

The most significant trends were noted in the case of share of extreme precipitation in overall precipitation totals whereas annual as well as accumulation period values of extreme precipitation

indices were characterized by the most permanent trends. No statistically significant tendencies of extreme precipitation were observed for its warm half-year values. All indices of precipitation extremes show decreasing tendency from 1979 to the middle of the eighties.

Clear increasing tendencies of the number of days with extreme precipitation, extreme precipitation total as well as its share in overall precipitation totals fall on the second half of the eighties and on the nineties. Weak decreasing tendencies of the annual values of extreme precipitation indices as well as their values for accumulation period and cold half-year were observed at the end of the 20th century and at the beginning of the new century (21st). Opposite direction of the extreme precipitation trends within the period mentioned above were only noted in the cold half-year. In the long-term variability of the extreme precipitation in Hornsund two sub periods (1979-1993 and 1994-2006) different in the averages values of the extreme precipitation indices can be pointed out. Extreme precipitation is the most probable at SWc synoptic situation in the warm half year whereas in the cold half-year extreme precipitation occurs with the highest probability at southern inflow of air masses at cyclonic situation (Sc).