

ZMIANY INTENSYWNOŚCI OPADÓW W HORNSUNDZIE (SPITSBERGEN) W OKRESIE 1978-2008

CHANGE IN PRECIPITATION INTENSITY IN HORNSUND (SPITSBERGEN) IN THE 1978-2008 PERIOD

Ewa Łupikasza

Katedra Klimatologii, WNoZ, Uniwersytet Śląski
ul. Będzińska 60, 41–200 Sosnowiec
ewa.lupikasza@us.edu.pl

Zarys treści. Artykuł porusza problematykę zmian intensywności opadów atmosferycznych w Hornsundzie (Spitsbergen) w okresie 1979-2008. Szczegółową analizę opadów dobowych przeprowadzono w przedziałach/klasach kwantyli równych sum opadów, które wyznaczono metodą zaproponowaną przez Karla i in. (1995) oraz Karla i Knighta (1998), a zmodyfikowaną przez Osborna i in. (2000), Brunettiego i in. (2001) oraz Brunettiego (2004). Wydzielone klasy kwantyli sum opadów zawierają w sobie łączną informację o sumie i liczbie dni z opadem, dzięki czemu zostały uznane za uproszczony wskaźnik intensywności opadów. Dla każdego z wydzielonych wskaźników intensywności, obliczono tendencje udziału opadów w całkowitej sumie rocznej oraz w sumach półroczy i sezonów. W Hornsundzie, w okresie 1979-2008 istotne trendy wzrostowe intensywności opadów zaobserwowano jedynie w okresie rocznym, w półroczu chłodnym oraz jesienią. W pozostałych porach roku oraz w półroczu ciepłym tendencje były nieistotne statystycznie, chociaż na wiosnę zaznaczył się spadek intensywności opadów.

Słowa kluczowe: opady dobowe, Hornsund, intensywność opadów, trendy.

1. Wstęp

Jednym z najistotniejszych problemów współczesnej klimatologii jest określenie kierunku i charakteru zmienności elementów klimatu. Obszary polarne stanowią szczególnie interesujący poligon badawczy – znajdując się pod stosunkowo najmniejszym wpływem człowieka bywają traktowane jako obszary wskaźnikowe, gdzie dominują naturalne czynniki zmian klimatu. Podejście takie, w dobie dyskusji na temat przyczyn zachodzących zmian klimatu i skali w jakiej są one powodowane działalnością człowieka, może oczywiście również podlegać dyskusji. Ogromne znaczenie opadów atmosferycznych jako elementu klimatu generalnie związane jest z ich udziałem w obiegu wody w przyrodzie (cykl hydrologiczny), a w obszarach polarnych dodatkowo znaczenie to wzmacnia ich wpływ na bilans masy lodowców. Badania regionalne opadów atmosferycznych, mające na celu poszukiwanie sygnału zmian klimatu, są ważne co najmniej z kilku powodów. Tendencje opadów atmosferycznych, w przeciwieństwie do temperatury powietrza, charakteryzują się niezwykle dużą zmiennością zarówno w czasie jak i w przestrzeni stąd wynika potrzeba podejścia regionalnego. W Hornsundzie na przykład, trendy

temperatury powietrza w okresie 1979-2008 były we wszystkich sezonach termicznych dodatnie i statystycznie istotne (Marsz 2007), podczas gdy kierunek i istotność tendencji różnorodnych wskaźników opadów atmosferycznych charakteryzowały się zmiennością sezonową (Łupikasa 2007). Znajomość współczesnych tendencji opadów atmosferycznych jest również ważna ze względu na fakt, że modele zmian klimatu mają ograniczone możliwości oceny przyszłych kierunków zmian opadów atmosferycznych, szczególnie w skali regionalnej (Mearns i in. 1995, Osborn 1997, Osborn i Hulme 1997, Crane i Hewitson 1998). Dla całej Arktyki R. Przybylak (1996, 2002b, 2003) stwierdził istnienie w latach 1922-1990 dominującego wzrostowego trendu sum opadów. Dla lat 1951-1990 w wielu miejscach ten trend był ujemny, zwłaszcza w Arktyce Rosyjskiej. Natomiast na Spitsbergenie, Grenlandii i w SW części Arktyki Kanadyjskiej (Przybylak 2002a) nadal utrzymywał się trend dodatni. Znaczący wzrost temperatury w okresie 1951-2000 nie wpłynął na zmianę trendów opadowych w Arktyce (Przybylak 2002b), które zachowują tendencje rosnącą także w modelach symulacyjnych klimatu Arktyki dla XX wieku (Kattsov i Walsh 2000). Istotny wzrost opadów w Arktyce Norweskiej dochodzący do 25% w ciągu 80 lat stwierdzono w kilku innych opracowaniach (Steffensen 1982, Bråzdil 1988, Førland i in. 1997, Hannsen-Bauer i Førland 1998, Førland i Hannsen-Bauer 2000, 2003). Wskutek niedoszacowania opadów w Arktyce, które może dochodzić nawet do 40% (Przybylak 2003) wyznaczone trendy mogą być obciążone błędami (Førland i Hannsen-Bauer 2003).

Z dotychczasowych badań tendencji opadów atmosferycznych w Hornsundzie wynika, że w okresie 1979-2005 w istotny sposób wzrastała roczna suma (+43,8 mm na 10 lat) i liczba dni z opadem atmosferycznym (+8,6 dni na 10 lat). Spośród wartości miesięcznych do statystycznie istotnych zaliczono spadkową tendencję sum opadów w lutym oraz rosnący trend w lipcu, listopadzie i grudniu. W lutym istotne były również zmiany liczby dni z opadem $\geq 0,0$ mm (Łupikasa 2007). Interesująco przedstawiają się wyniki analizy trendów opadów z uwzględnieniem rodzaju ich występowania, które mogą być przejawem zachodzących w Hornsundzie zmian warunków klimatycznych. W latach 1979-2005 obserwowano tam wyraźny wzrost sumy opadów ciekłych w roku i w okresie akumulacyjnym oraz równie istotny spadek sum opadów śniegu zimą i w okresie akumulacyjnym (Førland i Hannsen-Bauer 2003, Łupikasa 2003, 2007, 2008).

Sygnal zmian klimatu, w przypadku opadów atmosferycznych może przejawiać się zmianami nie tylko sum opadowych czy liczby dni z opadem ale również zmianami ich intensywności, które zdaniem Chahine'a (1992) będą efektem wpływu wzrostu temperatury powietrza (IPCC 2007) na przebieg cyklu hydrologicznego we wszystkich skalach przestrzennych. Zmiany intensywności opadów atmosferycznych mogą wskazywać, oczywiście z dużym przybliżeniem, na zmianę mechanizmów prowadzących do formowania się opadów atmosferycznych (Osborn i in. 2000). Celem niniejszej pracy jest identyfikacja czasowych zmian rozkładu intensywności sum opadów atmosferycznych w Hornsundzie (Spitsbergen) w okresie 1979-2008. Szczegółowe badania tendencji udziału opadów dobowych o różnej wysokości w całkowitej sumie rocznej i sumach sezonowych przedstawiono na tle klimatycznych wskaźników opadowych informujących w sposób ogólny o zmianach ich intensywności.

2. Intensywność opadów atmosferycznych

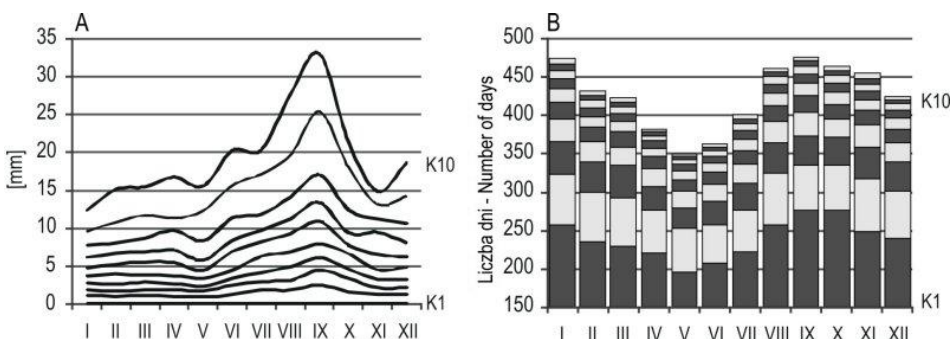
Pod pojęciem intensywności lub natężenia opadów, jak podaje Słownik Meteorologiczny IMGW (Niedźwiedz 2003), rozumie się ilość opadów atmosferycznych, niezależnie od rodzaju, spadających w jednostce czasu, najczęściej wyrażaną w $\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$. Pozyskanie danych o tak rozumianej intensywności

ności opadów atmosferycznych, jest najczęściej niemożliwe (brak odpowiednio długich i szczegółowych obserwacji). Dlatego też w klimatologii, szczególnie w badaniach dotyczących zmian klimatu, których podstawę stanowią wieloletnie ciągi obserwacyjne, z konieczności stosuje się uproszczone wskaźniki intensywności opadów.

Ogólną informację na temat zmian intensywności opadów atmosferycznych można uzyskać na podstawie porównania kierunku oraz tempa zmian dwóch prostych wskaźników opadowych – sumy opadów atmosferycznych oraz liczby dni z opadem. Na przykład wzrost (spadek) sum opadów przy równoczesnym braku zmian liczby dni z opadem może sugerować wzrost (spadek) ich intensywności. O zmianach intensywności opadów może również świadczyć różne tempo zmian sum i liczby dni z opadem. Należy przy tym zaznaczyć, że zmiany wysokości dobowych sum opadów mogą do pewnego stopnia być również efektem wzrostu czasu trwania opadów w ciągu doby. Często stosowaną miarą, szczególnie opadów ekstremalnych, jest tak zwany prosty wskaźnik intensywności będący ilorazem sumy opadów atmosferycznych (lub tylko opadów ekstremalnych) i liczby dni z opadem lub opadem ekstremalnym (Easterling i in. 1999, Groisman i in. 1999, Heino i in. 1999, Klein Tank i Können 2003, Moberg i in. 2006).

Ciekawą metodę analizy zmian intensywności opadów atmosferycznych w przedziałach klasowych zaproponowali Karl i in. (1995) oraz Karl i Knight (1998), która w drobnej modyfikacji stosowana była również przez Osborna i in. (2000), Brunetti i in. (2001) oraz Brunetti (2004). Według tej metody w każdym miesiącu w roku wydzielono 10 przedziałów klasowych (1K, 2K, 3K, ..., 10K). Opady dobowe uszeregowano w porządku rosnącym. Do pierwszej klasy (K1) zaliczono tyle zdarzeń opadowych z najniższym opadem dobowym w szeregu rosnącym, aby ich suma stanowiła 10% całej wody opadowej w danym miesiącu jaka dotarła do powierzchni ziemi w okresie 1979-2008. Do drugiej klasy (K2) zaliczono tyle kolejnych zdarzeń opadowych z najniższym opadem dobowym w szeregu rosnącym, aby ich suma również stanowiła dalsze 10% całej wody opadowej w danym miesiącu jaka dotarła do powierzchni ziemi w okresie 1979-2008 itd. Wydzielone w ten sposób klasy nazwano klasami kwantyli równej sumy opadów (Osborn i in. 2000, Brunetti i in. 2001, Brunetti 2004). W pierwotnej wersji rozpatrywano klasy kwantyli równej częstości opadów zazwyczaj w przedziałach co 5% lub co 10% (Karl i in. 1995, Karl i Knight 1998). Wydzielanie klas kwantyli równej sumy opadów (dalej określane jako klasy intensywności opadów) dla każdego miesiąca z osobna jest szczególnie zalecane w obszarach o dużym zróżnicowaniu sum opadów w przebiegu rocznym. Tak zdefiniowane przedziały klasowe rzeczywiście odzwierciedlają słabe, umiarkowane czy też maksymalne zdarzenia opadowe dla jakiegokolwiek okresu w przebiegu rocznym. Ponadto, zasadniczą zaletą tej metody, podobnie jak każdej innej metody bazującej na wartościach kwantyli, jest porównywalność uzyskanych rezultatów nawet pomiędzy stacjami o zróżnicowanych warunkach opadowych. Opisana metoda nie jest pozbawiona mankamentów. Wyniki uzyskane po jej zastosowaniu są porównywalne tylko w przypadku, gdy rozpatrywane serie dobowych opadów atmosferycznych obejmują ten sam okres obserwacyjny. Na rycinie 1 zamieszczono dwa wykresy charakteryzujące klasy kwantyli równej sumy opadów atmosferycznych w Hornsundzie wydzielone na podstawie ciągu obejmującego lata 1979-2008. Wyraźnej zmienności w przebiegu rocznym podlegają granice wyróżnionych przedziałów klasowych. Zmienność ta wzrasta wraz ze wzrostem intensywności opadów w ciągu doby, co potwierdza zasadność wydzielania tychże klas dla każdego miesiąca z osobna. Na przykład dolna granica drugiej klasy intensywności opadów (K2) zmienia się w przebiegu rocznym od 0,8 mm w maju do 2,4 mm we wrześniu, podczas gdy analogiczna granica dla dziesiątej, najwyższej klasy intensywności opadów przyjmuje wartości od 12,3 mm

w styczniu do 33,0 mm we wrześniu (ryc. 1A). Na rycinie 1B pokazano zmiany w przebiegu rocznym liczby dni z opadem w każdej klasie intensywności. W wieloleciu 1978-2008 liczba dni zaliczonych do klasy najmniejszej intensywności (K1) zmienia się od 196 dni w maju do 277 dni w październiku, podczas gdy w klasie największej intensywności (K10) liczba tychże dni jest zdecydowanie mniejsza: 3 dni w kwietniu i maju oraz 7 dni w listopadzie i styczniu (ryc. 1B). Przypomnijmy, że do każdej klasy zaliczono taką liczbę dni z opadem ażeby uzyskana suma stanowiła 10% całej wody opadowej jaka w danym miesiącu dotarła do powierzchni ziemi w okresie 1979-2008. Warto również zwrócić uwagę na wyraźnie zaznaczoną w Hornsundzie różnicę intensywności opadów w ciągu doby pomiędzy styczniem i wrześniem, o czym świadczy podobna liczba dni z opadem w rozpatrywanym wieloleciu ale znacząco mniejsza wieloletnia suma opadów (ryc. 1).



Ryc. 1. Podstawowe charakterystyki klas kwantyli równej sumy opadów (klas intensywności opadów) w Hornsundzie na podstawie danych z okresu 1979-2008. A – dobowy opad odpowiadający dolnej granicy przedziałów klasowych kwantyli równej sumy opadów, B – liczba dni z opadem w klasach kwantyli równej sumy opadów. K1 – K10 – klasy kwantyli równej sumy opadów.

Objaśnienie: miesięczna liczba dni z opadem na wykresie 1B, to suma wszystkich dni z opadem jakie wystąpiły w danym miesiącu w całym badanym okresie 1978-2008. Na przykład całkowita liczba dni z opadem dla stycznia wynosi ponad 450, co oznacza że na wszystkie dni styczniowe w okresie 1978-2008, opady notowano podczas 450 dni. Następnie, dni te zostały przydzielone do klas równej wysokości opadów. Metoda klasyfikacji dni do klas równej wysokości opadów opisana jest w rozdziale 3. Materiały i Metody stosowane w pracy

Fig. 1. Basic characteristics of precipitation class-intervals of equal quantiles (precipitation intensity class-intervals) in Hornsund based on the data for the 1979-2008 period. A – daily precipitation total corresponding to the lower limit of the precipitation intensity class-intervals, B – number of days with precipitation within each of the precipitation intensity class-intervals.

Explanation: Monthly number of days with precipitation shown in figure 1B means the total number of days with precipitation noted during the whole 1978-2008 period. For example, the total number of days with precipitation in January equals to 450 days. This means that precipitation was noted on 450 days out of all January days within the 1978-2008 period. In the next step, each of these days was counted among 10 class of equal precipitation sum. The methodology of this procedure is described in the Section 3 of this work

3. Materiały i metody stosowane w pracy

W opracowaniu wykorzystano dobowe sumy opadów atmosferycznych z Polskiej Stacji Polarnej w Hornsundzie (Spitsbergen) z okresu 1979-2008 oraz kalendarz typów cyrkulacji atmosfery dla Spitsbergenu (Niedźwiedź 2009). Dane opadowe pochodzą 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 okresy 2000/2001 i 2001/2002 opublikowano w Instytucie Geofizyki PAN pod kierunkiem Kwaczyńskiego 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 zostały udostępnione w formie elektronicznej przez Instytut Geofizyki PAN w Warszawie. Skompletowany materiał liczbowy zawiera drobne braki, które zarówno w danych dobowych jak i terminowych pojawiają się w okresie od 1 do 26 lipca 1981 r. Ponadto, dla dni 4, 7, 9 i 18 lipca 1979 roku nie zmierzono sum dobowych opadu.

Zmiany intensywności opadów atmosferycznych rozpatrywano analizując tendencje sum i liczby dni z opadem atmosferycznym oraz średniej dobowej sumy opadów w okresie rocznym, półroczach (ciepłe: IV-IX, chłodne: X-XII i I-III) oraz standardowych w klimatologii porach roku (wiosna: III-V, lato: VI-VIII, jesień: IX-XI, zima: XII, I, II). Uzyskane w ten sposób ogólne wyniki uszczegółowiono poprzez analizę czasowych zmian opadów w klasach intensywności wyznaczonych metodą Osborna i in. (2000). Dla każdej z 10 klas kwantyli równej sumy opadów (klasy intensywności opadów) obliczono tendencje udziału sum opadów klasowych w ogólnej sumie opadów rocznych i sezonowych (półrocze ciepłe i chłodne, wiosna, lato, jesień zima).

Wielkość i kierunek tendencji określono za pomocą trendu liniowego dopasowanego metodą najmniejszych kwadratów. Wielkość tendencji wyrażono w procentach średnich wieloletnich (1979-2008) wartości rozpatrywanych charakterystyk opadowych (trendy względne), co umożliwiło porównanie wyników analizy trendów wskaźników wyrażonych w różnych jednostkach oraz trendów w obrębie klas różniących się wielkością dobowych sum opadów, a tym samym ich udziałem w sumach ogólnych. Dla tendencji statystycznie istotnych podano również wielkość rzeczywistej zmiany wskaźnika. Istotność statystyczną trendów wyznaczono nieparametrycznym testem Manna-Kendalla. Jako że opady atmosferyczne są elementem charakteryzującym się ogromną zmiennością w czasie, za istotne statystycznie uznano trendy z $p \leq 0,2$ (Rapp 2000), przyjmując że jeśli $0,1 < p \leq 0,2$ to tendencje są słabo istotne statystycznie, a jeśli $p \leq 0,1$ to tendencje są statystycznie istotne.

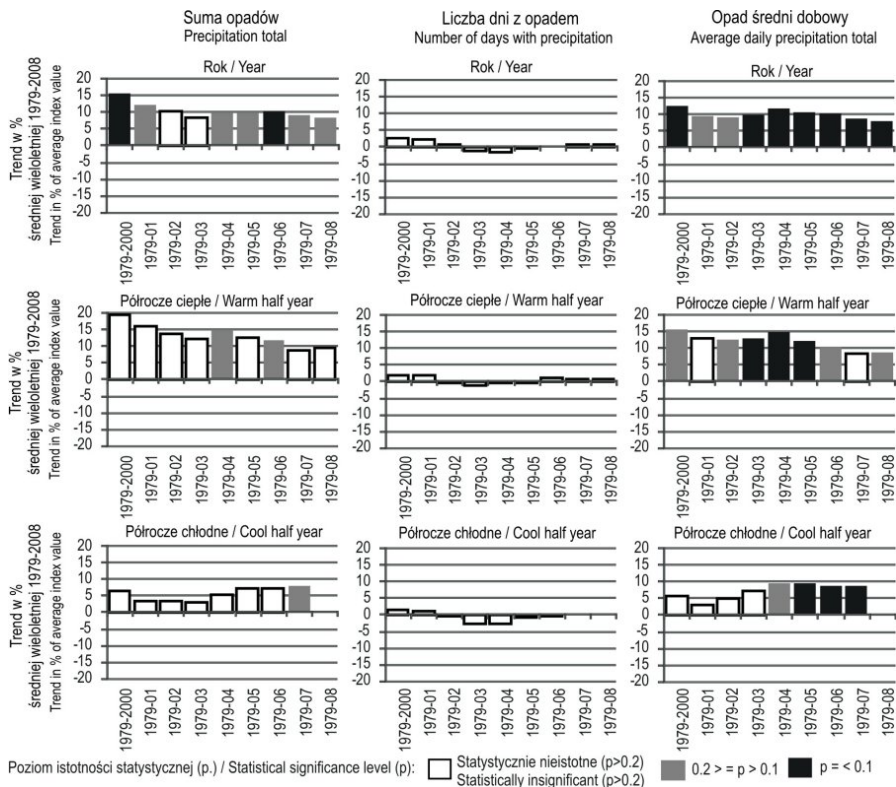
Wyniki analizy trendów są reprezentatywne tylko i wyłącznie dla rozpatrywanego wielolecia i w dużym stopniu zależą od początkowej oraz końcowej wartości badanego elementu. Trwałość tendencji rozpatrywanego parametru można w pewnym stopniu ocenić poprzez uwzględnienie wielolecia o różnej długości lub, o ile pozwala na to długość ciągu obserwacyjnego, poprzez analizę tendencji w wieloleciach konsekwentnych (Łupikasa 2009). W niniejszym opracowaniu podstawowym okresem analizy trendów było wielolecie 1979-2008. Dodatkowo, dla ogólnych wskaźników intensywności opadów (sumy opadów, liczba dni z opadem, średnia dobowo suma opadów) trendy liniowe wyznaczono dla dziewięciu arbitralnie przyjętych różnej długości okresów: 1979-2000, 1979-2001, 1979-2002, ..., 1979-2008.

4. Tendencje ogólnych wskaźników intensywności opadów

W Hornsundzie średnia roczna suma opadów atmosferycznych (1979-2008) osiągała średnio 433,3 mm, opady notowano przez około 170 dni w roku. Średni dobowy opad na stacji tej wynosił około 2,5 mm.

W rozpatrywanym wieloleciu istotnie wzrastała roczna suma opadów przy równoczesnym braku zmian liczby dni z opadem. Tendencja wzrostowa omawianego wskaźnika była w Hornsundzie dosyć stabilna – w siedmiu z dziewięciu rozpatrywanych wielolecia trendy były istotne lub słabo istotne (ryc. 2).

Najsilniejszy wzrost sum opadów rocznych przypada na wielolecie 1970-2000 (+15,8% średniej wieloletniej na 10 lat), a następnie na lata 1979-2006 (+10,4% średniej wieloletniej na 10 lat). Generalnie roczna suma opadów w uwzględnionych wieloletniach wzrastała o około +10% wartości średniej wieloletniej na każde 10 lat. Zmiany liczby dni z opadem były zdecydowanie słabsze niż zmiany sum opadów, zazwyczaj nieistotne i nietrwale pod względem kierunku. Wzrost liczby dni z opadem dochodził co najwyżej do +2,7% wartości średniej na 10 lat. W trzech wieloletniach trendy liczby dni z opadem były spadkowe 1979-2003 do 1979-2005 (tab. 1, ryc. 2). Brak istotnych trendów liczby dni z opadem oraz istotny i trwały wzrost sum opadów w okresie rocznym może sugerować wzrost ich intensywności. Potwierdza to statystycznie istotny we wszystkich badanych wieloletniach wzrost średniego opadu dobowego (ryc. 2, tab. 1). Wzrost średniej rocznej dobowej sumy opadów w analizowanych wieloletniach zmieniał się od ponad +8% średniej wieloletniej na 10 lat w latach 1979-2007 i 1979-2008 do +12,7% średniej wieloletniej na 10 lat w okresie 1979-2000. Warto również zwrócić uwagę na bardzo słabo zarysowany ale regularny spadek wielkości trendów średniej dobowej i rocznej sumy opadów w kolejno badanych wieloletniach poczynając od 1979-2004 (ryc. 2).



Ryc. 2 Trendy liniowe (w % średniej wartości wskaźnika na 10 lat) sum opadów, liczby dni z opadem i opadu średniego dobowego w wybranych wieloletniach okresu 1979-2008 w Hornsundzie – rok, półrocze ciepłe i chłodne

Fig. 2. Linear trends (in % of average index value for 1979-2008 per 10 years) in precipitation totals, number of days with precipitation and average daily precipitation total in Hornsund in selected long-term periods of the 1979-2008 – year, warm and cool half years

Tabela 1 – Table 1

Wielkość trendów liniowych rocznych sum opadów atmosferycznych (w mm/10 lat), liczby dni z opadem (liczba dni/10lat) i średniej dobowej sumy opadów (mm/10 lat) oraz poziom ich statystycznej istotności (p) w Hornsundzie w wybranych wieloletniach okresu 1979-2008 – rok

Linear trends in yearly precipitation totals (in mm per 10 year), number of days with precipitation (number of days per 10 year) and average daily precipitation total (in mm per 1 year) and their significance level (p) in Hornsund in selected long-term periods of the 1979-2008 – year

Lata Years	Suma Total		Liczba dni Number of days		Średni dobowy Average daily total	
	trend	p	trend	trend	trend	p
1979-2000	+68,4	0,080	+4,6	0,553	+0,3	0,071
1979-2001	+52,8	0,170	+3,8	0,579	+0,2	0,170
1979-2002	+44,4	0,244	+1,4	0,881	+0,2	0,118
1979-2003	+36,4	0,362	-2,2	0,708	+0,3	0,065
1979-2004	+43,7	0,186	-2,5	0,643	+0,3	0,022
1979-2005	+42,9	0,144	-0,8	0,917	+0,3	0,037
1979-2006	+45,0	0,086	+0,7	0,828	+0,3	0,026
1979-2007	+40,2	0,111	+1,3	0,721	+0,2	0,053
1979-2008	+36,8	0,116	+1,1	0,734	+0,2	0,050

pogrubiono trendy statystycznie istotne ($p \leq 0,2$) według testu Manna-Kendala
bolded are statistically significant trends by Mann-Kendal method ($p \leq 0,2$)

W Hornsundzie sumy opadów atmosferycznych w półroczu ciepłym (233,4 mm) są nieco wyższe niż w półroczu chłodnym (202,0 mm), natomiast dni z opadem zazwyczaj częściej są obserwowane w półroczu chłodnym (średnio 89,0 dni w półroczu chłodnym i 81,2 dni w półroczu ciepłym – różnica pomiędzy liczbą dni z opadem w półroczu ciepłym i chłodnym jest, według testu t, statystycznie istotna na poziomie $p=0,019$). W rezultacie intensywność opadów dobowych w cieplejszej części roku jest większa (średni opad dobowy: 2,8 mm) niż w chłodniejszej (średni opad dobowy 2,3 mm).

Wieloletnie zmiany prostych wskaźników intensywności opadów w półroczach przebiegały podobnie jak w okresie rocznym. Wielkość zmian sum opadów i opadu średniego dobowego były wyraźnie większe niż liczby dni z opadem, szczególnie w półroczu ciepłym, przy czym zmiany sum opadów, w przeciwieństwie do zmian opadu średniego dobowego zwykle nie posiadały istotności statystycznej.

Opady półroczu ciepłego istotnie wzrastały tylko podczas dwóch z badanych wieloleci: 1979-2004 (+15,1% średniej wieloletniej na 10 lat) i 1979-2006 (+11,9% średniej wieloletniej na 10 lat). W pozostałych okresach, pomimo że wielkość trendów (biorąc pod uwagę trendy wyrażone w % średniej wieloletniej) była większa niż w okresie rocznym, nie były one statystycznie istotne, co może być wynikiem dużej zmienności sum opadów półroczu ciepłego z roku na rok i zróżnicowanych pod względem kierunku tendencji krótkookresowych. Wielkość tendencji wzrostowych sum opadów półroczu ciepłego zmieniała się od +9,0% średniej wieloletniej na 10 lat w latach 1979-2007 do +19,6% średniej wieloletniej na 10 lat w okresie 1979-2000. W rozpatrywanym okresie w zasadzie nie zmieniała się liczba dni z opadem w półroczu ciepłym. Wielkość ogólnych tendencji nie przekraczała 2% średniej wieloletniej. Istotnym zmianom w większości analizowanych wieloleci podlegał natomiast średni opad dobowy w półroczu ciepłym (ryc. 2, tab. 2). Najbardziej istotny wzrost tego wskaźnika notowano w wieloletniach 1979-2003 (+13,0% średniej wieloletniej), 1979-2004 (+15,0% średniej wieloletniej)

i 1979-2005 (+12,3% średniej wieloletniej). Od wielolecia 1979-2004 obserwuje się stopniowy spadek wielkości trendów rosnących średniego opadu dobowego, czyli wyhamowanie tempa wzrostu intensywności opadów.

W półroczu chłodnym, na istotne zmiany intensywności wskazuje tylko jeden z rozpatrywanych wskaźników – średni opad dobowy. W początkowych wieloleciach, to jest od 1979-2000 do 1979-2003 ogólne trendy omawianego wskaźnika były rosnące lecz nie posiadały statycznej istotności. Znaczący wzrost średniego opadu dobowego w półroczu chłodnym zaczyna się od okresu 1979-2004 (+9,6% średniej wieloletniej na 10 lat) i obejmuje wszystkie kolejne wielolecia. Trendy wzrostowe pojawiały się również w przebiegu wieloletnim sum opadów półrocza chłodnego (od +3% średniej wieloletniej na 10 lat w 1974-2003 do +8% średniej wieloletniej na 10 lat w 1979-2007), przy czym były one ważne z punktu widzenia statystyki tylko w wieloleciu 1979-2007. Liczba dni z opadem w półroczu chłodnym, podobnie jak w półroczu ciepłym, praktycznie nie podlegała zmianom w badanym okresie (ryc. 2, tab. 2).

Tabela 2 – Table 2

Wielkość trendów liniowych sum opadów atmosferycznych (w mm/10 lat), liczby dni z opadem (liczba dni/10 lat) i średniej dobowej sumy opadów (mm/10 lat) oraz poziom ich statystycznej istotności (p) w Hornsundzie w wybranych wieloleciach okresu 1979-2008 – półrocze ciepłe i chłodne

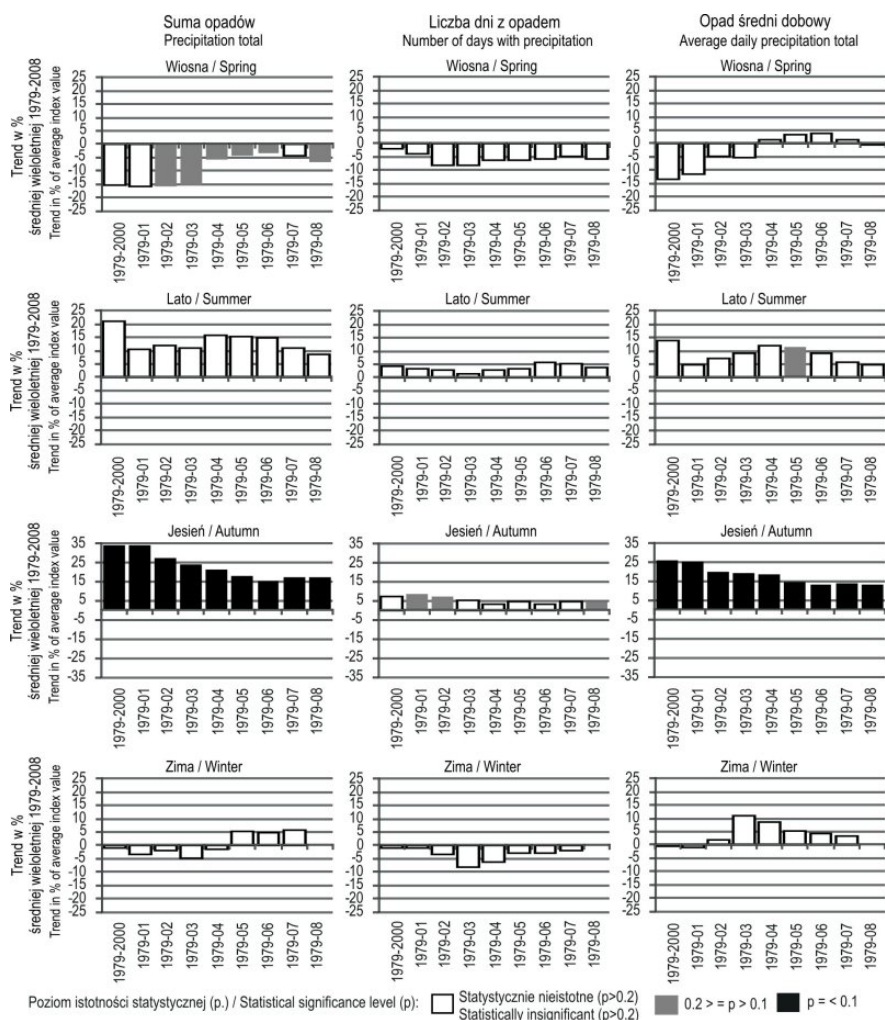
Linear trends in precipitation totals (in mm per 10 year), number of days with precipitation (number of days per 10 year) and average daily precipitation total (in mm per 1 year) and their significance level (p) in Hornsund in selected long-term periods of the 1979-2008 – cool and warm half years

Lata Years	Półrocze ciepłe – Warm half year						Półrocze chłodne – Cool half year					
	Suma Total		Liczba dni Number of days		Średni dobowy Average daily total		Suma Total		Liczba dni Number of days		Średni dobowy Average daily total	
	trend	p	trend	p	trend	p	trend	p	trend	p	trend	p
1979-2000	+45,7	0,310	+1,6	0,412	+0,4	0,159	+13,0	0,612	+1,5	0,800	+0,1	0,535
1979-2001	+38,0	0,369	+1,6	0,443	+0,4	0,224	+6,7	0,833	+0,9	0,792	+0,1	0,833
1979-2002	+32,3	0,359	+0,1	0,785	+0,4	0,157	+7,3	0,710	-0,2	0,941	+0,1	0,535
1979-2003	+29,0	0,338	-0,9	0,963	+0,4	0,097	+6,0	0,761	-2,2	0,528	+0,2	0,272
1979-2004	+35,1	0,186	-0,4	0,982	+0,4	0,047	+10,5	0,481	-2,4	0,494	+0,2	0,123
1979-2005	+29,9	0,227	+0,1	0,786	+0,4	0,095	+14,8	0,278	-0,7	0,867	+0,2	0,087
1979-2006	+27,7	0,199	+1,1	0,527	+0,3	0,138	+14,8	0,228	-0,2	1,000	+0,2	0,079
1979-2007	+21,1	0,399	+0,5	0,679	+0,2	0,253	+16,2	0,149	+0,3	0,807	+0,2	0,053
1979-2008	+22,3	0,269	+0,5	0,707	+0,3	0,153	-	-	-	-	-	-

pogrubiono trendy statystycznie istotne ($p \leq 0,2$) według testu Manna-Kendala
bolded are statistically significant trends by Mann-Kendal method ($p \leq 0,2$)

Wiosną w Hornsundzie notuje się średnio (1979-2008) 71,2 mm opadu. Zarówno liczba dni z opadem (38,5 dni) jak i średni dobowy opad (1,9 mm) są w sezonie tym najmniejsze. Jesienią do powierzchni ziemi dociera najwięcej wody opadowej spośród wszystkich sezonów klimatycznych (146,5 mm). W porównaniu z pozostałymi sezonami największa jest również średnia liczba dni z opadem (46,6 dni) i średni opad dobowy (3,1 mm). Latem średni opad na rozpatrywanej stacji osiąga około 124,0 mm, opady notowane są w ciągu około 41 dni, a ich średnia dobowa suma wynosi 2,9 mm. Wartości tych charakterystyk opadowych dla zimy wynoszą: 91,4 mm, 44,2 dni i 2,1 mm odpowiednio.

Istotne zmiany wskaźników intensywności opadów stwierdzono tylko w przejściowych porach roku, przy czym kierunek tych zmian był przeciwny (ryc. 3, tab. 3). Wiosną, w latach 1979-2008 obserwowano trwały spadek sum opadów oraz liczby dni z opadem. Wielkość tendencji spadkowych sum opadów wiosną w pierwszych czterech (od 1979-2000 do 1979-2003) z dziewięciu badanych wieloleci dochodziła do -15% wartości średniej wieloletniej na 10 lat. W pozostałych wieloleciach, to jest od 1979-2004 trendy spadkowe były zdecydowanie mniejsze (około -5% wartości średniej wieloletniej na 10 lat), do czego przyczyniła się wysoka wartość tego wskaźnika w 2004 roku, kiedy to w Hornsundzie wiosną spadło 134,3 mm opadu. Spadkowe trendy opadów wiosny przeważnie były statystycznie istotne (ryc. 3, tab. 3).



Ryc. 3 Trendy liniowe (w % średniej wartości wskaźnika na 10 lat) sum opadów, liczby dni z opadem i opadu średniego dziobowego w wybranych wieloleciach okresu 1979-2008 w Hornsundzie – wiosna, lato, jesień, zima

Fig. 3. Linear trends (in % of average index value for 1979-2008 per 10 years) in precipitation totals, number of days with precipitation and average daily precipitation total in Hornsund in selected long-term periods of the 1979-2008 – spring, summer, autumn, winter

Tabela 3 – Table 3

Wielkość trendów liniowych sum opadów atmosferycznych (w mm/10 lat), liczby dni z opadem (liczba dni/10 lat) i średniej dobowej sumy opadów (mm/10 lat) oraz poziom ich statystycznej istotności (p) w Hornsundzie w wybranych wieloletniach okresu 1979-2008 – klimatyczne pory roku (wiosna, lato, jesień, zima)

Linear trends in precipitation totals (in mm per 10 year), number of days with precipitation (number of days per 10 year) and average daily precipitation total (in mm per 1 year) and their significance level (p) in Hornsund in selected long-term periods of the 1979-2008 – climatic seasons (spring, summer, autumn, winter)

Lata Years	Suma Total		Liczba dni Number of days		Średni dobowy Average daily total		Suma Total		Liczba dni Number of days		Średni dobowy Average daily total	
	trend	p	trend	p	trend	p	trend	p	trend	p	trend	p
	Wiosna – Spring						Lato – Summer					
1979-2000	-11,1	0,631	-0,7	0,338	-0,2	0,236	+26,0	0,535	+1,7	0,651	+0,4	0,367
1979-2001	-11,4	0,327	-1,6	0,291	-0,2	0,316	+13,2	1,000	+1,4	0,711	+0,1	0,792
1979-2002	-11,2	0,136	-3,1	0,264	-0,1	0,637	+14,5	0,747	+1,2	0,691	+0,2	0,568
1979-2003	-10,9	0,096	-3,1	0,234	-0,1	0,657	+13,7	0,726	+0,6	0,925	+0,3	0,414
1979-2004	-4,3	0,185	-2,4	0,537	0,0	0,930	+19,7	0,427	+1,2	0,675	+0,4	0,217
1979-2005	-3,0	0,155	-2,4	0,677	+0,1	0,677	+19,2	0,338	+1,4	0,587	+0,3	0,196
1979-2006	-2,3	0,178	-2,2	0,797	+0,1	0,567	+18,6	0,277	+2,4	0,313	+0,3	0,314
1979-2007	-3,1	0,229	-1,9	0,666	0,0	0,837	+13,5	0,420	+2,2	0,310	+0,2	0,536
1979-2008	-4,9	0,112	-2,3	0,392	0,0	0,887	+10,4	0,544	+1,6	0,475	+0,1	0,669
	Jesień – Autumn						Zima – Winter					
1979-2000	+49,5	0,013	+3,5	0,256	+0,8	0,028	-0,7	0,499	-0,5	0,843	0,0	0,843
1979-2001	+50,2	0,008	+4,1	0,159	+0,8	0,017	-3,0	0,342	-0,4	0,853	0,0	0,853
1979-2002	+40,6	0,016	+3,5	0,186	+0,6	0,035	-1,8	0,472	-1,5	0,486	0,0	0,486
1979-2003	+35,0	0,021	+2,3	0,335	+0,6	0,038	-4,2	0,315	-3,5	0,224	+0,2	0,224
1979-2004	+31,0	0,025	+1,5	0,478	+0,6	0,025	-1,3	0,597	-2,7	0,331	+0,2	0,331
1979-2005	+26,8	0,033	+2,0	0,314	+0,5	0,045	+4,7	1,000	-1,2	0,676	+0,1	0,676
1979-2006	+22,9	0,050	+1,5	0,415	+0,4	0,055	+4,4	0,953	-1,2	0,649	+0,1	0,649
1979-2007	+25,2	0,026	+2,1	0,250	+0,4	0,031	+5,0	0,750	-0,9	0,721	+0,1	0,721
1979-2008	+25,8	0,020	+2,3	0,185	+0,4	0,025	-	-	-	-	-	-

pogrubiono trendy statystycznie istotne ($p \leq 0,2$) według testu Manna-Kendala

bolded are statistically significant trends by Mann-Kendal method ($p \leq 0,2$)

Wiosną w Hornsundzie spadała również liczba dni z opadem, przy czym tendencje te nie miały statystycznego znaczenia mimo, że były większe niż we wcześniej rozpatrywanym okresie rocznym czy półroczach. Wielkość trendów liczby dni z opadem wiosną zmieniła się od -1,7% średniej wieloletniej na 10 lat w okresie 1979-2000 do -8,1% średniej wieloletniej na 10 lat w okresach 1979-2002 i 1979-2003. Istotnym zmianom nie podlegał również średni dobowy opad w sezonie wiosennym. Nie mniej jednak warto wspomnieć, że kierunek tendencji tegoż wskaźnika zmienił się ze spadkowego w czterech pierwszych okresach, to jest od 1979-2000 do 1979-2003 na wzrostowy od 1979-2004 do 1979-2007 (ryc. 3, tab. 3).

Jesienią w Hornsundzie obserwowano największe zmiany rozpatrywanych wskaźników opadowych. We wszystkich uwzględnionych wieloletniach istotnie wzrastały sumy opadów tego sezonu oraz średni opad dobowy. Nawet wzrost liczby dni z opadem, w niektórych wieloletniach, był słabo statystycznie istotny. Wielkość tendencji sum opadów w latach 1979-2000 i 1979-2001 dochodziła do ponad +30% wartości średniej wieloletniej na 10 lat (odpowiednio +33,8% i +34,2%). W następnym wieloletniach,

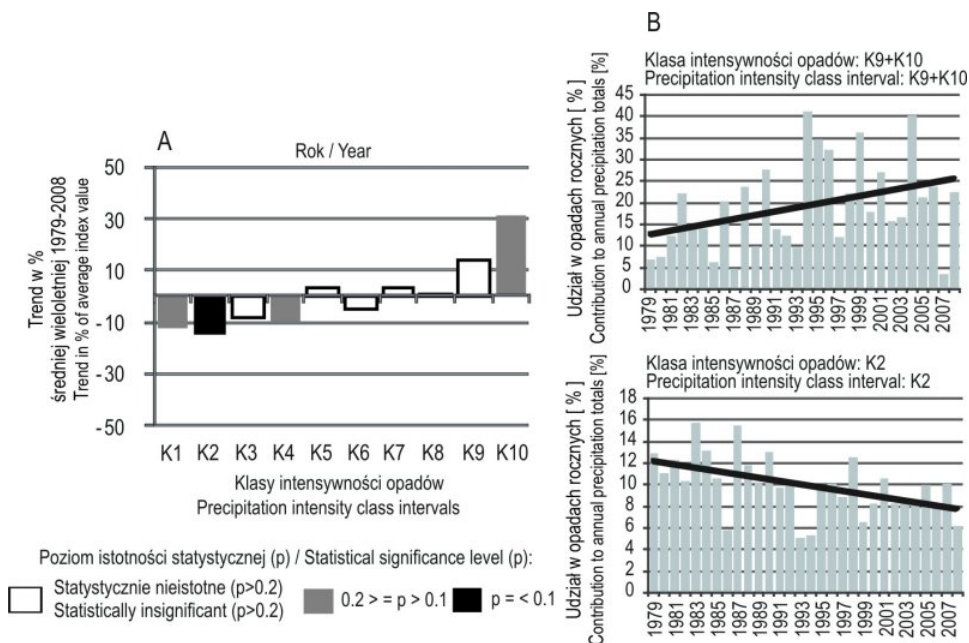
to jest od 1979-2002 do 1979-2006 wielkość trendów wzrostowych stopniowo malała z +27,7% średniej wieloletniej na 10 lat do +15,6% średniej wieloletniej na 10 lat. W ostatnich dwóch okresach (1979-2007 i 1979-2008) suma opadów jesieni wzrastała o ponad +17% wartości średniej na każde 10 lat – 17,2% i 17,6% odpowiednio (ryc. 3, tab. 3). Tendencje liczby dni z opadem, podobnie jak w poprzednio analizowanych sezonach i w roku były stosunkowo niewielkie (od +8,7% do +3,2% wartości średniej wieloletniej), przy czym tylko jesienią były one w niektórych wieloleciach (1979-2000, 1979-2001 i 1979-2008) statystycznie istotne. Jesienią znacząco i trwale wzrastał również opad średni dobowy, z tym że wielkość wspomnianych tendencji malała w kolejno rozpatrywanych wieloleciach z +25,9% (1979-2000) do 13,5% średniej wieloletniej na 10 lat (1979-2008) – ryc. 3, tab. 3.

Zimą i latem nie stwierdzono istotnych statystycznie zmian intensywności opadów. Warto jednak wskazać na pewne charakterystyczne dla tych sezonów cechy ogólnych zmian badanych wskaźników. Latem pomimo braku statystycznej istotności, kierunek tendencji był trwały – dodatni dla wszystkich charakterystyk opadowych. Największym wzrostem (od +21,0% do +8,4% średniej wieloletniej na 10 lat) charakteryzowała się suma opadów tego sezonu, z kolei stosunkowo niewielkie były trendy liczby dni z opadem (od +5,9% do +1,4% średniej wieloletniej na 10 lat). Tendencje średniego dobowego opadu zmieniały się od +14,1% do +4,1% średniej wieloletniej. Zimą natomiast wielkość trendów wszystkich wskaźników intensywności opadów była najmniejsza ze wszystkich pór roku. Zmianom podlegał również kierunek tendencji (ryc. 3, tab. 3).

5. Tendencje udziału klas intensywności opadów w sumach całkowitych

Przeprowadzona analiza tendencji prostych wskaźników opadowych pozwoliła na ogólną charakterystykę zmian intensywności opadów w Hornsundzie. Niniejszy rozdział poświęcony jest szczegółowej analizie zmian udziału opadów każdej z 10 wyróżnionych klas ich wysokości w ogólnej sumie opadów rocznych i sezonowych (półrocze ciepłe, chłodne, wiosna, lato, jesień, zima). Metodyka wyznaczania klas wysokości opadów została opisana w rozdziale 2. Badając tendencje udziału poszczególnych klas w całkowitych sumach opadów półrocza ciepłego i chłodnego połączono dwie najwyższe klasy ich wysokości K9 i K10 w klasę K9+K10, z kolei w przypadku wartości sezonowych (wiosna, lato, jesień, zima) rozpatrywano klasy K1, ..., K4 a następnie K5+K6, K7+K8 i K9+K10. Było to konieczne ze względu na zbyt małą liczebność zdarzeń opadowych w przyjętych początkowo 10 klasach, co uniemożliwiałoby zastosowanie analizy trendów.

W Hornsundzie, w rozpatrywanym wieloleciu zmniejszała się część opadów rocznych przypadająca na zdarzenia o małej intensywności (ryc. 4). Najbardziej znaczący statystycznie był spadkowy trend udziału opadów z drugiej klasy wysokości (K2) w sumie rocznej, którego wielkość osiągnęła –15,0% udziału średniego wieloletniego na 10 lat. Istotnie zmniejszał się również udział klas K1 (–12,7% średniej wieloletniej na 10 lat) i K4 (–9,6% średniej wieloletniej na 10 lat) w rocznej sumie opadów. Przeciwnym kierunkiem zmian charakteryzowały się opady z klas najwyższej intensywności. W badanym wieloleciu istotnie wzrastał udział opadów ekstremalnych (K10) w ogólnej sumie rocznej. Wielkość wspomnianej tendencji wynosiła +31,0% średniej wieloletniej na każde 10 lat i była statystycznie istotna na poziomie $p=0,124$. Poziom istotności statystycznej tendencji udziału opadów ekstremalnych w sumie rocznej wzrasta po połączeniu dwóch najwyższych klas intensywności K9 i K10. W tym wypadku wzrost udziału klas K9+K10 w sumie rocznej wyniósł około 23% średniej wieloletniej na 10 lat i był istotny statystycznie na poziomie $p=0,042$ (ryc. 4, tab. 4).



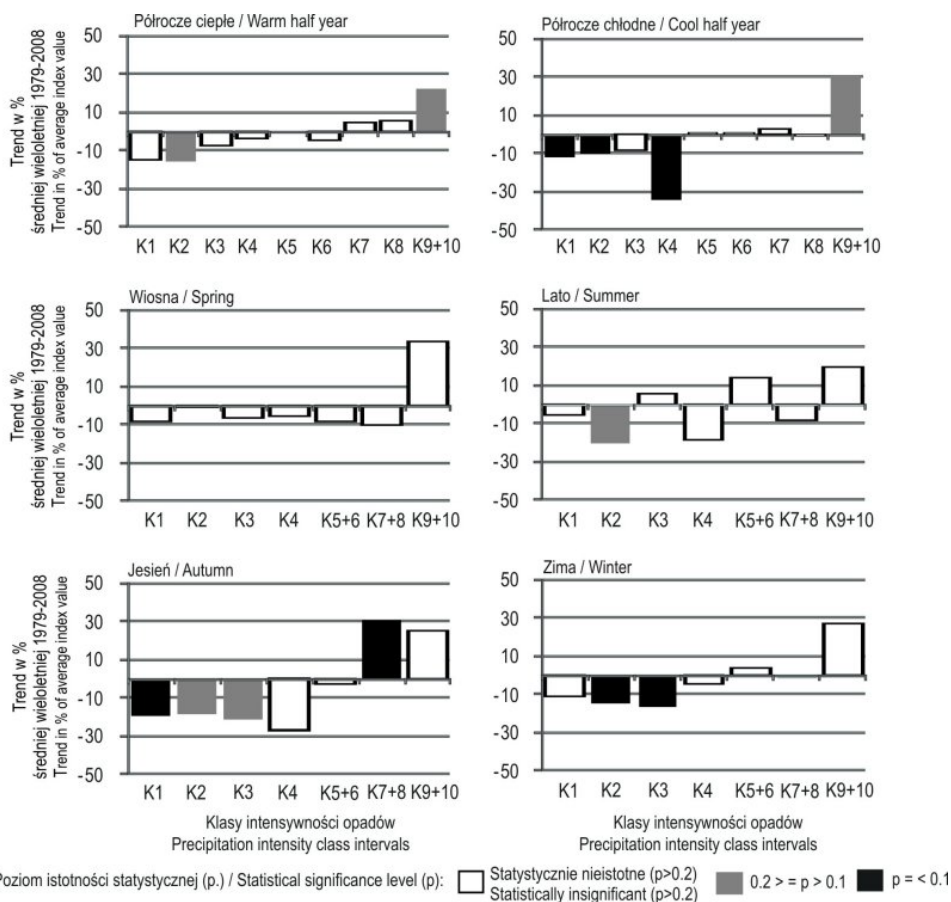
Ryc. 4. Trendy (w % średniej wartości wskaźnika na 10 lat) udziału klas intensywności dobowych opadów w sumie rocznej (A) i zmienność wieloletnia udziału przedziałów klasowych w rocznej sumie opadów (B) w Hornsundzie w okresie 1979-2008

Fig. 4. Linear trends (in % of average index value for 1979-2008 per 10 years) in contribution of precipitation intensity class intervals to annual precipitation total (A) and long-term variability in contribution of precipitation intensity class-intervals to annual precipitation total in Hornsund in the 1979-2008 period

W półroczu ciepłym istotne zmiany obserwowano tylko w przypadku dwóch klas intensywności opadów. Wyraźnie malał udział opadów z klasy K2 (–15,7% średniej wieloletniej na 10 lat), z kolei wzrastał udział opadów z klas najwyższej intensywności K9+K10 (+22,9% średniej wieloletniej na 10 lat) w całkowitej sumie opadów tego półroczu. Zmiany udziału pozostałych klas w opadach półroczu ciepłego nie posiadały statystycznej istotności, nie mniej jednak warto wspomnieć, że tendencje dla klas od K1 do K6 były spadkowe, zaś dla klas od K7 i wyższych były wzrostowe (ryc. 5).

W Hornsundzie znacząco malała część opadów półroczu chłodnego przypadająca na trzy klasy intensywności to jest K1 (–12,1% średniej wieloletniej na 10 lat), K2 (–10,3% średniej wieloletniej na 10 lat) i K4 (–33,9% średniej wieloletniej na 10 lat). Tendencje klas wysokości opadów od K5 były dodatnie lecz w żadnym przypadku nie posiadały istotności statystycznej (ryc. 5, tab. 4).

W sezonach klimatycznych (wiosna, lato, jesień, zima) szczegółowa analiza opadów w przyjętych przedziałach klasowych wskazuje, że największe zmiany ich intensywności notowano przede wszystkim jesienią. W sezonie tym znacząco spadał udział opadów z klas od K1 do K3 w ogólnej sumie opadów tego sezonu. Wielkość wspomnianych tendencji spadkowych wynosiła odpowiednio –8,9%, –18,5% i –21,5% średniej wieloletniej na 10 lat. Jesienią tendencje udziału opadów z wyższych klas wysokości opadów (K7+K8 i K9+K10) w sumie całkowitej były przeciwne, przy czym istotne zmiany dotyczyły tylko klasy K7+K8 (+30,8% średniej wieloletniej).



Ryc. 5. Trendy (w % średniej wartości wskaźnika na 10 lat) udziału klas intensywności dobowych opadów w sezonowych sumach opadów w Hornsundzie w okresie 1979-2008 – półrocze ciepłe i chłodne, wiosna, lato, jesień, zima

Fig. 5. Linear trends (in % of average index value for 1979-2008 per 10 years) in contribution of precipitation intensity class intervals to seasonal precipitation totals in Hornsund in the 1979-2008 period – warm and cool half year, spring, summer, autumn, winter

Wyraźne zmiany udziału klas wysokości opadów w sumach całkowitych notowano ponadto zimą i latem, przy czym zimą statystycznie istotne były spadkowe tendencje udziału opadów z klas K2 i K3 (odpowiednio $-14,5\%$ i $-16,5\%$ średniej wieloletniej na 10 lat), natomiast latem istotnie spadał udział opadów z klasy K2 ($-20,5\%$ średniej wieloletniej na 10 lat). Wiosną, mimo że rozpatrywane poprzednio charakterystyki opadowe wskazywały na spadek intensywności opadów, szczegółowa analiza w klasach wysokości opadów nie wykazała jakichkolwiek istotnych zmian. Przy czym warto zaznaczyć, że kierunek udziału większości klas wysokości opadów w całkowitych sumach tego sezonu był ujemny (ryc. 5, tab. 4). Możliwe więc, że spadkowe, nieistotne statystycznie tendencje dla poszczególnych klas dały w rezultacie istotny spadek intensywności opadów rozpatrywanych globalnie (bez podziału na klasy intensywności).

Tabela 4 – Table 4

Wielkość trendów liniowych (T; w % na 10 lat) udziału klas intensywności opadów (K1, ...K10) w całkowitych sumach rocznych i sezonowych (półrocze ciepłe (P. C.), półrocze chłodne (P. Ch.), wiosna, lato, jesień, zima) oraz poziom ich statystycznej istotności (p) w Hornsundzie w okresie 1979-2008

Linear trends (T; % per 10 years) in contribution of precipitation intensity class-intervals (K1, ...K10) to annual and seasonal precipitation totals (cool (P.Ch.) and warm (P.C.) half years, spring, summer, autumn, winter) and their significance level (p) in Hornsund in the 1979-2008 period

Okres Period	Trend	K1	K2	K3	K4	K5	K6	K7	K8	K9	K10
Rok Year	T	-1,3	-1,5	-0,8	-0,9	+0,4	-0,5	+0,3	+0,1	+1,3	+3,1
	p	0,108	0,002	0,372	0,187	0,617	0,212	0,943	0,915	0,382	0,124
P. C.	T	-1,6	-1,7	-0,8	-0,4	-0,1	-0,5	+0,5	+0,6		+3,9
	p	0,225	0,164	0,803	0,498	0,887	0,292	0,830	1,000		0,160
P. Ch.	T	-1,3	-1,0	-0,8	-3,2	0,0	+0,1	+0,3	-0,1		+6,0
	p	0,034	0,031	0,339	0,026	0,666	0,807	0,368	0,778		0,277
Wiosna Spring	T	-0,9	0,0	-0,7	-0,5		-1,7		-1,9		+5,6
	p	0,887	1,000	1,000	0,568		0,354		0,462		0,332
Lato Summer	T	-0,7	-2,3	+0,6	-2,0		+2,8		-1,6		+3,2
	p	0,432	0,134	0,592	0,363		0,261		0,567		0,337
Jesień Autumn	T	-2,1	-2,0	-2,4	-2,9		-0,5		+5,7		+4,3
	p	0,035	0,134	0,193	0,246		0,817		0,024		0,318
Zima Winter	T	-1,2	-1,6	-1,8	-0,4		+0,8		-0,3		+4,5
	p	0,339	0,058	0,063	0,599		0,511		0,548		0,266

pogrubiono trendy statystycznie istotne ($p \leq 0,2$) według testu Manna-Kendala
 bolded are statistically significant trends by Mann-Kendal method ($p \leq 0,2$)

6. Zależność intensywności opadów atmosferycznych od cyrkulacji atmosfery

Problematyka zależności pomiędzy opadami atmosferycznymi i cyrkulacją atmosfery na Spitsbergenie była już niejednokrotnie poruszana (Niedźwiedz i Ustrnul 1988, Przybylak i Marciniak 1992, Łupikasza i Niedźwiedz 2002, Niedźwiedz 2002, Łupikasza 2007). Wiadomo, że w Hornsundzie najwyższe średnie dobowe sumy opadów atmosferycznych najczęściej zdarzają się podczas adwekcji ciepłego i wilgotnego powietrza z SW i S, kiedy archipelag znajduje się pod wpływem układu niżowego. Napływ powietrza z wymienionych kierunków sprzyja formowaniu się stosunkowo wysokich opadów również w sytuacji antycyklonalnej (Łupikasza 2007). W Hornsundzie najwyższe dobowe sumy opadów związane są z występowaniem dwóch sytuacji synoptycznych: SWc i Sc.

Ostatnią część niniejszego opracowania poświęcono prostej analizie związków między opadami atmosferycznymi w uwzględnionych klasach ich wysokości, a cyrkulacją atmosfery. W związku z tym, iż zależności opad-cyrkulacja wykazują zmienność sezonową uwzględniono tylko klimatologiczne pory roku. W każdym sezonie dla każdej klasy wysokości opadów wybrano typ cyrkulacji charakteryzujący się największą częstością dni z opadem. Wyniki przeprowadzonej analizy prezentuje tabela 5, w której dodatkowo zamieszczono wysokość opadu odpowiadającą dolnej granicy przedziałów kwantyli równej wysokości opadów.

Przeprowadzona analiza wskazuje, że w Hornsundzie związki między opadami atmosferycznymi i cyrkulacją atmosfery zmieniają się w zależności od intensywności opadów. W większości sezonów opady dobowe z klasy najmniejszej ich wysokości (klasa K1) najczęściej notowane były podczas napływu

Tabela 5 – Table 5

Typy cyrkulacji o największej częstości opadów w klasach intensywności opadów dobowych

Circulation types of the highest frequency of precipitation for each of the precipitation intensity class-intervals

Sezon Season	Symbol	K1	K2	K3	K4	K5	K6	K7	K8	K9	K10
Wiosna Spring	A	Ec	Ca, Cc	Cc	SWc	SWc	SWc	SWc	SWc	SWc	SWc
	B	0,1	0,9	1,8	2,6	3,5	5,0	6,5	8,9	11,8	15,9
Lato Summer	A	Ka, Bc	SWc, Bc	Bc	SWc	SWc	SWc	SWc	SWc	SWc	SWc
	B	0,1	1,5	2,8	4,1	5,7	8,0	9,7	12,4	17,4	22,7
Jesień Autumn	A	Ec	Bc, Cc	SWc, Bc	SWc	SWc	SWc	SWc	SWc	SWc	SWc
	B	0,1	1,7	3,3	4,6	6,2	8,3	10,7	13,5	18,8	23,1
Zima Winter	A	Ec	SEc	SEc	SWc	SWc	SWc	SWc	SWc	SWc	SWc
	B	0,1	1,0	1,9	2,8	4,0	5,3	6,9	8,8	11,5	15,3

A – typ cyrkulacji; B – średnia dolna granica przedziałów kwantyli równej wysokości opadów dobowych (klas intensywności opadów); K1, K2, ..., K10 – klasy intensywności opadów

A – circulation types; B – average lower limit of classes of equal amount quantiles (precipitation intensity class-intervals); K1, K2, ..., K10 – precipitation intensity class-intervals

powietrza ze wschodu przy układzie niskiego ciśnienia (typ Ec); jedynie latem występowanie tychże opadów związane było głównie z typami Ka i Bc. Dużej zmienności sezonowej podlegają typy charakteryzujące się największą częstością opadów z dwóch kolejnych klas wysokości, a mianowicie K2 i K3 (tab. 5). Najciekawszym rezultatem jest fakt, że we wszystkich sezonach opady z klas od K4 i wyższych występowały najczęściej przy typie SWc. Zgodność ta może być potraktowana jako potwierdzenie poprawności metodyki wydzielenia klas równych sum opadów – dla każdego miesiąca oddzielnie.

7. Podsumowanie

Przeprowadzone badania wskazują, że w Hornsundzie w okresie 1979-2008, istotne zmiany intensywności opadów zaobserwowano przede wszystkim w okresie rocznym, półroczu chłodnym i jesienią. W okresie rocznym znacząco wzrastała suma opadów przy braku zmian liczby dni z opadem. W rezultacie istotnie wzrastał średni opad dobowy. Zmiany te związane były ze wzrostem udziału opadów ekstremalnych (K10) w sumie całkowitej oraz równoczesnym spadkiem udziału opadów o małej intensywności (K1 i K2). Podobne zmiany (wzrost sumy oraz średniego opadu dobowego) obserwowano w półroczu chłodnym. W tym przypadku wspomniane zmiany są konsekwencją spadku udziału opadów dobowych z niższych klas intensywności (K1, K2 i K4) w całkowitej sumie opadów tego sezonu. Jesienią istotne były tendencje wzrostowe zarówno sumy, liczby dni z opadem jak i średniego opadu dobowego, przy czym wzrost sum opadów i opadu średniego dobowego był wyraźnie większy niż liczby dni z opadem. Zmiany te związane są ze spadkiem udziału opadów klas K1, K2 i K4 oraz wzrostem udziału opadów z klas K7 i K8 w całkowitej sumie opadów pojawiających się jesienią (tab. 6).

Wiosną istotny statystycznie spadek sum opadów, przy równoczesnym braku zmian liczby dni z opadem, wskazuje na spadek intensywności opadów. Jednakże szczegółowa analiza tendencji w klasach intensywności nie wykazała jakichkolwiek istotnych zmian. Warto przy tym zaznaczyć, że kierunek trendów udziału większości klas intensywności opadów w całkowitych sumach tego sezonu był ujemny.

Tabela 6 – Table 6

Trendy liniowe (zmiana / 10 lat w % średniej 1979-2008) charakterystyk intensywności opadów w Hornsundzie w okresie 1979-2008)

Linear trends (change in % of average indices values per 10 years) in indices of precipitation intensity in Hornsund in the 1979-2008 period).

Symbol Symbol	Rok Year	P.C.	P.Ch.	Wiosna Spring	Lato Summer	Jesień Autumn	Zima Winter
S	+ 8,5	+ 9,6	+ 8,0	- 6,9	+ 8,4	+ 17,6	+ 5,5
LD	+ 0,6	+ 0,6	+ 0,4	- 5,9	+ 4,0	+ 4,9	- 2,0
SD	+ 8,1	+ 8,9	+ 8,8	- 0,4	+ 4,6	+ 13,5	+ 3,1
K1	- 12,7	- 14,3	- 12,1	- 8,5	- 5,5	- 18,9	- 10,6
K2	- 15,0	- 15,7	- 10,3	- 0,2	- 20,5	- 18,5	- 14,5
K3	- 8,0	- 7,5	- 7,9	- 6,3	+ 5,4	- 21,5	- 16,5
K4	- 9,6	- 3,7	- 33,9	- 5,0	- 18,6	- 26,5	- 4,6
K5	+ 3,5	- 0,8	+ 0,2	- 8,2	+ 14,5	+ 2,4	+ 3,9
K6	- 5,3	- 4,6	+ 1,3				
K7	+ 3,1	+ 5,2	+ 2,8	- 9,7	- 8,6	+ 30,8	- 1,7
K8	+ 0,9	+ 5,8	- 0,6				
K9	+ 13,8						
K10	+ 31,0	+ 22,9	+ 30,5	+ 33,2	+ 20,0	+ 25,4	+ 26,7

S – suma opadów; LD – liczba dni z opadem; SD – opad średni dobowy; P.C. – półrocze ciepłe, P.Ch. – półrocze chłodne; K1, K2, ..., K10 – klasy intensywności opadów; pogrubiono trendy statystycznie istotne ($p \leq 0,2$) według testu Manna-Kendala

S – precipitation totals; LD – number of days with precipitation; SD – average daily precipitation total; P.C. – warm half year, P.Ch. – cool half year; K1, K2, ..., K10 – precipitation intensity class-intervals; bolded are statistically significant trends by Mann-Kendal method ($p \leq 0,2$)

Możliwe więc, że spadkowe, nieistotne statystycznie tendencje dla poszczególnych klas dały w rezultacie istotny spadek intensywności opadów rozpatrywanych bez podziału na klasy intensywności. Warto również zaznaczyć, że tendencje sum opadów wiosny i jesieni były przeciwne – wiosną spadkowe, a jesienią wzrostowe (tab. 6). Uzyskane wyniki badań wskazują na wzrostowe tendencje sum opadów w większości z rozpatrywanych sezonów w okresie 1978-2008 i są one zgodne z wynikami badań trendów opadowych w Arktyce w okresach wcześniejszych (Steffensen 1982, Brázdil 1988, Førland i in. 1997, Hannsen-Bauer i Førland 1998, Førland i Hannsen-Bauer 2000, 2003; Przybylak 1996, 2002b, 2003). Wyjątek stanowią wiosna i zima. Wcześniejsze prace na temat tendencji sum opadowych w latach 1922-1990 i 1951-1990 w Arktyce i na Spitsbergenie wykazały wzrost opadów również i w tych sezonach (Przybylak 1996, 2002b, 2003). Rezultaty niniejszego opracowania pokazują, że wiosną trendy sum opadów w okresie 1978-2008 były spadkowe, natomiast zimą kierunek tendencji był zmienny. Zmiana kierunku tendencji opadów wiosennych i zimowych może wynikać z zachodzących w Hornsundzie zmian stosunków opadowych, ale może także być efektem dużej zmienności opadów atmosferycznych na Spitsbergenie i mieć charakter przejściowy, tym bardziej, że wielkość trendów spadkowych wiosną, dla kolejnych okresów od 1978-2000, 1978-2001 do 1978-2008, malała. Brak istotnych statystycznie zmian liczby dni z opadem jest zgodny z tendencjami tego wskaźnika w wielu obszarach położonych w wysokich szerokościach geograficznych półkuli północnej (Hunington i in. 2005).

W Hornsundzie związki pomiędzy opadami atmosferycznymi i cyrkulacją atmosfery zmieniają się w zależności od ich intensywności. W większości sezonów opady o najmniejszej intensywności (klasa K1) najczęściej notowane były podczas napływu powietrza ze wschodu przy układzie niskiego ciśnienia (typ Ec). We wszystkich sezonach opady z klas ich wysokości od K4 i wyższych występowały najczęściej przy typie SWc. Na uzyskane wyniki bez wątpienia wpływa znany problem niedoszacowania opadów w obszarach polarnych, szczególnie opadów w postaci stałej i w okresie zimowym.

Literatura

- Brázdil R., 1988. Variation of air temperature and atmospheric precipitation in the region of Svalbard, In: Results of Investigations of the Geographical Research Expedition Spitsbergen 1985, University J.E. Purkyne, Brno: 285-323.
- Brunetti M., 2004. Changes in daily precipitation frequency and distribution in Italy over the last 120 years. *Journal of Geophysical Research*, 109: 1-16.
- Brunetti M., Colacino M., Maugeri M., Nanni T., 2001. Trends in the daily intensity of precipitation in Italy from 1951 to 1996. *International Journal of Climatology*, 21 (3): 299-316.
- Chahine M. T., 1992. The hydrological cycle and its influence on climate. *Nature*, 359: 373-379.
- Crane R.G., Hewitson B.C., 1998. Doubled CO₂ precipitation changes for the Susquehanna Basine: down-scaling from the GENESIS general circulation model. *International Journal of Climatology*, 18 (1): 65-76.
- Easterling D.R., Evans J.L., Groisman P.Y., Karl T.R., Kunkel K.E., Ambenje P., 1999. Observed variability and trends in extreme climate events: a brief review. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 81: 417-425.
- Førland E.J., Hanssen-Bauer I., Nordli P.Ø., 1997. Climate statistics and long term series of temperature and precipitation at Svalbard and Jan Mayen. DNMI – Rapport, 21/97, Norwegian Meteor. Inst., Oslo, 72 s.
- Førland E.J., Hanssen-Bauer I., 2000. Increased precipitation in the Norwegian Arctic: true or false? *Climatic Change*, 46 (4): 485-509.
- Førland E. J., Hanssen-Bauer I., 2003. Climate variations and implications for precipitation types in the Norwegian Arctic. Norwegian Meteorological Institute, Report no. 24/02 KLIMA: 21 s.
- Groisman P.Y., Karl T.R., Easterling D.R., Knight R.W., Jamason P.F., Hennessy K.J., Suppiah R., Page Ch.M., Wibig J., Fortuniak K., Razuvaev V.N., Douglas A., Førland E., Zhai P.M., 1999. Changes in probability of heavy precipitation: important indicators of climatic change. *Climatic Change*, 42 (1): 243-283.
- Hanssen-Bauer I. Førland E.J., 1998. Long-term trends in precipitation and temperature in the Norwegian Arctic: can they be explained by changes in atmospheric circulation patterns? *Climate Research*, 10: 143-153.
- Heino R., Brázdil R., Førland E., Tuomenvirta H., Alexandersson H., Beniston M., Pfister C., Rebetez M., Rosenhagen G., Rösner S., Wibig J., 1999. Progress in the study of climatic extremes in Northern and Central Europe. *Climatic Change*, 42 (1): 151-181.
- Hunington H., Fox S., Berkes F., Krupnik I., 2005. The changing Arctic: Indigenous perspectives. [w:] Arctic Climate Impact Assessment. Cambridge University Press, New York, 1042 s.
- IMGW, 2000-2001, Roczniki Meteorologiczne Hornsund (red. M. Miętus) 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).
- 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).

- IPCC, 2007. *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of working group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, M.L. Parry, O.F. Canziani, J.P. Palutikof, P.J. van der Linden, C.E. Hanson (red.), Cambridge University Press, Cambridge, UK, 976 s.
- Karl T.R., Knight R.W., 1998. Secular trends of precipitation amount frequency and intensity in the United States. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 79 (2): 231-241.
- Karl T.R., Knight R.W., Plummer N., 1995. Trends in high-frequency climate variability in the twentieth century. *Nature*, 377: 217-220.
- Kattsov V.M., Walsh J.E., 2000. Twentieth-Century trends of Arctic precipitation from observational data and a climate model simulation. *Journal of Climate*, 13 (8): 1362-1370.
- Klein Tank A.M.G., Können G.P., 2003. Trends in indices of daily temperature and precipitation extremes in Europe 1946-1999. *Journal of Climate*, 16 (22): 3665-3680.
- Łupikasza E., 2003. Zmienność występowania opadów deszczu i śniegu w Hornsundzie w okresie lipiec 1978 – grudzień 2002. *Problemy Klimatologii Polarnej*, 13: 93-150.
- Łupikasza E., 2007. Opady atmosferyczne. [w:] Marsz A.A i Styszyńska A (red.), *Klimat Rejonu Polskiej Stacji Polarnej w Hornsundzie*. Wydawnictwo Akademii Morskiej, Gdynia: 185-193.
- Łupikasza E., 2008. Zależność występowania opadów od temperatury powietrza w Hornsundzie (Spitsbergen) w okresie 1978-2007. *Problemy Klimatologii Polarnej*, 18: 99-112.
- Łupikasza E., 2009. Spatial and temporal variability of extreme precipitation in Poland in the period 1951-2006. *International Journal of Climatology*, Published online in Wiley InterScience, (www.interscience.wiley.com) DOI: 10.1002/joc.1950, 17s.
- Łupikasza E., Niedźwiedz T., 2002. Wpływ cyrkulacji na opady atmosferyczne w Hornsundzie. [w:] *Polish Polar Studies, Funkcjonowanie i Monitoring Geosystemów Obszarów Polarnych*, Poznań: 203-216.
- Marsz A.A., 2007. Zmiany temperatury powietrza. [w:] Marsz A.A i Styszyńska A (red.), *Klimat Rejonu Polskiej Stacji Polarnej w Hornsundzie*. Wydawnictwo Akademii Morskiej, Gdynia, 273-279.
- Mearns L.O., Giorgi F., McDaniel L., Shields C., 1995. Analysis of Daily variability of precipitation in a nested regional climate model: comparison with observations and doubled CO2 results. *Global and Planetary Change*, 10 (1-4): 55-78.
- Moberg A., Jones P.D., Lister D., Walther A., Brunet M., Jacobeit J., Alexander L.V., Della-Marta P.M., Luterbacher J., You P., Chen D., Klein Tank A.M.G., Saladié O., Sigró J., Aguilar H., Alexandersson H., Almarza C., Auer I., Barriendos M., Begert M., Bergström H., Böhm R., Butler C.J., Caesar J., Drebs A., Founda D., Gerstengarbe F.W., Micela G., Maugeri M., Österle H., Pandzic K., Petrakis M., Srncic L., Tolasz R., Tuomenvirta H., Werner P.C., Lienderholm H., Philipp A., Wanner H., Xoplaki E., 2006. Indices for daily temperature and precipitation extremes in Europe analyzed for the period 1901-2000. *Journal of Geophysical Research* 111(D22106): 25. DOI: 10.1029/2006JD007103.
- Niedźwiedz T., 2002. Wpływ cyrkulacji atmosfery na wysokie opady w Hornsundzie (Spitsbergen). *Problemy Klimatologii Polarnej*, 12: 65-75.
- Niedźwiedz T. (red.), 2003. *Słownik Meteorologiczny*. Polskie Towarzystwo Geofizyczne. IMGW, Warszawa.
- Niedźwiedz T., 2009. *Kalendarz typów cyrkulacji atmosfery dla Spitsbergenu (1951-2009) – zbiór komputerowy*, Uniwersytet Śląski, Katedra Klimatologii. Zbiór on line na stronie internetowej: <<http://klimat.wnoz.us.edu.pl/>>
- Niedźwiedz T., Ustrnul Z., 1988. Wpływ sytuacji synoptycznych na stosunki opadowe w Hornsundzie (Spitsbergen). [w:] *XV Sympozjum Polarne, Stan obecny i wybrane problemy polskich badań polarnych*. Wydawnictwa Uniwersytetu Wrocławskiego, Wrocław: 196-202.
- Osborn T.J., 1997. Areal and point precipitation intensity changes: implication for the application of climate models. *Geophysical Research Letters*, 24 (22): 2829-2832.
- Osborn T.J., Hulme M., 1997. Development of the relationship between station and grid-box rain day frequencies for climate model evaluation. *Journal of Climate*, 10 (8): 1885-1908.

- Osborn T.J., Hulme M., Jones P.D., Basnett T.A., 2000. Observed trends in the daily intensity of United Kingdom precipitation. *International Journal of Climatology*, 20 (4): 347-364.
- Przybylak R., 1996. Zmienność temperatury powietrza i opadów atmosferycznych w okresie obserwacji instrumentalnych w Arktyce. Uniwersytet Mikołaja Kopernika, Rozprawy, Toruń, 280 s.
- Przybylak R., 2002a. Variability of total and solid precipitation in the Canadian Arctic from 1950 to 1995, *International Journal of Climatology*, 22 (4): 395-420.
- Przybylak R., 2002b. 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, 270 s.
- Przybylak R., Marciniak K., 1992. Opady a cyrkulacja atmosferyczna na zachodnim wybrzeżu Spitsbergenu w okresie 1979-1985. *Problemy Klimatologii Polarniej*, 2: 85-95.
- Rapp J., 2000. Konzeption, Problematik und Ergebnisse klimatologischer Trendanalysen für Europa und Deutschland, *Berichte des Deutschen Wetterdienstes* 212: Offenbach, 145 s.
- Steffensen E.L., 1982. The climate at Norwegian Arctic stations. *Det Norske Meteorologiske Institutt, Klima*, 5: Oslo, 44 s.

Wpłynęło: 24 czerwca 2009; poprawiono: 30 września 2009.

Summary

This paper deals with problems of temporal changes in distribution of precipitation intensity in Hornsund (Spitsbergen) in the period 1979-2008. Trends in precipitation totals, number of days with precipitation and average daily precipitation amount were calculated in order to assess general changes in precipitation intensity. Detailed analysis of changes in distribution of daily precipitation amount was conducted by categorizing all daily precipitation into 10 classes of precipitation intensity and then computing the proportion of each seasonal total which was provided by events of each class. This class intervals, which can be thought of as 10 equal amount quantiles, were calculated after Osborn et al. (2000). In the next step trends in contribution of each precipitation intensity class-interval to annual and seasonal (warm and cool half-year, spring, summer, autumn, winter) precipitation total were calculated. Linear regression fitted by the least square method was used to assess trends magnitude and direction. Trends were expressed in percentage of average indices values for the 1979-2008 period (relative trends) which enabled the comparison of the trends magnitude calculated for indices expressed with different units and for class-intervals characterized by various range of daily precipitation amounts. Statistical significance of trends was checked by Mann-Kendall test. Trends with significance level p between 0.2 and 0.1 were recognized as slightly significant whereas trends with p equal to or less than 0.1 were recognized as significant. The 1979-2008 period was the base for trend analysis. Moreover, several arbitrary selected long-term periods (1979-00, 1979-01, 1979-02, ..., 1979-08) were also considered in order to assess the trends stability.

In Hornsund in the period 1979-2008 significant changes in daily precipitation intensity appeared on annual basis as well as in cool half year and in autumn. There was a significant increase in annual precipitation total and no sign of any changes in the number of days with precipitation. These were

a result of an increase in contribution of extreme precipitation (K10) to total annual precipitation and a decrease in contribution of daily precipitation of low intensity. Similar pattern of precipitation intensity changes was noted in cool half year. In this case the changes are a consequence of decreasing trends in contribution of lower intensity class-intervals (K1, K2 | K4) to total precipitation. In autumn statistically significant were increasing trends in precipitation totals, number of days with precipitation and average daily precipitation amounts – at the same time the increases in precipitation totals and average precipitation amounts were much more higher than in the number of days with precipitation. These changes were a result of decreasing trends in contribution of K1, K2 and K3 intensity classes and increasing trends in contribution of K7 and K8 intensity classes in total autumn precipitation.

In spring statistically significant drop in precipitation totals accompanied by unchanged number of days with precipitation indicates the decrease in precipitation intensity. However, detailed analysis of trends in contribution of class-intervals to total winter precipitation has not proven any significant changes of precipitation intensity in this season. It is worth to notice that there were negative trends in contribution of majority of precipitation intensity class-intervals to total spring precipitation which probably resulted in significant decrease in intensity of total precipitation. It also should be mentioned that there are opposite trend directions in spring and autumn precipitation totals.

In Hornsund the relationships between precipitation and atmospheric circulation depend on daily precipitation intensity. In majority of seasons daily precipitation of the least intensity (class-interval K1) are the most frequent during an inflow of air masses from east under influence of low pressure system. Precipitation from K4 and higher intensity classes were usually noted in SWc type. It must be said that the results of this study are probably influenced by well-known problem of precipitation measurement errors in polar regions especially in relation to snow and cool period of year.

Key words: daily precipitation, Hornsund, precipitation intensity, trends.