

ZALEŻNOŚĆ WYSTĘPOWANIA RODZAJÓW OPADÓW OD TEMPERATURY POWIETRZA W HORNSUNDZIE (SPITSBERGEN) W OKRESIE 1978-2007

DEPENDENCE OF PRECIPITATION FORMS ON AIR TEMPERATURE IN HORNSUND (SPITSBERGEN) IN THE PERIOD 1978-2007

Ewa Łupikasza

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

Zarys treści. Opracowanie dotyczy związków pomiędzy występowaniem różnych rodzajów opadu atmosferycznego (ciekły, mieszany, stały) i temperaturą powietrza w Hornsundzie w okresie od lipca 1978 do grudnia 2007. Częstość oraz prawdopodobieństwo wystąpienia różnych rodzajów opadu określono w przedziałach średniej dobowej temperatury powietrza. Ponadto analizowano zależność liczby dni z rodzajami opadu od średniej miesięcznej temperatury oraz związku pomiędzy wieloletnią zmiennością liczby dni z poszczególnymi rodzajami opadu i średnią dobową, maksymalną i minimalną temperaturą powietrza w porach roku.

Wysokie prawdopodobieństwo opadów ciekłych przypada na zakres średniej dobowej temperatury powietrza w granicach od 3.0°C do 7.0°C. Opady stałe występują najczęściej przy temperaturze od 0.0°C do -11.0°C. Dni z opadem ciekłym stanowią od 80 do 100% wszystkich dni z opadem w miesiącach ze średnią temperaturą $\geq 4.0^\circ\text{C}$, natomiast nie pojawiają się nigdy kiedy średnia miesięczna temperatura spada poniżej -13.0°C . Dni z opadem stałym stanowią od 80 do 100% liczby dni z opadem w miesiącach ze średnią temperaturą $\leq -10.0^\circ\text{C}$. Opady ciekłe w dniach z temperaturą $< 0.0^\circ\text{C}$ zdarzają się sporadycznie (przeciętnie raz w roku). Opady śniegu w dniach z temperaturą średnią powyżej 0.0°C notowane są średnio 14.6 razy w ciągu roku.

Słowa kluczowe: opad ciekły, opad mieszany, opad stały, temperatura powietrza, Hornsund, Spitsbergen.

1. Wstęp

Znajomość udziału opadów w postaci stałej w ogólnej ilości opadów, jak pisał Bartnicki (1955), jest bardzo istotna zarówno z punktu widzenia klasyfikacji klimatów, jak i praktycznego. W okresie wyraźnie zaznaczających się zmian warunków klimatycznych, widocznych przede wszystkim w wieloletnim przebiegu temperatury powietrza, ważnymi stają się zagadnienia relacji pomiędzy rodzajem występujących opadów atmosferycznych i temperaturą powietrza. Analiza wspomnianych zależności nie jest prosta ze względu na konieczność dysponowania odpowiednimi danymi meteorologicznymi, nie mniej jednak była ona kilkakrotnie podejmowana. Najważniejsze prace poświęcone występowaniu opadów śnieżnych, a także analizie związków pomiędzy rodzajem opadów atmosferycznych i temperaturą powietrza zwykle pochodzą z lat 50. czy 60. XX wieku (Lauscher 1954, Cehak-Trock 1958,

Wierzbicki 1959, Bartnicki i Wierzbicki 1962, Hess 1965). W opracowaniach tych najczęściej rozpatrywano zależność pomiędzy liczbą dni czy też wysokością opadów stałych i ciekłych oraz średnią roczną (Lauscher 1954, Cehak-Trock 1958, Hess 1965) lub miesięczną temperaturą powietrza (Hess 1965). Lauscher (1954) na podstawie materiałów z Alp Wschodnich, Skandynawii i Arktyki stwierdził, że w górach wysokość opadów w postaci stałej wyrażona w procentach sumy rocznej zależy od średniej rocznej temperatury powietrza oraz wysokości nad poziomem morza. Zdaniem tego autora u podnóża gór w obszarach o średniej rocznej temperaturze powietrza wynoszącej około 10.0°C opady stałe stanowią tylko 5% sumy rocznej. Na wysokości 2000 m n.p.m., gdzie średnia roczna temperatura jest stosunkowo niska (0.5°C) prawie połowa (51%) rocznej sumy opadów pochodzi z opadów śniegu, natomiast powyżej 3000 m n.p.m., gdzie średnia roczna temperatura obniża się do -5.6°C, aż 88% sumy rocznej opadu stanowią opady śnieżne (Lauscher 1954).

Cehak-Trock (1958) przeprowadziła podobne obliczenia dla całej strefy atlantyckiej na podstawie danych ze stacji położonych w różnych szerokościach geograficznych (od tropików po Arktykę). Stwierdziła, że pomiędzy średnią roczną temperaturą powietrza, a procentem opadów w postaci stałej i ciekłej istnieje zależność bliska prostoliniowej. Przy zmianie średniej rocznej temperatury powietrza o 5°C, udział opadów stałych i płynnych w ogólnej sumie rocznej zmienia się o około 25%. Opady stałe nie występują przy średniej rocznej temperaturze powietrza wynoszącej 10°C i więcej, natomiast opady ciekłe nie pojawiają się gdy wspomniana temperatura osiąga -10°C i mniej. Udział opadów stałych i ciekłych w sumie rocznej jest równy (50%) przy średniej temperaturze wynoszącej 0.0°C (Cehak-Trock 1958).

Lauscher (1976) na podstawie danych ze 130 stacji na świecie stwierdził, że procentowy udział opadów stałych w sumie rocznej (F%) może wyrazić proste równanie zależności od średniej miesięcznej temperatury powietrza (t): $F\% = 50 - 5t$, co oznacza, że opady takie mogą się pojawiać w szerokim zakresie temperatury miesięcznej niższej od 10°C. Jednak już przy wartościach temperatury średniej miesięcznej poniżej -10°C wszystkie opady występują wyłącznie w postaci stałej. Z kolei Hess (1965) stwierdził istnienie ścisłego związku pomiędzy średnią roczną i miesięczną temperaturą powietrza i liczbą dni z opadem śnieżnym w Karpatach Zachodnich. Zdaniem tego autora opady śnieżne mogą występować w obszarach, gdzie średnia roczna temperatura powietrza mieści się w granicach od 10°C do -6°C.

Szczegółowe badania nad zmiennością opadów stałych i ich udziałem w sezonowych i rocznych sumach opadów przeprowadził Przybylak (2002) dla 16 stacji Arktyki Kanadyjskiej. Określił on związek omawianych wskaźników opadowych ze zmianami temperatury powietrza i cyrkulacją atmosfery określając trendy za lata 1950-1995. Analizą związków pomiędzy rodzajami opadu atmosferycznego i temperaturą powietrza w Arktyce Norweskiej zajmowali się również Førland i Hanssen-Bauer (2003). Autorzy ci badali częstość rodzajów opadu w przedziałach temperatury powietrza, prawdopodobieństwo wystąpienia opadów w postaci stałej i ciekłej w przedziałach temperatury powietrza, jak również analizowali częstość opadów ciekłych przy temperaturze niższej niż 0°C. Okazało się, że w Arktyce Norweskiej udział opadów ciekłych i stałych w ogólnej liczbie dni z opadem rozpatrywany jako funkcja temperatury powietrza charakteryzuje się wyraźnym zróżnicowaniem geograficznym. Na stacjach Bjørnøya i Jan Mayen przy temperaturze powietrza bliskiej 0°C, udział opadów ciekłych w ogólnej liczbie przypadków wystąpienia opadu jest większy niż na stacjach zlokalizowanych na Spitsbergenie. Ponadto, przy temperaturze powietrza powyżej 1.5°C opady ciekłe stanowią 90% przypadków na stacji Bjørnøya, podczas gdy w Longyearbyen tylko 20%. Autorka tego artykułu (Łupikaska 2003,

2007) wykonała analizę przebiegu rocznego oraz zmienności wieloletniej liczby dni oraz sum opadów atmosferycznych z uwzględnieniem ich rodzaju dla Polskiej Stacji Polarnej w Hornsundzie na Spitsbergenie. Niniejsze opracowanie jest kontynuacją tych badań.

2. Dane i metody

Wykorzystane w niniejszym opracowaniu dane, to jest średnia dobowa temperatura powietrza, maksymalna oraz minimalna temperatura powietrza, dobowa suma opadów atmosferycznych oraz dane dotyczące zjawisk atmosferycznych w zapisach pogody bieżącej i ubiegłej, obejmują okres od lipca 1978 do grudnia 2007. Wymienione powyżej dane zostały zaczerpnięte z roczników meteorologicznych Hornsund za lata 1978/79 – 1980/81, 1982/83 – 1999/2000 (IMGW, 2000-2001), które wykonano w Oddziale Morskim IMGW w Gdyni, roczników meteorologicznych Hornsund za okres 2000/2001 oraz 2001/2002 (Institute of Geophysics 2001, 2003), opublikowanych w Instytucie Geofizyki PAN. Dane za okres od sierpnia 1981 do sierpnia 1982 zostały udostępnione przez dr M. Sobika z Zakładu Meteorologii i Klimatologii Uniwersytetu Wrocławskiego. Natomiast zbiory danych dobowych i terminowych (co 3 godziny) od stycznia 2001 zostały udostępnione w formie elektronicznej przez Instytut Geofizyki PAN w Warszawie.

Rodzaj opadów atmosferycznych określono na podstawie zjawisk atmosferycznych w zapisach pogody ubiegłej i bieżącej oraz stosując dodatkowe kryterium termiczne (temperaturę średnią, maksymalną i minimalną dobową z 200 cm). Dokładny opis sposobu klasyfikacji opadów w Hornsundzie ze względu na postać ich występowania opisano w pracach Łupikasz (2003, 2007). Wydzielono trzy rodzaje opadów atmosferycznych: ciekły, mieszany i stały. W związku z tym, iż sposób zapisu danych uniemożliwił rozpatrywanie każdego przypadku wystąpienia wydzielonych rodzajów opadu, analizowano dobę z opadem ciekłym (kiedy podczas doby opadowej wystąpiły wyłącznie opady deszczu lub mżawki), dobę z opadem mieszanym (kiedy podczas doby opadowej wystąpiły zarówno opady deszczu jak i śniegu lub deszczu ze śniegiem) oraz dobę z opadem stałym (kiedy podczas doby opadowej wystąpiły wyłącznie opady śniegu) (Łupikasz 2003, 2007). Pod pojęciem doby opadowej rozumie się czas od godziny 6⁰⁰ dnia danego do godziny 6⁰⁰ UTC dnia następnego, co jest zgodne z metodą przyjętą w większości krajów europejskich.

Zasadniczym celem pracy było określenie związków pomiędzy występowaniem rodzajów opadu atmosferycznego i temperaturą powietrza w Hornsundzie w okresie 1978-2007. Wyznaczono średnią temperaturę powietrza podczas dni z wydzielonymi rodzajami opadów atmosferycznych, częstość opadów w przedziałach dobowej temperatury powietrza, prawdopodobieństwo wystąpienia rodzajów opadu w przedziałach dobowej temperatury powietrza, udział rodzajów opadu w ogólnej liczbie dni z opadem w zależności od średniej miesięcznej temperatury powietrza. Za szerokość przedziałów temperatury powietrza przyjęto 1.0°C podobnie jak Førland i Hanssen-Bauer (2003). Ponadto, przeprowadzono próbę określenia zależności pomiędzy liczbą dni z rodzajami opadu atmosferycznego w klimatologicznych porach roku (3-miesięczne okresy) i sezonową temperaturą powietrza, przy czym w tym wypadku oprócz temperatury średniej uwzględniono również sezonowo uśrednioną temperaturę maksymalną i minimalną. Zależności pomiędzy liczbą dni z rozpatrywanymi rodzajami opadu i sezonową temperaturą powietrza (średnią, maksymalną i minimalną) obliczono za pomocą dwóch nieparametrycznych metod korelacyjnych, a mianowicie współczynnika korelacji rangowej Spearmana oraz metodą korelacji tau Kendalla. Obydwie metody przeznaczone są do badania

zależności pomiędzy parametrami, których rozkład statystyczny odbiega od normalnego. Stosując metodę korelacji rangowej Spearmana niwelowane jest oddziaływanie wartości odstających na wynik analizy związków pomiędzy parametrami (Kot i in. 2007).

3. Temperatura powietrza podczas dni z różnymi rodzajami opadów.

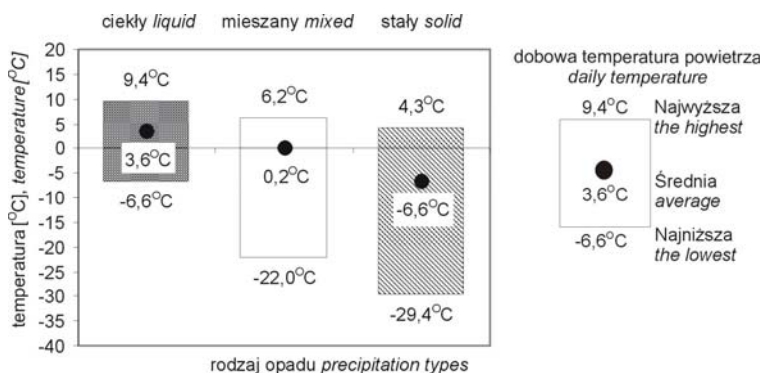
Na stacji Hornsund, w badanym okresie, średnia dobowa temperatura powietrza wynosiła 3.6°C w dniach z opadem ciekłym, 0.2°C w dniach z opadem mieszanym oraz -6.6°C w dniach z opadem śnieżnym. W rozpatrywanym wieloleciu zakres zmienności średniej dobowej temperatury powietrza, w dniach z opadem ciekłym był wyraźnie mniejszy (16.0°C) niż w przypadku dni z opadem mieszanym (28.2°C) i stałym (33.7°C). Najwyższa średnia dobowa temperatura powietrza w dniach z opadem ciekłym wynosiła 9.4°C (ryc. 1). Należy przy tym zaznaczyć, że w ciągu całego rozpatrywanego okresu, średnia dobowa temperatura powietrza była wyższa niż wspomniana wartość (9.4°C) tylko dwukrotnie, to jest 11 lipca 1979 roku (10.1°C) oraz 22 lipca 1998 roku (10.8°C). W Hornsundzie opady ciekłe występowały także w dniach ze średnią dobową temperaturą powietrza poniżej 0.0°C, jednakże sytuacje takie zdarzały się sporadycznie. W badanym wieloleciu, obejmującym 10747 dni z wymaganymi obserwacjami, dni z opadem ciekłym, podczas których średnia dobowa temperatura powietrza była niższa niż 0.0°C pojawiły się tylko 32 razy (0.2% dni z opadem ciekłym). Zwykle notowane były raz lub dwa razy w ciągu roku, za wyjątkiem lat 1979 i 2007 (3 dni z opadem ciekłym i temperaturą średnią dobową <0.0°C) oraz roku 2006 (4 dni z opadem ciekłym i temperaturą średnią dobową <0.0°C), przy czym nie zaobserwowano żadnej prawidłowości ich występowania w przebiegu rocznym (tab. 1). Na innych stacjach w Arktyce opady ciekłe podczas temperatury poniżej 0.0°C występują średnio 1 raz na rok w Longyearbyen i Ny-Alesund II, 1.1 raza na rok na stacji Svalbard Airport, 3 razy na rok w Bjørnøya i aż 8.5 razy na rok na Jan Mayen (Førland i Hanssen-Bauer 2003).

Tabela 1 – Table 1

Zestawienie dni z opadem ciekłym w porządku chronologicznym, podczas których dobowa temperatura powietrza (T) była niższa niż 0°C w Hornsundzie w okresie od lipca 1978 – do grudnia 2007

List of days with liquid precipitation and daily temperature (T) below 0°C in a chronological order at Hornsund station in the period July 1978 – December 2007

Data – date				Data – date				Data – date			
Rok	Miesiąc	Dzień	T	Rok	Miesiąc	Dzień	T	Rok	Miesiąc	Dzień	T
Year	Month	Day		Year	Month	Day		Year	Month	Day	
1979	X	5	-0.4	1993	II	13	-1.7	2004	IV	25	-0.1
1979	X	24	-0.8	1993	IX	08	-0.3	2004	V	28	-0.8
1979	X	25	-4.6	1993	IX	11	-1.0	2005	III	27	-1.5
1980	II	20	-1.7	1993	XI	20	-1.3	2006	I	13	-1.1
1980	V	19	-1.5	1996	I	21	-4.3	2006	II	02	-2.9
1981	V	15	-0.8	1997	IX	11	-0.4	2006	V	08	-1.8
1984	X	26	-5.1	1998	IV	03	-5.5	2006	IX	19	-2.6
1985	III	07	-0.4	1998	XI	30	-1.2	2007	X	25	-1.7
1985	V	07	-2.7	2000	XII	03	-6.4	2007	X	29	-0.1
1992	V	26	-0.5	2001	II	04	-0.8	2007	XII	31	-6.6
1992	IX	04	-0.4	2003	XI	07	-1.7				



Ryc. 1. Zakres zmian średniej dobowej temperatury powietrza w dniach z opadem ciekłym, stałym i mieszanym w Hornsundzie w okresie lipiec 1978 – grudzień 2007

Fig. 1. Range of average daily temperature on days with various precipitation types (liquid, mixed and solid) at Hornsund station in the period July 1978 – December 2007

Największym zakresem zmienności średniej dobowej temperatury powietrza charakteryzują się dni z opadem śnieżnym. W Hornsundzie opady w postaci stałej występowały w dniach ze średnią dobową temperaturą powietrza mieszczącą się w przedziale od 4.3 do -29.4°C (ryc. 1). W ciągu 428 dni, co stanowi 4% wszystkich dni z opadem śnieżnym, średnia dobową temperaturą powietrza była $>0.0^{\circ}\text{C}$. Opady śniegu w dniach z dodatnią temperaturą powietrza zdarzały się w Hornsundzie średnio 14.6 razy w ciągu roku; największą ich liczbę zanotowano w roku 2003 (28 dni), natomiast najmniejszą w roku 1983 (4 dni).

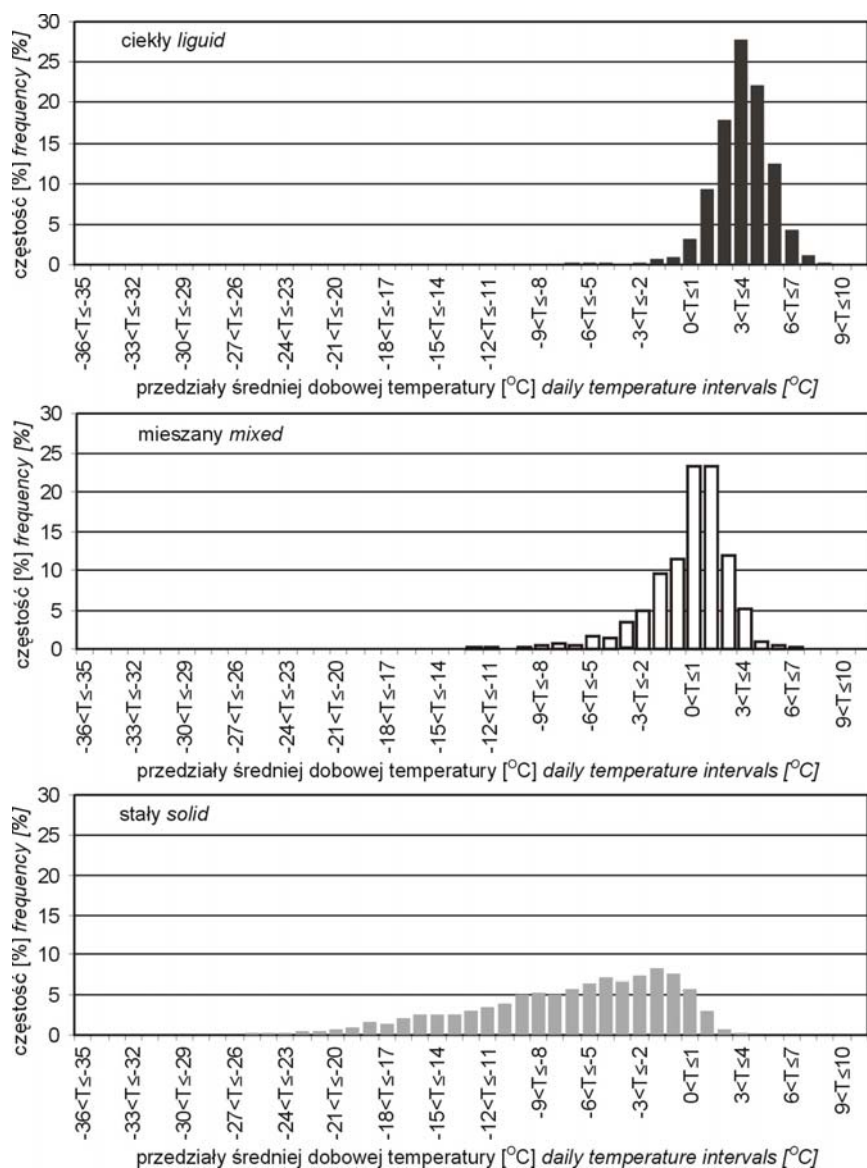
4. Częstość występowania rodzajów opadu w jednostopniowych przedziałach średniej dobowej temperatury powietrza

W poprzednim rozdziale, dotyczącym średniej dobowej temperatury powietrza w dniach z rodzajami opadu, zwrócono uwagę na całkowity zakres jej zmienności w dniach z opadem ciekłym, stałym i mieszanym. W niniejszej części opracowania, poświęconej występowaniu rodzajów opadu atmosferycznego w przedziałach średniej dobowej temperatury powietrza, wzięto pod uwagę częstości $\geq 1\%$.

W Hornsundzie opady ciekłe zdarzają się z częstością $\geq 1\%$, kiedy średnia dobową temperaturą powietrza mieści się w granicach od -2.0 do 8.0°C . Najczęściej średnia dobową temperaturą w dniach z opadem ciekłym (67.6%) zmieniała się od 2.0 do 5.0°C (ryc. 2), przy czym największa częstość dni z opadem ciekłym (28%) przypada na przedział od 3.0 do 4.0°C .

Częstość opadów mieszanych przekracza 1% w przedziałach średniej dobowej temperatury powietrza od -9.0 do 8.0°C , z maksimum (około 23% w każdym z przedziałów) odpowiadającym temperaturze w przedziałach od 0.0°C do 2°C . Częstość opadów mieszanych oscyluje wokół 10% w przedziałach temperatury od -2.0 do -1.0°C (9.4%), od -1.0 do 0.0°C (11.4%) oraz od 2.0 do 3.0°C (11.8%), natomiast w pozostałych przedziałach klasowych nie przekracza 5%.

Zmienność średniej dobowej temperatury powietrza, podczas której pojawiają się w Hornsundzie opady śniegu jest znacznie większa niż w przypadku wcześniej wspomnianych opadów ciekłych i mieszanych. Opady śniegu w Hornsundzie mogą występować w dniach z temperaturą średnią dobową



Ryc. 2. Częstość opadów ciekłych, mieszanych i stałych w przedziałach średniej dobowej temperatury powietrza w Hornsundzie w okresie lipiec 1978 – grudzień 2007

Fig. 2. Frequencies of various precipitation types (liquid, mixed, solid) for daily temperature intervals at Hornsund station in the period July 1978 – December 2007

od -21.0 do 4.0°C . Częstość dni z opadem śniegu stopniowo wzrasta z 1% do ponad 8% w przedziałach temperatury od wspomnianych -21.0 do -1.0°C , po czym zdecydowanie maleje w klasach do 3.0°C . Najczęściej notowana dobowa temperatura powietrza w dniach z opadem śniegu przyjmuje wartości od -2.0 do -1.0°C . Rozkład częstości dni z opadem śnieżnym w przedziałach średniej dobowej temperatury powietrza jest lewostronnie asymetryczny (ryc. 2).

Tabela 2 – Table 2

Częstość [%] rodzajów opadu w wybranych przedziałach temperatury powietrza (T) w Hornsundzie w okresie lipiec 1978 – grudzień 2007

Frequency [%] of precipitation types for the selected daily temperature (T) intervals at Hornsund station in the period July 1978 – December 2007

Rodzaj opadu precipitation types	Przedziały średniej dobowej temperatury powietrza Daily air temperature intervals						
	$-3 < T \leq -2$	$-2 < T \leq -1$	$-1 < T \leq 0$	$0 < T \leq 1$	$1 < T \leq 2$	$2 < T \leq 3$	$3 < T \leq 4$
Ciekły – Liquid	0.2	0.6	0.8	3.0	9.2	17.7	27.7
Mieszany – Mixed	4.9	9.4	11.4	23.2	23.3	11.8	5.0
Stały – Solid	7.4	8.2	7.6	5.6	3.0	0.7	0.2

W Hornsundzie każdy z 3 analizowanych rodzajów opadu może pojawić się w dniach z temperaturą dobową od -2.0 do 3.0°C . Przy dobowej temperaturze powietrza poniżej -2.0°C w Hornsundzie nie występują lub notowane są sporadycznie opady ciekłe, natomiast w dniach z temperaturą powyżej 4.0°C nie pojawiają się opady śniegu (tab. 2).

5. Prawdopodobieństwo warunkowe występowania rodzaju opadów w przedziałach dobowej temperatury powietrza

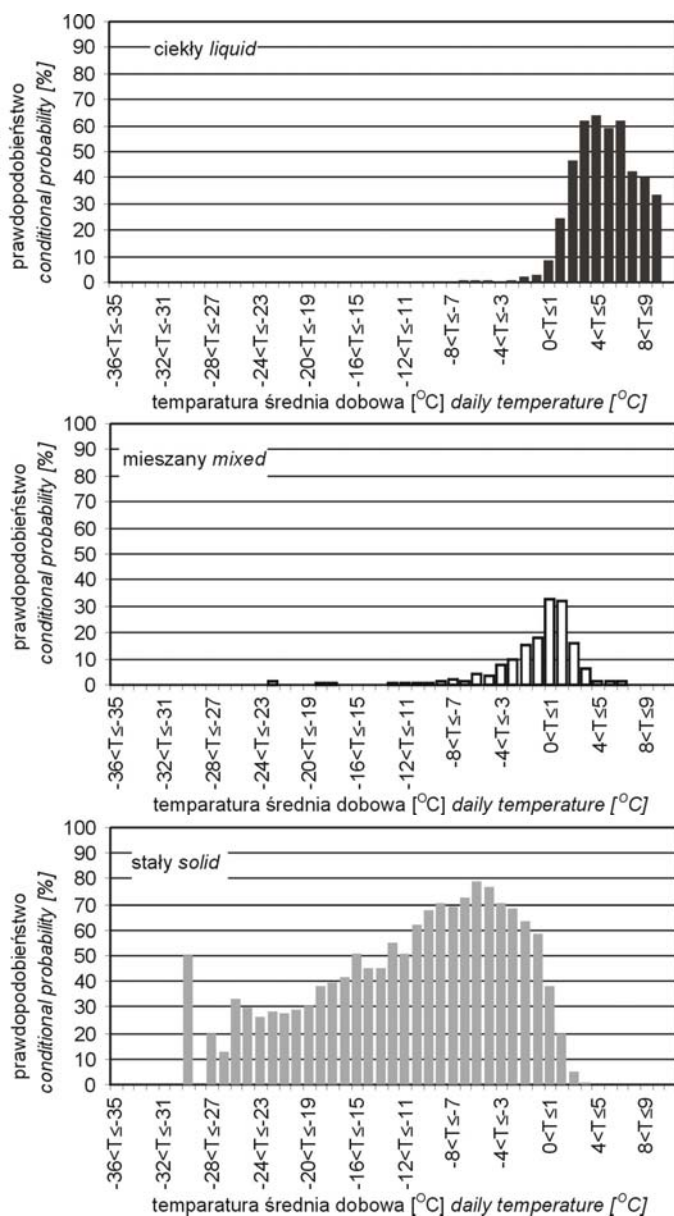
Ważną, ponieważ prognostyczną informacją jest znajomość prawdopodobieństwa wystąpienia rodzajów opadu w przedziałach temperatury powietrza. W Hornsundzie opady deszczu są najbardziej prawdopodobne w dniach z temperaturą dobową od 3.0 do 7.0°C (około 60% dni) i są mało prawdopodobne kiedy temperatura dobową jest mniejsza od 0.0°C . Wówczas prawdopodobieństwo ich wystąpienia zmienia się od 2.6% przy temperaturze od 0.0 do -1.0°C , do 0.5% lub 0.6% w przedziałach temperatury do -7.0°C .

W Hornsundzie, spośród wszystkich rozpatrywanych rodzajów, najmniej prawdopodobne są opady mieszane. Największe, dochodzące do 30%, prawdopodobieństwo ich wystąpienia dotyczy dni z temperaturą dobową od 0 do 2°C . W dniach z temperaturą dobową mniejszą niż -1.0°C oraz większą niż 2.0°C opady mieszane pojawiają się z prawdopodobieństwem dochodzącym co najwyżej do 18% (ryc. 3).

Najbardziej prawdopodobne w Hornsundzie są opady śniegu, które zdarzają się od 60 do 80% dni z temperaturą od -11.0 do 0.0°C . Prawdopodobieństwo ich wystąpienia zmniejsza się wraz ze spadkiem temperatury powietrza do około 30% w dniach z temperaturą wynoszącą -26.0°C . Opady śnieżne w Hornsundzie nie pojawiają się podczas najbardziej mroźnych dni, to jest dni z temperaturą poniżej -30.0°C , które związane są z występowaniem sytuacji wyżowych.

6. Zależność występowania rodzajów opadu atmosferycznego od średniej miesięcznej temperatury powietrza

W Hornsundzie wyraźne są zależności pomiędzy średnią miesięczną temperaturą powietrza i udziałem opadów ciekłych, a następnie stałych w ogólnej liczbie dni z opadem. Opady ciekłe na tej stacji notowane są w miesiącach o średniej temperaturze w granicach od około -13.0°C (-13.2°C) do



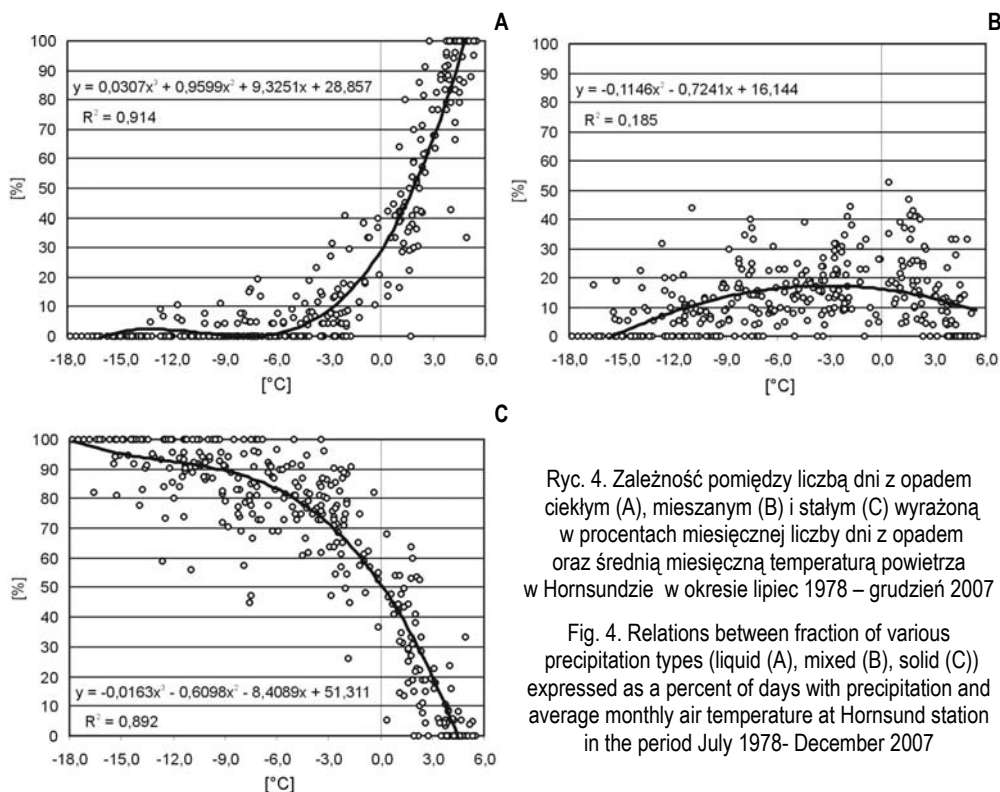
Ryc. 3. Prawdopodobieństwo warunkowe wystąpienia opadów ciekłych, mieszanych i stałych w przedziałach średniej dobowej temperatury powietrza w Hornsundzie w okresie lipiec 1978 – grudzień 2007

Fig. 3. Conditional probability of various precipitation types (liquid, solid, mixed) for daily temperature intervals at Hornsund station in the period July 1978 – December 2007

ponad 5°C (5.4°C). Przy średniej miesięcznej temperaturze powietrza przekraczającej 4.0°C, ponad 80% opadów występuje w postaci ciekłej. W miesiącach o średniej temperaturze od 0.0 do ok. -5.0°C, opady ciekłe stanowią co najwyżej 40% ogólnej liczby dni z opadem, natomiast przy miesięcznej

temperaturze poniżej -5.0°C stanowią one co najwyżej 20% dni z opadem. W Hornsundzie opady mogą występować w 100% w postaci ciekłej w miesiącach o temperaturze średniej $\geq 2.6^{\circ}\text{C}$ (ryc. 4).

W Hornsundzie opady stałe mogą pojawiać się w miesiącach o temperaturze od -16.6 do 5.2°C . Udział opadów stałych w ogólnej liczbie dni z opadem przekracza w większości przypadków 80%, kiedy temperatura miesięczna spada poniżej -10.0°C . Śnieg może być jedyną formą pojawiających się opadów w miesiącach ze średnią temperaturą $\leq -3.4^{\circ}\text{C}$ (ryc. 4).



Ryc. 4. Zależność pomiędzy liczbą dni z opadem ciekłym (A), mieszanym (B) i stałym (C) wyrażoną w procentach miesięcznej liczby dni z opadem oraz średnią miesięczną temperaturą powietrza w Hornsundzie w okresie lipiec 1978 – grudzień 2007

Fig. 4. Relations between fraction of various precipitation types (liquid (A), mixed (B), solid (C)) expressed as a percent of days with precipitation and average monthly air temperature at Hornsund station in the period July 1978- December 2007

Zależność pomiędzy liczbą dni z opadem ciekłym i stałym wyrażoną w procentach ogólnej liczby dni z opadem oraz temperaturą powietrza dobrze opisują wielomiany 3-stopnia, które wyjaśniają wspomniane zależności w około 90%. Niższy współczynnik determinacji dla opadów stałych związany jest z większą zmiennością ich udziału w ogólnej liczbie dni z opadem w miesiącach z temperaturą powietrza poniżej -5.0°C .

7. Zależność występowania rodzaju opadów od sezonowej temperatury powietrza

Kolejnym z rozpatrywanych problemów jest związek pomiędzy wieloletnim przebiegiem liczby dni z rodzajami opadu atmosferycznego oraz temperaturą powietrza w klimatologicznych porach roku. W badaniach dotyczących zmian klimatu, rozważając tendencje zaznaczające się w termicznych charakterystykach klimatu, uwagę zwraca się nie tylko na średnią temperaturę powietrza lecz również

na jej wartości skrajne. Często tendencje temperatury maksymalnej czy też minimalnej są bardziej istotne niż trendy w wieloletnim przebiegu temperatury średniej. Z tego względu analizując związki pomiędzy występowaniem opadów atmosferycznych oraz sezonową temperaturą powietrza uwzględniono nie tylko jej wartości średnie lecz również średnie maksymalne oraz minimalne.

Tabela 3 – Table 3

Współczynniki korelacji pomiędzy sezonowa liczbą dni z rodzajami opadu oraz sezonową średnią (t śr), maksymalną (t max) i minimalną (t min) temperaturą powietrza w Hornsundzie w okresie 1979-2007. Wartości pogrubione oznaczają współczynniki korelacji istotne na poziomie $p \leq 0.05$

Correlation coefficients between seasonal number of days with precipitation types and average (t śr), maximum (t max) and minimum (t min) air temperature for seasons at Hornsund station in the period 1979-2007. Bolded values denote correlation coefficients statistically significant at level $p \leq 0.05$

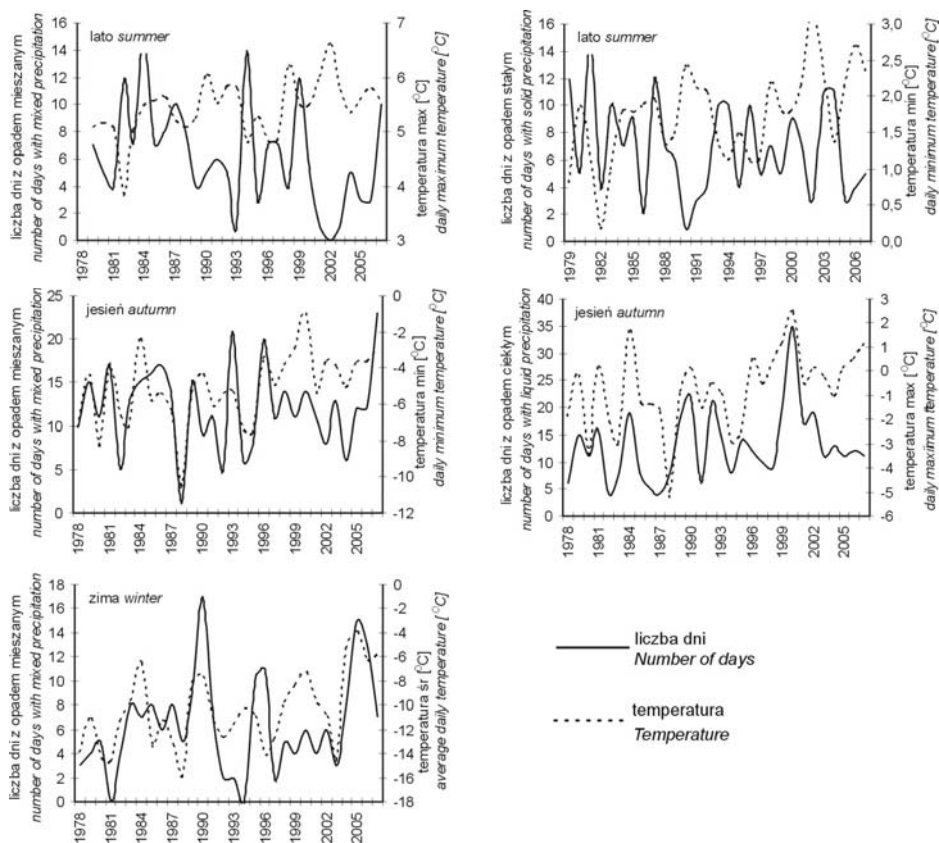
M		Ciekły Liquid precipitation				Mieszany Mixed precipitation				Stały Solid precipitation			
		W	L	J	Z	W	L	J	Z	W	L	J	Z
Sp	t śr	0.326	0.070	0.602	0.298	0.247	-0.496	0.422	0.482	0.280	-0.456	-0.274	0.229
	t max	0.326	0.040	0.616	0.297	0.266	-0.573	0.451	0.469	0.288	-0.407	-0.333	0.228
	t min	0.340	0.150	0.564	0.291	0.236	-0.417	0.454	0.463	0.265	-0.486	-0.265	0.250
tK	t śr	0.227	0.060	0.417	0.244	0.176	-0.380	0.309	0.358	0.190	-0.328	-0.190	0.161
	t max	0.221	0.025	0.432	0.237	0.202	-0.426	0.323	0.334	0.195	-0.302	-0.237	0.161
	t min	0.227	0.126	0.366	0.237	0.171	-0.308	0.319	0.334	0.185	-0.374	-0.195	0.175

M – metoda korelacji – correlation method: Sp – Spearmana, tK – tau Kendalla;
W – wiosna – spring, L – lato – summer, J – jesień – autumn, Z – zima – winter

W Hornsundzie występowanie opadów ciekłych jest istotnie zależne od temperatury powietrza tylko jesienią. W tym wypadku obydwie wykorzystane metody dały najwyższe współczynniki korelacji pomiędzy liczbą dni z opadem ciekłym i temperaturą maksymalną. Częstość opadów stałych znacząco maleje wraz ze wzrostem temperatury w sezonie letnim. Najistotniejszy wpływ na występowanie dni z opadem stałym latem ma średnia minimalna temperatura powietrza w tym sezonie. Niemal w ciągu całego roku, za wyjątkiem wiosny, ważne z punktu widzenia statystyki są zależności pomiędzy występowaniem opadów mieszanych i temperaturą powietrza. Latem liczba dni z opadem mieszanym najsilniej związana jest ze średnią maksymalną temperaturą powietrza. Zimą zmienność liczby dni z opadem mieszanym jest najwyraźniej uzależniona od średniej temperatury tego sezonu. Z kolei jesienią, najwyższe współczynniki korelacji dotyczą, w zależności od metody, temperatury maksymalnej (korelacja metodą tau Kendalla) lub minimalnej (korelacja metodą Spearmana) (tab. 3, ryc. 5). Na ryc. 5 pokazano przebiegi czasowe liczby dni z rozpatrywanymi rodzajami opadu oraz sezonowej temperatury powietrza dla przypadków, w których współczynniki korelacji pomiędzy tymi parametrami okazały się statystycznie istotne.

8. Podsumowanie i wnioski

W Hornsundzie istnieją wyraźne zależności pomiędzy rodzajem występowania opadów atmosferycznych oraz temperaturą powietrza. Największe częstości wszystkich z rozpatrywanych rodzajów opadu atmosferycznego przypadają na średnią dobową temperaturę powietrza nieznacznie (biorąc



Ryc. 5. Wieloletnia zmienność liczby dni z rodzajami opadu atmosferycznego i temperatury powietrza w Hornsundzie w okresie lipiec 1978 – grudzień 2007 – wybrane przykłady

Fig. 5. Long-term variability of number of days with various precipitation types and seasonal air temperature at Hornsund station in the period July 1978 – December 2007 – selected examples

pod uwagę cały zakres zmienności średniej dobowej temperatury powietrza w Hornsundzie) wyższą (4.0°C) lub niższą (-2.0°C) od 0.0°C (tab. 4). Analiza prawdopodobieństwa warunkowego wskazuje jednak, iż zakres średniej dobowej temperatury powietrza charakteryzującej się wysokim prawdopodobieństwem wystąpienia opadów ciekłych i stałych jest znacznie większy. O ile największe częstotliwości opadów ciekłych notowane były w przedziale średniej dobowej temperatury od 3.0 do 4.0°C , to ten rodzaj opadu jest równie prawdopodobny również przy temperaturze wyższej, dochodzącej do 7.0°C . W przypadku opadów stałych największe częstotliwości ich występowania przypadają na przedział od -2.0 do 0.0°C , lecz opady śniegu są również wysoce prawdopodobne wówczas, gdy temperatura powietrza jest znacznie niższa (do -11.0°C) – tabela 4. W Hornsundzie opady ciekłe w dniach z temperaturą niższą niż 0.0°C zdarzają się sporadycznie (średnio 1.1 raz w roku). Stanowiły one 0.2% dni z opadem ciekłym. Częściej, ponieważ średnio 14.6 razy w ciągu roku opady śniegu pojawiają się w dniach z temperaturą średnią powyżej 0.0°C , stanowiąc 4% wszystkich dni z opadem śnieżnym. W dniach najzimniejszych, z temperaturą dobową poniżej -26°C , podczas których Spitsbergen najczęściej znajduje się pod wpływem układu wyżowego, a powietrze napływa z kierunków od N do E, opady

zazwyczaj nie występują. W ciągu 38 takich dni (z temperaturą dobową $<-26^{\circ}\text{C}$) opad atmosferyczny notowano tylko 4 razy, przy czym dwukrotnie był to opad stały śladowy (08.04.1988 i 26.12.1988), a w pozostałych dwóch dniach jego wysokość nie przekroczyła 0.5 mm (04.03.1986 i 01.03.1988). Podczas wspomnianych 4 dni w Horsundzie występowały sytuacje niżowe (NEc, Bc) i tylko raz Ka.

Tabela 4 – Table 4

Wybrane wyniki analizy zależności pomiędzy występowaniem rodzajów opadu atmosferycznego i średnią dobową temperaturą powietrza (Td) w Horsundzie w okresie lipiec 1978 – grudzień 2007

Relations between various precipitation types occurrence and average daily temperature at Horsund station in the period July 1978 – December 2007 – selected results

Opad – Precipitation:	Ciekły Liquid	Mieszany Mixed	Stały Solid
Całkowity zakres Td podczas której występują poszczególne rodzaje opadu Total daily temperature range on days with different precipitation types	-2°C do $+8^{\circ}\text{C}$ *	-9°C do $+8^{\circ}\text{C}$ *	-21°C do $+3^{\circ}\text{C}$ *
Zakres Td przy której poszczególne rodzaje opadów występują najczęściej Daily temperature range with the highest frequency of various precipitation types	$+3^{\circ}\text{C}$ do $+4^{\circ}\text{C}$	0°C do $+2^{\circ}\text{C}$	-2°C do 0°C
Zakres Td o największym prawdopodobieństwie wystąpienia rodzajów opadu Daily temperature range with the highest conditional probability of various precipitation types	$+3^{\circ}\text{C}$ do $+7^{\circ}\text{C}$	0°C do $+2^{\circ}\text{C}$	-11°C do 0°C
Zakres Td przy której mogą występować wszystkie rodzaje opadów Daily temperature range at which both liquid, mixed and solid precipitation may occur	-2°C do $+3^{\circ}\text{C}$		

* podane zakresy temperatury dotyczą częstości występowania opadów $\geq 1\%$

* given air temperature ranges concern precipitation frequency $\geq 1\%$

W Horsundzie najbardziej wyraźne są zależności pomiędzy średnią miesięczną temperaturą powietrza i udziałem opadów ciekłych, a w następnej kolejności opadów stałych w ogólnej liczbie dni z opadem. Zależności te w 90% wyjaśniają wielomiany 3-stopnia. Dni z opadem ciekłym stanowią od 80% do 100% ogólnej liczby dni z opadem, gdy średnia miesięczna temperatura powietrza wynosi lub przekracza 4.0°C , natomiast nie pojawiają się w miesiącach o temperaturze średniej niższej od -13.0°C . Dni z opadem stałym stanowią od 80% do 100% liczby dni z opadem, gdy średnia miesięczna temperatura powietrza wynosi lub jest mniejsza niż -10.0°C . Trudno jest natomiast wyznaczyć najwyższą wartość graniczną średniej miesięcznej temperatury powietrza powyżej której nie pojawiają się w Horsundzie opady śniegu. Stosując uogólnienie można stwierdzić, że przy średniej miesięcznej temperaturze wyższej od 5.0°C opady śnieżne w badanym obszarze nie występują. Należy jednak wspomnieć, że w Horsundzie tylko 5 razy w ciągu analizowanego okresu temperatura średnia miesięczna była wyższa niż 5.0°C , przy czym podczas dwóch spośród wspomnianych 5 miesięcy zanotowano dni z opadem śnieżnym, które stanowiły 4 i 5% miesięcznej liczby dni z opadem.

Zmienność liczby dni z opadem ciekłym związana jest w istotny sposób z temperaturą w sezonie jesiennym, przy czym występowanie dni z opadem deszczu lub mżawki najsilniej uzależnione jest od średniej maksymalnej temperatury we wspomnianym sezonie. Występowanie opadów stałych związane jest istotnie z temperaturą sezonu letniego, zwłaszcza ze średnią temperaturą minimalną. Z kolei na liczbę dni z opadem mieszanym wpływa temperatura niemal w każdej klimatologicznej porze roku, za wyjątkiem zimy.

Literatura

- Bartnicki L., 1955. Zagadnienie klimatologiczne dotyczące opadów w postaci stałej. Przegląd Meteorologiczny i Hydrologiczny, R. VIII, z. 2: 163-164.
- Bartnicki L., Wierzbicki Z., 1962. Udział opadów stałych w ogólnej sumie opadów w Polsce, Prace PIHM, 66: 3-15.
- Cehak-Trock H., 1958. Der feste Niederschlag im atlantischen Klimagebiet. Archiv für Meteorologie, Geophysik und Bioklimatologie Serie B, 8 (3-4): 352-368.
- 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.
- Hess M., 1965. Piętra klimatyczne w Polskich Karpatach Zachodnich, Zeszyty naukowe UJ CXV, Prace Geograficzne, z 11, Prace Instytutu Geografii z. 33: 267 s.
- 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.
- Kot M., Jakubowski J., Sokołowski A., 2007. Statystyka. Podręcznik dla studiów ekonomicznych. Wyd. Difin, Warszawa: 520 s.
- Lauscher F., 1954. Klimatologische Probleme des festen Niederschlags. Archiv für Meteorologie, Geophysik und Bioklimatologie Serie B, 6 (1-2): 60-65.
- Lauscher F., 1976. Methoden zur Weltklimatologie der Hydrometeore. Der Anteil des festen Niederschlags am Gesamtniederschlag. Archiv für Meteorologie, Geophysik und Bioklimatologie Serie B, 24 (3): 129-176.
- Łupikasza E., 2003. Zmienność występowania opadów deszczu i śniegu w Hornsundzie w okresie lipiec 1978 – grudzień 2002. Problemy Klimatologii Polarnej, 13: 93-105.
- Łupikasza E., 2007. Opady atmosferyczne. [w:] A.A. Marsz i Styszyńska A (red.), Klimat rejonu Polskiej Stacji Polarnej w Hornsundzie – stan, zmiany i ich przyczyny, Wyd. Akademii Morskiej, Gdynia: 185-196.
- Przybylak R., 2002. Variability of total and solid precipitation in the Canadian Arctic from 1950 to 1995, International Journal of Climatology, 22 (4): 395-420.
- Wierzbicki Z., 1959. Stosunek opadów w postaci stałej do całkowitej sumy opadów w Polsce. Prace i Studia Komitetu Gospodarki Wodnej PAN, cz. I, Warszawa: 15 s.

Summary

This paper is devoted to research on connections between the occurrence of liquid, mixed and solid precipitation forms and air temperature. The analysis was based on meteorological data (daily temperature: average, maximum and minimum, daily precipitation totals and past and current weather

notations) covering the period from July 1978 to December 2007. The way of noting meteorological phenomena has not allowed to examine each precipitation case separately. Therefore, days with liquid precipitation (only rain or drizzle occurred during a precipitation day), days with mixed precipitation (only rain and snow or sleet occurred during a precipitation day) and days with solid precipitation (only snow occurred during a precipitation day) were taken into account.

In this work the following problems were considered:

- average daily temperature on days with various precipitation types,
- frequency and conditional probability of various precipitation types occurrence at average daily temperature intervals,
- relations between the number of days with various precipitation types (expressed as a percent of days with precipitation) and average monthly air temperature,
- relations between variability of the number of days with various precipitation types and air temperature (average, average maximum and minimum) for climatological seasons.

It was stated that at Hornsund station the highest frequencies of each of precipitation types were connected with daily temperature slightly higher or lower than 0.0°C (temperature range from 4.0°C to –2.0°C). However, daily temperature range characterized by high conditional probability of solid and liquid precipitation was much wider. While the highest frequencies of liquid precipitation were noted at daily temperature range from 3°C to 4°C, liquid precipitation was also equally probable at higher temperature, reaching 7.0°C. The highest frequencies of solid precipitation occurred at daily temperature intervals from –2.0°C to 0.0°C, however snowfall was also highly probable in the 0.0°C to –11.0°C daily temperature brackets. At Hornsund station liquid precipitation on days with average temperature lower than 0.0°C happened on average 1.1 a year, and they accounted for 0.2% of all days with liquid precipitation. Days with solid precipitation and average temperature above 0.0°C were reported 14.6 times a year and they accounted for 4% of all days with snowfall. At Hornsund station precipitation was not observed on the most frizzling days with average temperature below –26.0°C, when Spitsbergen was under the influence of anticyclone with an inflow of air from NE sector.

At Hornsund station connections between average monthly air temperature and contribution of days with liquid precipitation and then days with solid precipitation to the overall number of days with precipitation were the clearest. While the average monthly air temperature was $\geq 4.0^\circ\text{C}$, days with liquid precipitation accounted for 80% to 100% of the overall number of days with precipitation. Days with rain or drizzle were not recorded in months with average temperature below -13.0°C . In months with average temperature $\leq -10.0^\circ\text{C}$, days with solid precipitation accounts for 80-100% of days with precipitation. It was difficult to determine the critical value of average monthly temperature above which snowfalls did not occur. However, temperature of 5.0°C might be pointed out.

Variability of number of days with liquid precipitation was significantly connected with temperature (mostly average maximum one) in autumn. Solid precipitation occurrence significantly depended on summer temperature, especially the average minimum one. However, temperature of nearly each season, except of winter, significantly influenced the number of days with mixed precipitation.