

**PRÓBA ANALIZY ZWIĄZKU OPADÓW O DUŻYCH SUMACH DOBOWYCH
Z CYRKULACJĄ ATMOSFERYCZNĄ NA WYBRANYCH
STACJACH ARKTYKI ATLANTYCKIEJ W OKRESIE 1981-2010**

TRIAL ANALYSIS OF HIGH EFFICIENCY ATMOSPHERIC PRECIPITATION
WITH RESPECT TO ATMOSPHERIC CIRCULATION IN SELECTED STATIONS
OF THE ATLANTIC PART OF THE ARCTIC IN 1981-2010

Piotr Muskała, Krzysztof Migala, Magdalena Korzystka, Jacek Piasecki

Instytut Geografii i Rozwoju Regionalnego, Uniwersytet Wrocławski

Pl. Uniwersytecki 1, 50-137 Wrocław

piotr.muskala@uni.wroc.pl, krzysztof.migala@uni.wroc.pl, magdalena.korzystka@uni.wroc.pl,

jacek.piasecki@uni.wroc.pl

Zarys treści. Opad atmosferyczny o dużej wydajności, szczególnie w odniesieniu do zmian klimatu, jest jednym z ważnych czynników wpływających na funkcjonowanie geosystemów środowiska obszarów polarnych. Celem niniejszego opracowania była analiza dobowych sum opadu atmosferycznego na dziewięciu wybranych stacjach synoptycznych atlantyckiego sektora Arktyki w wieloleciu 1981-2010. Dla całego analizowanego obszaru stwierdzono istotny udział opadów o dobowych sumach przekraczających 10 mm w rocznych i miesięcznych sumach opadu. Na części analizowanych stacji (Hornsund, Ny Alesund) odnotowano niewielki wzrost częstości występowania opadów o dużych sumach dobowych, jednak na podstawie przeanalizowanych danych nie można jednoznacznie stwierdzić wzrostu w odniesieniu do wszystkich analizowanych stacji, a tym bardziej do całego atlantyckiego wycinka Arktyki. Występowanie opadów o dużym natężeniu wiązało się z konkretnymi typami cyrkulacji atmosferycznej. Dla większości stacji najbardziej opadonośna była cyrkulacja z sektora południowego.

Słowa kluczowe: opad atmosferyczny, atlantycki sektor Arktyki, opad o dużej sumie dobowej, zmiany klimatu.

1. Wstęp

Opad atmosferyczny jest jednym z istotnych elementów klimatu, szczególnie ważna wydaje się jego rola jako jednego z czynników modelujących poszczególne komponenty środowiska przyrodniczego, takie jak: stosunki wodne, rzeźba terenu i in. Szczególnym znaczeniem charakteryzuje się opad o ponadprzeciętnych sumach dobowych. W Arktyce zdarzenia z takim opadem stanowią znaczący udział w miesięcznych i rocznych sumach opadu (opad o dużych sumach dobowych jest więc tam istotnym elementem klimatu w skali regionalnej i lokalnej). Ponadprzeciętne i ekstremalne sumy opadów zimowych, w zależności od swojej postaci (opad stały, ciekły) w różny sposób modyfikują długość zalegania pokrywy śnieżnej i bilans masy lodowców. W cieplej porze roku wystąpienie opadu ciekłego o dużym natężeniu kształtuje tempo ablacji i ruch lodowców. Pośrednio opad atmosferyczny o dużym natężeniu współodpowiada za uruchomienie i intensyfikację procesów hydrologicznych i geomorfologicznych (stokowych), funkcjonowanie środowiska ożywionego oraz bilans radiacyjny i kształtowanie lokalnych warunków termicznych.

Celem niniejszego opracowania jest próba analizy przypadków wystąpienia opadu o ponadprzeciętnych i ekstremalnych sumach dobowych (10-20 oraz >20 mm, por. rozdział 3.) na wybranych stacjach Arktyki Atlantycznej w wieloleciu 1981-2010 oraz analiza takich przypadków w odniesieniu do sytuacji synoptycznej. Przedstawione w opracowaniu wyniki należy traktować jako wstępne, stanowiące podstawę do dalszej dyskusji nad sygnalizowanymi problemami.

2. Obszar badań i dane

W analizie wykorzystano dane o opadzie atmosferycznym z dziewięciu stacji synoptycznych położonych w obrębie atlantyckiego sektora Arktyki (tab.1) i reprezentujących różne jego obszary, od Nowej Ziemi na wschodzie, przez Svalbard aż po Jan Mayen na zachodzie. Niewielka liczba stacji pomiarowych wybranych do analizy wynika z ograniczonego dostępu do odpowiednio długich serii pomiarowych (co najmniej 30 lat) oraz znaczących luk zauważonych w dostępnych bazach jak również niezgodności danych pomiędzy różnymi źródłami. Wybrane stacje wytypowano tak, aby uzyskać dane za zamierzony okres (30 lat) i jednocześnie objąć analizą możliwie największy obszar.

Jako dane podstawowe wykorzystano informacje o dobowej sumie opadu atmosferycznego, które pozyskano z ogólnodostępnych archiwów depesz synoptycznych, zamieszczonych na stronach internetowych NOAA (<ftp://ftp.ncdc.noaa.gov/pub/data/>). Bazę uzupełniającą stanowiły dane z serwisu eKlima Norweskiego Instytutu Polarnego (<http://eklima.met.no>) oraz Rosyjskiego Instytutu Meteorologicznego (<http://meteo.ru>). Ponadto wykorzystano dane meteorologiczne ze Stacji Polarnej PAN w Hornsundzie, archiwalne mapy synoptyczne pobrane ze stron Wetterzentrale (www.wetterzentrale.de) oraz kalendarz typów cyrkulacji atmosferycznej dla Spitsbergenu wg T. Niedźwiedzia (Niedźwiedź 2013). Zestawienie stacji wybranych do analizy przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Zestawienie stacji

Table 1. List of stations

Nazwa stacji Station name	Współrzędne geograficzne Location	Wysokość [m n.p.m.] Height [m.a.s.l.]
Barentsburg	78°07'N; 14°25'E	22
Hopen	76°34'N; 25°09'E	6
Hornsund	77°00'N; 17°33'E	10
Jan Mayen	70°56'N; 8°40'W	9
Malve Karmakuly	72°22'N; 52°42'E	18
Ny Alesund	78°14'N; 15°27'E	15
Svalbard Lufthavn	78°15'N; 15°28'E	28
Tromsø	69°39'N; 18°56'W	10
Wyspa Niedźwiedzia	74°31'N; 19°01'E	16

Jako podstawowy okres badawczy przyjęto trzydziestolecie 1981-2010. Ponadto przedstawiono tło historyczne dla dwóch stacji, dla których w dostępnych bazach zgromadzono najdłuższe, około 90-letnie serie obserwacyjne (1920-2010 dla Wyspy Niedźwiedziej i 1922-2010 dla Jan Mayen).

Podczas analizy badanego materiału zwrócono uwagę na szereg błędów i nieścisłości w dostępnej dokumentacji podstawowej. Wśród najistotniejszych, a więc mogących mieć wpływ na wyniki analiz, należy odnotować przede wszystkim błąd pomiaru wysokości opadu (szczególnie opadu stałego; Przybylak 1996). Błąd ten wynika z metodyki pomiaru (konstrukcji deszczomierza). W większości

przypadków występuje zaniżenie wartości opadu rzeczywistego, co jest efektem przepływu powietrza i turbulencji wiatru ponad otworem wlotowym ombrometru. W ekstremalnych przypadkach błąd pomiaru opadu stałego może sięgać nawet 40% (Przybylak 1996). W przypadku zastosowania jednakowych deszczomierzy poziom niedoszacowania wydaje się zbliżony dla różnych stacji, niemniej jednak należy mieć na uwadze także uwarunkowania lokalne (w szczególności warunki anemologiczne), które mogą być odpowiedzialne za znaczące różnice w błędzie pomiaru pomiędzy poszczególnymi stacjami. Błędy tego nie korygowano, jednakże każdorazowo zwrócono uwagę na jego potencjalną rolę przy szczegółowej analizie poszczególnych parametrów (por. rozdział 4).

Kolejna nieścisłość związana z wykorzystaniem w pracy materiałem źródłowym wynika z różnic w metodyce pomiaru na poszczególnych stacjach. Na różnych stacjach w okresie badawczym stosowano bowiem odmienne metody pomiaru wysokości opadu (np. w Barentsburgu i na stacji Malye Kamakuly), jak również zmieniano metodykę pomiaru. Jest to szczególnie istotne w ostatniej dekadzie, kiedy nastąpiła automatyzacja pomiarów i w wielu miejscach standardowe deszczomierze Hellmana zastąpiono urządzeniami elektronicznymi. Z analiz odrzucono stacje, w których w okresie badawczym zmieniono metodę pomiarową.

Kolejny problem stanowiła niekompletność baz danych. Jako przykład należy wskazać przede wszystkim lata 2004 i 2005 (duże luki w bazie podstawowej dla wielu stacji) oraz okres II Wojny Światowej dla stacji referencyjnych. Ostatnia nieścisłość w materiale podstawowym dotyczy różnic pomiędzy poszczególnymi bazami danych. W niektórych dniach różnice dobowych sum opadu na tych samych stacjach pomiędzy poszczególnymi bazami danych sięgały kilkunastu, a nawet kilkudziesięciu milimetrów.

Taki stan rzeczy zdecydował o wyborze do opracowania i prezentacji danych zaledwie z kilku stacji pomiarowych w omawianym obszarze badawczym, pomimo rozbudowanej sieci pomiarów. Ze względu na charakterystykę badanego zjawiska nie wykonano żadnych zabiegów statystycznych w celu homogenizacji danych, a jedynie wszystkie wykorzystane w analizach dane przeliczono do wspólnej jednostki (mm) oraz zweryfikowano pod względem wiarygodności, sprawdzając czy nie występują luki w danych, bądź niewiarygodne rekordy (znaleziono jednostkowe przypadki m.in. ujemnych sum opadu, sum dobowych >200 mm itp.). Bazę podstawową stanowiły dane ze stron NOAA. W przypadku stacji Hornsund poprawiono i uzupełniono podstawową bazę w oparciu o dane pochodzące bezpośrednio ze stacji PAN. Z kolei dla wszystkich stacji objętych w bazie eKlima Norweskiego Instytutu Polarnego luki w materiale podstawowym uzupełniono danymi z tego serwisu. W przypadku znacznych różnic pomiędzy bazami jako bardziej wiarygodne źródło uznano serwis eKlima. Z obliczeń statystycznych wyłączono lata, dla których uzupełnienie dni z brakiem danych w materiale podstawowym w oparciu o źródła dodatkowe było niemożliwe. W przypadku gdy dane dostępne były dla różnych okresów (np. brak danego roku dla wybranych stacji), zaprezentowano je bez wykonywania operacji statystycznych. Z kolei dla celów obliczeń statystycznych wykorzystano wyłącznie te lata, w których ciągi danych były kompletne dla wszystkich stacji – stąd nie wszystkie prezentowane parametry przedstawiono dla wszystkich stacji.

3. Metoda

Ze względu na zawartość dostępnych baz danych analizie poddano wyłącznie dobowe sumy opadu atmosferycznego. Za opad o dużej sumie dobowej dla atlantyckiego sektora Arktyki przyjęto

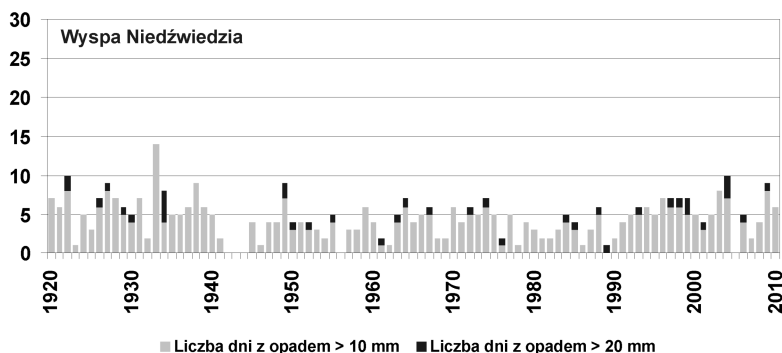
wykorzystywaną w literaturze przedmiotu sumę dobową przekraczającą 20 mm (określoną dla potrzeb niniejszej pracy jako opad ekstremalny), (Przybylak 1996, Łupikasa 2013). Jednak z uwagi na bardzo niewielką liczbę przypadków opadu o sumie dobowej >20 mm analizie poddano również przypadki z dobową sumą opadu >10 mm, jako opady o ponadprzeciętnej, choć nie ekstremalnej sumie dobowej. Wielkość tę uznano za ponadprzeciętną na podstawie analizy rozkładu dobowych sum opadu w ciągu roku. Za wartość graniczną przyjęto górny decyl. Na każdej z analizowanych stacji liczby dni z sumą opadu >10 i ≤ 20 mm (opad ponadprzeciętny; 10-20 mm) w dalszej części pracy skrótowo oznaczono jako 10-20 mm. Dni takie stanowiły średnio w 30-leciu 1981-2010 nie więcej niż 10% wszystkich dni w roku. Z takiej klasyfikacji wyłączono stację w Tromsø, na której roczne sumy opadów i liczby dni z opadem 10-20 mm odbiegają w zasadniczy sposób od sum opadów na pozostałych analizowanych stacjach, tam liczba dni z opadem 10-20 mm w roku jest kilkukrotnie większa, niż na pozostałych analizowanych stacjach. Ze względu na brak odpowiedniej informacji nie analizowano czasu trwania opadów, zwłaszcza o trwałości ponad 24 godz., pomimo, że takie przypadki wydają się szczególnie interesujące ze względu na ich rolę w środowisku. Z tego samego powodu nie analizowano również opadów pod względem ich natężenia w krótszych jednostkach czasu.

W opracowaniu analizie poddano udział opadów o sumie dobowej >20 mm i 10-20 mm w sumach rocznych oraz miesięcznych, liczbę dni z opadem o sumie dobowej >20 mm oraz >10 i ≤ 20 mm w roku oraz związki opadów o dużych sumach dobowych z cyrkulacją atmosferyczną. Udział opadów o dużym natężeniu w rocznych i miesięcznych sumach opadu może być analizowany w kontekście ich wpływu na procesy hydrologiczne i geomorfologiczne. Co oczywiste, każdy opad, zależnie od czasu trwania i natężenia ma wpływ na powyższe procesy, jednak wydaje się warto podkreślić, że przypadki opadu o dużym natężeniu są szczególnie istotnym czynnikiem przeobrażającym środowisko. Z kolei analiza szeregów czasowych liczby dni z opadem o dużym natężeniu może sygnalizować ewentualne tendencje zachodzące w środowisku Arktyki. Jednakże ze względu na ułomność posiadanego materiału badawczego autorzy nie czują się uprawnieni do stawiania tez w tej materii.

Jako podstawę do analizy sytuacji synoptycznej kształtującej warunki meteorologiczne dla stacji położonych na Spitsbergenie wykorzystano kalendarz typów cyrkulacji atmosferycznej Niedźwiedzia (Niedźwiedź 2013). W przypadku stacji położonych poza obszarem Spitsbergenu samodzielnie określono typy cyrkulacji (dla uproszczenia wyłącznie dla dni z sumą opadu przekraczającą 20 mm) stosując metodologię opisaną przez Niedźwiedzia (Niedźwiedź 2013). Do oceny zależności pomiędzy ilością opadu atmosferycznego a cyrkulacją atmosferyczną wykorzystano analizę skupień.

4. Wyniki

Podstawowe cechy reżimu opadowego analizowanych stacji przedstawiono w tab.2. Najdłuższą, bo aż 91.letnią, serię pomiarową przeanalizowano dla Wyspy Niedźwiedziej. Pozwoliło to stworzyć tło referencyjne (ryc.1) dla rozważań o opadach na pozostałych stacjach, dla których przyjęto okres 30. letni. W okresie 1920-2010 na Wyspie Niedźwiedziej odnotowano 37 dni z opadem >20 mm, co daje średnio zaledwie niecały jeden dzień z takim opadem w ciągu dwóch lat. Średnia roczna suma opadu w tym wieloleciu wyniosła 389,7 mm i była o 26,3 mm niższa od średniej z 30.letnia 1981-2010, w którym wystąpiło 15 dni z opadem >20 mm. W całym wieloleciu wyższe opady dominowały w chłodnej porze roku, od września do marca-kwietnia. Opad dobowy o sumach w przedziale 10-20 mm odnotowano średnio 4,9 dni w roku w wieloleciu 1920-2010 i nieco rzadziej bo średnio 4,8 dni w latach 1981-2010.



Ryc. 1. Liczba dni z dobową sumą opadu $R > 10$ mm i ≤ 20 mm oraz > 20 mm na Wyspie Niedźwiedziej w okresie 1920-2010

Fig. 1. Number of days with precipitation sum $R > 10$ mm and ≤ 20 mm and > 20 mm in Bjornoya in 1920-2010.

Tabela 2. Wybrane cechy reżimu opadowego analizowanych stacji w wieloleciu 1981-2010

Table 2 Some features of the precipitation regime in 1981-2010.

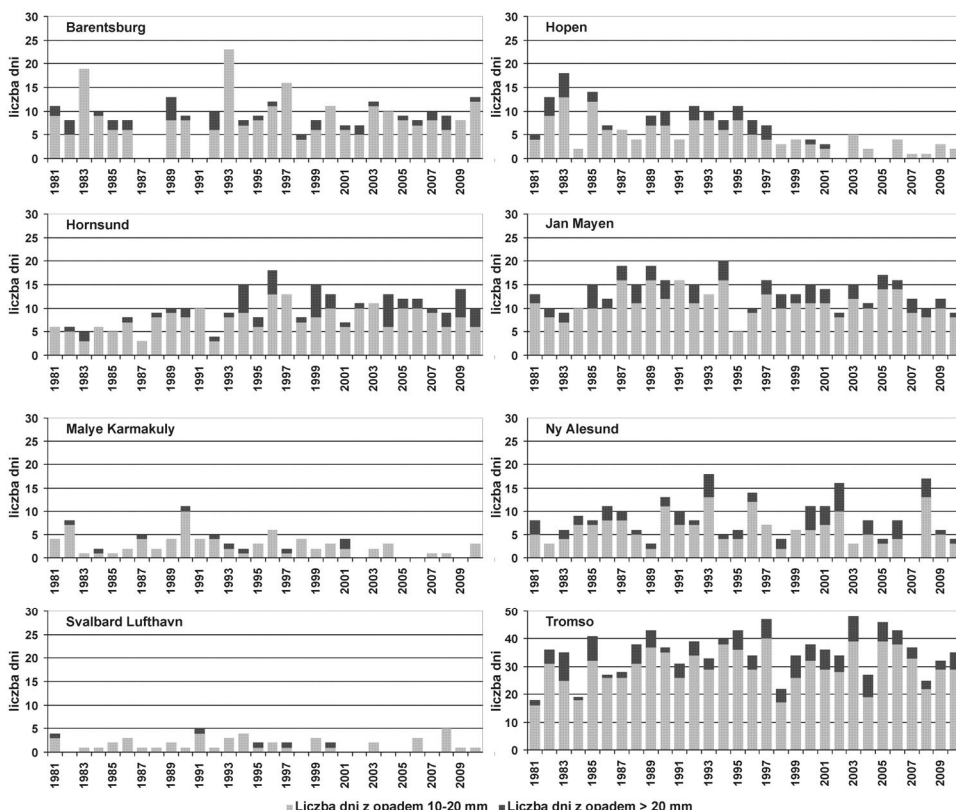
Nazwa stacji Station name	Średnia roczna suma opadu [mm] Average yearly precipitation sum [mm]	Średnia roczna liczba dni z opadem > 20 mm Average yearly number of days with precipitation > 20 mm	Średnia roczna liczba dni z opadem > 10 i ≤ 20 mm Average yearly number of days with precipitation > 10 and ≤ 20 mm
Barentsburg*	521,0	1,54	11,35
Hopen*	425,4	1,44	7,28
Hornsund	440,0	2,10	10,00
Jan Mayen	659,8	2,38	13,76
Malye Karmakuly*	328,7	0,38	3,62
Ny Alesund	410,9	2,07	8,10
Svalbard Lufthavn	187,9	0,17	1,80
Tromso	1080,5	5,23	34,90
Wyspa Niedźwiedzia	416,0	0,50	4,83

* Przy obliczeniach w stacjach: Barentsburg, Hopen i Malye Karmakuly wyłączono lata dla których brakowało danych, jest to więc dla tych stacji odpowiednio średnia z: 27, 28 oraz 26 lat; dla pozostałych stacji średnia z całego 30-lecia.

*In calculations for Barentsburg, Hopen and Malye Karmakuly years with lack of data have been excluded, so for these stations it is the average of 27, 28 and 26 years, respectively; other stations – 30-years average

4.1. Liczba dni z opadem o dużej sumie dobowej

Ogólnie liczba dni z opadem ekstremalnym i ponadprzeciętnym jest na badanym obszarze bardzo mała. W okresie 1981-2010 wystąpiło od 10 dni z opadem > 20 mm na stacji Malye Karmakuly i 15 na Wyspie Niedźwiedziej do 69 na Jan Mayen. Najwięcej, 157 dni, z opadem > 20 mm odnotowano w Tromso. Średnio było to od zaledwie jednego dnia na 3 lata (Malye Karmakuly) do 2,3 dnia na Jan Mayen i 5,2 dnia rocznie w Tromso. Dni z opadem 10-20 mm odnotowano znacznie więcej, średnio od 1,8 w roku na stacji Svalbard Lufthavn do 13,3 na Jan Mayen i aż 34,8 w Tromso. Wciąż jednak jest to bardzo niewielki udział w porównaniu do umiarkowanych szerokości geograficznych. Rycina 2



Ryc. 2. Liczba dni z dobową sumą opadu >10 mm i ≤ 20 mm oraz >20 mm w okresie 1981-2010
 Fig. 2. Number of days with precipitation sum $R > 10$ mm and ≤ 20 mm and > 20 mm in 1981-2010.

przedstawia liczbę dni z opadem w wieloleciu 1981-2010. W niektórych stacjach (szczególnie Hornsund i Tromsø) występuje wyraźny choć niewielki wzrost liczby dni z opadem o dużej wydajności. Zupełnie odmienną sytuację odnotowano w przypadku Hopen, skąd dane wskazują na wyraźny spadek liczby dni z opadem o dużej wydajności, obserwowany od połowy ostatniej dekady XX wieku. W przypadku pozostałych stacji liczba dni z opadem o dużej wydajności była zmienna i trudno było określić jakkolwiek trend. Dodatkowo przeanalizowano zmienność liczby dni z opadem o dużej wydajności w dekadach wielolecia 1981-2010. Wyniki obliczeń zestawiono w tabeli 3. Wzrost liczby dni z opadem o sumie dobowej przekraczającej 20 mm można zaobserwować w stacjach: Hornsund, Ny Alesund, Wyspa Niedźwiedzia oraz Tromsø, przy czym wyraźną tendencję odnotowano w Hornsundzie i Tromsø pomiędzy pierwszą a drugą dekadą wielolecia 1981-2010, natomiast na Wyspie Niedźwiedziej wzrost był niewielki (o 1 dzień) a w stacji Ny Alesund zbliżony pomiędzy pierwszą i drugą oraz drugą i trzecią dekadą. Na stacjach Jan Mayen oraz Malye Karmakuly odnotowano spadek liczby dni z dobowym opadem > 20 mm. Spadek szczególnie wyraźnie zaznacza się na stacji Malye Karmakuly w przypadku liczby dni z opadem 10-20 mm.

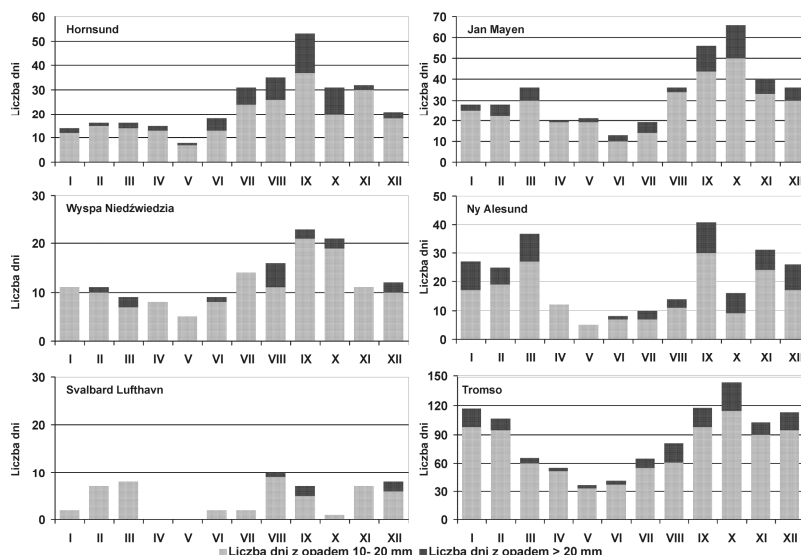
Z punktu widzenia roli opadów o dużych sumach dobowych w środowisku istotny jest okres ich występowania. Na rycinie 3 przedstawiono sumaryczną liczbę dni z opadem 10-20 mm i >20 mm

w poszczególnych miesiącach w analizowanym wieloleciu. Ze względu na zachowanie równoliczności zbiorów i porównywalności wyników z prezentacji wyłączone stacje, dla których występowały braki dla jakiegokolwiek roku z opisywanego trzydziestolecia. Należy zwrócić uwagę, że największa liczba dni z opadem o dużych sumach dobowych w zależności od stacji przypada w różnych okresach roku. Na Wyspie Niedźwiedziej, Jan Mayen, w Svalbard Lufthavn oraz w Hornsundzie (podobną zależność w sezonach zauważono w nie zaprezentowanej ze względów technicznych stacji Malye Karmakuly) wydajne opady dominują w okresie od sierpnia do października. Z kolei w Ny Alesund (i nie prezentowanym na wykresach Barentsburgu) wyraźnie zaznacza się dominacja opadów o dużych sumach dobowych w chłodnej części roku.

Tabela 3. Sumaryczna liczba dni z sumą opadu >10 i ≤ 20 mm oraz ≥ 20 mm w dekadach wielolecia 1981-2010 (wyłącznie dla stacji z kompletną bazą danych opadowych dla wszystkich lat)

Table 3 Total number of days with precipitation sum >10 and ≤ 20 mm and >20 mm in decades 1981-2010 (for stations with complete precipitation database only).

Dekada – Decade	1981-1990		1991-2000		2001-2010	
Suma opadu Precipitation sum	>10 i ≤ 20 mm >10 and ≤ 20 mm	>20 mm	>10 i ≤ 20 mm >10 and ≤ 20 mm	>20 mm	>10 i ≤ 20 mm >10 and ≤ 20 mm	>20 mm
Hornsund	68	8	113	26	109	27
Jan Mayen	138	27	136	21	125	21
Ny Alesund	77	17	89	21	86	29
Svalbard Lufthavn	16	1	24	4	14	0
Tromsø	322	45	361	54	363	58
Wyspa Niedźwiedzia	29	4	59	5	57	6



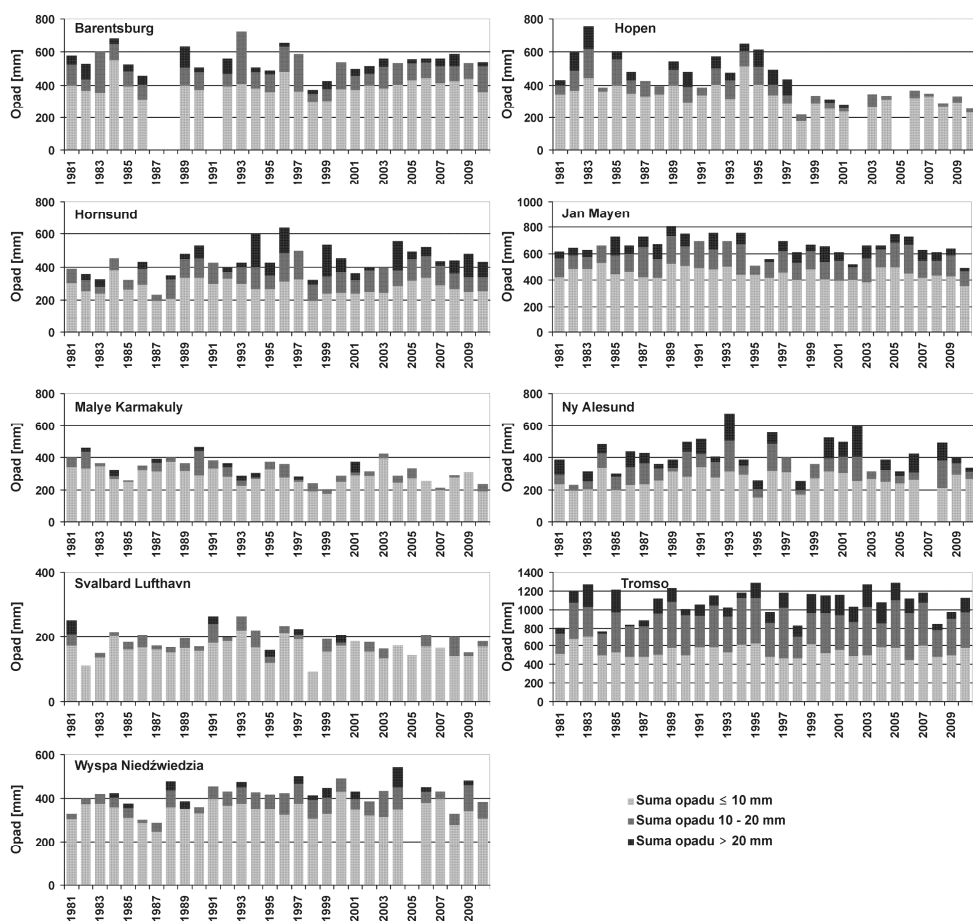
Ryc. 3. Sumaryczna liczba dni z dobową sumą opadu >10 mm i ≤ 20 mm oraz >20 mm w miesiącach wielolecia 1981-2010.

Fig. 3. Sum of days with precipitation sum $R>10$ mm and ≤ 20 mm and >20 mm in months in 1981-2010.

Tak znaczące zróżnicowanie opadów pomiędzy poszczególnymi stacjami należy tłumaczyć przede wszystkim ich położeniem (szczególnie szerokością geograficzną), co decyduje o zasobach wilgotności powietrza i dominującej cyrkulacji atmosferycznej, ale także warunkami lokalnymi (orografia, położenie względem wybrzeża itp.). Szczególnie wyraźnie zaznaczają się różnice pomiędzy stacjami położonymi na Spitsbergenie.

4.2. Sumy opadu

Na wszystkich dziewięciu stacjach przeanalizowano całkowity udział opadu o sumie dobowej >10 i ≤ 20 mm oraz >20 mm w rocznych sumach opadu. Wyniki przedstawiono na ryc. 4. Udział opadów o sumie dobowej 10-20 i >20 mm w rocznych sumach opadu wykazuje dużą zmienność, zarówno na poszczególnych stacjach jak i pomiędzy nimi. Ogólnie udział opadu 10-20 mm na dobę w rocznych sumach opadów waha się od kilku do kilkunastu, a nawet kilkudziesięciu procent. Warto zwrócić uwagę na sytuację, w której opad o dobowej sumie >10 mm stanowi ponad 50% sum miesięcznych.



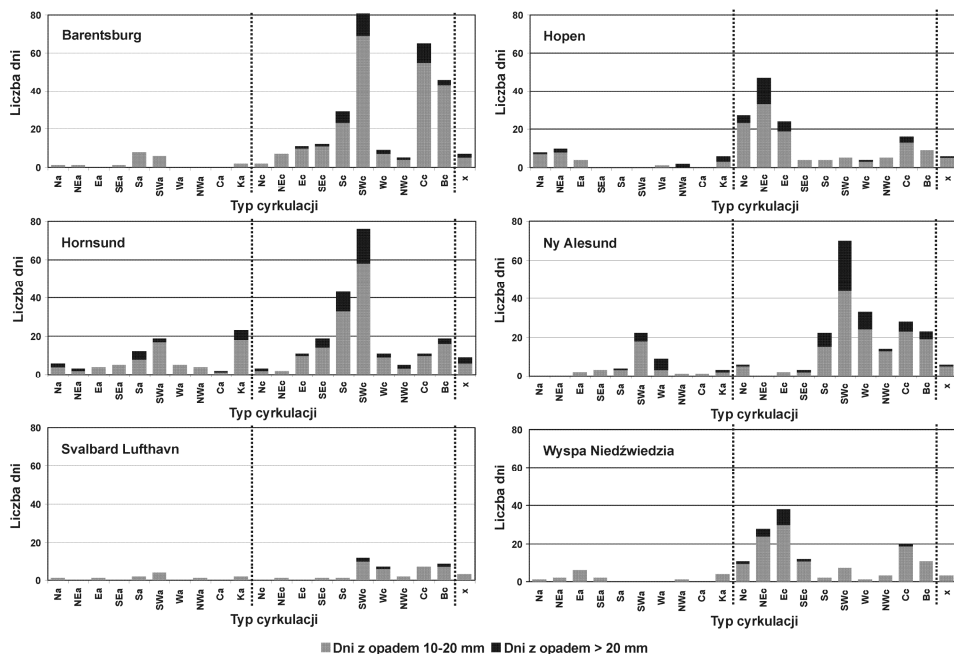
Ryc. 4. Roczne sumy opadu w okresie 1981-2010

Fig. 4. Yearly precipitation sums in 1981-2010.

W stacji Hornsund zauważalny jest słaby wzrost udziału opadu o sumie dobowej 10-20 mm i przekraczającej 20 mm w rocznych sumach opadu. Podobnie sytuacja kształtuje się na Wyspie Niedźwiedziej. Na pozostałych stacjach udział opadów o dużej wydajności w rocznej sumie opadu jest zmienny, bądź maleje (Hopen). Wyraźnie zaznaczający się w przypadku Hopen wyraźnie widoczny spadek, zarówno liczby dni z dużym opadem oraz jego udziału w rocznych sumach opadu wynikać może z trudnych do określenia błędów w danych źródłowych. W Barentsburgu zauważalny jest spadek udziału opadów o dobowej sumie 10-20 mm i >20 mm w drugiej połowie analizowanego wielolecia. Od początku XXI wieku ich udział utrzymywał się na stałym poziomie kilkunastu procent. Zdecydowanie najmniejszy udział opadów ekstremalnych i ponadprzeciętnych zanotowano na stacji Svalbard Lufthavn, co wynika z uwarunkowań lokalnych (usytuowanie w głębi fiordu i osłonięcie przez orografię w przypadku napływu masy powietrza wydajnej w opady). Warto jednak zauważyć, że na Svalbard Lufthavn, podobnie jak w większości pozostałych stacji widoczne są lata ze zwiększonym udziałem opadu o sumie dobowej 10-20 oraz >20 mm w połowie drugiej i w trzeciej dekadzie opisywanego wielolecia.

4.3. Związki opadu o dużej wydajności z cyrkulacją atmosferyczną

Dla stacji położonych na Spitsbergenie przeanalizowano typy cyrkulacji atmosferycznej dla dni z wystąpieniem opadu o dobowej sumie >10 i ≤20 mm oraz >20 mm. Wykorzystano w tym celu kalendarz typów cyrkulacji atmosferycznej T. Niedźwiedzia (2013). Wyniki tych analiz zestawiono na ryc. 5.



Ryc. 5. Związek liczby dni z dobową sumą opadu >10 mm i ≤20 mm oraz >20 mm z typami cyrkulacji T. Niedźwiedzia w okresie 1981-2010.

Fig. 5. Relation between number of days with precipitation sum $R > 10$ mm and ≤20 mm and >20 mm and T. Niedźwiedź circulation in 1981-2010.

Na stacjach spitsbergeńskich najczęściej dni z opadem dobowym 10-20 mm i >20 mm zanotowano przy cyrkulacji cyklonalnej i napływie powietrza z południowego zachodu (typ SWc). Ponadto znacząca liczba dni z opadem o ponadprzeciętnej i ekstremalnej sumie dobowej miała miejsce przy cyrkulacji Sc, SEc i Bc (tab. 4 i 5). Potwierdza to prawidłowości znane z literatury dla Hornsundu (Łupikasa 2013). Co ciekawe, opad o sumie dobowej 10-20 mm i >20 mm zdarzał się również przy cyrkulacji antycyklonalnej przy napływie powietrza z sektora południowego. W przypadku Jan Mayen najczęściej dni z dobową sumą opadu >20 mm odnotowano przy cyrkulacji NEc, niemniej jednak istotną

Tabela 4. Liczba dni (n) i ich procentowy udział (%) z dobową sumą opadu w klasie od 10 do 20mm w latach 1981-2010 według pogrupowanych typów cyrkulacji atmosferycznej Niedźwiedzia

Table 4. Number of days (n) and their share (%) with daily precipitation sum >10 and ≤20 mm in years 1981-2010 according to T. Niedźwiedź circulation types.

Stacja Station		Na+NEa	Ea+SEa	Sa+SWa	Wa+NWa	Ca+Ka	Nc+NEc	Ec+SEC	Sc+SWc	Wc+NWc	Cc+Bc	x
Barentsburg	n	2	1	13	0	1	6	15	90	8	95	4
	%	0,9	0,4	5,5	0,0	0,4	2,6	6,4	38,3	3,4	40,4	1,7
Hopen	n	15	4	0	1	3	56	23	9	8	22	5
	%	10,3	2,7	0,0	0,7	2,1	38,4	15,8	6,2	5,5	15,1	3,4
Hornsund	n	6	9	25	9	19	4	24	91	12	26	6
	%	2,6	3,9	10,8	3,9	8,2	1,7	10,4	39,4	5,2	11,3	2,6
Ny Alesund	n	0	5	21	4	3	5	4	59	37	42	5
	%	0,0	2,7	11,4	2,2	1,6	2,7	2,2	31,9	20,0	22,7	2,7
Svalbard Lufhavn	n	1	1	6	1	2	1	1	11	8	14	3
	%	2,0	2,0	12,2	2,0	4,1	2,0	2,0	22,4	16,3	28,6	6,1
Wyspa Niedźwiedzia	n	3	8	0	1	4	34	41	9	4	30	3
	%	2,2	5,8	0,0	0,7	2,9	24,8	29,9	6,6	2,9	21,9	2,2

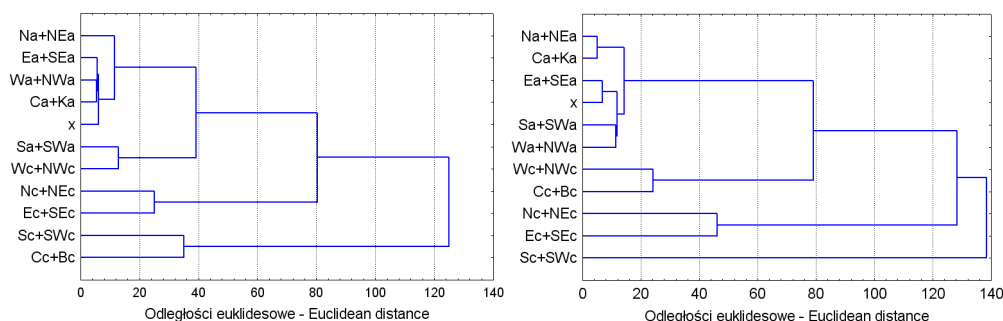
Tabela 5. Liczba dni (n) i ich procentowy udział (%) z dobową sumą opadu w klasie >20 mm w latach 1981-2010 według pogrupowanych typów cyrkulacji atmosferycznej Niedźwiedzia

Table 5. Number of days (n) and their share (%) with daily precipitation sum >20 mm in years 1981-2010 according to T. Niedźwiedź circulation types

Stacja Station		Na+NEa	Ea+SEa	Sa+SWa	Wa+NWa	Ca+Ka	Nc+NEc	Ec+SEC	Sc+SWc	Wc+NWc	Cc+Bc	x
Barentsburg	n	0	0	0	0	0	0	2	17	3	6	1
	%	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	6,9	58,6	10,3	20,7	3,4
Hopen	n	3	0	0	2	3	18	5	0	1	3	1
	%	8,3	0,0	0,0	5,6	8,3	50,0	13,9	0,0	2,8	8,3	2,8
Hornsund	n	3	0	6	0	6	1	6	28	4	4	3
	%	4,9	0,0	9,8	0,0	9,8	1,6	9,8	45,9	6,6	6,6	4,9
Ny Alesund	n	0	0	5	6	1	1	1	33	10	9	1
	%	0,0	0,0	7,5	9,0	1,5	1,5	1,5	49,3	14,9	13,4	1,5
Svalbard Lufhavn	n	0	0	0	0	0	0	0	2	1	2	0
	%	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	40,0	20,0	40,0	0,0
Wyspa Niedźwiedzia	n	0	0	0	0	0	5	9	0	0	1	0
	%	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	33,3	60,0	0,0	0,0	6,7	0,0

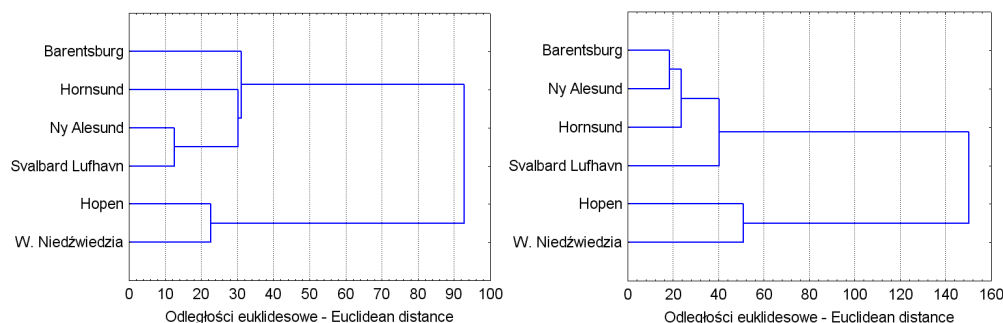
rolę miała też cyrkulacja SEc, Sc, SWc oraz Cc. Dla Wyspy Niedźwiedziej najbardziej opadonośnym kierunkiem napływu powietrza był cały sektor wschodni. Zdecydowana większość przypadków opadu 10-20 mm oraz >20 mm na dobę miała miejsce przy sytuacjach cyklonalnych (Ec oraz NEc).

Szczegółową analizę związku opadów o dużych sumach dobowych z cyrkulacją atmosferyczną przeprowadzono dla stacji spitsbergeńskich i położonych w bliskim sąsiedztwie Spitsbergenu wykorzystując analizę skupień metodą Warda (ryc. 6 i 7). W analizie uwzględniono 11 pogrupowanych typów cyrkulacji T. Niedźwiedzia (2013). Analiza wskazuje, że na stacjach zachodniego wybrzeża Spitsbergenu większą liczbę przypadków z dobową sumą opadu w klasie 10-20 mm notowano w typach cyrkulacji atmosferycznej Sc+SWc oraz Cc+Bc, chociaż stacja Svalbard Lufthavn schowana w głębi fjordu otrzymywała takich opadów najmniej. Nieco mniejszą liczbę przypadków odnotowano na Hopen i Wyspie Niedźwiedziej, gdzie nieistotną rolę odgrywa czynnik orograficzny. Analizowane opady występowały w sytuacjach odmiennych w stosunku do obserwowanych na Zachodnim Spitsbergenie, bo z dominacją typów cyrkulacji Nc+NEc i Ec+SEc a także typu Cc+Bc wyraźnie zaznaczającego się na Spitsbergenie (tab. 4 oraz ryc. 6 i 7).



Ryc. 6. Udział typów cyrkulacji atmosferycznej Niedźwiedzia decydujących o częstości przypadków z sumą dobową opadu >10 i ≤20 mm (lewy) i >20 mm (prawy)

Fig. 6. Share of T. Niedźwiedź atmospheric circulation types determining frequency of daily precipitation sum >10 and ≤20 mm (left) and >20 mm (right).



Ryc. 7. Cechy stacji pomiarowych w świetle wyników analizy skupień dla liczby przypadków z sumą dobową opadu >10 i ≤20 mm (lewy) i >20 mm (prawy)

Fig. 7. Measurement stations' characteristics based on data clustering for number of days with precipitation sum >10 and ≤20 mm (left) and >20 mm (right).

W przypadku opadów o sumie dobowej >20 mm udział poszczególnych typów cyrkulacji atmosferycznej nieco różni się tych typów cyrkulacji, które decydują o opadach w klasie 10-20 mm. Większą liczbę przypadków z dobową sumą opadu >20 mm odnotowano również na stacjach zachodniego wybrzeża Spitsbergenu (Ny Alesund, Hornsund i Barentsburg) a opadom tym głównie sprzyjała cyrkulacja atmosferyczna z typami Sc+SWc. W kształtowaniu opadów o dużych sumach dobowych zauważalny udział brały także typy cyrkulacji atmosferycznej Cc+Bc a także Wc+NWc oraz Ec+SEc. Położenie stacji Svalbard Lufthavn i wpływ rzeźby terenu w jej otoczeniu powoduje, że znajduje się ona w cieniu opadowym. Na wyrażnie odmienne cechy tej stacji wskazuje analiza skupień.

Mniejszą liczbę przypadków z dużym opadem odnotowano na Hopen i Wyspie Niedźwiedziej i co należy zauważyć, związane były głównie z typami Nc+NEc oraz Ec+SEc, podobnie jak dla opadów w klasie 10-20 mm. Na stacjach tych, w porównaniu ze Spitsbergenem, nieistotną rolę odgrywa czynnik orograficzny, chociaż jego wpływ zaznacza się w przypadku opadów na Hopen. Pośrednio wskazuje na to dwukrotnie większa liczba przypadków z opadem o sumie dobowej >20 mm w porównaniu z notowanymi na Wyspie Niedźwiedziej (tab. 5 oraz ryc. 6 i 7).

Ogólnie w większości przeanalizowanych przypadków opad o dużej wydajności związany był z cyrkulacją cyklonalną i napływem wilgotnego powietrza z niższych szerokości geograficznych (Araźny 2003). Niemniej jednak warto zauważyć, że część przypadków mogła być związana z cyrkulacją lokalną (np. efektami orograficznymi). Może na to wskazywać wystąpienie dni z opadem o dużej wydajności przy pogodzie antycyklonalnej.

4.4. Studium przypadku – SW Spitsbergen, lato 2012

Jako ilustrację omawianego problemu w skali lokalnej, w kontekście środowiskowych skutków ekstremalnych opadów atmosferycznych warto pokazać przykład epizodu wezbraniowego z sierpnia 2012 na niewielkiej rzece Bratteg. W ciągu zaledwie kilku godzin od początku opadu związanego z południowo-zachodnią cyrkulacją cyklonalną poziom wody w niewielkiej rzece Bratteg na przedpolu lodowca Werenskiolda (SW Spitsbergen) wzrósł o ponad 1,5 m. Dobowa suma opadu z 10 sierpnia 2012 r. zmierzona w okolicy stacji polarnej im. St. Baranowskiego wyniosła 38 mm. W czasie całego epizodu opadowego (9-11.08) suma opadu wyniosła 58 mm, co stanowiło 45% sumy miesięcznej (14 dni z opadem). Wysokie sumy opadu odnotowano również w pobliskiej stacji polarnej PAN (odpowiednio: 28,5 i 47 mm 10 sierpnia i w okresie 9-11 sierpnia). Wezbranie podczas epizodu w okolicy stacji St. Baranowskiego przedstawiono na ryc. 8.



Ryc. 8. Brattega, 10 sierpnia 2012.
Fot. Piotr Modzel

Fig. 8 Bratteg river, 10 August 2012.
Photo: Piotr Modzel.

5. Podsumowanie

Należy wskazać na istotny udział opadów o dobowych sumach 10-20 mm oraz >20 mm w rocznych i miesięcznych sumach opadu dla całego analizowanego obszaru. Średnia roczna liczba dni z opadem ekstremalnym (>20 mm) jest bardzo zróżnicowana w zależności od stacji, od 0,17 na stacji Svalbard Lufthavn do 2,38 na Jan Mayen. Wynika to przede wszystkim ze znacznego zróżnicowania położenia geograficznego, ale także uwarunkowań lokalnych (np. położone stosunkowo niedaleko od siebie Svalbard Lufthavn i Hornsund).

W wieloleciu 1981-2010 stwierdzono występowanie typowej dla Arktyki Atlantycznej sezonowości ponadprzeciętnych dobowych sum opadowych. Pomimo, że w części analizowanych stacji odnotowano niewielki wzrost częstości występowania opadów o sumach dobowych 10-20 mm i >20 mm, na podstawie przeanalizowanych danych nie można wnioskować o wzroście opadów ponadprzeciętnych i ekstremalnych w odniesieniu do wszystkich analizowanych stacji, a tym bardziej do całego atlantyckiego sektora Arktyki.

Związek występowania opadu o sumie dobowej 10-20 mm i >20 mm z typami cyrkulacji atmosferycznej był bardzo wyraźny. Dla większości stacji (Barentsburg, Ny Alesund, Svalbard Lufthavn i Hornsund) jako istotna zaznaczyła się rola cyrkulacji południowej (przynoszącej ciepłe masy powietrza o znacząco większych od średniej dla analizowanego i chłodniejszego obszaru zasobach wilgoci). Cyrkulacja południowa nie miała natomiast związku z występowaniem takich opadów w przypadku stacji Hopen i Wyspa Niedźwiedzia (odpowiednio Sa+SWa – 0% przypadków oraz Sc+SWc po mniej niż 10% przypadków). Należy także zauważyć rolę typów cyrkulacji Cc+Bc, które na wszystkich stacjach rejonu Spitsbergenu odgrywały znaczącą rolę w kształtowaniu ponadprzeciętnych dobowych sum opadowych, od około 40% w Barentsburgu do nieco ponad 11% w Hornsundzie. W części przypadków wyraźnie zaznaczyła się także nie analizowana szczegółowo w niniejszej pracy rola lokalnego położenia stacji i wpływu orografii na pole opadu atmosferycznego.

Należy zwrócić uwagę na jakość dostępnych baz danych i znaczne trudności w uzyskaniu wiarygodnych, kompletnych i homogenicznych danych opadowych, co znacząco utrudnia wszelkie analizy tego elementu klimatu w obszarach polarnych, a przede wszystkim zmniejsza liczbę możliwych do wykorzystania stacji pomiarowych oraz utrudnia bądź wręcz uniemożliwia wykonanie podstawowych analiz klimatologicznych.

Literatura

- Arażny A., 2003. Przebieg roczny wilgotności względnej w Arktyce Norweskiej w okresie 1971-2000. *Problemy Klimatologii Polarnej*, 13: 107-115.
- Łupikasza E., 2013. Atmospheric precipitation. [w:] Marsz A., Styszyńska A (red), *Climate and Climate change at Hornsund, Svalbard*. The publishing house of Gdynia Maritime University, Gdynia: 199-212.
- Niedźwiedź T., 2002. Wpływ cyrkulacji atmosfery na wysokie opady w Hornsundzie. *Problemy Klimatologii Polarnej*, 12: 65-75.
- Niedźwiedź T., 2013. *Kalendarz typów cyrkulacji atmosfery dla Spitsbergenu* — zbiór komputerowy, Uniwersytet Śląski, Katedra Klimatologii, Sosnowiec.
- Przybylak R., 1996. *Zmienność temperatury powietrza i opadów atmosferycznych w okresie obserwacji instrumentalnych w Arktyce*. Wydawnictwo Uniwersytetu M. Kopernika, Toruń: 280 s.
- <ftp://ftp.ncdc.noaa.gov/pub/data/> (dostęp 11.04.2013).

<http://eklima.met.no> (dostęp 13.04.2013).
<http://meteo.ru> (dostęp 13.04.2013).
<http://www.wetterzentrale.de/topkarten/fsfaxbra.html> (dostęp 15.04.2013).

Wpłynęło: 19 lipca 2013 r., poprawiono: 20 października 2013 r., zaakceptowano: 28 października 2013 r.

Summary

Contemporary climate change mark out intensively in polar regions. Due to some climatologists one of the most important effects of climate change is increase of frequency and intensity of atmospheric precipitation. It has a significant meaning for functioning of polar geoeosystems, especially for glacier ice mass balance, duration and height of snow cover, intensity of hydrological and geomorphological processes as well as the animated environment. The research objective of this study is trial analysis of high efficiency precipitation events in nine chosen synoptic stations in the Atlantic part of the Arctic in period 1981-2010 with particular focus on the first decade of the 21st century as well analyses of these cases in terms of synoptic conditions.

Significant contribution of high efficiency precipitation in monthly and yearly precipitation sums have been found in all analysed stations. In some of the analysed stations there was a slight increase of frequency of high efficiency precipitation noticed, however basing on the analysed data it is impossible to explicitly show an increasing trend neither in all analysed stations nor the more in the whole Atlantic Arctic. Correlation between high efficiency precipitation and atmospheric circulation types was very clear. For majority of stations the southern circulation was crucial for high precipitation (humid air masses inflow). In some cases there was clearly visible role of location of the station and influence of orography on the precipitation field.

It is important to notice the quality of available databases and considerable difficulties in obtaining reliable, complete and homogenous precipitation data, what makes all analyses of this climatological element in polar areas difficult. The results shown in this study should be regarded as preliminary and basis for further discussion on signalized problems.

Key words: atmospheric precipitation, Atlantic part of the Arctic, high efficiency precipitation, climate change.