

WYSTĘPOWANIE DNI Z PRZEJŚCIEM TEMPERATURY POWIETRZA PRZEZ 0°C NA WYBRANYCH STACJACH W ATLANTYCKIM SEKTORZE ARKTYKI

THE OCCURRENCE OF DAYS WITH FREEZE-THAW EVENTS
AT SELECTED STATIONS WITHIN THE ATLANTIC SECTOR OF ARCTIC

Ewa Łupikasza, Tadeusz Niedźwiedz, Łukasz Małarzewski

Uniwersytet Śląski; Wydział Nauk o Ziemi, Katedra Klimatologii
ul. Będzińska 60, 41-200 Sosnowiec
ewa.lupikasza@us.edu.pl, tadeusz.niedzwiedz@us.edu.pl, malarzewski@onet.eu

Zarys treści. Opracowanie dotyczy ważnego wskaźnika współczesnych zmian klimatu – dni z przejściem temperatury powietrza przez 0°C, które wyróżniono na podstawie temperatury dobowej maksymalnej i minimalnej mierzonej na 4 wybranych stacjach w obrębie atlantyckiego sektora Arktyki w okresie regularnych pomiarów instrumentalnych. Analiza częstości występowania tych dni w kolejnych miesiącach wskazuje na ich bimodalny przebieg roczny z maksimum w maju lub czerwcu, a minimum w lipcu lub sierpniu. Obliczona metodą Mann-Kendalla istotność tendencji wykazała spadek częstości występowania dni z $T_{max} > 0^{\circ}\text{C}$ i $T_{min} < 0^{\circ}\text{C}$ w miesiącach z cieplejszej części roku oraz w grudniu. Czasowe zmiany występowania tych dni zależą od lokalnej cyrkulacji atmosfery – najsilniej od napływu powietrza z południa, który w lecie przyczynia się do spadku, zaś w zimie do wzrostu ich frekwencji.

Słowa kluczowe: dni z przejściem temperatury przez 0°C, Arktyka, trendy dni przymrozkowych, cyrkulacja atmosfery, wskaźniki cyrkulacji, AO.

1. Wstęp

Arktyka, a tym samym Spitsbergen, odróżniają się pod względem klimatycznym od większości obszarów na Ziemi. Decyduje o tym lokalizacja w wysokich szerokościach geograficznych, która determinuje czas trwania dnia i nocy, a w następstwie również ilość dopływającego tam promieniowania słonecznego. W efekcie oddziaływania czynników klimatotwórczych temperatura powietrza zmienia się w przebiegu rocznym. W cieplejszej części roku – określonej przez A.A. Marsza (2013) na okres od drugiej dekady maja do drugiej dekady września – warunki atmosferyczne kształtują się pod wpływem cyrkulacji atmosfery oraz promieniowania słonecznego. Cyrkulacja atmosfery, która zdaniem M.C Serreze'a i J.A. Francis (2006) jest w znacznej mierze odpowiedzialna za ostatnie zmiany klimatu Arktyki, warunkuje pogodę w ciągu całego roku.

W atlantyckim sektorze Arktyki stwierdzono znaczący wzrost temperatury powietrza, o około 1°C, w okresie 1995-2005, z największym ociepleniem w jesieni i w zimie (Przybylak 2007). W Homsundzie (Spitsbergen) tendencja do ocieplania się jest najsilniejsza w grudniu i statystycznie istotna również

w listopadzie, kwietniu, maju, czerwcu i sierpniu (Marsz i Styszyńska 2007, 2013). Istotny wzrost temperatury powietrza w obszarze tym potwierdzają również wyniki badań E.J. Førlanda i I. Hanssen-Bauer (2003), P. Ø Nordliego (2005) i E. Bednorz (2011). Obserwowany wzrost temperatury powietrza w Arktyce powinien prowadzić do istotnych zmian częstości występowania dni charakterystycznych. W obszarach polarnych szczególne znaczenie ma liczba dni z przejściem temperatury przez próg 0°C , kiedy to następują procesy zamarzania wody i tajania lodu ważne dla procesów wietrzenia mrozowego skał i ruchów mrozowych gruntu. Dni charakterystyczne pod względem termicznym, czyli takie, podczas których temperatura powietrza przekracza określone wartości progowe, zaliczane są do wskaźników współczesnych zmian klimatu. Definicja dnia z przejściem temperatury przez 0°C dotyczy przedziałów dobowych, zdefiniowanych dla obszaru Europy, jako okres od godziny 18 UTC dnia poprzedniego do godziny 18 UTC dnia bieżącego. Zmiana temperatury może mieć klasyczny przebieg dobowy, a także, zwłaszcza w obszarach polarnych, temperatura może nierównomiernie spadać od wartości dodatnich do ujemnych, ewentualnie wzrastać od wartości ujemnych do dodatnich. Niekiedy w ciągu doby może dochodzić do kilkakrotnego przejścia temperatury przez 0°C (Łupikasza i in. 2012). Na potrzebę wydzielenia takich dni pierwszy zwrócił uwagę M. Hess (1965) przy badaniach klimatu Karpat, traktując takie dni, jako właściwe dni przymrozkowe. Stosowana nierzadko definicja dnia przymrozkowego (m. in. Glickman 2000), jako dnia z temperaturą ujemną ($T_{\min} < 0^{\circ}\text{C}$) nie jest właściwa, gdyż w tej grupie dni znajdują się również dni mroźne ($T_{\max} < 0^{\circ}\text{C}$). Dlatego też M. Hess (1965) określił takie dni terminem dni z mrozem i przymrozkiem. W słowniku meteorologicznym Polskiego Towarzystwa Geofizycznego (Niedźwiedz 2003) dni z przejściem temperatury przez 0°C również traktowane są jako dni z przymrozkiem. W tej pracy będzie się jednak określać jako dni z przejściem temperatury powietrza przez 0°C (dalej oznaczone DT0).

Badania nad częstością występowania dni charakterystycznych w Arktyce były rzadko podejmowane. Analizę występowania dni mroźnych oraz związku między ich częstością i cyrkulacją atmosfery zajmowali się T. Niedźwiedz i in. (2012) oraz E. Łupikasza i in. (2013). Z. Ustrnul (1987) podaje, że w Hornsundzie w okresie 1978-1986 występowały średnio 73 dni, podczas których temperatura powietrza przechodzi przez 0°C ; najwięcej takich dni pojawiało się w maju, czerwcu i we wrześniu (średnio 11 dni), z kolei najmniej w lipcu i sierpniu. Szczegółowa analiza występowania dni z przejściem temperatury przez 0°C w Hornsundzie w okresie 1979-2011 wskazuje istotny statystycznie wzrost ich frekwencji w grudniu i spadek w czerwcu (Łupikasza i in. 2012).

Celem niniejszego opracowania jest ocena przebiegu rocznego występowania dni z przejściem temperatury przez 0°C na wybranych stacjach w obrębie atlantyckiego sektora Arktyki, ocena tendencji występowania tych dni oraz związków pomiędzy ich wieloletnią zmiennością i cyrkulacją atmosfery w okresie obserwacji instrumentalnych. W badaniach uwzględniono cztery stacje meteorologiczne zlokalizowane powyżej 70°N – Svalbard-Lufthavn (WMO No 01008, $78^{\circ}15'\text{N}$, $15^{\circ}28'\text{E}$, 2 m n.p.m.), Polską Stację Polarną w Hornsundzie (01003, $77^{\circ}00'\text{N}$, $15^{\circ}33'\text{E}$, 11 m n.p.m.), Hopen (01062, $76^{\circ}30'\text{N}$, $25^{\circ}04'\text{E}$, 6 m n.p.m.) i Bjørnøye (01028, $74^{\circ}31'\text{N}$, $19^{\circ}01'\text{E}$, 16 m n.p.m.).

2. Dane i metody

Dni z przejściem temperatury przez 0°C (DT0), określane jako dni z przymrozkiem (Niedźwiedz 2003), wyznaczono na podstawie temperatury dobowej maksymalnej (T_{\max}) oraz minimalnej (T_{\min}) zmierzonej na czterech stacjach meteorologicznych położonych w granicach atlantyckiego sektora

Arktyki. Większość danych dla stacji Svalbard Lufthavn, Hopen i Bjørnøya pochodzi z udostępnionej w Internecie do użytku publicznego, bazy danych meteorologicznych e-Klima (eklima.met.no) Norweskiego Instytutu Meteorologicznego. Część danych dla wymienionych powyżej stacji zaczerpnięto z bazy danych ECA&D (European Climate Assessment&Dataset; Klein Tank i in. 2002). Dane dla Stacji Naukowej Instytutu Geofizyki PAN, zlokalizowanej na tundrze w południowo-zachodniej części Spitsbergenu na terasie morskiej fiordu Homsund pozyskano z Biuletynów IMGW (Miętuś 2000-2001) oraz Biuletynów Instytutu Geofizyki Polskiej Akademii Nauk (Instytut of Geophysics 2001, 2003, Instytut Geofizyki PAN, 2009-2013). Dane za okres od października 1999 r. do marca 2013 r. zostały porównane i uzupełnione danymi pochodzącymi z depesz synoptycznych (SYNOP) zgromadzonych w bazie OGIMET (Valor 2013).

Ciągi chronologiczne temperatury powietrza obejmują, w zależności od stacji, wielolecia różnej długości. Najdłuższe ciągi, przekraczające 67 lat zebrano dla stacji Hopen (listopad 1946 – marzec 2013) oraz Bjørnøya (styczeń 1946 – marzec 2013). Zakres czasowy danych w przypadku stacji Svalbard Lufthavn (z uwzględnieniem wcześniejszej stacji Longyearbyen) wynosi 56 lat (styczeń 1957 – marzec 2013), a w przypadku stacji Hornsund przekracza 34 lata (lipiec 1978 – marzec 2013).

Na podstawie wybranych statystyk opisowych określono przebieg roczny częstości występowania dni z przejściem temperatury powietrza przez 0°C. W celu zapewnienia porównywalności uzyskanych wskaźników statystycznych, statystyki opisowe dla każdej stacji (częstość, średnią liczbę dni, błąd standardowy średniej, przedziały ufności, wartości skrajne oraz odchylenie standardowe) obliczono na podstawie danych za okres 1979-2012. Wieloletnie zmiany występowania DT0 oceniono na podstawie analizy trendów w różnych okresach wieloletnich, a mianowicie: w całym okresie pomiarów instrumentalnych na poszczególnych stacjach meteorologicznych (różne okresy w zależności od stacji), we wspólnym dla wszystkich rozpatrywanych stacji okresie 1979-2013 oraz w latach 1995-2013, które uważane są za okres wyraźnego wzrostu temperatury powietrza w Arktyce (Przybylak 2007). Istotność statystyczną trendów oceniono stosując test Mann-Kendalla, zaś wielkość trendów obliczono metodą najmniejszych kwadratów i wyrażono zmianą liczby dni na 10 lat.

Związki pomiędzy wieloletnimi zmianami występowania dni z przejściem temperatury przez 0°C i cyrkulacją atmosfery oceniono na podstawie współczynnika korelacji Spearmana. Wykorzystano trzy regionalne wskaźniki cyrkulacji atmosfery (cyrkulacji zachodniej W, cyrkulacji południowej S oraz cykloniczności C) i jeden makroskalowy (AO – Arctic Oscillation). Zarówno w przypadku trendów jak i współczynników korelacji przyjęto poziom istotności statystycznej $\alpha=0,05$. Wszystkie analizy przeprowadzono w ujęciu miesięcznym oraz sezonowym, definiując sezony jako standardowe w klimatologii okresy 3-miesięczne: zima – grudzień, styczeń, luty; wiosna – marzec, kwiecień, maj; lato – czerwiec, lipiec, sierpień; jesień – wrzesień, październik, listopad.

Regionalne wskaźniki cyrkulacji (W, S, C) zostały obliczone na podstawie typów cyrkulacji atmosfery dla Spitsbergenu (Niedźwiedź 2013a,b). Każdemu typowi cyrkulacji przypisano określoną liczbę punktów w zależności od wskaźnika cyrkulacji, a następnie punkty te zsumowano dla każdego miesiąca w roku. Obliczając wskaźnik cyrkulacji zachodniej – typowi cyrkulacji W przypisano +2 punkty, typowi NW oraz SW przypisano +1 pkt, typowi E przypisano –2 punkty, zaś typom NE i SE: –1 pkt. Dodatnie wartości wskaźnika oznaczają wyraźną dominację przepływu zachodniego, z kolei wartości ujemne wskazują na duże nasilenie przepływu wschodniego.

Wskaźnik cyrkulacji południowej (S) jest sumą punktów przypisanych do typów cyrkulacji według następującej zasady: +2 pkt dla typu S, +1 pkt dla typów SE i E, –2 pkt dla typu N oraz –1 pkt dla

typów NW i NE. Dodatkowo wartości wskaźnika S wynikają z silnego przepływu strefowego z kierunku południowego, z kolei ujemne są efektem przewagi przepływu północnego.

Wskaźnik cykloniczności informujący o częstotliwości występowania układów niżowych obliczono przypisując +2 pkt centrum niżu i bruzdzie niżowej, +1 pkt pozostałym cyklonalnym typom cyrkulacji (Nc, NEc, Ec, SEc, Sc, SWc, Wc i NWc), -1 pkt antycyklonalnym sytuacjom adwekcyjnym (Na, NEa, Ea, SEa, Sa, SWa, Wa i NWA) oraz -2 pkt centrum układu wyżowego oraz wałowi wyżowemu. Dodatkowo wartości wskaźnika wskazują przewagę cyklonalnych typów cyrkulacji nad typami antycyklonalnymi.

Sumy miesięczne otrzymane po zsumowaniu punktów przypisanych sytuacjom synoptycznym zostały podzielone przez podwojoną sumę dni w danym miesiącu. W ten sposób uzyskano względne wartości wskaźnika zmieniające się w zakresie od -100 do +100%. Wartość +100% oznacza iż w danym miesiącu wystąpiły tylko i wyłącznie te typy cyrkulacji, którym przypisano +2 pkt, z kolei wartość -100% oznacza, iż pojawiały się tylko typy cyrkulacji, którym przypisano -2 pkt.

Wskaźnik AO jest wskaźnikiem opisującym cyrkulację makroskalową (Thompson i Wallace 1998), i wyraża zróżnicowanie ciśnienia atmosferycznego pomiędzy wysokimi i umiarkowanymi szerokościami geograficznymi półkuli północnej. Ujemne wartości wskaźnika oznaczają występowanie wysokiego ciśnienia w obszarach polarnych oraz niższego niż zwykle ciśnienia w szerokościach umiarkowanych półkuli północnej. Dodatkowo wartości AO wskazują na odwrócony rozkład ciśnienia na półkuli północnej w stosunku do opisanego powyżej. Miesięczne wartości tego wskaźnika pozyskano ze strony Internetowej National Oceanic and Atmospheric Administration (<http://www.cpc.noaa.gov/products/...>).

3. Przebieg roczny występowania dni z przejściem temperatury przez 0°C

Średnia roczna liczba dni, podczas których temperatura powietrza przekraczała próg 0°C zmieniała się od 63 dni na stacji Svalbard Lufthavn położonej najdalej na północ do 96 dni na stacji Bjørnøya wysuniętej najbardziej na południe. Skrajne częstotliwości występowania dni z przejściem temperatury przez 0°C znacznie odbiegają od wartości średnich. Maksymalna częstotliwość tych dni osiągnęła 151 dni w 1959 r. na stacji Hopen, 100 dni w 1996 r. na stacji Hornsund, 98 dni w 1959 r. na stacji Svalbard Lufthavn oraz 130 dni na stacji Bjørnøya w 1949. Minimalne częstotliwości zmieniały się z kolei od 38 dni w 1968 i 1971 r. na stacji Svalbard Lufthavn przez 49 dni w 2002 r. na stacji Hornsund i 51 dni w 1970 roku na stacji Bjørnøya do 56 dni w 1973 r. na stacji Hopen.

Dni z $T_{max} > 0^{\circ}\text{C}$ i $T_{min} < 0^{\circ}\text{C}$ pojawiają się w ciągu całego roku. W Hornsundzie oraz na stacji Svalbard Lufthavn najczęściej notowane są jesienią (odpowiednio 28 i 23 dni), w Hopen zbliżoną frekwencją takich dni charakteryzuje się lato i jesień (około 27 dni), z kolei na stacji Bjørnøya sezonowe maksimum częstotliwości ich występowania przypada na wiosnę (32 dni). Na większości stacji temperatura powietrza w ciągu doby przekracza 0°C najrzadziej latem (Svalbard Lufthavn 8 dni, Bjørnøya 11 dni, Hornsund 13 dni). Jedynie na stacji Hopen minimum częstotliwości omawianych dni przypada na zimę (13 dni; patrz tab. 1). Największą spośród wszystkich rozpatrywanych stacji frekwencją dni z $T_{max} > 0^{\circ}\text{C}$ i $T_{min} < 0^{\circ}\text{C}$ charakteryzuje się stacja Hopen, gdzie latem w 1965 roku odnotowano aż 67 takich dni.

Przebieg roczny występowania DT0 na rozpatrywanych stacjach jest bimodalny. Na większości stacji pierwszorzędne maksimum ich częstotliwości przypada na maj, jedynie na stacji Hopen notowane jest w czerwcu. Drugorzędne maksimum tej charakterystyki termicznej wyróżnia październik (ryc. 1). Na stacji Svalbard Lufthavn dni z $T_{max} > 0^{\circ}\text{C}$ i $T_{min} < 0^{\circ}\text{C}$ w zasadzie nie pojawiają się w lipcu. Na stacji tej w ciągu badanych 57 lat temperatura powietrza w ciągu doby przekroczyła próg 0°C tylko raz, co

Tabela 1. Statystyki opisowe częstości występowania dni z przejściem temperatury przez 0°C na wybranych stacjach w Atlantyckim sektorze Arktyki w okresie 1979-2012

Table 1. Descriptive statistics of the frequency of days with freeze-thaw events at selected stations within the Atlantic sector of Arctic in the period 1979-2012.

Okres Period	Stacja Station	Frq [%]	Śr (±BS) [liczba dni] [no of days]	Przedziały ufności Confidence intervals		Min	Max	OS
				-95%	+95%			
Rok Year	Svalbard Lufthavn	17	63(±2)	59	66	42	85	11
	Hornsund	21	77(±2)	73	81	49	100	12
	Hopen	24	86(±2)	82	91	64	111	12
	Bjørnøya	26	96(±3)	91	101	71	129	16
Zima Winter	Svalbard Lufthavn	13	12(±1)	9	15	2	34	8
	Hornsund	15	14(±1)	11	17	3	37	8
	Hopen	14	13(±1)	10	15	4	32	7
	Bjørnøya	27	25(±2)	21	28	8	46	10
Wiosna Spring	Svalbard Lufthavn	21	19(±1)	17	21	2	30	6
	Hornsund	24	23(±1)	20	25	1	34	7
	Hopen	21	20(±1)	17	22	4	30	7
	Bjørnøya	35	32(±1)	30	35	20	46	7
Lato Summer	Svalbard Lufthavn	9	8(±1)	6	10	0	20	6
	Hornsund	14	13(±1)	10	15	1	31	7
	Hopen	29	27(±2)	23	31	6	54	11
	Bjørnøya	12	11(±1)	8	13	0	30	6
Jesień Autumn	Svalbard Lufthavn	26	23(±1)	21	26	10	36	7
	Hornsund	31	28(±1)	26	31	13	42	8
	Hopen	30	27(±1)	24	30	12	47	8
	Bjørnøya	31	28(±1)	26	31	11	45	7

Frq – częstość w procentach dni w, Śr – średnia liczba dni z Tmax>0°C i Tmin<0°C, BS – błąd standardowy, Min – minimum, Max – maksimum, OS – odchylenie standardowe

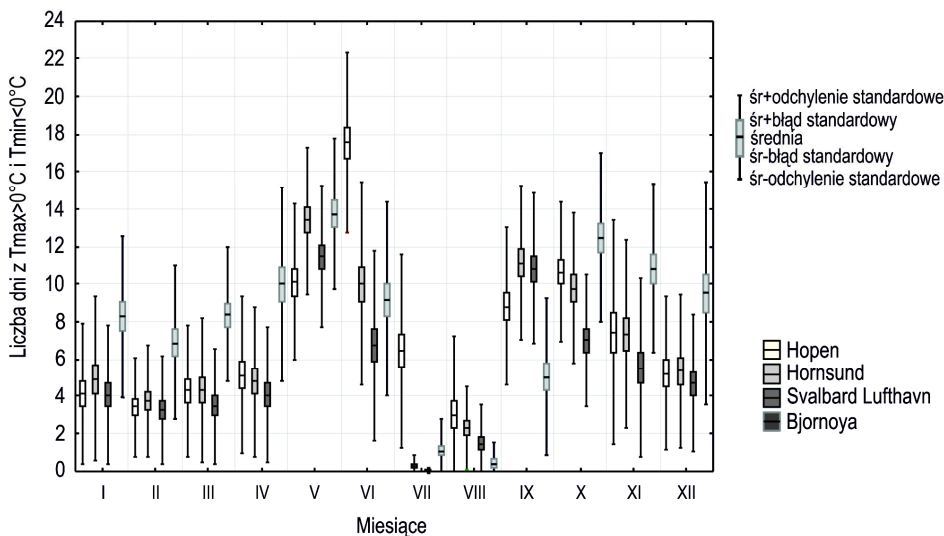
Frq – frequency in percentage of days in particular period (year, June – July, season), Śr – average number of days with freeze-thaw events, BS – standard error, Min – minimum, Max – maximum, OS – standard deviation

miało miejsce w 2000 roku. W Hornsundzie rozpatrywane dni notowano podczas 9 na 35 badanych lipców; miesięczna częstość tych dni zazwyczaj wynosiła 1 dzień, jedynie 1984 i 1996 roku osiągnęła 2 dni. Na stacji Hopen i Bjørnøya najmniej dni z Tmax>0°C i Tmin<0°C pojawia się w sierpniu. Na stacji Bjørnøya wystąpiły one podczas 27 z 67 badanych sierpni, z maksimum wynoszącym 10 dni w sierpniu 1965 roku. Na stacji Hopen rozpatrywane dni do roku 1990 pojawiały się niemal w każdym sierpniu (z wyjątkiem lat 1972 i 1981), zaś w okresie od 1990 do 2012 r. notowano je podczas 8 na 23 sierpień.

4. Tendencje występowania dni z przejściem temperatury przez 0°C

Najistotniejsze zmiany miesięcznych częstości występowania DT0 stwierdzono na stacji Hopen, gdzie wyznaczone trendy były statystycznie istotne dla 5 miesięcy, w większości przynależnych do cieplejszej części roku (maj, lipiec, sierpień, wrzesień) oraz w grudniu. Na tej stacji w lipcu, sierpniu oraz we wrześniu stwierdzono istotny spadek częstości występowania dni z Tmax>0°C i Tmin<0°C. W lipcu i sierpniu tendencje te dotyczyły zarówno całego okresu pomiarów instrumentalnych na Hopen jak i wielolecia 1979-2013, z kolei we wrześniu – wszystkich rozpatrywanych okresów. W lipcu spadek

częstości omawianych dni w całym okresie pomiarów instrumentalnych wynosił około -2 dni na 10 lat, zaś w okresie 1979–2013 osiągnął -3 dni na 10 lat. W sierpniu tempo spadku w okresie 1979–2013 było nieco mniejsze niż w lipcu, osiągając -2 dni na 10 lat. We wrześniu istotność statystyczna jak i wielkość trendów była mniejsza niż w lipcu i sierpniu. W miesiącu tym istotny spadek częstości występowania dni z przejściem temperatury przez 0°C , rzędu około 5 dni na 10 lat stwierdzono także w okresie 1995–2013. W Hopen w niektórych z rozpatrywanych okresów istotne zmiany badanej charakterystyki termicznej zachodziły także w maju i grudniu, przy czym kierunek tendencje te były wzrostowe (tab. 2).



Ryc. 1. Przebieg roczny średniej liczby dni z przejściem temperatury powietrza przez 0°C ($T_{\max}>0^{\circ}\text{C}$ i $T_{\min}<0^{\circ}\text{C}$) na wybranych stacjach w atlantyckim sektorze Arktyki w okresie 1979-2012

Fig. 1. Annual course of the number of days with freeze-thaw events ($T_{\max}>0^{\circ}\text{C}$ i $T_{\min}<0^{\circ}\text{C}$) at selected stations within the Atlantic sector of Arctic in the period 1979-2012.

Istotny statystycznie spadek liczby dni z $T_{\max}>0^{\circ}\text{C}$ i $T_{\min}<0^{\circ}\text{C}$ w cieplejszej części roku rozpoznano także na stacji Bjørnøya. We wrześniu tendencje te dotyczyły wszystkich uwzględnionych lat, a ich wielkość zmieniała się w zależności od wielolecia od około -1 dni na 10 lat do -3 dni na 10 lat (tab. 2). W lipcu i sierpniu istotne zmiany DT0, jednak o mniejszej istotności statystycznej i wielkości, stwierdzono w całym okresie pomiarów instrumentalnych, a w lipcu również w wieloleciu 1979-2012. Na stacji Bjørnøya w dwóch miesiącach zimowych (grudzień, styczeń) liczba dni, w których temperatura powietrza przekraczała 0°C istotnie wzrastała. W grudniu tendencję wzrostową rzędu około $+3$ dni na 10 lat stwierdzono w okresie 1979-2012. W styczniu wzrost częstości występowania omawianych dni wynosił około $+1,5$ dni na 10 lat, z kolei w okresie regularnych pomiarów instrumentalnych $+0,5$ dni na 10 lat.

Na stacji Svalbard Lufthavn oraz w Hornsundzie istotne tendencje dni z $T_{\max}>0^{\circ}\text{C}$ i $T_{\min}<0^{\circ}\text{C}$ stwierdzono przede wszystkim w czerwcu (wzrostowe) oraz grudniu (spadkowe). W czerwcu wielkość spadku częstości występowania tych dni była większa na stacji Svalbard Lufthavn niż w Hornsundzie, wynosząc odpowiednio około -3 dni na 10 lat oraz -2 dni na 10 lat w okresie 1979-2012. W grudniu

Tabela 2. Istotność statystyczna oraz wielkość trendów miesięcznej liczby dni z przejściem temperatury powietrza przez 0°C (Tmax>0°C i Tmin<0°C) na wybranych stacjach w okresie regularnych obserwacji instrumentalnych

Table 2. Statistical significance and magnitude of trends in the monthly number of days with freeze-thaw events at selected stations within the Atlantic sector of Arctic in the periods of regular meteorological measurements.

Miesiąc Month	Czas Period	Svalbard Lufthavn		Hornsund		Hopen		Bjørnøya	
		p	t/10yrs.	p	t/10yrs.	p	t/10yrs.	p	t/10yrs.
Styczeń January	a	0,039	0,5	0,096	1,6	0,375	0,2	0,047	0,5
	b	0,045	1,4	0,146	1,5	0,119	1,4	0,041	1,5
	c	0,106	2,9	0,092	4,2	0,191	2,1	0,790	0,4
Luty February	a	0,065	0,4	0,954	0,2	0,966	-0,1	0,987	-0,1
	b	0,916	0,3	0,964	0,1	0,600	-0,1	0,743	-0,2
	c	0,092	2,8	0,153	2,7	0,264	2,1	0,284	2,5
Marzec March	a	0,892	0,1	0,549	-0,4	0,794	-0,1	0,728	0,1
	b	0,178	-0,6	0,549	-0,2	0,858	-0,1	0,893	0,3
	c	0,728	-0,2	0,969	0,7	0,490	0,5	0,468	2,2
Kwiecień April	a	0,921	-0,1	0,087	1,2	0,773	0,1	0,290	0,5
	b	0,256	0,7	0,087	1,2	0,731	0,3	0,541	0,7
	c	0,702	0,7	0,671	0,4	0,619	0,6	0,118	3,8
Maj May	a	0,085	0,5	0,205	1,2	0,039	0,5	0,181	0,4
	b	0,088	1,2	0,205	1,2	0,051	1,4	0,447	0,6
	c	0,147	3,3	0,147	2,8	0,033	3,9	0,621	0,9
Czerwiec June	a	0,002	-1,3	0,045	-2,2	0,496	0,0	0,012	-0,9
	b	<0,000	-3,2	0,045	-2,2	0,400	-0,8	0,052	-1,8
	c	0,066	-3,3	0,287	-3,6	0,215	-1,8	0,360	-3,0
Lipiec July	a	0,353	0,0	0,694	0,0	<0,0001	-1,8	0,004	-0,5
	b	0,683	0,0	0,984	0,0	0,000	-3,2	0,010	-0,7
	c	0,563	-0,1	0,625	-0,2	0,055	-4,5	0,435	-0,3
Sierpień August	a	0,104	-0,2	0,099	-0,6	<0,0001	-1,7	0,000	-0,3
	b	0,082	-0,7	0,061	-0,6	0,001	-2,1	0,156	-0,3
	c	0,514	-0,7	0,155	-0,9	0,439	-1,8	0,725	-0,1
Wrzesień September	a	0,097	-0,6	0,116	-1,2	0,001	-1,0	0,006	-0,8
	b	0,475	-0,6	0,118	-1,3	0,026	-1,6	0,004	-1,9
	c	0,879	-1,4	0,022	-5,0	0,023	-4,8	0,012	-3,0
Październik October	a	0,843	-0,2	0,283	0,8	0,909	-0,1	0,676	-0,1
	b	0,429	0,6	0,210	1,0	0,474	0,4	0,953	0,2
	c	1,000	-0,1	0,267	2,2	0,078	2,6	0,704	1,7
Listopad November	a	0,706	0,3	0,316	0,9	0,936	0,1	0,194	0,4
	b	0,194	0,9	0,256	1,0	0,084	2,1	0,084	1,6
	c	0,760	0,2	0,514	-0,5	0,732	-0,4	0,909	0,2
Grudzień December	a	0,007	0,7	0,001	1,8	0,294	0,1	0,391	0,3
	b	0,004	1,3	0,001	1,9	0,000	2,1	0,001	2,9
	c	0,207	1,9	0,033	3,2	0,117	2,4	0,057	5,0

Czas analizy trendów: a – cały dostępny okres dla poszczególnych stacji, b – 1979-2012, c – 1995-2012, p – poziom istotności statystycznej wyznaczony wg testu Mann-Kendalla, t – wielkość trendu wyznaczona metodą najmniejszych kwadratów, wartości pogrubione są istotne na poziomie $\alpha \leq 0.05$

Periods of trends analysis: a – all available data at particular stations, b – 1979-2012, c – 1995-2012, p – level of statistical significance calculated with Mann-Kendall test, t – trend magnitude calculated with the method of least squares, bolded values are significant at $\alpha \leq 0.05$.

wzrost liczby dni z przejściem temperatury powietrza przez 0°C był z kolei nieco większy w Hornsundzie niż na stacji Svalbard Lufthavn (tab. 2). Na stacji Svalbard Lufthavn podobne zmiany częstotliwości

występowania DT0 zachodziły w styczniu (+1,4 dnia na 10 lat w okresie 1979-2012). W Hornsundzie istotną okazała się również spadkowa tendencja dni z $T_{max}>0^{\circ}\text{C}$ i $T_{min}<0^{\circ}\text{C}$ we wrześniu w okresie 1995-2012, czyli w okresie silnego ocieplenia Arktyki.

Tendencje częstości występowania dni z $T_{max}>0^{\circ}\text{C}$ i $T_{min}<0^{\circ}\text{C}$ w poszczególnych sezonach są wypadkową zmian zaznaczających się w poszczególnych miesiącach roku. Na wszystkich stacjach istotne zmiany częstości tych dni zachodziły przede wszystkim w sezonie letnim. Najistotniejsze tendencje malejące stwierdzono na stacji Svalbard Lufthavn, a następnie Hopen, gdzie wielkość spadku w okresie 1979-2012 osiągnęła odpowiednio około -4 dni na 10 lat oraz -6 dni na 10 lat. Statystycznie istotne były również tendencje wyznaczone dla całego okresu obserwacji instrumentalnych na poszczególnych stacjach.

Na wszystkich stacjach w niektórych z rozpatrywanych okresów istotne były również wzrostowe trendy DT0 w zimie. Najtrwalsze zmiany, potwierdzone istotnymi trendami we wszystkich rozpatrywanych wieloletniach stwierdzono na stacji Svalbard Lufthavn (tab. 3). Jesienią i wiosną frekwencja dni z przejściem temperatury przez 0°C nie podlegała istotnym zmianom.

Tabela 3. Istotność statystyczna oraz wielkość trendów rocznej i sezonowej liczby dni z przejściem temperatury powietrza przez 0°C ($T_{max}>0^{\circ}\text{C}$ i $T_{min}<0^{\circ}\text{C}$) na wybranych stacjach w okresie regularnych obserwacji instrumentalnych

Table 3. Statistical significance and magnitude of trends in the annual and seasonal numbers of days with freeze-thaw events at selected stations within the Atlantic sector of Arctic the periods of regular meteorological measurements.

Okres roku Period	Czas Time	Svalbard Lufthavn		Hornsund		Hopen		Bjørnøya	
		p	t/10yrs.	p	t/10yrs.	p	t/10yrs.	p	t/10yrs.
Rok Year	a	0,548	0,1	0,070	3,6	0,001	-3,6	0,577	-0,7
	b	0,624	1,2	0,047	3,6	1,000	-0,2	0,197	2,9
	c	0,448	6,1	0,138	6,2	0,765	1,1	0,081	10,3
Zima Winter DJF	a	0,007	1,8	0,038	3,5	0,581	0,2	0,308	0,7
	b	0,016	2,9	0,082	3,2	0,007	3,4	0,022	4,0
	c	0,036	6,9	0,069	8,6	0,069	6,1	0,160	7,2
Wiosna Spring MAM	a	0,444	0,5	0,098	2,2	0,165	0,5	0,091	0,9
	b	0,624	1,2	0,098	2,2	0,228	1,6	0,218	1,7
	c	0,196	3,8	0,138	3,9	0,159	5,0	0,081	6,9
Lato Summer JJA	a	0,001	-1,5	0,047	-2,9	<0,0001	-3,4	0,001	-1,7
	b	<0,000	-3,9	0,047	-2,9	0,003	-6,1	0,009	-2,9
	c	0,055	-4,0	0,304	-4,7	0,095	-8,0	0,358	-3,4
Jesień Autumn SON	a	0,496	-0,5	0,658	0,5	0,151	-0,9	0,435	-0,5
	b	0,571	0,9	0,571	0,7	0,467	0,9	0,858	-0,1
	c	0,731	-1,2	0,732	-3,7	0,704	-2,6	0,494	-1,1

Czas analizy trendów: a – cały dostępny okres dla poszczególnych stacji, b – 1979-2012, c – 1995-2012, p – poziom istotności statystycznej wyznaczony wg testu Mann-Kendalla, t – wielkość trendu wyznaczona metodą najmniejszych kwadratów, wartości pogrubione są istotne na poziomie $\alpha \leq 0.05$

Periods of trends analysis: a – all available data at particular stations, b – 1979-2012, c – 1995-2012, p – level of statistical significance calculated with Mann-Kendall test, t – trend magnitude calculated with the method of least squares, bolded values are significant at $\alpha \leq 0.05$.

Analiza trendów wykonana dla okresu drastycznego ocieplenia w Arktyce, które zdaniem Przybyłaka (2007) rozpoczęło się w 1995 r. nie wykazała istnienia wyraźnych zmian częstości występowania dni z $T_{max}>0^{\circ}\text{C}$ i $T_{min}<0^{\circ}\text{C}$ na badanych stacjach reprezentujących atlantycki sektor Arktyki.

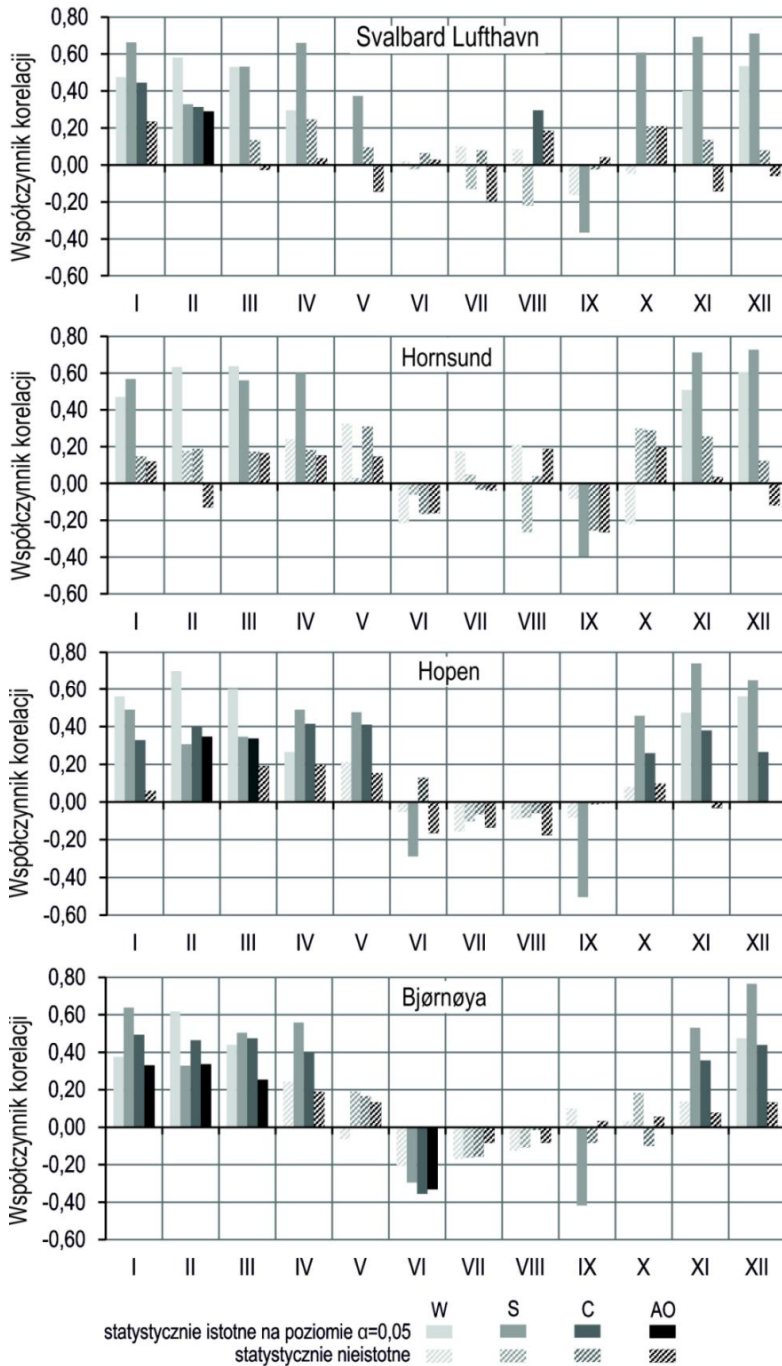
Niemniej jednak w przypadku większości miesięcy i sezonów wielkość trendów w okresie tym była największa (tab. 2 i 3). W przypadku wartości miesięcznych, istotne statystycznie trendy DT0 w okresie 1995-2013 na większości stacji stwierdzono tylko we wrześniu, na stacji Hopen w maju i na stacji Hornsund w grudniu. Istotne zmiany wartości sezonowych w okresie tym zachodziły jedynie na stacji Svalbard Lufthavn w zimie (tab. 2 i 3).

5. Zależności pomiędzy wieloletnią zmiennością występowania dni z przejściem temperatury przez 0°C i wskaźnikami cyrkulacji atmosfery

Na wszystkich rozpatrywanych stacjach najczęściej statystycznie istotne są korelacje pomiędzy miesięczną liczbą dni z $T_{max}>0^{\circ}\text{C}$ i $T_{min}<0^{\circ}\text{C}$ oraz wskaźnikiem S. Współczynniki korelacji w miesiącach od października do maja są dodatnie, co oznacza iż napływ powietrza z południa w miesiącach tych powoduje wzrost częstości występowania DT0. Adwekcja powietrza z południa w cieplejszej części roku powoduje z kolei spadek częstości ich pojawiania się, szczególnie w czerwcu i wrześniu, kiedy zależności te są statystycznie istotne (ryc. 2). Wskaźnik S ma istotny wpływ na częstość występowania rozpatrywanych dni niemal w ciągu całego roku na stacji Hopen (10 miesięcy), z kolei podczas połowy roku na stacji Hornsund (6 miesięcy). Na stacji Svalbard Lufthavn i Bjørnøya związki korelacyjne pomiędzy omawianymi zmiennymi były istotne odpowiednio dla 9 oraz 8 miesięcy (ryc. 2).

Znaczący wpływ pozostałych wskaźników cyrkulacji (W, C i AO) na występowanie dni z $T_{max}>0^{\circ}\text{C}$ i $T_{min}<0^{\circ}\text{C}$ obejmuje już mniejszą część roku (miesiące) i zmienia się w zależności od stacji. Na wyspie Hopen cyrkulacja atmosfery najdłużej w ciągu roku determinuje pojawianie się dni z przejściem temperatury powietrza przez 0°C ; zależności te trwają najkrócej i są równocześnie najsłabsze na stacji Hornsund. W początkowych miesiącach roku, to jest – w zależności od stacji – w styczniu, lutym i/lub marcu, związki korelacyjne pomiędzy DT0 i wskaźnikiem cyrkulacji W są silniejsze niż pomiędzy DT0 i wskaźnikiem S. W pozostałych miesiącach roku wskaźnik W silniej determinuje częstość występowania DT0 niż wskaźnik S.

Na stacjach Hopen oraz Bjørnøya drugorzędny (po wskaźniku S) wpływ na występowanie dni z $T_{max}>0^{\circ}\text{C}$ i $T_{min}<0^{\circ}\text{C}$ ma wskaźnik cykloniczności. Zależności korelacyjne między tym wskaźnikiem i rozpatrywaną zmienną są statystycznie istotne w ciągu ośmiu miesięcy – od października do maja – na stacji Hopen i podczas siedmiu miesięcy – od listopada do czerwca, z wyjątkiem maja – na stacji Bjørnøya. W zdecydowanej większości miesięcy, z wyjątkiem maja na stacji Bjørnøya, wzrost częstości występowania cyklonalnych typów cyrkulacji sprzyja występowaniu DT0. Na stacji Svalbard Lufthavn omawiane relacje są istotne tylko podczas 3 miesięcy w roku (styczeń, luty i sierpień), z kolei w Hornsundzie wskaźnik cykloniczności w ogóle nie decyduje o występowaniu dni z $T_{max}>0^{\circ}\text{C}$ i $T_{min}<0^{\circ}\text{C}$ (ryc. 2). Na stacjach tych (Hornsund i Svalbard Lufthavn) drugorzędny wpływ na występowanie DT0 ma, z kolei wskaźnik W, który determinuje występowanie tych dni przez około pół roku – 6 miesięcy na stacji Svalbard Lufthavn (od listopada do kwietnia) i 5 miesięcy na stacji Hornsund (od listopada do marca). Związki pomiędzy DT0 i wskaźnikiem cyrkulacji W kształtują się podobnie na stacji Hopen, gdzie istotne korelacje stwierdzono w ciągu 6 miesięcy – od listopada do kwietnia. Na stacji Bjørnøya relacje te były znaczące już tylko podczas 4 miesięcy – od grudnia do marca. W każdym przypadku wzmocnienie cyrkulacji zachodniej powoduje wzrost częstości występowania dni z przejściem temperatury przez 0°C .

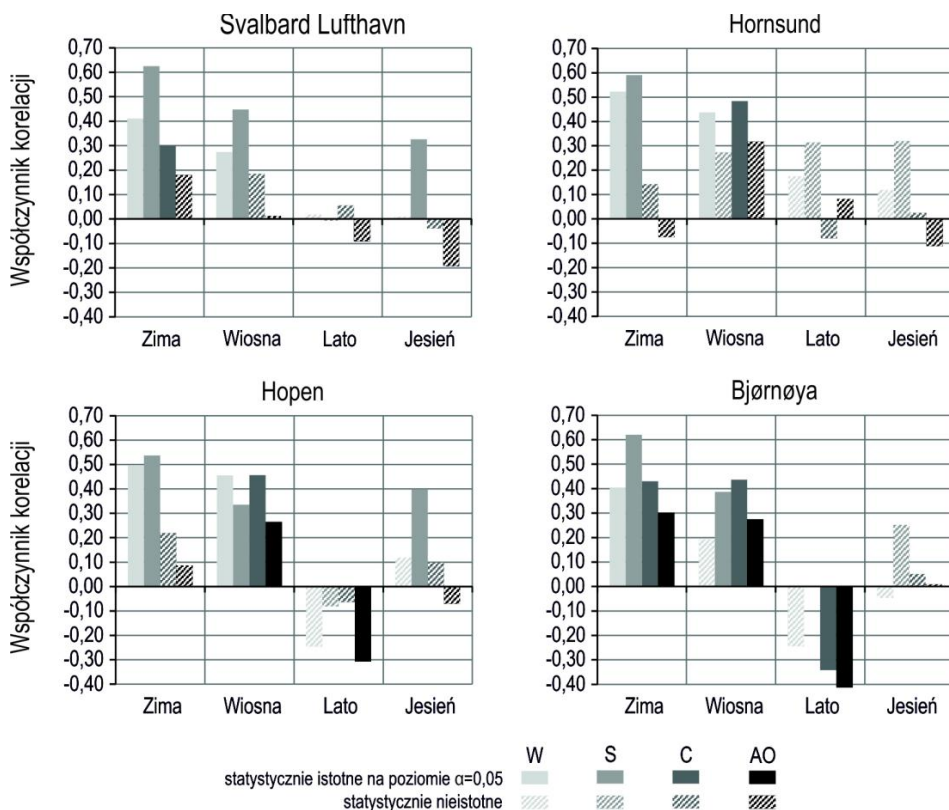


Ryc. 2. Współczynniki korelacji pomiędzy miesięczną liczbą dni z przejściem temperatury przez 0°C (Tmax>0°C i Tmin<0°C) wskaźnikami cyrkulacji atmosfery: W, S, C i AO

Fig. 2. Correlation coefficients between the monthly number of days with freeze-thaw events (Tmax>0°C i Tmin<0°C) and circulation indices: W, S, C and AO.

Na rozpatrywanych stacjach reprezentujących atlantycki sektor Arktyki zależności pomiędzy występowaniem dni z $T_{max}>0^{\circ}\text{C}$ i $T_{min}<0^{\circ}\text{C}$ i regionalnymi wskaźnikami cyrkulacji są znacznie silniejsze niż relacje występowania tych dni z makroskalowym wskaźnikiem AO. W Hornsundzie wskaźnik AO nie ma związku z występowaniem DT0, w Hopen i na stacji Svalbard Lufthavn zależności są istotne tylko w lutym. Jedynie na stacji Bjørnøya położonej w najniższych szerokościach geograficznych w stosunku do pozostałych stacji, korelacje pomiędzy DT0 i AO są statystycznie istotne od stycznia do marca (dodatnie współczynniki korelacji) oraz w czerwcu (ujemny współczynnik korelacji). Znaki przy współczynnikach korelacji wskazują, iż w miesiącach zimowych z cyrkulacją zachodnią związany jest wzrost, z kolei w czerwcu spadek częstości występowania DT0.

Zależności pomiędzy występowaniem dni z $T_{max}>0^{\circ}\text{C}$ i $T_{min}<0^{\circ}\text{C}$ i cyrkulacją atmosferyczną w ujęciu sezonowym są zróżnicowane w zależności od stacji (ryc. 3). Na większości stacji, z wyjątkiem Hornsundu cyrkulacja z południa determinuje częstość występowania DT0 w większości sezonów z wyjątkiem lata. Związki te najsilniejsze są zimą. Wskaźnik cyrkulacji zachodniej determinuje występowanie DT0 zimą i wiosną. Jedynie na stacji Bjørnøya jego znaczenie ogranicza się do zimy. Zarówno



Ryc. 3. Współczynniki korelacji pomiędzy sezonową liczbą dni z przejściem temperatury przez 0°C ($T_{max}>0^{\circ}\text{C}$ i $T_{min}<0^{\circ}\text{C}$) i wskaźnikami cyrkulacji atmosfery (wskaźniki: W, S, C i AO)

Fig. 3. Correlation coefficients between the annual and seasonal numbers of days with freeze-thaw events ($T_{max}>0^{\circ}\text{C}$ i $T_{min}<0^{\circ}\text{C}$) and circulation indices: W, S, C and AO.

napływ powietrza z południa jak i ze wschodu sprzyja występowaniu dni z przejściem temperatury przez 0°C . Częstość występowania układów niżowych wykazuje związek z możliwością przejścia temperatury powietrza przez 0°C tylko w jednym sezonie w ciągu roku – w Hopen i w Hornsundzie (wiosną), oraz na stacji Svalbard Lufthavn (zimą). Jedynie na stacji Bjørnøya współczynniki korelacji pomiędzy wskaźnikiem cyrkulacji C i DT0 są statystycznie istotne zimą, wiosną i latem. Na stacji tej w tych samych porach roku wpływ na występowanie DT0 posiada również wskaźnik AO. W przypadku obydwu wskaźników zimą i wiosną współczynniki korelacji są dodatnie, z kolei latem ujemne. Wskaźnik AO wykazuje istotny wpływ na występowanie DT0 także na stacji Hopen wiosną i latem. Roczna liczba dni z $T_{\text{max}} > 0^{\circ}\text{C}$ i $T_{\text{min}} < 0^{\circ}\text{C}$ jest determinowana wyłącznie przez wskaźnik S na stacjach Svalbard Lufthavn i Bjørnøya.

6. Podsumowanie i wnioski

W opracowaniu omówiono przebieg roczny występowania dni z przejściem temperatury powietrza przez 0°C (DT0), ich tendencje oraz związki ich występowania z cyrkulacją atmosfery wyrażoną za pomocą wskaźników regionalnych T. Niedźwiedzia (W, S, C) oraz wskaźnika cyrkulacji makroskalowej AO. Dni z $T_{\text{max}} > 0^{\circ}\text{C}$ i $T_{\text{min}} < 0^{\circ}\text{C}$ wyselekcjonowano na podstawie temperatury dobowej maksymalnej i minimalnej w okresie obserwacji instrumentalnych na poszczególnych stacjach.

Dni z przejściem temperatury przez 0°C uważane są za istotny wskaźnik współczesnych zmian klimatu, przejawiających się najwyraźniej szybką zmianą temperatury powietrza. Na rozpatrywanych stacjach w atlantyckim sektorze Arktyki średnio w roku pojawia się od około 63 dni (Svalbard Lufthavn) do 96 dni (Bjørnøya) z $T_{\text{max}} > 0^{\circ}\text{C}$ i $T_{\text{min}} < 0^{\circ}\text{C}$. Występują one w ciągu całego roku, lecz najczęściej notowane są jesienią (Svalbard Lufthavn, Hornsund, Hopen) lub wiosną (Bjørnøya), zaś najrzadziej latem (Svalbard Lufthavn, Hornsund, Bjørnøya) lub zimą (Hopen). Przebieg roczny częstości występowania DT0 ma charakter bimodalny z pierwszorzędym maksimum w maju (Svalbard Lufthavn, Hornsund, Bjørnøya) lub czerwcu (Hopen), a drugorzędym w październiku.

Najwyraźniejsze zmiany częstości występowania dni z $T_{\text{max}} > 0^{\circ}\text{C}$ i $T_{\text{min}} < 0^{\circ}\text{C}$ stwierdzono na stacji Hopen i Bjørnøya, głównie w miesiącach przynależnych do cieplejszej części roku, czyli w lipcu, sierpniu oraz wrześniu. W miesiącach tych częstość występowania DT0 malała. Na stacji Svalbard Lufthavn oraz w Hornsundzie istotny spadek częstości występowania DT0 stwierdzono w czerwcu. W miesiącach przynależnych do chłodniejszej części roku istotne były tendencje wzrostowe liczby dni z $T_{\text{max}} > 0^{\circ}\text{C}$ i $T_{\text{min}} < 0^{\circ}\text{C}$ w grudniu, a na stacji Svalbard Lufthavn i Bjørnøya także w styczniu. W okresie wyraźnego wzrostu średniej temperatury powietrza w Arktyce, przypadającego na okres od 1995 roku, nie stwierdzono istotnych statystycznie trendów częstości występowania DT0. Trendy DT0 obliczone dla okresu 1995-2012 były statystycznie istotne jedynie we wrześniu, a na pojedynczych stacjach także w maju i grudniu. Warto jednak zauważyć, iż współczynniki kierunkowe trendów DT0 dla tego wielolecia osiągały najwyższe wartości w porównaniu ze współczynnikami dla pozostałych analizowanych okresów.

Zmiany występowania dni z $T_{\text{max}} > 0^{\circ}\text{C}$ i $T_{\text{min}} < 0^{\circ}\text{C}$ są istotnie związane z cyrkulacją atmosfery. Na rozpatrywanych stacjach największy wpływ na częstość występowania DT0 posiada wskaźnik S, który determinuje zmiany występowania tych dni w większości sezonów i miesięcy z wyjątkiem lata. W początkowych miesiącach roku częstość występowania DT0 wykazuje znaczący związek z napływem powietrza z zachodu (wskaźnik W). Wskaźnik cykloniczności determinuje występowanie DT0

przede wszystkim na stacjach Hopen i Bjørnøya. Oddziaływanie cyrkulacji makroskalowej (wskaźnik AO) na czasowe zmiany częstości występowania DT0 ogranicza się do stacji Bjørnøya w przypadku wartości miesięcznych, zaś w przypadku wartości sezonowych obejmuje także stację Hopen. Statystycznie istotne współczynniki korelacji w miesiącach z cieplejszej części roku, to jest od czerwca do września, posiadają znak ujemny, z kolei w pozostałych miesiącach roku są dodatnie. Istotnie statystycznie spadkowe tendencje częstości występowania DT0 w cieplejszej części roku, głównie we wrześniu, mogą być związane z nasileniem przepływu północnego na rzecz osłabienia przepływu południowego. Jednak najistotniejsze zmiany częstości występowania dni z $T_{max} > 0^{\circ}\text{C}$ i $T_{min} < 0^{\circ}\text{C}$ na rozpatrywanych stacjach zachodziły w miesiącach, w których związki występowania DT0 z cyrkulacją atmosfery nie mają znaczenia z punktu widzenia statystyki. Skłania to do założenia, iż w miesiącach tych znaczenie cyrkulacji atmosfery jako czynnika sterującego występowaniem DT0 jest mniejsze, co wymaga badań z uwzględnieniem pozostałych czynników klimatotwórczych, a przede wszystkim czynników radiacyjnych.

Literatura

- Bednorz E., 2011. Occurrence of winter air temperature extremes in Central Spitsbergen. *Theoretical and Applied Climatology*, 106 (3-4): 547-556.
- Førland E.J., Hanssen-Bauer I., 2003. Past and future climate variations in the Norwegian Arctic: overview and novel analyses. *Polar Research*, 22 (2): 113-124.
- Glickman T.S. (red.), 2000. *Glossary of Meteorology*. Second Edition. American Meteorological Society, Boston Massachusetts, USA: 855 s.
- Hess M., 1965. Piętra klimatyczne w polskich Karpatach Zachodnich. *Zeszyty Naukowe UJ, Prace Geograficzne*, 11: 1-258.
- 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).
- Instytut Geofizyki PAN, 2009-2013. *Biuletyn meteorologiczny – Spitsbergen – Hornsund 2009.10-2013.03* (dostępne na stronie internetowej: www.glacio-topoclim.org/index.php/reports).
- Klein Tank A.M.G., Wijngaard J.B., Können G.P., Böhm R. i in., 2002. Daily dataset of 20th-century surface air temperature and precipitation series for the European Climate Assessment. *International Journal of Climatology*, 22 (12): 1441-1453. Data and metadata available at <http://www.ecad.eu>
- Łupikasza E., Malarzewski Ł., Niedźwiedź T., 2012. Wpływ cyrkulacji atmosfery na występowanie dni z przejściem temperatury przez 0°C w Hornsundzie (Spitsbergen). *Problemy Klimatologii Polarnej*, 22: 5-16.
- Łupikasza E., Niedźwiedź T., 2013. Frequency of ice days at selected meteorological stations in Svalbard. *Bulletin of Geography – Physical Geography Series No 6/2013*: 80-97.
- Marsz A.A., Styszyńska A. (red.), 2007. *Klimat Rejonu Polskiej Stacji Polamej w Hornsundzie – stan, zmiany i ich przyczyny*. Wydawnictwo Akademii Morskiej w Gdyni: 376 s.
- Marsz A.A., 2013. Air temperature, chapter 9. [w:] Marsz A.A., Styszyńska A. (red.), *Climate and climate change at Hornsund, Svalbard*. Maritime University, Gdynia: 145-187.
- Marsz A.A., Styszyńska A. (red.), 2013. *Climate and climate change at Hornsund, Svalbard*. Maritime University, Gdynia: 402 s.

- Miętus M. (red.), 2000-2001. Roczniki Meteorologiczne Hornsund (1978/79-1980/81, 1982/83-1999/2000). Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej Oddział Morski, Gdynia.
- Niedźwiedz T. (red.), 2003. Słownik Meteorologiczny. Polskie Towarzystwo Geofizyczne, IMGW. Warszawa: 495 s.
- Niedźwiedz 2013a. The atmospheric circulation, chapter 4 [w:] Marsz A.A., Styszyńska A. (red.), Climate and climate change at Hornsund, Svalbard. Maritime University, Gdynia: 57-74
- Niedźwiedz T., 2013b. Katalog typów cyrkulacji nad Spitsbergenem (1951-2012). Zbiór komputerowy (Katedra Klimatologii, Wydział Nauk o Ziemi Uniwersytetu Śląskiego, Sosnowiec (<http://klimat.wnoz.us.edu.pl>)).
- Niedźwiedz T., Łupikasza E., Malarzewski Ł., 2012. Wpływ cyrkulacji atmosfery na występowanie dni mroźnych w Hornsundzie (Spitsbergen). Problemy Klimatologii Polarnej, 22: 17-26.
- Nordli P.Ø., 2005. Long-term temperature trends and variability at Svalbard (1911-2004). Geophysical Research Abstracts, 7(06939), SRef-ID: 1607-7962/gra/EGU05-A-06939.
- Przybylak R., 2007. Recent air-temperature changes in the Arctic. Annales of Glaciology, 46: 316-324.
- Serreze M.C., Francis J.A., 2006. The Arctic amplification debate. Climatic Change, 76: 241-264.
- Thompson D.W.J., Wallace J.M., 1998. The Arctic Oscillation signature in the wintertime geopotential height and temperature fields. Geophysical Research Letters, 25 (9): 1297-1300.
- Ustrnul Z., 1987. Some characteristics of air thermal conditions in Hornsund, Spitsbergen. Polish Polar Research 8 (3): 261-275.
- Valor G.B., 2013. OGIMET – Professional information about meteorological conditions in the world (SYNOP messages available on-line on the web site: <http://www.ogimet.com>). Last access 17 August 2013.

Wpłynęło: 26 listopada 2013 r., poprawiono: 3 grudnia 2013 r., zaakceptowano: 5 grudnia 2013 r.

Summary

This study aims at determining the occurrence of days with freeze-thaw events at selected meteorological stations (Svalbard Lufthavn, Hornsund, Hopen, Bjørnøya) representing the Atlantic sector of the Arctic, recognizing the trends in the frequency of these days and their relation to atmospheric circulation. The days with freeze-thaw events (TD0) were selected on the basis of daily minimum and maximum air-temperature during the period of regular instrumental measurements conducted at particular stations – Hopen: November 1946 – March 2013, Bjørnøya: January 1946 – March 2013, Svalbard Lufthavn: January 1957 – March 2013, Hornsund: July 1978 – March 2013.

Basic descriptive statistics were used to investigate the annual course of the days with freeze-thaw events ($T_{max} > 0^{\circ}\text{C}$ and $T_{min} < 0^{\circ}\text{C}$) occurrence in the period 1979-2012 which allowed the comparison of the statistics between the stations. Statistical significance of trends were checked with Mann-Kendall test whereas the trends magnitudes were calculated with the least square method and expressed as a change in the number of days per 10 years. Spearman correlation coefficients were calculated to assess the relations between the TD0 occurrence and atmospheric circulation. Three local circulation indices (S index, W index, C index) and one macroscale circulation index (AO index) were taken into consideration. Statistical significance level of 0.05 was used for both trends and correlations coefficients. The trends were calculated for three various periods: the period of regular instrumental measurements – various at particular stations, the period 1979-2012 – common for all

stations analysed and 1995-2012 which is the period of dramatic warming of the Arctic (Przybylak 2007). The investigations were conducted from monthly, seasonal (winter – Dec, Jan, Feb; spring – Mar, Apr, May; summer – Jun, Jul, Aug; autumn – Sep, Oct, Nov) and annual perspective. Days with freeze-thaw events are considered as an indicator of current climate change primarily manifesting in the rapid increase of air-temperature. The average annual number of days with freeze-thaw events varied depending on station from 63 days to 96 days in the period of 1979-2012. These days occurred during the whole year with the maximum in autumn (Svalbard Lufthavn, Hornsund and Hopen) or spring (Bjørnøya) and the minimum in summer (Svalbard Lufthavn, Hornsund, Bjørnøya) or winter (Hopen). The annual course of the number of days with freeze-thaw events is bimodal with the first rate maximum in May (Svalbard Lufthavn, Hornsund, Bjørnøya) or June (Hopen) and the secondary maximum in October. The clearest changes (increase) in the frequency of DT0 occurrence were found in Hopen and Bjørnøya in the months belonging to the warmer part of a year – July, August, September. In Svalbard Lufthavn and Hornsund significant increase in the frequency of DT0 was detected in June. In December increasing trends in the DT0 occurrence were significant which also applies to January DT0 trends at both Longyearbyen and Bjørnøya stations. Dramatic increase of the air-temperature in the Arctic which began in the middle of the nineties has not influenced the frequency of days with freeze-thaw events – the trends calculated for the period of 1995-2012 were significant only in September and sporadically (single stations) in May and December.

The long-term variability in the number of days with freeze-thaw events was significantly related to atmospheric circulation. The occurrence of such days was most influenced by the S circulation index, which determined the frequency of DT0 in majority of months and seasons despite summer. At the beginning of a year (February – March) the frequency of DT0 depended most on the flow of air from west (W circulation index). The cyclonicity index (C index) affected the number of DT0 at Hopen and Bjørnøya stations. The impact of macroscale circulation (AO index) on the variability of DT0 was limited to Bjørnøya station in the case of monthly values and covered Hopen station in the case of seasonal values. Statistically significant correlation coefficients calculated for the warmer part of a year (from June to September) were positive and were negative for the rest months. Significant decrease of the DT0 frequency in September might be related to the strengthening of the northern flow.

Key words: freeze-thaw events, Arctic, trends in the days with freeze-thaw events, atmospheric circulation, circulation indices, AO.