

Rola cyrkulacji atmosfery w kształtowaniu wielkości zachmurzenia ogólnego na Spitsbergenie (1983-2013)

*The role of atmospheric circulation in shaping total cloudiness
over Spitsbergen (1983-2013)*

OSKAR LIPIŃSKI, EWA ŁUPIKASZA

Wydział Nauk o Ziemi, Uniwersytet Śląski,
41-200 Sosnowiec, ul. Będzińska 60; oskar.lipinski18@gmail.com

Zarys treści. W pracy omówiono wielkość zachmurzenia w relacji z typami cyrkulacji atmosfery dla wybranych stacji meteorologicznych na Spitsbergenie. Materiał badawczy stanowiły średnie dobowe wartości zachmurzenia z trzech stacji meteorologicznych: Ny-Ålesund, Svalbard Lufthavn i Hornsund. Analiza objęła 31-letni okres obserwacji (1983-2013). Obliczono średnie, maksymalne oraz minimalne wielkości zachmurzenia w poszczególnych typach cyrkulacji. Uwzględniono również dni o charakterystycznym zachmurzeniu (bezczmurne, pogodne, pochmurne oraz z całkowitym zachmurzeniem) i zbadano prawdopodobieństwo warunkowe ich wystąpienia. Przeprowadzona analiza wykazała, że w kształtowaniu wielkości zachmurzenia na Spitsbergenie ważną rolę odgrywa nie tylko charakter układu, ale przede wszystkim kierunek adwekcji mas powietrza. Pomimo niewielkich odległości dzielących rozpatrywane stacje, badany obszar cechuje się znacznym zróżnicowaniem wielkości zachmurzenia i liczby dni charakterystycznych w ciągu roku oraz w zdefiniowanych sezonach.

Słowa kluczowe: wielkość zachmurzenia, cyrkulacja atmosfery, Spitsbergen, Arktyka.

Wstęp

Wzrost temperatury powietrza, zmniejszenie zasięgu lodu morskiego, czy niezwykle labilny obraz pola barycznego, mogą mieć znaczący wpływ na wielkość pokrycia nieba przez chmury w Arktyce. Zachmurzenie jest jednym z nielicznych elementów meteorologicznych, który ocenia się wizualnie. Określa nie tylko obecny stan atmosfery, ale może również zwiastować jego postępującą zmianę. Chmury mogą ulegać licznym modyfikacjom, istotnie wpływając na bilans radiacyjny Ziemi oraz atmosfery, a w następstwie tego oddziaływać na warunki termiczne



(IPCC, 2007; Przybylak, 2007; Vavrus i inni, 2011; Matuszko i Soroka, 2013; Bednorz i inni, 2016). Zachmurzenie, poprzez zmianę ilości energii słonecznej docierającej do Ziemi, ma również wpływ na samopoczucie człowieka (Araźny, 2008). Zmienność zachmurzenia odgrywa, podstawową rolę w kształtowaniu usłonecznienia a także innych elementów klimatu – temperatury powietrza, sumy opadów i widzialności poziomej (Marsz, 2013). Ponadto, wiedza na temat zachmurzenia oraz powiązanych z nim opadów atmosferycznych, stanowi podstawę do zrozumienia bilansu lodowców (Turner i Gareth, 2011). Obecnie obserwuje się zmniejszanie zasięgu lodu morskiego (Meier i inni, 2011; Polyakov i inni, 2012; Stroeve i inni, 2012), co jak wskazują badania modelowe będzie miało znaczący wpływ na zachmurzenie tego obszaru (Schweiger i inni, 1992; Schweiger, 2004; Kay i Gettelman, 2009; Eastman i Warren, 2010; Palm i inni, 2010). Współcześni badacze przypisują chmurom rolę jednego z głównych wskaźników zmian klimatu (Webber, 1994), zatem jest potrzeba ich wnikliwego badania.

Głównym celem niniejszego opracowania jest określenie wpływu cyrkulacji atmosferycznej na wielkość zachmurzenia ogólnego na Spitsbergenie, największej wyspie arktycznego archipelagu Svalbard. Położenie tej wyspy w centrum atlantyckiego sektora Arktyki skutkuje wzmożoną dynamiką zmian warunków pogodowych, których kształtowanie się podlega określonym sytuacjom synoptycznym. Charakterystyczną cechą cyrkulacji atmosfery nad Spitsbergenem jest wzmożona aktywność cyklonalna, uwarunkowana położeniem wyspy w pobliżu frontu arktycznego (Niedźwiedz, 2006). Poza procesami związanymi z napływem powietrza z różnych kierunków, na zróżnicowanie wielkości pokrycia nieba przez chmury wpływają uwarunkowania lokalne: urozmaicona rzeźba terenu oraz obecność ciepłego Prądu Zachodniospitsbergeńskiego u zachodnich wybrzeży archipelagu.

Dotychczas powstało kilka monografi poświęconych problematyce zachmurzenia w obszarach polarnych, jednak w dalszym ciągu jest to element słabo rozpoznany. Analizę zachmurzenia ogólnego nad Arktyką lub jej wybranymi obszarami przeprowadzili m.in. W.E. Raatz (1981), J.A. Beesley i R.E. Mortiz (1999), R. Przybylak (2003), A.A. Marsz i inni (2013). D. Matuszko i J. Soroka (2013) wykonali ilościową i jakościową analizę zachmurzenia w Hornsundzie oraz określili średnią roczną wielkość zachmurzenia w zależności od typów cyrkulacji w okresie od 1.07.2009 do 30.06.2012. Badano również rolę chmur w kształtowaniu warunków insolacyjnych (Vowinckel i Orvig, 1962; Curry i inni, 1996) oraz ich wpływ na zmiany zasięgu lodu morskiego (Liu i inni, 2007; Kay i Gettelman, 2009; Eastman i Warren, 2010). J. Soroka i D. Matuszko (2013) zwrócili uwagę na specyfikę prowadzenia obserwacji zachmurzenia w obszarach polarnych, m.in. słabą widzialność w trakcie nocy polarnej, obniżoną tropopauzę oraz problemy wynikające z ograniczenia zapisu rodzaju chmur w postaci depeszy SYNOP. Powstało także opracowanie dotyczące analizy pokrycia nieba przez chmury nad Svalbardem przy użyciu zdjęć satelitarnych (Kotarba i Widawski, 2008), jednak

zostało ono ograniczone wyłącznie do okresu jednego roku. Również zależność pomiędzy wielkością zachmurzenia a cyrkulacją atmosfery została częściowo rozpoznana. R. Adamczyk i Z. Ustrnul (2008) badając wpływ cyrkulacji atmosfery na wielkość zachmurzenia w obrębie strefy polarnej Europy stwierdzili duże zróżnicowanie warunków nefologicznych w pięciu badanych punktach węzłowych siatki geograficznej. Wskazali na potrzebę analizy stosunków nefologicznych w mniejszych skalach przestrzennych oraz na podstawie danych pomiarowych. Wpływ cyrkulacji na kształtowanie wielkości zachmurzenia w Polskiej Stacji Polarnej Hornsund zbadali także T. Niedźwiedź i Z. Ustrnul (1989). Na podstawie dziewięcioletniej serii pomiarowej (lipiec 1978-lipiec 1987 r.) zanalizowali średnie dobowe wartości zachmurzenia oraz liczbę dni charakterystycznych w różnych typach cyrkulacji. Wyniki ilościowej oraz jakościowej analizy zachmurzenia nad Spitsbergenem w okresie 1978-2007 zostały także przedstawione w pracy A.A. Marsza i innych (2013), w której zbadano ponadto regresję pomiędzy stopniem zachmurzenia i rocznym wskaźnikiem cyrkulacji południowej T. Niedźwiedzia. Stwierdzono, że zmiany zachmurzenia na Spitsbergenie są szybkie i zachodzą w takt zmian sytuacji synoptycznych, wymuszających zmiany kierunku adwekcji. Wieloaspektową dyskusję zachmurzenia w Hornsundzie oraz jego relacji ze wskaźnikami cyrkulacji atmosfery na tle pozostałych stacji zlokalizowanych na wyspie (Ny-Ålesund, Svalbard Lufthavn, Björnöya) w okresie 1978-2009 przeprowadził również A.A. Marsz (2013). Zachmurzenie oraz jego relacje z cyrkulacją atmosfery w krótkim okresie 2010-2011 było również analizowane nad NW Spitsbergenem, w Arktyce norweskiej (Kejna, 2012). Badania warunków atmosferycznych podczas anomalnych wartości zachmurzenia w lecie i w zimie na stacji Svalbard Lufthavn w okresie 1981-2010 E. Bednorz i innych (2016) wskazują, że zachmurzenie w atlantyckim sektorze Arktyki jest silnie kontrolowane przez cyrkulację atmosfery sterowaną rozkładem ciśnienia atmosferycznego na poziomie morza.

W niniejszym opracowaniu omówiono przebieg roczny oraz sezonowy zachmurzenia nad zachodnią częścią Svalbardu oraz określono jego relacje z cyrkulacją atmosfery. W dotychczasowych opracowaniach badania zależności zachmurzenia od sytuacji synoptycznych przeprowadzane były na podstawie krótszych okresów lub dla pojedynczych stacji. W pracy, oprócz Hornsundu, uwzględniono również dwie, zlokalizowane na północ stacje Svalbard Lufthavn oraz Ny-Ålesund. W odróżnieniu od cytowanych powyżej prac rozpatrywano zachmurzenie w czasie dnia i nocy polarnej, których czas trwania na rozpatrywanych stacjach jest różny. Uwzględniono także dwa znacznie krótsze okresy „przejściowe” – wiosenny (pomiędzy nocą oraz dniem polarnym) oraz jesienno (pomiędzy dniem a nocą polarną). Oprócz analizy średniego zachmurzenia oraz częstości wybranych dni z charakterystycznym zachmurzeniem w typach cyrkulacji, badano także ich prawdopodobieństwo warunkowe, które jest statystycznym wskaźnikiem o charakterze prognostycznym.

Materiały i metody

Podstawę opracowania stanowiły średnie dobowe wartości zachmurzenia ogólnego z 31-letniego okresu obserwacji (1983-2013). Uzyskane dane meteorologiczne pochodziły z trzech stacji synoptycznych położonych na obszarze Spitsbergenu (tab. 1). Najdalej na północ jest położona stacja Ny-Ålesund, Svalbard Lufthavn usytuowana jest kilka kilometrów na północny zachód od Longyearbyen, zaś Hornsund – Polska Stacja Polarna Instytutu Geofizyki PAN – znajduje się w południowej części wyspy.

Tabela 1. Charakterystyka stacji meteorologicznych oraz okresów uwarunkowanych sezonowymi zmianami promieniowania słonecznego*

Characteristics of meteorological stations and periods conditioned by seasonal variation in solar radiation

	Ny-Ålesund	Svalbard Lufthavn	Hornsund
\varnothing	78°55'N	78°15'N	77°00'N
λ	11°56'E	15°28'E	15°33'E
h	8 m	27 m	10 m
n.p.m./m a.s.l.			
DP*	18.04-24.08	21.04-21.08	24.04-18.08
(dni/days)	(129)	(123)	(117)
J	25.08-24.10	22.08-27.10	19.08-30.10
(dni/days)	(61)	(67)	(73)
NP*	25.10-17.02	28.10-14.02	31.10-11.02
(dni/days)	(116)	(110)	(104)
W	18.02-17.04	15.02-20.04	12.02-23.04
(dni/days)	(59)	(65)	(71)

\varnothing – szerokość geograficzna/latitude, λ – długość geograficzna/longitude, h – wysokość n.p.m./altitude in m a.s.l., DP – dzień polarny/the polar day, J – jesienny okres przejściowy/the autumn transitional period, NP – noc polarna/the polar night, W – wiosenny okres przejściowy/the spring transitional period.

* czas trwania dnia i nocy polarnej według / durations of polar day and night after:
<http://hornsund.igf.edu.pl/hornsund.old/swiatlo.html>

Opracowanie własne, podobnie pozostałe tabele. / Author's own elaboration, as well as other tables

Zebrany materiał obejmuje dane meteorologiczne, pozyskane z ogólnodostępnej bazy danych klimatycznych „eklima” Norweskiego Instytutu Meteorologicznego w Oslo (dane ze stacji norweskich, <http://eklima.met.no/>) oraz z Roczników Meteorologicznych Hornsund za lata 1982/1983-1999/2000 wykonanych w Oddziale Morskim IMGW w Gdyni pod kierunkiem M. Miętusa (IMGW, 2000-2001). Roczniki z okresu pomiarów 2000/2001 i 2001/2002 opublikowano w Instytucie Geofizyki PAN pod kierunkiem Kwaczyńskiego i Nowosielskie-

go (*Meteorological Conditions...*, 2001, 2003). Dane dla stacji Hornsund za lata 2003-2013 pochodzą z bazy udostępnionej przez Instytut Geofizyki PAN w Warszawie. Ponadto, przy określaniu wpływu cyrkulacji atmosfery na kształtowanie wielkości zachmurzenia, wykorzystano uproszczoną typologię sytuacji synoptycznych dla obszaru Spitsbergenu autorstwa T. Niedźwiedzia (2013a). Kalendarz składa się z 11 typów cyrkulacji, w tym 5 typów antycyklonalnych (Ca+Ka, N+NEa, E+SEa, S+SWa, W+NWa) oraz 5 cyklonalnych (Cc+Bc, N+NEc, E+SEc, S+SWc, W+NWc). Klasyfikacja uwzględnia także jeden typ sytuacji nieokreślonej - „x” (siodło baryczne, bądź rozmyte pole baryczne nad archipelagiem).

Opracowanie zostało podzielone na trzy części. Pierwsze dwie obejmują analizę wybranych warunków nefologicznych. Na podstawie średnich dobowych wielkości zachmurzenia, obliczono wartości miesięczne, sezonowe oraz roczne. Wskazano miesiące, sezony i lata o maksymalnej oraz minimalnej wielkości zachmurzenia oraz omówiono roczny przebieg częstości występowania dni z charakterystycznym zachmurzeniem. W literaturze poświęconej problematyce zachmurzenia przyjmuje się różne założenia przy wyznaczaniu takich dni. W niniejszej pracy, zgodnie ze *Słownikiem Meteorologicznym IMGW* (Niedźwiedź, 2003) za dzień pogodny przyjęto dobę, podczas której średnie zachmurzenie było mniejsze niż 20% całkowitego pokrycia nieba ($N < 20\%$), za dzień pochmurny uznano ten, w którym średnia wielkość zachmurzenia była większa niż 80% ($N > 80\%$). Ponadto w opracowaniu uwzględniono liczbę dni całkowicie zachmurzonych ($N = 100\%$) oraz bezchmurnych ($N = 0\%$), których znaczenie jest szczególnie ważne przy analizach warunków bioklimatologicznych. Ostatnia część opracowania dotyczy relacji między wielkością zachmurzenia a jedenaściami typami sytuacji synoptycznych, według uproszczonego kalendarza typów cyrkulacji T. Niedźwiedzia (2013) dla obszaru Spitsbergenu. Obliczono średnie wartości zachmurzenia oraz częstość i prawdopodobieństwo warunkowe w poszczególnych sytuacjach synoptycznych.

Wielkość zachmurzenia

Norweska część Arktyki uchodzi za jeden z najbardziej zachmurzonych obszarów na Ziemi (Przybylak, 2003). Spośród analizowanych stacji najwyższe średnie zachmurzenie w ciągu roku cechuje Hornsund – 72,5%, w pozostałych wielkość zachmurzenia wynosi około 66%. Zróżnicowanie takie wynika z lokalizacji stacji w różnych częściach wyspy, w tym z ich oddalenia od wpływu ciepłego Prądu Zachodniospitsbergeńskiego, którego największemu oddziaływaniu podlega stacja Hornsund. W ciągu roku wielkość zachmurzenia ogólnego wykazuje pewne cechy wspólne na rozpatrywanych stacjach (tab. 2). Największe zachmurzenie jest podczas dnia polarnego oraz w okresie przejściowym – jesiennym. Sezony te pokrywają się z czasem ablacji lodowców przypadającym na okres od

czerwca do sierpnia (Kryza i inni, 2011). Nad Spitsbergen następuje wówczas wzmożony napływ mas powietrza pochodzenia morskiego z kierunku południowo-zachodniego, które przynoszą nad wychłodzony ląd ciepło i wilgoć (Araźny, 2003; Niedźwiedź, 2006).

Położony w południowej części Spitsbergenu, Hornsund częściej niż pozostałe rozpatrywane stacje znajduje się w zasięgu zachmurzenia związanego z układami ciśnienia przechodzącymi na południe od Wyspy (Marsz i inni, 2013). Ponadto, jak wspomina A.A. Marsz (2013, s. 92) znaczenie ma także czynnik orograficzny oraz odległość od otwartych wód Morza Grenlandzkiego.

Tabela 2. Średnie miesięczne, sezonowe i roczne wartości zachmurzenia ogólnego [%] na Spitsbergenie (1983-2013) oraz zakresy ich zmienności

Mean monthly, seasonal and annual total cloudiness [%] over Spitsbergen (1983-2013), and variability ranges

Ny-Ålesund																	
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Rok	NP	W	DP	J
	Jan	Feb	Mar	Apr	May	June	July	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	Year				
N	56,4	56,9	60,9	58,8	68,5	76,7	78,7	79,6	75,7	68,6	61,7	54,0	66,4	57,5	59,7	73,9	73,9
$\delta \cdot n$	12,4	9,6	10,1	10,8	8,6	6,8	8,0	5,3	8,3	7,2	11,4	11,8	3,7	7,4	8,0	4,1	4,9
N max	85,2	72,1	80,0	84,4	81,7	90,3	93,0	88,0	87,0	87,4	81,6	74,0	74,3	71,6	75,4	80,9	81,6
N min	37,1	36,1	39,4	38,3	49,3	58,9	58,3	62,1	56,3	54,0	39,0	30,8	57,0	41,1	46,6	64,7	64,2
Svalbard Lufthavn																	
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Rok	NP	W	DP	J
	Jan	Feb	Mar	Apr	May	June	July	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	Year				
N	57,6	56,6	58,1	58,3	67,2	74,0	74,5	77,0	76,6	69,0	63,9	58,6	65,9	59,6	57,8	71,7	73,8
$\delta \cdot n$	9,8	8,8	8,8	10,3	5,5	6,8	6,8	5,8	5,5	6,6	9,4	11,2	3,0	6,8	6,0	3,6	4,5
N max	73,1	74,1	75,1	78,2	76,6	86,7	87,7	86,7	86,9	86,0	80,9	77,6	73,3	71,9	68,8	78,0	82,6
N min	35,2	39,0	43,0	33,4	52,1	58,6	56,3	64,1	61,0	55,3	46,0	35,8	60,1	47,7	42,5	62,5	61,4
Hornsund																	
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Rok	NP	W	DP	J
	Jan	Feb	Mar	Apr	May	June	July	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	Year				
N	66,5	66,5	66,2	66,4	74,6	80,1	81,2	80,7	81,1	73,1	69,2	64,4	72,5	66,4	66,5	78,5	77,6
$\delta \cdot n$	10,3	9,6	9,4	11,8	7,7	6,7	7,3	5,5	5,8	6,7	10,8	12,8	3,3	8,1	6,3	3,8	4,2
N max	87,8	87,5	85,9	90,9	88,6	89,6	92,6	92,5	92,5	88,1	85,5	87,3	79,3	84,3	80,9	84,9	84,8
N min	44,8	45,3	50,1	46,5	48,0	62,6	54,9	68,2	69,5	57,8	45,2	38,7	64,5	45,2	52,5	67,4	68,2

N – średnie zachmurzenie/mean cloudiness, $\delta \cdot n$ – odchylenie standardowe/standard deviation, N max i N min – maksymalne i minimalne średnie wartości zachmurzenia ogólnego/average maximum and minimum cloudiness values, NP – noc polarna/the polar night, W – wiosenny okres przejściowy/the spring transitional period, DP – dzień polarny/the polar day, J – jesienny okres przejściowy/the autumn transitional period.

Tworzące się nad Morzem Grenlandzkim niskie chmury „wciskane” do fiordów zachodniego wybrzeża Spitsbergenu często nie dochodzą do oddalonej od wejścia Isfjordu stacji Svalbard Lufthavn. Generalnie, w przebiegu rocznym największe zachmurzenie obserwowane jest w lipcu (Hornsund 81,2%) oraz sierpniu (Svalbard Lufthavn 77,0%, Ny-Ålesund 79,6%). Z wyjątkiem stacji położonej najdalej w głąb wyspy, najwyższe wartości nierzadko przekraczają 90,0% pokrycia nieba przez chmury. Zmienność zachmurzenia jest szczególnie duża w grudniu na Svalbard Lufthavn oraz Hornsund (na stacji Ny-Ålesund Hornsund w styczniu), o czym świadczą wysokie wartości odchylenia standardowego. Największe zachmurzenie występuje w czasie dnia polarnego okresu przejściowego jesienno, kiedy jego średnie wartości wahają się od 71,7% w Svalbard Lufthavn do 78,5% w stacji Hornsund. Duże zachmurzenie w tym okresie związane jest z silniejszą cyklogenezą oraz większą liczbą układów niskiego ciśnienia niż zimą (Brümmer i inni, 2000). Najbardziej pogodne są zwykle miesiące od grudnia do lutego. W czasie nocy polarnej, kiedy rola czynników radiacyjnych jest minimalna, główną rolę w kształtowaniu warunków pogodowych odgrywa cyrkulacja atmosfery.

Dni charakterystyczne

Pomimo niewielkiej odległości dzielącej rozpatrywane stacje na Spitsbergenie liczba dni charakterystycznych (bezczmurnych, pogodnych, pochmurnych oraz całkowicie zachmurzonych) jest zróżnicowana.

Częstość występowania dni bezchmurnych w przebiegu rocznym jest znikoma (tab. 3); na stacjach Hornsund i Svalbard Lufthavn pojawiają się one rzadziej niż raz w ciągu roku. Najczęściej występują w czasie nocy polarnej w stacji Ny-Ålesund (7,7% dni), natomiast praktycznie nie pojawiają się na Spitsbergenie w okresie przejściowym – jesienno. Maksymalny udział dni bezchmurnych przypada na miesiące zimowe – od grudnia do lutego (średnio od 0,1% w Svalbard Lufthavn do 2,4% w Ny-Ålesund). Zdaniem A.A. Marsza (2013) i A.A. Marsza i innych (2013), mała liczba dni bezchmurnych w Hornsundzie jest efektem częstego i szybkiego tworzenia się chmur orograficznych w polu widzenia obserwatora, które zmienia się bardzo szybko.

Przestrzenne zróżnicowanie częstości występowania dni pogodnych jest mniejsze w porównaniu do innych dni z charakterystycznym zachmurzeniem, zwłaszcza od czerwca do września. W pozostałych miesiącach liczba dni pogodnych wzrasta w miarę przemieszczania się na północ. Największą liczbę dni pogodnych w skali roku ma stacja Ny-Ålesund – 12,5%, zaś Hornsund oraz Svalbard Lufthavn odpowiednio 6,5% i 9,3% wszystkich dni w roku. Zdecydowanie najwięcej występuje ich podczas nocy polarnej (od 11,3% w Hornsundzie do 21,3% w Ny-Ålesund) oraz w okresie przejściowym, wiosennym na stacji Svalbard Lufthavn (14,7%).

W ciągu roku na wszystkich stacjach zdecydowanie przeważają dni pochmurne. Przez większość miesięcy (poza wrześniem), dni pochmurne najrzadziej notowane są w położonej w głębi fiordu stacji Svalbard Lufthavn. W Hornsundzie dni pochmurne stanowią nieco ponad połowę dni w roku (52,6%). Na pozostałych stacjach frekwencja tych dni jest również największa (tab. 3). Średnio w roku notowane są one podczas 41,6% (Svalbard Lufthavn) oraz 44,0% (Ny-Ålesund) dni. Maksimum pojawiania się dni pochmurnych przypada na dzień polarny, zaś minimum na okres przejściowy, wiosenny oraz noc polarną. W przebiegu rocznym zakres zmienności ich występowania waha się od 42,6% (marzec i grudzień) do 68,9% (lipiec) w stacji Hornsund, przy 28,9% (luty) do 60,8% (sierpień) w Svalbard Lufthavn oraz 31,8% (grudzień) do 61,7% (sierpień) w Ny-Ålesund.

Dni całkowicie zachmurzone stanowią średnio od 3,7% (Svalbard Lufthavn) do 18,5% (Ny-Ålesund) dni w roku. W przebiegu rocznym ich miesięczna frekwencja zmienia się nieznacznie, jednak przestrzenne zróżnicowanie ich częstości jest spore, z wyraźną przewagą w Ny-Ålesund (od 19 do 21,3% w trakcie dnia polarnego oraz jesienią). Na stacji Hornsund najwięcej pojawia się ich w okresie wiosennym – średnio od 16,3%. Z kolei w Svalbard Lufthavn jest ich najwię-

Tabela 3. Częstość [%] dni bezchmurnych (N=0%), pogodnych (N<20%), pochmurnych (N>80%) oraz całkowicie zachmurzonych (N=100%) na Spitsbergenie (1983-2013)
Frequency [%] of cloudless days (N=0%), clear days (N<20%), cloudy days (N>80%) and completely overcast days (N=100%) [%] on Spitsbergen (1983-2013)

ST	Dni Days	Miesiące / Months												R	NP	W	DP	J
		I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII					
Ny-Ålesund	N=0%	3,1	1,4	0,8	1,0	0,6	0,1	0,2	0,2	0,1	0,2	0,9	2,7	11,1	7,7	1,7	1,3	0,2
	N<20%	21,1	21,4	18,0	17,6	11,7	6,5	6,1	5,9	7,0	10,2	16,5	24,7	12,5	21,3	15,8	6,6	5,1
	N>80%	33,3	32,8	36,6	33,8	47,1	55,8	57,2	61,7	55,7	44,0	38,6	31,8	44,0	34,7	34,9	53,2	52,1
	N=100%	18,7	17,1	14,4	12,6	20,6	21,6	21,4	24,8	21,8	18,3	18,6	16,9	18,5	17,6	13,5	21,3	19,0
Svalbard Lufthavn	N=0%	0,1	0,2	0,1	0,1	0,0	0,0	0,1	-	-	-	0,0	0,1	0,8	0,4	0,2	0,2	0,0
	N<20%	17,8	17,9	15,2	15,9	8,0	6,4	7,5	4,4	4,2	6,5	12,3	15,1	9,3	14,2	14,7	5,4	2,5
	N>80%	29,9	28,9	29,1	32,4	43,7	54,4	57,1	60,8	57,1	41,8	35,5	29,7	41,6	31,7	29,8	51,3	51,9
	N=100%	7,0	6,3	7,5	5,8	7,1	6,3	5,8	6,3	6,9	5,7	10,2	7,2	3,7	5,4	4,4	4,2	5,0
Hornsund	N=0%	0,3	0,2	0,1	0,1	0,0	-	0,1	-	-	-	0,0	0,5	1,3	1,0	0,3	0,1	0,0
	N<20%	13,4	13,4	11,5	12,7	6,6	4,7	5,5	4,1	4,4	6,0	10,3	14,1	6,5	11,3	10,3	2,6	2,0
	N>80%	45,6	45,0	42,6	42,9	54,8	64,4	68,9	63,8	64,7	48,9	46,2	42,7	52,6	44,4	43,8	61,3	57,6
	N=100%	12,9	9,6	9,7	10,2	11,0	11,1	12,2	11,9	12,3	12,4	11,0	11,2	9,7	9,8	16,3	10,1	10,3

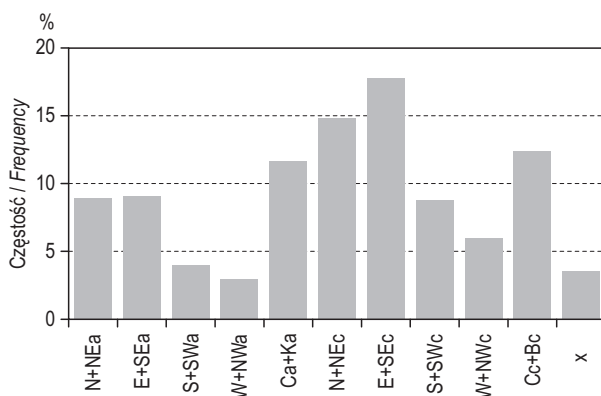
R – rok/ year, NP – noc polarna/ the polar night, W – wiosenny okres przejściowy/ the spring transitional period, DP – dzień polarny/ the polar day, J – jesienny okres przejściowy/ the autumn transitional period, 0,0 – dni z charakterystycznym zachmurzeniem występują sporadycznie, a ich częstość jest >0 ale mniejsza niż 0,0/ days of characteristic cloudiness occur sporadically, at a frequency of occurrence >0 but below 0.0; „-” brak dni z charakterystycznym zachmurzeniem w okresie badawczym/ no days of characteristic cloudiness in the study period.

cej w czasie nocy polarnej (5,4%). Najmniejsza liczba dni całkowicie zachmurzonych przypada na czas wiosny (Ny-Ålesund) oraz dnia polarnego (Svalbard Lufthavn), gdy średnio notuje się ich od 4,2% do 13,5%. W stacji Hornsund jest to noc polarna (9,8%).

Wpływ cyrkulacji atmosfery na wielkość zachmurzenia

Cyrkulacja atmosferyczna wraz z promieniowaniem słonecznym, odgrywają podstawową rolę w kształtowaniu warunków klimatycznych oraz typów pogody. Obszar Svalbardu odznacza się zmiennym obrazem pola barycznego w ciągu roku (Niedźwiedź, 2013b). Oblewające archipelag morza są istotnym źródłem ciepła, którego ilość może się w przyszłości zwiększyć, wraz ze zmniejszaniem się zasięgu lodów morskich w Arktyce (Schweiger i inni, 2008; Kay i Gettelman, 2009; Eastman i Warren, 2010; Palm i inni, 2010).

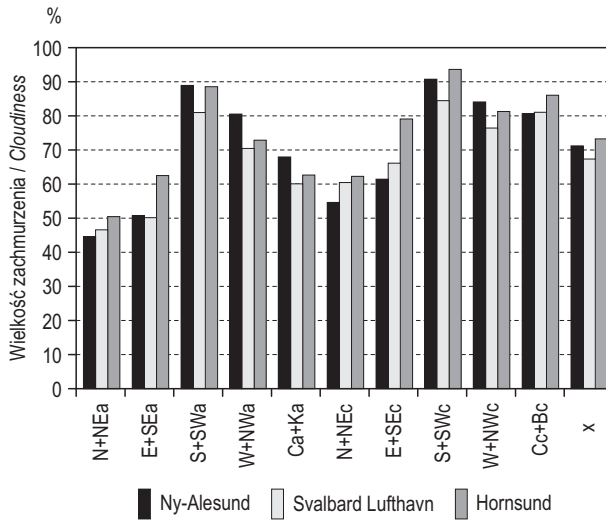
Położenie Spitsbergenu w wysokich szerokościach geograficznych decyduje o przewadze napływu powietrza z kierunku wschodniego. Na badanym obszarze w latach 1983-2013 sytuacje cyklonalne wyraźnie dominowały (59,7%) nad antycyklonalnymi (36,7%). Częstość sytuacji cyklonalnych w okresie 1983-2013 była większa niż w latach 1951-2006 (około 56% za Niedźwiedź, 2013b), co wskazuje na wzrost aktywności cyklonalnej nad Svalbardem (Niedźwiedź i Łupikasz, 2015). Najczęściej występującymi typami cyrkulacji były sytuacje niżowe z adwekcją powietrza z kierunków E+SEc (17,7%) oraz N+NEc (14,8%). Najrzadziej w ciągu roku pojawiała się sytuacja antycyklonalna W+NWa (3,0%). Sytuacje nieokreślone i siodła baryczne pojawiały się podczas 3,6% dni w roku. Stosunkowo często występowały również typy bezadwekcyjne (Cc+Bc oraz Ca+Ka) – łącznie blisko 1/4 wszystkich typów cyrkulacji (ryc. 1).



Ryc. 1. Średnia roczna częstość typów cyrkulacji na Spitsbergenie wg klasyfikacji T. Niedźwiedzia (1983-2013). Opracowanie własne, podobnie jak pozostałe ryciny

Mean annual frequency of the different circulation types over Spitsbergen (1983-2013), in line with the Niedźwiedź classification. Author's own elaboration, as well as other figures

Zależność średniego zachmurzenia od typów cyrkulacji atmosfery w okresie rocznym kształtuje się podobnie na wszystkich stacjach (ryc. 2). Największe zachmurzenie występuje przy adwekcji powietrza z sektora południowego, bez względu na rodzaj układu barycznego (S+SWa i S+SWc), co jest zgodne z wynikami wcześniejszych prac (np. Niedźwiedź i Ustrnul, 1989; Przybylak i inni, 2012; Marsz, 2013; Soroka i Matuszko, 2013). Dużemu zachmurzeniu sprzyja tworzenie się niżu między Grenlandią i Spitsbergenem, któremu towarzyszy napływ ciepłych i wilgotnych mas powietrza morskiego (Soroka i Matuszko, 2013). Charakterystyczne jest również duże zachmurzenie notowane podczas dwóch innych sytuacji cyklonalnych Cc+Bc oraz W+NWc. Zdecydowanie w najmniejszym stopniu niebo jest pokryte przez chmury w typie N+NEa. Zachmurzenie w sytuacjach antycyklonalnych jest wyraźnie mniejsze niż w cyklonalnych, pomijając typ S+SWa.



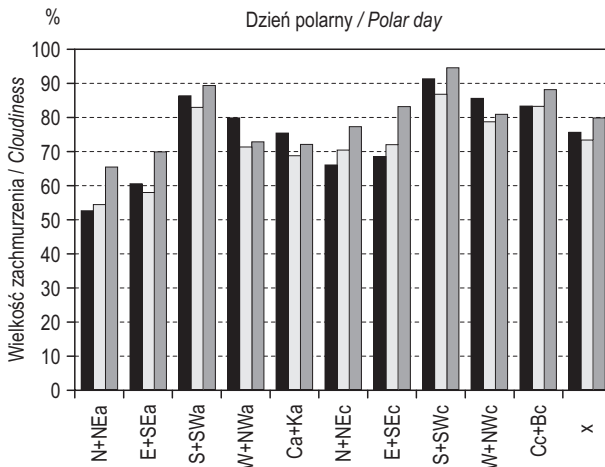
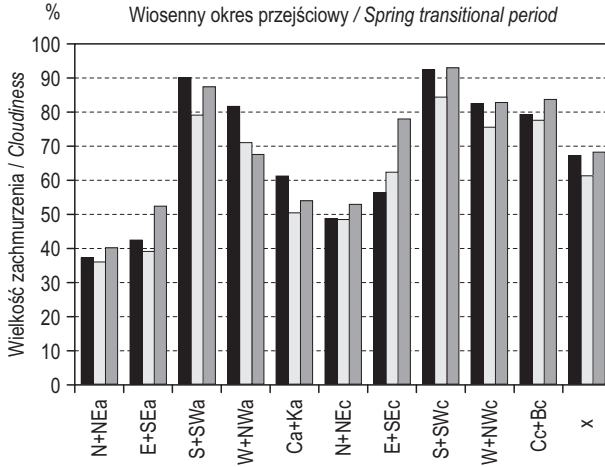
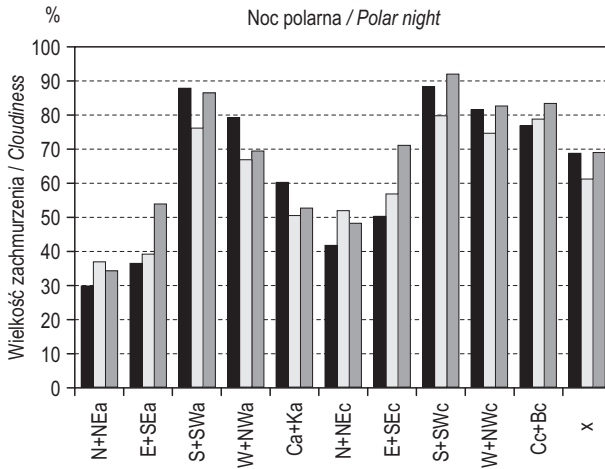
Ryc. 2. Średnia roczna wielkość zachmurzenia na Spitsbergenie w typach cyrkulacji według klasyfikacji Niedźwiedzia, 1983-2013

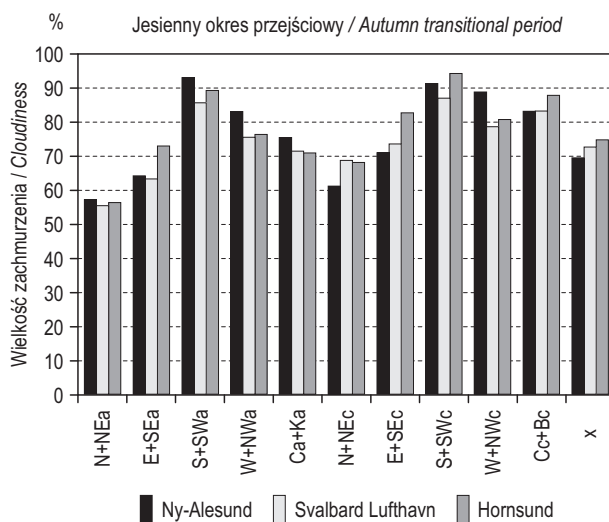
Mean annual cloudiness on Spitsbergen (1983-2013), for selected circulation types in line with the Niedźwiedź classification

Wpływ cyrkulacji atmosferycznej na wielkość zachmurzenia zmienia się w cyklu sezonowym (ryc. 3). Podobnie jak w przypadku całego roku, największe zachmurzenie w rozpatrywanych stacjach występuje podczas dni z adwekcją powietrza z sektora południowego (S+SWc oraz S+SWa). Zdecydowanie najmniejsze zachmurzenie towarzyszy sytuacjom z napływem powietrza z kierunku północnego (N+NEa i N+NEc), niezależnie od rodzaju układu barycznego

i pory roku. W typie S+SWc zachmurzenie zmienia się w granicach od 79,9% w czasie nocy polarnej w Svalbard Lufthavn do 94,7% w ciągu dnia polarnego na stacji Hornsund. Podczas sytuacji N+NEa średnie zachmurzenie kształtuje się w przedziałach od 29,7% w Ny-Ålesund (noc polarna) do 65,5% w Hornsundzie (dzień polarny). Związek pomiędzy stopniem zachmurzenia a cyrkulacją atmosfery podczas nocy polarnej oraz wiosny jest silniejszy niż w trakcie dwóch pozostałych sezonów. Wskazuje na to większy zakres zmian zachmurzenia określony jako różnica jego wartości pomiędzy typami z zachmurzeniem maksymalnym i minimalnym. Oznacza to, że z niektórymi typami wyraźnie związane jest duże lub małe zachmurzenie. W czasie dnia polarnego różnica pomiędzy wielkością zachmurzenia w typie N+NEa i S+SWc wynosiła średnio 33,5% (ryc. 3), z kolei w czasie nocy polarnej sięgała aż 53,2%. Stopień pokrycia nieba w typach cyklonalnych (wykluczając typ S+SWc) na wszystkich stacjach Spitsbergenu wynosił średnio od 66,6% w czasie nocy polarnej do 78,2% podczas dnia polarnego. W większości typów cyklonalnych (poza W+NWc w czasie dnia polarnego oraz jesienią oraz N+NEc) największe zachmurzenie występuje na stacji Hornsund (od 75,6% do 85%) najczęściej znajdującej się w strefie zachmurzenia związanego z układami niżowymi przechodzącymi na południe od Spitsbergenu (Marsz, 2013). Zaobserwowano również, że w typie E+SEc stopień zachmurzenia maleje wraz ze wzrostem szerokości geograficznej osiągając od 71,2% do 83,3% na stacji Hornsund oraz od 50,3% do 71,1% w Ny-Ålesund. W typach antycyklonalnych (z wyjątkiem typu S+SWa) średnia wielkość zachmurzenia na Spitsbergenie zmienia się w granicach od 50,8% (noc polarna) do 68,6% (jesień). We wszystkich sezonach największe zachmurzenie w większości sytuacji wyżowych, czyli: S+SWa (oprócz dnia polarnego), W+NWa oraz Ca+Ka, występowało na stacji w Ny-Ålesund (od 60,3% do 93,2%). Jedynie przy napływie powietrza znanego z Morza Barentsa (typ E+SEa) największymi wartościami cechuje się stacja Hornsund. Największe przestrzenne zróżnicowanie wielkości zachmurzenia towarzyszy sytuacji E+SEc, gdzie wartości sięgają od 50,3% podczas nocy polarnej w Ny-Ålesund do 83,3% w stacji Hornsund podczas dnia polarnego. W analizowanych sezonach na wybranych stacjach Spitsbergenu nie stwierdzono znaczących różnic pokrycia nieba przez chmury w typie Cc+Bc. Wybrane typy cyrkulacji, takie jak: S+SWa, S+SWc, W+NWc oraz Cc+Bc w stacji Hornsund, W+NWc w Svalbard Lufthavn, a także W+NWa oraz S+SWc w Ny-Ålesund, nie wykazują znacznej zmienności sezonowej (wartości nie przekraczają 5,0%).

Przestrzenne zmiany zachmurzenia w zależności od typu cyrkulacji są skomplikowane i zmieniają się w zależności od sezonu i typu cyrkulacji. Ogólnie w typach ze stosunkowo niskim zachmurzeniem (np. N+NEa, zwłaszcza w przejściowych porach roku i w czasie nocy polarnej) zróżnicowanie przestrzenne jest mniejsze niż w typach sprzyjających występowaniu dni z większym zachmurzeniem (np. S+SWc i S+SWa). Wówczas większego znaczenia nabierają czynniki lokalne.





Ryc. 3. Średnia wielkość zachmurzenia na Spitsbergenie w typach cyrkulacji według klasyfikacji T. Niedźwiedzia, 1983-2013

Mean seasonal cloudiness on Spitsbergen (1983-2013), for selected circulation types in line with the Niedźwiedź classification

Wpływ cyrkulacji atmosfery na liczbę dni z charakterystycznym zachmurzeniem

Prawdopodobieństwo warunkowe jest metodą pozwalającą ocenić szansę wystąpienia dni z charakterystycznym zachmurzeniem w poszczególnych typach cyrkulacji, biorąc pod uwagę ich zróżnicowaną frekwencję w ciągu roku. W przeciwieństwie do najbardziej typowych dla strefy polarnej dni pochmurnych ($N > 80\%$), dni bezchmurne ($N = 0\%$) na Spitsbergenie występują co prawda sporadycznie, lecz największe prawdopodobieństwo ich pojawienia się związane jest z typami N+NEa oraz E+SEa (odpowiednio 6,9 i 7,5%) na stacji Ny-Ålesund (tab. 4). Na pozostałych stacjach możliwość ich wystąpienia jest jeszcze mniejsza (poniżej 5%). W zestawieniu sezonowym największym prawdopodobieństwem wystąpienia dni bezchmurnych wyróżnia się okres nocy polarnej w stacji Ny-Ålesund podczas adwekcji powietrza z sektorów północno-wschodniego (N+NEa, 18,3%) oraz południowo-wschodniego (E+SEa, 14,1%). Tylko w okresie wiosennym, pojawieniu się dni bezchmurnych sprzyja typ W+NWa (5,6%) na stacji Hornsund oraz E+SEa w Ny-Ålesund (9,3%). Dni bezchmurne są obserwowane najrzadziej w Svalbard Lufthavn, gdzie występują wyłącznie przy typach antycyklonalnych N+NEa (2%) oraz E+SEa (1,1%), w pozostałych sytuacjach prawdopodobieństwo ich wystąpienia jest niewielkie ($< 1\%$).

Tabela 4. Prawdopodobieństwo warunkowe [%] wystąpienia dni charakterystycznych pod względem zachmurzenia w typach cyrkulacji na Spitsbergenie (1983-2013)

TC	Ny-Ålesund					Svalbard Lufthavn					Hornsund				
	NP	W	DP	J	R	NP	W	DP	J	R	NP	W	DP	J	R
Dni bezchmurne / <i>Cloudless days</i> (N=0%)															
N+NEa	18,3	5,0	2,6	0,7	6,9	2,0	0,8	–	–	0,7	5,1	0,7	0,3	–	1,5
E+SEa	14,1	9,3	3,6	0,8	7,5	1,1	0,4	0,8	–	0,7	1,5	0,8	–	–	0,6
S+SWa	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
W+NWa	4,8	–	–	–	0,6	–	–	–	–	–	2,6	5,6	0	–	0,6
Ca+Ka	5,0	2,6	0,7	0,5	1,7	0,8	0,6	0,3	–	0,4	0,5	1,5	0,3	–	0,5
N+NEc	8,8	2,3	1,5	0,6	4,5	0	0,3	0,3	–	0,1	1,4	–	–	–	0,5
E+SEc	8,2	2,6	1,3	0	4,4	0,2	–	–	–	0,1	0,5	–	–	–	0,2
S+SWc	0,6	–	–	–	0,2	0,3	–	–	–	0,1	–	–	–	–	–
W+NWc	1,3	–	–	–	0,3	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Cc+Bc	1,1	0,4	–	–	0,4	–	–	–	–	–	0,2	–	0,2	–	0,1
x	3,1	–	–	1,2	1,2	0,8	–	–	–	0,2	–	–	–	–	–
Dni pogodne / <i>Clear days</i> (N<20%)															
N+NEa	45,1	33,0	16,2	12,1	26,5	34,3	35,2	14,3	7,5	23,0	37,7	24,7	5,3	8,7	18,5
E+SEa	40,4	35,6	15,1	12,7	26,5	36,5	32,1	12,3	7,8	22,8	15,2	18,8	5,3	–	10,6
S+SWa	–	–	1,4	–	0,7	0,9	1,7	1,4	–	1,1	–	1,5	1,4	–	0,9
W+NWa	9,5	–	1,8	–	2,3	5,1	–	2,8	1,5	2,6	5,3	5,6	1,8	1,5	2,4
Ca+Ka	16,2	12,9	7,1	6,1	9,3	19,5	17,2	8,8	4,4	10,9	18,5	18,1	5,4	4,2	9,2
N+NEc	28,6	19,9	6,3	7,8	17,6	17,1	17,2	3,9	1,4	11,0	20,9	13,2	0,5	2,8	10,9
E+SEc	24,0	19,9	7,1	6,2	16,9	15,6	8,9	3,7	2,6	9,6	7,8	4,3	1,7	0,7	4,5
S+SWc	1,4	–	–	0,5	0,6	0,3	–	–	–	0,1	–	–	2,2	–	–
W+NWc	4,5	3,1	0,9	–	1,7	–	2,7	0,6	–	0,6	1,4	–	–	–	1,2
Cc+Bc	5,3	3,4	1,1	1,7	2,9	1,7	2,0	–	–	0,9	1,6	–	0,5	0,4	0,7
x	11,5	5,1	7,4	9,9	8,8	7,2	4,7	3,1	3,4	4,9	2,4	5,6	0,8	3,3	2,7

Pojawienie się dni pogodnych (N<20%) nad Spitsbergenem jest wyraźnie związane z charakterem cyrkulacji atmosfery (tab. 4). Największe prawdopodobieństwo wystąpienia takich dni charakteryzuje adwekcję powietrza z sektora północnego oraz wschodniego podczas oddziaływania układu wyżowego (N+NEa i E+SEa), znaczne zaś również analogiczne typy cyklonalne (N+NEc oraz E+SEc) oraz sytuacja Ca+Ka. Zależności pomiędzy występowaniem dni pogodnych i cyrkulacją atmosfery są jednak zróżnicowane sezonowo i przestrzennie. Podczas nocy polarnej prawdopodobieństwo wystąpienia dni pogodnych w typie N+NEa zmienia się od 34,3% w Svalbard Lufthavn do 45,1% w Ny-Ålesund. W dniach z tym samym kierunkiem adwekcji, lecz podczas oddziaływania ukła-

Tabela 4. cd. Conditional probability [%] of days with characteristic cloudiness in circulation types over Spitsbergen (1983-2013)

TC	Ny-Ålesund					Svalbard Lufthavn					Hornsund				
	NP	W	DP	J	R	NP	W	DP	J	R	NP	W	DP	J	R
Dni pochmurne / <i>Cloudy days</i> (N>80%)															
N+NEa	6,7	7,7	23,7	27,9	16,4	6,1	5,3	21,9	15,5	13,3	5,9	7,1	34,8	20,3	18,4
E+SEa	14,8	18,2	35,5	38,1	26,2	10,8	11,6	30,8	36,2	21,7	25,9	20,3	43,6	46,1	33,4
S+SWa	71,8	74,5	70,1	87,3	74,0	51,8	64,4	72,5	74,7	67,5	68,3	75,4	86,3	82,7	80,1
W+NWa	64,3	42,9	58,0	70,5	60,3	38,5	46,7	46,3	55,4	47,5	50,0	44,4	52,1	55,9	52,3
Ca+Ka	35,4	33,5	56,3	56,6	49,7	22,9	20,0	47,6	49,1	39,6	22,7	20,1	50,8	47,3	41,0
N+NEc	13,0	16,3	36,1	25,8	21,6	18,0	12,7	43,9	39,4	27,4	16,6	17,8	57,7	36,5	30,4
E+SEc	24,7	27,3	43,7	47,3	32,7	25,0	31,3	46,7	50,7	35,0	48,2	62,7	74,9	67,1	60,2
S+SWc	73,7	85,3	82,0	85,2	80,0	57,7	71,1	82,0	85,0	72,1	89,8	92,1	94,6	94,3	92,5
W+NWc	60,9	67,2	69,9	76,5	68,7	45,3	53,4	60,7	54,0	55,3	65,5	73,6	64,4	58,7	64,4
Cc+Bc	56,2	60,8	67,2	62,6	61,4	62,1	55,3	72,1	70,6	65,4	70,9	71,9	80,2	79,6	75,6
x	49,2	40,7	60,3	50,6	52,1	35,2	25,0	58,3	54,5	45,0	39,8	39,4	64,8	50,0	49,4
Dni z zachmurzeniem całkowitym / <i>Overcast days</i> (N=100%)															
N+NEa	1,9	0,9	5,1	7,1	3,6	1,6	–	0,8	1,2	0,9	0,4	–	4,2	1,7	1,9
E+SEa	7,4	5,3	8,4	10,3	7,8	1,1	0,4	2,9	0,7	1,5	2,7	2,6	4,2	1,9	3,0
S+SWa	46,2	49,0	35,0	46,5	41,2	9,1	10,2	4,8	12,0	8,0	23,1	21,5	22,3	21,0	22,4
W+NWa	28,6	7,1	20,1	26,2	21,9	10,3	–	1,8	3,1	2,9	15,8	11,1	6,4	7,4	7,8
Ca+Ka	17,7	14,2	26,3	16,8	21,7	3,8	1,7	4,8	2,7	3,8	4,2	2,5	6,5	3,5	5,0
N+NEc	2,7	3,0	10,0	4,5	4,8	1,5	–	1,3	1,7	1,2	1,9	1,1	4,4	3,6	2,7
E+SEc	8,8	8,6	14,0	16,1	11,0	3,2	1,3	1,3	2,3	2,3	11,1	13,0	7,5	9,4	10,6
S+SWc	46,2	47,4	44,8	44,3	45,3	8,2	12,1	8,7	9,5	9,1	25,1	24,7	35,1	36,7	30,3
W+NWc	30,1	21,9	31,2	29,6	29,5	3,3	2,7	2,4	0,8	2,3	10,3	4,6	8,3	7,0	8,1
Cc+Bc	33,5	24,1	25,8	23,5	27,7	8,0	4,1	7,0	4,4	6,3	16,0	11,9	16,0	16,4	15,4
x	23,8	6,8	20,6	17,3	19,0	1,6	–	2,4	1,1	1,5	6,5	2,8	4,8	4,3	5,0

Skróty jak w tabeli 1 / Abbreviations see Table 1.

du niżowego, prawdopodobieństwo występowania tych dni jest znacznie mniejsze i waha się od 17,1% (w Svalbard Lufthavn) do 28,6% (w Ny-Ålesund). Podobnym prawdopodobieństwem występowania dni pogodnych odznacza się sytuacja antycyklonalna Ca+Ka, w której omawiane dni stanowią od 16,2% w Ny-Ålesund do 19,5% w stacji Svalbard Lufthavn. W przebiegu sezonowym, pojawieniu się dni pogodnych sprzyja okres nocy polarnej oraz wiosny, kiedy powietrze napływa nad Spitsbergen z kierunków N+NE i E+SE oraz w typie Ca+Ka. Praktycznie dni pogodne nie występują w typach S+SWa oraz S+SWc. W pozostałych sezonach zależności są podobne jak w czasie nocy polarnej oraz wiosny, jednakże

prawdopodobieństwo wystąpienia dni pogodnych na Spitsbergenie jest znacznie mniejsze. Dni pogodne najczęściej występują w okresie jesiennym przy sytuacji N+NEa na stacji Hornsund (8,7%) oraz przy tym samym typie cyrkulacji podczas dnia polarnego w stacjach Svalbard Lufthavn (14,3%) oraz Ny-Ålesund (16,2%). Rozkład przestrzenny występowania dni pogodnych jest zmienny w zależności od typu cyrkulacji; można jedynie wskazać, że w większości sytuacji i sezonów największą ich liczbą wyróżnia się stacja Ny-Ålesund.

Dni pochmurne ($N > 80\%$), w odróżnieniu od pozostałych dni charakterystycznych, mogą występować na Spitsbergenie praktycznie w każdym typie cyrkulacji. W przebiegu rocznym największe prawdopodobieństwo ich pojawienia się dotyczy sytuacji S+SEc, S+SWa, W+NWc oraz Cc+Bc – na wszystkich stacjach nie mniej niż 50%. W Hornsundzie, podobnie jak w innych stacjach, przy typach cyklonalnych pojawieniu się dni pochmurnych sprzyja czas dnia polarnego (Hornsund 74,3%, pozostałe stacje około 60%). Na stacjach Svalbard Lufthavn i Ny-Ålesund duże prawdopodobieństwo jest również w okresie jesiennym. W czasie nocy polarnej oraz sezonu wiosennego szansa wystąpienia dni pochmurnych jest mniejsza – prawdopodobieństwo w sytuacjach cyklonalnych wynosi od 41,6% w Svalbard Lufthavn do 63,6% w stacji Hornsund. Przy sytuacjach antycyklonalnych dni pochmurne mogą wystąpić na stacji Svalbard Lufthavn z prawdopodobieństwem od 26% (noc polarna) do 46,1% (jesień), zaś w Hornsundzie i Ny-Ålesund odpowiednio od 33,4% (wiosna) do 53,5% (dzień polarny) i od 35,4% (wiosna) do 56,1% (jesień). Na każdej stacji dni pochmurne notowano najrzadziej przy typie N+NEa podczas nocy polarnej i wiosną – nie częściej niż 10%.

W skali sezonowej oraz rocznej (tab. 4) prawdopodobieństwo wystąpienia dni całkowicie zachmurzonych ($N = 100\%$) jest największe podczas adwekcji powietrza z sektora południowego (S+SWa i S+SWc). Dotyczy to zwłaszcza stacji Ny-Ålesund (45,3%) oraz Hornsund (30,3%), przy sytuacji cyklonalnej. Dni całkowicie zachmurzone mogą jednak wystąpić w każdym z typów cyrkulacji. Jedynie na stacji Svalbard Lufthavn, położonej najdalej w głąb wyspy, prawdopodobieństwo ich pojawienia się w większości sytuacji nie przekracza 10%, z wyjątkiem S+SWa jesieni oraz S+SWc wiosną, kiedy osiąga ono 12%. Mniejsze prawdopodobieństwo dni całkowicie zachmurzonych może w tym wypadku mieć związek z osłonięciem stacji Svalbard Lufthavn od południa przez wysoką krawędź, która stanowi barierę dla napływających wilgotnych mas powietrza. Zróżnicowanie sezonowe prawdopodobieństwa dni z $N = 100\%$ w większości typów cyrkulacji jest stosunkowo niewielkie, na stacjach Hornsund oraz Svalbard Lufthavn nie przekracza 10% (poza W+Wa oraz S+SWc). Jedynie na stacji Ny-Ålesund, sezonowy zakres zmian prawdopodobieństwa przekracza 10% w typach antycyklonalnych: S+SEa, W+NWa i Ca+Ka, Dni całkowicie zachmurzone najrzadziej towarzyszą sytuacji N+NEa, tylko na stacji Ny-Ålesund w czasie jesieni oraz dnia polarnego prawdopodobieństwo ich wystąpienia przekracza 5%.

Wnioski

Badania przebiegu rocznego i sezonowego zachmurzenia na wybranych stacjach zachodniej części Spitsbergenu w okresie 1983-2013 wskazują, że cyrkulacja atmosfery odgrywa znaczącą rolę w kształtowaniu zachmurzenia. Pomimo stosunkowo niewielkich odległości dzielących poddane analizie stacje, stopień pokrycia nieba przez chmury jest dosyć zróżnicowany. Największe średnie roczne zachmurzenie występuje w Hornsundzie, zaś w dwóch pozostałych stacjach wartości są do siebie zbliżone. Maksymalne wartości zachmurzenia na Spitsbergenie występują w czasie dnia polarnego oraz okresu przejściowego jesienno-polarnej. Noc polarna to czas, kiedy niebo jest pokryte przez chmury w najmniejszym stopniu. Jest to jednak okres, kiedy ocena wielkości zachmurzenia jest dla obserwatora najtrudniejsza. W przebiegu sezonowym najmniejsze zróżnicowanie zachmurzenia, wyrażone przez wartości odchylenia standardowego, charakteryzuje dzień polarny. Liczba dni charakterystycznych pod względem zachmurzenia w poszczególnych stacjach jest również zróżnicowana. Najwięcej dni bezchmurnych ($N=0\%$) oraz pogodnych ($N<20\%$) występuje w ciągu roku w Ny-Ålesund. Podobnie jest w przypadku dni całkowicie zachmurzonych ($N=100\%$). Największa liczba dni pochmurnych ($N>80\%$) występuje natomiast w stacji Hornsund, położonej najdalej na południu wyspy. Na badanym obszarze wyraźnie przeważają kierunki adwekcji powietrza z sektora wschodniego, znad Morza Barentsa, gdzie najczęściej w ciągu roku przemieszczają się ośrodki cyklonalne. Analizując związki wielkości zachmurzenia z typami cyrkulacji, w okresie rocznym oraz przyjętych sezonach, można zaobserwować kilka prawidłowości.

Wielkość zachmurzenia zależy przede wszystkim od kierunku adwekcji mas powietrza, mniejsze znaczenie ma rodzaj układu barycznego. Największe zachmurzenie na Spitsbergenie występuje w typach o adwekcji powietrza z kierunku południowego, bez względu na charakter układu barycznego (S+SWc oraz S+SWa). Niezależnie od lokalizacji stacji oraz rozpatrywanego okresu (rok, sezon), zdecydowanie najmniejsze zachmurzenie było związane z typami N+N_{Ea} oraz N+N_{Ec}.

Przy większości typów cyklonalnych największe zachmurzenie występuje w stacji Hornsund (poza typem W+N_{Wc} w czasie dnia polarnego i jesienią). W przypadku sytuacji antycyklonalnych: S+SWa (poza dniem polarnym w stacji Hornsund), W+N_{Wa} i Ca+Ka, największe zachmurzenie wyróżnia z kolei stację w Ny-Ålesund. Natomiast w Svalbard Lufthavn, podczas nocy polarnej, średnie zachmurzenie jest największe przy adwekcji powietrza z sektora północnego.

Wpływ cyrkulacji na wielkość zachmurzenia zmienia się w zależności od sezonu. Największy jest w czasie nocy polarnej (Svalbard Lufthavn i Ny-Ålesund) oraz jesienią (stacja Hornsund). Na wszystkich stacjach zachmurzenie jest naj-

mniej zróżnicowane w typach cyrkulacji podczas dnia polarnego, kiedy obok czynników cyrkulacyjnych, dużą rolę odgrywają również warunki radiacyjne.

Największe prawdopodobieństwo wystąpienia charakteryzuje dni pochmurne, zarówno w okresie rocznym jak i w poszczególnych sezonach. Podobnie jest w przypadku dni o całkowitym zachmurzeniu, notowanych najczęściej podczas napływu powietrza z południa, bez względu na rodzaj układu barycznego.

Liczba dni bezchmurnych jest niewielka na wszystkich stacjach Spitsbergenu, zwłaszcza w stacjach Hornsund i Svalbard Lufthavn. Zauważa się jednak, że na stacji Ny-Ålesund, w czasie nocy polarnej oraz wiosny, mogą one pojawić się przy adwekcji z sektorów N+NE oraz E+SE, zarówno w typach cyklonalnych oraz antycyklonalnych. Podobnie jest w przypadku dni pogodnych – i to dotyczy wszystkich stacji.

*

Praca powstała dzięki wsparciu finansowemu ze środków Krajowego Naukowego Ośrodka Wiodącego (KNOW) przyznanych Centrum Studiów Polarnych na lata 2014-2018.

Piśmiennictwo

- Adamczyk R., Ustrnul Z., 2008, *Uwarunkowania cyrkulacyjne zachmurzenia ogólnego w strefie polarnej Europy*, Problemy Klimatologii Polarnej, 18, s. 79-86.
- Arażny A., 2003, *Przebieg roczny wilgotności względnej w Arktyce Norweskiej w okresie 1971-2000*, Problemy Klimatologii Polarnej, 13, s. 107-115.
- Arażny A., 2008, *Bioklimat Arktyki Norweskiej i jego zmienność w okresie 1971-2000*, Wydawnictwo Naukowe Uniwersytetu Mikołaja Kopernika, Toruń.
- Bednorz E., Kaczmarek D., Dulik P., 2016, *Atmospheric conditions governing anomalies of the summer and winter cloudiness in Spitsbergen*, Theoretical and Applied Climatology, 123, s. 1-10.
- Beesley J.A., Mortiz R.E., 1999, *Toward an explanation of the annual cycle of cloudiness over the Arctic Ocean*, Journal of Climate, 12, s. 395-415.
- Brümmer B., Thiemann S., Kirchgäbner A., 2000, *A cyclone statistics for the Arctic based on European Centre re-analysis data*, Meteorology and Atmospheric Physics, 75, s. 233-250.
- Curry J.A., Rossow W.B., Randall D., Schramm J.L., 1996, *Overview of Arctic cloud and radiation characteristics*, Journal of Climate, 9, s. 1731-1764.
- Eastman R., Warren S.G., 2010, *Interannual variations of arctic cloud types in relation to sea ice*, Journal of Climate, 23, 15, s. 4216-4232.
- <http://eklima.met.no/>
- <http://hornsund.igf.edu.pl/hornsund.old/swiatlo.html>
- IMGW, 2000-2001, *Roczniki Meteorologiczne Hornsund* (red. M. Miętus) 1982/83-1999/2000, Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej Oddział Morski, Gdynia.
- IPCC, 2007, *Climate Change 2007: The Physical Science Basis Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press.
- Kay J.E., Gettelman A., 2009, *Cloud influence on and response to seasonal Arctic sea ice loss*, Journal of Geophysical Research, 114, D18204, doi:10.1029/2009JD011773.

- Kejna M., 2012, *Radiation conditions*, [w:] R. Przybylak, A. Arażny, M. Kejna, R. Maszewski, *Topoclimatic Diversity in Forlandsundet Region (NW Spitsbergen) in Global Warming Conditions*, Nicolaus Copernicus University, Oficyna Wydawnicza Turpress, Toruń, s. 53-76.
- Kotarba A., Widawski A., 2008, *Satelitarna charakterystyka zachmurzenia ogólnego nad Svalbardem w roku 2007 w powiązaniu z cyrkulacją atmosfery*, *Problemy Klimatologii Polarnej*, 18, s. 127-140.
- Kryza M., Szymanowski M., Migala K., 2011, *Zastosowanie modelu R.Sun do określenia dobowych sum promieniowania rzeczywistego na lodowcu Werenskjolda (SW Spitsbergen)*, *Prace i Studia Geograficzne*, 47, s. 435-442.
- Liu Y., Key J.R., Francis J.A., Wang X., 2007, *Possible causes of decreasing cloud cover in the Arctic winter, 1982-2000*, *Journal of Geophysical Research*, 34, L14705, doi: 10.1029/2007GL030042.
- Marsz A.A., 2013, *Cloudiness and sunshine duration*, [w:] A.A. Marsz, A. Styszyńska (red.), *Climate and Climate Change in Hornsund, Svalbard*, Gdynia Maritime University, Gdynia, s. 101-125.
- Marsz A.A., Niedźwiedz T., Styszyńska A., 2013, *Współczesne zmiany klimatu Spitsbergenu jako podstawa wyznaczania zmian kraobrazowych*. [w:] Z. Zwoliński, A. Kostrzewski, M. Pulina (red.), *Dawne i współczesne geoekosystemy Spitsbergenu*, Bogucki Wydawnictwo Naukowe, Poznań, s. 391-413.
- Matuszko D., Soroka J., 2013, *Zachmurzenie Spitsbergenu*, Instytut Geografii i Gospodarki Przestrzennej Uniwersytetu Jagiellońskiego, Kraków.
- Meier W.N., Gerland S., Granskog M.A., Key J.R., Haas C., Hovelsrud G.K., Kovacs K., Makhtas A., Michel C., Perovich D., Reist J.D., van Oort B.E.H., 2011, Chapter 9: *Sea ice*, [w:] *Snow, Water, Ice and Permafrost in the Arctic: Climate Change and the Cryosphere*, Arctic Monitoring and Assessment Programme, Oslo, Norway.
- Meteorological Conditions Hornsund, Spitsbergen 2000/2001*, 2001, Publications of the Institute of Geophysics Polish Academy of Science, D-57(341), Warszawa.
- Meteorological Conditions Hornsund, Spitsbergen 2001/2002, 2003*, Publications of the Institute of Geophysics Polish Academy of Science, D-60(351), Warszawa.
- Niedźwiedz T. (red.), 2003, *Słownik meteorologiczny*, Polskie Towarzystwo Geofizyczne, IMGW, Warszawa.
- Niedźwiedz T., 2006, *Główne cechy cyrkulacji atmosfery nad Spitsbergenem (XII 1950-IX 2006)*, *Problemy Klimatologii Polarnej*, 16, s. 91-105.
- Niedźwiedz T., 2013a, *Kalendarz typów cyrkulacji dla Spitsbergenu*, Wydział Nauk o Ziemi Uniwersytetu Śląskiego, Sosnowiec (zbiór komputerowy dostępny w Katedrze Klimatologii).
- Niedźwiedz T., 2013b, *The atmospheric circulation*, [w:] A.A. Marsz, A. Styszyńska (red.), *Climate and Climate Change in Hornsund, Svalbard*, Gdynia Maritime University, Gdynia, s. 57-74.
- Niedźwiedz T., Łupikasza E., 2015, *Dynamika wskaźników cyrkulacji nad Spitsbergenem*, *Problemy Klimatologii Polarnej*, 25, s. 153-167.
- Niedźwiedz T., Ustrnul Z., 1989, *Wpływ cyrkulacji atmosferycznej na kształtowanie się zachmurzenia w Hornsundzie*, [w:] *Dorobek i perspektywy Polskich Badań Polarnych. XVI Sympozjum Polarne*, Uniwersytet Mikołaja Kopernika, Toruń, s. 158-160.
- Palm S.P., Marshak A., Yang Y., Spinhirne J., Markus T., 2010, *The influence of Arctic sea ice extent on polar cloud fraction and vertical structure and implications for regional climate*, *Journal of Geophysical Research*, 115, D21209; doi: 10.1029/2010JD013900.

- Polyakov I.V., Walsh J.E., Kwok R., 2012, *Recent changes of Arctic multiyear sea ice coverage and the likely causes*, Bulletin of the American Meteorological Society, 93, s. 145-151.
- Przybylak R., 2003, *The Climate of the Arctic*, Atmospheric and Oceanographic Science Library, 26, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht-Boston-London.
- Przybylak R., 2007, *Współczesne zmiany klimatu w Arktyce*, [w:] A. Styszyńska, A.A. Marsz (red.), *Zmiany klimatyczne w Arktyce i Antarktyce w ostatnim pięćdziesięcioleciu XX wieku i ich implikacje środowiskowe*, Akademia Morska, Gdynia, s. 93-110.
- Przybylak R., Araźny A., Kejna M., Maszewski R., 2012, *Topoclimatic Diversity in Forland-sundet Region (NW Spitsbergen) in Global Warming Conditions*, Nicolaus Copernicus University, Oficyna Wydawnicza Turpress, Toruń.
- Raatz W.E., 1981, *Trends in cloudiness in the Arctic since 1920*, Atmospheric Environment, 15, s. 1503-1506.
- Schweiger A., 2004, *Changes in seasonal cloud cover over the Arctic seas from satellite and surface observations*, Geophysical Research Letters, 31, L12207.
- Schweiger A.J., Key J.R., 1992, *Arctic cloudiness: comparison of ISCCPC2 and NIMBUS-7 satellite-derived cloud products with a surface based climatology*, Journal of Climate, 5, s. 1514-1527.
- Soroka J., Matuszko D., 2013, *Trudności w wizualnej ocenie zachmurzenia w Hornsundzie*, Problemy Klimatologii Polarnej, 23, s. 147-156.
- Stroeve J.C., Serreze M.C., Holland M.M., Kay J.E., Maslanik J., Barrett A.P., 2012, *The Arctic's rapidly shrinking sea ice cover: a research synthesis*, Climate Change, 110, s. 1005-1027.
- Turner J., Gareth J.M., 2011, *Climate change in the Polar Regions*, Institute of Arctic and Alpine Research (INSTAAR), University of Colorado, Colorado.
- Vavrus S.J., Bhatt U.S., Alexeev V.A., *Factors influencing simulated changes in future arctic cloudiness*, Journal of Climatology, 24, s. 4817-4830.
- Vowinckel E., Orvig S., 1962, *Relation between solar radiation income and cloud type in the Arctic*, Journal of Applied Meteorology, 1, s. 552-559.
- Webber G.R., 1994, *On the seasonal variation of local relationship between temperature, temperature range, sunshine and cloudiness*, Theoretical and Applied Climatology, 50, 1-2, s. 15-22.

[Wpłynęło: luty; poprawiono: czerwiec 2016 r.]

OSKAR LIPIŃSKI, EWA ŁUPIKASZA

THE ROLE OF ATMOSPHERIC CIRCULATION IN SHAPING TOTAL CLOUDINESS OVER SPITSBERGEN (1983-2013)

The main island of the Svalbard Archipelago, Spitsbergen, is located in the centre of the Atlantic sector of the Arctic and is exposed to an increased dynamic of change in weather conditions, the shaping of which is affected by specific synoptic situations. In the work described here, it was the impact of atmospheric circulation on cloudiness over Spitsbergen that was studied, by reference to (1983-2013) average daily values for cloudiness at the Ny-Ålesund, Svalbard Lufthavn and Hornsund Meteorological Stations. The influence of atmospheric circulation was examined on the basis of a simpli-

fied *Calendar of synoptic situations for Spitsbergen* (Niedźwiedź, 2013), whose classification embraces 5 cyclonic, 5 anticyclonic and 1 undetermined type. The average daily values for cloudiness referred to provided the basis for further calculations of annual, monthly and seasonal values, with results then being presented in relation to the course over years and seasons, as conditioned by the amount of sunlight reaching Spitsbergen at different times of the year. The analysis thus took in the polar day, the polar night and two much shorter (spring and autumn) transition periods, which are of somewhat different lengths at the several different stations. Annual courses for the proportions of days capable of being regarded as characteristic were then described, while a final stage to the work concerned the relationship between cloudiness and the eleven aforementioned types of atmospheric circulation. Average values for sky cover with different circulation types were calculated, as were the conditional probabilities relating to the occurrence of the characteristic days. The results demonstrate that, notwithstanding environmental conditions, atmospheric circulation plays an important role in cloud formation over the whole island. However, despite the relatively short distances involved, the stations analysed were found to be characterised by significant differences where the spatial distribution of values for levels of sky cover by cloud were concerned. The causal relationship between cloudiness and respective circulation types is not as important as the direction of advection of air masses. The highest mean daily cloudiness values were reported in circulation types entailing advection from the south, i.e. Sc+SWc and Sa+SWa (relating to both cyclonic and anticyclonic types). Lowest average levels of cloudiness co-occurred under the Na+NEa and Nc+NEc circulation types. The total number of characteristic days at particular stations is also quite varied. Ny-Ålesund reports the most cloudless days (N=0%) and clear days (N<20%) during the year. The same is true of the number of completely overcast days (N=100%). The largest number of cloudy days (N>80%) characterises Hornsund, the most southerly of the stations on Spitsbergen studied. At Svalbard Lufthavn, average cloudiness during the polar night is greatest when the air flow originates in the north. The greatest variation in the distribution of cloudiness is to be observed during the polar night (at Svalbard Lufthavn and Ny-Ålesund) or in the autumn transitional period (Hornsund).

