

## OPADY MARZĄCE I GOŁOLEDŹ W HORNSUNDZIE (SW SPITSBERGEN)

### FREEZING PRECIPITATION AND GLAZE AT HORNSUND (SW SPITSBERGEN)

Jakub Soroka<sup>1</sup>, Maciej Benedyk<sup>2</sup>, Dorota Matuszko<sup>3</sup>

<sup>1</sup> – Stacja Hydrologiczno-Meteorologiczna w Gorzowie Wielkopolskim, Oddział we Wrocławiu, IMGW – PIB  
ul. Sybiraków 10, 66-400 Gorzów Wielkopolski  
jakub.soroka@imgw.pl

<sup>2</sup> – Centralne Biuro Prognoz Lotniczych – Meteorologiczne Biuro Nadzoru, IMGW – PIB,  
ul. Podleśna 61, 01-673 Warszawa  
maciej.benedyk@imgw.pl

<sup>3</sup> – Zakład Klimatologii, Instytut Geografii i Gospodarki Przestrzennej, Uniwersytet Jagielloński  
ul. Gronostajowa 7, 30-387 Kraków  
d.matuszko@uj.edu.pl

**Zarys treści.** Artykuł przedstawia charakterystykę opadów marznących i gołoledzi w strefie polarnej na podstawie danych z Polskiej Stacji Polarnej w Hornsundzie. Analizie poddano opady w 34 sezonach zimowych (od 1982/83 do 2015/16 roku). W okresie tym wystąpiło łącznie 197 dni z opadami powodującymi gołoledź. Zjawiska te występowały od września do czerwca, z największym nasileniem od października do maja. Zmiana liczby dni z gołoledzią w następujących po sobie sezonach zimowych była bardzo zróżnicowana (od 0 do 17 dni na sezon). W badanym okresie nie zaobserwowano istotnej tendencji zmian liczby dni z opadami marznącymi. Najczęściej opady takie występowały przy cyklonalnym typie cyrkulacji: adwekcji mas powietrza z kierunków od S do W oraz przy zatoce niżowej i centrum niżu w rejonie Spitsbergenu. Typową sytuacją sprzyjającą pojawieniu się gołoledzi było zbliżanie się niżu z nad Morza Grenlandzkiego lub Morza Norweskiego z frontem ciepłym, przed którym występowała strefa opadów marznących.

**Słowa kluczowe:** opady marznące, opady przechłodzone, gołoledź, Polska Stacja Polarna Hornsund, sytuacja synoptyczna.

### 1. Wstęp

Występowanie opadów o charakterze marznącym powoduje duże trudności w działalności człowieka. Dotyczy to zwłaszcza infrastruktury technicznej eksponowanej na warunki atmosferyczne oraz transportu lotniczego, morskiego i drogowego. Zewnętrzne elementy techniczne w postaci anten telekomunikacyjnych oraz linii przesyłowych poddane wpływowi intensywnych opadów marznących mogą stać się bezużyteczne i prowadzić do ograniczeń w działalności człowieka.

Gołoledź na Spitsbergenie nie jest zjawiskiem częstym, ale jej wystąpienie może pociągać za sobą poważne konsekwencje. Z Polskiej Stacji Polarnej w Hornsundzie do najbliższej osady, skąd mogłaby nadejść ewentualna pomoc (Longyearbyen), jest ponad 130 km. W sytuacji potencjalnego zagrożenia, szybkim środkiem dotarcia w rejon Hornsundu jest śmigłowiec. Dla tego rodzaju transportu jednym z największych zagrożeń jest wystąpienie opadu marznącego, który stanowi główną przyczynę oblodzenia statku powietrznego. Lód osadzający się wskutek zamarzania opadu prze-

chłodzonego narasta bardzo szybko i jest trudny do usunięcia (Szewczak 2010). Występowanie opadów powodujących gołoledź w rejonie środkowego i południowego Spitsbergenu wyklucza użycie śmigłowca, co w sytuacji kryzysowej w Polskiej Stacji Polarnej (np. nagła choroba, pożar, wypadek itp.) ma bardzo duże znaczenie.

Innymi ważnymi skutkami pojawiania się pokrywy lodowej na gruncie (w tym gołoledzi) w środowisku naturalnym ubogich ekosystemów polarnych są: niszczenie szaty roślinnej, wpływ na mikroorganizmy glebowe oraz ograniczenie możliwości zdobywania pożywienia przez renifery prowadzące do zmniejszenia populacji tych zwierząt itp. (Robinson i in. 1998, Coulson i in. 2000, Kohler i Aanes 2004, Hansen i in. 2011). Z tego względu niezbędnym wydaje się poznanie klimatologicznej charakterystyki opadów marznących oraz ich synoptycznych uwarunkowań, co jest celem niniejszego opracowania.

Zagadnienie występowania opadów przechłodzonych i gołoledzi w klimacie polarnym jest stosunkowo rzadko podejmowane w światowej literaturze klimatologicznej. Większość badań dotyczy kontynentu amerykańskiego, a szczególnie Arktyki Kanadyjskiej. Opadom marzącym w Kanadzie swoje prace poświęcili m.in. Strapp i in. (1996) oraz Stuart i Isaac (2010), którzy zaprezentowali klimatologiczno-meteorologiczną analizę tego zjawiska. Wnikliwą charakterystykę konkretnych zdarzeń opadów przechłodzonych w Arktyce Kanadyjskiej (miejscowości Inuvik i Yellowknife) przedstawili Magono i Kikuchi (1980) oraz Kajikawa i in. (1988, 2000). Ten ostatni zespół udokumentował m.in. przypadek z dnia 20 grudnia 1995 r., w którym wystąpił opad kropel przechłodzonej mżawki przy temperaturze powietrza dochodzącej do  $-23^{\circ}\text{C}$ . W Europie opady marzące były przedmiotem studiów Carière i in. (2000), jednak obszar ich badań sięgnął najdalej na północ zaledwie do środkowej Skandynawii.

W polskiej literaturze dotyczącej klimatu obszarów polarnych nie było dotychczas opracowań poświęconych zagadnieniu opadów marzących i gołoledzi. Przyczyną takiego stanu rzeczy jest prawdopodobnie trudność i czasochłonność pozyskania informacji o opadach marzących i gołoledzi ze współczesnych baz danych meteorologicznych. Zarówno w charakterystykach klimatu Arktyki (Martyn 1995, Przybylak 2016), jak i w opracowaniach klimatu rejonu Polskiej Stacji Polarnej (Kierzkowski 1996, Marsz i Styszyńska 2013) w ogóle nie pojawiło się zagadnienie opadów marzących. Szczegółową analizę opadów z uwzględnieniem ich rodzajów w Hornsundzie prowadziła E. Łupikasza (2003, 2008, 2013), jednak także w jej pracach nie znalazła się wzmianka o opadach przechłodzonych.

Pomiary opadów marzących i obserwacja wystąpienia gołoledzi wymaga obecności obserwatora meteorologicznego na stacji, co w dobie postępującej automatyzacji systemów pomiarowych jest coraz radsze. Wprawdzie współczesne automatyczne stacje pomiarowe posiadają czujniki wykrywania opadów i identyfikacji ich rodzaju, jednak zdaniem autorów, ich skuteczność oraz trafność rozpoznania typów zjawisk w obszarach polarnych, zwłaszcza w zakresie opadów powodujących gołoledź jest wciąż niska. Dla obserwatora meteorologicznego opady marzące są zjawiskiem łatwym do wykrycia i nawet mało doświadczony pracownik stacji potrafi prawidłowo rozpoznać ten typ hydrometeoru. Aktualnie na obszarze Spitsbergenu funkcjonują jedynie trzy stacje meteorologiczne pracujące w trybie całodobowym z obsługą obserwatora: Longyearbyen (Svalbard Lufthavn), Barentsburg oraz Polska Stacja Polarna Hornsund. W norweskiej części Arktyki znajdują się jeszcze trzy podobnie działające stacje – na wyspach Bjørnøya, Hopen i Jan Mayen.

Położenie Polskiej Stacji Polarnej Hornsund ( $\varphi = 77^{\circ}00'\text{N}$ ,  $\lambda = 15^{\circ}33'\text{E}$ ,  $H = 10$  m n.p.m.) oraz wpływ głównych czynników klimatotwórczych regionu został szczegółowo opisany w monografii klimatu Hornsundu pod red. A.A. Marsza i A. Styszyńskiej (2013).

## 2. Opady marzące – definicje i geneza

W literaturze naukowej pojęcie opadu marzącego nie budzi wątpliwości. Według wytycznych Światowej Organizacji Meteorologicznej (WMO-No. 407, 1975) oraz *Instrukcji dla stacji meteorologicznych* (Stepko i Trzebunia 2015) opad marzący to opad deszczu lub mżawki, którego krople mają temperaturę niższą od 0°C. Przy zetknięciu się z powierzchnią gruntu, przedmiotami na gruncie i statkami powietrznymi w locie, krople opadu przechłodzonego tworzą mieszaninę wody i lodu o temperaturze 0°C. W *Słowniku Meteorologicznym* (Niedźwiedź 2003a) marzący deszcz i mżawka są opisane jako opad, którego krople zamarzają w momencie zetknięcia się z gruntem lub przedmiotami znajdującymi się w powietrzu – w tej definicji nie ma wzmianki o temperaturze kropeł. Może się zdarzyć sytuacja, że występuje opad ciekły o dodatniej temperaturze, zbliżonej do 0°C, który padając na zamrożony grunt lub przedmioty o ujemnej temperaturze, na ich powierzchni zamarznie tworząc gołoledź. Jako że obserwator na stacji meteorologicznej nie ma możliwości pomiaru temperatury cząstek opadu, praktyczna identyfikacja opadu marzącego sprowadza się do stwierdzenia, czy opad ciekły zamarza na powierzchni gruntu lub eksponowanych przedmiotów.

Drugie istotne pojęcie związane z opadami marzącymi to gołoledź. W *Instrukcji dla stacji meteorologicznych* oraz przepisach WMO jest ona definiowana jako gładki i zwarty osad lodu, na ogół przezroczysty, powstający wskutek zamarzania przechłodzonych kropeł deszczu na przedmiotach, których powierzchnia ma temperaturę niższą lub nieznacznie wyższą od 0°C. Gołoledź pokrywa wszystkie części powierzchni wystawionych na opad. Stanowi na ogół osad (warstwę lodu) dość jednorodny, pojawia się na gruncie i w pobliżu gruntu, gdy kropelki mżawki lub krople deszczu padają przez dostatecznie grubą warstwę powietrza o temperaturze niższej od punktu zamarzania. Z gołoledzią nie należy utożsamiać lodu na gruncie, który powstał wskutek: zamarznięcia wody pochodzącej z uprzednio spadłego opadu nie przechłodzonych kropełek mżawki lub kropeł wody, ponownego zamarznięcia wody pochodzącej z zupełnego lub częściowego stopnienia śniegu, ubicia śniegu na gruncie wskutek ruchu drogowego (Stepko i Trzebunia 2015, WMO-No. 407, 1975). Dodatkowo definicja gołoledzi w *Słowniku Meteorologicznym* (Niedźwiedź 2003a) jest rozszerzona o przypadek zamarzania nieprzechłodzonych kropełek deszczu lub mżawki na powierzchniach, których temperatura jest niższa od 0°C.

Na stacji meteorologicznej w Polskiej Stacji Polarnej w Hornsundzie, zgodnie z zasadami obowiązującymi w IMGW (*Zbiór zasad...* 1992), obserwator rozróżnia dwie fazy gołoledzi: narastającą i zalegającą. Gołoledź narastająca jest osadem, który jest w trakcie tworzenia się, zwiększania swojej grubości i występuje tylko podczas trwania opadu przechłodzonego. Z kolei gołoledź zalegająca jest warstwą lodu, która już nie przyrasta i może występować nawet przez kilka, kilkanaście dni po ustaniu opadów marzących.

Po wnikliwej analizie danych pochodzących ze stacji w Hornsundzie autorzy zdecydowali się skoncentrować na przypadkach gołoledzi narastającej, której występowanie jest równe czasowi trwania opadów marzących. W niniejszej pracy, zgodnie ze *Słownikiem Meteorologicznym* (Niedźwiedź 2003a) oraz *Instrukcją dla stacji meteorologicznych* (Stepko i Trzebunia 2015), pojęcia: „opady marzące”, „opady przechłodzone”, „gołoledź” oraz „gołoledź narastająca” są – w zakresie czasu ich występowania – traktowane jako synonimy.

Z punktu widzenia meteorologii synoptycznej opady marzące i gołoledź można zasadniczo podzielić na frontalne i wewnątrzmasowe. Ich cechą wspólną jest konieczność wystąpienia adwekcji

ciepłego i wilgotnego powietrza. Dodatkowo za warunki sprzyjające wystąpieniu tych zjawisk uważa się (Kaczanowski 1987):

– dla stref frontalnych:

- temperaturę na powierzchni 850 hPa od +5°C do -5°C (najkorzystniej, gdy wartości temperatury między powierzchnią ziemi a poziomem 850 hPa wahają się od 0°C do -5°C),
- niewielką pionową rozciągłość zachmurzenia frontowego,
- izotermę 0°C w pobliżu górnej granicy chmur,
- izotermę -10°C na wysokości 2-3 km,

– wewnątrz masy powietrza:

- inwersję temperatury między wysokością 500 m a 1500 m,
- wystąpienie inwersji w grubej warstwie chmur.

Należy podkreślić, że są to warunki sprzyjające, a nie konieczne, zatem brak jednego z czynników nie zawsze przekreśla możliwości wystąpienia opadów marznących.

### 3. Materiały źródłowe i metody opracowania

Występowanie opadów marznących i gołoledzi jest nieodłącznie związane z okresem zimowym i porami przejściowymi, dlatego analiza rocznego ich przebiegu została przeprowadzona w podziale na poszczególne okresy zimowe, tj. od września do czerwca, a nie jak to ma miejsce w typowych analizach klimatologicznych – od stycznia do grudnia. Okres potencjalnego występowania dni z gołoledzią w Hornsundzie niemal pokrywa się czasowo (jest tylko nieznacznie dłuższy) z pojęciem „okresu chłodnego” zastosowanego dla Polskiej Stacji Polarnej przez A. Marsza (2013) – od drugiej dekady września do drugiej dekady maja.

Zasadniczy materiał źródłowy stanowią dane obserwacyjne ze stacji meteorologicznej działającej w ramach Polskiej Stacji Polarnej w Hornsundzie na Spitsbergenie. Dane z lat 2012-2016 otrzymano dzięki uprzejmości Pana mgr. Tomasza Wawrzyniaka z Instytutu Geofizyki Polskiej Akademii Nauk, natomiast dane z wcześniejszego okresu zostały pozyskane w roku 2012 z nieistniejącej już dziś ogólnodostępnej bazy danych Glacio-Topoclim. Należy uzupełnić, że do końca sezonu 1999/2000 dane zostały opracowane i opublikowane przez Oddział Morski IMGW w Gdyni (Miętus 1999-2001), natomiast od sezonu 2000/2001 materiał obserwacyjny jest gromadzony i archiwizowany przez Instytut Geofizyki PAN w Warszawie.

Stacja ta pracuje w międzynarodowej sieci Światowej Organizacji Meteorologicznej. Regularne pomiary i obserwacje meteorologiczne zostały rozpoczęte latem 1978 r., jednak nieprzerwany ciąg obserwacyjny udało się uzyskać od sierpnia 1982 r. Analizie poddano 34 okresy zimowe – od 1982/83 do 2015/16 roku. Otrzymany materiał obserwacyjny stanowiły dane dobowe oraz terminowe z ośmiu obserwacji na dobę. Spośród danych dobowych wybrano dni z gołoledzią, tj. dobowy czas trwania gołoledzi narastającej i zalegającej. Do weryfikacji wyżej wymienionych danych, do wyodrębnienia zdarzeń gołoledzi narastającej oraz pomocniczo wykorzystano również czas trwania opadów ciekłych, mieszanych i stałych oraz temperatury ekstremalne. Natomiast z zestawień terminowych wyselekcjonowano obserwacje, podczas których zostały zanotowane następujące zjawiska zgodnie z liczbą klucza *ww* (pogoda bieżąca):

24 – marznąca mżawka lub marznący deszcz powodujący gołoledź, w ciągu ostatniej godziny, lecz nie w czasie obserwacji;

- 56 – mżawka marznąca, słaba, w czasie obserwacji;
- 57 – mżawka marznąca, umiarkowana lub silna, w czasie obserwacji;
- 66 – deszcz marzący, słaby, w czasie obserwacji;
- 67 – deszcz marzący, umiarkowany lub silny, w czasie obserwacji.

Pomocniczo wykorzystano również dane zaszyfrowane jako  $W_1$  – pogoda ubiegła. Do weryfikacji oraz opisu warunków meteorologicznych towarzyszącym opadom marzącym i gołoledzi przeanalizowano wartości terminowe: temperatury i wilgotności powietrza, kierunku i prędkości wiatru oraz sumę opadów.

Proces weryfikacji danych wykazał istnienie drobnych błędów polegających na niezgodności informacji zawartych w zestawieniach dobowych i terminowych. Do rozstrzygnięcia wątpliwych przypadków wykorzystano depeşe SYNOP dostępne w bazie OGIMET (Valor 2016). Trzy przypadki opadów marzących zostały potwierdzone na podstawie komentarzy autorstwa obserwatorów pracujących w Hornsundzie publikowanych w Biuletynach Meteorologicznych od 2009 roku (Bania i in. 2011, Kępski i in. 2013, 2014). Efektem weryfikacji materiału obserwacyjno-pomiarowego jest lista przypadków opadów marzących w sezonach zimowych 1982/83-2015/16. Z listy tej sporządzono zestawienie liczby dni z opadem marzącym w miesiącu. Należy zwrócić uwagę, że częstość tego zjawiska jest mniejsza niż liczba dni z gołoledzią, gdyż nie uwzględnia czasu trwania gołoledzi zalegającej. Scharakteryzowano przebieg średniej miesięcznej liczby dni z gołoledzią w skali sezonu zimowego. Dla każdego okresu chłodnego wyznaczono daty pierwszego i ostatniego przypadku opadów marzących oraz obliczono średnie wieloletnie daty początku i końca okresu z gołoledzią. Każdemu dniu z gołoledzią narastającą przypisano typ cyrkulacji wg kalendarza T. Niedźwiedzia (2016) i przeanalizowano powiązania obu elementów.

Analizę synoptyczną wybranych przypadków wystąpienia opadów marzących w Hornsundzie przeprowadzono na podstawie przyziemnych map synoptycznych, map topografii barycznej z poziomów 700 i 850 hPa oraz diagramów aerologicznych. Wykorzystano mapy przyziemne służb meteorologicznych: brytyjskiej (UKMO) i niemieckiej (DWD), udostępnione na stronach internetowych <http://www.wetterzentrale.de> oraz <http://wetter3.de>. Mapy topografii barycznej bezwzględnej z poziomu 850 hPa (ok. 1500 m nad poziomem gruntu) posłużyły głównie do wyznaczenia obszarów ciepła i chłodu, pól wilgotności, określenia kierunku i charakteru adwekcji. Z synoptycznego punktu widzenia istotną pomocą były także mapy z poziomu 700 hPa, ponieważ odpowiadają wysokości ok. 3000 m, na której adwekcyjne zmiany ciśnienia są równe zeru. Układy baryczne oraz fronty atmosferyczne na tym poziomie przemieszczają się zgodnie z regułą prądu sterującego, czyli równolegle do kierunku izohips (linii geopotencjałów) z prędkością wiatru gradientowego. W artykule wykorzystano mapy topografii barycznej GFS dostępne pod adresem: <http://www1.wetter3.de/Archiv>. Kolejnym, niezwykle cennym materiałem pomocniczym były diagramy aerologiczne (udostępniane przez University of Wyoming na stronie: <http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>) będące zespołem krzywych przedstawiających procesy termodynamiczne zachodzące w atmosferze, a zatem wszelkie zależności między wielkościami charakteryzującymi stan powietrza. Najbliższą stacją wykonującą sondaż aerologiczne jest Bjørnøya – zlokalizowana ok. 300 km na południe od Hornsundu. Ponieważ w większości przypadków opady marzące na Spitsbergenie następują wskutek adwekcji powietrza z południa, jest to sondaż z kierunku napływu.

Pewien problem stanowiły różne okresy archiwizacji map i diagramów, przez co analiza najstarszych przypadków wystąpienia opadów marzących nie mogła być w pełni udokumentowana. Innym

ważnym problemem był zasięg kartowania zarówno map przyziemnych, jak i górnych. Obejmują one wprawdzie obszar Spitsbergenu, natomiast urywają się nieznacznie na północ od niego, co utrudnia interpretację sytuacji, w których następuje adwekcja powietrza z sektora północnego lub zalegają tam układy baryczne mające istotny wpływ na kształtowanie się warunków pogodowych na Spitsbergenie.

#### 4. Warunki meteorologiczne towarzyszące opadom marznącym

W Hornsundzie w czasie obserwowanych opadów marznących mżawki lub deszczu temperatura powietrza wahała się od  $-8,5^{\circ}\text{C}$  do  $1,2^{\circ}\text{C}$ , najczęściej był to przedział od  $-3^{\circ}$  do  $0^{\circ}\text{C}$ . Typową sytuacją było występowanie opadów marznących po długim okresie bezodwilżowym; przykładowo gołoledź mająca miejsce 27 i 28 kwietnia 1988 r. była poprzedzona 48-dniowym okresem z temperaturą powietrza poniżej  $0^{\circ}\text{C}$ . Częste były również przypadki, że po kilkudniowej odwilży i opadach ciekłych pojawiały się opady marznące przechodzące w opady śniegu z jednoczesnym spadkiem temperatury powietrza (np. 20 kwietnia 2003 r.). Charakterystyczne dla pogody z gołoledzią są gwałtowne wzrosty lub spadki temperatury powietrza, np. 22 stycznia 1996 r. zanotowano opad przechłodzony trwający zaledwie pół godziny, który był poprzedzony wzrostem temperatury od  $-10^{\circ}$  do  $0^{\circ}\text{C}$ , natomiast po tym opadzie zaobserwowano spadek temperatury do  $-12^{\circ}\text{C}$  w ciągu 12 godzin. Warty odnotowania są przypadki opadów przechłodzonych przy niskich wartościach temperatury powietrza, i tak dnia 1 marca 1993 r. marznąca mżawka zdarzyła się przy temperaturze  $-8,5^{\circ}\text{C}$ , a 3 i 4 stycznia 2004 r. deszcz marznący padał przy temperaturze  $-6^{\circ}$ ,  $-7^{\circ}\text{C}$ . Z drugiej strony opady przechłodzone mogą występować przy dodatniej temperaturze powietrza, np. 9 listopada 2011 r. marznącą mżawkę odnotowano przy temperaturze  $1,2^{\circ}\text{C}$ . Podsumowując, zmiany temperatury powietrza w czasie przechodzenia stref z marznącymi opadami są nieregularne i uzależnione niemal wyłącznie od czynnika adwekcyjnego.

Reżim wiatru w Hornsundzie jest silnie uzależniony od wpływu warunków lokalnych, takich jak przebieg linii brzegowej oraz położenie stacji względem elementów rzeźby terenu (Styszyńska 2013) i często nie nawiązuje do ogólnego kierunku napływu mas powietrza ze strefami opadów marznących. Z tego powodu wnikliwa analiza struktury wiatru przyziemnego w dniach z gołoledzią nie ma zasadnienia, a także dlatego że gołoledź znacznie obniża sprawność wiatromierza i często blokuje jego działanie, stąd do wyników pomiarów wiatru należy przy tych zjawiskach podchodzić z dużą dozą ostrożności. Dotyczy to również, choć w mniejszym stopniu, wiatromierza z funkcją ogrzewania, jaki od roku 2001 funkcjonuje w Hornsundzie. Pobieźna obserwacja danych anemologicznych podczas występowania opadów przechłodzonych wskazuje na istnienie dwóch głównych grup kierunków wiatru. Pierwsza grupa to wiatr z kierunków W i SW, natomiast drugą grupę stanowią kierunki E i NE. W czasie gołoledzi wiatr z pozostałych sektorów wieje sporadycznie. Porównując te wyniki z wieloletnią częstością kierunków wiatru (W i SW – 17% oraz E i NE – 62% za A. Styszyńską 2013) zwraca uwagę fakt, że wiatr z sektorów W i SW przy opadach marznących występuje znacznie częściej niż w ciągu całego roku. Cechą charakterystyczną dla dni z gołoledzią jest gwałtowna zmiana kierunku wiatru z E i NE na SW i W, bądź odwrotnie (z równoczesnym spadkiem lub wzrostem temperatury powietrza), co jest związane z przechodzeniem frontu atmosferycznego lub ze zmianą położenia centrum ośrodka niżowego.

Wydajność opadów marznących powodujących gołoledź jest trudna do oszacowania, gdyż w okresie za jaki mierzona jest suma opadów występowały zazwyczaj inne rodzaje opadów np. deszcz ze śniegiem, śnieg, śnieg ziarnisty, ziarna lodowe, deszcz niemarznący. Najczęściej natężenie opadów

przechłodzonych było oceniane na słabe. W przypadku przechłodzonego opadu mżawki, której siłą rzeczy wydajność jest mniejsza od deszczu, odnotowano łącznie 24 obserwacje ze zjawiskiem marznącej mżawki umiarkowanej lub silnej. Na podkreślenie zasługuje tu wspomniany wcześniej przypadek z dnia 1 i 2 marca 1990 r., kiedy przy temperaturze  $-8^{\circ}$ ,  $-7^{\circ}\text{C}$  zaobserwowano intensywną mżawkę marznącą. W ciągu 34 analizowanych sezonów zimowych zanotowano zaledwie 4 przypadki obserwacji, podczas których deszcz marznący osiągnął natężenie większe niż słabe. Na podstawie analizy sumy opadów oraz przebiegu rodzajów i natężenia opadów można szacować, że najczęściej wydajność opadów marznących nie przekracza 1 mm. Jeden z najbardziej znaczących epizodów miał miejsce na przełomie października i listopada 2009 r., kiedy po trzydniowych naprzemiennych opadach przechłodzonego deszczu i mżawki oraz deszczu i śniegu na eksponowanych przedmiotach i na gruncie powstała warstwa gołoledzi osiągająca grubość do 2,5 cm (Soroka i in. 2009).

## 5. Opady marznące w ujęciu klimatologicznym

W sezonach zimowych 1982/83-2015/16 zaobserwowano łącznie 197 dni z gołoledzią narastającą, co przekłada się na blisko 6 dni na sezon. W przebiegu sezonowym występują dwa maksima, pierwsze przypada od października do stycznia z kulminacją w grudniu, a drugie – na kwiecień (tab. 1). Najrzadziej opady marznące były notowane we wrześniu i czerwcu. Tylko w jednym miesiącu (grudniu) średnia liczba dni z opadem marznącym osiąga wartość 1. Dla orientacji, w warunkach klimatu Polski średnia liczba dni z gołoledzią (narastającą i zalegającą) wynosi od 0 do 10 dni w sezonie zimowym. Natomiast na Śnieżce, gdzie panują warunki bardziej zbliżone do polarnych, gołoledź pojawia się czterokrotnie częściej (24 dni w roku) niż w Hornsundzie (Dołęga i Lorenc 2012).

Tab. 1. Średnia miesięczna oraz maksymalna liczba dni z opadem marznącym w Hornsundzie w sezonach zimowych 1982/83-2015/16

Table 1. Average monthly and maximum number of days with freezing precipitation at Hornsund in the winters of 1982/83-2015/16.

	Liczba dni w miesiącu – Number of days in a month										Sezon Season
	IX	X	XI	XII	I	II	III	IV	V	VI	
Średnia Mean	0,1	0,8	0,7	1,0	0,7	0,6	0,4	0,9	0,5	0,1	5,8
Max	2	4	4	4	4	6	2	4	2	2	17
Sezon Season	1996/97	2007/08	2002/03	1994/95 1995/96	2009/10	2002/03	1990/91 1992/93 1994/95 2004/05 2010/11	1990/91 2001/02	1992/93 1995/96 1997/98	1992/93	2002/03

Opady marznące powodujące gołoledź występują w Hornsundzie od września do czerwca. W lipcu i sierpniu w ogóle nie odnotowano opadów marznących. Teoretycznie mogłyby one się pojawić w czasie tych dwóch letnich miesięcy; o ile w drugiej połowie sierpnia jest to całkiem możliwe, o tyle w lipcu prawdopodobieństwo takiego zdarzenia jest znikome. Zmienność długości okresu z opadami przechłodzonymi w poszczególnych latach jest bardzo duża, począwszy od 0 dni (trzykrotnie) i 1-2 dni (sześciokrotnie) do 240 dni w czasie zimy 1987/88. Do wyznaczenia przeciętnych dat pierwszego i ostatniego dnia z gołoledzią posłużono się medianą ze względu na dużą rozpiętość skrajnych dat

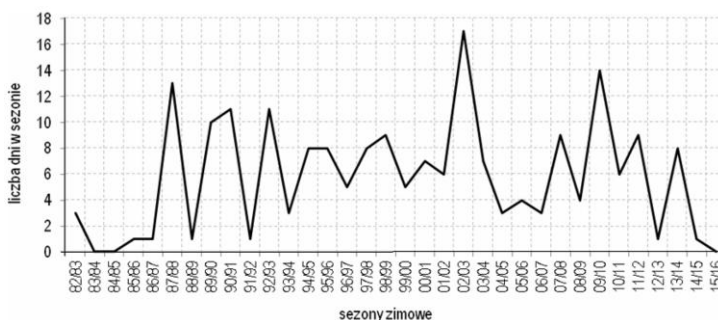
(np. pierwszy opad marznący w sezonie 2012/2013 został zaobserwowany dopiero 23 maja 2013 r., a ostatni taki opad w sezonie 1986/87 zanotowano już 16 września 1986 r.). Przeciętnie pierwszy przypadek opadu marznącego pojawia się na początku trzeciej dekady października, a ostatni epizod występuje na początku trzeciej dekady kwietnia (tab. 2), jednak bardzo duży rozstęp kwartylny tych wartości (64 dni dla pierwszego dnia oraz 98 dni dla ostatniego dnia) oraz stosunkowo przypadkowy charakter przyczyny opadów marznących, uwarunkowany przede wszystkim cyrkulacyjnie, każe traktować te daty wyłącznie orientacyjnie.

Tab. 2. Przeciętne oraz skrajne daty występowania pierwszych i ostatnich dni z opadem marznącym w Hornsundzie w sezonach zimowych 1982/83-2015/16

Table 2. Average and extreme dates of the first and last days with freezing precipitation at Hornsund in the winters of 1982/83-2015/16.

Dzień z opadem marznącym Day with freezing precipitation	Pierwszy dzień First day	Ostatni dzień Last day
Mediana / Median	21.10	21.04
Najwcześniejszy / Earliest	03.09.1996	16.09.1986
Najpóźniejszy / Latest	23.05.2013	03.06.1993

Przebieg liczby dni z gołoledzią z sezonu na sezon jest bardzo zróżnicowany (ryc. 1). Najczęściej opady marznące były obserwowane w czasie okresu chłodnego 2002/03 (łącznie 17 dni), a trzykrotnie takich zjawisk w ogóle nie odnotowano (zimy 1983/84, 1984/85 i 2015/16). W wieloletnim przebiegu liczby dni z gołoledzią w sezonie nie obserwuje się istotnej tendencji. Początek oraz koniec analizowanego okresu (lata 1982-1987 oraz 2014-2016) odznaczał się małą częstością opadów marznących, natomiast pozostała część wielolecia cechowała się dużą zmiennością z roku na rok bez wyraźnej tendencji.



Ryc. 1. Przebieg liczby dni z opadem marznącym w sezonach zimowych 1982/83-2015/16 w Hornsundzie

Fig. 1. Changes in the number of days with freezing precipitation at Hornsund in the winters of 1982/83-2015/16.

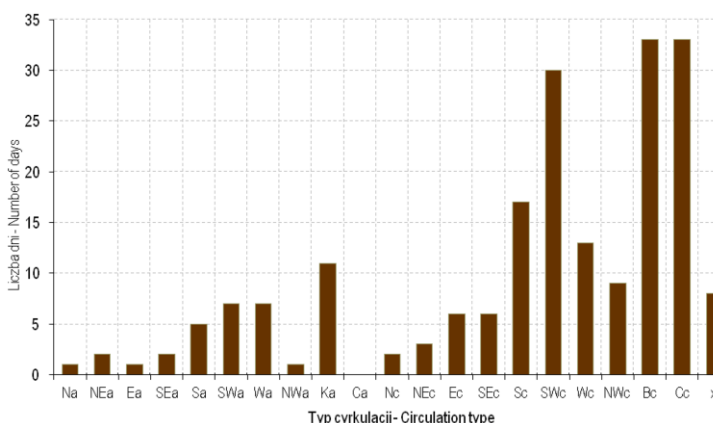
## 6. Opady marznące w świetle typów cyrkulacji

Decydującą rolę w kształtowaniu stosunków opadowych na Spitsbergenie odgrywa cyrkulacja atmosferyczna (Przybylak i Marciniak 1982, Niedźwiedź 2003b, Łupikaska 2013). W analizach klimatologicznych Spitsbergenu powszechnie używa się kalendarza typów cyrkulacji autorstwa T. Niedźwiedzia (2016). W wieloleciu 1982-2015 przeważały sytuacje cyklonalne (60%) nad antycyklonalnymi



(36%), natomiast dni z nieokreślonym polem barycznym bądź siodłem barycznym stanowiły zaledwie 4% wszystkich przypadków. Spośród wyżowych typów cyrkulacji nad Spitsbergenem najczęściej pojawiał się układ z klinem wyżowym (Ka – 10%) oraz adwekcja z kierunków E i SE (łącznie 9%), a najrzadziej adwekcja z sektora od S do NW (łącznie 7%). Najczęściej pojawiający się cyklonalny typ cyrkulacji to napływ powietrza z kierunku E (10%), a następnie z NE i SE (po 8%). Istotne znaczenie miały także sytuacje z zatoką niżową nad Spitsbergenem oraz adwekcją z N (po 7%).

Opady marznące najczęściej występowały przy cyklonalnym typie cyrkulacji (łącznie 77% przypadków), w tym trzy sytuacje: bruzda cyklonalna i centrum niżu w rejonie Spitsbergenu (po 17%) oraz adwekcja powietrza z SW (15%) towarzyszyły blisko połowie wszystkich przypadków dni z gołoledzią (ryc. 2). Napływ powietrza z SW w układzie niżowym jest również tym typem cyrkulacji, podczas którego zdarzają się najwyższe dobowe sumy opadów w ciągu całego roku (Łupikasz 2013). Opady marznące nie wystąpiły przy sytuacji, gdzie centrum wyżu znalazło się w rejonie obszaru badań, a zaledwie pojedyncze przypadki gołoledzi miały miejsce w antycyklonalnym napływie z kierunków NW, N, NE, E, SE oraz w cyklonalnej adwekcji z kierunku N i NE. Obecność opadów marznących wykazuje dużą zależność od typów cyrkulacji atmosferycznej. Sytuacjami niosącymi wyższe ryzyko pojawienia się gołoledzi w Hornsundzie są te, gdy Spitsbergen dostaje się pod wpływ adwekcji powietrza znanego z Cieśniny Duńskiej, Islandii i Morza Norweskiego. Szczegółowe objaśnienie sytuacji synoptycznej i mechanizmu powodującego gołoledź znajduje się w rozdziałach 2 i 7.



Ryc. 2. Łączna liczba dni z opadem marznącym w poszczególnych typach cyrkulacji (wg Niedźwiedzia) w sezonach zimowych 1982/83-2015/16

Fig. 2. Total number of days with freezing precipitation at Hornsund by type of circulation (according to Niedźwiedź) in the winters of 1982/83-2015/16.

## 7. Opady marznące a sytuacje synoptyczne – studium przypadku

Do analizy synoptycznej wybrano zarówno przypadki charakterystyczne, jak i mniej typowe, ale interesujące z meteorologicznego punktu widzenia. W miarę możliwości starano się uwzględniać sytuacje związane z adwekcją powietrza z różnych kierunków.

Do przypadków charakterystycznych należy zaliczyć te z wyraźną adwekcją ciepłego powietrza z sektora południowego, w których synoptyk na podstawie dostępnych materiałów prognozowałby

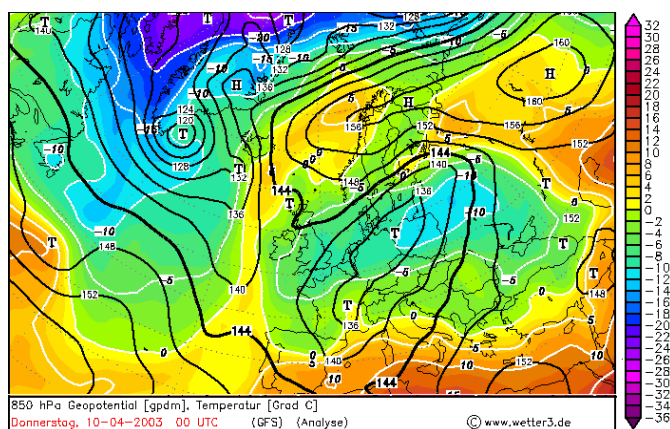
wystąpienie opadów marznących, a te faktycznie wystąpiły. Dodatkowym czynnikiem był czas trwania opadów. Wzięto pod uwagę przypadki, gdy zjawisko trwało powyżej 3 godzin, tak aby wykluczyć jego epizodyczny charakter. Do sytuacji mniej typowych zaliczono z kolei te, gdzie układy baryczne i kierunek adwekcji nie sugerowały napływu ciepłego powietrza i wystąpienia opadów marznących. Na podstawie dostępnych materiałów starano się prześledzić zmiany układów barycznych, a tym samym wyjaśnić dlaczego zjawisko wystąpiło.

### 7.1. Opady marznące 10 kwietnia 2003 r.

Sytuacja z 10 kwietnia 2003 r. ukazuje klasyczny przykład wystąpienia opadów marznących przed frontem ciepłym. Na mapie dolnej głównym ośrodkiem kształtującym pogodę rejonie Spitsbergenu jest niż położony na południe od Islandii i lokalny niż na Morzu Grenlandzkim z wyraźnym wycinkiem ciepłym od Spitsbergenu aż po Wyspy Brytyjskie. Przyziemne układy baryczne znajdują swoje pokrycie na mapie 850 hPa za wyjątkiem niżu znad Morza Grenlandzkiego. Na mapie tej (ryc. 3) widać wyraźną baroklinowość, czyli wzajemne przecinanie izohips z izotermami, świadczące o adwekcji powietrza ciepłego bądź chłodnego.

Ryc. 3. Mapa topografii barycznej bezwzględnej i temperatury na poziomie 850 hPa, 10 kwietnia 2003 r., godz. 00 UTC, analiza GFS (źródło: <http://www1.wetter3.de/Archiv/>)

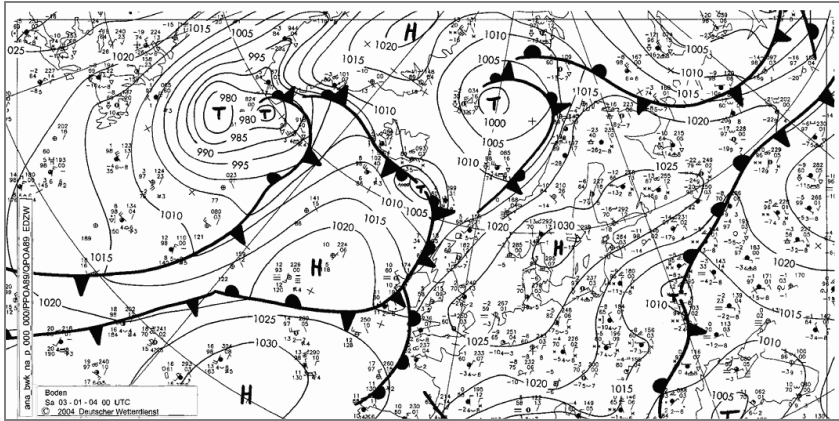
Fig. 3. Absolute topography and temperature chart at 850 hPa, 10 April 2003, 00 UTC, GFS analysis (source: <http://www1.wetter3.de/Archiv/>).



Na mapie dolnej ciepły front atmosferyczny położony jest na południe od Spitsbergenu. W wycinku ciepłym znajduje się wyż z centrum nad północną Skandynawią. Mapy górne wskazują na przemieszczanie wspomnianego frontu w kierunku E i NE. Adwekcja ciepła jest zatem słabsza niż byłoby to w przypadku adwekcji z południa. Wyspa Niedźwiedzia znalazła się już w cieplejszym powietrzu za frontem ciepłym. Wystąpiły tam opady mżawki przy temperaturze  $+2^{\circ}\text{C}$ . W Hornsundzie 10 kwietnia 2003 r. zanotowano ponad czterogodzinny epizod deszczu marznącego poprzedzonego opadem śniegu. W czasie przejścia frontu ciepłego temperatura wzrosła z  $-5^{\circ}\text{C}$  do  $0^{\circ}\text{C}$ , a kierunek wiatru zmienił się z E na W.

### 7.2. Opady marznące 3-4 stycznia 2004 r.

Mapa synoptyczna dolna z godz. 00 UTC (ryc. 4) przedstawia stacjonarny i pogłębiający się niż nad północnym Atlantykiem, drugi niż między Spitsbergenem a Grenlandią, będący dopiero w stadium powstawania oraz kolejny usytuowany na Morzu Arktycznym.



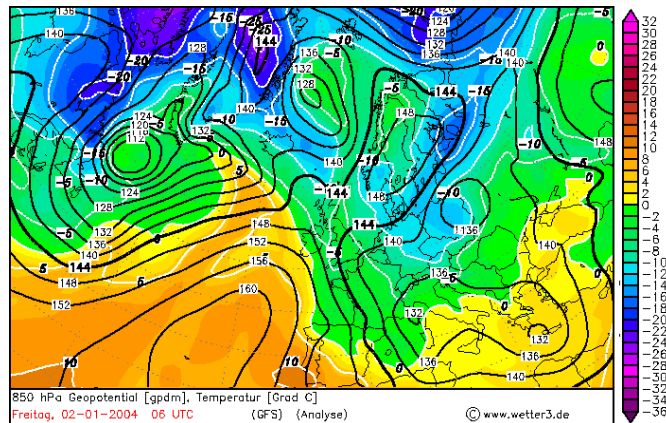
Ryc. 4. Mapa synoptyczna, 3 stycznia 2004 r., godz. 00 UTC, DWD  
(źródło: [http://www1.wetter3.de/Archiv/archiv\\_dwd.html](http://www1.wetter3.de/Archiv/archiv_dwd.html))

Fig. 4. Sea-level synoptic chart, 3 January 2004, 00 UTC, DWD  
(source: [http://www1.wetter3.de/Archiv/archiv\\_dwd.html](http://www1.wetter3.de/Archiv/archiv_dwd.html)).

Początkowo (2 stycznia) Hornsund znajdował się w tylnej części nizu znad Morza Arktycznego w chłodnej, chwiejnej i wilgotnej masie powietrza. Z czasem (co dobrze widać na mapach z poziomu 850 hPa – ryc. 5 i 6), napływ masy z kierunku SE zmienia się na SW, co skutkuje adwekcją coraz cieplejszego i wilgotniejszego powietrza docierającego do Hornsundu, które sprzyja powstawaniu opadów marznięcych, a tym samym narastaniu gołoledzi.

Ryc. 5. Mapa topografii barycznej bezwzględnej i temperatury na poziomie 850 hPa, 2 stycznia 2004 r., godz. 06 UTC, analiza GFS (źródło: <http://www1.wetter3.de/Archiv/>)

Fig. 5. Absolute topography and temperature chart at 850 hPa, 2 January 2004, 06 UTC, GFS analysis (source: <http://www1.wetter3.de/Archiv/>).



Potwierdzenie korzystnych warunków do wystąpienia wymienionych zjawisk można znaleźć na diagramie aerologicznym dla stacji Bjørnøya (ryc. 7). Temperatura powietrza od powierzchni ziemi do poziomu 850 hPa waha się od 0° do -7°C, natomiast izoterma -10°C znajduje się na wysokości ok. 2,3 km (zatem w przedziale 2-3 km, najbardziej korzystnym do powstawania opadów marznięcych).

Występująca w Hornsundzie gołoledź w dniach 3-4 stycznia 2004 r. wystąpiła w warunkach bezodwilżowych, przy temperaturze powietrza od -7° do -6°C. Słabe opady śniegu były przeplatane słabymi opadami deszczu marznięcego. Nie odnotowano istotnych zmian temperatury powietrza i kierunku wiatru (E).

Ryc. 6. Mapa topografii barycznej bezwzględnej i temperatury na poziomie 850 hPa, 3 stycznia 2004 r., godz. 12 UTC, analiza GFS (źródło: <http://www1.wetter3.de/Archiv/>)

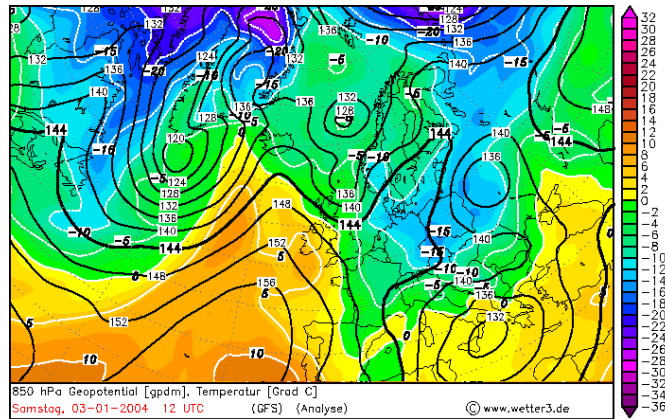


Fig. 6. Absolute topography and temperature chart at 850 hPa, 3 January 2004, 12 UTC, GFS analysis (source: <http://www1.wetter3.de/Archiv/>).

Ryc. 7. Sondaż aerologiczny ze stacji Bjørnøya, 2 stycznia 2004 r., godz. 12 UTC (źródło: <http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>)

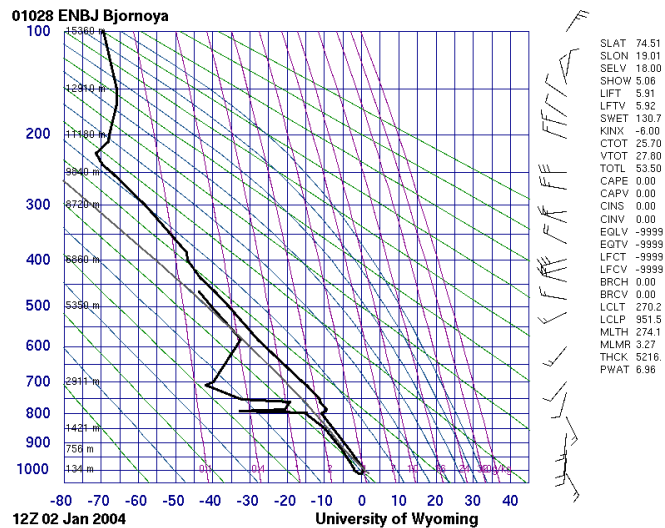


Fig. 7. Aerological diagram from the Bjørnøya station, 2 January 2004, 12 UTC (source: <http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>).

### 7.3. Opady marznące w dniach 30 października – 1 listopada 2009 r.

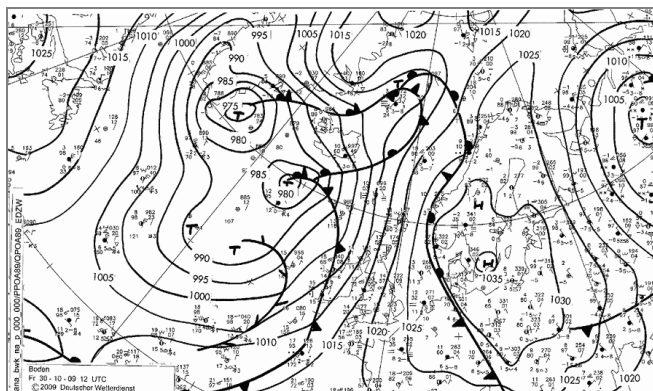
W analizowanych dniach Spitsbergen znajdował się początkowo w siodle barycznym (ośrodki niżowe znajdowały się na wschód i zachód od Hornsundu, wyżej z kolei na północ i południe). Wspomniane niżę łączył pofalowany front chłodny z fragmentem frontu ciepłego na południowy-wschód od Hornsundu (ryc. 8).

Stopniowa rozbudowa na wschód zatoki związanej z niżem znad wschodniej Grenlandii (widoczna zarówno na mapie przyziemnej, jak i na poziomie 850 hPa) spowodowała adwekcję ciepłego i wilgotnego powietrza z kierunku SW. Temperatura powietrza przy powierzchni ziemi na obszarze między Spitsbergenem a Wyspą Niedźwiedzią oscylowała wokół 0°C z zaznaczającym się niewielkim wzrostem temperatury w kierunku południowym. Różnica temperatury między powierzchnią ziemi a poziomem 850 hPa wynosiła ok. 5°C (ryc. 9). Izoterma -10°C początkowo znajdowała się na poziomie znacznie powyżej 3 km, później nieznacznie poniżej tej wysokości. Na stacji Bjørnøya panowała odwilż i występowały niemarznące opady deszczu oraz mżawki, w Hornsundzie natomiast tempe-

ratura podlegała nieregularnym wahaniom (od  $-3^{\circ}$  do  $+4^{\circ}\text{C}$ ) i naprzemiennie padał śnieg oraz opady marznące i niemarznące doprowadzając do powstania wyjątkowo grubego osadu lodu.

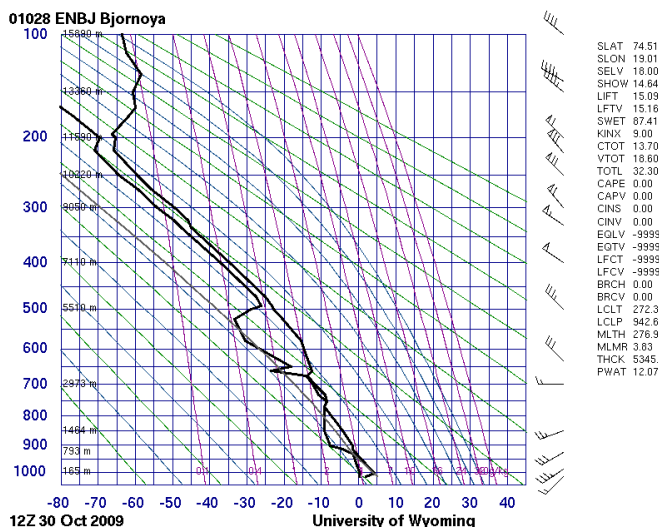
Ryc. 8. Mapa synoptyczna, 30 października 2009 r., godz. 12 UTC, DWD (źródło: [http://www1.wetter3.de/Archiv/archiv\\_dwd.html](http://www1.wetter3.de/Archiv/archiv_dwd.html))

Fig. 8. Sea-level synoptic chart, 30 October 2009, 12 UTC, DWD (source: [http://www1.wetter3.de/Archiv/archiv\\_dwd.html](http://www1.wetter3.de/Archiv/archiv_dwd.html)).



Ryc. 9. Sondaż aerologiczny ze stacji Bjørnøya, 30 października 2009 r., godz. 12 UTC (źródło: <http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>)

Fig. 9. Aerological diagram from the Bjørnøya station, 30 October 2009, 12 UTC (source: <http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>).



#### 7.4. Opady marznące 30 kwietnia 2000 r.

Na mapie synoptycznej z godziny 00 UTC można zaobserwować silnie rozbudowany wyż (1038 hPa) z centrum niedaleko na wschód od Spitsbergenu (ryc. 10). Ośrodek ten dynamicznie przemieszcza się w kierunku SSE, wymuszając tym samym napływ powietrza z południa. Z kolei niż znad Wysp Owczych szybko przemieszcza się na NNE, transportując ciepłe i wilgotne powietrze polarne morskie.

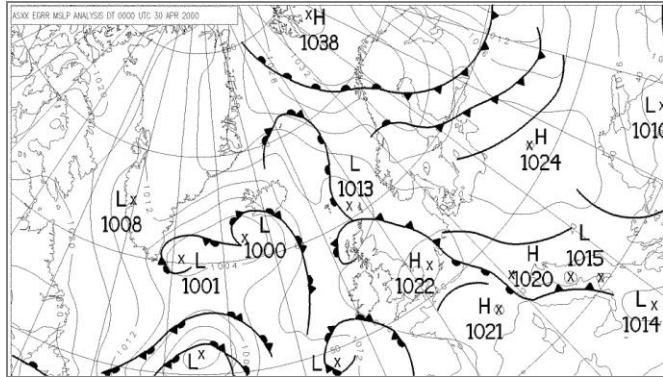
Po upływie doby oba ośrodki znajdują się na podobnej szerokości geograficznej. Taki układ baryczny wymusza adwekcję powietrza z południa, a silny wyż zalegający nad północną Skandynawią dynamizuje cyrkulację, przyczyniając się do napływu ciepłego i wilgotnego powietrza nad obszar Spitsbergenu (ryc. 11).

Na stacji w Hornsundzie zanotowano wtedy opady deszczu marznącego oraz narastającą gołoledź. Warto zwrócić uwagę na różnicę temperatury między pomiarem o 12 UTC ( $-3,8^{\circ}\text{C}$ ) a 15 UTC



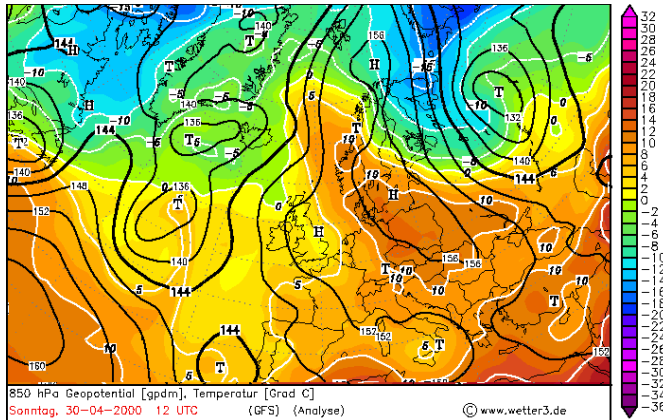
Ryc. 10. Mapa synoptyczna,  
30 kwietnia 2000 r., godz. 00 UTC,  
DWD (źródło:  
<http://www.wetterzentrale.de>)

Fig. 10. Sea-level synoptic chart,  
30 April 2000, 00 UTC,  
DWD (source:  
<http://www.wetterzentrale.de>).



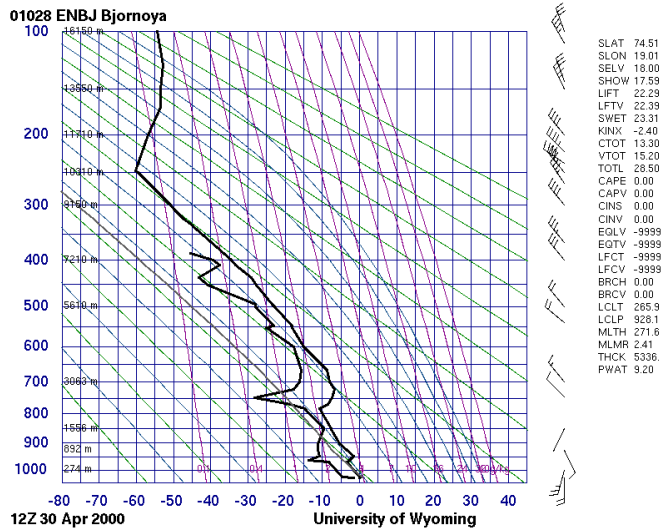
Ryc. 11. Mapa topografii barycznej  
bezwzględnej i temperatury  
na poziomie 850 hPa,  
30 kwietnia 2000 r., godz. 12 UTC,  
analiza GFS (źródło:  
<http://www1.wetter3.de/Archiv/>)

Fig. 11. Absolute topography  
and temperature chart at 850 hPa,  
30 April 2000, 12 UTC,  
GFS analysis (source:  
<http://www1.wetter3.de/Archiv/>).



Ryc. 12. Sondaż aerologiczny  
ze stacji Bjørnøya,  
30 kwietnia 2000 r., godz. 12 UTC  
(źródło: <http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>)

Fig. 12. Aerological diagram  
from the Bjørnøya station,  
30 April 2000, 12 UTC  
(source: <http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>).



(0,3°C), która wskazuje na wyraźną adwekcję ciepła, towarzyszy temu gwałtowna zmiana kierunku wiatru z E na WSW. Analizując diagram z Wyspy Niedźwiedziej (ryc. 12), czyli z kierunku napływu, należy stwierdzić, że wprawdzie zachmurzenie nie jest zwarte w przekroju pionowym, w którym wy-

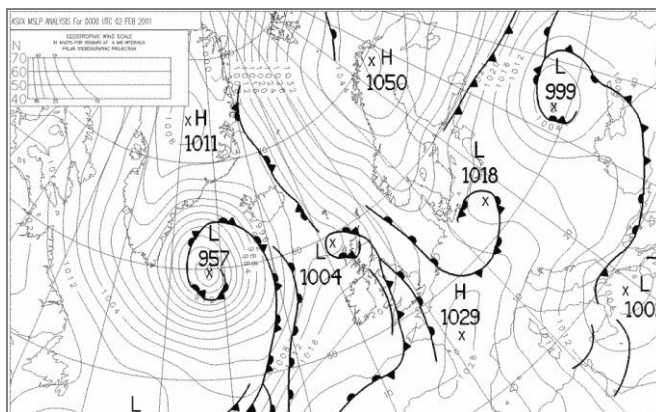
stępują poziomy z powietrzem suchszym, to biorąc pod uwagę różnicę temperatury od powierzchni ziemi do poziomu 850 hPa oraz wysokość zalegania izotermy  $-10^{\circ}\text{C}$ , istnieją przesłanki do wystąpienia opadów marznących.

### 7.5. Opady marznące w dniach 2-5 lutego 2001 r.

Ciekawa sytuacja miała miejsce w dniach 2-5 lutego 2001 r., kiedy w ciągu 4 dni notowano opady marznące oraz gołoledź narastającą. Analizując sytuację synoptyczną można zauważyć, że Spitsbergen znajduje się pod wpływem cyrkulacji antycyklonalnej, początkowo związanej z wyżami nad północną Skandynawią oraz drugorzędny nad Grenlandią (ryc. 13). Następnie wyż skandynawski przemieszcza się na zachód, wkraczając na obszar Morza Norweskiego.

Ryc. 13. Mapa synoptyczna,  
2 lutego 2001 r., godz. 00 UTC,  
UKMO (źródło:  
<http://www.wetterzentrale.de>)

Fig. 13. Sea-level synoptic chart,  
2 February 2001, 00 UTC,  
UKMO (source:  
<http://www.wetterzentrale.de>).

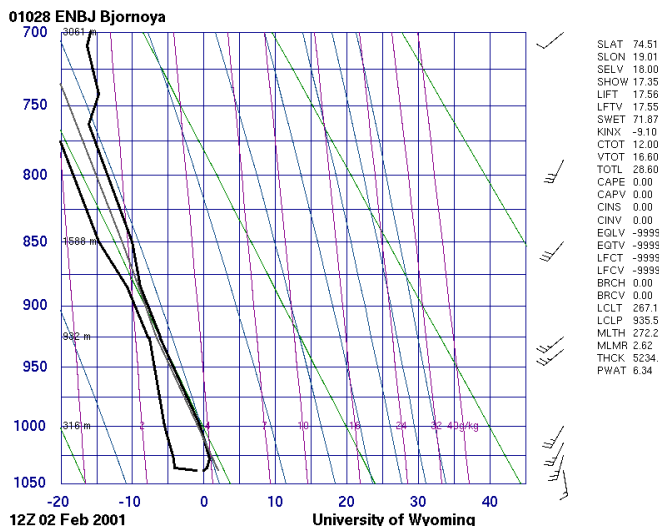


Na mapach topografii barycznej 700 hPa oraz 850 hPa sytuacja wygląda podobnie, jednak centrum wyżu jest przesunięte bardziej na północ od Skandynawii. Wspomniana wędrowka tego ośrodka powoduje zmianę cyrkulacji z południowo-zachodniej na zachodnią. Wydawać by się mogło, że taki typ cyrkulacji spowoduje adwekcję powietrza chłodniejszego, jednak wartości temperatury notowane w Hornsundzie oscylowały w tych dniach wokół  $0^{\circ}\text{C}$ . Źródłem tego ciepłego i wilgotnego powietrza są dwa niże: pierwszy powstały na północnym Atlantyku, który spowodował adwekcję ciepłego powietrza w wyższe szerokości geograficzne do niżu Islandzkiego. Tam z kolei pierwotne położenie wyżu nad Skandynawią wymusiło dalszą adwekcję tej masy na północny-wschód, właśnie w rejon Spitsbergenu. Wprawdzie wyż wskutek swojej wędrowki odciął możliwość dalszej adwekcji ciepłego i wilgotnego powietrza na północ, jednak powietrze wcześniej przetransportowane w rejon Spitsbergenu pozostało tam, aż do momentu jego przetransformowania. Proces transformacji masy (utrąty pierwotnych właściwości masy powietrza i nabrania cech powietrza otaczającego) widoczny jest chociażby w stopniowym spadku temperatury powietrza w Hornsundzie od 2 do 5 lutego.

Pionowy przekrój troposfery ze stacji Bjørnøya (ryc. 14) nie daje podstaw do prognozowania opadów marznących, jednak w takiej sytuacji synoptycznej i zmianie adwekcji z południowego zachodu na zachód wpływ mogło mieć położenie Wyspy Niedźwiedziej na południe od Hornsundu i brak wyraźnego napływu ciepła w wyższych warstwach atmosfery. Poniższy diagram, jak i te z późniejszych terminów sugerują bardziej możliwość wystąpienia opadów śniegu, m.in. z powodu niskiego poziomu zalegania izotermy  $-10^{\circ}\text{C}$ .

Ryc. 14. Sondaż aerologiczny ze stacji Bjørnøya, 2 lutego 2001 r., godz. 12 UTC (źródło: <http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>)

Fig. 14. Aerological diagram from the Bjørnøya station, 2 February 2001, 12 UTC (source: <http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>).

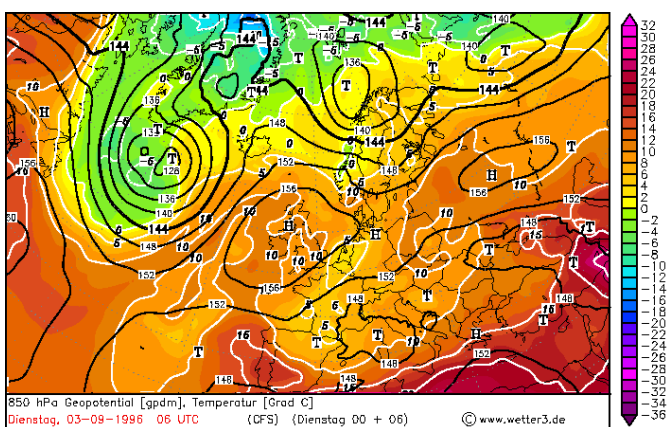


## 7.6. Opady marznące 3 września 1996 r.

O ile sytuacje synoptyczne, w których cyrkulacja wschodnia i północno-wschodnia prowadzą do powstania opadów marznięcych należą do epizodycznych, to jednak takie występowały i warto choć jedną z nich poddać analizie. Za przykład posłuży sytuacja z 3-4 września 1996 r. Analiza tego przypadku będzie nieco okrojona, ze względu na brak dostępnej przyziemnej mapy synoptycznej oraz ograniczony zasięg kartowania map górnych. Początkowo obszar Spitsbergenu znajdował się pod wpływem niżu z centrum w okolicach Wyspy Niedźwiedziej, determinującym cyrkulację wschodnią i transport ciepłego i wilgotnego powietrza (ryc. 15).

Ryc. 15. Mapa topografii barycznej bezwzględnej i temperatury na poziomie 850 hPa, 3 września 1996 r., godz. 06 UTC, analiza GFS (źródło: <http://www1.wetter3.de/Archiv/>)

Fig. 15. Absolute topography and temperature chart at 850 hPa, 3 September 1996, 06 UTC, GFS analysis (source: <http://www1.wetter3.de/Archiv/>).



Z czasem niż przemieszcza się w kierunku SE, umożliwiając tym samym adwekcję chłodniejszego powietrza z kierunku NE. Należy podkreślić, że adwekcja ta jest bardzo słaba i zachodzi w przyziemnym słabogradientowym polu ciśnienia, o czym świadczą cisze notowane w dwóch terminach obserwacji. Odpowiedzi na pytanie o przyczynę wystąpienia w tych dniach opadów marznięcych należy





## 8. Opady marznące a pokrywa śnieżna

Charakterystycznymi elementami kształtującymi pokrywę śnieżną w Hornsundzie i okolicznych lodowcach, oprócz samych opadów śniegu, są odwilże z towarzyszącymi im opadami deszczu oraz silny wiatr powodujący wywiewanie śniegu. Skutkiem tego w przekrojach pionowych pokrywy najczęściej obserwuje się warstwy lodoszreni oddzielające zasadnicze warstwy śniegu, często ubitego (Leszkiewicz i Pulina 1996, Leszkiewicz i Głowacki 2001). Badacze podkreślają, że powstawanie na powierzchni śniegu lodoszreni chroni zakumulowane poniżej warstwy śniegu i przyczynia się do zwiększenia grubości pokrywy śnieżnej. Z drugiej strony opad śniegu padający na warstwę lodu może być łatwo zwiewany, co stanowi istotną przeszkodę w jego akumulacji.

Pojawiająca się w czasie odwilży na powierzchni śniegu woda (zarówno z opadów deszczu, jak i z roztopiania) przenika w głąb pokrywy śnieżnej, a następnie zamarza tworząc warstwę lodoszreni. Głębokość penetracji wody opadowej i roztopowej w profilu śnieżnym zależy od intensywności opadów deszczu oraz skali i długości odwilży. Natomiast w przypadku występowania opadów marznących w warunkach ujemnej temperatury powietrza nie dochodzi do wsiąkania wody opadowej w pokrywę śnieżną. Przechłodzona woda opadowa zamarza momentalnie w zetknięciu z powierzchnią zalegającego śniegu tworząc warstwę gołoledzi. Miąższość tak powstałego lodu zależy wyłącznie od czasu trwania i natężenia opadów marznących.

Wydaje się, że rola opadów marznących powodujących gołoledź we współczesnych badaniach niwalnych obszarów polarnych jest przez naukowców niedostrzegana. Badacze właściwości pokrywy śnieżnej (m.in. Leszkiewicz i Pulina 1996, 1999; Jania 1997, Grześ i Sobota 2000, Leszkiewicz i Głowacki 2001, Laska i in. 2016) jako przyczynę tworzenia się warstw lodoszreni podają jedynie odwilż i związane z nią opady deszczu oraz roztopy. Ye i in. (2008) oraz Laska i in. (2016) zwracają uwagę na zjawisko „rain-on-snow”, mające duży wpływ na pokrywę śnieżną, bez rozróżnienia opadów na marznące i niemarznące, natomiast przypadki analizowane w niniejszym opracowaniu wskazują, że opady przechłodzone zamarzają natychmiast na powierzchni śniegu. Spośród blisko 200 dni z opadami marznącymi w Hornsundzie w latach 1982-2016 aż ok. 50% miało miejsce przy temperaturze powietrza poniżej 0°C, w warunkach bezodwilżowych. W skrajnych przypadkach (np. w dniach 31 grudnia 1989, 27 listopada 1994, 3-4 kwietnia 1998, 3-4 stycznia 2004) przechłodzone opady ciekłe występowały przy temperaturze od -7° do -5°C. Zatem w czasie mroźnej pogody na powierzchni pokrywy śnieżnej pojawiła się warstwa gołoledzi, która przy analizie całego profilu śnieżnego mogłaby być potraktowana jako lodoszreń pochodząca z epizodu odwilżowego. Takie nieprawidłowe założenie mogłoby doprowadzić do błędnej identyfikacji i datowania kolejnych warstw pokrywy śnieżnej. Dodać należy, że intensywność opadów marznących w warunkach mroźnej pogody nie jest duża; najczęściej suma opadów powodujących gołoledź nie przekracza 1 mm.

## 9. Podsumowanie

Niniejsze opracowanie stanowi analizę występowania opadów marznących powodujących gołoledź na stacji w Hornsundzie w ujęciu klimatologicznym i synoptycznym. Są to stosunkowo rzadkie zjawiska, jednak ich pojawienie się może nieść realne zagrożenie dla działalności człowieka na obszarach polarnych. W ciągu analizowanych 34 sezonów zimowych wystąpiły łącznie 197 dni z opadem marznącym. Pojawienie się gołoledzi w Hornsundzie jest możliwe od początku września do początku

czerwca, a największe prawdopodobieństwo jej pojawienia się przypada na okres od października do maja.

Występowanie opadów przechłodzonych w rejonie Polskiej Stacji Polarnej jest uwarunkowane niemal wyłącznie cyrkulacyjnie. Większość tego typu zjawisk jest związana z aktywnością cyklonalną i adwekcją ciepłego powietrza znad mórz Norweskiego i Grenlandzkiego. Nie jest wykluczone, że sporadycznie opady ciekłe mogą przybrać cechę opadu marznącego za sprawą czynnika lokalnego. Taką przyczyną może być zaleganie zimnego powietrza w przyziemnej warstwie spowodowane obecnością lodu morskiego w fiordzie Hornsund, bądź napływ mroźnego powietrza w rejon stacji wskutek splywu katabatycznego znad Lodowca Hansa przy jednoczesnej adwekcji ciepłych mas powietrza z opadami deszczu z kierunków od S do W.

W wieloletnim przebiegu liczby dni z opadem marznącym nie zaobserwowano istotnej tendencji. Nie jest widoczny również związek między liczbą dni z gołoledzią a stopniowym wzrostem średniej temperatury powietrza w kolejnych sezonach zimowych i latach. Badania zmienności cyrkulacji nad Spitsbergenem T. Niedźwiedzia (2013) wskazują na istnienie w latach 1951-2012 wzrostów wartości wskaźników cyrkulacji zachodniej oraz południowej objawiającymi się większą częstością adwekcji mas powietrza odpowiednio z zachodu i z południa. Następuje także wzrost aktywności układów niżowych w sezonach zimowych. Wymienione elementy wydają się być czynnikami sprzyjającymi większej częstości przypadków gołoledzi, jednak wzrost liczby tych zjawisk nie jest obserwowany.

#### **Podziękowania**

Autorzy składają serdecznie podziękowania Panom: mgr. T. Wawrzyniakowi oraz prof. P. Głowackiemu i prof. M. Lewandowskiemu za udostępnienie i możliwość wykorzystania danych meteorologicznych z Polskiej Stacji Polarnej Instytutu Geofizyki PAN w Hornsundzie. Wyrazy wdzięczności kierujemy również do Pana prof. T. Niedźwiedzia za udostępnienie kalendarza typów cyrkulacji atmosfery dla Spitsbergenu.

#### **Literatura:**

*Archiwum map synoptycznych DWD*, 2016. mapy analityczne DWD, strona internetowa: [http://www1.wetter3.de/Archiv/archiv\\_dwd.html](http://www1.wetter3.de/Archiv/archiv_dwd.html), dostęp: 1 listopada 2016 r.

*Archiwum map synoptycznych UKMO*, 2016. mapy analityczne UKMO, strona internetowa: [www.wetterzentrale.de](http://www.wetterzentrale.de), dostęp: 1 listopada 2016 r.

*Archiwum map topografii barycznej bezwzględnej i temperatury na poziomie 850 hPa*, 2016. mapy analityczne GFS, strona internetowa: <http://www1.wetter3.de/Archiv/>, dostęp: 1 listopada 2016 r.

*Archiwum sondaży aerologicznych ze stacji Bjornoya*, 2016. University of Wyoming, Department of Atmospheric Science, strona internetowa: [weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html](http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html), dostęp: 1 listopada 2016 r.

Bania M., Wawrzyniak T., 2011. *Biuletyn Meteorologiczny, Spitsbergen – Hornsund, listopad 2011*, Polska Stacja Polarna, Instytut Geofizyki PAN. [http://hornsund.igf.edu.pl/Biuletyny/BIULETYN\\_34/report\\_2011\\_11.pdf](http://hornsund.igf.edu.pl/Biuletyny/BIULETYN_34/report_2011_11.pdf), dostęp: 1 listopada 2016 r.

Carière J-M., Lainard C., Le Bot C., Robart F., 2000. *A climatology study of surface freezing precipitation in Europe*. *Meteorological Applications*, 7, 229-238, doi: 10.1017/S1350482700001560.

Coulson S.J., Leinaas H.P., Ims R.A., Søvik G., 2000. *Experimental manipulation of the winter surface ice layer: the effects on a High Arctic soil microarthropod community*. *Ecography*, 23 (3): 299-306, doi: 10.1111/j.1600-0587.2000.tb00285.x.

Dołęga E., Lorenc H., 2012. *Ryzyko występowania gołoledzi w Polsce*. [w:] Lorenc H. (red.), *Klęski żywiołowe a bezpieczeństwo wewnętrzne kraju*. IMGW – PIB, Warszawa: 98-119.

- Grześ M., Sobota I., 2000. *Winter snow accumulation and discharge from the Waldemar Glacier, northwestern Spitsbergen in 1996-1998*. Polish Polar Research, 21 (1): 19-32.
- Hansen B.B., Aanes R., Herfindal I., Kohler J., Sæther B.E., 2011. *Climate, icing, and wild arctic reindeer: past relationships and future prospects*. Ecology, 92 (10): 1917-1923, doi: 10.1890/11-0095.1.
- Jania J., 1997. *Glaciologia*. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa: 360 s.
- Kaczanowski L., 1987. *Analiza i prognoza pogody dla lotnictwa*. Dowództwo Wojsk Obrony Powietrznej Kraju, Warszawa: 234 s.
- Kajikawa M., Kikuchi K., Asuma Y., Inoue Y., Sato N., 2000. *Supercooled drizzle formed by condensation-coalescence in the mid-winter season of the Canadian Arctic*. Atmospheric Research, 52 (4): 293-301, doi: 10.1016/S0169-8095(99)00035-6.
- Kajikawa M., Sakurai K., Kikuchi K., 1988. *Characteristic Features of Supercooled Raindrops in the Mid-Winter Season of Arctic Canada*. Journal of the Meteorological Society of Japan. Ser. II, 66 (2): 393-398, [https://www.jstage.jst.go.jp/article/jmsj1965/66/2/66\\_2\\_393/\\_pdf](https://www.jstage.jst.go.jp/article/jmsj1965/66/2/66_2_393/_pdf), dostęp: 1 listopada 2016 r.
- Kępski D., Górski Z., Wawrzyniak T., 2013. *Biuletyn Meteorologiczny, Spitsbergen – Hornsund, grudzień 2013, Polska Stacja Polarna, Instytut Geofizyki PAN*. [http://hornsund.igf.edu.pl/Biuletyny/BIULETYN\\_36/report\\_2013\\_12.pdf](http://hornsund.igf.edu.pl/Biuletyny/BIULETYN_36/report_2013_12.pdf), dostęp: 1 listopada 2016 r.
- Kępski D., Górski Z., Wawrzyniak T., 2014. *Biuletyn Meteorologiczny, Spitsbergen – Hornsund, styczeń 2014, Polska Stacja Polarna, Instytut Geofizyki PAN*. [http://hornsund.igf.edu.pl/Biuletyny/BIULETYN\\_36/report\\_2014\\_01.pdf](http://hornsund.igf.edu.pl/Biuletyny/BIULETYN_36/report_2014_01.pdf), dostęp: 1 listopada 2016 r.
- Kierzkowski T., 1996. *Cechy klimatu lokalnego stacji w Hornsundzie w oparciu o materiał z lat 1978-1995*. Problemy Klimatologii Polarnej, 6: 67-82.
- Kohler J., Aanes R., 2004. *Effect of Winter Snow and Ground-Icing on a Svalbard Reindeer Population: Results of a Simple Snowpack Model*. Arctic, Antarctic and Alpine Research, 36 (3): 333-341, doi:10.1657/1523-0430(2004)036[0333:EOWSAG]2.0.CO;2).
- Laska M., Luks B., Budzik T., 2016. *Influence of snowpack internal structure on snow metamorphism and melting intensity on Hansbreen, Svalbard*. Polish Polar Research, 37 (2): 193-218, doi:10.1515/popore-2016-0012.
- Leszkiewicz J., Głowacki P., 2001. *Metamorfoza pokrywy śnieżnej w rejonie południowego Spitsbergenu w sezonie 1992/93*. Problemy Klimatologii Polarnej, 11: 41-54.
- Leszkiewicz J., Pulina M., 1996. *Analiza zimowej pokrywy śnieżnej pod kątem wydzielania faz sypania śniegu (Lodowiec Hansa, region Hornsundu, Spitsbergen)*. Problemy Klimatologii Polarnej, 5: 43-65.
- Leszkiewicz J., Pulina M., 1999. *Snowfall phases in analysis of a snow cover in Hornsund, Spitsbergen*. Polish Polar Research, 20 (1): 3-24.
- Łupikasza E., 2003. *Zmienność występowania opadów deszczu i śniegu w Hornsundzie w okresie lipiec 1978-grudzień 2002*. Problemy Klimatologii Polarnej, 13: 93-105.
- Łupikasza E., 2008. *Zależność występowania rodzajów opadów od temperatury powietrza w Hornsundzie (Spitsbergen) w okresie 1978-2007*. Problemy Klimatologii Polarnej, 18: 99-112.
- Łupikasza E., 2013. *Atmospheric precipitation*. Chapter 11, [w:] Marsz A.A., Styszyńska A. (eds), *Climate and Climate Change at Hornsund, Svalbard*. Gdynia Maritime University, Gdynia: 199-211.
- Magono C., Kikuchi K., 1980. *Some Observations of Snowfall and Meteorological Conditions in Arctic Canada*. Monthly Weather Review, 108 (10): 1656-1664, doi: 10.1175/1520-0493(1980)108<1656:SOOSAM>2.0.CO;2.
- Marsz A.A., 2013. *Air temperature*. Chapter 9, [w:] Marsz A.A., Styszyńska A. (eds), *Climate and Climate Change at Hornsund, Svalbard*. Gdynia Maritime University, Gdynia: 145-187.
- Marsz A.A., Styszyńska A. (eds), 2013. *Climate and Climate Change at Hornsund, Svalbard*. Gdynia Maritime University, Gdynia: 402 s.

- Martyn D., 1995. Klimaty Arktyki, [w:] *Klimaty kuli ziemskiej*. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa: 298-304.
- Miętus M. (red.), 1999-2000. *Roczniki Meteorologiczne Hornsund (1982/83-1999/2000)*. Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej, Oddział Morski, Gdynia: 61.
- Niedźwiedz T. (red.), 2003a. *Słownik meteorologiczny*. Polskie Towarzystwo Geofizyczne, Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej, Warszawa, 496 s.
- Niedźwiedz T., 2003b. *Współczesna zmienność cyrkulacji atmosfery, temperatury powietrza i opadów atmosferycznych na Spitsbergenie*. Problemy Klimatologii Polarnej, 13: 79-92.
- Niedźwiedz T., 2013. *Changes of circulation indices*. Chapter 16.2, [w:] Marsz A.A., Styszyńska A. (eds), *Climate and Climate Change at Hornsund, Svalbard*. Gdynia Maritime University, Gdynia: 285-292.
- Niedźwiedz T., 2016. *Kalendarz typów cyrkulacji atmosfery dla Spitsbergenu* – zbiór komputerowy udostępniony przez autora. Uniwersytet Śląski, Katedra Klimatologii, Sosnowiec.
- Przybylak R., 2016. *The Climate of the Arctic*. Ser. Atmospheric and Oceanographic Sciences Library, vol. 52, Springer International Publishing: 287 s.
- Przybylak R., Marciniak K., 1992. *Opady a cyrkulacja atmosferyczna na zachodnim wybrzeżu Spitsbergenu w okresie 1979-1985*. Problemy Klimatologii Polarnej, 2: 85-95.
- Robinson C.H., Wookey P.A., Lee J.A., Callaghan T.V., Press M.C., 1998. *Plant community responses to simulated environmental change at a high Arctic polar semi-desert*. Ecology, 79 (3): 856-866, doi: 10.1890/0012-9658(1998)079[0856:PCRTSE]2.0.CO;2.
- Soroka J., Haczek A., Sikora S., 2009. *Biuletyn Meteorologiczny, Spitsbergen – Hornsund, listopad 2009*, Polska Stacja Polarna, Instytut Geofizyki PAN. [http://hornsund.igf.edu.pl/Biuletyny/BIULETYN\\_32/report\\_2009\\_11.pdf](http://hornsund.igf.edu.pl/Biuletyny/BIULETYN_32/report_2009_11.pdf), dostęp: 1 listopada 2016 r.
- Stepko W., Trzebunia J., 2015. *Meteory (zjawiska atmosferyczne)*. Rozdział 14 [w:] Rózdzyński K. (red), Instrukcja dla stacji meteorologicznych, IMGW – PIB, Warszawa: 199-239.
- Strapp J.W., Stuart R.A., Isaac G.A., 1996. *A canadian climatology of freezing precipitation and a detailed study using data from St. John's, Newfoundland*. Materiały konferencyjne: Proc. FAA Int. Conf. on Aircraft Inflight Icing at Springfield, VA, vol. 2: 45-56, <https://www.researchgate.net/publication/309616506>, dostęp 1 listopada 2016 r.
- Stuart R.A., Isaac G.A., 2010. *Freezing precipitation in Canada*. Atmosphere-Ocean, 37 (1): 87-102, doi: 10.1080/07055900.1999.9649622.
- Styszyńska A., 2013. *The winds*. Chapter 6, [w:] Marsz A.A., Styszyńska A. (eds), *Climate and Climate Change at Hornsund, Svalbard*. Gdynia Maritime University, Gdynia: 81-99.
- Szewczak P., 2010. *Meteorologia dla pilota samolotowego (PPL, CPL, ATPL, IR)*. Wydawca: Avia-Test, Poznań: 532 s.
- Valor G.B., 2016. OGIMET. Strona internetowa zawierająca archiwum depesz SYNOP: <http://www.ogimet.com>, dostęp: 1 listopada 2016 r.
- WMO-No.407, 1975. *International Cloud Atlas*, vol. 1, Manual on the observations of cloud and other meteors, World Meteorological Organization, Geneva: 156 s.
- Ye H., Yang D., Robinson D., 2008. *Winter rain on snow and its association with air temperature in northern Eurasia*. Hydrological Process, 22 (15): 2728-2736, doi: 10.1002/hyp.7094.
- Zbiór zasad dotyczących notowania i szyfrowania wyników obserwacji*, 1992. seria: Instrukcja i Podręczniki, wydanie piąte, Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej, Warszawa: 52.

Wpłynęło: 19 października 2016 r., poprawiono: 23 grudnia 2016 r., zaakceptowano: 30 grudnia 2016 r.

## Summary

The article discusses the climatological and synoptic characteristics of freezing rain and freezing drizzle causing glaze at Hornsund. Freezing precipitation and glaze are relatively rare phenomena, but they can expose human activity in the polar regions to serious risks. The study is based on data from the Polish Polar Station Hornsund. The synoptic analysis of selected cases of supercooled precipitation presented in the article was performed on the basis of surface synoptic charts, absolute topography charts at 700 and 850 hPa levels, and aerological diagrams. The type of circulation which co-occurred with each day with glaze was determined using a calendar prepared by T. Niedźwiedź.

Over the course of the 34 winter seasons under investigation (between 1982/83 and 2015/16), there was a total of 197 days with supercooled precipitation. Air temperatures ranged between  $-8.5^{\circ}$  and  $1.2^{\circ}\text{C}$ , and predominantly between  $-3^{\circ}$  and  $0^{\circ}\text{C}$ , when freezing precipitation under investigation were observed. In a typical situation, supercooled precipitation followed a long thawless period. There were also frequent cases when several days of thaw and liquid precipitation were followed by freezing rain turning into snowfall with simultaneous air temperature drops. One feature characterising weather with glaze is the occurrence of sudden and multi-directional changes of temperature, which are almost completely determined by advection. Freezing precipitation occurs both when air temperatures drop below zero and when they rise above freezing point. Glaze can appear in Hornsund from early September until early June, with the highest likelihood observed between October and May. The change in the number of days with glaze observed in the successive winters was variable (ranging from 0 to 17 days per season).

The occurrence of freezing precipitation in the area of the Polish Polar Station is nearly exclusively correlated with circulatory conditions. Most such phenomena are associated with cyclonic activity and advection of warm air from above the Norwegian Sea and the Greenland Sea. Occasionally, liquid precipitation may turn into freezing rain as a consequence of a local factor, for example the presence of cold surface air caused by sea ice in the Hornsund fjord or the influx of freezing air carried by katabatic winds from the Hans Glacier, with simultaneous southerly and westerly advection of warm air masses with rainfall.

No significant trend was observed as regards multi-annual changes in the number of days with freezing rain. Such rain was observed most frequently during the winter season of 2002/03 (17 days in total), and was absent altogether during three seasons (1983/84, 1984/85 and 2015/16). There is also no noticeable correlation between the number of days with glaze and the gradual increase in average air temperatures over successive winters and years. As is demonstrated by studies of changes in the circulation over Spitsbergen conducted by T. Niedźwiedź (2013), the values of westerly and southerly circulation indexes went up in the years 1951-2012, which is evidenced by an increased frequency in the corresponding westerly and southerly advection. There is also a rising trend in the activity of cyclones in winter. The above elements seem to contribute to an increased frequency of days with glaze. However, there is no observable growth in the numbers of these phenomena.

**Key words:** freezing precipitation, supercooled precipitation, glaze, Polish Polar Station Hornsund, synoptic situation.