

FALE MROZÓW W POZNANIU I ICH CYRKULACYJNE UWARUNKOWANIA

ARKADIUSZ M. TOMCZYK

Zakład Klimatologii, Wydział Nauk Geograficznych i Geologicznych,
Uniwersytet im. Adama Mickiewicza w Poznaniu,
ul. B. Krygowskiego 10, 61-680 Poznań

Abstract: The article aims to determine the long-term variability of frosty days and frost waves occurrence in Poznań, as well as to define the pressure conditions triggering off frost waves. A frosty day was defined as a day with the maximum temperature below the 5th percentile of the daily maximum temperature from a whole year (-1.7°C). A frost wave was defined as a sequence of at least 5 frosty days. In the analysed period, there were 44 frost waves which in total took 406 days. The most frequent were 7-day waves which represented 25% of all the frost waves. These tended to occur between November and March, with a majority of them (as much as 54.5%) in January. The occurrence of frost waves in Poznań in the discussed multiannual period was related to a ridge of high pressure above Eastern and Central Europe. During frost waves, the pressure over the analysed area was higher than the average in the winter season. According to the *Grosswetterlagen* (GWL) classification of weather types, frosty days forming frost waves were mainly associated with the anticyclonic circulation (54.0%).

Keywords: frosty day, frost wave, atmospheric circulation, Poznań

WSTĘP

Współczesne ocieplenie się klimatu nie budzi wątpliwości i jest widoczne we wzroście średniej globalnej temperatury powietrza i temperatury oceanu, a także wzroście intensywności topnienia śniegu i lodu oraz podnoszeniu globalnego średniego poziomu morza (IPCC 2007, 2013). Według autorów Piątego Raportu IPCC (2013) wzrost średniej globalnej temperatury w latach 1880–2012 wyniósł $0,85^{\circ}\text{C}$, a pierwszą dekadę XXI w. uznaje się za najcieplejszą od momentu rozpoczęcia pomiarów instrumentalnych. Przejawem ocieplenia jest coraz częstsze występowanie dni upalnych i fal upałów (Batima i in. 2005; Kejna i in. 2009; Avotniece i in. 2010; Ding i in. 2010; Kossowska-Cezak, Skrzypczuk 2011; Pai i in. 2013; Lhotka, Kyselý 2014; Tomczyk, Bednorz 2014; Tomczyk 2014) oraz zmniejszanie się liczby dni mroźnych i bardzo mroźnych (Cebulak, Limanówka 2007; Bielec-Bąkowska, Łupikasza 2009; Avotniece i in. 2010; Bielec-Bąkowska, Piotrowicz 2013; Kossowska-Cezak 2014; Łupikasza i in. 2014; Tomczyk 2015).

Jednym z najważniejszych czynników kształtujących warunki pogodowe i klimatyczne jest cyrkulacja atmosferyczna (Chromow 1952; Niedźwiedź 1981;

Yarnal 1993). To jej zmiany, niezależnie od przyczyn, które je powodują, stanowią o krótkookresowej – międzyrocznej i międzydekadowej – zmienności temperatury powietrza (Marsz 2013). Jak wskazuje Bielec-Bąkowska (2010), ważną cechą cyrkulacji nad Europą jest występowanie układów wysokiego ciśnienia, a w szczególności układów blokujących cyrkulację strefową i charakteryzujących się znaczącą trwałością. Układy blokadowe latem nad Europą Środkową przyczyniają się do występowania fal upałów, a zimą – fal mrozów (Porębska, Zdunek 2013).

Za cel niniejszej pracy przyjęto:

- 1) określenie wieloletniej zmienności w występowaniu dni mroźnych oraz fal mrozów w Poznaniu w latach 1970/71–2009/10;
- 2) określenie sytuacji barycznych oraz typów cyrkulacji powodujących występowanie fal mrozów w Poznaniu w badanym wieloleciu.

MATERIAŁY ŹRÓDŁOWE I METODY ANALIZY

Podstawę opracowania stanowiły dobowe wartości maksymalnej (T_{\max}), minimalnej (T_{\min}) oraz średniej dobowej temperatury powietrza (T_{sr}) w Poznaniu w latach 1970–2010. Dane pozyskano ze zbiorów Instytutu Meteorologii i Gospodarki Wodnej – Państwowego Instytutu Badawczego.

W literaturze klimatologicznej dzień mroźny najczęściej definiowany jest jako dzień z maksymalną dobową temperaturą powietrza $< 0^{\circ}\text{C}$ (Kossowska-Cezak 2014; Łupikasza i in. 2014) lub minimalną $\leq -10^{\circ}\text{C}$ (Kozłowska-Szczęsna i in. 2002). W niniejszej pracy przy określaniu dnia mroźnego uwzględniono definicję ekstremalnego zjawiska pogodowego według IPCC (2007). Zjawisko pogodowe, które występuje tak rzadko na danym terenie i w danej porze roku, że mieści się w przedziale 10. lub 90. percentyla zaobserwowanej funkcji gęstości prawdopodobieństwa lub rzadziej określa się jako zjawisko ekstremalne (IPCC, 2007). Dlatego dzień mroźny zdefiniowano jako dzień z temperaturą maksymalną poniżej 5. percentyla codziennej temperatury maksymalnej z całego roku, który wyniósł $-1,7^{\circ}\text{C}$. Z kolei za falę mrozów uznano ciąg co najmniej 5 dni mroźnych. Na podstawie pozyskanych danych wyliczono średnie wartości temperatury powietrza dla poszczególnych lat i sezonów zimowych (XII–II) oraz współczynnik korelacji między średnią temperaturą powietrza zimą i liczbą dni mroźnych. Następnie wyznaczono dni mroźne i fale mrozów. Zbadano również ich zmienność w badanym wieloleciu oraz określono trendy zmian.

W niniejszej pracy, w celu określenia warunków barycznych sprzyjających występowaniu fal mrozów, wykorzystano codzienne wartości ciśnienia na poziomie morza (SLP) oraz wysokości powierzchni izobarycznej 500 hPa (z500 hPa). Dane pochodzą ze zbiorów National Center for Environmental Prediction/ National Center for Atmospheric Research (NCEP/NCAR) Reanalysis (Kalnay

i in. 1996). Na podstawie powyższych danych wykreślono mapy SLP oraz z500 hPa dla sezonu zimowego (XII–II) oraz mapy zbiorcze dla wszystkich fal mrozów. Charakterystykę uzupełniono wykreśleniem map anomalii. Anomalie wyliczono jako różnicę między średnią wartością SLP oraz z500 hPa dla fal mrozów a średnią wartością powyższych elementów w zimie badanego wielolecia. Wydzielenia typów cyrkulacji dokonano poprzez grupowanie poszczególnych fal mrozów pod względem wartości ciśnienia na poziomie morza, stosując metodę minimalnych wariancji (znaną jako metoda Warda). Metoda ta opiera się na odległościach euklidesowych. Jej istotą jest łączenie dwóch skupień A i B, które po połączeniu w jedno skupienie zapewniają minimum sumy kwadratów odchyłeń wszystkich obiektów od środka ciężkości nowo utworzonego skupienia (Ward 1963; Bednorz 2009). W tym celu wykorzystano standaryzowane wartości SLP. Standaryzacji dokonano, aby wyrównać sezonową zmienność przy jednoczesnym zachowaniu intensywności pola ciśnienia (Esteban i in. 2005). Metody grupowania, m.in. metoda Warda, znajdują często zastosowanie w klimatologii, np. przy wydzieleniu sezonów i regionów klimatycznych oraz wyróżnianiu typów pogody (Bednorz 2008; Tomczyk 2014). Dla wyznaczonych typów wykreślono mapy SLP i z500 hPa oraz mapy anomalii. Dodatkowo dla dni mroźnych wyznaczono typy cyrkulacji oraz prawdopodobieństwo wystąpienia tych dni w poszczególnych typach, wykorzystując klasyfikację Grosswetterlagen – GWL (tab. 1; Werner, Gerstengarbe 2010).

WYNIKI

Średnia roczna temperatura powietrza w Poznaniu w latach 1971–2010 wyniosła $8,7^{\circ}\text{C}$ i wahała się od $7,0^{\circ}\text{C}$ (1980 i 1987) do $10,2^{\circ}\text{C}$ (2008) (ryc. 1). Odchylenie standardowe wyniosło $0,9^{\circ}\text{C}$. W badanym okresie stwierdzono istotny statystycznie ($p < 0,05$) wzrost T_{sr} , który kształtował się na poziomie $0,3^{\circ}\text{C}$ na 10 lat. Najczęściej najcieplejszym miesiącem w roku był lipiec ($18,6^{\circ}\text{C}$), a najchłodniejszym styczeń ($-1,3^{\circ}\text{C}$). W sezonie zimowym (grudzień–luty) średnia temperatura powietrza wyniosła $-0,2^{\circ}\text{C}$ i zmieniała się od $-4,8^{\circ}\text{C}$ (1984/85) do $3,4^{\circ}\text{C}$ (2006/07) (ryc. 1). Wyznaczony trend liniowy wskazuje na wzrost średniej temperatury powietrza zimą, lecz zmiany nie są istotne statystycznie.

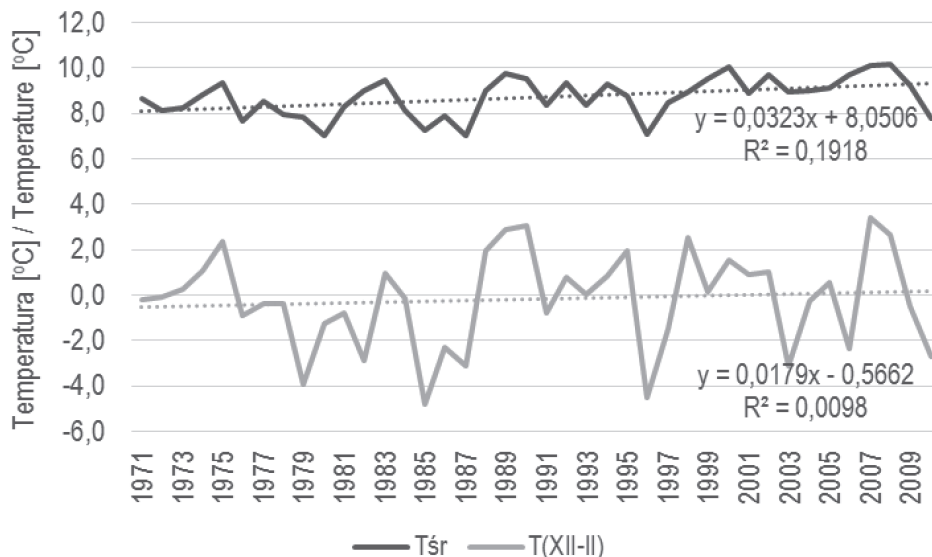
W latach 1970/71–2009/10 stwierdzono istotną statystycznie ($p < 0,05$) korelację między średnią temperaturą powietrza w sezonie zimowym i liczbą dni mroźnych (tj. dni z temperaturą maksymalną $< -1,7^{\circ}\text{C}$), a wartość współczynnika wyniosła $-0,91$. Dni mroźne w Poznaniu występowały średnio przez 17 dni w sezonie. W poszczególnych sezonach zimowych ich liczba zmieniała się od 1 dnia (1974/75) do aż 48 (1984/85) (ryc. 2A), a odchylenie standardowe wyniosło 13 dni. W analizowanym okresie odnotowano spadek liczby dni powyższej kategorii ($0,8$ dnia/10 lat), lecz nie był on istotny statystycznie. Dni z $T_{max} <$

Tabela 1. Typy cyrkulacji Grosswetterlagen (Werner, Gerstengarbe 2010)
 Table 1. Types of Grosswetterlagen circulation (Werner, Gerstengarbe 2010)

Ogólny kierunek cyrkulacji (GWT)/ Circulation direction (GWT)	Symbol/ Symbol	Typy cyrkulacji (GWL)/Circulation types (GWL)
zachodnia	WA	zachodnia, antycyklonalna
	WS	zachodnia przesunięta ku południowi
	WZ	zachodnia cyklonalna
	WW	zachodnia, brzeżna na skraju blokującego Wyżu Rosyjskiego
południowo-zachodnia	SWA	południowo-zachodnia, antycyklonalna
	SWZ	południowo-zachodnia, cyklonalna
północno-zachodnia	NWA	północno-zachodnia, antycyklonalna
	NWZ	północno-zachodnia, cyklonalna
centralna wyżowa	HM	wyż nad Europą Środkową
	BM	klin wyżowy nad Europą Środkową
centralna niżowa	TM	niż nad Europą Środkową
północna	NA	północna, antycyklonalna
	NZ	północna, cyklonalna
	HNA	wyż nad Morzem Północnym – Islandią, antycyklonalna
	HNZ	wyż nad Morzem Północnym – Islandią, cyklonalna
	HB	wyż nad Wyspami Brytyjskimi
	TRM	bruzda nad Europą Środkową
północno-wschodnia	NEA	północno-wschodnia, antycyklonalna
	NEZ	północno-wschodnia, cyklonalna
wschodnia	HFA	wyż nad Fennoskandią, antycyklonalna
	HFZ	wyż nad Fennoskandią, cyklonalna
	HNFA	wyż nad Morzem Północnym – Fennoskandią, antycyklonalna
	HNFZ	wyż nad Morzem Północnym – Fennoskandią, cyklonalna
południowo-wschodnia	SEA	południowo-wschodnia, antycyklonalna
	SEZ	południowo-wschodnia, cyklonalna
południowa	SA	południowa, antycyklonalna
	SZ	południowa, cyklonalna
	TB	niż nad Wyspami Brytyjskimi
	TRW	bruzda nad Europą Zachodnią
	U	sytuacja nieokreślona lub przejściowa

$-1,7^{\circ}\text{C}$ najczęściej występowały w styczniu, łącznie 293 dni (co stanowiło 44,3% wszystkich dni mroźnych) (ryc. 2B). Dni mroźne odnotowano również poza sezonem zimowym (XII–II) – w listopadzie (łącznie 30 dni; 4,5% wszystkich dni mroźnych) i marcu (20 dni; 3% wszystkich dni mroźnych). W listopadzie nie były one notowane od sezonu 1999/00, natomiast w marcu od sezonu 1993/94.

W latach 1970/71–2009/10 w sezonie zimowym najczęściej występował typ cyrkulacji WZ (20,9%) oraz BM (10,1%) (ryc. 3A). Z kolei najrzadziej,

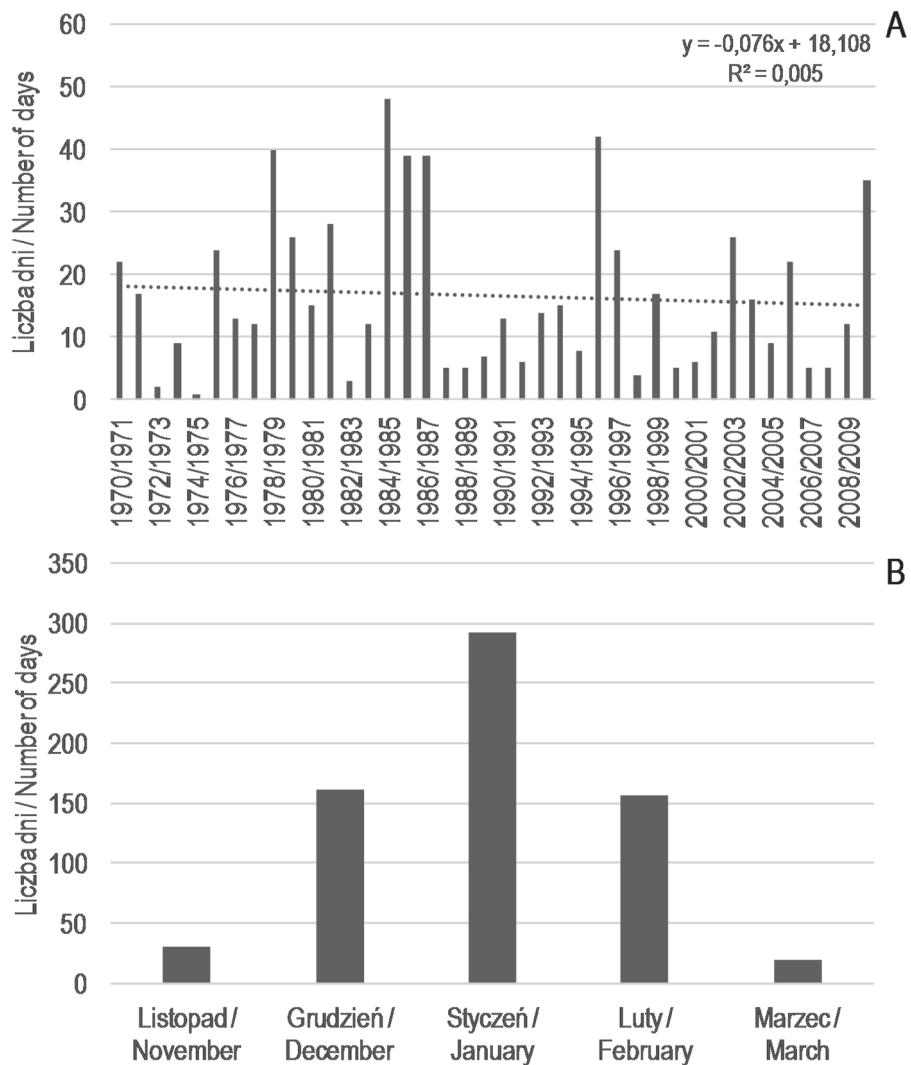


Ryc. 1. Średnia roczna temperatura powietrza oraz średnia temperatura powietrza w sezonie zimowym (grudzień–luty) w Poznaniu w latach 1970/71–2009/10

Fig. 1. The average annual air temperature and average air temperature in the winter season (December–February) in Poznań in period 1970/71–2009/10

z częstością poniżej 1%, występowały następujące typy: NA (0,5%), NEZ (0,5%), HNFA (0,6%), NEA (0,6%), TB (0,6%), U (0,8%), HNZ (0,9%) oraz TM (0,9%). W powyższym okresie przeważała cyrkulacja cyklonalna (58,1%) nad antycyklonalną (41,2%). Największe prawdopodobieństwo wystąpienia dnia mroźnego notowano podczas typu HNFZ (77,4%) (ryc. 3B). Prawdopodobieństwem powyżej 50% charakteryzowały się typy: HNFA (65,2%), HFZ (64,1%), HFA (63,3%), HNA (62,5%), SEA (55,3%) HNZ (53,8%). Z kolei najmniejszą szansę na wystąpienie dnia z $T_{\max} < -1,7^{\circ}\text{C}$ notowano w typach WA (0,9%), WZ (1,5%) oraz SWZ (1,8%). Większe prawdopodobieństwo wystąpienia dnia mroźnego stwierdzono podczas cyrkulacji antycyklonalnej (23%) aniżeli cyklonalnej (14,8%).

Średnie ciśnienie atmosferyczne na poziomie morza, w latach 1970/71–2009/10, w sezonie zimowym (XII–II) osiągało najwyższe wartości w rejonie Wysp Azorskich (> 1021 hPa) (ryc. 4). Spadek ciśnienia następował w kierunku północnym, a centrum niżu zlokalizowane było nad północnym Atlantykiem, na południowy zachód od Islandii (< 997 hPa). Nad oceanem pomiędzy wskazanymi centrami barycznymi występował duży poziomy gradient baryczny, który nad kontynentem był znacząco mniejszy. Zimą uśredniona powierzchnia izobaryczna 500 hPa nachylona była w kierunku północnym. Maksimum wysokości odnotowano nad Wyspami Azorskimi (> 5710 m), natomiast minimum nad

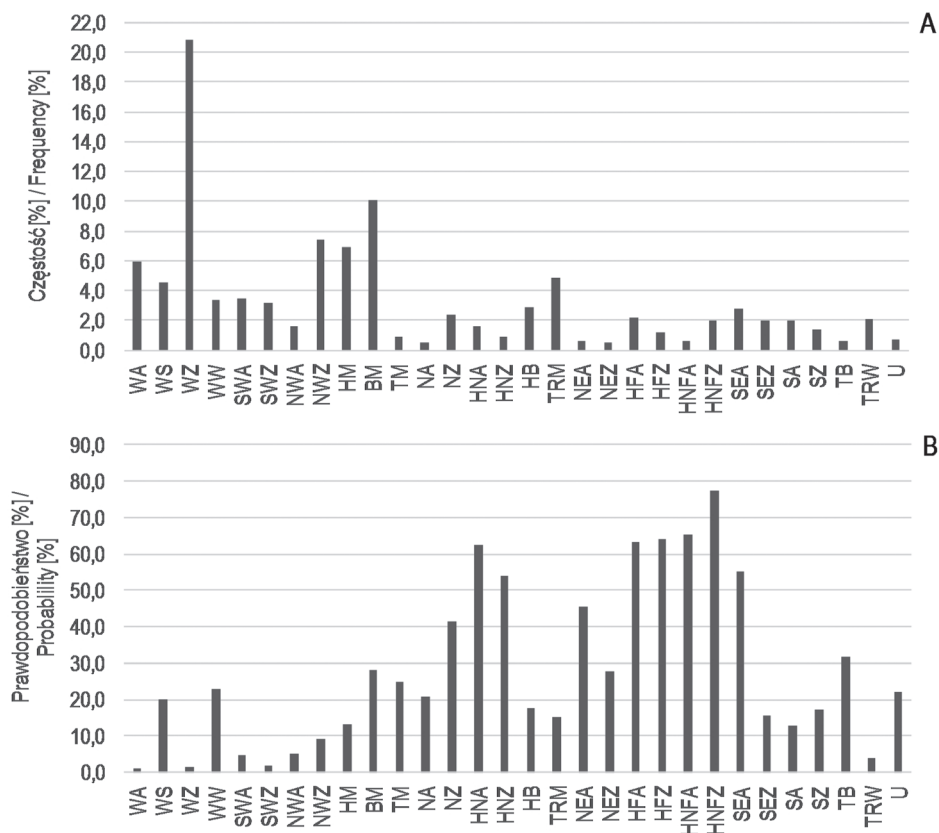


Ryc. 2. A. Sezonowa liczba dni mroźnych. B. Łączna liczba dni mroźnych w poszczególnych miesiącach w Poznaniu w latach 1970/71–2009/10

Fig. 2. A. The seasonal number of frosty days. B. The total number of frosty days in each month in Poznań in period 1970/71–2009/10

północnym Atlantykiem i północną Skandynawią (< 5210 m). Powyższy układ baryczny powodował typową dla Europy cyrkulację zachodnią zarówno w dolnej, jak i środkowej troposferze.

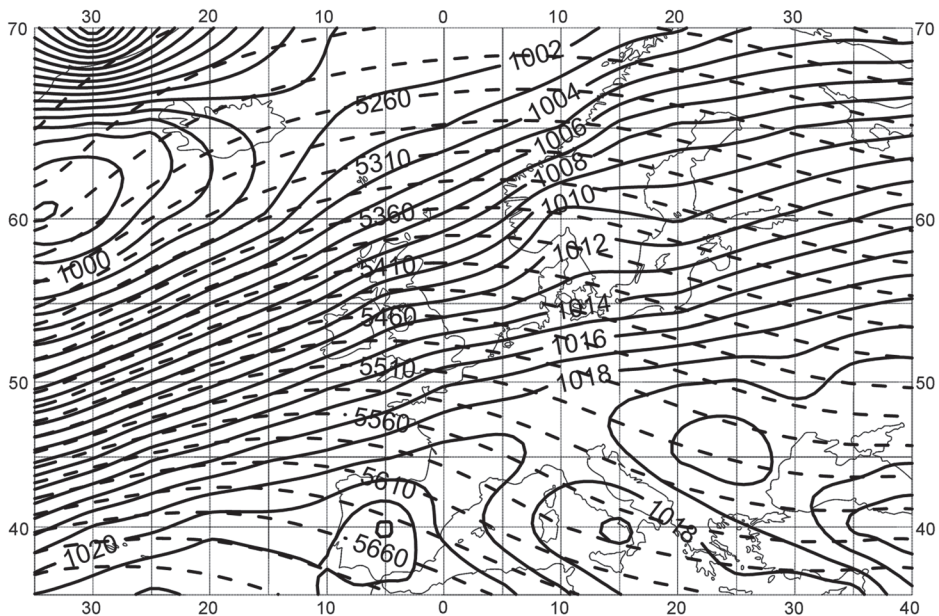
W Poznaniu, w latach 1970/71–2009/10 stwierdzono 44 fale mrozów, które łącznie trwały 406 dni. Najczęściej występowały fale 7-dniowe, które stanowiły 25% wszystkich fal mrozów. W latach 1970/71–1979/80 oraz 1980/81–1989/90



Ryc. 3. A. Częstość występowania typów cyrkulacji w sezonie zimowym (grudzień–luty).
 B. Prawdopodobieństwo wystąpienia dni mroźnych w poszczególnych typach w Poznaniu w latach 1970/71–2009/10

Fig. 3. A. Frequency of circulation types in the winter season (December–February).
 B. Probability of the occurrence of frost days in the particular types in Poznań in period 1970/71–2009/10

najliczniej notowano fale 7-dniowe, natomiast w latach 1990/91–1999/00 z podobną częstością występowały fale 5-, 6- i 10-dniowe. Z kolei w ostatnim 10-leciu dominowały najkrótsze fale – 5-dniowe. Średnia długość fali mrozów w analizowanym wieloleciu wyniosła 9,2 dnia, natomiast w poszczególnych dekadach zmieniała się od 7,4 (1970/71–1979/80) do 12,3 (1980/81–1989/90) (tab. 2). Jednakże najdłuższe fale mrozów trwały powyżej 20 dni i były notowane w sezonach: 1984/85 (od 26.12.1984 do 21.01.1985), 1985/86 (od 3.02 do 1.03) oraz 1996/97 (od 20.12.1996 do 12.01.1997). Fale mrozów występowały od listopada do marca, aczkolwiek najwięcej – bo aż 54,5% odnotowano w styczniu. Najmniej fal mrozów stwierdzono w listopadzie i marcu, odpowiednio: 3 i 2. Średnia T_{max} podczas analizowanych fal mrozów, wyniosła $-5,4^{\circ}\text{C}$, natomiast



Ryc. 4. Średnie dla miesięcy zimowych (grudzień–luty) ciśnienie na poziomie morza (linia ciągła) oraz wysokość powierzchni izobarycznej 500 hPa (linia przerywana)

Fig. 4. Averages for winter months (December–February) a pressure on the sea level (solid lines) and height of isobaric area 500 hPa (dashed lines)

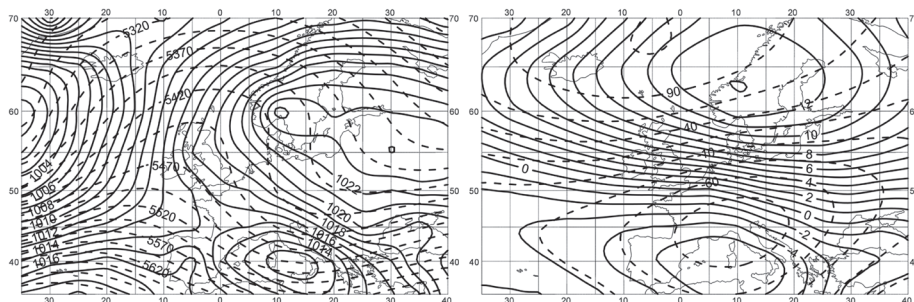
T_{\min} $-11,6^{\circ}\text{C}$. Najwyższą średnią T_{\max} stwierdzono podczas fal mrozów w roku 1970 (25–30.12) i 1978 (4–10.02), która wyniosła $-2,9^{\circ}\text{C}$, natomiast najniższą średnią T_{\max} w roku 1987 (7–22.01) i wyniosła $-10,6^{\circ}\text{C}$.

Występowanie fal mrozów w Poznaniu, w rozpatrywanym wieloleciu, przeciętnie związane było z klinem wysokiego ciśnienia (> 1023 hPa) obejmującym Europę Wschodnią i Środkową (ryc. 5). Podczas fal mrozów ciśnienie nad

Tabela 2. Charakterystyka fal mrozów w Poznaniu w latach 1970/71–2009/10

Table 2. Characteristics frost waves in Poznań in period 1970/71–2009/10

Lata/Years	Liczba fal mrozów/ The number of frost waves	Czas trwania fal mrozów (w dniach)/ The duration of frost waves (in days)	Średnia długość fal mrozów (w dniach)/ The mean duration of frost waves (in days)
1970/71–1979/80	14	104	7,4
1980/81–1989/90	11	135	12,3
1990/91–1999/00	9	82	9,1
2000/01–2009/10	10	85	8,5
1970/71–2009/10	44	406	9,2

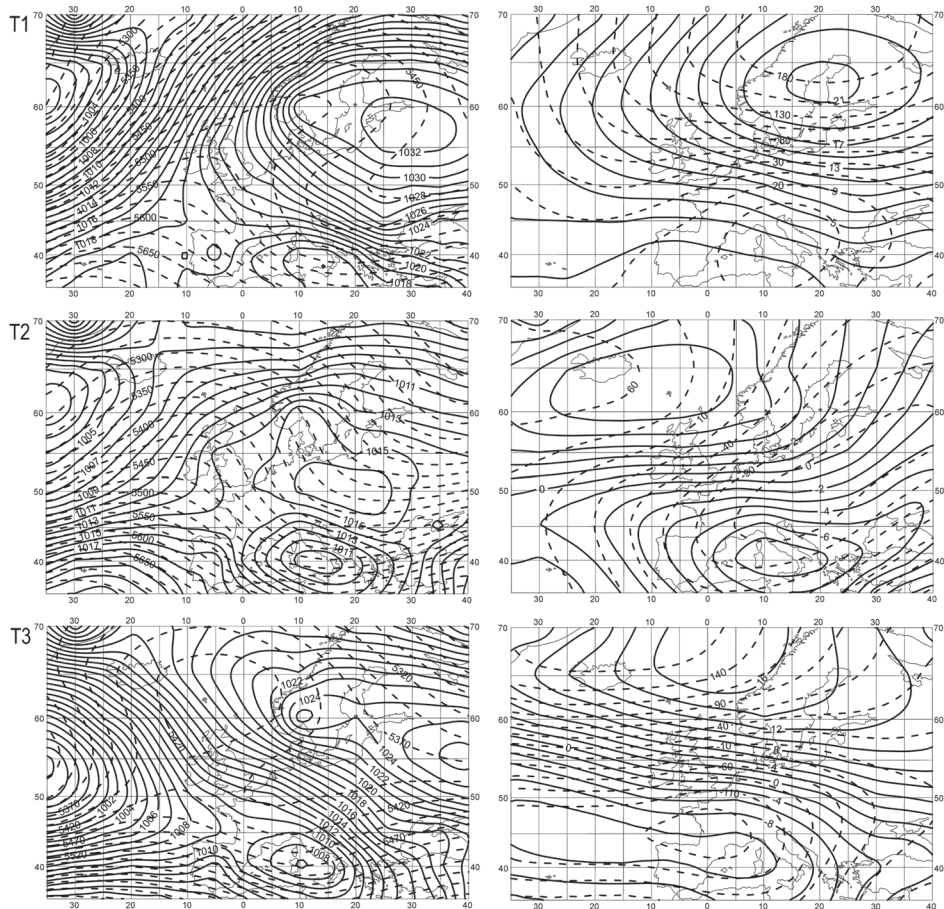


Ryc. 5. Średnie ciśnienie na poziomie morza (linia ciągła) i wysokość powierzchni izobarycznej 500 hPa (linia przerywana) dla wszystkich fal mrozów odnotowanych w Poznaniu oraz mapa anomalii

Fig. 5. Mean sea level pressure (solid lines) and height of isobaric area 500 hPa (dashed lines) for all the frost waves recorded in Poznań and map of anomalies

obszarem badań było wyższe niż przeciętnie w sezonie zimowym, a anomalie SLP wyniosły około 6 hPa. Izohipsy powierzchni izobarycznej 500 hPa na przeważającym obszarze kontynentu były wygięte ku południu, tworząc wyraźne obniżenie nad Europą Środkową, co potwierdza obecność chłodnych mas powietrza. Związane jest to z zależnością między temperaturą i gęstością powietrza, a co za tym idzie – zmianą ciśnienia wraz z wysokością w różnych warunkach termicznych. Chłodne masy powietrza cechują się większą gęstością niż ciepłe, dlatego spadek ciśnienia wraz z wysokością następuje szybciej. Powierzchnia z500 hPa nad obszarem badań zalegała niżej niż przeciętnie zimą, a anomalie wyniosły około –60 m. Opisany powyżej układ powodował napływ w dolnej troposferze chłodnego i suchego powietrza polarnego kontynentalnego ze wschodu. Z kolei w wyższych warstwach troposfery następowała adwekcja mas powietrza z północnego zachodu.

W typie 1 (T1) sklasyfikowano 16 fal mrozów, podczas których Polska znajdowała się pod wpływem wyżu z centrum (1032 hPa), zlokalizowanym na pograniczu Estonii, Łotwy i Rosji (ryc. 6). Nad obszarem badań, w powyższych dniach, ciśnienie było wyższe niż przeciętnie zimą o około 13 hPa. Opisana sytuacja zapewniała adwekcję mroźnego powietrza z południowego wschodu. W typie 2 (T2), podobnie jak w typie 1, stwierdzono 16 fal mrozów. W niniejszym typie centrum wyżu (1016 hPa) zalegało nad Polską (ryc. 6). Cechą charakterystyczną pogody antycyklonalnej jest bezchmurne niebo bądź z niewielkim zachmurzeniem, co skutkowało silnym wypromieniowaniem ciepła z powierzchni ziemi. W wyższych warstwach atmosfery następował napływ mroźnych mas powietrza z sektora północnego, co potwierdza układ izohips powierzchni izobarycznej 500 hPa, która nad Polską zalegała około 115 m niżej niż przeciętnie zimą. W typie 3 (T3) stwierdzono 12 fal mrozów. W powyższym typie Polska znajdowała się pod wpływem klina wysokiego ciśnienia (ryc. 6).



Ryc. 6. Średnie ciśnienie na poziomie morza (linia ciągła) i wysokość powierzchni izobarycznej 500 hPa (linia przerywana) dla wydzielonych trzech typów sytuacji synoptycznych oraz mapy anomalii

Fig. 6. Mean sea level pressure (solid lines) and height of isobaric area 500 hPa (dashed lines) for the distinguished three types of synoptic situations for frost periods and map of anomalies

Podobnie jak w typie 1 taki układ ciśnienia powodował napływ mroźnego powietrza kontynentalnego z południowego wschodu. Z kolei w wyższej atmosferze następował sptyw powietrza z sektora północnego.

DYSKUSJA

W Poznaniu w latach 1970/71–2009/10 stwierdzono wzrost średniej temperatury powietrza w sezonie zimowym (XII–II), lecz zmiany nie były istotne

statystycznie. Bielec-Bąkowska i Piotrowicz (2013), analizując ekstremalne temperatury w Polsce w latach 1951–2006, wykazały wzrost temperatury powietrza zimą, który na przeważającym obszarze kraju nie był istotny statystycznie. Prowadzone dotychczas badania wskazują, iż najsilniejsze ocieplenie notowano w marcu, maju oraz sierpniu (Kozuchowski, Żmudzka 2001; Degirmendzić i in. 2004; Michalska 2011).

W analizowanym okresie odnotowano spadek liczby dni mroźnych, który nie był istotny statystycznie. Podobny kierunek zmian stwierdzono również m.in. w Krakowie (Matuszko, Piotrowicz 2012), Warszawie (Kossowska-Cezak 2014) oraz na obszarze całego kraju (Tomczyk 2015). W latach 1970/71–2009/10 spośród 662 dni mroźnych wydzielono 44 fale mrozów. Najmniej fal mrozów odnotowano w latach 1990/91–1999/00, a najwięcej w 1970/71–1979/80. Zbliżone wyniki uzyskano, analizując występowanie fal upałów i chłódów na południowym wybrzeżu Morza Bałtyckiego (Tomczyk, Bednorz 2014). Występowanie fal mrozów związane było z pogodą wyżową, zapewniającą głównie adwekcję suchych i chłodnych mas powietrza z sektora wschodniego. Podobny kierunek napływu mas powietrza wykazał Ustrnul wraz z zespołem (2010), analizując występowanie ekstremalnych temperatur w Polsce. Występowanie fal mrozów w Europie Środkowej może być spowodowane obecnością układów blokadowych położonych na zachodzie badanego obszaru (Porębska, Zdunek 2013).

Brak istotnych statystycznie zmian, zarówno w występowaniu dni mroźnych oraz fal mrozów, potwierdza tezę postawioną przez Bielec-Bąkowską i Piotrowicz (2013), że pomimo zaznaczającego się ocieplenia nie jest ono jeszcze aż tak duże, aby znalazło swoje odzwierciedlenie w zdecydowanej zmianie warunków ekstremalnych.

PODSUMOWANIE

Z przeprowadzonych badań wynika wzrost średniej rocznej temperatury powietrza ($0,3^{\circ}\text{C}/10$ lat) oraz spadek liczby dni mroźnych ($0,8$ dnia/10 lat, zmiana nieistotna statystycznie). W rozpatrywanym okresie wystąpiły 44 fale mrozów, które łącznie trwały 406 dni. W badanym wieloleciu stwierdzono spadek liczby dłuższych fal mrozów, a wzrost liczby fal najkrótszych. Występowaniu fal mrozów sprzyjały trzy typy cyrkulacji, podczas których notowano dodatnie anomalie ciśnienia na poziomie morza oraz ujemne anomalie wysokości powierzchni izobarycznej 500 hPa, co wskazuje na obecność układów wysokiego ciśnienia oraz zaleganie chłodnych mas powietrza. W typie 1 centrum wyżu położone było na północny wschód od Polski, a w typie 2 centrum wyżu zalegało nad Polską. Z kolei w typie 3 Polska była pod wpływem klina wysokiego ciśnienia. Powyższe układy zapewniały napływ kontynentalnych mas powietrza z sektora wschodniego.

LITERATURA

- Avotniece Z., Rodinov V., Lizuma L., Briede A., Kļaviņš M., 2010: *Trends in the frequency of extreme climate events in Latvia, Baltica*, 23(2), 135–148.
- Batima P., Natsagdorj L., Gomboluudev P., Erdenetsetseg B., 2005: *Observed climate change in Mongolia*, AIACC Working Paper, 13, 4–25.
- Bednorz E., 2008: *Synoptic conditions of snow occurrence in Budapest*, Meteorologische Zeitschrift, 17(1), 39–45.
- Bednorz E., 2009: *Wpływ sytuacji barycznych na występowanie pokrywy śnieżnej na obszarach nizinnych środkowej Europy*, Wyd. Nauk. UAM, Poznań.
- Bielec-Bąkowska Z., 2010: *Silne wyże nad Europą w XX wieku*, [w:] L. Kolendowicz (red.), *Klimat Polski na tle klimatu Europy. Warunki cyrkulacyjne i radiacyjne*, Poznań, 23–37.
- Bielec-Bąkowska Z., Łupikasza E., 2009: *Frosty, freezing and severe freezing days and their synoptic implications in Malopolska, Southern Poland, 1951–2000*, Bulletin of Geography – Physical Geography, 1, 35–56.
- Bielec-Bąkowska Z., Piotrowicz K., 2013: *Temperatury ekstremalne w Polsce w latach 1951–2006*, Prace Geograficzne, 132, 59–98.
- Cebulak E., Limanówka D., 2007: *Dni z ekstremalnymi temperaturami powietrza w Polsce*, [w:] K. Piotrowicz, R. Twardosz (red.), *Wahania klimatu w różnych skalach przestrzennych i czasowych*, IGiP UJ, Kraków, 185–194.
- Chromow S.P., 1952: *Meteorologia i klimatologia*, PWN, Warszawa.
- Degirmendžić J., Kożuchowski K., Żmudzka E., 2004: *Changes of air temperature and precipitation in Poland in the period 1951–2000 and their relationship to atmospheric circulation*, International Journal of Climatology, 24, 291–310.
- Ding T., Qian W.H., Yan Z.W., 2010: *Changes of hot days and heat waves in China during 1961–2007*, International Journal of Climatology, 30, 1452–1462.
- Esteban P., Jones P.D., Martin-Vide J., Mases M., 2005: *Atmospheric circulation patterns related to heavy snowfall days in Andorra, Pyrenees*, International Journal of Climatology, 25, 319–329.
- IPCC, 2007. Climate change: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel in Climate Change, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- IPCC 2013: Climate Change: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel in Climate Change, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Kalnay E., Kanamitsu M., Kistler R., Collins W., Deaven D., Gandin L., Iredell M., Saha S., White G., Woollen J., Zhu Y., Leetmaa A., Reynolds R., Chelliah M., Ebisuzaki W., Higgins W., Janowiak J., Mo K.C., Ropelewski C., Wang J., Jenne R., Joseph D., 1996: *The NMC/NCAR 40-Year Reanalysis Project*, Bulletin of the American Meteorological Society, 77, 437–471.
- Kejna M., Araźny A., Maszewski R., Przybylak R., Uscka-Kowalowska J., Vizi Z., 2009: *Daily minimum and maximum air temperature in Poland in the years 1951–2005*, Bulletin of Geography – Physical Geography, 2, 35–56.
- Kossowska-Cezak U., 2014: *Zmiany wieloletnie liczby termicznych dni charakterystycznych w Warszawie (1951–2010)*, Prace Geograficzne, 136, 9–30.
- Kossowska-Cezak U., Skrzypczuk J., 2011: *Pogoda upalna w Warszawie (1947–2010)*, Prace i Studia Geograficzne, 47, 139–146.
- Kozłowska-Szczęsna T., Błażejczyk K., Krawczyk B., Limanówka D., 2002: *Bioklimat uzdrowisk polskich i możliwość jego wykorzystania w lecznictwie*, Monografie, 3, IGiPZ PAN, Warszawa.
- Kożuchowski K., Żmudzka E., 2001: *Ocieplenie w Polsce: skala i rozkład sezonowy zmian temperatury w drugiej połowie XX w.*, Przegląd Geofizyczny, 46(1–2), 81–90.

- Lhotka O., Kysely J., 2014: *Characterizing joint effects of spatial extent, temperature magnitude and duration of heat waves and cold spells over Central Europe*, International Journal of Climatology, DOI: 10.1002/joc.4050.
- Łupikasza E., Niedźwiedz T., Małarzewski L., 2014: *Regional differentiation in probability of ice days occurrence in Poland*, Quaestiones Geographicae, 33(3), 89–99.
- Marsz A.A., 2013: *Frekwencja makrotypów cyrkulacji środkowotroposferycznej według klasyfikacji Wangengejma–Girsa w okresie zimowym a pole ciśnienia atmosferycznego nad Europą i północną Azją*, Przegląd Geofizyczny, 1–2, 3–24.
- Matuszko D., Piotrowicz K., 2012: *Wieloletnia zmienność sytuacji meteorotropowych w Krakowie*, Przegląd Geograficzny, 84(3), 413–422.
- Michalska B., 2011: *Tendencje zmian temperatury powietrza w Polsce*, Prace i Studia Geograficzne, 47, 67–75.
- Niedźwiedz T., 1981: *Sytuacje synoptyczne i ich wpływ na zróżnicowanie przestrzenne wybranych elementów klimatu w dorzeczu górnej Wisły*, Rozprawy Habilitacyjne Uniwersytetu Jagiellońskiego, 58, Kraków.
- Pai D.S., Nair S.A., Ramanathan A.N., 2013: *Long term climatology and trends of heat waves over India during the recent 50 years (1961–2010)*, Mausam, 64, 4, 585–604.
- Porębska M., Zdunek M., 2013: *Analysis of extreme temperature events in Central Europe related to high pressure blocking situations in 2001–2011*, Meteorologische Zeitschrift, 22(5), 533–540.
- Tomczyk A.M., 2014: *Cyrkulacyjne uwarunkowania występowania fal upałów w Poznaniu*, Przegląd Geograficzny, 86(1), 41–52.
- Tomczyk A.M., 2015: *Impact of macro-scale circulation types on the occurrence of frosty days in Poland*, Bulletin of Geography, Physical Geography Series, 9, 55–65.
- Tomczyk A.M., Bednorz E., 2014: *Heat and cold waves on the southern coast of the Baltic Sea*, Baltica, 27(1), 45–53.
- Ustrnul Z., Czekerda D., Wypych A., 2010: *Extreme values of air temperature in Poland according to different atmospheric circulation classifications*, Physics and Chemistry of the Earth, 35, 429–436.
- Ward J.H., 1963: *Hierarchical grouping to optimize an objective function*, Journal of the American Statistical Association, 58, 236–244.
- Werner P.C., Gerstengarbe F.W., 2010: *Katalog der Großwetterlagen Europas (1881–2009) nach Paul Hess und Helmut Brezowsky*, PIK Report. 119, Potsdam Institute for Climate Change Impact Research, 140 s.
- Yarnal B., 1993: *Synoptic Climatology in Environmental Analysis*, Belhaven Press, London.