

ZMIENNOŚĆ INWERSJI TEMPERATURY POWIETRZA NAD KRAKOWEM W ŚWIETLE WARUNKÓW CYRKULACYJNYCH

Angelika Palarz

Variability of air temperature inversions over Cracow in relation to the atmospheric circulation

Abstract: Temperature inversion is a phenomenon in which air temperature increases with altitude. The studies on air temperature inversions in Cracow were based on various data and methods e.g. data from standard and automatic meteorological stations, radiosonde observations, lidar and sodar measurements. They showed the annual and diurnal variability of temperature inversions, but most of them did not investigate the multi-annual trends in the occurrence of temperature inversions. Due to the relationship between meteorological conditions and air quality, it is important to study the multi-annual, annual and diurnal variability of air temperature inversions. The main aim of this article is to determine the multi-annual variability of air temperature inversions in Cracow and its relation to synoptic situation. Moreover, the annual and diurnal variability of temperature inversions is shown. The study is based on data derived from NCEP-NCAR reanalysis and the classification of synoptic situation types by T. Niedźwiedź. In this paper two parameters of inversions are presented – frequency and intensity. The study confirmed that the frequency and intensity of inversions have annual and diurnal variation. Multi-annual changes in the numbers of days with temperature inversion were also observed – a statistically significant increase in the 1000–925 hPa layer as well as in the intensity of temperature inversions – a statistically significant increase in the 1000–925 hPa, 1000–850 hPa and 925–850 hPa layers. It was proved that a very strong relationship exists between the days with temperature inversion and the anticyclonic situation, especially with the air-flow from south, south-west and south-east.

Keywords: air temperature inversion, NCEP-NCAR reanalysis, circulation types, Cracow, trends, conditional probability

Zarys treści: Głównym celem opracowania jest ocena wieloletniej zmienności inwersji temperatury powietrza nad Krakowem oraz określenie wpływu warunków cyrkulacyjnych na ich występowanie. Przeprowadzona dla wielolecia 1961–2010 analiza została wykonana na podstawie danych pozyskanych z reanaliz NCEP-NCAR i *Kalendarza typów cyrkulacji atmosfery dla Polski Południowej* T. Niedźwiedzia. Obejmowała ona cztery warstwy dolnej troposfery – 1000–925 hPa, 1000–850 hPa, 1000–700 hPa i 925–850 hPa. Wyniki zostały przedstawione w odniesieniu do dwóch charakterystyk warstw inwersyjnych – częstości i natężenia. Związek występowania inwersji termicznych z sytuacją synoptyczną określono za pomocą częstości i prawdopodobieństwa warunkowego wystąpienia dni z inwersją temperatury powietrza w poszczególnych typach cyrkulacji atmosfery. Przeprowadzona analiza wskazuje na występowanie istotnego statystycznie dodatniego trendu zmian liczby dni z inwersją temperatury powietrza między poziomami 1000 hPa i 925 hPa oraz dodatnich trendów średniego rocznego natężenia zjawiska w warstwach 1000–925 hPa, 1000–850 hPa i 925–850 hPa. Występowaniu warstw inwersyjnych sprzyjają sytuacje antycyklonalne, w szczególności z adwekcją powietrza z sektora południowego – typy SWa, Sa i SEa.

Słowa kluczowe: inwersja temperatury powietrza, reanalizy NCEP-NCAR, typ cyrkulacji atmosfery, Kraków, trendy

Wstęp

Inwersja temperatury jest zjawiskiem polegającym na wzroście temperatury powietrza wraz z wysokością. Występujące w troposferze warstwy inwersyjne cechują się zróżnicowanym zasięgiem przestrzennym i mechanizmem powstawania, czego konsekwencją jest ich podział typologiczny. Biorąc pod uwagę pionowy zasięg zjawiska wyodrębniono przypowierzchniowe inwersje dolne i utrzymujące się w swobodnej atmosferze inwersje górne (*Słownik meteorologiczny* 2003). Inwersje dynamiczne i statyczne wydzielono natomiast na podstawie kryterium genetycznego. Wśród inwersji dynamicznych wyróżnia się powstające w wyniku napływu cieplejszego powietrza nad wychłodzoną powierzchnię czynną inwersje adwekcyjne i frontowe, tworzące się przy opadaniu powietrza w stacjonarnych ośrodkach wysokiego ciśnienia inwersje osiadania oraz będące skutkiem intensywnej turbulencji w swobodnej atmosferze inwersje mieszania. Inwersje statyczne utożsamia się natomiast z procesem radiacyjnego ochładzania powierzchni Ziemi, chmur lub warstw zanieczyszczeń – tzw. inwersje radiacyjne lub nocne (Chromow 1977; Jacobson 2002).

Z punktu widzenia warunków termiczno-wilgotnościowych i dyspersji zanieczyszczeń powietrza inwersje termiczne uznaje się powszechnie za zjawisko niekorzystne. Jest z nim związane m.in. występowanie przygruntowych przymrozków, mgieł i zamglań oraz wysokich stężeń zanieczyszczeń powietrza. Od końca XX w. prężnie rozwijają się badania ukierunkowane na określenie wpływu warunków meteorologicznych na dyspersję pyłów i gazowych związków chemicznych (Niedźwiedź, Olecki

1994; Knozová 2008; Bokwa 2011). Występująca przy utrzymywaniu się inwersji temperatury stała stratyfikacja atmosfery ogranicza pionowe ruchy powietrza – konwekcję i turbulencję, co prowadzi do wzrostu koncentracji zanieczyszczeń powietrza poniżej warstwy inwersyjnej (Jacobson 2002).

Dotychczasowy stan badań i cel pracy

Najczęściej inwersje temperatury powietrza były badane na podstawie danych pozyskanych ze stacji meteorologicznych lub czujników zlokalizowanych na różnych wysokościach nad poziomem morza, co pozwalało na identyfikację tzw. inwersji względnych – występujących w warstwie o miąższości determinowanej deniwelacją punktów pomiarowych. Takie ujęcie problemu reprezentują zarówno prace naukowców niemieckich (Geiger 1961; Koch 1961), jak i polskich (Orlicz, Orliczowa 1955; Milata 1959; Boniecka-Żółcik 1963; Lewińska 1984; Bokwa 2011). Orlicz i Orliczowa (1955) wykorzystali wartości temperatury powietrza z trzech terminów pomiarowych oraz temperatury minimalnej i maksymalnej na pięciu tatrzańskich stacjach meteorologicznych w latach 1949–1954. Zgromadzony materiał pozwolił na ilościową ocenę liczby przypadków, natężenia, długości trwania i grubości warstw inwersyjnych. W odniesieniu do obszaru Krakowa analogiczne analizy wykonały Milata (1959), Lewińska (1984) i Bokwa (2011). Uzyskane przez wszystkich wymienionych autorów wyniki jednoznacznie wskazują na dobową i roczną zmienność występowania inwersji termicznych. Najwięcej przypadków zjawiska zidentyfikowano we wszystkich pracach w porannym terminie obserwacyjnym i w sezonie zimowym.

Dane aerologiczne, które dostarczają informacji o warunkach termicznych panujących w wyższych warstwach troposfery, stanowiły podstawę badań Michalczewskiego (1962), Kłysika (1971) i Kożuchowskiego (1975). Wszystkie opracowania stanowią jednak swoiste studia przypadku. Dłuższą serię pomiarową wykorzystwała Knozová (2008), przedstawiając wieloletnią zmienność inwersji termicznych w Pradze w latach 1975–2006. Przeprowadzone badania dowiodły występowania ujemnego trendu zmian liczby inwersji temperatury powietrza w przy powierzchniowej warstwie atmosfery, co tłumaczono rozwojem miasta i intensyfikacją efektu miejskiej wyspy ciepła. Dane radiosondażowe w kontekście badań inwersji termicznych wykorzystywali też m.in. Serreze i in. (1992), Whiteman i in. (1999), Millionis i Davies (2002) oraz Hudson i Brandt (2005). Szerokie możliwości badania przypowierzchniowych warstw inwersyjnych stwarzają dane lidarowe i sodarowe. Analiza danych pochodzących z akustycznego sondażu atmosfery stanowiła podstawę licznych artykułów Walczewskiego (2006, 2007a, 2007b, 2009), w których nakreślono m.in. związek występowania inwersji temperatury powietrza w Krakowie z typami cyrkulacji według kalendarzy Lityńskiego i Niedźwiedzia. Zagadnienie inwersji termicznych wiąże się również

z problemem miąższości warstwy mieszania, które w odniesieniu do Krakowa było analizowane przez Kaszowskiego i Bielaka (1997), Bielaka i in. (1998, 2000) oraz Kaszowskiego i Hajto (2006). Taki sam materiał źródłowy w innych obszarach wykorzystali Tennekes (1973), Kumar i in. (2001) oraz Lokoshchenko (2002).

Biorąc pod uwagę podkreślaną w literaturze (Zwoździak i in. 1998; Jacobson 2002) zależność warunków meteorologicznych i stężenia zanieczyszczeń powietrza, istotne jest dokładne poznanie reżimu wieloletniego, rocznego i dobowego inwersji temperatury powietrza. Większość wspomnianych opracowań została wykonana na podstawie stosunkowo krótkich serii danych obejmujących okres od kilku dni do kilkunastu lat, co umożliwiło określenie rocznej i dobowej zmienności zjawiska, ale nie pozwoliło na wyznaczenie trendów wieloletnich. Możliwości takie stwarzają dostępne od roku 1949 reanalizy NCEP-NCAR, na podstawie których została wykonana niniejsza analiza. Celem opracowania jest ocena wieloletniej zmienności inwersji termicznych nad Krakowem oraz określenie wpływu warunków cyrkulacyjnych na występowanie omawianego zjawiska. Dodatkowo zostanie scharakteryzowany roczny i dobowy przebieg inwersji temperatury powietrza.

Materiał źródłowy i metody

Badania zostały przeprowadzone dla wielolecia 1961–2010 na podstawie danych uzyskanych z reanaliz NCEP-NCAR (National Centers for Environmental Prediction & National Center for Atmospheric Research) dla punktu gridowego o współrzędnych odpowiadających położeniu Krakowa – 50°N, 20°E (NOAA Earth System Research Laboratory 2013). Były to wartości temperatury powietrza w czterech terminach pomiarowych – 00, 06, 12 i 18 UTC z sześciu poziomów izobarycznych – 1000, 925, 850, 700, 600 i 500 hPa. Analizowana zmienna jest zaliczana do tzw. klasy A, dla której wyniki są konstruowane przede wszystkim na podstawie interpolacji przestrzennej danych obserwacyjnych, a nie modelu matematycznego (Kalnay i in. 1996; Kistler i in. 2001). Pozwoliły one na identyfikację inwersji temperatury powietrza w różnych warstwach dolnej troposfery. Zaznaczyć należy, iż położenie powierzchni izobarycznych jest silnie uzależnione od temperatury powietrza i podlega okresowym wahaniom. W cieplej masie powietrza kolejne poziomy izobaryczne zalegają wyżej, w chłodnej zaś – niżej. W niniejszym opracowaniu inwersje termiczne były zatem identyfikowane w warstwach o jednakowym gradiencie ciśnienia atmosferycznego, lecz w zróżnicowanym zakresie wysokościowym. Do zbadania cyrkulacyjnych warunkowań występowania inwersji temperatury powietrza użyto kalendarza typów cyrkulacji atmosfery dla Polski Południowej (Niedźwiedz 2013).

W artykule inwersję termiczną definiowano jako przypadek wzrostu temperatury powietrza wraz z wysokością, a więc sytuację występowania ujemnego pionowego

gradientu temperatury powietrza. Częstość i natężenie omawianego zjawiska analizowano w ujęciu wieloletnim, rocznym i dobowym. Trendy wieloletnie wyznaczono dla liczby dni z inwersją temperatury powietrza i natężenia zjawiska. Za dzień z inwersją temperatury powietrza uznawano przypadek, gdy ujemny gradient termiczny wystąpił przynajmniej w jednym terminie pomiarowym danej doby. Natężenie inwersji termicznej jest rozumiane jako różnica temperatury powietrza między dwoma granicznymi dla danej warstwy poziomami izobarycznymi i może być utożsamiane ze stosowanymi w literaturze pojęciami intensywności inwersji lub skoku temperatury (Chromow 1977). Związek występowania omawianego zjawiska z warunkami cyrkulacyjnymi został zbadany w odniesieniu do liczby dni z inwersją temperatury powietrza w najniższej położonej warstwie 1000–925 hPa i scharakteryzowany przez częstość oraz prawdopodobieństwo warunkowe wystąpienia dni z inwersją temperatury powietrza w poszczególnych typach cyrkulacji atmosfery. Otrzymane wyniki, ze względu na charakter danych wejściowych, należy traktować jako reprezentatywne dla dolnej troposfery Krakowa i jego okolic.

Wyniki

Częstość i natężenie inwersji temperatury powietrza

Jak należało oczekiwać, najwięcej przypadków inwersji termicznych wystąpiło w warstwach położonych najbliższej powierzchni Ziemi. Częstość zjawiska we wszystkich terminach pomiarowych wyniosła w warstwie 1000–925 hPa – 17,5%, w warstwie 1000–850 hPa – 9,8%, w warstwie 1000–700 hPa – 1,9% i w warstwie 925–850 hPa – 7,4%. Ujemny gradient temperatury powietrza pojawiał się natomiast zdecydowanie rzadziej w warstwach 1000–600 hPa – 0,1%, 925–700 hPa – 0,4%, 850–700 hPa – 0,2%, 925–600 hPa – 0,0% i 850–600 hPa – 0,0%. Inwersje temperatury powietrza nie wystąpiły w pozostałych sześciu warstwach dolnej troposfery – 1000–500 hPa, 925–500 hPa, 850–500 hPa, 700–600 hPa, 700–500 hPa i 600–500 hPa. Do kolejnego etapu badań wzięto wyłącznie warstwy, w których średnia wieloletnia częstość inwersji termicznych przekroczyła 1,0% tj. 1000–925 hPa, 1000–850 hPa, 1000–700 hPa i 925–850 hPa.

Wartość rozpatrywanej charakterystyki cechowała się dużymi wahaniami wieloletnimi. Częstość omawianego zjawiska oscylowała w warstwie 1000–925 hPa w granicach od 10,9% w roku 1965 do 24,3% w roku 1993, w warstwie 1000–850 hPa od 4,9% w roku 1966 do 16,7% w roku 1996, w warstwie 1000–700 hPa od 0,3% w roku 1965 do 6,4% w roku 1996 i w warstwie 925–850 hPa od 3,9% w roku 1974 do 14,0% w roku 1969. Największa wartość współczynnika zmienności częstości występowania inwersji termicznych została stwierdzona między poziomami 1000 hPa

i 700 hPa – 64,2%, najmniejsza zaś między poziomami 1000 hPa i 925 hPa – 18,1% (tab. 1).

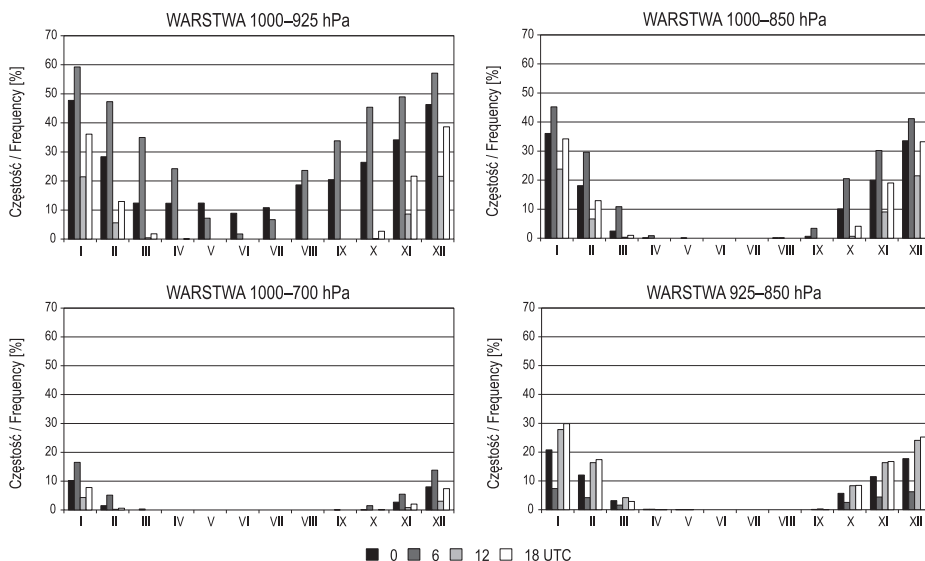
Częstość inwersji temperatury powietrza charakteryzowała się także znaczną zmiennością w przebiegu rocznym i dobowym (ryc. 1). We wszystkich rozpatrywanych warstwach atmosfery była ona największa w sezonie zimowych z maksimum w styczniu – odpowiednio 41,1% w warstwie 1000–925 hPa, 34,8% w warstwie 1000–850 hPa, 9,7% w warstwie 1000–700 hPa i 25,5% w warstwie 925–850 hPa. W ciągu całego roku inwersje termiczne występowały jedynie między poziomami 1000 hPa i 925 hPa. Ich średnia częstość była tam najmniejsza w czerwcu i wyniosła 2,7%. Zjawiska nie stwierdzono w warstwie 1000–850 hPa w czerwcu i lipcu, w warstwie 1000–700 hPa w okresie od kwietnia do sierpnia, a w warstwie 925–850 hPa w okresie od czerwca do sierpnia. W przebiegu dobowym najczęściej warstwy inwersyjne pojawiały się w terminie porannym w warstwach 1000–925 hPa – 32,5%, 1000–800 hPa – 15,2% i 1000–700 hPa – 3,6%. Między poziomami 925 hPa i 850 hPa występowały one stosunkowo często o godzinie 12 i 18 UTC – odpowiednio 8,1% i 8,4%. Przez większość miesięcy między poziomem 1000 hPa a poziomami 925 hPa, 850 hPa i 700 hPa zaznaczała się wyraźna dominacja częstości inwersji temperatury powietrza w terminie porannym. Wyjątek stanowiła warstwa 1000–925 hPa, w której w okresie od maja do lipca inwersje termiczne częściej pojawiały się o godzinie 00 niż 06 UTC.

Rocznie występowały średnio 134 dni z inwersją temperatury powietrza w warstwie 1000–925 hPa, 61 w warstwie 1000–850 hPa, 14 w warstwie 1000–700 hPa i 45 w warstwie 925–850 hPa. W ujęciu wieloletnim liczba ta wahała się odpowiednio od 96 do 175 w warstwie 1000–925 hPa, od 36 do 84 w 1000–850 hPa, od 3 do 39 w 1000–700 hPa i od 28 do 69 w 925–850 hPa (ryc. 2). Wyznaczone trendy

Tab. 1. Średnia wieloletnia częstość inwersji temperatury powietrza i jej charakterystyki statystyczne (Kraków, 1961–2010)

Table 1. Average multi-annual frequency of air temperature inversions and its statistical characteristics (Cracow, 1961–2010)

Warstwa Layer [hPa]	Średnia częstość Average frequency [%]	Zakres zmienności Range of variation [%]		Odchylenie standardowe Standard deviation	Współczynnik zmienności Variability coefficient [%]
		Minimum Minimum	Maksimum Maximum		
925–850	7,4	3,9	14,0	2,3	30,4
1000–700	1,9	0,3	4,5	125	64,2
1000–850	9,8	4,9	16,7	2,5	25,5
1000–925	17,5	10,9	24,3	3,2	18,1

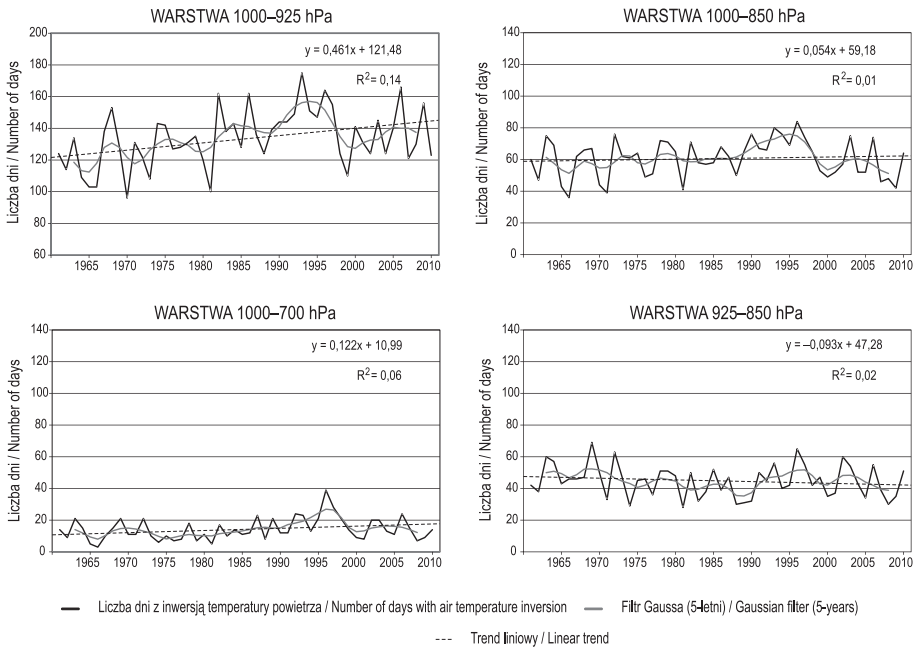


Ryc. 1. Częstość (%) inwersji temperatury powietrza w poszczególnych miesiącach i godzinach w czterech warstwach troposfery (Kraków, 1961–2010)

Fig. 1. Frequency (%) of air temperature inversions in particular months and hours in four tropospheric layers (Cracow, 1961–2010)

wieloletniej zmienności liczby dni z inwersją temperatury powietrza okazały się istotne statystycznie na poziomie 0,05 i 0,01 wyłącznie w odniesieniu do warstwy 1000–925 hPa, a obliczona na podstawie równania regresji zmiana wyniosła +4,5 dnia/10 lat. Średnia miesięczna liczba dni z omawianym zjawiskiem nawiązywała do częstości jego występowania, osiągając we wszystkich warstwach maksimum w grudniu – odpowiednio 20 dni w warstwie 1000–925 hPa, 16 w 1000–850 hPa, 6 w 1000–700 hPa i 12 w 925–850 hPa.

Średnie wieloletnie natężenie inwersji temperatury powietrza wyniosło odpowiednio w warstwie 1000–925 hPa – 1,6°C, w warstwie 1000–850 hPa – 2,4°C, w warstwie 1000–700 hPa – 1,8°C i w warstwie 925–850 hPa – 1,3°C. W przebiegu wieloletnim mieściło się ono w przedziale od 1,2°C do 2,2°C w przypadku warstwy 1000–925 hPa, od 1,5°C do 3,7°C w warstwie 1000–850 hPa, od 0,7°C do 4,3°C w warstwie 1000–700 hPa i od 0,9°C do 2,0°C w warstwie 925–850 hPa (ryc. 3). Wyznaczone trendy wieloletniej zmienności natężenia inwersji temperatury powietrza były istotne statystycznie na poziomie 0,05 w warstwach 1000–925 hPa, 1000–850 hPa i 925–850 hPa, a na poziomie 0,01 w warstwach 1000–850 hPa i 925–850 hPa. Wyniosły one odpowiednio

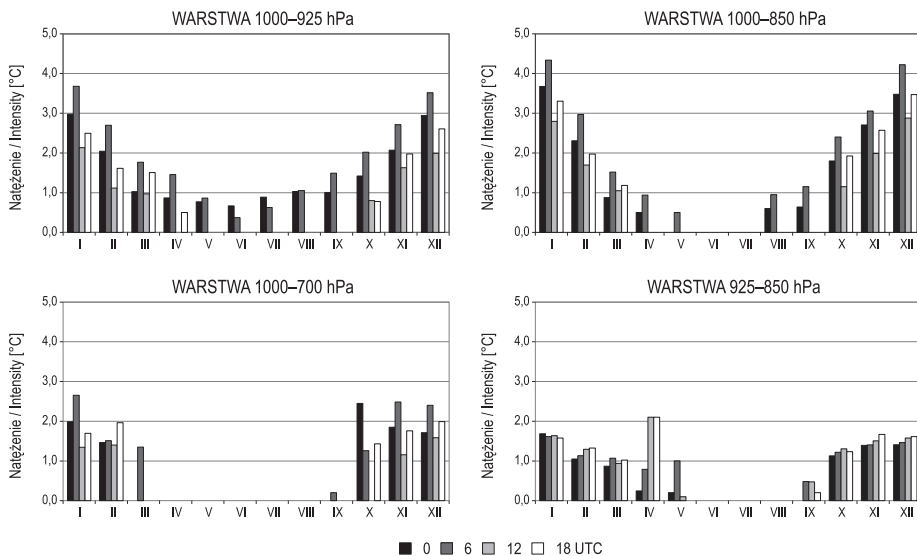


Ryc. 2. Wieloletnia zmienność liczby dni z inwersją temperatury powietrza (Kraków, 1961–2010)

Fig. 2. Multi-annual variability of the number of days with air temperature inversion (Cracow, 1961–2010)

dla warstwy 1000–925 hPa $+0,04^{\circ}\text{C}/10$ lat, dla warstwy 1000–850 hPa $+0,16^{\circ}\text{C}/10$ lat, i dla warstwy 925–850 hPa $+0,07^{\circ}\text{C}/10$ lat.

Najwyższe średnie miesięczne wartości omawianej charakterystyki występowały w między poziomem 1000 hPa a poziomami 925 hPa, 700 hPa i 850 hPa w styczniu, między zaś poziomami 1000 hPa a 850 hPa w styczniu i grudniu (ryc. 4). Biorąc pod uwagę przebieg dobowy, natężenie inwersji termicznych było największe w warstwach 1000–925 hPa, 1000–850 hPa i 1000–700 hPa w terminie porannym. W warstwie 925–850 hPa natomiast zbliżone wartości stwierdzono o godzinie 12 i 18 UTC. W warstwach 1000–925 hPa i 1000–850 hPa roczny i dobowy przebieg natężenia inwersji temperatury powietrza nawiązywał do przebiegu częstości zjawiska, w warstwach 1000–700 hPa i 925–850 hPa nie zaobserwowano natomiast takiej zależności.



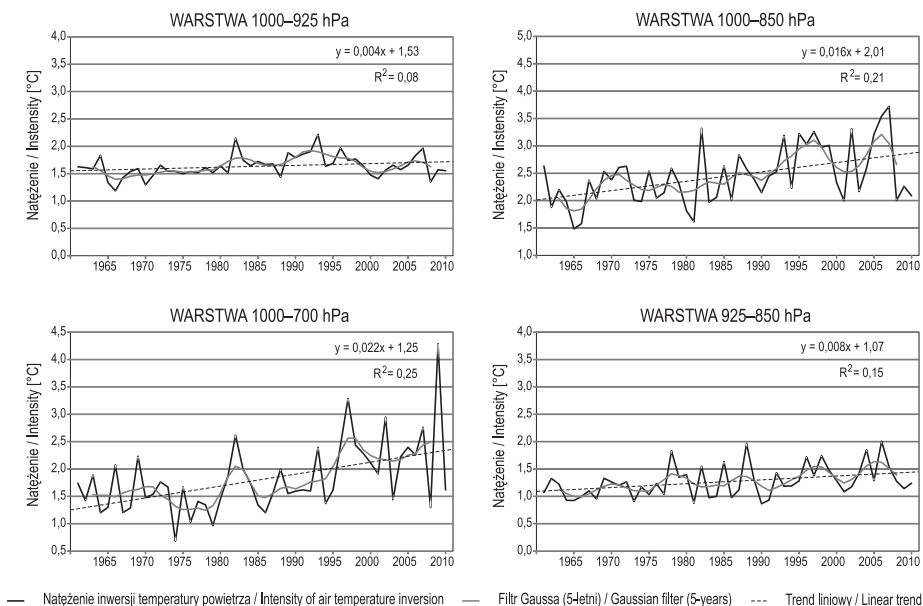
Ryc. 3. Wieloletnia zmienność nateżenia (°C) inwersji temperatury powietrza w czterech warstwach troposfery (Kraków, 1961–2010)

Fig. 3. Multi-annual variability of air temperature inversions intensity (°C) in four tropospheric layers (Cracow, 1961–2010)

Uwarunkowania cyrkulacyjne inwersji temperatury powietrza

Dni z inwersją temperatury powietrza występowały częściej w sytuacjach antycyklonalnych niż cyklonalnych, stanowiąc odpowiednio 66,3% i 33,4% (ryc. 5). Najczęściej pojawiały się one w sytuacji klina antycyklonalnego – 15,3% oraz w typach zachodnim antycyklonalnym – 11,2%, południowo-zachodnim antycyklonalnym – 9,3% i południowo-wschodnim antycyklonalnym – 8,5%. Wśród sytuacji cyklonalnych stosunkowo dużą częstością dni z inwersją termiczną charakteryzowały się bruzda niskiego ciśnienia – 7,6% oraz typy południowo-zachodni – 7,1% i zachodni – 6,4%. Najrzadziej natomiast dni z inwersją temperatury powietrza występowały w typie północnym antycyklonalnym – 0,6%, północno-wschodnim cyklonalnym – 0,5%, północnym cyklonalnym – 0,3% i w centrum niżu – 0,3%.

Roczny przebieg częstości dni z inwersją temperatury powietrza w poszczególnych typach cyrkulacji obrazują wykresy sporządzone dla charakterystycznych w klimatologicznych porach roku miesięcy – stycznia i lipca oraz kwietnia i października (ryc. 6). We wspomnianych miesiącach dni z inwersją termiczną najczęściej występowały



Ryc. 4. Wieloletnia zmienność natężenia (°C) inwersji temperatury powietrza w czterech warstwach troposfery (Kraków, 1961–2010)

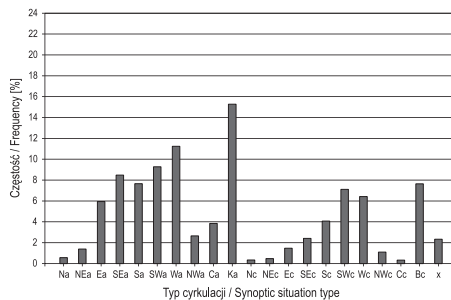
Fig. 4. Multi-annual variability of air temperature inversions intensity (°C) in four tropospheric layers (Cracow, 1961–2010)

w sytuacji klina antycyklonalnego, podczas której wartość omawianej charakterystyki wyniosła od 15,2% w styczniu do 22,1% w lipcu. Duże różnice wartości między styczniem i lipcem stwierdzono w przypadku bruzdy cyklonalnej – w styczniu 3,0%, a w lipcu 22,0% i typu zachodniego antycyklonalnego – w styczniu 16,0%, a w lipcu 3,4%. Większą częstością dni z inwersją temperatury powietrza w październiku niż w kwietniu cechowały się sytuacje antycyklonalne, w szczególności typ południowo-zachodni antycyklonalny – w kwietniu 8,5%, a w październiku 18,2%; zachodni cyklonalny – w kwietniu 3,1%, a w październiku 11,0%; oraz centrum wyżu – w kwietniu 0,8%, a w październiku 6,8%. W kwietniu częściej niż w październiku dni z inwersją termiczną pojawiały się natomiast w sytuacji bruzdy cyklonalnej – w kwietniu 10,5%, a w październiku 4,3%.

W celu wykluczenia możliwości przeszacowania związku inwersji termicznych z sytuacjami synoptycznymi pojawiającymi się często w ciągu roku, zostało obliczone prawdopodobieństwo warunkowe wystąpienia dni z inwersją temperatury powietrza w poszczególnych typach cyrkulacji atmosfery (ryc. 7). Na jego pod-

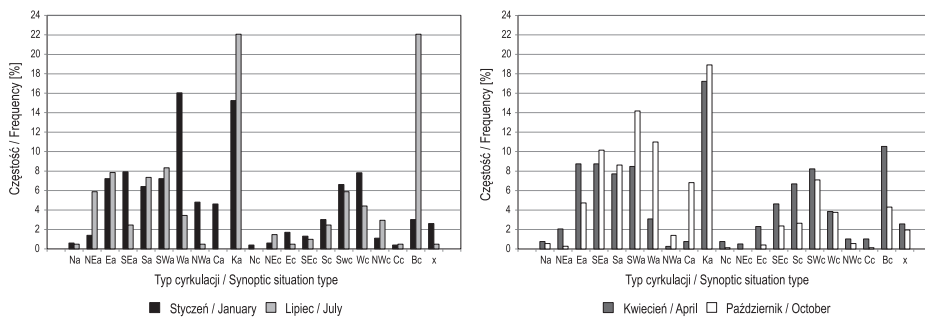
stawie należy uznać, że analizowanemu zjawisku zdecydowanie bardziej sprzyjały sytuacje wyżowe niż niżowe – odpowiednio 47,6% i 24,5%. Szczególnie wysokie wartości prawdopodobieństwa warunkowe przyjmowało dla typu południowo-zachodniego antycyklonalnego – 85,7%, południowego antycyklonalnego – 81,1% i południowo-wschodniego antycyklonalnego – 71,6%. Zdecydowanie mniejsze natomiast dla bezadwekcyjnych sytuacji antycyklonalnych – centrum wyżu – 48,4% i klina antycyklonalnego – 45,7%. Utrzymaniu się warstw inwersyjnych nie sprzyjał typ północny cyklonalny – 4,3%, północny antycyklonalny – 6,7%, północno-wschodni cyklonalny – 7,4% i północno-zachodni cyklonalny – 7,1%.

We wszystkich czterech analizowanych miesiącach największe wartości prawdopodobieństwa warunkowego wystąpiły w typie południowo-zachodnim antycyklonalnym – od 51,5% w lipcu do 97,3% w styczniu; oraz południowym antycyklonalnym – od 51,7% w lipcu do 92,8% w styczniu (ryc. 8). Małym



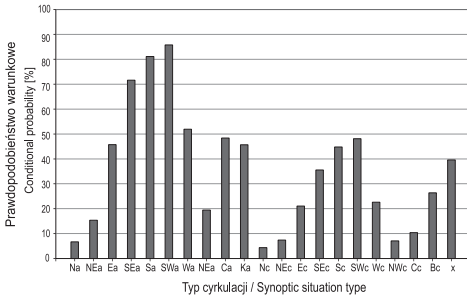
Ryc. 5. Częstość (%) dni z inwersją temperatury powietrza w poszczególnych typach cyrkulacji atmosfery w warstwie 1000–925 hPa (Kraków, 1961–2010)

Fig. 5. Frequency (%) of days with air temperature inversion in particular circulation types in the 1000–925 hPa layer (Cracow, 1961–2010)



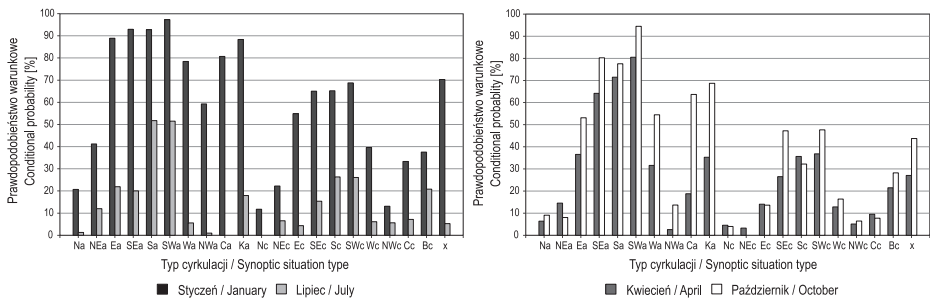
Ryc. 6. Częstość (%) dni z inwersją temperatury powietrza w poszczególnych typach cyrkulacji atmosfery w warstwie 1000–925 hPa – styczeń i lipiec, kwiecień i październik (Kraków, 1961–2010)

Fig. 6. Frequency (%) of days with air temperature inversion in particular circulation types in the 1000–925 hPa layer – January and July, April and October (Cracow, 1961–2010)



Ryc. 7. Prawdopodobieństwo warunkowe (%) wystąpienia dni z inwersją temperatury powietrza w poszczególnych typach cyrkulacji w warstwie 1000–925 hPa (Kraków, 1961–2010)
 Fig. 7. Conditional probability (%) of days with air temperature inversion in particular circulation types in the 1000–925 hPa layer (Cracow, 1961–2010)

prawdopodobieństwem warunkowym wystąpienia dni z inwersją temperatury powietrza cechował się natomiast typ północny cyklonalny – od 0,0% w lipcu do 11,8% w styczniu; północny antycyklonalny – od 1,3% w lipcu do 20,7% w styczniu; i północno-wschodni cyklonalny od 6,5% w lipcu do 22,2% w styczniu. Dużymi różnicami wartościami prawdopodobieństwa warunkowego między poszczególnymi miesiącami charakteryzował się klin antycyklonalny, typ zachodni antycyklonalny, południowo-wschodni antycyklonalny i wschodni antycyklonalny. Wymienione typy osiągały największe wartości prawdopodobieństwa warunkowego w styczniu i październiku, najmniejsze zaś w lipcu.



Ryc. 8. Prawdopodobieństwo warunkowe (%) wystąpienia dni z inwersją temperatury powietrza w poszczególnych typach cyrkulacji w warstwie 1000–925 hPa – styczeń i lipiec, kwiecień i październik (Kraków, 1961–2010)
 Fig. 8. Conditional probability (%) of days with air temperature inversion in particular circulation types in the 1000–925 hPa layer – January and July, April and October (Cracow, 1961–2010)

Podsumowanie

Inwersje temperatury powietrza były najczęstsze w położonej najbliżej powierzchni czynnej warstwie 1000–925 hPa. Ich frekwencja charakteryzowała się dużą zmiennością roczną i dobową. We wszystkich badanych warstwach dolnej troposfery omawiane zjawisko pojawiało się najczęściej w styczniu, a w przebiegu dobowym w terminie porannym, co jest zgodne z wynikami badań wspomnianych w opracowaniu badaczy. Wyjątek stanowi warstwa 925–850 hPa, dla której częstość inwersji termicznych była podobna o godzinie 12 i 18 UTC.

Natężenie inwersji temperatury powietrza nawiązywało do rocznego i dobowego przebiegu ich częstości w przypadku warstw 1000–925 hPa i 1000–850 hPa. Podobnych prawidłowości nie stwierdzono w przypadku warstw 1000–700 hPa i 925–850 hPa. Wspomniana już warstwa 925–850 hPa cechowała się dużą częstością i natężeniem zjawiska o godzinie 12 i 18 UTC, co prawdopodobnie można wiązać z występowaniem tzw. inwersji wzniesionych, które powstają wskutek rozwoju wstępujących ruchów powietrza poniżej warstwy hamującej.

Zarówno liczba dni z inwersją temperatury powietrza, jak i jej natężenie wykazywały stosunkowo duże wahania wieloletnie – szczególnie w przypadku natężenia w warstwach 1000–850 hPa i 1000–700 hPa. Analiza dowiodła występowania istotnego statystycznie dodatniego trendu zmian liczby dni z inwersją temperatury powietrza w warstwie 1000–925 hPa. Wynik ten pozostaje w opozycji do wspomnianych już badań prowadzonych w Pradze, gdzie stwierdzono występowanie ujemnego trendu zmian liczby przypadków inwersji temperatury powietrza w przypowierzchniowej warstwie atmosfery. Znacząco wzrastało również natężenie zjawiska we wszystkich analizowanych warstwach.

Przeprowadzone badania potwierdziły, że inwersjom termicznym sprzyjają sytuacje antycyklonalne. Szczególnie dobre warunki występowania warstw inwersyjnych towarzyszyły sytuacjom wyżowym z napływem powietrza z sektora południowego – typy SWa, Sa, SEa. Wbrew oczekiwaniom w bezadwekcyjnych sytuacjach wyżowych – typy Ca i Ka – wartości prawdopodobieństwa warunkowego wystąpienia dni z inwersją temperatury powietrza były zdecydowanie niższe. Za sytuacje niesprzyjające powstawaniu zjawiska należy bez wątplenia uznać sytuacje niżowe z napływem powietrza z sektora północnego – typy NWc, Nc i NEc.

Literatura

Bielak A., Feleksy-Bielak M., Kaszowski W., Walczewski J., 2000, *Częstość występowania różnych głębokości mieszanina w Krakowie – niektóre dane z obserwacji lidarowych*, Wiadomości IMGW, 23, 4, 29–36.

- Bielak A., Feleksy-Bielak M., Śliwińska U., 1998, *Próba oceny średniej głębokości mieszania w Krakowie – przebieg dobowy i roczny*, Wiadomości IMGW, 21, 1, 35–48.
- Bokwa A., 2011, *Influence of air temperature inversions on the air pollution dispersion conditions in Kraków*, Zeszyty Naukowe UJ, Prace Geograficzne, 126, 41–51.
- Bonieczka-Żółcik H., 1963, *Częstość inwersji temperatury powietrza w Krynicy-Zdroju w latach 1956–1960*, Przegląd Geofizyczny, 8, 1–2, 37–44. Chromow S.P., 1977, *Meteorologia i klimatologia*, Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa.
- Chromow S.P., 1977, *Meteorologia i klimatologia*, Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa.
- Geiger R., 1961, *Das Klima der bodennahen Luftschicht: Ein Lehrbuch der Mikroklimatologie*, Friedrich Vieweg & Sohn, Braunschweig.
- Hudson S.R., Brandt R.E., 2005, *A look at the surface-based temperature inversion on the Antarctic Plateau*, Journal of Climate, 18, 1673–1696.
- Jacobson M.Z., 2002, *Atmospheric pollution: History, science and regulation*, Cambridge University Press, New York.
- Kalnay E., Kanamitsu M., Kistler R., Collins W., Deaven D., Gandin L., Iredell M., Saha S., White G., Woollen J., Zhu Y., Chelliah M., Ebisuzaki W., Higgins W., Janowiak J., Mo K.C., Ropelewski C., Wang J., Leetmaa A., Reynolds R., Jenne R., Joseph D., 1996, *The NCEP/NCAR 40-Year Reanalysis Project*, Bulletin of American Meteorological Society, 77, 437–471.
- Kaszowski W., Bielak A., 1997, *Pomiary głębokości warstwy mieszania z użyciem lidar, sodaru oraz balonu na uwięzi*, Wiadomości IMGW, 20, 1, 59–65.
- Kaszowski W., Hajto M., 2006, *Metody określania głębokości warstwy mieszania – pomiary teledetekcyjne a formuły parametryzacji*, Wiadomości IMGW, 29, 3–4, 53–57.
- Kistler R., Kalnay E., Collins W., Saha S., White G., Wollen J., Chelliah M., Ebisuzaki W., Kanamitsu M., Kousky V., van der Dool H., Jenne R., Florino M., 2001, *The NCEP-NCAR 50-Year Reanalysis: Monthly and Means CD-ROM and Documentation*, Bulletin of American Meteorological Society, 82, 247–267.
- Kłysik K., 1971, *Ze studiów nad stratyfikacją powietrza w Dolinie Wilkowskiej*, Przegląd Geofizyczny, 26, 1–2, 101–110.
- Knozová G., 2008, *Inwersje temperatury powietrza na stacji aerologicznej Praga–Libuš (1975–2006)*, [w:] K. Kłysik, J. Wibig, K. Fortuniak (red.), *Klimat i bioklimat miast*, Wydawnictwo Uniwersytetu Łódzkiego, Łódź, 65–79.
- Koch H.G., 1961, *Die warme Hangzone. Neue Anschauungen zur nächtlichen Kaltluftschichtung in Tälern und an Hängen*, Zeitschrift für Meteorologie, 15, 1–6, 151–171.
- Kożuchowski K., 1975, *Profil temperatury w Tatrach a stratyfikacja termiczna atmosfery*, Przegląd Geofizyczny, 20, 97–110.
- Kumar V.S., Kumar Y.B., Raghunath K., Rao P.B., Krishnaiah M., Mizutani K., Aoki T., Yasui M., Itabe T., 2001, *Lidar measurements of mesospheric temperature inversion at a low latitude*, Annales Geophysicae, 19, 1039–1044.
- Lewińska J., 1984, *Struktura termiczna powietrza nad Krakowem*, Biuletyn Instytutu Kształtowania Środowiska, 3–4, 46–52.

- Lokoshchenko M.A., 2002, *Long-term sodar observations in Moscow and a new approach to potential mixing determination by radiosonde data*, Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 19, 1151–1162.
- Michalczewski J., 1962, *Długotrwałe zastoiska mrozowe Kotliny Podhalańskiej*, Acta Geographica Lodziensia, 13, 27–70.
- Milata S., 1959, *Częstotliwość inwersji względnych temperatury powietrza w Krakowie w latach 1954, 1955 i 1957*, Przegląd Geofizyczny, 4, 1, 19–37.
- Milonis A.E., Davies D.T., 2002, *Associations between atmospheric temperature inversions and vertical wind profiles: A preliminary assessment*, Meteorological Applications, 9, 223–228.
- Niedźwiedz T., Olecki Z., 1994, *Wpływ sytuacji synoptycznych na zanieczyszczenie powietrza w Krakowie*, Zeszyty Naukowe UJ, Prace Geograficzne, 96, 55–66.
- Niedźwiedz T., 2013, *Kalendarz typów cyrkulacji atmosfery dla Polski Południowej – zbiór komputerowy*, UŚ, Katedra Klimatologii, Sosnowiec, <http://klimat.wnoz.us.edu.pl/> (09. 2013).
- NOAA Earth System Research Laboratory, <http://www.esrl.noaa.gov/> (07. 2013).
- Orlicz M., Orliczowa J., 1955, *Inwersje temperatury na północnym skłonie Tatr*, Przegląd Meteorologiczny i Hydrologiczny, 8, 3–4, 235–255.
- Serreze, M.C., Russell C.S., Jonathan D.K., 1992, *Low-level temperature inversions of the Eurasian Arctic and comparisons with Soviet drifting station*, Journal of Climate, 5, 615–629.
- Słownik meteorologiczny*, 2003, T. Niedźwiedz (red.), Polskie Towarzystwo Meteorologiczne, IMGW, Warszawa.
- Tennekes, H., 1973, *A model for the dynamics of the inversion above a convective boundary layer*, Journal of Atmospheric Sciences, 30, 558–567.
- Walczewski J., 2006, *Liczba dni z całodziennymi inwersjami w Krakowie w latach 1994–2005*, Wiadomości IMGW, 50, 3–4, 69–73.
- Walczewski J., 2007a, *Analiza częstości występowania w Krakowie całodziennych inwersji w zestawieniu z typami cyrkulacji w okresie lat 1994–2005*, Wiadomości IMGW, 51, 1, 49–54.
- Walczewski J., 2007b, *Związki między występowaniem typów cyrkulacji J. Lityńskiego a pojawianiem się całodziennych warstw inwersyjnych w latach 1994–2005*, Wiadomości IMGW, 51, 2–3, 65–74.
- Walczewski J., 2009, *Niektóre dane o występowaniu całodziennych warstw inwersyjnych w atmosferze Krakowa i uwarunkowania tego zjawiska*, Przegląd Geofizyczny, 54, 3–4, 183–191.
- Whiteman C.D., Xindi B., Shiyuan Z., 1999, *Wintertime evolution of the temperature inversion in the Colorado Plateau Basin*, Journal of Applied Meteorology and Climatology, 38, 1103–1117.
- Zwoździak J., Zwoździak A., Szczurek A., 1998, *Meteorologia w ochronie atmosfery*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław.

Angelika Palarz

Uniwersytet Jagielloński

Instytut Geografii i Gospodarki Przestrzennej

ul. Gronostajowa 7, 30-387 Kraków

e-mail: angelika.palarz@uj.edu.pl

