

## INWERSJA TEMPERATURY POWIETRZA W TATRACH W LATACH 1995–2020

ZOFIA GRAJEK, KATARZYNA SZYGA-PLUTA\*

Zakład Meteorologii i Klimatologii, Instytut Geografii Fizycznej i Kształtowania Środowiska Przyrodniczego,  
Wydział Nauk Geograficznych i Geologicznych, Uniwersytet im. Adama Mickiewicza w Poznaniu,  
ul. B. Krygowskiego 10, 61-680 Poznań  
\*ORCID: 0000-0001-9718-3920

**Abstract:** *Air temperature inversion in the Tatra Mountains in 1995–2020.* This paper concerns the characteristics of the multi-annual, seasonal and daily variability of thermal inversion in the Tatra Mountains in 1995–2020. The analysis was performed on the basis of hourly measurements taken at the Institute of Meteorology and Water Management National Research Institute (IMGW-PIB) station in Kasprowy Wierch and Zakopane. The types of atmosphere circulation were determined found when the inversion was most frequent. The concentration of PM10 during the inversion and its intensity were analyzed and indicated that the number of inversion cases was growing. The analysis confirmed that inversions were most frequent in the cold season in the evening hours during anticyclonic circulation. Strong inversions occurred in the cold season. Winter inversions were associated with an increase in PM10 concentration.

**Keywords:** thermal inversion, atmosphere circulation, particulate matter PM10, Kasprowy Wierch, Zakopane

### WSTĘP

Inwersja temperatury powietrza inaczej nazywana termiczną to zjawisko wzrostu temperatury powietrza wraz z wysokością (Woś 1999). Jest to sytuacja odwrótne od normalnej, w której zgodnie z przemianami adiabatycznymi, masy powietrza, unosząc się, ulegają rozprężaniu, czyli tracą energię wewnętrzną układu kosztem przeciwdziałania zewnętrznemu ciśnieniu atmosferycznemu. Stan równowagi powietrza jest najbardziej stały w czasie trwania inwersji termicznej, czyli gdy gradient faktyczny będzie ujemny. Kaczorowska (1977) wydzieliła ze względu na pionowy zasięg zjawiska inwersje niskie i wysokie. Inwersje niskie są związane z wypromieniowaniem ciepła z podłoża. Inwersje wysokie występują na różnych wysokościach w swobodnej atmosferze, są związane z wypromieniowaniem ciepła z górnych powierzchni chmur lub dymów.

W drugiej połowie XIX w. badania inwersji w Tatrach zapoczątkował Kolbenheyer (1890 za: Michalczewski 1962). Analizy ilościowej zjawiska inwersji temperatury powietrza na północnym skłonie Tatr dokonali Orlicz i Orliczowa (1955). Tym samym obszarem badawczym zajął się Kożuchowski (1975). Badał on profil temperatury w Tatrach i jej związek ze stratyfikacją termiczną atmosfery. Długotrwałe zastoiska mrozowe w Kotlinie Podhalańskiej oraz warunki ich

powstawania badań Michalczewski (1962). Wibig (1997) dokonała analizy inwersji termicznej w Kotlinie Zakopiańskiej w profilu Kasprowy Wierch–Zakopane. Wibig (1997) zbadała zależność występowania inwersji z typami cyrkulacji atmosferycznej według Osuchowskiej-Klein (1978).

Badacze zjawisko inwersji często analizowali dla regionów górskich. Zmiany inwersji termicznej w dolnej troposferze na obszarze na południe od Karpat podjęli w swoich badaniach Bărcăcianu i Apostol (2014). Rozkładem temperatury powietrza w rejonach wysokogórskich na Płaskowyżu Tybetańskim zajęli się Du i in. (2007).

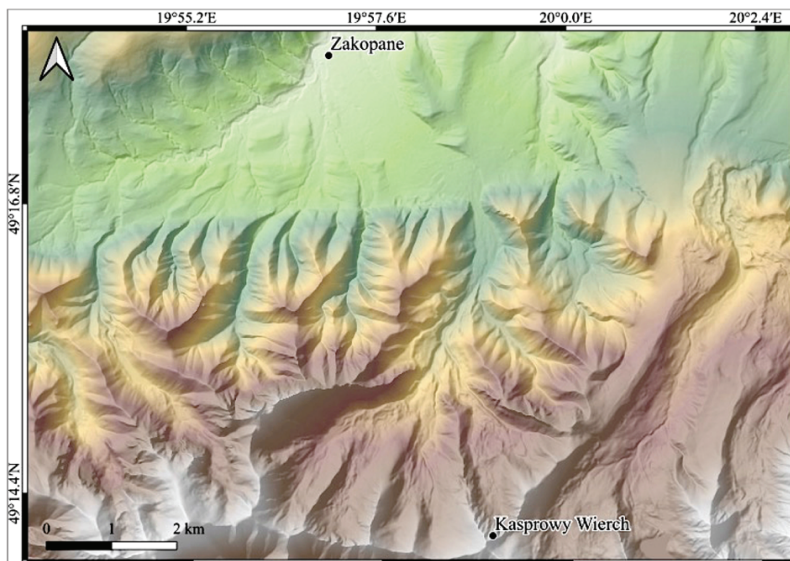
W wielu pracach naukowych temat inwersji termicznej powiązany jest z utrudnioną dyspersją zanieczyszczeń powietrza i występowaniem mgieł. Tematykę inwersji termicznych i wystąpienia w czasie ich trwania wysokich stężeń zanieczyszczeń podjęli: Rendón i in. (2014), Palarz i in. (2015), Largeron i Staquet (2016), Palarz i Celiński-Mysław (2017).

Hiebl i Schöner (2018) w swojej publikacji poruszyli temat inwersji termicznej i zmian klimatycznych, które powstały w wyniku ocieplającego się klimatu. Badaniem inwersji termicznych na innych obszarach zajęli się: Bil (1998), Kruśzewski (2002), Palarz (2014) oraz Czarnecka i in. (2019).

Główny cel pracy stanowiła analiza prawidłowości występowania oraz czasowej zmienności inwersji termicznej w profilu Kasprowy Wierch–Zakopane w latach 1995–2020. Ważnymi aspektami pracy było określenie uwarunkowań cyrkulacyjnych na podstawie typów cyrkulacji według kalendarza Niedźwiedzia (2017) oraz korelacja wysokich stężeń pyłu zawieszonego PM10 z występowaniem inwersji termicznych.

## OBSZAR, MATERIAŁ ŹRÓDŁOWY I METODY BADAŃ

Stacja w Zakopanem położona jest na wysokości 852 m n.p.m., a stacja wysokogórska na Kasprowym Wierchu na 1990 m n.p.m. (imgw.pl). Bliska odległość obu stacji i znaczne zróżnicowanie w wysokości stwarzają dogodne warunki do analizy ilościowej inwersji termicznej (ryc. 1). Średnia roczna temperatura powietrza w Zakopanem wynosi 6,1°C, a na Kasprowym Wierchu –0,7°C (Woś 2010). Na analizowanym obszarze najczęściej odnotowuje się wiatr z sektora południowo-zachodniego i północno-wschodniego (Koźmiński i in. 2003 za: Stopa-Boryczka, Boryczka 2005). Charakterystyczne dla obszaru Tatr jest występowanie wiatrów halnych, górskich i dolinnych.



Ryc. 1. Położenie stacji Zakopane i Kasprowy Wierch  
 Źródło: Opracowanie własne na podstawie: [www.geoportal.gov.pl](http://www.geoportal.gov.pl).

Fig. 1. Location of the Zakopane and Kasprowy Wierch stations

Cogodzinne pomiary temperatury powietrza w okresie 1995–2020, które są podstawą analizy głównego celu pracy, uzyskano ze stacji IMGW-PIB Zakopane i Kasprowy Wierch ([danepubliczne.imgw.pl](http://danepubliczne.imgw.pl)).

Za kryterium wystąpienia inwersji termicznej przyjęto godzinę, w której temperatura powietrza odnotowana na stacji Kasprowy Wierch była wyższa o co najmniej  $0,1^{\circ}\text{C}$  w porównaniu z temperaturą w Zakopanem. Wystąpienie danej inwersji przypisywano kolejno do godziny, dnia, miesiąca i roku, w których dana inwersja się rozpoczęła. Za czas trwania danej inwersji termicznej uznano okres od godziny wystąpienia inwersji do jej zakończenia włącznie. W czasie trwania inwersji obliczono odchylenie wartości temperatury powietrza w warstwie inwersji od wartości temperatury według średniego gradientu adiabatyicznego ( $6,5^{\circ}\text{C}/\text{km}$ ) przypadającej na różnicę położenia stacji w Zakopanem i na Kasprowym Wierchu ( $7,4^{\circ}\text{C}$ ).

Intensywność inwersji termicznych analizowano dla godzin, w których wystąpiła inwersja w analizowanym profilu. Za intensywność przyjęto różnicę temperatury powietrza pomiędzy stacją na Kasprowym Wierchu a stacją w Zakopanem.

Intensywność inwersji termicznych określono na podstawie kryterium zaproponowanego przez Orlicza i Orliczową (1955):

- inwersja słaba  $0\text{--}2^{\circ}\text{C}$ ,
- inwersja umiarkowana  $2,1\text{--}6^{\circ}\text{C}$ ,
- inwersja silna  $>6^{\circ}\text{C}$ .

Typy cyrkulacji podczas trwania inwersji termicznej od 1995–2018 określano na podstawie kalendarza typów cyrkulacji dla Polski Południowej Niedźwiedzia (2017) ([www.kk.wnoz.us.edu.pl](http://www.kk.wnoz.us.edu.pl)) (tab. 1). Typy cyrkulacji z okresu 2018–2020 uzyskano dzięki uprzejmości Profesora Tadeusza Niedźwiedzia. Użyto kodowania typów cyrkulacji w zbiorze – 21 typów. Dokonano analizy częstości wystąpienia typów cyrkulacyjnych dla analizowanego okresu. Ponadto obliczono prawdopodobieństwo warunkowe wystąpienia inwersji termicznej przy pojawieniu się danego typu cyrkulacji. Prawdopodobieństwo obliczono na podstawie ilorazu liczby dni z inwersją termiczną w danym typie cyrkulacyjnym i liczbą dni z danym typem cyrkulacyjnym w analizowanym okresie.

Tabela 1. Objasnienie symboli typów cyrkulacyjnych wg kalendarza Niedźwiedzia  
Table 1. Explanation of symbols of circulation types according to the Niedźwiedź's calendar

Typy antycyklonalne	
Na	Adwekcja powietrza z północy
NEa	Adwekcja powietrza z północnego wschodu
Ea	Adwekcja powietrza ze wschodu
SEa	Adwekcja powietrza z południowego wschodu
Sa	Adwekcja powietrza z południa
SWa	Adwekcja powietrza z południowego zachodu
Wa	Adwekcja powietrza z zachodu
NWa	Adwekcja powietrza z północnego zachodu
Ca	Sytuacja centralna antycyklonalna, brak adwekcji
Ka	Klin antycyklonalny, oś wału wysokiego ciśnienia
Typy cyklonalne	
Nc	Adwekcja powietrza z północy
NEc	Adwekcja powietrza z północnego wschodu
Ec	Adwekcja powietrza ze wschodu
SEc	Adwekcja powietrza z południowego wschodu
Sc	Adwekcja powietrza z południa
SWc	Adwekcja powietrza z południowego zachodu
Wc	Adwekcja powietrza z zachodu
NWc	Adwekcja powietrza z północnego zachodu
Cc	Sytuacja centralna cyklonalna
Bc	Bruzda cyklonalna, rozmyty obszar niskiego ciśnienia lub oś bruzdy niżowej
x	Niesklasyfikowana sytuacja

Źródło: opracowanie własne na podstawie: <http://www.kk.wnoz.us.edu.pl/nauka/kalendarz-typow-cyrkulacji/>.

Analizę wpływu inwersji na koncentrację zanieczyszczeń przeprowadzono na podstawie codziennych pomiarów stężenia pyłu zawieszonego PM10 od 2010 do 2020 r. ze stacji w Zakopanem dla godzin z inwersją ([powietrze.gios.gov.pl](http://powietrze.gios.gov.pl)). Wykorzystano terminy pomiarowe zawierające pełne dane. Użyto indeksów jakości powietrza zaproponowanych przez Główny Inspektorat Ochrony Środowiska

(powietrze.gios.gov.pl) (tab. 2). W niniejszej pracy za powietrze dobrej jakości uznano bardzo dobry, dobry i umiarkowany indeks jakości powietrza dla stężeń PM10. Za powietrze złej jakości uznano dostateczny, zły i bardzo zły indeks jakości powietrza dla stężeń PM10.

Tabela 2. Indeks jakości powietrza dla stężeń pyłu zawieszonego PM10  
Table 2. The air quality index for PM10 concentrations

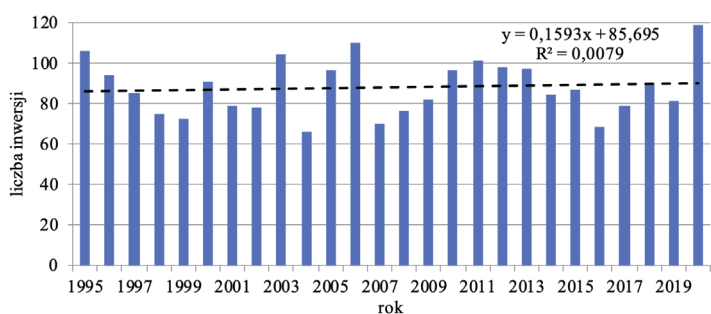
Indeks jakości powietrza	PM10 [ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ]
bardzo dobry	0–20
dobry	20,1–50
umiarkowany	50,1–80
dostateczny	80,1–110
zły	110,1–150
bardzo zły	>150

Źródło: opracowanie własne na podstawie: <powietrze.gios.gov.pl>.

## WYNIKI

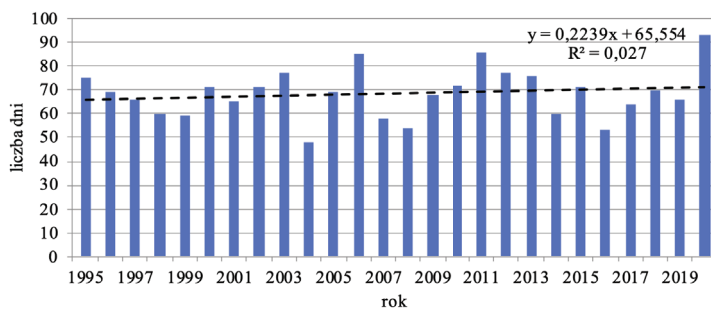
### Przebieg wieloletni, roczny, dobowy liczby inwersji termicznych

W latach 1995–2020 odnotowano 2284 inwersje termiczne w profilu Kasprowy Wierch–Zakopane (ryc. 2). Największą liczbę inwersji odnotowano w 2020 r. i wyniosła ona 119 przypadków. Wysokie liczby inwersji wystąpiły również w latach: 1995, 2003, 2006 i 2011. Najmniejszą liczbę inwersji odnotowano w 2004 r., kiedy wystąpiła 66 razy. Systematyczny spadek liczby inwersji odnotowano od 1995 do 1999 r., natomiast systematyczny wzrost od 2007 do 2011 roku. W badanym wieloleciu inwersja wystąpiła podczas 1783 dni (ryc. 3). Największą liczbę dni z inwersją odnotowano w 2020 r. – 93, natomiast najmniejszą w 2004 r. – 48.



Ryc. 2. Liczba inwersji temperatury powietrza w profilu Kasprowy Wierch–Zakopane w latach 1995–2020

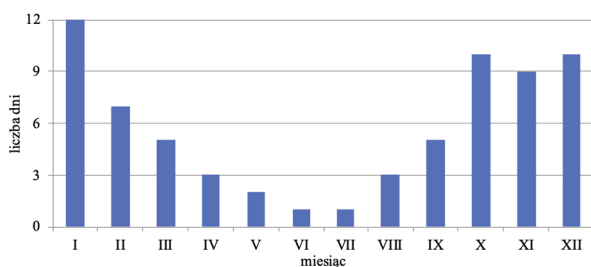
Fig. 2. Number of air temperature inversions in the Kasprowy Wierch–Zakopane profile in 1995–2020



Ryc. 3. Liczba dni z inwersją termiczną w profilu Kasprowy Wierch-Zakopane w latach 1995–2020

Fig. 3. Number of days with thermal inversion in the Kasprowy Wierch-Zakopane profile in 1995–2020

W latach 1995–2020 średnia liczba dni z inwersją w miesiącu wynosiła 6 dni. Największą średnią liczbę dni z inwersją odnotowano w styczniu – 12 dni, a najmniejszą w czerwcu i lipcu, kiedy inwersje występowały średnio 1 raz. Widoczna jest wyraźna sezonowość w przebiegu średniej liczby dni z inwersją w ciągu roku (ryc. 4). Największe średnie liczby dni z inwersją występowały w miesiącach zimowych (grudzień, styczeń) i jesiennych (październik, listopad). W miesiącach letnich (czerwiec, lipiec, sierpień) i w kwietniu dni z inwersją termiczną występowały najrzadziej. Średnia liczba dni z inwersją malała od stycznia do lipca, a wzrastała od sierpnia do grudnia (z wyjątkiem listopada).

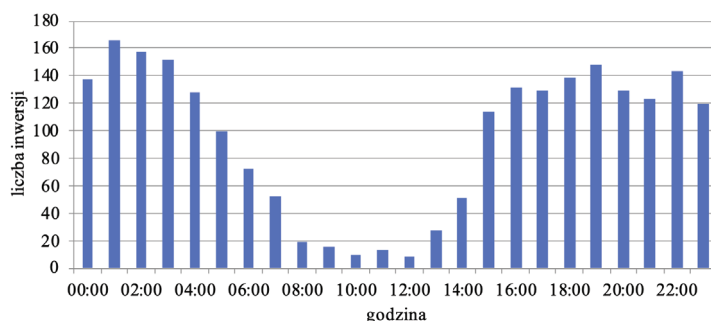


Ryc. 4. Średnia liczba dni z inwersją termiczną w poszczególnych miesiącach w profilu Kasprowy Wierch-Zakopane w latach 1995–2020

Fig. 4. Average number of days with thermal inversion in individual months in the Kasprowy Wierch-Zakopane profile in 1995–2020

W przebiegu dobowym liczby inwersji termicznych można zaobserwować wyraźną cykliczność (ryc. 5). Największą liczbę inwersji odnotowano w godzinach rannych, popołudniowych i nocnych, natomiast najmniejszą liczbę w godzinach późnorannych i przedpołudniowych (od 8:00 do 12:00). Średnia suma liczby inwersji termicznych w ciągu godziny wyniosła 95 przypadków. Największą liczbę inwersji termicznych w przebiegu dobowym odnotowano o godzinie 1:00 – 166. Najmniejszą

liczbę inwersji termicznych odnotowano o godzinie 12:00 – 8. Różnica pomiędzy maksimum o 1:00 a minimum o 12:00 wyniosła 158 przypadków inwersji termicznych, z czego wynika, że różnice te są znaczne. Największy wzrost liczby inwersji nastąpił w godzinach od 12:00 do 16:00. Wynikiem tego jest wyraźny spadek liczby inwersji w pierwszej połowie dnia i systematyczny wzrost w drugiej jej połowie.

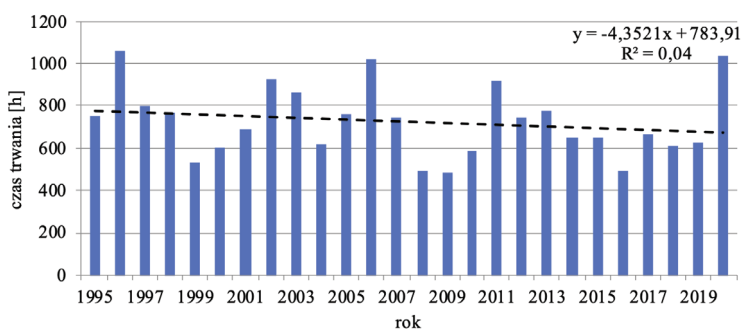


Ryc. 5. Liczba inwersji temperatury powietrza w przebiegu dobowym w profilu Kasprowy Wierch–Zakopane w latach 1995–2020

Fig. 5. Number of air temperature inversions in the daily course in the Kasprowy Wierch–Zakopane profile in 1995–2020

### Przebieg wieloletni, roczny, dobowy czasu trwania inwersji termicznych

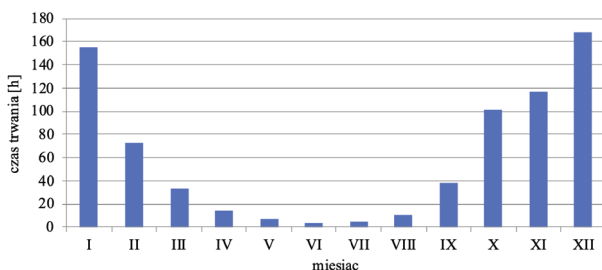
Średni czas trwania inwersji w ciągu roku w badanym wieloleciu wyniósł 725 godzin. Największą sumę roczną czasu trwania inwersji odnotowano w 1996 r. – 1060 godzin, równie wysokie sumy powyżej 1000 godzin odnotowano także w 2006 (1017 godzin) i 2020 r. (1037 godzin) (ryc. 6). Najkrócej inwersje trwały w 2009 r. – 485 godzin. Najdłuższy okres wzrostu czasu trwania inwersji w następujących po sobie latach trwał od 1999 do 2002 roku.



Ryc. 6. Czas trwania [h] inwersji termicznych w profilu Kasprowy Wierch–Zakopane w latach 1995–2020

Fig. 6. Duration [h] of thermal inversions in the Kasprowy Wierch–Zakopane profile in 1995–2020

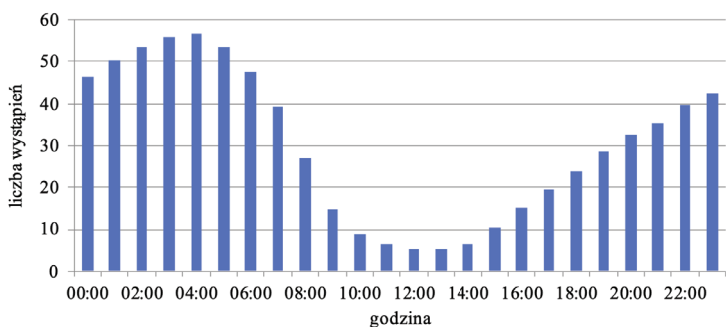
Średni czas trwania inwersji termicznych w miesiącu w analizowanym okresie wyniósł 60 godzin. Najdłuższy średni czas trwania odnotowano w grudniu – 169 godzin, najkrótszy zaś w czerwcu – 3 godziny (ryc. 7). Największe różnice pomiędzy następującymi po sobie miesiącami przypadały na okres zimowy, natomiast najmniejsze różnice na okres letni. W przebiegu rocznym średniego czasu trwania inwersji widać wyraźną sezonowość.



Ryc. 7. Średni czas trwania [h] inwersji termicznych w przebiegu rocznym w profilu Kasprowy Wierch–Zakopane w latach 1995–2020

Fig. 7. Average duration [h] of thermal inversions in the annual course in the Kasprowy Wierch–Zakopane profile in 1995–2020

Średnia liczba wystąpień inwersji termicznych w przebiegu dobowym w analizowanym okresie wyniosła 30 przypadków. Wystąpienie inwersji termicznych wykazuje wyraźny przebieg dobowy. Najczęstszym tworzeniem się inwersji termicznych charakteryzowały się godziny późnonocne i wczesnoranne (od 1:00 do 5:00). Najrzadziej inwersje odnotowano w godzinach od 10:00 do 15:00. Najczęściej inwersje odnotowano o godzinie 4:00 – 57 przypadków, najmniejszą liczbę wystąpień odnotowano o 12:00 i 13:00 – 5 przypadków (ryc. 8).



Ryc. 8. Średnia liczba wystąpień inwersji termicznych w przebiegu dobowym w profilu Kasprowy Wierch–Zakopane w latach 1995–2020

Fig. 8. Average number of occurrences of thermal inversions in the daily course in the Kasprowy Wierch–Zakopane profile in 1995–2020

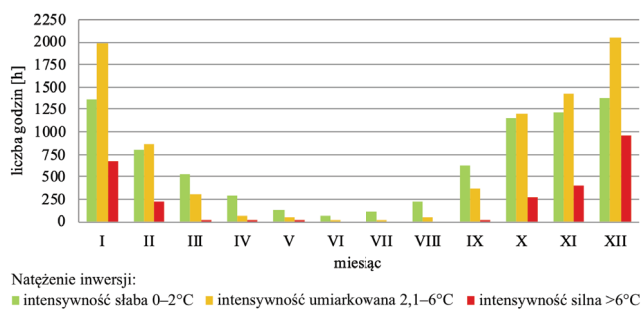


## Intensywność inwersji termicznych

Intensywność inwersji termicznych rozpatrywano w trzech kategoriach intensywności. W analizowanym okresie najczęściej występowały inwersje umiarkowane, następnie słabe, a najrzadziej inwersje intensywne. Słabe inwersje stanowiły 41,8% wszystkich godzin z inwersją (7883 przypadków). Inwersje umiarkowane stanowiły 44,5% inwersji (8394 przypadków), natomiast inwersje silne odnotowane były w 13,7% wszystkich przypadków (2577). Liczba inwersji oraz ich natężenie mają wyraźny przebieg roczny (ryc. 9). Inwersje o intensywności umiarkowanej występowały w ciągu całego roku. Średnia roczna liczba godzin w tej kategorii wyniosła 700 godzin. Najczęściej inwersje niezależnie od natężenia tworzyły się w grudniu (2043 h), a najrzadziej w lipcu (16 h). Styczeń i grudzień charakteryzowały się wyraźnie większą liczbą godzin z umiarkowaną inwersją termiczną w porównaniu z innymi miesiącami. Od stycznia do lipca liczba godzin z inwersją o tej intensywności maleje, a od sierpnia do grudnia rośnie. Liczba godzin z inwersją termiczną o intensywności umiarkowanej we wszystkich miesiącach jest większa od intensywności silnej.

Inwersje o intensywności słabej występowały w ciągu całego roku. Średnia roczna liczba godzin w tej kategorii wyniosła 657 godzin. W okresie chłodnym (X–II) inwersje umiarkowane występowały częściej niż inwersje słabe, natomiast rzadziej w okresie od marca do września. Najwięcej godzin z inwersją w tej kategorii podobnie jak w kategorii umiarkowanej odnotowano w grudniu (1376 h), a najmniejszą w czerwcu (64 h). Od stycznia do czerwca liczba godzin z inwersją o intensywności słabej maleje, natomiast od lipca do grudnia rośnie.

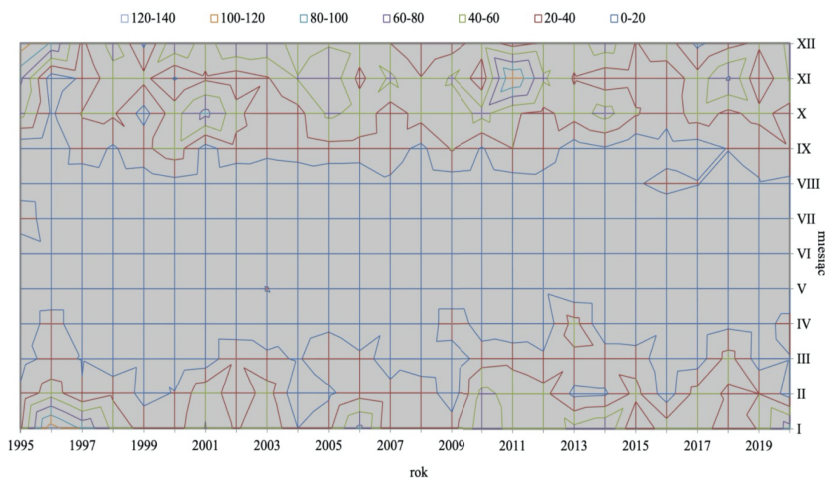
Średnia roczna liczba godzin w kategorii silnej wyniosła 215 godzin. Inwersje silne nie tworzyły się latem (VI–VIII). Najczęściej inwersje w tej kategorii odnotowano w grudniu (967 h), a najrzadziej w maju (1 h). Od stycznia do marca liczba godzin z inwersją o intensywności silnej maleje, a od października do grudnia rośnie. We wszystkich analizowanych miesiącach inwersje silne występowały rzadziej niż kategorie słaba i umiarkowana.



Ryc. 9. Liczba godzin [h] z inwersją termiczną o różnym natężeniu w przebiegu rocznym w profilu Kasprowy Wierch–Zakopane w latach 1995–2020

Fig. 9. Number of hours [h] with thermal inversion of varying intensity in the annual course in the Kasprowy Wierch–Zakopane profile in 1995–2020

Rozkład liczby godzin z inwersją słabą w latach 1995–2020 przedstawiono na ryc. 10. Średnia liczba godzin w tej kategorii intensywności wyniosła 25 godzin. W badanym wieloleciu najmniejsza liczba godzin w tej kategorii wystąpiła w okresie od kwietnia do sierpnia. Zróżnicowanie liczby godzin w chłodnej części roku jest większe niż w porze cieplej. Największa liczba godzin o słabej intensywności wystąpiła w styczniu i grudniu. Widoczna jest tendencja do wzrostu liczby godzin z inwersją w chłodniejszych miesiącach. W badanym okresie odnotowano największą liczbę godzin z inwersją o natężeniu słabym w latach 1995–1997 i 2011. W latach 2009–2020 w marcu i kwietniu widoczny jest wzrost liczby godzin z inwersją w porównaniu do lat 1996–2008.

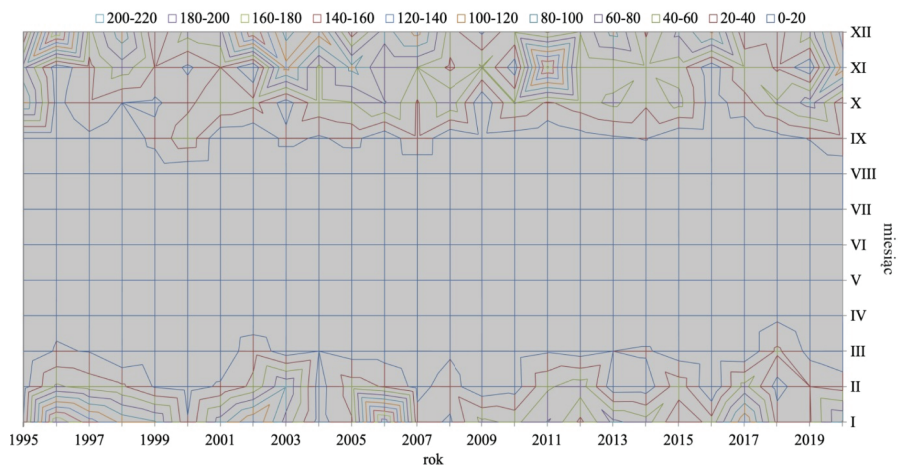


Ryc. 10. Rozkład liczby godzin z inwersją słabą w profilu Kasprowy Wierch–Zakopane w latach 1995–2020

Fig. 10. Distribution of the number of hours with weak inversion in the Kasprowy Wierch–Zakopane profile in 1995–2020

W analizowanym wieloleciu inwersje umiarkowane występowały częściej niż inwersje o intensywności słabej. Średnia liczba godzin w kategorii umiarkowanej intensywności wyniosła 27 godzin. Zróżnicowanie liczby godzin w chłodnej części roku jest większe niż w porze cieplej (ryc. 11). Podobnie jak w przypadku inwersji o natężeniu słabym, najmniejsza liczba godzin z inwersją o natężeniu umiarkowanym wystąpiła w porze cieplej i trwała od marca do września, czyli dłużej niż w przypadku inwersji słabej. Największą liczbę godzin z inwersją w tej kategorii odnotowano w latach 1995–2007 i roku 2011, czyli największa liczba przypadała na lata wcześniejsze badanego okresu.

Średnia liczba godzin inwersji silnych wyniosła 8 godzin. Inwersje intensywne występowały najrzadziej (ryc. 12). Największa liczba godzin przypada na okres od listopada do lutego, a najmniejsza od marca do października. W badanym okresie największą liczbę godzin inwersją silną odnotowano w latach 1997, 2002, 2006 i 2007, czyli największa liczba przypadała na lata wcześniejsze badanego okresu.



Ryc. 11. Rozkład liczby godzin z inwersją umiarkowaną w profilu Kasprowy Wierch–Zakopane w latach 1995–2020

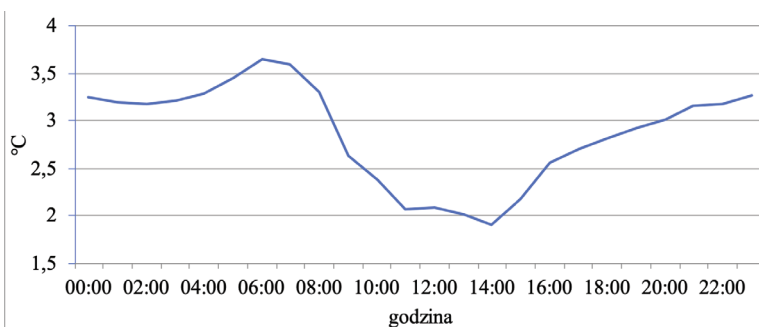
Fig. 11. Distribution of the number of hours with moderate inversion in the Kasprowy Wierch–Zakopane profile in 1995–2020



Ryc. 12. Rozkład liczby godzin z inwersją silną w profilu Kasprowy Wierch–Zakopane w latach 1995–2020

Fig. 12. Distribution of the number of hours with strong inversion in the Kasprowy Wierch–Zakopane profile in 1995–2020

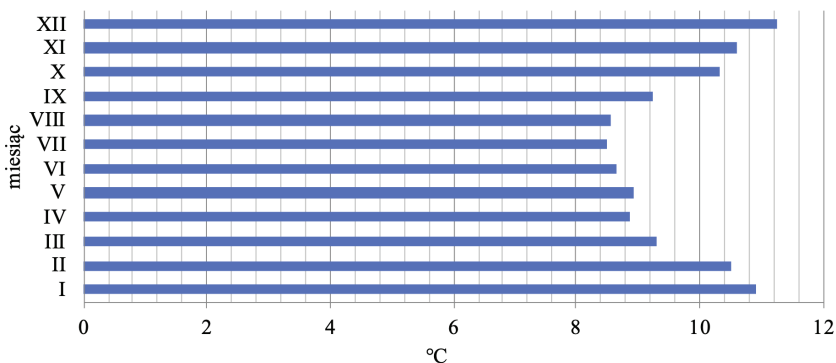
Rozkład średnich intensywności w analizowanym wieloleciu ma wyraźny przebieg dobowy (ryc. 13). Średnia intensywność w ciągu doby wyniosła  $2,9^{\circ}\text{C}$ , czyli zalicza się do kategorii intensywności umiarkowanej. Inwersje o największym natężeniu odnotowano w godzinach popołudniowych i nocnych z maksimum w godzinach 6:00 i 7:00. Inwersje o najmniejszej intensywności występowały od 11:00 do 14:00. Jedynie średnia intensywność o godzinie 14:00 należy do kategorii inwersji słabej.



Ryc. 13. Rozkład średnich różnic temperatury powietrza w ciągu doby [°C] w profilu Kasprowy Wierch–Zakopane w latach 1995–2020

Fig. 13. Distribution of average air temperature differences during the day [°C] in the Kasprowy Wierch–Zakopane profile in 1995–2020

Różnica wysokości między stacją na Kasprowym Wierchu (1990 m n.p.m.) a stacją w Zakopanem (852 m n.p.m.) wynosi 1138 m, co zgodnie ze średnim gradientem adiabaticznym odpowiada różnicy temperatury wynoszącej 7,4°C. Oznacza to, że temperatura powietrza na Kasprowym Wierchu powinna być niższa o 7,4°C w porównaniu ze stacją w Zakopanem. Największe odchylenia od tej temperatury przypadły na miesiące półrocza chłodnego (X–II) (ryc. 14). Maksymalne odchylenie wyniosło 11,3°C i wystąpiło w grudniu. Najmniejsze odchylenia wystąpiły od kwietnia do sierpnia. Minimalne odchylenie odnotowano w lipcu i wyniosło ono 8,5°C.

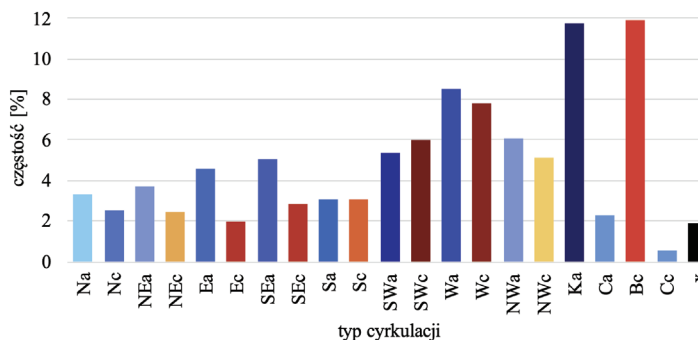


Ryc. 14. Odchylenie temperatury powietrza w czasie inwersji od temperatury wg średniego gradientu termicznego w profilu Kasprowy Wierch–Zakopane w latach 1995–2020

Fig. 14. Air temperature deviation during inversion from temperature according to the average thermal gradient in the Kasprowy Wierch–Zakopane profile in 1995–2020

## Inwersja termiczna a typ cyrkulacji

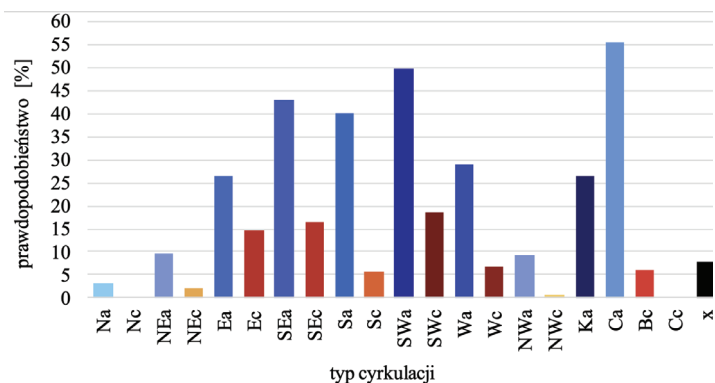
W latach 1995–2020 w południowej Polsce dominował typ Bc (typ cyklonalny) oraz typ Ka (typ antycyklonalny) (ryc. 15). Często występowały typy cyrkulacji z sektora zachodniego, rzadziej ze wschodu. Centralna sytuacja antycyklonalna i centralny cyklon w analizowanym okresie wystąpiły najrzadziej.



Ryc. 15. Częstość [%] wystąpienia typów cyrkulacji dla południowej Polski wg kalendarza Niedźwiedzia w latach 1995–2020 (Objaśnienia symboli – tab. 1)

Fig. 15. The frequency [%] of circulation types for southern Poland according to the Niedźwiedź's calendar in 1995–2020 (Explanation of symbols – tab. 1)

Prawdopodobieństwo warunkowe wystąpienia inwersji termicznej w analizowanym okresie podczas typów antycyklonalnych wyniosło 28,3%, natomiast podczas typów cyklonalnych 7,7%. Inwersje termiczne występowały najczęściej w czasie cyrkulacji antycyklonalnych. Największym prawdopodobieństwem wystąpienia inwersji, bo aż 56%, charakteryzowała się centralna sytuacja antycyklonalna Ca (ryc. 16). Najmniejsze prawdopodobieństwo wystąpienia inwersji odnotowano podczas typów cyrkulacji z sektora północnego. Inwersje nie wystąpiły w typie Nc i Cc. Wysokie prawdopodobieństwo wystąpiło podczas typów antycyklonalnych z kierunków południowych, głównie z południowego zachodu. Dla typów antycyklonalnych najmniejsze prawdopodobieństwo wystąpiło podczas cyrkulacji z sektora północnego. Największym prawdopodobieństwem wystąpienia inwersji podczas typów cyklonalnych charakteryzowała się sytuacja cyklonalna z południowego zachodu SWc. Wysokie prawdopodobieństwo wystąpienia inwersji podczas typów cyklonalnych odnotowano dla sytuacji z kierunku południowo-zachodniego i południowo-wschodniego. Mniejsze prawdopodobieństwo dla typów cyklonalnych odnotowano dla kierunku zachodniego i południowego.



Ryc. 16. Prawdopodobieństwo warunkowe [%] wystąpienia inwersji termicznej w profilu Kasprowy Wierch–Zakopane w typach cyrkulacji wg kalendarza Niedźwiedzia w latach 1995–2020 (Objaśnienia symboli – tab. 1)

Fig. 16. Conditional probability [%] of the occurrence of thermal inversion in the Kasprowy Wierch–Zakopane profile in the types of circulation according to the Niedźwiedź's calendar in 1995–2020 (Explanation of symbols – tab. 1)

## Zanieczyszczenie pyłem zawieszonym PM10 a wystąpienie inwersji

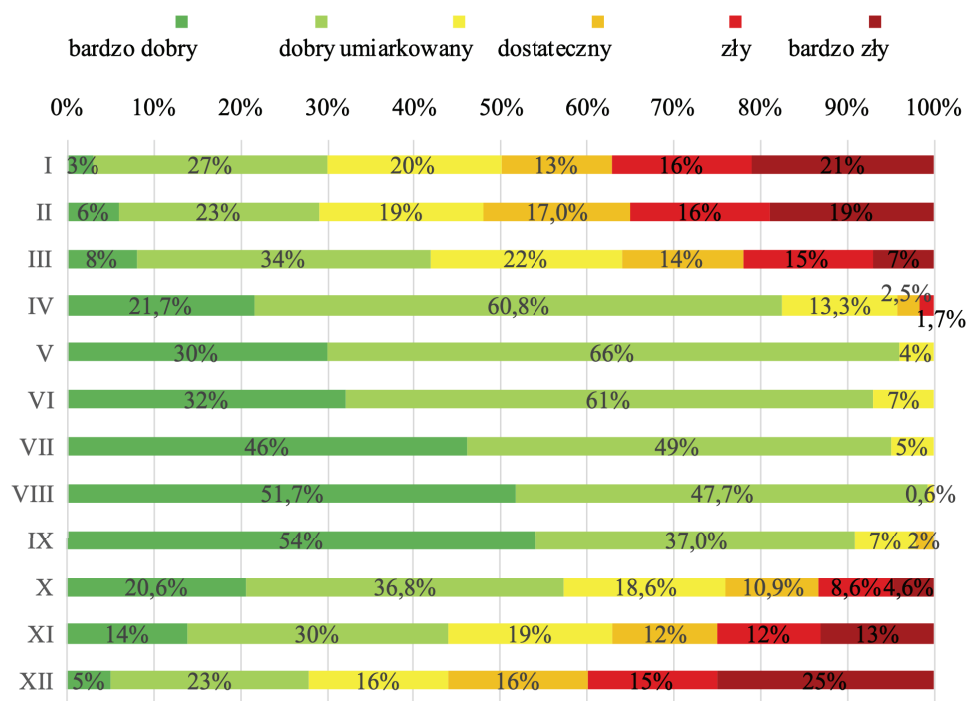
Analiza wykazała, że w czasie trwania inwersji zanieczyszczenie pyłem PM10 zostało najczęściej zaklasyfikowane jako powietrze dobrej jakości, a najrzadziej jako powietrze złej jakości. W czasie trwania inwersji bardzo zła jakość powietrza wystąpiła w 15% przypadków. W czasie trwania inwersji najlepsza jakość powietrza wystąpiła w okresie późnowiosennym, letnim i wczesnojesiennym (ryc. 17). Od kwietnia do września nie wystąpiło stężenie PM10, które odpowiada bardzo złemu indeksowi jakości powietrza, a od maja do września złemu indeksowi jakości powietrza. Najlepszą jakością powietrza charakteryzował się sierpień: bardzo dobry i dobry indeks jakości powietrza stanowiły 99% udziału, umiarkowany indeks jakości powietrza stanowił pozostałe 1%. Najgorszą jakością powietrza charakteryzowały się miesiące zimowe i późnojesienne, szczególnie styczeń, luty i grudzień (ryc. 17). Stężenie wyższe od  $400 \mu\text{g}/\text{m}^3$  odnotowano w Zakopanem 26 razy w latach 2010–2020.

Średnie miesięczne wartości temperatury powietrza w latach 2010–2020 w ciągu roku były najniższe w miesiącach XII–II. W styczniu średnia temperatura powietrza wyniosła  $-3,6^\circ\text{C}$ , w lutym  $-2,2^\circ\text{C}$ , a w grudniu  $-1,3^\circ\text{C}$  (meteomodel.pl). W Zakopanem w styczniu, czyli w najchłodniejszym miesiącu w roku, odnotowano najmniejszy udział (3%) bardzo dobrego indeksu jakości powietrza dla stężeń PM10. Indeks bardzo zły stanowił aż 21% udziału wszystkich kategorii. W styczniu w badanym wieloleciu średnie miesięczne stężenie pyłem PM10 wy-

niosło  $235 \mu\text{g}/\text{m}^3$  i była to najwyższa średnia miesięczna wartość w ciągu roku. W grudniu bardzo zły indeks stanowił 25% wszystkich kategorii.

Wysoki udział dobrej jakości powietrza przypada na miesiące letnie, natomiast wysoki udział złej jakości powietrza występuje w najchłodniejszych miesiącach. Zła jakość powietrza związana jest w tym czasie z okresem grzewczym. W Zakopanem zabudowa składa się w większości z domów jednorodzinnych opalanych węglem i drewnem, często niskiej jakości. Wysokie emisje PM10 i wystąpienie inwersji spowodowało wystąpienie wysokich stężeń PM10.

Najwyższe stężenie pyłu zawieszonego PM10 w czasie trwania inwersji termicznej odnotowano o godzinie 0:00 9 lutego 2012 r. i wyniosło ono aż  $661 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Wskaźnik CAPE, który określa energię potencjalną dostępną konwekcyjnie w warstwie przy powierzchni ziemi, wyniósł 0 ([http://rawinsonde.com/ERA5\\_Europe/](http://rawinsonde.com/ERA5_Europe/)). Oznacza to, że nie mogły tworzyć się wtedy prądy wstępujące, co jest częste podczas trwania inwersji termicznej.



Ryc. 17. Udział [%] dni z inwersją w kategoriach stężenia PM10 ciągu roku w Zakopanem (2010–2020)

Fig. 17. Share [%] of inversion days in terms of PM10 concentration during the year in Zakopane (2010–2020)

## DYSKUSJA

Na podstawie przeprowadzonej analizy stwierdzono, że największa liczba inwersji termicznych przypadała na okres zimowy, a najmniejsza na okres letni. Największą liczbę inwersji odnotowano w styczniu, a drugorzędne maksimum w grudniu. Natomiast w latach 1949–1954 w profilu Kasprowy Wierch–Zakopane (Orlicz, Orliczowa 1955) największą średnią liczbę inwersji temperatury powietrza odnotowano w październiku, a drugorzędne maksimum w styczniu i grudniu. Najmniejsza średnia liczba inwersji w pracy Orlicza i Orliczowej (1955) przypadała na okres od kwietnia do sierpnia. Biorąc pod uwagę niniejsze badania, uznano, że największa liczba inwersji należała do umiarkowanych, następnie słabych i najmniejszy udział miały inwersje intensywne. W latach 1949–1954, zgodnie z badaniami Orlicza i Orliczowej (1955), średnia roczna liczba inwersji według natężenia najwyższa była w kategorii słabej, następnie umiarkowanej i intensywnej. Największą liczbę inwersji termicznych odnotowano w godzinach nocnych i rannych (od 15:00 do 5:00), co potwierdzają wcześniejsze wyniki (Orlicz, Orliczowa 1955).

Z przeprowadzonej analizy wynika, że na tworzenie się inwersji największy wpływ ma cyrkulacja antycyklonalna, co potwierdza wyniki uzyskane przez Wibig (1997). Inwersje termiczne najczęściej powstawały podczas typów antycyklonalnych: Ca, SWa, SEa i Sa, czyli głównie z kierunków południowych. Typy cyklonalne miały wyraźnie mniejszy udział. Wibig (1997) analizowała typy cyrkulacji w profilu Kasprowy Wierch–Zakopane w latach 1954–1968 z wykorzystaniem klasyfikacji zaproponowanej przez Osuchowską-Klein (1978 za: Wibig 1997). Rezultatem rozważań autorki jest stwierdzenie dominującego wpływu antycyklonalnych typów cyrkulacyjnych z wyjątkiem typu NE antycyklonalnego oraz dominacji typu SW cyklonalnego na tworzenie się części inwersji. Orlicz i Orliczowa (1955) również podkreślają, że inwersje w okresie zimowym i jesiennym są związane z cyrkulacją antycyklonalną. Palarz (2014) w swojej analizie dla Krakowa (1961–2010), na podstawie danych z reanaliz NCEP-NCAR dla czterech warstw troposfery, odnotowała także największy wpływ typu antycyklonalnego Ka (wg klasyfikacji Niedźwiedzia) na tworzenie się inwersji.

Analiza pozwala ustalić, że w czasie trwania inwersji zimowych zanieczyszczenie pyłem PM10 było znaczne, co poświadcza wyniki uzyskane przez Palarz i Celińskiego-Mysława (2017), którzy badali stężenie pyłu PM10 w Zakopanem. Wysokie stężenia pyłu zawieszonego pojawia się w czasie występowania inwersji termicznych i układów wysokiego ciśnienia. Palarz i Celiński-Mysław (2017) odnotowali, że maksimum natężenia przypada na okres po zachodzie słońca, co jest zgodne z wynikami uzyskanymi w niniejszej pracy.



## PODSUMOWANIE

W analizowanym profilu w latach 1995–2020 zarówno liczba inwersji termicznych, jak i liczba dni z inwersją nieznacznie rosła. Czas trwania inwersji termicznych charakteryzował trend malejący. W rezultacie w badanym okresie wzrastała liczba inwersji, które były coraz krótsze. Jednakże szybciej rosła liczba dni z inwersją niż liczba jej przypadków. Najwięcej inwersji wystąpiło w miesiącach zimowych, a najmniej tworzyło się latem. Charakterystyczne było odnotowanie większej i średniej liczby dni z inwersją w październiku w porównaniu z listopadem. W przebiegu rocznym najdłuższe średnie okresy trwania inwersji wystąpiły w miesiącach zimowych, a najkrótsze w letnich. W przebiegu dobowym podobnie jak w przebiegu rocznym można zaobserwować wyraźną cykliczność. Największa liczba inwersji przypadała na godziny od 15:00 do 4:00, czyli na chłodniejszą część doby. Największa średnia liczba inwersji pojawiała się w godzinach nocnych, a najmniejsza w godzinach od 10:00 do 14:00. W rezultacie wraz ze wzrostem temperatury powietrza spada liczba inwersji. Natomiast spadek temperatury powietrza powoduje wzrost wilgotności względnej, czyli inwersje termiczne występują przy większej wilgotności względnej powietrza.

Najczęściej występowały inwersje o umiarkowanej intensywności, następnie słabej, a inwersje intensywne występowały najrzadziej. Inwersje słabe i umiarkowane odnotowano w ciągu całego roku, inwersje intensywne tylko w najchłodniejszych miesiącach. Im średnia miesięczna temperatura miesiąca była wyższa, tym słabsze inwersje występowały. Najbardziej intensywne inwersje w cyklu dobowym miały miejsce w godzinach nocnych i wczesnorannych z maksimum o 6:00. Najmniejszą intensywnością inwersji charakteryzowały się godziny okołopołudniowe.

Reasumując, do inwersji w analizowanym okresie w profilu Kasprowy Wierch–Zakopane najczęściej dochodziło przy typach antycyklonalnych podczas chłodnej części roku w godzinach nocnych i wtedy inwersje były najbardziej intensywne. Wystąpienie inwersji zimowych wiązało się ze wzrostem stężenia pyłu zawieszonego PM<sub>10</sub>.

## LITERATURA

- Bărcăcianu F., Apostol L., 2014: *Considerations on temperature inversions in the lower troposphere in the 2001–2002 Cold Season, South of the Carpathian Mountains*. PESD., 8, 2, 243–253.
- Bil G., 1998: *Występowanie przyziemnych inwersji temperatury powietrza w warunkach miejskich na przykładzie Sosnowca*. Act. Geograph. Lodz., Fol. Geograph. Phys., 3, 403–409.
- Czarnecka M., Nidzgorska-Lancewicz J., Rawicki K., 2019: *Temporal structure of thermal inversions in Leba (Poland)*. Theoretical and Appl. Clim., 136, 1–13.
- Du M., Kawashima S., Yonemura S., Yamada T., Zhang X., Liu J., Li Y., Gu S., Tang Y., 2007: *Temperature distribution in the high mountain regions on the Tibetan Plateau-Measurement*

- and simulation, *Proceedings of the MODISM 2007 International Congress on Model Simulation*. MSSANZ., 2146–2152.
- Hiebl J., Schöner W., 2018: *Temperature inversions in Austria in a warming climate-changes in space and time*. *Meteorol. Z.*, 27, 4, 309–323.
- Kaczorowska Z., 1977: *Pogoda i klimat*. WSiP, Warszawa.
- Kożuchowski K., 1975: *Profil temperatury w Tatrach a stratyfikacja termiczna atmosfery*. *Przeł. Geofiz.*, 20, 97–110.
- Kruszewski G., 2002: *Głębokie zimowe inwersje temperatury na nadmorskiej terasie okolic stacji im. H. Arctowskiego (Wyspa Króla Jerzego, Szetlandy Pd., Antarktyka Zach.)*. *Prob. Klimatol. Polarnej*, 8, 4–56.
- Larger Y., Staquet Ch., 2016: *Persistent inversion dynamics and wintertime PM10 air pollution in Alpine valleys*. *Atmos. Environ.*, 135, 92–108.
- Michalczewski J., 1962: *Długotrwałe zastoiska mrozowe Kotliny Podhalańskiej*. *Act. Geograph. Lodz.*, 13, 2770.
- Niedźwiedz T., 2017: *Kalendarz typów cyrkulacji atmosfery dla Polski południowej – zbiór komputerowy*. UŚ, Kat. Klimatol., Sosnowiec.
- Orlicz M., Orliczowa J., 1955: *Inwersje temperatury na północnym sklonie Tatr*. *Przeł. Meteorol. Hydrol.*, 8, 3–4, 235–255.
- Osuchowska-Klein B., 1978: *Katalog typów cyrkulacji atmosferycznej*. WKiŁ, Warszawa.
- Palarz A., 2014: *Zmienność inwersji temperatury powietrza nad Krakowem w świetle warunków cyrkulacyjnych*. *Pr. Geogr.*, 138, 29–43.
- Palarz A., Celiński-Mysław D., 2017: *The effect of temperature inversions on the particulate matter PM 10 and sulfur dioxide concentrations in selected basins in the Polish Carpathians*. *Carpathian J. Earth Environ. Sci.*, 12, 2, 629–640.
- Palarz A., Ustrnul Z., Wypych A., 2015: *Temperature inversions in the Polish Carpathians and their influence on air pollution (case study)*, [w:] Šiška et al. (ed.) *TOWARDS CLIMATIC SERVICES*.
- Rendón A.M., Salazar J.F., Palacio C.A., 2014: *Effects of Urbanization on the Temperature Inversion Breakup in a Mountain Valley with Implications for Air Quality*. *J. Appl. Meteorol. Climatol.*, 53, 840–858.
- Stopa-Boryczka M., Boryczka J., 2005: *Rola cyrkulacji atmosferycznej w kształtowaniu klimatu*. [w:] Richling A., Ostaszewska K. (red.), *Geografia fizyczna Polski*, Wyd. Nauk. PWN, Warszawa.
- Wibig J., 1997: *Occurrence of thermal inversions in Zakopane depending on atmospheric circulation*. *Act. Univ. Wratislav. No 1950, Pr. Inst. Geogr., Ser. C – Meteorol. Klimatol.*, 4, 127–130.
- Woś A., 1999: *ABC Meteorologii*. Wyd. Nauk. UAM, Poznań.
- Woś A., 2010: *Klimat Polski w drugiej połowie XX wieku*. Wyd. Nauk. UAM, Poznań.

### Źródła internetowe

- [https://meteomodel.pl/dane/srednie-miesieczne/?imgwid=349190625&par=tm&max\\_empty=2](https://meteomodel.pl/dane/srednie-miesieczne/?imgwid=349190625&par=tm&max_empty=2) [dostęp: 12.06.2020].
- <https://danepubliczne.imgw.pl> [dostęp: 12.06.2020].
- <http://www.kk.wnoz.us.edu.pl/nauka/kalendarz-typow-cyrkulacji/> [dostęp: 12.06.2020].
- [http://powietrze.gios.gov.pl/pjp/current/station\\_details/archive/459](http://powietrze.gios.gov.pl/pjp/current/station_details/archive/459) [dostęp: 12.06.2020].
- [http://rawinsonde.com/ERA5\\_Europe/](http://rawinsonde.com/ERA5_Europe/) [dostęp: 12.06.2020].