

EKSTREMALNIE WYSOKIE STĘŻENIA ZANIECZYSZCZEŃ POWIETRZA W NOWYM SĄCZU W DNIACH OD 23 STYCZNIA DO 1 LUTEGO 2006 R. I ICH PRZYCZYNY

ANGELIKA PALARZ

Zakład Klimatologii, Wydział Biologii i Nauk o Ziemi, Instytut Geografii i Gospodarki Przestrzennej,
Uniwersytet Jagielloński, ul. Gronostajowa 7,
30-387 Kraków

Abstract: The issue of high concentrations of air pollution and their synoptic conditions is an important research problem which has been studied over many years in different parts of the world. Unfortunately, previous studies were conducted mainly in highly industrialised and urbanised cities. The main goal of this work is to clarify the causes of the extremely high concentrations of air pollutants in Nowy Sącz that occurred in the period from 23 January to 1 February 2006, i.e. the strongest episode of pollution recorded in southern Poland in 2005–2014. The study was based on data consisting of average daily and hourly concentrations of PM₁₀, sulphur dioxide and nitrogen oxides obtained from the websites of the Regional Inspectorates for Environmental Protection in Kraków, as well as an analysis of the ERA-Interim reanalysis and high resolution gridded dataset CARPATCLIM. The results showed that the episode of very high concentrations of air pollutants was associated both with the local land relief, which fosters the stagnation of cool air, as well as extremely unfavourable synoptic conditions.

Keywords: air pollution, meteorological conditions, Nowy Sącz, case study

WPROWADZENIE

Zanieczyszczenie powietrza definiuje się jako obecność w atmosferze substancji obcych niewystępujących w niej w warunkach naturalnych oraz mogących wywierać negatywny wpływ na ludzkie zdrowie, rośliny i zwierzęta, a także powodować zakłócenia w funkcjonowaniu ekosystemów i działalności człowieka (Jacobson 2002; „American Meteorological Society” 2014; Pascal i in. 2013). Zagadnienie czasowej i przestrzennej zmienności występowania wysokich stężeń omawianych substancji oraz ich uwarunkowań synoptycznych było badane w różnych obszarach świata. Wśród najnowszych publikacji omawiających ten problem na uwagę zasługują prace dotyczące zurbanizowanych obszarów Ameryki Północnej (Whiteman i in. 2014) i Europy (Unal i in. 2011; Russo i in. 2014), a także najsilniej dotkniętych problemem złej jakości powietrza miast chińskich (Wang i in. 2014) oraz indyjskich (Trivedi i in. 2014). Niezależnie od lokalizacji rozkład stężeń pyłów zawieszonych – PM₁₀ i PM_{2.5} charakteryzował się wyraźną sezonowością, osiągając maksimum

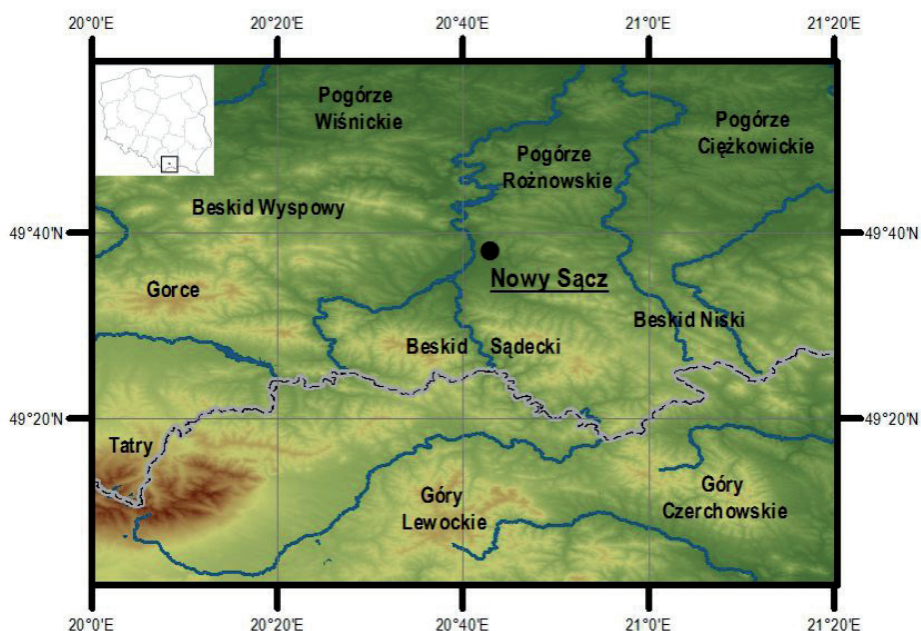
w porze chłodnej, gdy atmosfera była bardziej stabilna. W Polsce analogiczne badania prowadzono dla silnie zurbanizowanych obszarów Górnośląskiego Okręgu Przemysłowego (Leśniok i in. 2010; Radomski, Widawski 2011) i Krakowa (Bokwa 2011; Bielec-Bąkowska i in. 2011). Jak należało oczekiwać, również w tym wypadku stężenia pyłu zawieszonego PM₁₀, dwutlenku siarki i dwutlenku azotu osiągały najwyższe wartości zimą, co było związane z ograniczonym osłonecznieniem, niskimi temperaturami i zwiększoną emisją zanieczyszczeń powietrza z palenisk domowych. Przekroczenia dopuszczalnych norm notowano najczęściej w słabogradentowych, blokujących sytuacjach antycyklonalnych – centrum wyżu i klinie antycyklonalnym oraz przy adwekcji powietrza z sektora południowego (Leśniok i in. 2010; Bielec-Bąkowska i in. 2010, 2011).

Odrębną grupę opracowań stanowią szczegółowe analizy epizodów smogowych, których celem było określenie związku jakości powietrza z warunkami synoptycznymi i wybranymi elementami meteorologicznymi (Kukkonen i in. 2005; Malek i in. 2006; Fu i in. 2008). Ponadto, w części artykułów podejmowano próby identyfikacji potencjalnych źródeł napływu niepożądanych pyłów i gazów (Ji i in. 2012; Lee i in. 2013; Segura i in. 2013). Pomimo szerokiego zainteresowania omawianą tematyką do tej pory badania nad jakością powietrza koncentrowały się niemal wyłącznie w dużych ośrodkach miejskich. Wyjątek stanowi praca Malek i in. (2006) traktująca o meteorologicznych i środowiskowych uwarunkowaniach wystąpienia jednego z najsilniejszych epizodów smogowych w Stanach Zjednoczonych. Notowane w styczniu 2004 r. w zamieszkałym przez około 100 tys. osób Logan skrajnie wysokie stężenia pyłu zawieszonego PM_{2.5} było związane zarówno z położeniem miasta w wybitnie wklęsłej formie terenu, jak i utrudniającymi dyspersję zanieczyszczeń powietrza warunkami meteorologicznymi – wystąpieniem inwersji termicznej wzmocnionej przez silny układ wysokiego ciśnienia i utrzymywanie się pokrywy śnieżnej.

Niniejsze opracowanie nawiązuje do badań nad jakością powietrza w miastach relatywnie małych. Jego głównym celem jest objaśnienie uwarunkowań wystąpienia ekstremalnie wysokich stężeń zanieczyszczeń powietrza w Nowym Sączu w dniach od 23 stycznia do 1 lutego 2006 r. Założenie to zostanie osiągnięte poprzez realizację celów szczegółowych, do których należą dokładna ocena sytuacji synoptycznej i analiza związku między stanem aerosanitarным a wybranymi elementami meteorologicznymi. Wartości notowanych w badanym okresie stężeń wybranych polutantów zostaną porównane ze stężeniami występującymi wówczas w Krakowie.

OBSZAR BADAŃ

Nowy Sącz, zgodnie z podziałem fizycznogeograficznym Polski Kondraczkiego (2002), jest położony w mezoregionie Kotliny Sądeckiej, będącej fragmentem makroregionu Beskidów Zachodnich. Stanowi rozległą formę wklęsłą z dnem zlokalizowanym na wysokości około 280–300 m n.p.m. i otoczoną wzniesieniami od północy Pogórza Rożnowskiego, od zachodu Beskidu Wyspowego, od południa Beskidu Sądeckiego i od wschodu Beskidu Niskiego (ryc. 1). Otaczające kotlinę obszary osiągają wysokość od 500 m n.p.m. na Pogórzu Rożnowskim do 1260 m n.p.m. w Beskidzie Sądeckim. Topografia obszaru jest czynnikiem wybitnie sprzyjającym stagnacji chłodnego powietrza w kotlinie i tworzeniu się tzw. zastoisk chłodu, a także występowaniu warstw inwersyjnych hamujących mieszanie powietrza. Dodatkowo brak większych zbiorników wodnych – wyłączając sieć rzeczną obejmującą Dunajec i jego dopływy – zmniejsza prawdopodobieństwo wystąpienia pionowych ruchów powietrza związanych z różnicami w nagrzewaniu i ochładzaniu odmiennych powierzchni czynnych. Szczególnie sprzyjające warunki powstawaniu warstw hamujących są obserwowane w styczniu i grudniu, co jest wynikiem znacznej częstości występowania sytuacji antycyklonalnych – łączna częstość sytuacji antycyklonalnych przekracza wówczas częstość występowania sytuacji cyklo-



Ryc. 1. Położenie obszaru badań
Fig. 1. Location of the study area

nalnych, wynosząc odpowiednio 53% w styczniu i 45% w grudniu (Niedźwiedź 1981). Zarówno osiadanu powietrza, prowadzącemu do powstawania inwersji w swobodnej atmosferze, jak i silnemu wypromieniowaniu ciepła z powierzchni czynnej i tworzeniu się inwersji radiacyjnych sprzyjają typy cyrkulacji z napływem mas powietrza z sektora południowego oraz bezadwekcyjne sytuacje wyżowe – centrum wyżu i klin antycyklonalny (Palarz 2014).

Nowy Sącz zamieszkuje około 84 tys. mieszkańców, co zgodnie z klasyfikacją Głównego Urzędu Statystycznego umiejscawia go wśród miast średnich (*Powierzchnia i ludność...*, 2014). Uwzględniając omówione we wstępie publikacje naukowe i obszary, jakich dotyczyły, Nowy Sącz uznać należy za miasto relatywnie małe.

DANE I METODY BADAWCZE

Opracowanie obejmuje analizę ekstremalnie silnego epizodu zanieczyszczeniowego, który wystąpił w Nowym Sączu w dniach od 23 stycznia do 1 lutego 2006 r. Był to przypadek najwyższej koncentracji pyłu zawieszonego PM₁₀ i dwutlenku siarki w okresie wykonywania pomiarów automatycznych, tj. w latach 2005–2014, w analizowanym mieście. Badania zostały wykonane na podstawie średnich dobowych i godzinnych stężeń pyłu zawieszonego PM₁₀, dwutlenku siarki (SO₂) i tlenków azotu (NO_x) pozyskanych za pośrednictwem portalu informacyjnego Wojewódzkiego Inspektoratu Ochrony Środowiska w Krakowie dla stacji Nowy Sącz i stacji komunikacyjnej Kraków-Aleja Kraśińskiego <<http://monitoring.krakow.pios.gov.pl/>>. Warunki synoptyczne i meteorologiczne zostały scharakteryzowane z zastosowaniem reanaliz ERA-Interim o rozdzielczości przestrzennej 0,125 × 0,125° <<http://www.ecmwf.int/en/research/climate-reanalysis/era-interim>> i bazy danych CARPATCLIM o rozdzielczości przestrzennej 0,1 × 0,1° <<http://www.carpatclim-eu.org/>>. Odpowiednio za grid reprezentatywny dla Nowego Sącza przyjęto, w przypadku reanaliz ERA-Interim, punkt o współrzędnych 20°37'30"E 49°37'30"N, a dla bazy CARPATCLIM punkt o współrzędnych 20°41'59"E 49°36'50"N. Analogiczne współrzędne dla Kasprowego Wierchu mają wartość 20°00'00"E 49°15'00"N i 20°00'00"E 49°12'10"N.

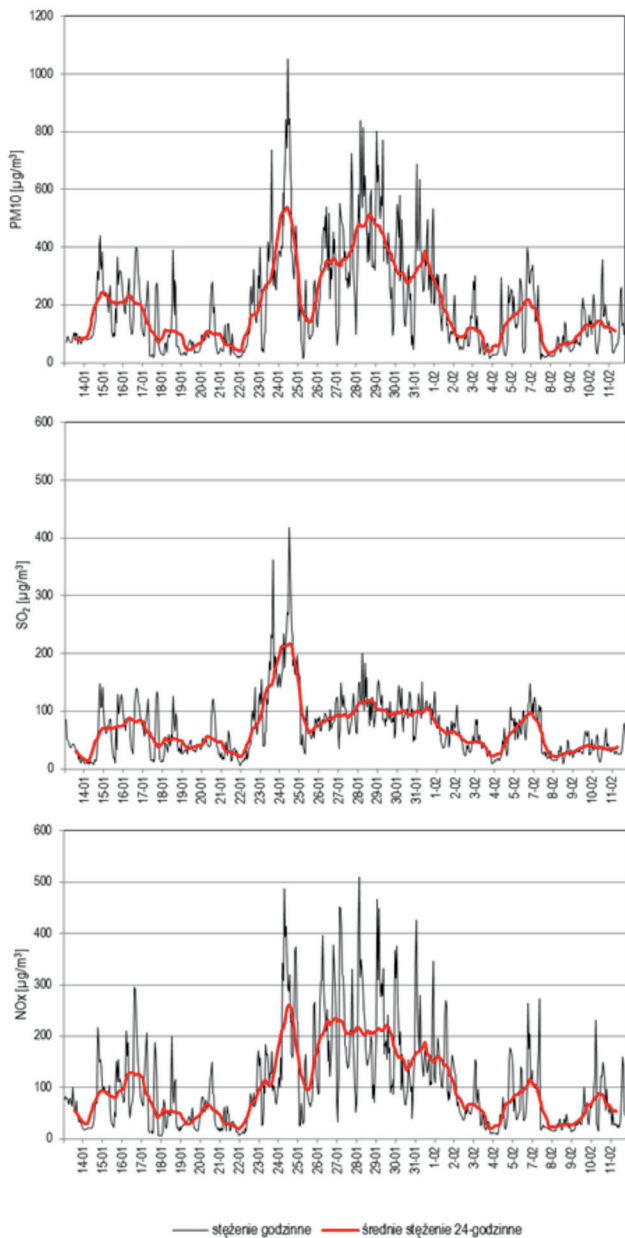
Ponadto, celem weryfikacji uzyskanych wyników przeanalizowano dolne i górne mapy synoptyczne holenderskiej i niemieckiej służby meteorologicznej <<http://www.knmi.nl/>, <http://www1.wetter3.de/>>, wyniki sondażu aerologicznych stacji Poprad-Gánovce <<http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>> oraz depesze SYNOP stacji Nowy Sącz <<http://www.ogimet.com/>>.

WYNIKI

Stężenie pyłu zawieszonego PM10, dwutlenku siarki i tlenków azotu

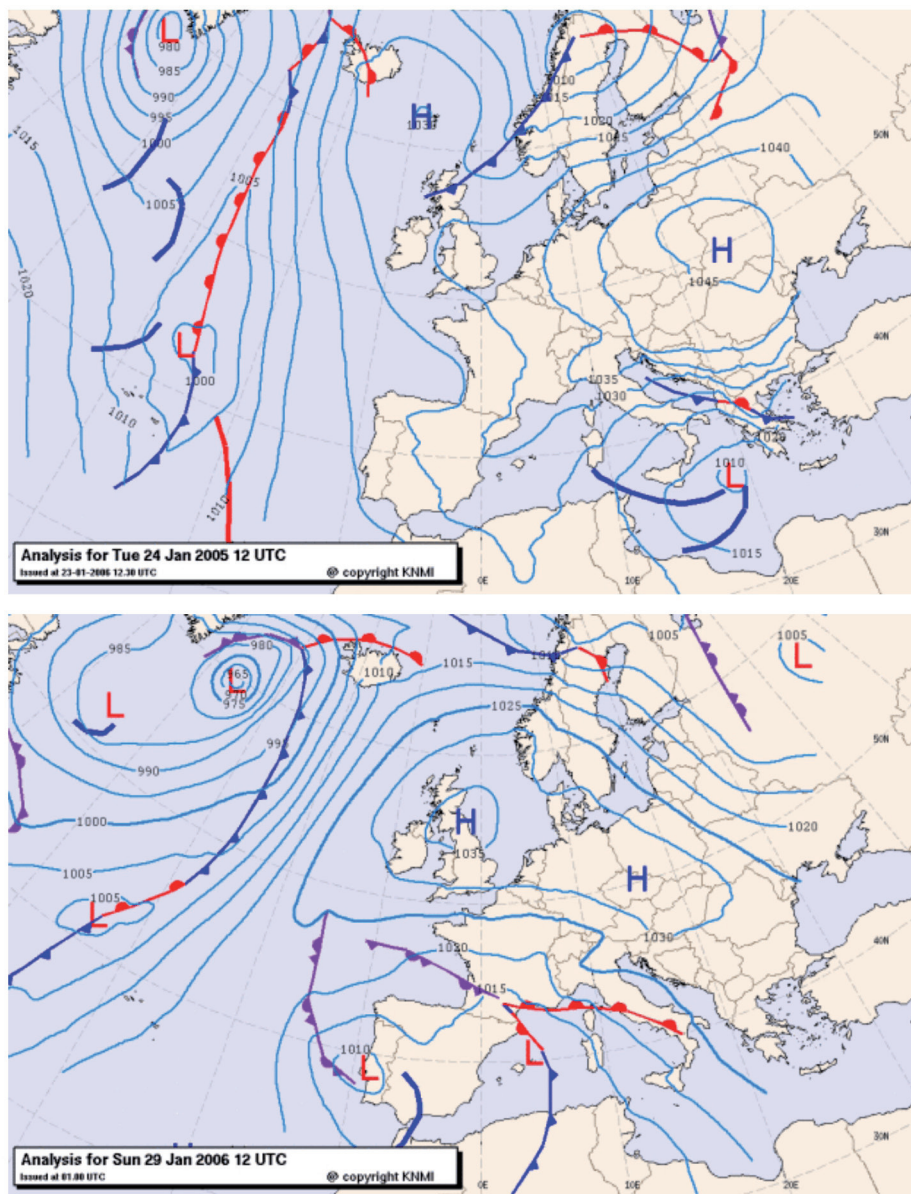
Koncentracja pyłu zawieszonego PM10 przekraczała dopuszczalne normy dobowe w trakcie całego okresu zestawionego na rycinie 2, co jest sytuacją bardzo częstą w sezonie zimowym i wiąże się ze wzmożoną emisją zanieczyszczeń powietrza z palenisk domowych wykorzystujących słabej jakości opał (głównie węgiel brunatny i kamienny). Wyraźny wzrost jego stężenia nastąpił jednak od 23 stycznia do 1 lutego, kiedy średnie dobowe wartości stężenia PM10 przekraczały $200 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ (przy dopuszczalnej normie 24-godzinnej $50 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$). Maksymalna dobową koncentracją omawianego polutanta wystąpiła 24 stycznia ($519 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$), a maksimum wtórne 29 stycznia ($500 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$). W obu dniach wartości te zdecydowanie – o ponad $200 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ – przekraczały wartości stężeń PM10 notowanych w Krakowie. Analogiczna tendencja utrzymywała się aż przez osiem dni badanego dziesięciodniowego epizodu smogowego. Koncentracja pyłu zawieszonego charakteryzowała się znaczną zmiennością dobową, osiągając maksimum wieczorem, a minimum w południe. Najwyższe wartości jego średnich stężeń godzinnych przekraczały $800 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ i występowały wieczorem, tj. w godzinach od 20.00 do 23.00. Maksymalna wartość omawianej charakterystyki wyniosła $1052 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ i odnotowana została 24 stycznia o godzinie 22.00.

Dwutlenek siarki cechował się silnym wzrostem stężenia dobowego w początkowej fazie badanego epizodu, tj. 23 i 24 stycznia (ryc. 2). W porównaniu z Krakowem wyższe wartości jego koncentracji wystąpiły 23 i 24 stycznia oraz od 30 stycznia do 1 lutego. Dopuszczalny dobowy poziom stężenia dwutlenku siarki – $125 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ – został przekroczony wyłącznie 24 stycznia 2006, kiedy wyniósł $215 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$. Również tlenki azotu osiągnęły wyraźnie podwyższone wartości podczas analizowanego epizodu zanieczyszczeniowego (ryc. 2). Ich bardzo wysoką koncentracją dobową, przekraczającą $200 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, stwierdzono 24 stycznia oraz od 27 do 29 stycznia. Stężenia dobowe tlenków azotu, jak oczekiwano, były niższe niż stężenia notowane na stacji komunikacyjnej Kraków-Aleja Krasieńskiego, jednak 24 stycznia 2006 r. różnica ich wartości dobowych wyniosła jedynie $50 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$. Zarówno koncentracja dwutlenku siarki, jak i tlenków azotu wykazywała wyraźny cykl dobowy z maksimum wieczorem i minimum w południe. Najwyższe wartości średnich godzinnych stężeń odpowiednio dwutlenku siarki przekraczały $300 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ – maksymalnie $418 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 24 stycznia o godzinie 22.00, tlenków azotu zaś $400 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ – maksymalnie $510 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 28 stycznia o godzinie 18.00.



Ryc. 2. Średnie godzinne stężenie pyłu zawieszonego PM10 (górna rycina), dwutlenku siarki (środkowa rycina) i tlenków azotu (dolna rycina) w Nowym Sączu w dniach od 13 stycznia do 11 lutego 2006 r.

Fig. 2. The hourly average concentration of particulate matter PM10 (top figure), sulfur dioxide (central figure) and nitrogen oxides (bottom figure) in Nowy Sącz from 13 January to 11 February 2006



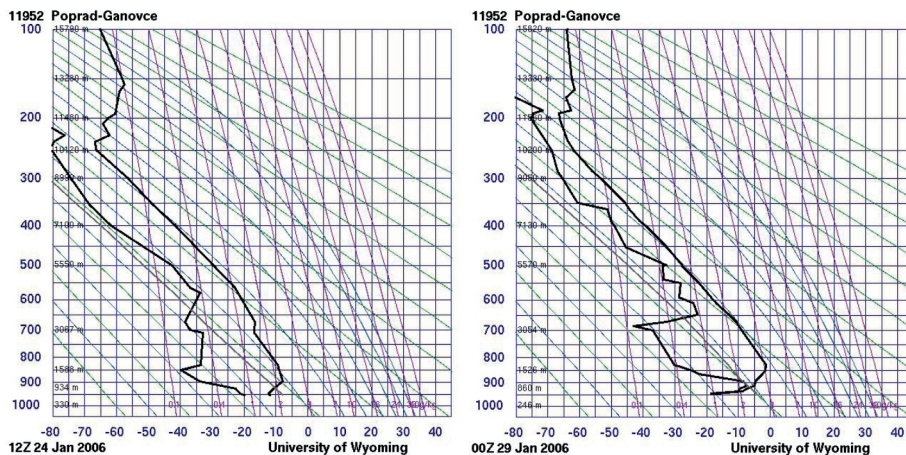
Ryc. 3. Rozkład ciśnienia atmosferycznego na poziomie morza o godzinie 12 UTC w dniach 24 styczeń (górna mapa) i 29 stycznia 2006 (dolna mapa) <<http://www.knmi.nl/>>

Fig. 3. Distribution of atmospheric pressure at sea level at 12 UTC on 24 January (upper map) and 29 January (lower map) 2006 <<http://www.knmi.nl/>>

WARUNKI SYNOPTYCZNE

Analizowany epizod zanieczyszczeniowy ukształtował się w sytuacji dominacji ośrodków antycyklonalnych nad Europą Środkową. Występujący pierwotnie nad Półwyspem Kolskim układ wyżowy relatywnie szybko przemieszczał się w kierunku południowym, systematycznie zwiększając swój zasięg przestrzenny – 22 stycznia jego centrum znajdowało się w rejonie Zatoki Ryskiej, 23 stycznia nad północną Polską, a 24 stycznia nad zachodnią Ukrainą. Ciśnienie atmosferyczne w jego centrum wynosiło wówczas około 1050 hPa (ryc. 3). Począwszy od 25 stycznia omawiany ośrodek antycyklonalny zaczął przemieszczać się w kierunku wschodnim, pozostawiając Europę Środkową pod wpływem rozległego klina antycyklonalnego, genetycznie związanego z wyżem znad Wysp Brytyjskich, w centrum którego ciśnienie atmosferyczne mieściło się w granicach 1035–1040 hPa (ryc. 3). Mimo rozwijających się nad Półwyspem Skandynawskim układów niżowych południowa Polska do 3 lutego pozostawała pod wpływem wyżu brytyjskiego, który ostatecznie 4 lutego ustąpił miejsca bruzdzie niskiego ciśnienia, powiązanej z płytkim ośrodkiem cyklonalnym zalegającym nad wschodnią Ukrainą.

Kształtujący warunki pogodowe 24 stycznia nad Europą Środkową ośrodek wysokiego ciśnienia znad zachodniej Ukrainy zaznaczał się głównie w dolnych warstwach troposfery – poziomy izobaryczne 925 hPa i 850 hPa, wyżej zaś – poziomy izobaryczne 700 hPa i 500 hPa – istotną rolę odgrywał rozległy klin antycyklonalny powiązany ze strefą podwyższonego ciśnienia atmosferycznego występującą nad północną Afryką. Omawianemu klinowi na poziomach 700 hPa i 500 hPa towarzyszył niż z centrum nad Półwyspem Bałkańskim, co w środkowej troposferze skutkowało sływem nad Europą Środkową relatywnie ciepłego powietrza. Większym zasięgiem wertykalnym cechował się natomiast wyż brytyjski, wpływający na sytuację pogodową w Europie Środkowej w dniu 29 stycznia. Sięgał on do środkowej troposfery – poziom izobaryczny 700 hPa. Na poziomie izobarycznym 500 hPa rejon Wysp Brytyjskich pozostawał pod wpływem klina antycyklonalnego połączonego genetycznie z Wyżem Azorskim, któremu towarzyszył niż znad Półwyspu Iberyjskiego. Europa Środkowa pozostawała wówczas w strefie granicznej między zalegającą wyżej powierzchnią geopotencjału nad Wyspami Brytyjskimi a strefą jego szybko obniżającej w kierunku północno-wschodnim wysokości. Konsekwencją występowania w analizowanym okresie w wyższych warstwach atmosfery relatywnie ciepłych mas powietrza było powolne osiadanie jego cząstek i wzrost ich temperatury, co skutkowało utrzymywaniem się licznych warstw inwersyjnych w dolnej i środkowej troposferze. Zgodnie z pozyskanymi dla analizowanego obszaru danymi z reanaliz ERA-Interim i sondażami aerologicznymi stacji Poprad-Gánovce odpowiednio 24 stycznia występowały one aż do poziomu 675 hPa, 29 stycznia do poziomu 700 hPa (ryc. 4).

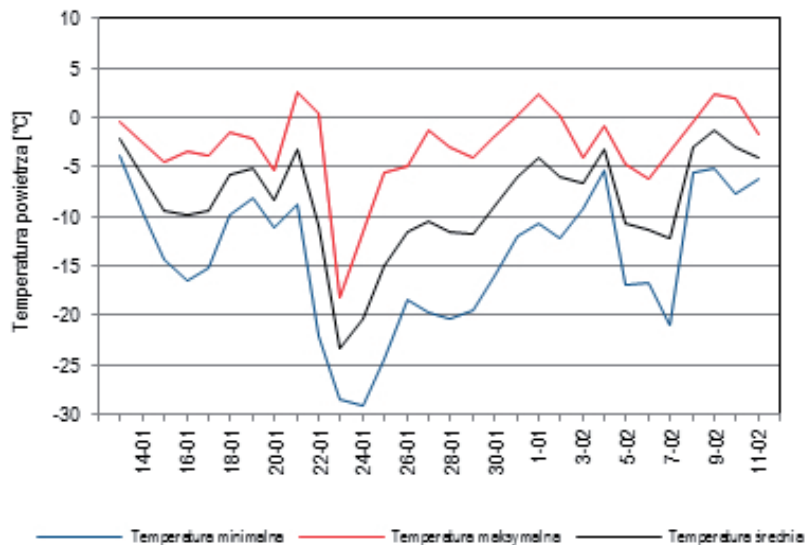


Ryc. 4. Sondáže aerologiczne stacji Poprad-Gánovce o godzinie 12 UTC w dniach 24 stycznia (lewa rycina) i 29 stycznia 2006 r. (prawa rycina)

<<http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>>

Fig. 4. Atmospheric sounding from Poprad-Gánovce station at 12 UTC on 24 January (left figure) and 29 January 2006 (right figure)

<<http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>>



Ryc. 5. Czasowa zmienności minimalnej, maksymalnej i średniej dobowej temperatury powietrza w Nowym Sączu w dniach od 13 stycznia do 11 lutego 2006 r.

Dane pozyskane z bazy CARPATCLIM

Fig. 5. The temporal variability of the minimum, maximum and mean daily temperature from 13 January to 11 February 2006

According to the CARPATCLIM database

WARUNKI METEOROLOGICZNE

Warunki termiczne towarzyszące omawianemu epizodowi wysokich stężeń zanieczyszczeń powietrza zostały przeanalizowane w odniesieniu do średniej temperatury dobowej oraz dobowej temperatury minimalnej i maksymalnej pozyskanych za pośrednictwem bazy CARPATCLIM (ryc. 5). Temperatura minimalna osiągnęła najniższą wartość 24 stycznia ($-29,1^{\circ}\text{C}$), natomiast najniższe wartości temperatury średniej dobowej i temperatury maksymalnej wystąpiły 23 stycznia (odpowiednio $-23,3^{\circ}\text{C}$ i $-18,9^{\circ}\text{C}$). Czasowy rozkład wartości tych charakterystyk potwierdza występowanie zależności między warunkami termicznymi i jakością powietrza – występowanie dni z wysokim stężeniem wybranych polutantów pokrywało się z najniższymi wartościami analizowanych charakterystyk termicznych. Istotnie statystycznie na poziomie 0,01 ujemne zależności zostały zidentyfikowane między temperaturą średnią dobową i minimalną a koncentracją pyłu zawieszonego PM10, dwutlenku siarki i tlenków azotu, a także między temperaturą maksymalną a stężeniem dwutlenku siarki; spadek wartości wybranych charakterystyk termicznych skutkował wyraźnym wzrostem koncentracji stężeń zanieczyszczeń powietrza (tab. 1).

Tabela 1. Wartości współczynnika korelacji liniowej Pearsona dla zależności między charakterystykami termicznymi a stężeniem wybranych zanieczyszczeń powietrza

Table 1. The values of Pearson's correlation coefficient for the relationship between thermal characteristics and the concentration of selected air pollutants

	Temperatura średnia dobowa Daily mean temperature	Temperatura minimalna Minimum temperature	Temperatura maksymalna Maximum temperature
Pył zawieszony/ Particulate matter PM10	-0,54	-0,61	-0,33
Dwutlenek siarki/ Sulfur dioxide SO ₂	-0,74	-0,75	-0,58
Tlenki azotu/Nitrogen oxides NO _x	-0,49	-0,58	-0,24

Wartości pogrubione – istotne statystycznie na poziomie 0,01.

Values in bold – statistically significant at 0.01.

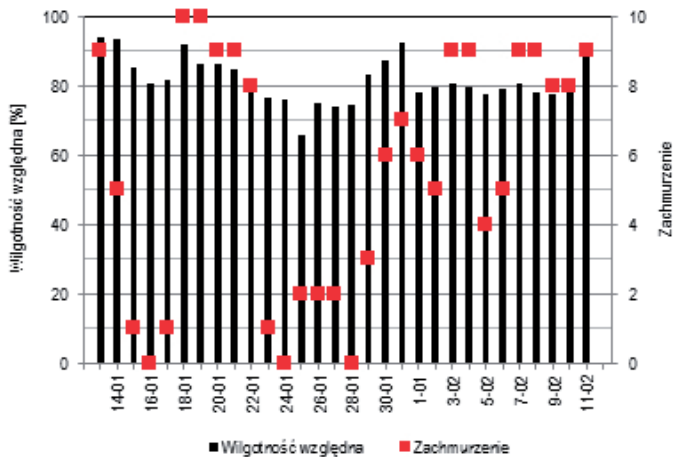
Rozkład przestrzenny wartości temperatury minimalnej zarówno 24 stycznia, jak i 29 stycznia wskazywał na występowanie swoistych „zastoisk chłodu” w Kotlinie Sądeckiej, a także w rejonie Żywca i Suchej Beskidzkiej. Minimalna temperatura powietrza w Tatrach była wówczas zdecydowanie wyż-

sza niż we wklęsłych formach kotlin, 24 stycznia wynosząc odpowiednio: dla Nowego Sącza $-29,1^{\circ}\text{C}$ i dla Kasprowego Wierchu $-16,2^{\circ}\text{C}$, a 29 stycznia dla Nowego Sącza $-19,4^{\circ}\text{C}$ i dla Kasprowego Wierchu $-9,2^{\circ}\text{C}$. Przeprowadzona ocena związku różnicy temperatury minimalnej między Nowym Sączem i Kasprowym Wierchem ze stężeniem zanieczyszczeń powietrza wykazała istnienie istotnej statystycznie na poziomie 0,01 ujemnej zależności między analizowanymi zmiennymi. Utrzymywanie się przy powierzchniowych warstw inwersyjnych – rozumianych jako ujemna wartość różnicy temperatury powietrza w profilu Nowy Sącz-Kasprowy Wierch – sprzyjało pogorszeniu sytuacji aerosanitarnej w Kotlinie Sądeckiej, a wzrost natężenia inwersji temperatury wpływał znacząco na zwiększenie koncentracji wszystkich branych pod uwagę polutantów. Wartość współczynnika korelacji liniowej Pearsona wyniosła: dla pyłu zawieszonego PM10 $-0,78$, dla dwutlenku siarki $-0,76$ i dla tlenków azotu $-0,78$.

Wilgotność względna powietrza charakteryzowała się silnym zróżnicowaniem czasowym w badanym okresie; jej wartości średnie dobowe wahały się od 66 do 94% (ryc. 6). Początkowo wykazywała tendencję spadkową, osiągając minimum średniej wartości dobowej 24 stycznia, a następnie systematycznie rosła, 31 stycznia osiągając 93%. Kolejno ustabilizowała się na poziomie około 80%. Charakterystyka ta nie wykazywała istotnej statystycznie zależności ze stężeniami badanych zanieczyszczeń powietrza. Znaczną zmiennością czasową cechował się również przebieg zachmurzenia. W dniach z najwyższymi wartościami stężeń pyłu zawieszonego PM10 osiągnęło 24 stycznia wartość 0/10, a 29 stycznia 3/10. Rozkodowane depesze SYNOP stacji Nowy Sącz wskazują jednak na występowanie w tych dniach intensywnych mgieł w godzinach porannych i całodobowych zamglenia. Biorąc pod uwagę warunki anemologiczne, analizowanemu epizodowi zanieczyszczeniowemu towarzyszyła głównie cisza lub słaby wiatr z sektora południowo-zachodniego (ryc. 7). Południowy i południowo-zachodni spływ powietrza z otaczających Kotlinę Sądecką wzniesień prawdopodobnie dodatkowo zwiększał stabilność utrzymującej się warstwy inwersyjnej. Istotnie statystycznie na poziomie 0,01 zależności zostały zidentyfikowane między wielkością zachmurzenia a stężeniem pyłu zawieszonego PM10, dwutlenku siarki i tlenków azotu oraz między prędkością wiatru a stężeniem pyłu zawieszonego PM10 i tlenków azotu – obie zależności były ujemne (tab. 2).

DYSKUSJA I WNIOSKI

Analogicznie do wspomnianego we wstępie opracowania Fu i in. (2008) również w przypadku Nowego Sącza długotrwałe utrzymywanie się bardzo silnego epizodu wysokich stężeń zanieczyszczeń powietrza było związane

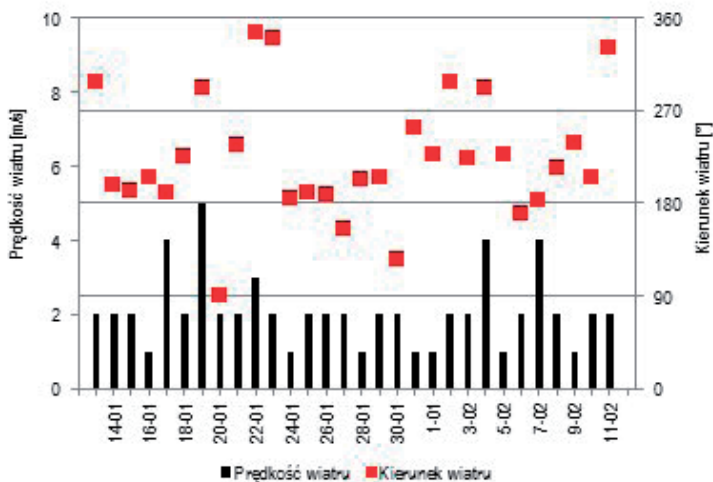


Ryc. 6. Czasowa zmienność wilgotności względnej powietrza i zachmurzenia w Nowym Sączu w dniach od 13 stycznia do 11 lutego 2006

Dane pozyskane z bazy CARPATCLIM

Fig. 6. The temporal variability of relative humidity and cloud cover in Nowy Sącz from 13 January to 11 February 2006

According to the CARPATCLIM database



Ryc. 7. Czasowa zmienność prędkości i kierunku wiatru w Nowym Sączu w dniach od 13 stycznia do 11 lutego 2006

Dane pozyskane z bazy CARPATCLIM.

Fig. 7. The temporal variability of the wind speed and direction in Nowy Sącz from 13 January to 11 February 2006

According to the CARPATCLIM database.

Tabela 2. Wartości współczynnika korelacji liniowej Pearsona dla zależności między wilgotnością względną powietrza, zachmurzeniem i prędkością wiatru a stężeniem wybranych zanieczyszczeń powietrza

Table 2. The values of Pearson's correlation coefficient for the relationship between relative humidity, cloud cover, wind speed and the concentration of selected air pollutants

	Wilgotność względna Relative humidity	Zachmurzenie Cloud cover	Prędkość wiatru Wind speed
Pył zawieszony/ Particulate matter PM10	-0,26	-0,68	-0,56
Dwutlenek siarki/ Sulfur dioxide SO ₂	-0,37	-0,71	-0,44
Tlenki azotu/Nitrogen oxides NO _x	-0,35	-0,68	-0,54

Wartości pogrubione – istotne statystycznie na poziomie 0,01.

Values in bold – statistically significant at 0.01.

z oddziaływaniem rozległych ośrodków wysokiego ciśnienia. Sprzyjały one subsydencji cząstek powietrza i zwiększaniu stabilności atmosfery, co w konsekwencji doprowadziło do powstania inwersji osiadania w dolnej i środkowej troposferze.

Ponadto, podobnie do Logan (Malek i in. 2006), niewielkie zachmurzenie i małe prędkości wiatru, a także zaleganie pokrywy śnieżnej zwiększającej promieniowanie odbite przyczyniły się do intensywnego wypromieniowania ciepła z podłoża i ukształtowania się inwersji radiacyjnej, wzmocnionej prawdopodobnie katabatycznymi wpływami chłodnego powietrza z otaczających Kotlinę Sądecką obszarów górskich.

Z porównania stężeń wybranych do analizy zanieczyszczeń powietrza w Nowym Sączu i Krakowie wynika, iż stan aerosanitarny powietrza nie jest uwarunkowany wyłącznie stopniem urbanizacji i lokalną emisją zanieczyszczeń. Najistotniejsze znaczenie należy przypisać aktualnej sytuacji synoptycznej i rzeźbie terenu. Warunki topograficzne były czynnikiem wybitnie sprzyjającym stagnacji chłodnego powietrza i powstawaniu tzw. zagłębień chłodu w Kotlinie Sądeckiej, prowadzących do ograniczenia procesów mieszania powietrza. Ponadto, niższa koncentracja omawianych polutantów w Krakowie w trakcie badanego epizodu mogła być uwarunkowana m.in. rozwojem efektu miejskiej wyspy ciepła i związaną z nią większą emisją ciepła, ułatwiającą dyssypację warstw hamujących. Problem ten wymaga jednak uwagi podczas dalszych badań.

Podsumowując, sporadyczne poruszenie problemu jakości powietrza w relatywnie małych obszarach miejskich i pozamiejskich w literaturze naukowej świadczy o niedocenianiu wagi problemu. Ze względu na negatywny wpływ zanieczyszczeń powietrza na zdrowie i życie ludzkie zagadnienie to wymaga

zwiększonej uwagi tak w zakresie poszerzenia funkcjonowania sieci monitoringu jakości powietrza, jak i opracowań naukowych omawiających sytuacje sprzyjające występowaniu wysokich stężeń zanieczyszczeń powietrza w tychże miejscowościach.

LITERATURA

- American Meteorological Society, 2014: *Glossary of Meteorology*, <<http://glossary.ametsoc.org/>>, [dostęp: 03.2015].
- Bielec-Bąkowska Z., 2010: Strong high pressure systems influencing the weather in Poland during the period 1971–200, *Bad. Fizjogr.* 61, 91–104.
- Bielec-Bąkowska Z., Knozová G., Leśniok M., Matuszko D., Piotrowicz K., 2011: *High suspended dust concentration in Brno, Sosnowiec and Krakow (the year 2009 as an example)*, *Pr. Geogr. UJ* 126, 67–84.
- Bokwa A., 2011: *Influence of the air temperature inversions on the air pollution dispersion conditions in Krakow*, *Pr. Geogr. UJ* 126, 41–51.
- CARPATCLIM: <<http://www.carpatclim-eu.org/>>, [dostęp: 03.2015].
- Deutscher Wetterdienst: <<http://www1.wetter3.de/>>, [dostęp: 12.2014].
- ERA-Interim reanalysis: <<http://www.ecmwf.int/en/research/climate-reanalysis/era-interim/>>, [dostęp: 01.2015].
- Fu Q., Zhuang G., Wang J., Xu Ch., Huang K., Li J., Hou B., Lu T., Street D.G., 2008: *Mechanism of formation of the heaviest pollution episode ever recorded in the Yangtze River Delta, China*, *Atm. Environment* 42, 2023–2036.
- Jacobson M.Z., 2002: *Atmospheric pollution: History, science and regulation*, Cambridge Univ. Press, New York.
- Ji D., Wang Y., Wang L., Chen L., Hu B., Tang G., Xin J., Song T., Wen T., Sun Y., Pan Y., Liu Z., 2012: *Analysis of heavy pollution episodes in selected cities of northern China*, *Atm. Environment* 50, 338–348.
- Kondracki J., 2002: *Geografia regionalna Polski*, Wyd. Nauk. PWN, Warszawa.
- Kukkonen J., Pohjola M., Sokhi R.S., Luhana L., Kitwiroon N., Fragkou L., Rantamäki M., Berge E., Ødegaard V., Slørdal L.H., Denby B., Finardi S., 2005: *Analysis and evaluation of selected local-scale PM10 air pollution episodes in four European cities: Helsinki, London, Milan and Oslo*, *Atm. Environment* 39, 2759–2773.
- Lee S., Ho Ch., Lee Y.G., Choi H., Song Ch., 2013: *Influence of transboundary air pollutants from China on the high PM10 episode in Seoul, Korea for the period October 16–20, 2008*, *Atm. Environment* 77, 430–439.
- Leśniok M., Małarzewski Ł., Niedźwiedz T., 2010: *Classification of circulation types for Southern Poland with an application to air pollution concentration in Upper Silesia*, *Phys. and Chem. of the Earth* 35, 516–522.
- Malek E., Davis T., Martin R.S., Silva P.J., 2006: *Meteorological and environmental aspects of one of the worst national air pollution episodes (January, 2004) in Logan, Cache Valley, Utah, USA*, *Atm. Res.* 79, 108–122.
- Niedźwiedz T., 1981: *Sytuacje synoptyczne i ich wpływ na zróżnicowanie przestrzenne wybranych elementów klimatu w dorzeczu górnej Wisły*, *UJ, Kraków* [rozpr. hab.].
- Ogimet: <<http://www.ogimet.com/>>, [dostęp: 12.2014].
- Palarz A., 2014: *Zmienność inwersji temperatury powietrza nad Krakowem w świetle warunków cyrkulacyjnych*, *Pr. Geogr.* 138, 29–43.
- Pascal M., Corso M., Chanel O., Declercq C., Badaloni C., Cesaroni G., Henschel S., Meister K., Haluza D., Martin-Olmedo P., Medina S., 2013: *Assessing the public health impacts of urban*

- air pollution in 25 European cities: Results of the Aphekom project*, Sc. of the Total Environment 449, 390–400.
- Powierzchnia i ludność w przekroju terytorialnym w 2014 roku*, 2014: GUS, Warszawa.
- Radomski J., Widawski A., 2011: *Influence of circulation types on the SO₂ concentration in the Silesian Upland*, Pr. Geogr. UJ 126, 53–65.
- Russo A., Trigo R.M., Martins H., Mendes M., 2014: *NO₂, PM₁₀ and O₃ urban concentrations and its association with circulation weather types in Portugal*, *Atm. Environment* 89, 768–785.
- Segura S., Estellés V., Esteve A.R., Utrillas M.P., Martínez-Lozano J.A., 2013: *Analysis of a severe pollution episode in Valencia (Spain) and its effect on ground level particulate matter*, *Journ. of Aerosol Sc.* nr 56, 5641–5652.
- Trivedi D.K., Ali K., Beig G., 2014: *Impact of meteorological parameters on the development of fine and coarse particles over Delhi*, *Sc. of the Total Environment* 478, 175–183.
- Unal Y.S., Toros H., Deniz A., Incecik S., 2011: *Influence of meteorological factors and emission sources on spatial and temporal variations of PM₁₀ concentrations in Istanbul metropolitan area*, *Atm. Environment* 45, 5504–5513.
- University of Wyoming, Department of Atmospheric Science: <<http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>>, [dostęp: 12.2014].
- Wang Y., Ying Q., Hu J., Zhang H., 2014: *Spatial and temporal variations of six criteria air pollutants in 31 provincial capital cities in China during 2013–2014*, *Environment Internat.* 73, 413–422.
- Whiteman C.D., Hoch S.W., Horel J.D., Charland A., 2014: *Relationship between particulate air pollution and meteorological variables in Utah's Salt Lake Valley*, *Atm. Environment* 94, 742–753.
- Wojewódzki Inspektorat Ochrony Środowiska w Krakowie: <<http://monitoring.krakow.pios.gov.pl/>>, [dostęp: 11.2014].