

## KONCENTRACJA ZANIECZYSZCZEŃ PYŁOWYCH POWIETRZA PM<sub>2,5</sub> W KRAKOWIE W LATACH 2010–2014

### Concentration of the air dust pollution PM<sub>2.5</sub> in Kraków in 2010–2014

JOANNA JĘDRUSZKIEWICZ\*, PIOTR PIOTROWSKI\*\*, BARTŁOMIEJ PIETRAS\*

**Zarys treści.** Kraków należy do najbardziej zanieczyszczonych miast w Polsce. Szczególnie niebezpieczny dla zdrowia jest pył o frakcji 2,5 µm (PM<sub>2,5</sub>). Największa jego koncentracja w powietrzu występuje w półroczu chłodnym, szczególnie duża jest w lutym i grudniu. Najwyższe stężenia pyłu PM<sub>2,5</sub> odnotowano na obszarze o gęstej zabudowie w centrum Krakowa, a w przebiegu dobowym – w godzinach wieczornych oraz nieco mniejsze w godzinach porannych, podczas szczytu komunikacyjnego. W półroczu chłodnym najwyższe stężenie PM<sub>2,5</sub> stwierdzono podczas napływu mas powietrza z kierunku południowo-zachodniego i południowego, natomiast w półroczu ciepłym – z południowo-wschodniego i południowego. Wraz ze wzrostem prędkości wiatru stężenie pyłu PM<sub>2,5</sub> wyraźnie się zmniejszało we wszystkich analizowanych punktach pomiarowych.

**Słowa kluczowe:** zanieczyszczenia pyłowe powietrza, PM<sub>2,5</sub>, Kraków, prędkość wiatru, cyrkulacja atmosferyczna

**Abstract.** Krakow is one of the most polluted cities in Poland. The dust fraction of 2.5 µm (PM<sub>2.5</sub>) has a significant impact on human health. The greatest concentration of PM<sub>2.5</sub> was found for the cold half year (especially in February and December) and in the most densely built-up area of the city center. The worst air quality occurs in the evening and morning (peak traffic) hours. In the cold half year the highest concentration of PM<sub>2.5</sub> was observed for the south-western and southern air masses advection, while in the warm half year for the south eastern and southern advection. The increase in wind speed is followed by a considerable decrease of the concentration of PM<sub>2.5</sub> in all monitoring sites.

**Key words:** air dust pollution, PM<sub>2.5</sub>, Kraków, wind speed, atmospheric circulation

## Wstęp

Zanieczyszczenie powietrza na obszarze Krakowa stanowi poważny problem, zarówno w ujęciu społecznym, jak i przyrodniczym. Ponadnormatywna koncentracja zanieczyszczeń pyłowych w powietrzu wpływa negatywnie na zdrowie mieszkańców miasta. Pył o średnicy 2,5 µm (PM<sub>2,5</sub>), ze względu na swoją frakcję, jest o wiele bardziej niebezpieczny niż pył o średnicy 10 µm (PM<sub>10</sub>). Pomimo wdrażania kolejnych Programów Ochrony Powietrza w Krakowie (w latach: 2005, 2009, 2011, 2013) i spadku emisji pyłów z najbardziej uciążliwych zakładów (Realizacja Programu ... 2012), koncentracja drobnych pyłów (PM<sub>2,5</sub>) wciąż pozostaje na wysokim poziomie. Świadczą o tym dane z pomiarów pyłu zawieszonego PM<sub>2,5</sub> na stacjach tła miejskiego w Krakowie przy ul. Bulwarowej,

Bujaka i Al. Krasińskiego z lat 2011–2014. Średnie roczne stężenie pyłu zawieszonego PM<sub>2,5</sub> w całym badanym okresie przekraczało na wszystkich wymienionych stanowiskach pomiarowych dopuszczalną wartość i poziom docelowy (25 g/m<sup>3</sup>) (Raport o stanie środowiska ... 2015). Mnogość oraz zróżnicowanie czynników wpływających na jakość powietrza na obszarze Krakowa oraz brak szczegółowego rozpoznania sytuacji stanowią istotne przeszkody dla podjęcia skutecznych działań mających na celu poprawę warunków aerosanitarnych miasta.

Przyczyny wysokich koncentracji pyłu zawieszonego w Krakowie mają charakter zarówno naturalny, jak i antropogeniczny. Czynniki naturalne związane są przede wszystkim ze specyficznymi uwarunkowaniami mezo- i mikroklimatycznymi badanego obszaru, powodującymi częste występowanie dni z inwersyjnym roz-

\* Uniwersytet Pedagogiczny w Krakowie, Instytut Geografii, ul. Podchorążych 2, 30-084 Kraków; e-mail: joajed@up.krakow.pl, bpietras86@gmail.com

\*\* Uniwersytet Łódzki, Wydział Nauk Geograficznych, Katedra Meteorologii i Klimatologii, ul. Narutowicza 88, 90-139 Łódź; e-mail: janos33@wp.pl

kładem temperatury (Milata 1959; Morawska-Horawska 1978; Lewińska 1984; Walczewski 1984, 1994; Walczewski i in. 2000) oraz topografią terenu, sprzyjającą akumulacji cząstek stałych oraz ograniczającą dyspersję zanieczyszczeń pyłowych (Bokwa 2007, 2010). Wpływ na koncentrację pyłów mają także niektóre parametry meteorologiczne i zjawiska atmosferyczne, które determinowane są przez czynniki atmosferyczne występujące w makro- i mezoskali (cyrkulacja atmosferyczna). Próbę określenia ilościowych zależności pomiędzy wybranymi elementami meteorologicznymi a zanieczyszczeniem powietrza w Krakowie podjęli Dworak i in. (2000). Wpływ sytuacji synoptycznych na występowanie ponadnormatywnych koncentracji pyłu PM<sub>2,5</sub> na obszarze Krakowa był tematem licznych badań prowadzonych m.in. przez Niedźwiedzia i Oleckiego (1994), Tomaszewską (2010), Bielec-Bąkowską i in. (2011) oraz Bokwę (2012). Nie jest w pełni jasny wpływ cyrkulacji atmosferycznej na wzrost lub spadek stężenia zanieczyszczeń pyłowych. Część zanieczyszczeń pyłowych może pochodzić z obszarów leżących poza aglomeracją krakowską. Próby identyfikacji odległych źródeł emisji pyłu PM<sub>2,5</sub> i ich wpływu na stężenie pyłu zawieszonego w Katowicach, Gdańsku i Diablej Górze były realizowane przez Godłowską i in. (2015) za pomocą modelu *HYSPLIT transport and dispersion model*. Odległe źródła zanieczyszczeń pyłem PM<sub>2,5</sub>, w oparciu o dane z EMEP-CEIP, zlokalizowano na obszarze państw położonych na południe i wschód od terytorium Polski. Podczas adwekcji z tych obszarów stwierdzono wzrost stężenia pyłu PM<sub>2,5</sub> na obszarze Katowic położonych blisko Krakowa. Badania wpływu kierunku i prędkości wiatru na warunki aerosanitarne na obszarze Krakowa prowadzili także m.in. Walczewski i Łukaszewski (1986), Bokwa (2007), Pietras (2013) oraz Oleniacz i in. (2014). Dokładne ujęcie ilościowe wpływu cyrkulacji atmosferycznej na koncentrację zanieczyszczeń pyłowych jest jednak niełatwe ze względu na niepełne dane zarówno o emisji z obszaru aglomeracji krakowskiej, jak i spoza niej, oraz nakładaniu się innych czynników mających wpływ na koncentrację zanieczyszczeń pyłowych w atmosferze.

Do najistotniejszych czynników sprzyjających zmniejszaniu się koncentracji zanieczyszczeń pyłowych w powietrzu można zaliczyć m.in.: duże prędkości wiatru, rozwój ruchów turbulencyjnych w miejskiej warstwie granicznej oraz opady atmosferyczne. W oparciu o obrazy z sodaru udało się ustalić istotny wpływ warunków

panujących w miejskiej warstwie granicznej na stężenie pyłu PM<sub>10</sub> w Krakowie (Godłowska i in. 2008). Stwierdzono spadek stężeń zanieczyszczeń powietrza wraz ze wzrostem wysokości konwekcji i inwersji dolnych, natomiast niekorzystne warunki do dyspersji zanieczyszczeń powietrza odnotowano podczas inwersji wzniesionych ponad inwersjami dolnymi. W tym samym opracowaniu zauważono, iż opad atmosferyczny odgrywa ograniczoną rolę w obniżaniu emisji zanieczyszczeń.

Koncentracja zanieczyszczeń pyłowych w powietrzu zmienia się nie tylko w zależności od warunków lokalnych i warunków atmosferycznych. Duże znaczenie ma też zmienność nasilenia emisji zanieczyszczeń w różnych skalach czasowych oraz wysokość emitorów. Z porównania warunków terenowych i wysokości emitorów pomiędzy stacją przy Al. Krasińskiego (centrum miasta) a Nową Hutą wynika, iż niska emisja i zwarta zabudowa w centrum miasta sprzyjają większej koncentracji pyłu PM<sub>10</sub> w powietrzu (Bokwa 2012).

W ciągu dnia większych stężeń zanieczyszczeń należy spodziewać się w godzinach szczytu komunikacyjnego. Biorąc pod uwagę pory roku największa koncentracja zanieczyszczeń pyłowych w powietrzu pojawia się w porze zimowej na skutek wzrostu emisji pyłowych z palenisk domowych. Mając na uwadze ww. przesłanki, analiza zanieczyszczenia powietrza pyłem PM<sub>2,5</sub> została przeprowadzona w różnych skalach czasowych, ze szczególnym uwzględnieniem cyklu dobowego oraz kierunku adwekcji i prędkości wiatru.

Stężenia pyłem PM<sub>2,5</sub> są analizowane znacznie rzadziej niż pyłu PM<sub>10</sub>, dlatego też postanowiono sprawdzić zmienność stężenia pyłu zawieszonego PM<sub>2,5</sub> w latach 2010–2014 na obszarze Krakowa w oparciu o dane z trzech punktów pomiarowych. Do analizy przestrzennego zróżnicowania stężenia pyłu PM<sub>2,5</sub> wybrano stacje monitoringu jakości powietrza, które położone są w różnych punktach miasta o odmiennym pokryciu terenu w otoczeniu stacji. W niniejszym opracowaniu skupiono się na analizie wybranych czynników mających wpływ na stężenie pyłu zawieszonego PM<sub>2,5</sub> – kierunku adwekcji i prędkości wiatru. Wybór tych czynników do analizy był uwarunkowany dostępnością danych oraz ich istotnym wpływem na koncentrację pyłu w powietrzu. W oparciu o ww. dane sprawdzono, jak zmienia się stężenie pyłu PM<sub>2,5</sub> w zależności od prędkości wiatru w półroczu ciepłym i chłodnym. Kolejnym celem opracowania było określe-

nie stężenia pyłu zawieszonego PM<sub>2,5</sub> w zależności od kierunku adwekcji i charakteru cyrkulacji atmosferycznej i porównanie uzyskanych wyników z podobnymi badaniami przeprowadzonymi w oparciu o wartości stężenia pyłu PM<sub>10</sub> na obszarze Krakowa. Za istotną uznano też określenie prawdopodobieństwa wystąpienia wysokich stężeń pyłu PM<sub>2,5</sub> w różnych porach dnia w zależności od kierunku adwekcji, z uwzględnieniem podziału na półroczne chłodne i ciepłe.

## Dane i metody

Kraków położony jest u zbiegu dwóch dużych jednostek geologicznych: monokliny śląsko-krakowskiej oraz Karpat i ich przedmurza (Gradziński 1974), co bezpośrednio odzwierciedla się w zróżnicowaniu morfometrycznym badanego obszaru i tym samym warunkuje przebieg głównych korytarzy przewietrzania miasta oraz wpływa na lokalne warunki cyrkulacyjne zarówno w mikro- jak i mezoskali (German 2007).

W opracowaniu wykorzystano dane z trzech stacji monitoringu jakości powietrza w Krakowie, położonych w różnych punktach miasta (Al. Krasieńskiego, Nowa Huta, Kurdwanów), oraz automatycznej stacji meteorologicznej Vaisala umieszczonej na dachu budynku Wydziału Fizyki i Informatyki Stosowanej Akademii Górniczo-Hutniczej (WFilS AGH) przy ul. Reymonta (rys. 1). Punkt pomiarowy prędkości wiatru na WFilS AGH umiejscowiono na dachu budynku w centrum miasta. Średnia prędkość wiatru (ok. 1,6–1,7 m/s) z 23 punktów pomiarowych rozmieszczonych na obszarze Krakowa (Oleniacz i in. 2014) jest bardzo zbliżona do prędkości wiatru w punkcie pomiarowym, który został wybrany do analizy warunków anemometrycznych w niniejszym opracowaniu.

Stacja monitoringu jakości powietrza przy Al. Krasieńskiego położona jest w obrębie dna doliny Wisły, na wysokości 203 m n.p.m. Charakteryzowana jest jako stacja tła komunikacyjnego i zlokalizowana jest na pasie zieleni w stosunkowo wąskim kanionie miejskim (ulicznym), przy jednej z najbardziej ruchliwych arterii komunikacyjnych miasta, o generalnym przebiegu SSE–NNW. W otoczeniu stacji zabudowę stanowią ściśle przylegające do siebie kamienice, ciągnące się wzdłuż ulicy.

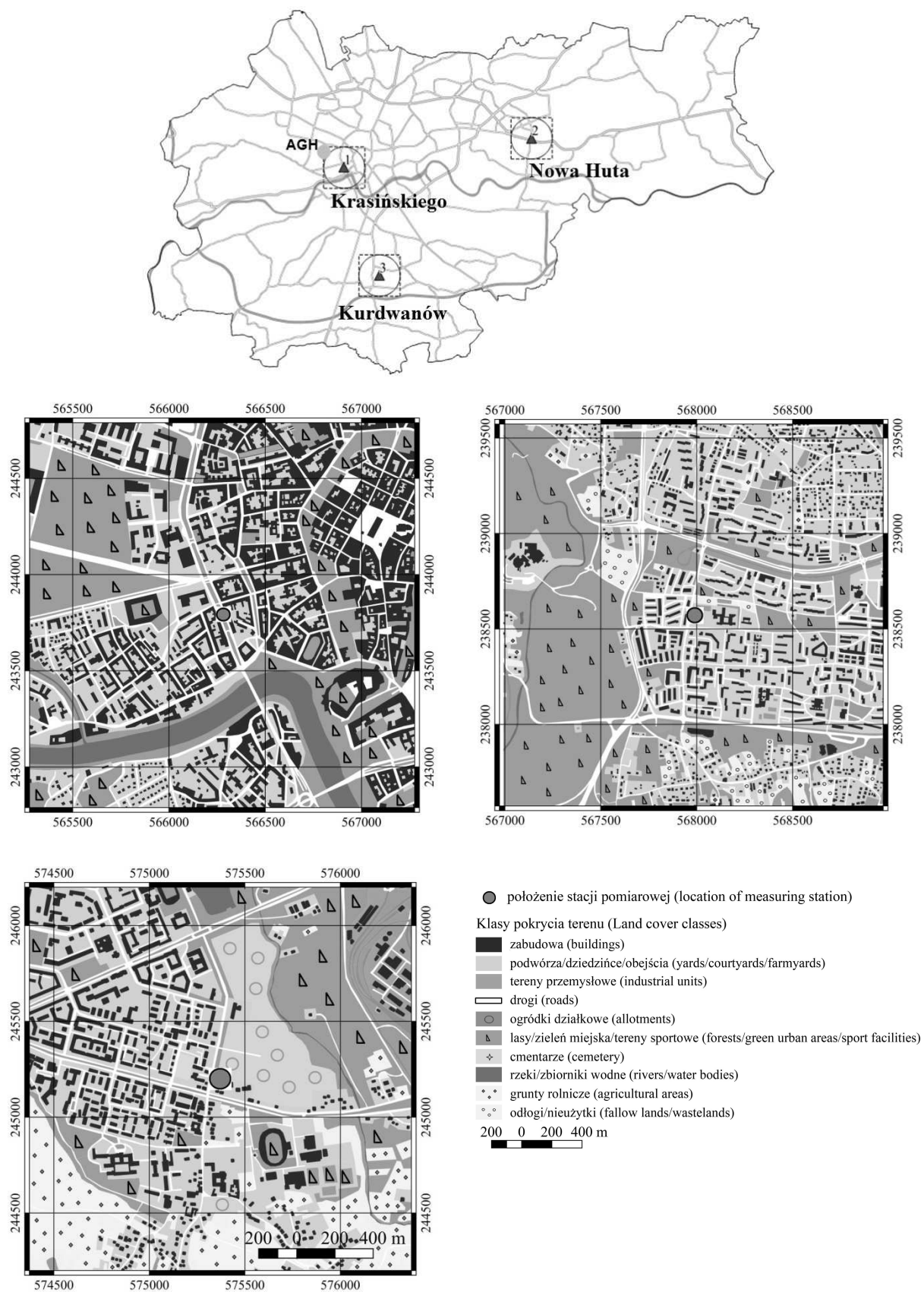
Stacja monitoringu w Nowej Hucie zaliczana jest do stacji tła miejskiego w strefie oddziaływania przemysłu. Stacja umieszczona jest w pobliżu skrzyżowania ul. Bulwarowej z Aleją

Jana Pawła II. Jest położona na wysokości 195 m n.p.m. w obrębie dna doliny Wisły, w odległości około 1 km na zachód od kombinatu metalurgicznego w Nowej Hucie. W odległości 600 metrów na wschód od stacji biegnie dolina rzeki Dłubni. W najbliższym otoczeniu punktu pomiarowego, od strony zachodniej, znajduje się stacja paliwowa oraz zwarta zabudowa, składająca się głównie z czteropiętrowych bloków mieszkalnych. Na północ oraz na wschód od stacji, w jej bezpośrednim sąsiedztwie, rozciągają się tereny ogródków działkowych.

Stacja monitoringu Kurdwanów jest stacją tła miejskiego. Zlokalizowana jest w południowej części Krakowa przy ul. Bujaka, w odległości 5 km od centrum miasta, na wysokości około 50 metrów nad dnem doliny Wisły (232 m n.p.m.). W odległości 700 metrów na zachód od stacji biegnie dolina rzeki Wilgi. W bezpośrednim otoczeniu stacji znajduje się głównie zwarta, niska i średnia zabudowa, w skład której wchodzi przede wszystkim czteropiętrowe bloki mieszkalne.

Normy stężenia pyłu PM<sub>2,5</sub> są odmienne w poszczególnych krajach i różnie obliczane. Wynika to głównie z trudnością miarodajnej oceny wpływu PM<sub>2,5</sub> na organizm ludzki. Szacuje się, iż już stężenia pyłu PM<sub>2,5</sub> rzędu 3–5 µg/m<sup>3</sup> mogą niekorzystnie wpływać na zdrowie zarówno przy krótkotrwałej, jak i długotrwałej ekspozycji (WHO 2005). Ustalony w Rozporządzeniu Ministra Środowiska z dnia 24 sierpnia 2012 r. dopuszczalny poziom dla rocznego stężenia pyłu zawieszonego PM<sub>2,5</sub> do osiągnięcia do dnia 1 stycznia 2015 roku, wynosi 25 µg/m<sup>3</sup>, a do 1 stycznia 2020 roku – 20 µg/m<sup>3</sup> (Dz. U. 2012 poz. 1031). Wytyczne WMO określają dopuszczalne średnie roczne stężenie PM<sub>2,5</sub> na poziomie 10 µg/m<sup>3</sup>, a średnie dobowe – na poziomie 25 µg/m<sup>3</sup>.

Dane dotyczące pyłu PM<sub>2,5</sub> pochodzą z wcześniej wymienionych stacji monitoringu jakości powietrza w Krakowie z lat 2010–2014. Średnie godzinne wartości prędkości wiatru uzyskano z pomiarów anemometrem umieszczonym na dachu budynku WFilS AGH. Kierunek adwekcji i charakter cyrkulacji atmosferycznej (cyklonalny i antycyklonalny) zostały wyznaczone na podstawie ciśnienia atmosferycznego na poziomie morza dla czterech terminów (0.00, 6.00, 12.00 i 18.00 GMT). Dane te pochodzą z baz danych NCEP/NCAR Reanalysis 1 (<http://www.esrl.noaa.gov/>) i zostały opisane przez Kalnay i in. (1996). Do określenia kierunku adwekcji i charakteru cyrkulacji atmosferycznej wykorzystano metodę Jenkinsona i Collisona (1977).



Rys. 1. Lokalizacja punktów pomiarowych  
Location of the measuring stations

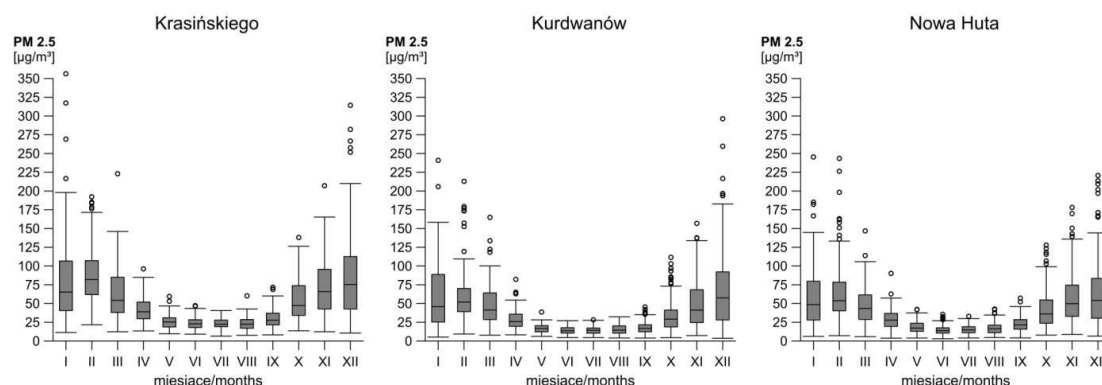
Skróty kierunków adwekcji podano w formie dużych liter, będących pierwszymi literami 8 kierunków geograficznych w języku angielskim, natomiast charakter cyrkulacji atmosferycznej w formie liter c (cyklonalna) i a (antycyklonalna). Wartości ciśnienia atmosferycznego na poziomie morza przypisane są do siatki 32 punktów. Centrum siatki usytuowane jest w punkcie o współrzędnych 50°N 20°E, a punkty gridowe rozmieszczone są z rozdzielczością przestrzenną 2,5 x 2,5° długości i szerokości geograficznej. Przykład rozmieszczenia punktów gridowych można znaleźć w opracowaniu Piotrowskiego (2009).

### Stężenie pyłu zawieszonego PM<sub>2,5</sub> na stacjach monitoringu w Krakowie

W Krakowie największe wahania dobowych stężeń pyłu PM<sub>2,5</sub> występują zimą (grudzień i styczeń) – od 3 do 145 µg/m<sup>3</sup> (Nowa Huta), od 4 do 296 µg/m<sup>3</sup> (Kurdwanów) i od 6 do 356 µg/m<sup>3</sup> (Al. Krasińskiego) (rys. 2). Najmniejsze dobowe

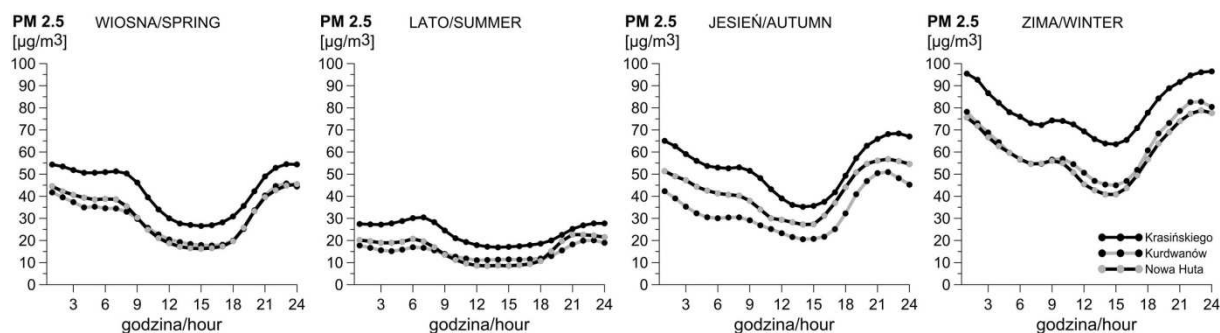
wahania zanotowano w miesiącach od maja do sierpnia (zazwyczaj poniżej 50 µg/m<sup>3</sup>). Wśród wybranych stacji monitoringu jakości powietrza, najwyższymi stężeniami i największym zróżnicowaniem w poszczególnych miesiącach wyróżnia się punkt pomiarowy przy Al. Krasińskiego, zaś najmniejszymi – punkt pomiarowy w Nowej Hucie. Mediana stężenia pyłów PM<sub>2,5</sub> znajduje się poniżej progu 25 µg/m<sup>3</sup> jedynie od czerwca do sierpnia (Nowa Huta – czerwiec i lipiec).

W dobowym rozkładzie stężenia pyłu PM<sub>2,5</sub> (rys. 3) na wszystkich analizowanych stacjach wyraźnie zaznaczają się dwa maksima: pierwsze poranne około godziny 7.00–8.00 i drugie przed godziną 22.00. Pierwsze maksimum związane jest z porannym szczytem komunikacyjnym oraz częstymi porannymi inwersjami termicznymi, zaś drugie wyraźniejsze, z nakładaniem się popołudniowego szczytu komunikacyjnego na wzmożoną emisję pyłów z palenisk domowych, zwłaszcza w porze zimowej. W godzinach



Rys. 2. Dobowa zmienność stężenia pyłu PM<sub>2,5</sub> w poszczególnych miesiącach (wartości odstające to wartości większe/mniejsze od kwartyła trzeciego/pierwszego o 1,5 rozstępu ćwiartkowego)

Daily variability of PM<sub>2,5</sub> concentration in particular months (outliers are defined as upper/lower quartile plus/minus 1.5 interquartile range)

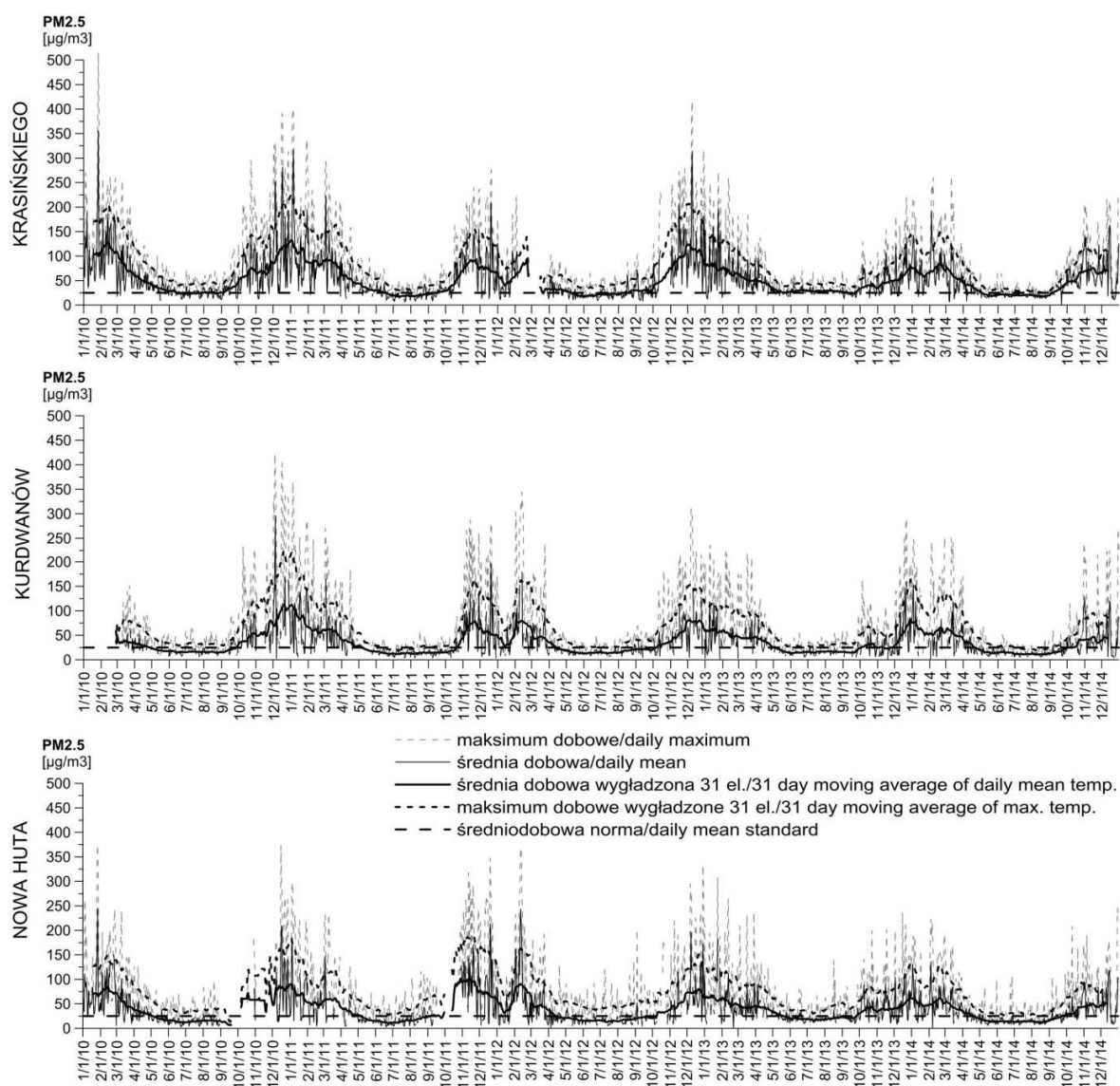


Rys. 3. Dobowy przebieg stężenia pyłu PM<sub>2,5</sub> w poszczególnych porach roku

Daily course of PM<sub>2,5</sub> concentration by season

wczesnopołudniowych zaobserwowano minimum stężenia wynikające z nieco mniejszego ruchu kołowego. W cieplej połowie roku spadek stężenia pyłu PM<sub>2,5</sub> w godzinach wczesnopołudniowych wynika również z częstszego pojawianiem się warunków do rozwoju konwekcji. Największa zmienność stężenia pyłu PM<sub>2,5</sub> pojawia się zimą – od ponad 40 do prawie 100 µg/m<sup>3</sup>. Latem, ze względu na zmniejszony ruch kołowy, mniejsze spalanie węgla oraz lepsze warunki dla rozwoju ruchów pionowych, wartości stężenia są znacznie niższe i bardziej wyrównane – od 10 do 30 µg/m<sup>3</sup>. Z porównania stężenia pyłu PM<sub>2,5</sub> w cyklu dobowym pomiędzy analizowanymi punktami pomiarowymi wynika, iż przy Al. Kra-

sińskiego było ono przeciętnie większe w porównaniu z pozostałymi punktami pomiarowymi; w okresie zimowym nawet o ok. 20 µg/m<sup>3</sup>. Z kolei dobowe przebiegi stężeń PM<sub>2,5</sub> na stacjach Kurdwanów i Nowa Huta są niemal identyczne od zimy do lata. Jesienią przez całą dobę nieco wyższe wartości stężeń odnotowano w Nowej Hucie w porównaniu z punktem pomiarowym na Kurdwanowie. Na podstawie dostępnych danych trudno jest wyjaśnić zaobserwowaną różnicę. Być może wyższe stężenia pyłu w Nowej Hucie są w pewnym stopniu związane z korzystniejszymi warunkami do częstszego utrzymywania się jesienią stabilnych stanów równowagi termodynamicznej atmosfery w tym punkcie pomiarowym.



Rys. 4. Maksymalne i średnie dobowe stężenie pyłu PM<sub>2,5</sub> w latach 2010–2014

Daily maximum and mean PM<sub>2,5</sub> concentration for 2010–2014 period

Wartości dobowe stężenia pyłu PM<sub>2,5</sub> w latach 2010–2014 zostały przedstawione na rys. 4. Analizowane stacje cechuje poziom zanieczyszczeń z podobnym przebiegiem rocznym. Wysokie stężenia pyłu PM<sub>2,5</sub> obserwowane były od listopada do marca, z maksimum na przełomie grudnia i stycznia sięgającym nawet 200–300 µg/m<sup>3</sup> w ciągu doby. Najwyższe maksymalne stężenia zimą dochodziły do 300–400 µg/m<sup>3</sup>. W przeważającej części roku (od października do kwietnia) średnie dobowe stężenia przekraczały dopuszczalne normy 25 µg/m<sup>3</sup> wytyczone przez WHO (2005). Okres ten pokrywał się z czasem trwania okresu grzewczego na obszarze Krakowa (Jędruszkiewicz 2013). Najniższe stężenia pyłu PM<sub>2,5</sub> poniżej 25 µg/m<sup>3</sup>, były notowane najczęściej od maja do końca września. Niezmiernie rzadko dobowe stężenia pyłu spadały poniżej 10 µg/m<sup>3</sup>, szczególnie na stacji Krasieńskiego. W badanym okresie średnie roczne stężenia pyłu PM<sub>2,5</sub> przekraczały roczne normy przyjęte przez WHO (10 µg/m<sup>3</sup>) i Unię Europejską (25 µg/m<sup>3</sup>) i wyniosły średnio 34 µg/m<sup>3</sup> (Kurdwanów), 36 µg/m<sup>3</sup> (Nowa Huta) i 50 µg/m<sup>3</sup> (Krasieńskiego) (WHO 2005; Air Quality Standards 2015). Epizody wysokich dobowych stężeń w okresie zimy bardzo często towarzyszyły znacznym spadkom temperatury powietrza (poniżej –10°C) i występowaniem układów wysokiego ciśnienia (np. druga połowa stycznia 2010, grudzień 2010 czy też początek lutego 2012 roku). Maksymalne stężenie pyłu PM<sub>2,5</sub> w badanym okresie zanotowano 27.01.2010 roku na stacji Krasieńskiego (515 µg/m<sup>3</sup>). Sytuację tą poprzedziła fala chłodu ze średnią dobową temperaturą powietrza przez 5 kolejnych dni poniżej –15°C oraz silnie rozbudowany układ wysokiego ciśnienia, wchodzący nad Polskę klinem od wschodu.

### **Stężenie pyłu zawieszonego PM<sub>2,5</sub> w zależności od kierunku i prędkości wiatru**

Prędkość wiatru jest czynnikiem mającym znaczący wpływ na dyspersję zanieczyszczeń pyłowych. Walczewski i Łukaszewski (1986) oraz Bokwa (2007) zwracali uwagę na fakt, iż wiatry z kierunku południowo-zachodniego mogą przynosić zanieczyszczenia spoza obszaru Krakowa, ze źródeł zlokalizowanych m.in. na obszarze Górnośląskiego Okręgu Przemysłowego. Bardziej odległe źródła były uwzględnione przez Godłowską i in. (2015). Oprócz zanieczyszczeń pyłowych docierających spoza aglomeracji krakowskiej istotnym czynnikiem, mającym wpływ na poziom stężenia pyłu PM<sub>2,5</sub>, jest również

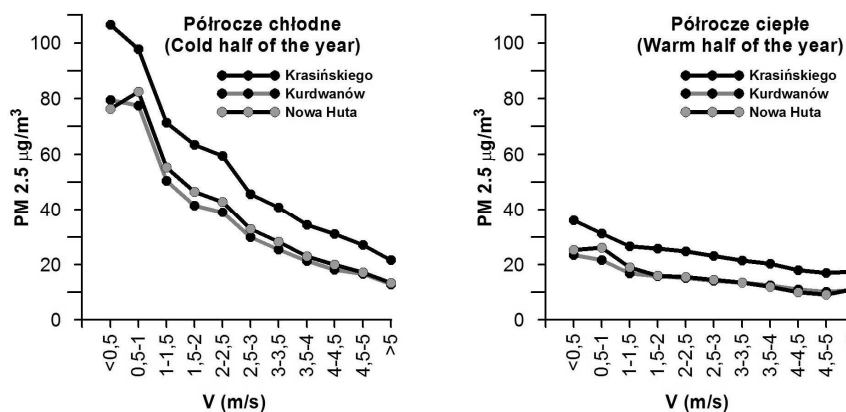
prędkość wiatru i ilość emitowanych zanieczyszczeń pyłowych na obszarze miasta. Bardzo duże warunkowe prawdopodobieństwo przekroczenia na wszystkich analizowanych stacjach stężenia pyłu PM<sub>2,5</sub> (powyżej 25 µg/m<sup>3</sup>) wystąpiło podczas adwekcji z południowego zachodu. Średnia prędkość wiatru z tego kierunku była najniższa w porównaniu z innymi kierunkami adwekcji, zarówno w półroczu chłodnym, jak i ciepłym (odpowiednio 0,98 i 1,30 m/s). Podczas adwekcji z południowego zachodu wyraźnie przeważała cyrkulacja antycyklonalna nad cyklonalną, zarówno w półroczu chłodnym, jak i ciepłym. Cyrkulacja antycyklonalna w porównaniu z cyrkulacją cyklonalną pojawiała się o 2,9 razy częściej w półroczu chłodnym, natomiast w półroczu ciepłym – 2,3 razy częściej. Południowo-zachodnia adwekcja powinna wg wymienionych wcześniej autorów, sprzyjać napływowi zanieczyszczeń spoza miasta. Z drugiej strony mała prędkość wiatru i duży udział sytuacji antycyklonalnych pogarszają warunki dyspersji zanieczyszczeń. Trudno jest jednak dokładnie określić, w jakim stopniu czynniki pozamiejskie, a w jakim lokalne są odpowiedzialne za wzrost zanieczyszczeń pyłowych powietrza na obszarze Krakowa.

Ze względu na duże stężenie pyłu PM<sub>2,5</sub> w powietrzu w półroczu chłodnym spadek stężenia pyłu wraz ze wzrostem prędkości wiatru jest większy niż w półroczu ciepłym (rys. 5). Najsilniejszy spadek stężenia pyłu PM<sub>2,5</sub> zaobserwowano przy prędkości wiatru powyżej 1–1,5 m/s. Na stacji w Nowej Hucie odnotowano niewielki spadek średniego stężenia pyłu PM<sub>2,5</sub> przy wietrze poniżej 0,5 m/s w porównaniu ze stężeniem przy prędkości wiatru rzędu 0,5–1 m/s. Trudno jest jednoznacznie określić przyczynę tego zjawiska.

Średnia prędkość wiatru w półroczu chłodnym (1,68 m/s) jest nieco większa niż w półroczu ciepłym (1,54 m/s). Średnia prędkość wiatru zimą jest nieznacznie większa niż dla całego półrocza chłodnego i wynosi 1,8 m/s, natomiast latem jest nieco niższa w porównaniu z półroczem ciepłym o niecałe 0,1 m/s. Wzrost emisji zanieczyszczeń pyłowych ze źródeł antropogenicznych w półroczu chłodnym oraz częstsze inwersje termiczne sprzyjały wzrostowi koncentracji zanieczyszczeń pyłowych w powietrzu. Efektem tego są duże różnice średniego półrocznego stężenia pyłu PM<sub>2,5</sub> pomiędzy oboma półroczami, pomimo zbliżonych średnich półrocznych prędkości wiatru. Zarówno w półroczu chłodnym, jak i ciepłym, największe średnie prędkości wiatru pojawiały się podczas cyrkulacji północno-zachodniej, zachodniej i północnej. Średnia roczna prędkość

kość wiatru z wymienionych kierunków wyniosła odpowiednio – 2,3, 1,8 i 1,7 m/s. Podczas wymienionych kierunków cyrkulacji odnotowano najmniejsze średnie roczne stężenia pyłu PM<sub>2,5</sub> w powietrzu we wszystkich analizowanych punktach pomiarowych, zarówno w półroczu chłod-

nym, jak i ciepłym. Najmniejszą średnią prędkość wiatru w półroczu ciepłym stwierdzono podczas cyrkulacji południowo-zachodniej (1,3 m/s), południowej (1,3 m/s) i południowo-wschodniej (1,4 m/s).



Rys. 5. Stężenie pyłu PM<sub>2,5</sub> w półroczu chłodnym i ciepłym w zależności od prędkości wiatru (V)  
PM<sub>2.5</sub> concentration in the cold and warm half year in relation to wind speed (V)

Udział cyrkulacji z kierunków: południowo-wschodniego, południowego, południowo-zachodniego oraz z kierunku wschodniego w półroczu ciepłym stanowił w analizowanym okresie 44,4% przypadków, natomiast w półroczu chłodnym wyraźnie przeważała adwekcja z kierunków: północno-zachodniego, zachodniego i południowo-zachodniego. Udział adwekcji z wymienionych kierunków stanowił w badanym okresie 51,4% przypadków. W półroczu chłodnym, podczas cyrkulacji z południowego zachodu, odnotowano najwyższe średnie stężenie pyłu PM<sub>2,5</sub> w ciągu całej doby, szczególnie duże w punkcie pomiarowym przy Al. Krasińskiego. W półroczu chłodnym, podczas cyrkulacji antycyklonalnej południowo-zachodniej (SWa) przy wietrze o średniej prędkości 0,9 m/s, stwierdzono tam średnie stężenie pyłu PM<sub>2,5</sub> wynoszące 104,8 µg/m<sup>3</sup>. O wiele niższe stężenie odnotowano podczas cyrkulacji SWc – 75,4 µg/m<sup>3</sup> przy średniej prędkości wiatru 1,3 m/s. Wzrost koncentracji pyłu PM<sub>2,5</sub> podczas cyrkulacji antycyklonalnej można wiązać ze zwiększoną frekwencją występowania cisz atmosferycznych w układach wyżowych. Jak wykazał Oleniacz i in. (2014) przez około 60–70% dni w roku w Krakowie występują cisie i niskie prędkości wiatru (poniżej 2 m/s), a efekt jego pozytywnego oddziaływania na jakość powietrza jest szczególnie widoczny w okresie zimowym, w szczycie sezo-

nu grzewczego. W badanym okresie średnia roczna prędkość wiatru jest przeciętnie o 1,2 razy większa podczas cyrkulacji cyklonalnej niż antycyklonalnej. Stosunek ten jest bardzo zbliżony do siebie w obu półroczach. Udział słabych wiatrów poniżej 2 m/s i cisz jest zbliżony do danych wietrznych opracowanych przez Oleniacza i in. (2014). W półroczu ciepłym wynosi on na stacji WFiIS AGH 68,2%, a w półroczu chłodnym 65,0%. Największe prawdopodobieństwo (powyżej 80%) pojawienia się słabych wiatrów i cisz w półroczu chłodnym jest związane z typami cyrkulacji atmosferycznej: SWa (91,8%), Sc (84,5%) i Sa (80,7%), natomiast w półroczu ciepłym z typami: SWa (84,6%) i Sa (81,5%). Według Palarz (2014) podczas tych typów cyrkulacji istnieje duże prawdopodobieństwo wystąpienia inwersji w warstwie 1000–925 hPa. Największe jest ono w przypadku typów SWa (85,7%) i Sa (81,1%). Adwekcja z sektora południowego może również sprzyjać intensyfikacji inwersji termicznej nad Krakowem na skutek napływu ciepłego powietrza (Niedźwiedź, Olecki 1994).

Najkorzystniejsze warunki aerosanitarne w półroczu chłodnym panowały podczas adwekcji z kierunków N, NW i W. Średnia prędkość wiatru podczas adwekcji z ww. kierunków wyniosła odpowiednio – 1,8, 2,6, 1,9 m/s, natomiast średnie półroczne stężenia pyłu, obliczone w oparciu o dane ze wszystkich trzech stacji,

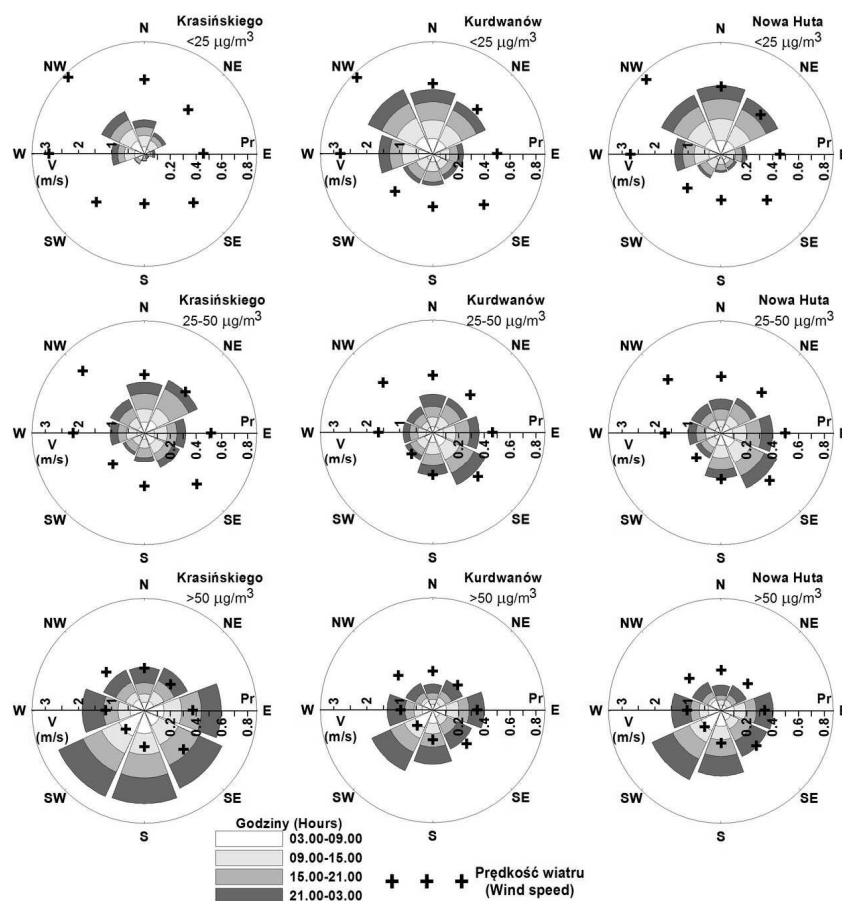


wyniosły odpowiednio – 41,2, 42,3 i 42,7  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . W półroczu chłodnym przeciętne stężenie pyłu PM<sub>2,5</sub> było na wszystkich punktach pomiarowych średnio większe o 1,2 razy podczas cyrkulacji antycyklonalnej w porównaniu z cyrkulacją cyklonalną.

W półroczu chłodnym podczas cyrkulacji antycyklonalnej średnie stężenia pyłu PM<sub>2,5</sub> na stacjach Krasieńskiego, Kurdwanów i Nowa Huta wyniosły odpowiednio – 69,4, 51,9 i 53,6  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , natomiast podczas cyrkulacji cyklonalnej adekwatnie – 60,9, 42,6 i 43,6  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . W półroczu ciepłym na wszystkich trzech stacjach stężenia pyłu również były mniejsze podczas cyrkulacji cyklonalnej w porównaniu z antycyklonalną. W półroczu tym średnie wartości stężeń pyłu wyniosły podczas cyrkulacji antycyklonalnej: 28,5, 18,9, 20,5  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , natomiast podczas cyrkulacji cyklonalnej 27,4, 16,6, 18,7  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , odpowiednio na stacjach Krasieńskiego, Kurdwanów i Nowa Huta. Uzyskane rezultaty potwierdzają

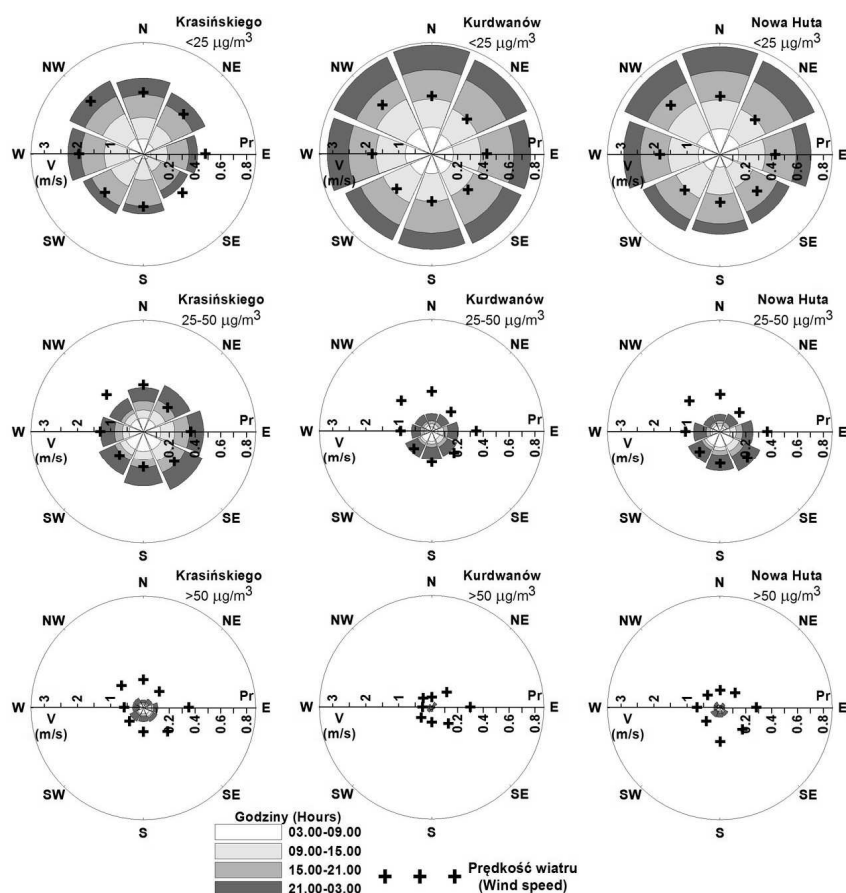
wcześniejsze wyniki analiz, iż cyrkulacja antycyklonalna sprzyja większym stężeniom pyłu w powietrzu niż cyrkulacja cyklonalna (Niedźwiedz, Olecki 1994).

Z porównania prawdopodobieństwa przekroczenia stężenia pyłu PM<sub>2,5</sub> powyżej 25  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  jest ono znacznie większe w półroczu chłodnym niż ciepłym (rys. 6, 7). W półroczu chłodnym największe prawdopodobieństwo wystąpienia stężenia PM<sub>2,5</sub> powyżej 50  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  stwierdzono podczas adwekcji z sektora południowego oraz kierunku wschodniego we wszystkich punktach pomiarowych. Największe prawdopodobieństwo tego typu zdarzeń pojawia się na stacji pomiarowej w centrum miasta przy Al. Krasieńskiego. W półroczu ciepłym prawdopodobieństwo wystąpienia tej wielkości stężenia PM<sub>2,5</sub> jest o wiele mniejsze niż w półroczu chłodnym. W przypadku adwekcji z południa jest ono mniejsze o 6,7 razy, a w przypadku adwekcji z południowego zachodu o 6,3 razy.



Rys. 6. Prawdopodobieństwo warunkowe wystąpienia określonych stężeń pyłu PM<sub>2,5</sub> w poszczególnych porach doby oraz średnia prędkość wiatru w półroczu chłodnym podczas określonych kierunków adwekcji

Conditional probability of PM<sub>2.5</sub> concentration for different times of day and wind speed in the cold half year during different directions of advection



Rys. 7. Prawdopodobieństwo warunkowe wystąpienia określonych stężeń pyłu PM<sub>2,5</sub> w poszczególnych porach doby i średnia prędkość wiatru w półroczu ciepłym podczas określonych kierunków adwekcji

Conditional probability of PM<sub>2.5</sub> concentration for different times of day in the warm half year during different directions of advection

W półroczu chłodnym w ciągu dnia największe warunkowe prawdopodobieństwo pojawienia się stężenia PM<sub>2,5</sub> przekraczającego  $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$  jest możliwe w godzinach nocnych, pomiędzy 21.00 a 03.00. Ta zależność odnosi się do wszystkich analizowanych stacji pomiarowych. W półroczu chłodnym największe prawdopodobieństwo tego typu przekroczeń odnotowano w punkcie pomiarowym przy Al. Krasińskiego (22,1%) i nieco mniejsze na stacji Nowa Huta i Kurdwanów, odpowiednio 19,9% i 18,3%. W półroczu ciepłym największe prawdopodobieństwo przekroczenia stężeń PM<sub>2,5</sub> powyżej  $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$  w tych samych okresie doby stwierdzono na stacjach Nowa Huta i Kurdwanów (odpowiednio z prawdopodobieństwem: 10,5% i 8,5%), natomiast na stacji przy Al. Krasińskiego największe prawdopodobieństwo wystąpienia stężenia powyżej  $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (15,3%) jest możliwe w godzinach 03.00–09.00.

## Wnioski

Stężenie pyłu PM<sub>2,5</sub> na obszarze o gęstej zabudowie i nasilonym ruchu samochodowym (Al. Krasińskiego) jest o wiele większe niż na stacjach pomiarowych położonych na obszarach o mniejszym udziale zabudowy miejskiej oraz w pobliżu obszarów o większym udziale zieleni i mniejszym natężeniu ruchu samochodowego. Tego typu zależność występuje w obu analizowanych półroczach.

Średnie dobowe stężenie pyłu PM<sub>2,5</sub> ulega zmianie w przebiegu rocznym. Maksimum stężenia występuje w półroczu chłodnym, natomiast minimum – w półroczu ciepłym. Różnice stężenia PM<sub>2,5</sub> pomiędzy półroczem chłodnym i ciepłym wynikają głównie ze wzrostu spalania węgla w paleniskach domowych oraz częstego pojawiania się niekorzystnych dla dyspersji zanieczyszczeń stanów równowagi termodyna-

micznej atmosfery w półroczu chłodnym oraz korzystnych warunków do rozwoju konwekcji w ciepłym półroczu. Pewne znaczenie może mieć też napływ zanieczyszczeń pyłowych spoza obszaru aglomeracji krakowskiej.

Dobowe maksimum koncentracji zanieczyszczeń powietrza pyłem PM<sub>2,5</sub>, zarówno w skali roku, jak i w poszczególnych sezonach, obserwowano najczęściej w godzinach od 21.00 do 3.00. W tym okresie doby częściej występują sytuacje słabogradientowe oraz stany równowagi termodynamicznej atmosfery hamujące ruchy wznoszące powietrza. Dodatkowym czynnikiem zwiększającym stężenie zanieczyszczeń pyłowych w powietrzu jest ich kumulacja z godzin popołudniowych wywołana wzrostem natężenia ruchu samochodowego oraz wzrostem emisji pyłów z palenisk w chłodnej połowie roku. Drugorzędne maksimum zaznaczało się w godzinach porannych podczas nasilenia ruchu samochodowego.

W półroczu ciepłym stężenie pyłu PM<sub>2,5</sub> w latach 2010–2014 było o 2,5 razy mniejsze niż w półroczu chłodnym. Najistotniejszy wpływ ma na to rozwój ruchów konwekcyjnych i mniejsza emisja ze spalania paliw w celach grzewczych i transportowych. Wskazuje na to istotny spadek koncentracji zanieczyszczeń w godzinach popołudniowych i popołudniowych.

Wpływ kierunku adwekcji na koncentrację zanieczyszczeń pyłowych według wielu opracowań wydaje się być dość istotny. Mimo porównywalnych prędkości wiatru, w chłodnym półroczu w porównaniu z półroczem ciepłym, ponadnormatywne stężenie zanieczyszczenia pyłowego PM<sub>2,5</sub> jest o wiele częściej przekraczane. Świadczy to o zwiększonej emisji pyłów w chłodnej połowie roku oraz częstszych stanach równowagi termodynamicznej niesprzyjających dyspersji zanieczyszczeń.

Kwestią dyskusyjną jest niewątpliwie ocena stopnia wpływu na koncentrację pyłu zawieszonego PM<sub>2,5</sub> na obszarze Krakowa zanieczyszczeń pyłowych docierającego do miasta spoza jego obszaru, emisji pyłów w obrębie miasta oraz czynników lokalnych determinujących stężenie pyłu w powietrzu. Ukształtowanie terenu sprzyja generalnie strefowemu napływowi mas powietrza. Adwekcja z sektora zachodniego sprzyja transportowi zanieczyszczeń znanego GOP-u. Z kolei mniejsza prędkość wiatru oraz występowanie inwersji termicznych sprzyjają wzrostowi koncentracji pyłu zawieszonego PM<sub>2,5</sub>. Z uzyskanych wyników trudno jednoznacznie ustalić, jaki czynnik bądź czynniki mają najistotniejszy

wpływ na kształtowanie stężenia pyłu PM<sub>2,5</sub> na obszarze Krakowa, gdyż często nakładają się one na siebie i bardzo trudno jest je odseparować. Oprócz prędkości wiatru i kierunku adwekcji wpływ na stężenie pyłu PM<sub>2,5</sub> ma wiele innych czynników. Aby ocenić ich wpływ na stopień zanieczyszczenia powietrza konieczna jest bardziej złożona, wieloczynnikowa analiza, przeprowadzona w oparciu o jak największą liczbę danych. Wyniki badań stężenia pyłu PM<sub>2,5</sub> w zależności od kierunku adwekcji i charakteru cyrkulacji atmosferycznej są bardzo zbliżone do wcześniej uzyskanych badań stężenia pyłu PM<sub>10</sub> w Krakowie, mimo, iż wykonywano je w oparciu o inne metody określania kierunku adwekcji.

## Literatura

- Air Quality Standards – Environment – European Commission. ec.europa.eu. Retrieved 1 February 2015.
- Bielec-Bąkowska Zuzanna, Grażyna Knozova, Mieczysław Leśniok, Dorota Matuszko, Katarzyna Piotrowicz. 2011. „High suspended dust concentrations in Brno, Sosnowiec and Krakow (the year 2009 as an example)”. *Prace Geograficzne IGiGP UJ* 126: 67-84.
- Bokwa Anita. 2007. Zanieczyszczenie powietrza. W: Dorota Matuszko (red.) *Klimat Krakowa w XX wieku*, 187-198. Kraków: Wydawnictwo Instytutu Geografii i Gospodarki Przestrzennej Uniwersytetu Jagiellońskiego.
- Bokwa Anita. 2010. Wieloletnie zmiany struktury mezo klimatu miasta na przykładzie Krakowa. Kraków: Instytut Geografii i Gospodarki Przestrzennej Uniwersytetu Jagiellońskiego.
- Bokwa Anita. 2012. Zanieczyszczenie powietrza pyłem zawieszonym PM<sub>10</sub> a sytuacje synoptyczne i warunki termiczne w Krakowie. W: Zuzanna Bielec-Bąkowska, Ewa Łupikasza, Artur Widawski (red.) *Rola cyrkulacji atmosferycznej w kształtowaniu klimatu*, 275-286. Sosnowiec: Wydział Nauk o Ziemi Uniwersytetu Śląskiego.
- Dworak T. Zbigniew, Bernard Polański, Alina Ziobroń. 2000. „Zmiany elementów meteorologicznych w aglomeracjach miejskich pod wpływem zanieczyszczeń atmosferycznych (na przykładzie Krakowa)”. *Przegląd Geofizyczny XLV* (1): 63-69.
- German Krystyna. 2007. Środowisko przyrodnicze Krakowa i jego wpływ na warunki klimatyczne. W: Dorota Matuszko (red.) *Klimat Krakowa w XX wieku*, 11-18. Kraków: Wydawnictwo Instytutu Geografii i Gospodarki Przestrzennej Uniwersytetu Jagiellońskiego.

- Godłowska Jolanta, Monika Hajto, Anna Tomaszewska. 2015. „Spatial analysis of air masses backward trajectories in order to identify distant sources of fine particulate matter emission”. *Archives of Environmental Protection* 41 (2): 28-35.
- Godłowska Jolanta, Anna Tomaszewska, Monika Hajto. 2008. Związek wysokości emisji zanieczyszczeń w Krakowie z warunkami w miejscowej warstwie granicznej określonymi na podstawie danych sodarowych. W: Kazimierz Kłysik, Joanna Wibig, Krzysztof Fortuniak (red.) *Klimat i bioklimat miast*, 455-465. Łódź: Wydawnictwo Uniwersytetu Łódzkiego.
- Gradziński Ryszard. 1974. „Budowa geologiczna terytorium Krakowa”. *Folia Geographica, Series Geographica-Physica* 8: 11-17.
- Jenkinson Arthur F., Peter Collison. 1977. An initial climatology of gales over the North Sea. Synoptic Climatology Branch Memorandum No. 62. Bracknell: Meteorological Office.
- Jędruszkiewicz Joanna. 2013. Scenariusze zmian wybranych cech klimatu Polski na lata 2021–2050 oraz 2071–2100 na podstawie regionalnych modeli klimatu. Praca doktorska.
- Kalnay Eugenia, Masao Kanamitsu, Robert Kistler, William Collins, Dennis Deaven, Lev Gandin, Mark Iredell, Suranjana Saha, Glenn White, John Woollen, Yong Zhu, Ants Leetmaa, Richard Reynolds, Muthuvel Chelliah, Wesley Ebisuzaki, Wayne Higgins, John Janowiak, Kingse C. Mo, Chester Ropelewski, Jian-Jian Wang, Roy Jenne, Joseph Dennis. 1996. „The NCEP/NCAR 40-Year Reanalysis Project”. *Bulletin of the American Meteorological Society* 77: 437-471.
- Lewińska Janina. 1984. „Struktura termiczna powietrza nad Krakowem”. *Biuletyn Instytutu Kształtowania Środowiska* 3-4: 46-52.
- Milata Stanisława, 1959, „Częstotliwość inwersji względnych temperatury powietrza w Krakowie w latach 1954, 1955 i 1957”. *Przegląd Geofizyczny* IV (1): 19-37.
- Morawska-Horawska Maria. 1978. „Struktura termiczna dolnej części troposfery i jej wpływ na zanieczyszczenie powietrza w Krakowie”. *Człowiek i Środowisko* 2/1: 61-85.
- Niedźwiedz Tadeusz, Zygmunt Olecki. 1994. „Wpływ sytuacji synoptycznych na zanieczyszczenie powietrza w Krakowie”. *Zeszyty Naukowe UJ, Prace Geograficzne* 96: 55-67.
- NOAA Earth System Research Laboratory, 21.12.2015. <http://www.esrl.noaa.gov/>
- Oleniacz Robert, Marek Bogacki, Mateusz Rzesutek, Agata Kot. 2014. Meteorologiczne determinanty jakości powietrza w Krakowie. W: Jan Konieczyński (red.) *Ochrona powietrza w teorii i praktyce, tom 2*, 163-178. Zabrze: Instytut Podstaw Inżynierii Środowiska Polskiej Akademii Nauk.
- Palarz Angelika. 2014. „Zmienność inwersji temperatury powietrza nad Krakowem w świetle warunków cyrkulacyjnych”. *Prace Geograficzne IGI GP UJ* 138: 29-43.
- Pietras Bartłomiej. 2013. „Czynniki meteorologiczne wpływające na koncentracje aerozoli w Krakowie oraz analiza cząstek aerozoli”. W: Darmowe dane i open source w badaniach środowiska. *Prace Studenckiego Koła Naukowego Geografów Uniwersytetu Pedagogicznego w Krakowie* 2: 90-100.
- Piotrowski Piotr. 2009. „Obiektywna metoda klasyfikacji cyrkulacji atmosferycznej dla Polski”. *Acta Universitatis Lodzianis, Folia Geographica Physica* 10: 1-216.
- Raport o stanie środowiska województwa małopolskiego w 2014 roku. 2015. Biblioteka Monitoringu Środowiska.
- Realizacja Programu Ochrony Powietrza w Aglomeracji Krakowskiej. 2012. Generalna Dyrekcja Ochrony Środowiska.
- Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 24 sierpnia 2012 r. w sprawie poziomów niektórych substancji w powietrzu (Dz. U. 2012 poz. 1031).
- Tomaszewska Anna M. 2010. Analiza zależności występowania wysokich stężeń PM10 od typów cyrkulacji Lityńskiego. W: Jan Konieczyński (red.) *Ochrona powietrza w teorii i praktyce, tom 2*, 375-387. Zabrze: Instytut Podstaw Inżynierii Środowiska Polskiej Akademii Nauk.
- Walczewski Jacek. 1984. „Charakterystyka warstwy granicznej atmosfery nad Krakowem w oparciu o wyniki akustycznego sondażu atmosfery”. *Materiały badawcze IMGW, seria Meteorologia* 9: 1-190.
- Walczewski Jacek. 1994. „Charakterystyka warstwy granicznej atmosfery nad miastem (na przykładzie Krakowa)”. *Materiały badawcze IMGW, seria Meteorologia* 22: 1-109.
- Walczewski Jacek, Jakub Łukaszewski. 1986. „Elementy klimatu Krakowa wpływające na jakość powietrza”. *Zeszyty Naukowe Akademii Górniczo-Hutniczej, seria Sozologia i Sozotechnika* 22: 65-79.
- Walczewski Jacek, Maria Feleksy-Bielak, Katarzyna Dębicka, Urszula Śliwińska. 2000. „Wskaźniki meteorologicznych warunków dyspersji zanieczyszczeń powietrza i ich zmienność w Krakowie w latach 1990-1999”. *Wiadomości IMGW XXIII* (3): 13-27.
- WHO. 2005. WHO Air quality guidelines for particulate matter, ozone, nitrogen dioxide and sulfur dioxide. Summary of risk assessment.

## Summary

Airborne particulate matter has far-reaching consequences for the environment and human health including premature mortality, hospital admissions, allergic reactions, lung dysfunction and cardiovascular diseases. Attention has been paid to particulate matter of less than 2.5  $\mu\text{m}$  in diameter (PM<sub>2.5</sub>) as a metric more closely associated with adverse health effects than PM<sub>10</sub>. Since Kraków is one of the most polluted cities in Poland, the main goal of this paper was to study the relation between meteorological parameters such as wind speed and advection direction and the concentration of PM<sub>2.5</sub> in a different time scale (daily, seasonal, annual variability).

Hourly PM<sub>2.5</sub> concentration data from three air quality monitoring sites in Kraków (Kraśińskiego, Nowa Huta, Kurdwanów) were used. The anemometric data was obtained from the Vaisala automatic weather station mounted on the roof of the building of the Faculty of Physics and Applied Computer Science, University of Science and Technology.

The PM<sub>2.5</sub> concentration in all of monitoring sites is characterized by a similar annual course. In the period of 2010–2014 the highest daily concentration of PM<sub>2.5</sub> was observed in winter (December and January) 145  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  (Nowa Huta), 296  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  (Kurdwanów) and 356  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  (Kraśińskiego), while the lowest concentration from May to August (usually below 50  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ). Generally, the daily PM<sub>2.5</sub> concentration standards of 25  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  (WHO 2005) were exceeded from October to April. Furthermore, also the annual standards of 10  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  (WHO) and 25  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  (European Union) were exceeded

(WHO 2005; Air Quality Standards 2015). The annual mean of PM<sub>2.5</sub> concentrations was 34  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  (Kurdwanów), 36  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  (Nowa Huta) i 50  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  (Kraśińskiego). The highest concentrations of particulate matter were associated with a considerable temperature decrease (below  $-10^\circ\text{C}$ ) and the occurrence of a high pressure system.

High annual variability of the PM<sub>2.5</sub> concentrations is mainly due to an increase in fossil fuel combustion and frequent occurrence of stable boundary layer (which is unfavorable for pollutant dispersion) in the cold half year and favorable conditions for convection development in the warm half year. The daily maximum of PM<sub>2.5</sub> concentration was observed from 9 PM to 3 AM and the second one around 9 AM. In the cold half year the concentration was 2.5 times higher than in the warm half year, primarily due the total effect of both heating (emission of fossil fuel combustion) and transport. One of the key factors for PM<sub>2.5</sub> concentrations is topography which, in case of Kraków, favors western advection. Wind speed during the southwestern circulation was 1.5 times lower on average in comparison to western inflow. That has a significant impact on the reduction of PM<sub>2.5</sub> concentration during the western inflow in the cold half year.

The concentration of PM<sub>2.5</sub> in a densely built-up area of the city center (Kraśińskiego) is much greater than in the other two monitoring sites surrounded by green areas and less traffic. This type of relationship was found during all year, but the most pronounced differences occurred during winter time (e.g. approximately 20  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  for the mean hourly concentration).