

Karolina ĆWIEK, Grzegorz MAJEWSKI

Zakład Meteorologii i Klimatologii, Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie
Division of Meteorology and Climatology, Warsaw University of Life Sciences – SGGW

Wpływ elementów meteorologicznych na kształtowanie się stężeń zanieczyszczeń powietrza na przykładzie Krakowa The influence of meteorological factors on the development of air pollutants concentration – Cracow case study

Słowa kluczowe: zanieczyszczenie powietrza, pył zawieszony PM₁₀, elementy meteorologiczne, epizody ponadnormatywnych stężeń zanieczyszczeń

Key words: air pollution, PM₁₀, meteorological elements, episodes of pollutants concentration exceedance

Wprowadzenie

Współczesne zmiany globalizacyjno-cywilizacyjne prowadzą do intensyfikacji zabudowy i rozbudowy terenów miejskich. Gwałtowne rozprzestrzenianie się miast, zwiększenie liczby ludności miejskiej i stopnia zwarcia zabudowy od dłuższego czasu jest kluczowym problemem wielu państw. Pociąga to za sobą zmiany bioklimatyczne i problemy przyrodnicze, zdrowotnościowe. Wskutek nieprzemyślanej działalności człowieka bądź jego zubożenia na kwestie środowiskowe do atmosfery trafia wiele szkodliwych substancji mających

kluczowy wpływ na funkcjonowanie organizmu. Zwiększenie zasięgu i częstotliwości występowania chorób cywilizacyjnych wymaga dokładnego przemyślenia kwestii związanych z funkcjonowaniem miast, a także rozwoju badań w kierunku lepszego rozpoznania głównych czynników negatywnie wpływających na sytuację aerosanitarną miast oraz wprowadzenia skuteczniejszych działań zaradczo-naprawczych. Do grona miast, których stan atmosfery znacznie się pogorszył w ostatnich latach, szczególnie pod względem zawartości pyłu, niewątpliwie należy Kraków.

Poziom zanieczyszczenia atmosfery pyłami w dużej mierze zależy od warunków meteorologicznych, przede wszystkim kierunku i prędkości wiatru, wilgotności względnej powietrza, natężenia promieniowania słonecznego (Gioda i in., 2013). Duże prędkości wiatru sprzyjają rozrzedzeniu zanieczyszczenia, a znaczna wilgotność powietrza

umożliwia agregację cząstek pyłu, przez co szybciej on opada. Zasadniczy wpływ mają także tzw. termiczne warstwy hamujące, ciśnienie atmosferyczne i opady atmosferyczne (Majewski, Kleniewska i Brandyk, 2009). Wpływ poszczególnych elementów meteorologicznych na jakość atmosfery jest procesem złożonym, przez co trudnym do zbadania w warunkach rzeczywistych. Jednocześnie o istocie tego zagadnienia decyduje także fakt, iż elementy meteorologiczne szczególnego znaczenia nabierają w warunkach epizodów ponadnormatywnych stężeń zanieczyszczeń, kiedy to potęgują efekt smogowy bądź sprzyjają jego minimalizacji. Stanowi to popularny temat badawczy, w Polsce zajmowali się tym m.in.: Godłowska (2004), Rozbicka (2007), Czarnecka i Kalbarczyk (2008), Czarnecka i Nidzgorska-Lencewicz (2008), Majewski i inni (2009), Juda-Rezler, Rezler i Oudinet (2011).

Pyły jako nośniki wielu niebezpiecznych substancji wyrządzają w środowisku dużo szkód (Badyda i in., 2013, Rogula-Kozłowska, Rogula-Kopiec i Majewski, 2014). Oddziałują zarówno na elementy biotyczne, tj. rośliny, zwierzęta, człowiek, jak i abiotyczne, np. poprzez wpływ na jakość materiałów budowlanych. Wpływ zanieczyszczeń w zależności od czasu i poziomu narażenia może mieć ostry, chroniczny i utajony charakter (Kozłowska-Szczęsna, Krawczyk i Kuchcik, 2004).

W pracy zbadano związek między elementami meteorologicznymi a stężeniem wybranych zanieczyszczeń powietrza. Kluczowym elementem pracy było również określenie częstości występowania epizodów ponadnormatywnych stężeń pyłu PM₁₀.

Materiał i metoda badań własnych

Podstawę opracowania stanowiły dane meteorologiczne w postaci średnich dobowych wartości temperatury powietrza (T), ciśnienia atmosferycznego (C), wilgotności względnej powietrza (f), widzialności poziomej (W) oraz prędkości wiatru (V). Dane imisyjne stanowiły średnie dobowe wartości stężeń wybranych zanieczyszczeń powietrza: dwutlenku siarki (SO₂), tlenku azotu (NO), tlenków azotu (NO_x), tlenku węgla (CO), pyłów PM₁₀ i PM_{2,5} oraz średnie godzinowe wartości stężeń dla dwutlenku azotu (NO₂), dwutlenku siarki (SO₂) i tlenku węgla (CO). Dane udostępnił Wojewódzki Inspektorat Ochrony Środowiska w Krakowie. Stacje, będące źródłem danych meteorologicznych, w większości są usytuowane w obrębie Krakowa. Należą do nich stacje badawcze Kraków Krowodrza, Kraków Kurdwanów, Kraków Aleja Krasińskiego oraz Kraków Nowa Huta. Dane pochodzą z okresu 2006–2012, z miesięcy zimowych (X–III).

W pracy analizowano częstość przekraczania dopuszczalnych norm jakości powietrza dla wartości godzinowych (D₁) i dobowych (D₂₄) w myśl zapisów rozporządzenia Ministra Środowiska z 24 sierpnia 2012 roku w sprawie poziomów niektórych substancji w powietrzu (Dz.U. 2012, poz. 1031). W przypadku PM₁₀ dozwolona częstość przekraczania odnosi się do poziomu dopuszczalnego dobowego (50 µg·m⁻³) i wynosi 35 dni w roku. Poza poziomami dopuszczalnymi sprawdzono także czy przekroczone są alarmowe poziomy substancji w powietrzu dla 1 h, dla NO₂ i SO₂, a także dla 24 h, dla PM₁₀. Alarmowe

poziomy substancji w powietrzu wynoszą: NO_2 – $400 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, SO_2 – $500 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, z zastrzeżeniem, że wartość występuje przez trzy kolejne godziny w punktach pomiarowych reprezentujących jakość powietrza na obszarze o powierzchni co najmniej 100 km^2 albo na obszarze strefy zależnie od tego, który z tych obszarów jest mniejszy, zaś dla PM_{10} – $300 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$.

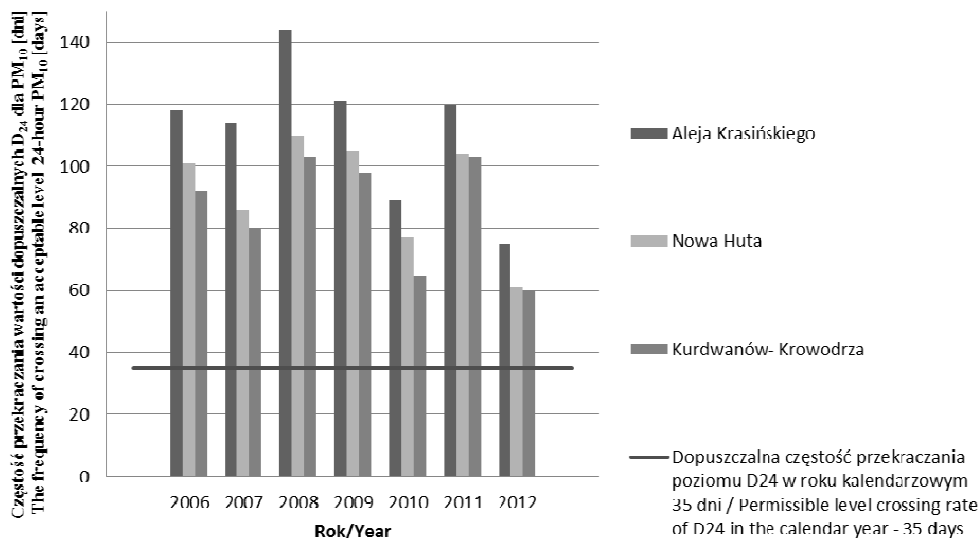
W celu zbadania związku między stężeniem zanieczyszczeń a elementami meteorologicznymi zastosowano analizę regresji wielokrotnej krokowej. Zastosowana analiza regresji wielokrotnej krokowej polega na wprowadzaniu w kolejnych etapach obliczeń zmiennych niezależnych aż do uzyskania najlepszego równania. Każda zmienna niezależna, której udział jest nieistotny, jest usuwana z równania (Draper i Smith, 1973). Jako zmienne niezależne przyjęto średnie dobowe wartości elementów meteorologicznych, a jako zmienną zależną przyjęto średnią dobową wartości stężenia zanieczyszczenia. Ocenę wpływu podanych zmiennych przeprowadzono z wykorzystaniem współczynnika determinacji R^2 . Przeprowadzona analiza regresji dotyczy całego okresu badawczego, a nie tylko wybranych epizodów, gdyż bardzo mały udział mają dni, w których stężenia nie przekraczają norm dobowych. Analizy dokonano w programie STATGRAPHICS Plus 5.0.

Dokonano także analizy stanu aerosanitarne powietrza w Krakowie poprzez analizę epizodów ponadnormatywnych stężeń zanieczyszczeń powietrza pyłem PM_{10} . Za epizod ponadnormatywnego stężenia zanieczyszczenia przyjmowano okres, w którym na każdej ze stacji w sposób ciągły występowały

dobowe stężenia pyłu PM_{10} przekraczające $50 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. Wyodrębniono epizody trwające minimum 3, 5, 10 i powyżej 15 dni. Dla jednego epizodu, na podstawie komentarzy synoptycznych publikowanych przez Interdyscyplinarne Centrum Modelowania Matematycznego i Numerycznego ICM Uniwersytetu Warszawskiego w ramach numerycznej prognozy pogody, dokonano przeglądu panujących warunków meteorologicznych, które towarzyszyły kształtowaniu się sytuacji aerosanitarnej miasta.

Wyniki

Ze względu na kluczowe znaczenie pyłu PM_{10} dla jakości powietrza w Krakowie w opracowaniu skupiono się przede wszystkim na omówieniu tego zanieczyszczenia. W analizowanym okresie badawczym zgromadzono 937 średnich dobowych stężeń PM_{10} w powietrzu. Zgodnie z obowiązującym prawem dopuszczalna dobową wartość stężenia PM_{10} ($D_{24} = 50 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) w ciągu roku może być przekraczana nie więcej niż 35 razy. Analiza dostępnych danych pod kątem dopuszczalnych poziomów danego zanieczyszczenia (przyjętych zgodnie z rozporządzeniem ze względu na ochronę zdrowia ludzi) wykazała, że powyższe wymagania nie były spełniane w Krakowie. Najwięcej przypadków przekroczeń D_{24} w sezonie zimowym 2006–2012 wystąpiło na stacji Aleja Krasińskiego, na 937 dni aż 781 stwarzało potencjalne zagrożenie dla zdrowia człowieka (rys. 1). W Nowej Hucie odnotowano 644 przypadki przekroczeń, a w Krowdrzy/Kurdwanowie 601 przypadków przekro-



RYSUNEK 1. Częstość przekraczania wartości dopuszczalnych D_{24} w ciągu roku dla PM_{10} w Aglomeracji Krakowskiej dla miesięcy zimowych (X–III) w latach 2006–2012

FIGURE 1. The annual frequency of exceeding PM_{10} limit value D_{24} in Cracow Agglomeration for the winter months (X–III) in 2006–2012

czeń. Najmniej przypadków niedotrzymania poziomów dopuszczalnych odnotowano w latach 2012 i 2010, a najgorzej pod tym względem wyglądała sytuacja w latach 2008, 2009 i 2011 (rys. 1).

Na Alei Krasińskiego dopuszczalna częstość przekroczenia poziomu D_{24} dla PM_{10} w roku kalendarzowym najbardziej była niedotrzymywana w 2008 roku, najmniej w 2012 roku. Odnotowano wtedy odpowiednio 83 i 40 dni z przekroczeniem norm dobowych ponad dopuszczalną ilość dni dla roku. W Nowej Hucie zaobserwowano od 75 (w 2008 r.) do 26 dni (w 2012 r.), a w Krowodrzy/Kurdwanowie od 68 (w latach 2008 i 2011) do 25 dni (w 2012 r.) z przekroczeniem poziomu D_{24} ponad dopuszczalne 35 dni (rys. 1). Jako główny powód niedotrzymania wartości normatywnych w stosunku do pyłu zawieszzonego PM_{10} można uznać emisję

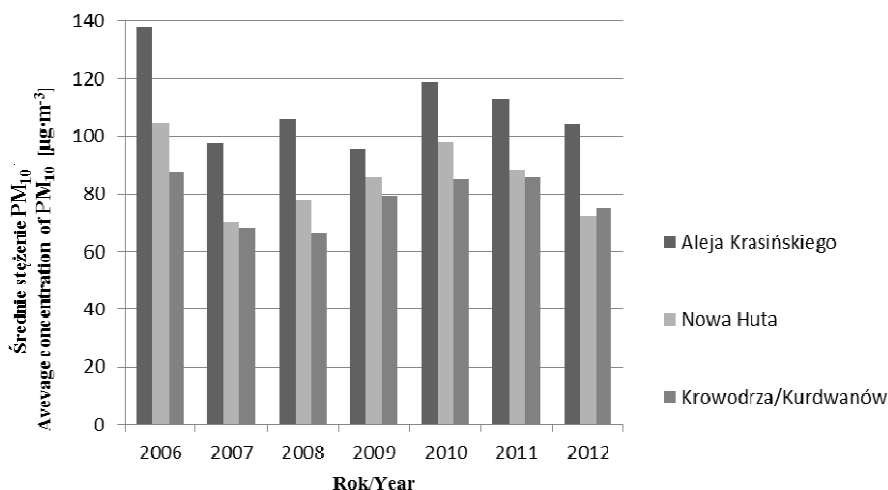
z indywidualnych instalacji grzewczych pochodzącą ze spalania węgla czy odpadów, co jest zjawiskiem powszechnym zarówno w Krakowie, jak i wielu innych miastach Polski (Bieniek i in., 2013). Podobna sytuacja występuje w Stambule, gdzie jedną z głównych przyczyn znacznych przekroczeń jest także ogrzewanie mieszkań indywidualnych niskiej jakości węglem. Z tego powodu stężenie PM_{10} zimą jest o 30% wyższe niż w miesiącach letnich (Unal i in., 2011). Przez to, że budynki indywidualne i zamieszkania zbiorowego są pozbawione wysokich kominów, zanieczyszczenia są emitowane na niewielkich wysokościach i zamiast rozrzedzać się w atmosferze powodują lokalne wzrosty stężeń zanieczyszczenia w powietrzu. Oprócz emisji niskiej z pewnością na kumulację zanieczyszczeń wpływ mają naturalne uwarunkowania geograficzne, w tym położenie

i warunki meteorologiczne uniemożliwiający wentylację miasta, co potwierdzają wyniki Diagnozy stanu środowiska miasta Krakowa (Rackiewicz, 2012).

Rysunek 2 przedstawia jak kształtowały się średnie stężenia pyłu zawieszonego PM₁₀ (uśrednione dla analizowanej części roku). Na Alei Krasińskiego średnie stężenie PM₁₀ wahało się od 137,8 (w 2006 r.) do 95,6 μg·m⁻³ (w 2009 r.), w Nowej Hucie w zakresie od 104,7 (w 2006 r.) do 70 μg·m⁻³ (w 2007 r.), w Krowodrzy-Kurdwanowie od 87,5 (w 2006 r.) do 66,7 μg·m⁻³ (w 2008 r.).

Z uzyskanych danych pomiarowych o stężeniu PM₁₀ wynika, że na Alei Krasińskiego w danym okresie badawczym jedynie 16,6% stężeń nie przekraczało wartości dobowego stężenia dopuszczalnego (D₂₄ = 50 μg·m⁻³), w Nowej Hucie 31,3%, w Krowodrzy/Kurdwanowie 35,9% (tab. 1). W pozostałych dniach średnie dobowe stężenia PM₁₀ w powietrzu przewyższały poziom dopusz-

czalny, przy czym najwięcej odnotowanych pomiarów zawierało się w zakresie 201–300% poziomu dopuszczalnego. Na analizowanych stacjach udział dni z takimi pomiarami wynosił: Aleja Krasińskiego 27,8%, Nowa Huta 20,1%, Krowodrza/Kurdwanów 18%. Niepokojący jest fakt, że odnotowano przekroczenia norm sięgające nawet 600% D₂₄ dla PM₁₀. Najwięcej takich przypadków zaobserwowano na Alei Krasińskiego: 1,7% wszystkich dni, mniej w Nowej Hucie (0,9% dni) i Krowodrzy/Kurdwanowie (0,5% dni) – tabela 1. Znaczne przekroczenia dobowych wartości stężeń dopuszczalnych PM₁₀ w powietrzu zaobserwowali także Unal i inni (2011) dla wcześniej wspomnianego Stambułu. W porównaniu do Krakowa mniejsza była jednak częstość przekraczania stężeń dopuszczalnych w tym mieście. W pięcioletnim okresie badawczym jakość powietrza w Stambule pod względem danego zanieczyszczenia kształ-



RYSUNEK 2. Średnie stężenia pyłu zawieszonego PM₁₀ w Aglomeracji Krakowskiej dla miesięcy zimowych (X–III) w latach 2006–2012

FIGURE 2. Average concentrations of PM₁₀ in the Agglomeration of Cracow for the winter months (X–III) in 2006–2012

TABELA 1. Procentowy udział dobowych stężeń PM_{10} w określonych przedziałach wartości dopuszczalnych D_{24} dla miesięcy zimowych (X–III) w latach 2006–2012

TABLE 1. Percentage of daily PM_{10} concentrations within certain limits D_{24} for the winter months (X–III) in 2006–2012

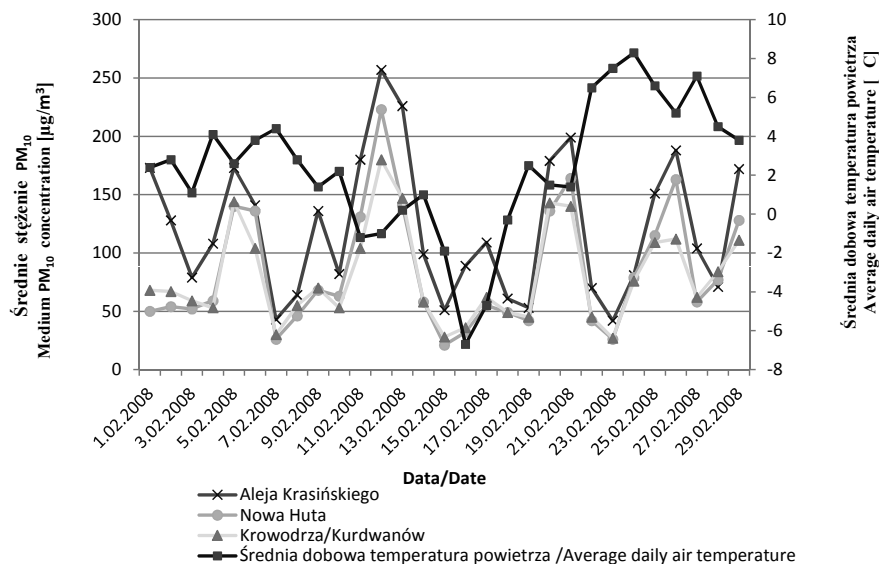
Procentowy udział dopuszczalnego poziomu Percent of acceptable level [%]	Aleja Krasińskiego	Nowa Huta	Krowodrza/Kurdwanów
≤100	16,6	31,3	35,9
101–200	33,7	37,1	38,4
201–300	27,8	20,1	18
301–400	14	7,8	4,5
401–500	5,0	2,1	1,4
501–600	1,2	0,7	1,3
>600	1,7	0,9	0,5

towała się następująco: w 2005 roku odnotowano 41,6% dni z niedotrzymaniem norm D_{24} , 48,5% w 2006 roku, 78,3% w 2007 roku, 52,5% w 2008 roku oraz 41% w 2009 roku, podczas gdy dozwolona liczba przekroczeń wynosi 35 dni (9,6%) w roku. Świadczy to o znaczącym wpływie ciepłownictwa indywidualnego również na obszarach o zupełnie innych uwarunkowaniach geograficznych. Tak znaczne przekroczenia norm zarówno w miastach polskich, jak i na świecie niewątpliwie mają ogromny wpływ nie tylko na jakość życia, ale i jego długość, co potwierdzają badania McGlade (2013), które dowiodły, że obecny poziom zanieczyszczenia powietrza w Europie przyczynia się do skrócenia życia o 8,6 miesiąca. Szacuje się, że w Europie zły stan jakości powietrza w każdym roku jest przyczyną zgonów ok. 300 000 osób (Garścia, 2009).

Występowanie przekroczeń dopuszczalnych stężeń PM_{10} w powietrzu w Krakowie było charakterystyczne dla chłodniejszej części roku, tożsamej z okresem grzewczym. Spadek tempe-

ratury powietrza, typowy dla okresu zimowego, powodował zwiększenie intensywności spalania paliw, a jednocześnie wzrost stężenia PM_{10} w powietrzu, co przedstawiono na rysunku 3 dla wybranego miesiąca (luty 2008). Widoczna jest na nim prosta zależność między notowaną wartością temperatury powietrza a poziomem PM_{10} w powietrzu. Obserwowanym pikom wzrostu temperatury powietrza odpowiadały spadki stężenia PM_{10} w powietrzu (rys. 3). Może to świadczyć o spadku zużycia m.in. paliw stałych czy innych surowców grzewczych do opalania gospodarstw domowych i zakładów wraz z ociepleniem. Szczególnie jest to widoczne w drugiej połowie lutego. W przypadku spadku temperatury powietrza, tj. 13.02.2008 roku, obserwowano pogorszenie jakości powietrza, co mogło być związane z nasileniem intensywności spalania paliw stałych, odpadów komunalnych i innych w indywidualnych instalacjach grzewczych.

Przekroczenia alarmowych poziomów substancji w powietrzu dominowa-



RYSUNEK 3. Zmienność dobowego stężenia PM₁₀ w zależności od temperatury powietrza w lutym 2008 roku

FIGURE 3. Variability of daily PM₁₀ concentration depending on air temperature in February 2008

ły na Alei Krasińskiego i dotyczyły wyłącznie PM₁₀ (tab. 2). Oprócz warunków meteorologicznych ogromne znaczenie miała w tym przypadku lokalizacja stacji. Stacja położona jest na obszarze zieleni między pasami drogi o nasilonym ruchu

oraz w otoczeniu wysokich budynków (5–6 kondygnacji), co sprzyja tworzeniu się niekorzystnych warunków dla wymiany powietrza, typowych dla kanyonów ulicznych. Prędkości wiatru są niewielkie lub panują warunki bezwietrzne,

TABELA 2. Liczba przypadków przekroczenia alarmowego poziomu pyłu PM₁₀ w powietrzu dla miesięcy zimowych (X–III) w latach 2006–2012

TABLE 2. Number of cases exceeded the alarm level of PM₁₀ in the air for the winter months (X–III) in 2006–2012

Okres badań Research period	Przypadki przekroczenia alarmowego poziomu PM ₁₀ /Cases of exceeded alarm level of PM ₁₀		
	Aleja Krasińskiego	Nowa Huta	Kordwanów/Krowodrza
2006	10	7	1
2007	1	0	0
2008	1	1	0
2009	0	0	0
2010	0	0	2
2011	2	0	1
2012	2	0	1
2006–2012	16	8	5

co sprzyja stagnacji powietrza i zwiększonym poziomom zanieczyszczeń.

W tabeli 3 przedstawiono równania regresji opisujące związek między średnimi dobowymi wartościami zanieczyszczeń (SO_2 , NO , NO_2 , NO_x , CO , PM_{10} i $\text{PM}_{2,5}$) a elementami meteorologicznymi dla wybranej stacji. Do otrzymanych równań regresji weszło od czterech do pięciu zmiennych niezależnych. Największy wpływ na wartość stężenia dwutlenku siarki oraz pyłu spośród elementów meteorologicznych ma wilgotność względna powietrza oraz temperatura powietrza. W przypadku tlenków azotu oraz tlenku węgla największy wpływ na stężenie tych gazów w powietrzu ma ciśnienie atmosferyczne oraz wilgotność względna powietrza. We wszystkich równaniach regresji na trzeciej lub czwartej pozycji znalazła się również prędkość wiatru. Zauważono również istotny wpływ widzialności poziomej na stężenia zanieczyszczeń. Wzrost widzialności poziomej jest związany prawdopodobnie z niższym stężeniem zanieczyszczeń w powietrzu atmosferycznym. Analogiczną sytuację przedstawiają wyniki badań chińskich naukowców realizowane na terenie Chin. Powszechnie wiadomo bowiem, że widzialność jest odwrotnie proporcjonalna do współczynnika ekstynkcji cząstek w atmosferze, co z kolei zależy głównie od składu chemicznego, także stężenia cząstek stałych i rozkładu ich wielkości (Zhao i in., 2010). Pojawianie się wielu zmiennych niezależnych w danych równaniach regresji świadczy o wpływie kilku elementów meteorologicznych na poziomy zanieczyszczeń. Jako miarę wpływu zmiennych na kształtowanie się jakości powietrza w Krakowie przyjęto współczynnik determina-

cji R^2 . W przypadku Alei Krasińskiego współczynnik determinacji R^2 wahał się od 44,8 do 62,6%. Spośród analizowanych zanieczyszczeń największy wpływ elementów meteorologicznych na ich stężenie w powietrzu atmosferycznym uzyskano dla $\text{PM}_{2,5}$, a najmniejszy dla NO . Wszystkie uzyskane równania regresji są wysoce istotne statystycznie (tab. 3). Ocena wpływu elementów meteorologicznych na kształtowanie się sytuacji aerosanitarnej za pomocą funkcji regresji jest często spotykana w polskiej literaturze. W zależności od lokalizacji obszaru badawczego na poziom zanieczyszczenia atmosfery mogą oddziaływać różne elementy meteorologiczne. Badania na ten temat prowadzone były przez wielu naukowców, m.in: Kalbarczyka (2008), Czarnecką i Kalbarczyka (2008), Majewskiego i innych (2011).

W celu dokładniejszej analizy stanu aerosanitarne powietrza w Krakowie dokonano również weryfikacji długości i częstości występowania epizodów ponadnormatywnych stężeń zanieczyszczeń powietrza pyłem PM_{10} . W Krakowie w okresie badawczym 2006–2012 odnotowano wystąpienie 81 epizodów ponadnormatywnych stężeń zanieczyszczeń powietrza pyłem PM_{10} . Najwięcej epizodów odnotowano w 2008 roku (14 przypadków) oraz w latach 2006, 2010 i 2011 (13 przypadków). Najmniej natomiast w 2012 roku, jedynie 7 przypadków, wśród nich 57,1% epizodów trwających 3–4 dni (tab. 4). Najdłuższe zaobserwowane epizody ponadnormatywnych stężeń zanieczyszczeń trwały przez 23 dni (w styczniu 2009 r.), 19 dni (w lutym 2011 r. i grudniu 2012 r.). Najwięcej odnotowano epizodów trwających 5–9 dni (49,4% w całym

TABELA 3. Równania opisujące związek między stężeniem wybranych zanieczyszczeń powietrza a elementami meteorologicznymi na stacji pomiarowej Kraków Aleja Krasińskiego dla miesięcy zimowych (X–III) w latach 2006–2012

TABLE 3. The equations describing the relationship between the concentration of selected air pollutants, and meteorological elements at the measuring station Cracow Krasiński's Avenue for the winter months (X–III) in 2006–2012

Parametr Parameter	Równanie regresji The regression equation	R ² [%]	P-value
SO ₂	$87,271 - 0,588f - 1,368T - 0,240V - 2,165W$	47,4	0,00
NO	$1465,56 - 1,208C - 0,454f + 1,405T - 4,631V - 5,718W$	44,8	0,00
NO ₂	$452,91 - 0,285C - 0,953f - 0,375T - 1,392V - 1,287W$	49,0	0,00
NO _x	$2688,79 - 2,128C - 1,642f + 1,7697T - 10,009V - 9,999W$	46,5	0,00
CO	$19,793 - 0,015C - 0,018f - 0,013T - 0,052V - 0,119W$	51,8	0,00
PM ₁₀	$484,087 - 2,878f - 2,086T - 3,009V - 13,384W$	58,4	0,00
PM _{2,5}	$323,297 - 1,676f - 1,746T - 2,040V - 10,694W$	62,6	0,00

Objaśnienia: C – ciśnienie atmosferyczne [hPa], T – temperatura powietrza [°C], f – wilgotność względna powietrza [%], W – widzialność pozioma [km], V – prędkość wiatru [km·h⁻¹].

Explanations: C – atmospheric pressure [hPa], T – air temperature [°C], f – relative air humidity [%], W – horizontal visibility [km], V – wind flow velocity [km·h⁻¹].

okresie badawczym) oraz 3–4 dni (39,5% w całym okresie badawczym) – tabela 4. Epizody trwające przynajmniej 15 dni stanowiły 3,7% wszystkich odnotowanych przypadków w analizowanych latach, przy czym najwięcej przypadków ich wystąpienia odnotowano w 2012 roku (14,3% przypadków w danym roku). Wystąpiły one także w 2009 roku (9,1% przypadków w danym roku) oraz

w 2011 roku (7,7%). Wraz z wydłużeniem czasu trwania epizodów obserwowano także spadek wartości temperatury powietrza (uśredniano ją dla epizodów w poszczególnych przedziałach czasowych), co potwierdza, że temperatura powietrza miała znaczący wpływ na kształtowanie się sytuacji aerosanitarnej w mieście (tab. 4).

TABELA 4. Procentowy udział epizodów ponadnormatywnego stężenia zanieczyszczenia powietrza pyłem PM₁₀ w określonych przedziałach czasowych dla miesięcy zimowych (X–III) w latach 2006–2012

TABLE 4. Frequency of episodes of exceeded concentrations of pollutants of PM₁₀ in given intervals for the winter months (X–III) in 2006–2012

Czas trwania epizodu [dni] Duration of the episode [days]	Średnia temperatura powietrza Average daily air temperature [°C]								
		2006–2012	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012
3–4	1,5	39,5	30,8	30,0	35,7	45,5	53,8	30,8	57,1
5–9	1,0	49,4	61,5	60,0	57,1	45,5	46,2	46,2	14,3
10–14	-3,8	7,4	7,7	10,0	7,1	0,0	0,0	15,4	14,3
≥15	-4,3	3,7	0,0	0,0	0,0	9,1	0,0	7,7	14,3

Dla jednego z analizowanych epizodów, na podstawie komentarzy synoptycznych publikowanych przez Interdyscyplinarne Centrum Modelowania Matematycznego i Numerycznego ICM Uniwersytetu Warszawskiego w ramach numerycznej prognozy pogody, dokonano przeglądu panujących warunków meteorologicznych, które wpływały na kształtowanie się sytuacji aerosanitarnej miasta. Wybrany epizod trwał 6 dni (26–31.01.2006 r.). W tym okresie odnotowano maksymalną dobową wartość stężenia PM_{10} w powietrzu w obrębie stacji pomiarowej Kraków Nowa Huta, przekraczającą dopuszczalne normy o $457 \mu g \cdot m^{-3}$. Z komentarzy synoptycznych wynikało, że sytuacja meteorologiczna panująca w tym czasie należała do szczególnie niekorzystnych pod względem rozprzestrzeniania się zanieczyszczeń powietrza. Od 26.01.2006 roku nad Polską zalegała warstwa gęstego, wymrożonego powietrza. Temperatura powietrza wynosiła na początku tego okresu $-13,7^{\circ}C$ oraz $-13,9^{\circ}C$, co przyczyniło się emisji komunalnej zwiększającej zawartość PM_{10} w powietrzu. Nad danym obszarem zalegał wyż środkowoeuropejski. Odnotowany w tym czasie brak pionowego mieszania przyziemnej warstwy atmosfery w połączeniu z utrzymującą się inwersją temperatury dochodzącą na początku, przed rozpoczęciem mieszania w kolejnych dniach, do samej ziemi, w warunkach topograficznych Krakowa niewątpliwie przyczyniał się do kumulacji zanieczyszczeń w powietrzu. Od 29.01.2006 roku Małopolska została objęta słabym mieszaniem, zaobserwowano niewielkie pionowe mieszanie zanieczyszczonego powietrza, co skutkowało zmniejszeniem obserwowanych stężeń

zanieczyszczenia powietrza PM_{10} . Mimo korzystniejszych warunków wietrznych do końca czasu trwania danego epizodu występowała jednak inwersja temperatury powietrza, a w ostatnich dniach wytworzyły się podinwersyjne chmury warstwowe oraz uciążliwe mgły, przez co stężenia PM_{10} w powietrzu nadal przekraczały dopuszczalne wartości. Podobnych wyników dostarczyły wyniki badań Choi i innych (2008 r.) prowadzone w Chinach czy Unal i innych (2011 r.) w Stambule, w których dokonano porównania poziomów stężenia PM_{10} w zależności od obserwowanych warunków meteorologicznych. Wynika z nich, że najwyższe stężenia pyłów są notowane w warunkach m.in. wysokiego ciśnienia i małej prędkości wiatru. Choi i inni (2008) wskazują także na duże znaczenie opadów atmosferycznych dla kształtowania się poziomu zanieczyszczenia powietrza pyłami, których częste występowanie może sprzyjać samoczyszczaniu się atmosfery.

Wnioski

Na podstawie powyższych analiz wyciągnięto następujące wnioski:

1. Sytuacja aerosanitarna w Krakowie była wyjątkowo niekorzystna ze względu na wysokie stężenie pyłu PM_{10} w powietrzu. W latach 2006–2012 na wszystkich analizowanych stacjach notowano znaczne przekroczenia dobowych norm jakości powietrza dla PM_{10} , sięgające nawet powyżej 600% D_{24} .
2. Dopuszczalne częstości przekraczania dobowych norm w roku kalendarzowym w przypadku pyłu PM_{10}

były znacznie przekraczane już w okresie zimowym, chociaż brano pod uwagę jedynie pół roku, a normy dotyczą całego roku.

3. Wyniki analizy regresji wielokrotnej wykazały, że elementy meteorologiczne wpływały na kształtowanie stężeń zanieczyszczeń powietrza. Uzyskano znaczne zróżnicowane charakteru związku między stężeniem analizowanych zanieczyszczeń a elementami meteorologicznymi. Wskazuje to na dużą złożoność tych zależności, na niektóre wpływa zespołowo wiele czynników.
4. Na Alei Krasińskiego na poziom każdego zanieczyszczenia wpływały następujące elementy meteorologiczne: temperatura powietrza, prędkość wiatru i wilgotność powietrza. Ciśnienie atmosferyczne wpływało na kształtowanie stężeń jedynie wybranych zanieczyszczeń. Na Alei Krasińskiego najbardziej uzależnione od warunków meteorologicznych było stężenie $PM_{2,5}$, najmniej NO .
5. Widoczny był bezpośredni związek między temperaturą powietrza a stężeniem pyłu PM_{10} . Wraz ze spadkiem temperatury powietrza rosło jego stężenie, co miało ścisły związek z nasileniem procesów grzewczych w ciepłownictwie indywidualnym.
6. W Krakowie w okresie badawczym 2006–2012 odnotowano wystąpienie 81 epizodów ponadnormatywnych stężeń zanieczyszczeń powietrza pyłem PM_{10} . Najdłuższe zaobserwowane epizody trwały przez 23 i 19 dni. Najwięcej odnotowano epizodów trwających 5–9 dni (49,4%

w całym okresie badawczym) oraz 3–4 dni (39,5%). Analiza prognoz synoptycznych wskazuje, że występowaniu epizodów wysokich stężeń zanieczyszczeń towarzyszyły następujące czynniki: brak pionowego mieszania powietrza, niska temperatura powietrza, zaleganie gęstego, wymrożonego powietrza, występowanie mgieł i inwersji termicznej.

Literatura

- Badyda, A.J., Dabrowiecki, P., Lubinski, W., Czechowski, P.O. i Majewski, G. (2013). Exposure to traffic-related air pollutants as a risk of airway obstruction. W M. Pokorski (red.), *Respiratory Regulation-Clinical Advances* (str. 35-45). Netherlands: Springer.
- Bieniek, J., Piech, P. i Romański, L. (2013). Analiza wpływu spalania odpadów na środowisko. *Acta Agrophysica*, 20(3), 353-364.
- Choi, Y.S., Ho, C.H., Chen, D., Noh, Y.H. i Song, C.K. (2008). Spectral analysis of weekly variation in PM_{10} mass concentration and meteorological conditions over China. *Atmospheric Environment*, 42(4), 655-666.
- Czarnecka, M. i Kalbarczyk, R. (2008). Warunki meteorologiczne kształtujące zmienność stężenia pyłu zawieszonego na Pomorzu. *Acta Agrophysica*, 11(2), 357-368.
- Czarnecka, M. i Nidzgorska-Lencewicz, J. (2008). Warunki meteorologiczne kształtujące jakość powietrza w styczniu i lipcu 2006 roku w Szczecinie. *Acta Agrophysica*, 12(1), 55-72.
- Draper, N.R. i Smith, H. (1973). Analiza regresji stosowana. Warszawa: PWN.
- Gioda, A., Ventura, L., Lima, I. i Luna, A. (2013). Influence of meteorological parameters on air quality. *EGU General Assembly Conference Abstracts, April, Vol. 15*, 3256.
- Garścia, E. (2009). Pogarsza się stan czystości powietrza atmosferycznego. *Aura*, 2, 9-11.
- Godłowska, J. (2004). The particulate matter PM_{10} air pollution in Cracow. *Wiadomości IMGW, XXVII(XLVIII)*, 1, 79-90.

- Juda-Rezler, K., Reizer, M. i Oudinet, J.P. (2011). Determination and analysis of PM₁₀ source apportionment during episodes of air pollution in Central Eastern European urban areas: The case of wintertime 2006. *Atmospheric Environment*, 45(36), 6557-6566.
- Kalbarczyk, R. i Kalbarczyk, E. (2008). Concentration of gas and particulate air pollutants in Suwalki analysed in relation to meteorological conditions. *Polish Journal of Natural Sciences*, 23(1), 134-151.
- Kozłowska-Szczęśna, T., Krawczyk, B. i Kuchcik, M. (2004). *Wpływ środowiska atmosferycznego na zdrowie i samopoczucie człowieka. Monografie/Instytut Geografii i Przestrzennego Zagospodarowania im. Stanisława Leszczyckiego, 4*. Warszawa: IGiPZ PAN.
- Majewski, G., Przewoźniczuk, W., Kleniewska, M. i Rozbicka, K. (2009). Analiza zmienności wybranych zanieczyszczeń powietrza w zależności od opadów atmosferycznych w rejonie Ursynowa. *Acta Agrophysica*, 167, 13(2), 419-434.
- Majewski, G., Kleniewska, M. i Brandyk, A. (2011). Seasonal variation of particulate matter mass concentration and content of metals. *Polish Journal of Environmental Studies*, 20(2), 417-427.
- McGlade, J. (red.). (2013). *Sygnaly EEA 2013. Z każdym oddechem. Poprawa jakości powietrza w Europie*. Luksemburg: Urząd Publikacji Unii Europejskiej.
- Rackiewicz, I. (red.). (2012). *Diagnoza stanu środowiska miasta Krakowa (Etap 1)*. Kraków: Atmoterm.
- Rogula-Kozłowska, W., Rogula-Kopiec, P. i Majewski, G. (2014). Udokumentowane skutki oddziaływania aerozolu atmosferycznego na środowisko. *Przegląd Naukowy Inżynieria i Kształtowanie Środowiska*, 3(65), 290-303.
- Rozbicka, K. (2007). Charakterystyka zanieczyszczenia powietrza atmosferycznego tlenkami azotu na obszarze aglomeracji warszawskiej ze szczególnym uwzględnieniem Ursynowa. *Przegląd Naukowy Inżynieria i Kształtowanie Środowiska*, 1(35), 62-73.
- Rozporządzenie Ministra Środowiska z 24 sierpnia 2012 roku w sprawie poziomów niektórych substancji w powietrzu (Dz.U. 2012, poz. 1031).
- Unal, Y.S., Toros, H., Deniz, A. i Incecik S. (2011). Influence of meteorological factors and emission sources on spatial and temporal variations of PM₁₀ concentrations in Istanbul metropolitan area. *Atmospheric Environment*, 45(31), 5504-5513.
- World Health Organization. (2000). Air quality guidelines for Europe, *WGO Regional Publications, European Series, 91*. Copenhagen: WHO.
- Zhao, F., Li, X., Gai, C. i Gao, W. (2010). Estimation of the temporal and spatial distribution of dust concentration over China by combining PM₁₀ and conventional meteorological observations. *Environmental Monitoring and Assessment*, 170(1-4), 65-72.

Streszczenie

Wpływ elementów meteorologicznych na kształtowanie się stężeń zanieczyszczeń powietrza na przykładzie Krakowa.

W pracy omówiono stan jakości powietrza w Krakowie na podstawie wyników pomiarów prowadzonych na stacjach monitoringu jakości powietrza: Aleja Krasińskiego, Kraków Nowa Huta, Kraków Krowodrza i Kurdwanów. Obliczono częstość przekraczania norm jakości powietrza (dla PM₁₀) oraz przekroczenia poziomów alarmowych (dla NO₂, SO₂, PM₁₀). W pracy zbadano również związek pomiędzy elementami meteorologicznymi a stężeniem analizowanych zanieczyszczeń powietrza. Badania wykazały, że głównym problemem w zakresie jakości powietrza w Krakowie było częste przekroczenie poziomu dopuszczalnego przez pył zawieszony PM₁₀. Wyniki analizy regresji wielokrotnej wykazały, że elementy meteorologiczne wpływały na kształtowanie stężeń zanieczyszczeń powietrza. Uzyskano znaczne zróżnicowane charakteru związku między stężeniem analizowanych zanieczyszczeń a elementami meteorologicznymi. Wskazuje to na dużą złożoność tych zależności, na niektóre wpływa zespołowo wiele czynników. W Krakowie w okresie badaw-

czym 2006–2012 odnotowano wystąpienie 81 epizodów ponadnormatywnych stężeń zanieczyszczeń powietrza pyłem PM₁₀. Najdłuższe zaobserwowane epizody trwały przez 23 i 19 dni. Występowaniu epizodów ponadnormatywnych stężeń zanieczyszczeń towarzyszyły następujące czynniki: brak pionowego mieszania powietrza, niska temperatura powietrza, zaleganie gęstego, wymrożonego powietrza, występowanie mgieł i inwersji termicznej.

Summary

The influence of meteorological factors on the development of air pollutants concentration – Cracow case study. The paper discusses the state of air quality in Cracow based on the results of measurements carried out at air quality monitoring stations: Krasieński's Avenue, Cracow Nowa Huta, Cracow Krowdrza, and Kurdwanów. The frequency of exceeding air quality standards (PM₁₀) and alarm levels (for NO₂, SO₂, PM₁₀) was calculated. The study also examined the relationship between meteorological elements and the concentration of air pollutants. Studies have shown that the main

problem in case of air quality in Cracow is a frequent exceeding of acceptable levels for particulate matter PM₁₀. Results of multiple regression analysis showed that meteorological elements influence the formation of air pollution concentrations. Significant diversification of the relationship between analyzed pollutants and meteorological factors was noted. This indicates high complexity of such relationships, some of which are affected by many factors simultaneously. In Cracow in 2006–2012 study period 81 episodes of air pollutants PM₁₀ exceedance were reported. The longest episodes were observed for 23 and 19 days. The presence of exceeded concentrations of pollution episodes is often accompanied by the following factors: the lack of vertical air mixing, low temperature, deposition of dense frozen air, the occurrence of fog and thermal inversion.

Authors' address:

Karolina Ćwiek, Grzegorz Majewski
Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego
w Warszawie
Katedra Inżynierii Wodnej
ul. Nowoursynowska 159, 02-776 Warszawa
Poland
e-mail: karolina_cwiek@sggw.pl