

Przegląd Naukowy – Inżynieria i Kształtowanie Środowiska nr 68, 2015: 193–206
(Prz. Nauk. Inż. Kszt. Środ. 68, 2015)
Scientific Review – Engineering and Environmental Sciences No 68, 2015: 193–206
(Sci. Rev. Eng. Env. Sci. 68, 2015)

Katarzyna ROZBICKA, Marta MICHALAK

Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska SGGW, Laboratorium – Centrum Wodne
Faculty of Civil and Environmental Engineering WULS-SGGW, Laboratory – Water Center

Charakterystyka stężeń wybranych zanieczyszczeń powietrza na obszarze Warszawy (Poland) Characteristic of selected air pollutants concentration in Warsaw (Poland)

Słowa kluczowe: jakość powietrza, dwutlenek azotu, ozon, PM₁₀, benzen, obszar miejski
Key words: air quality, nitrogen dioxide, ozone, PM₁₀, benzene, urban area

Wprowadzenie

Jednym z problemów w aglomeracjach miejskich jest jakość powietrza atmosferycznego. Często stężenia obecnych w nim szkodliwych substancji przekraczają dopuszczalne normy. Na taki stan powietrza duży wpływ ma dynamiczny rozwój motoryzacji i wzrost liczby pojazdów poruszających się po ulicach aglomeracji warszawskiej. Z danych przedstawionych w 2005 roku przez Warszawskie badanie ruchu wynika, że do Warszawy dojeżdża dziennie około 300 tysięcy pojazdów z podmiejskiego oraz tranzytowego ruchu, co powoduje dodatkowe obciążenie systemu komunikacyjnego w mieście. Istniejące sieci

komunikacyjne nie wystarczają obecnie aby sprawnie obsłużyć cały generowany przez pojazdy ruch, co powoduje ciągły wzrost poziomu zanieczyszczenia powietrza poprzez emisję do atmosfery produktów spalania paliw (Badyda i Majewski, 2006, Rozbicka, 2007, Majewski i Przewoźniczuk, 2009, Rozbicka i Rozbicki, 2014). W zależności od typu pojazdu i rodzaju stosowanego paliwa do atmosfery emitowane są liczne substancje, które negatywnie oddziałują na zdrowie ludzi i środowisko. Przy długotrwałej ekspozycji substancje te powodują choroby oraz uszkodzenia narządów wewnętrznych, głównie w układzie oddechowym człowieka. Przez pojazdy mechaniczne wydzielane są przeważnie tlenki azotu, węgla i siarki, węglowodory (także aromatyczne – WWA) oraz cząstki stałe (Grantz i inni, 2003, Juda-Rezler, 2006).

Występowanie wysokich stężeń zanieczyszczeń komunikacyjnych przekraczających dopuszczalne normy zwłaszcza w dużych miastach staje się obecnie coraz poważniejszym problemem. W związku z tym na obszarze Warszawy podejmowane są różne działania, prowadzące do zmniejszenia emisji z transportu, m.in. budowane są obwodnice wokół miasta, wprowadzane są ograniczenia dla ruchu samochodowego w niektórych dzielnicach zwłaszcza w centrum miasta lub nawet stosowany jest zakaz wjazdu do nich (Raport, 2013).

Obszar i metodyka badań

W opracowaniu wykorzystano dane pochodzące ze stacji pomiarowych funkcjonujących w ramach systemu monitoringu atmosfery należących do Wojewódz-

kiego Inspektoratu Ochrony Środowiska w Warszawie (WIOŚ) i znajdujących się na terenie Warszawy – stacja Warszawa-Targówek (kod stacji: MzWarTarKondra) znajduje się przy ul. Kondratowicza w dzielnicy Targówek i jest stacją tła miejskiego. Stacja Warszawa-Komunikacyjna (kod stacji: MzWarszNiepodKom) położona jest bezpośrednio przy al. Niepodległości o znacznym natężeniu ruchu komunikacyjnego w dzielnicy Śródmieście – jest stacją komunikacyjną, a stacja Warszawa-Ursynów (kod stacji: MzWarszUrsynow) znajduje się przy ul. Wokalnej w dzielnicy Ursynów i reprezentuje tło miejskie. W tabeli 1 zawarte są szczegółowe charakterystyki stacji pomiarowych.

Przeanalizowane zostały wartości godzinne stężenia dwutlenku azotu, pyłu zawieszonego PM₁₀, ozonu i benzenu, z okresu trzech lat, od 1 stycznia 2011



RYSUNEK 1. Rozmieszczenie stacji pomiarowych
FIGURE 1. Location of measurement stations

TABELA 1. Charakterystyki stacji pomiarowych w Warszawie (WIOŚ, 2014)

TABLE 1. Characteristics of measurement stations in Warsaw area (WIOŚ, 2014)

Nazwa stacji (według WIOŚ)	Warszawa-Targówek	Warszawa-Komunikacyjna	Warszawa-Ursynów
Krajowy kod stacji	MzWarTarKondra	MzWarszNiepodKom	MzWarszUrsynow
Krótką nazwa stacji	WaT	WaK	WaU
Ulica	Kondratowicza	al. Niepodległości	Wokalna
Typ stacji	tła miejskiego	komunikacyjna	tła miejskiego
Długość geograficzna	E 21°02'21''	E 21°00'21''	E 21°02'21''
Szerokość geograficzna	N 52°17'27,092''	N 52°13'09,455''	E 52°09'38,783''
Wysokość [m n.p.m.]	85	103	102
Typ obszaru	miejski	miejski	miejski
Charakterystyka strefy	handlowo-mieszkaniowy	handlowo-mieszkaniowy	handlowo-mieszkaniowy
Analizowane stężenia	NO ₂ , O ₃ , PM ₁₀	NO ₂ , PM ₁₀ , C ₆ H ₆	NO ₂ , O ₃ , PM ₁₀ , C ₆ H ₆
Czas uśredniania stężeń	NO ₂ , PM ₁₀ , C ₆ H ₆ – godzinne wartości O ₃ – ośmiogodzinne wartości		
Metoda pomiaru zgodne z metodami referencyjnymi	NO ₂ – chemiluminescencja O ₃ – fotometria UV PM ₁₀ – dwie metody: metoda odniesienia i procedura badania terenowego do wykazania równoważności stosowanej metody pomiarowej z metodą odniesienia C ₆ H ₆ – chromatografia gazowa		

roku do 31 grudnia 2013 roku. Dla ozonu analizowano również wartości ośmiogodzinne, jedynie ze stacji Targówek i Ursynów.

Charakterystykę zanieczyszczenia powietrza opracowano poprzez obliczenie średnich: rocznych, miesięcznych oraz godzinnych stężeń zanieczyszczeń zarówno dla poszczególnych lat, jak i całego analizowanego okresu. Obliczono także liczbę przekroczeń wartości normowanych stężeń średniogodzinnych w rozpatrywanym okresie na każdej ze stacji. Ponadto, ze zbioru stężeń ozonu na analizowanych stacjach Targówek i Ursynów w okresie 2011–2013 wyodrębniono siedem dni, w których średnia ośmiogodzinna wartość stężenia ozonu przekraczała 100 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ (co odpowiada

83% poziomu docelowego, wynoszącego 120 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$), które nazwano dalej dniami z epizodami podwyższonego stężenia. Na obu ww. stacjach daty wystąpienia podwyższonego stężenia ozonu obserwowane były w tych samych okresach pomiarowych. Dla tych przedziałów czasowych wykonano analizy statystyczne przy zastosowaniu technik regresyjnych: regresji wielokrotnej. Zbadano zależności między stężeniami ozonu, NO₂, PM₁₀, C₆H₆ a parametrami meteorologicznymi (temperatura i wilgotność względna powietrza, prędkość wiatru, natężenie promieniowania całkowitego). Wyznaczono również współczynniki regresji liniowej Pearsona między analizowanymi stężeniami zanieczyszczeń a parametrami meteorologicznymi dla stacji położonych

przy ul. Wokalnej i ul. Kondratowicza. Obliczenia statystyczne wykonano programem Statistica 10.

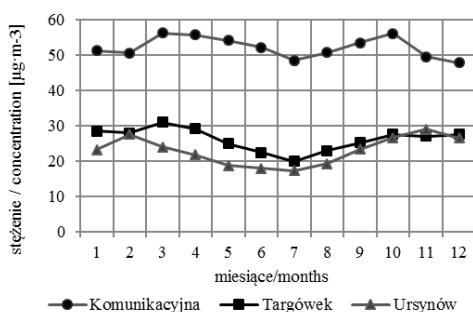
Wyniki badań i ich dyskusja

Z przeprowadzonych analiz wynika, iż średnioroczne wartości stężenia dwutlenku azotu w latach 2011–2013 na stacji Komunikacyjna znacznie przewyższają wartości uzyskane dla stacji Targówek oraz Ursynów. We wszystkich trzech analizowanych latach zaobserwowano tu przekroczenie wartości dopuszczalnej rocznej, wynoszącej $40 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ (Rozporządzenie Ministra Środowiska z 2012 r. w sprawie poziomów niektórych substancji w powietrzu Dz.U.

z 2012 r., poz. 1031) i wahały się od 114 do 141% normy rocznej (tab. 2). Najniższe stężenie roczne NO_2 w ciągu trzech lat zanotowano na wszystkich stacjach w okresie letnim, w lipcu na Ursynowie ($23,9 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) (tab. 2, rys. 2). Mogło to być wynikiem m.in. zmniejszenia natężenia ruchu drogowego spowodowanego wyjazdami wakacyjnymi mieszkańców, zwłaszcza w takiej dzielnicy jak Ursynów, która jest nazywana sypialnią Warszawy, jak również korzystniejszymi warunkami meteorologicznymi dla rozprzestrzeniania się zanieczyszczeń w atmosferze w tym okresie. Dla analizowanych dni stwierdzono również, iż zmienności średniodobowych stężeń NO_2 w okresie 2011–2013 wynikają ze zmienności natężenia ruchu samo-

TABELA 2. Średnie roczne wartości stężenia NO_2 [$\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$] w poszczególnych latach 2011–2013
TABLE 2. Annual mean values of NO_2 [$\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$] concentration in particular years 2011–2013

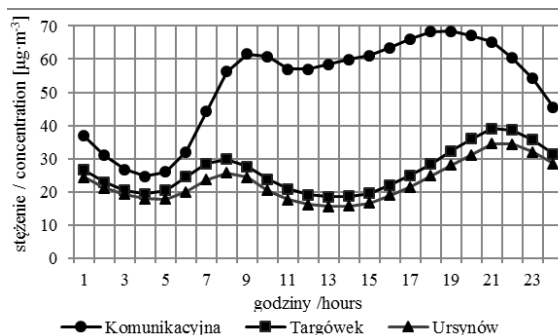
Stacja/Station	2011	2012	2013	Średnia Mean	Wartość dopuszczalna roczna Annual limit value
Warszawa-Targówek	24,2	25,1	24,5	26,3	40
Warszawa-Ursynów	20,7	24,0	24,0	23,9	
Warszawa-Komunikacyjna	45,4	54,8	56,2	52,1	



RYSUNEK 2. Roczny przebieg średniego miesięcznego stężenia NO_2 [$\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$] w Warszawie w 2011–2013

FIGURE 2. Annual course of monthly mean values of NO_2 [$\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$] concentration in Warsaw in 2011–2013

chodowego. I tak, wzrost stężenia NO_2 obserwuje się między godziną 5 a 8, a następnie od godziny 17 do 22. Na stacji Komunikacyjna podwyższone stężenia NO_2 utrzymują się od godziny 7 do 23, osiągając maksimum między godziną 18 a 19 (wynoszące $68,5 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) (rys. 3). Między stacjami Targówek i Ursynów zróżnicowanie stężenia NO_2 zarówno w przebiegu rocznym, jak i dobowym, jest nieznaczne, tzn. wartości stężeń kształtują się na podobnym poziomie, jak również wykazują podobny charakter przebiegu.



RYSUNEK 3. Dobowy przebieg średniego godzinnego stężenia NO₂ [µg·m⁻³] w Warszawie w 2011–2013
 FIGURE 3. Daily course of hourly mean values of NO₂ [µg·m⁻³] in Warsaw in 2011–2013

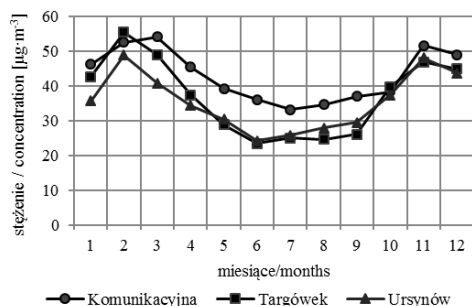
Analizy wartości średniorocznych stężeń pyłu zawieszonego PM₁₀ wskazują iż, w ciągu trzech lat jedynie na Ursynowie nie przekraczają wartości normowanej rocznej. Najbardziej niekorzystna sytuacja – najwyższe stężenie średnioroczne wystąpiło w centrum miasta, na stacji Komunikacyjna w 2011 roku. Stężenie roczne pyłu PM₁₀, osiągnęło wartość 49,0 µg·m⁻³, przekraczając wartość normowaną (40 µg·m⁻³) o ponad 20%. Średnia wartość z trzech analizowanych lat wyniosła 42,4 µg·m⁻³. Wartości stężeń PM₁₀ dla lat 2012 oraz 2013 są bliskie wartości dopuszczalnej, jednak jej nie przekraczają (tab. 3). Najniższe stężenia występowały na Ursynowie – osiągając wartości między 33,2 a 37,2 µg·m⁻³. Wartości miesięczne w przebiegu rocznym, podobnie jak w przypadku dwutlenku azotu, są najmniejsze między czerwcem a wrześniem, największe zaś

przypadają na okres luty–marzec (rys. 4). Taka zależność wynika m.in. z rozpoczęcia sezonu grzewczego z powodu obniżania się temperatury powietrza w miesiącach zimowych. W przebiegu dobowym średnio godzinnych wartości stężenia pyłu PM₁₀ widoczna jest również zależność stężenia pyłu od natężenia ruchu pojazdów – wyższe stężenia występują w godzinach szczytów komunikacyjnych: porannym i popołudniowym, trwających nawet do godzin nocnych. Wartości stężenia mierzonego na stacji Komunikacyjna wzrastają w godzinach 6–10 oraz 18–22 i utrzymują się na wysokim poziomie, na stacjach Targówek i Ursynów stężenia pyłu są natomiast niższe, a wzrost stężenia obserwuje się około godziny 9 oraz od godziny 16 do godzin nocnych (rys. 5).

W przypadku ozonu wartości średniorocznych stężeń uzyskane dla okresu

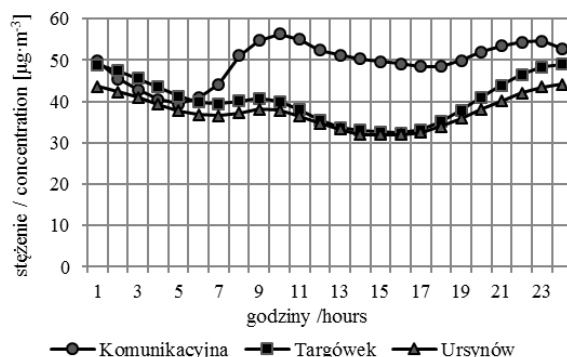
TABELA 3. Średnie roczne wartości stężenia PM₁₀ [µg·m⁻³] w latach 2011–2013
 TABLE 3. Annual mean values of PM₁₀ [µg·m⁻³] concentration in 2011–2013

Stacja Station	2011	2012	2013	Średnia Mean	Wartość dopuszczalna roczna Annual limit value
Warszawa-Targówek	36,6	42,6	32,0	37,0	40
Warszawa-Ursynów	36,0	37,2	33,2	35,4	
Warszawa-Komunikacyjna	49,0	38,7	39,6	42,4	



RYSUNEK 4. Przebieg średniego miesięcznego stężenia PM_{10} [$\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$] w Warszawie w 2011–2013
 FIGURE 4. Annual course of monthly mean values of PM_{10} [$\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$] concentration in Warsaw in 2011–2013

oraz grudniu, najwyższe zaś przypadają na okres od kwietnia do sierpnia (rys. 6). Natomiast w przebiegu dobowym średniogodzinnych stężeń ozonu dla analizowanych lat, podobnie jak w przypadku NO_2 zauważa się zależność wzrostu stężenia ozonu od wzrostu natężenia ruchu komunikacyjnego zwłaszcza w godzinach szczytów komunikacyjnych. Potwierdza to również istotną rolę tlenków azotu jako zanieczyszczeń pierwotnych w formowaniu się ozonu jako zanieczyszczenia wtórnego. Wartości stężenia ozonu pomierzone na stacji Targówek

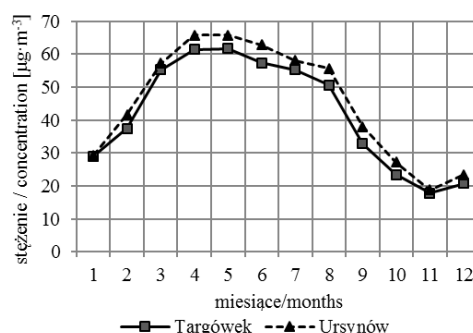


RYSUNEK 5. Dobowy przebieg średniego godzinnego stężenia PM_{10} [$\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$] w Warszawie w 2011–2013
 FIGURE 5. Daily course of hourly mean values of PM_{10} [$\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$] in Warsaw in 2011–2013

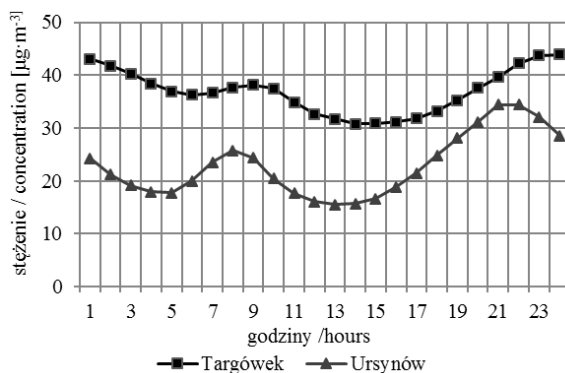
TABELA 4. Średnie roczne wartości stężenia O_3 [$\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$] w poszczególnych latach 2011–2013
 TABLE 4. Annual mean values of O_3 [$\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$] concentration in particular years 2011–2013

Stacja\Station	2011	2012	2013	Średnia Mean
Warszawa-Targówek	40,8	42,6	41,9	41,8
Warszawa-Ursynów	45,6	44,9	46,1	45,5

trzech lat wyniosły odpowiednio $41,8 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ (Targówek) oraz $45,5 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ (Ursynów) (tab. 4). W przebiegu rocznym dla obu analizowanych stacji stężenia ozonu są najniższe w listopadzie



RYSUNEK 6. Przebieg średniego miesięcznego stężenia O_3 [$\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$] w Warszawie w 2011–2013
 FIGURE 6. Annual course of monthly mean values of O_3 [$\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$] concentration in Warsaw in 2011–2013



RYSUNEK 7. Dobowy przebieg średniego godzinowego stężenia O₃ [µg·m⁻³] w Warszawie w 2011–2013

FIGURE 7. Daily course of hourly mean values of O₃ [µg·m⁻³] in Warsaw in 2011–2013

wzrastają między godziną 6 a 9, a także od 15 do późnych godzin wieczornych, a na Ursynowie wzrosty stężenia obserwuje się między godzinami 5 a 8 oraz 13 a 22 (rys.7).

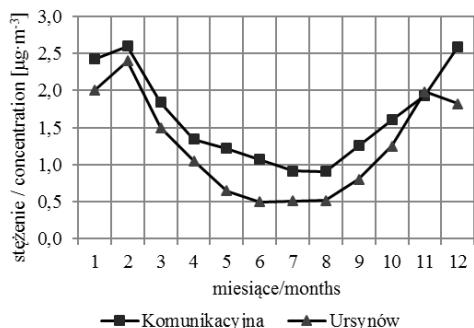
Analiza wartości średniorocznych stężeń benzenu wykazała, iż w ciągu trzech lat wartość średnioroczna nie przekroczyła wartości dopuszczalnej rocznej, wynoszącej 5 µg·m⁻³. Średnio roczne wartości uzyskane dla okresu trzech lat wynoszą odpowiednio 1,5 µg·m⁻³ (Komunikacyjna) oraz 1,2 µg·m⁻³ (Ursynów), co stanowi 25–30% wartości normowanej (tab. 5). Wartości średniomiesięczne w przebiegu rocznym dla obu stacji są najniższe w lipcu oraz sierpniu, wartości najwyższe natomiast przypadają na okres między listopadem a lutym (rys. 8). W przebiegu dobowym wartości średniogodzinnych stężeń ben-

zenu dla całego analizowanego okresu 2011–2013 r. obserwuje się wzrost w godzinach porannego i popołudniowego szczytu komunikacyjnego, tak jak w przypadku pyłu PM₁₀, NO₂ i O₃. Wzrost wartości stężenia benzenu uzyskanych na stacji Komunikacyjna obserwuje się między godziną 6 a 9, a także już od godziny 14 do 22, a na stacji Ursynów między godzinami 7 a 9 oraz 15 a 22 (rys. 9).

Przebiegi czasowe dobowe i roczne analizowanych zanieczyszczeń NO₂, PM₁₀, C₆H₆, O₃ wykazują podobny charakter zmienności stężeń powiązany z warunkami emisyjnymi. Głównym źródłem zanieczyszczeń na badanym obszarze jest emisja z pojazdów samochodowych (na stacji Komunikacyjna jest największe natężenie ruchu i stężenie NO₂ we wszystkich miesiącach jest

TABELA 5. Średnie roczne wartości stężenia C₆H₆ [µg·m⁻³] w poszczególnych latach 2011–2013
TABLE 5. Annual mean values of C₆H₆ [µg·m⁻³] concentration in particular years 2011–2013

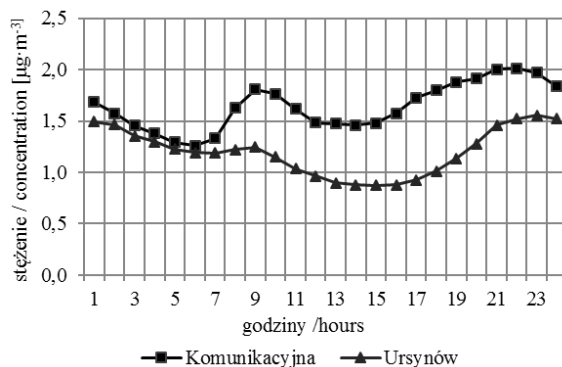
Stacja\Station	2011	2012	2013	Średnia Mean	Wartość dopuszczalna roczna Annual limit value
Warszawa-Komunikacyjna	1,6	1,7	1,6	1,5	5
Warszawa-Ursynów	1,3	1,2	1,3	1,2	



RYSUNEK 8. Przebieg średniego miesięcznego stężenia C₆H₆ [µg·m⁻³] w Warszawie w latach 2011–2013

FIGURE 8. Annual course of monthly mean values of C₆H₆ [µg·m⁻³] concentration in Warsaw in 2011–2013

występują podwyższone stężenia ozonu, przeanalizowano tylko te dni zwane epizodami podwyższonego stężenia ozonu, w których stężenie przekraczało 100 µg·m⁻³ (co odpowiada 83% poziomu docelowego). W tabeli 6 przedstawiono dni z epizodami, czas ich trwania oraz średnie dzienne wartości parametrów meteorologicznych. Czas trwania poszczególnych epizodów określono między godziną 2 a 19. Dwa najkrótsze przypadki epizodu trwające dwie godziny, wystąpiły w godzinach nocnych, pozostałe zaś (6–19 godzin) występowały wyłącznie w ciągu dnia. Stężenie O₃ podczas występowania wszystkich epizodów było



RYSUNEK 9. Dobowy przebieg średniego godzinnego stężenia C₆H₆ [µg·m⁻³] w Warszawie w latach 2011–2013

FIGURE 9. Daily course of hourly mean values of C₆H₆ [µg·m⁻³] in Warsaw in 2011–2013

dwukrotnie wyższe niż na pozostałych stacjach), ale także wiąże się z procesami grzewczymi (znaczny spadek stężeń w miesiącach letnich). Jedynie w cyklu rocznym O₃ wykazuje odmienny przebieg zmienności stężeń związany zwłaszcza z odmiennymi warunkami meteorologicznymi przy formowaniu się tego gazu jako zanieczyszczenia wtórnego.

W celu dokładniejszej analizy warunków meteorologicznych, przy których

zbliżone, natomiast znacznie różniły się warunki meteorologiczne. W związku z tym powyższe epizody podzielono na dwie grupy: „wiosenne” i „letnie”, które różnią się przede wszystkim warunkami meteorologicznymi związanymi z okresem ich występowania. Podczas epizodów „wiosennych”, które wystąpiły w marcu i kwietniu, zarejestrowano znacznie mniejsze natężenie promieniowania słonecznego, wahające się od 44,4

TABELA 6. Dane dla dni z podwyższonym stężeniem O₃ na stacji Ursynów i Targówek
 TABLE 6. Data for episodic days with higher O₃ concentrations in Ursynów and Targówek stations

Stacja Station	Data Date	Maksymalne stężenie O ₃ Maximum con- centration O ₃	Czas trwania Duration	Wartości średnie dzienne Daily mean values				
		µg/m ³		h	R	t	v	f
					W·m ⁻²	°C	m·s ⁻¹	%
Targówek	19.03.2013	104,8	9	44,4	-2,0	2,1	80,6	
Targówek	28.03.2013	101,7	2	0	0,6	2,6	46,5	
Ursynów		102,7	2	0	-0,5	2,8	49,5	
Targówek	29.03.2013	108,5	19	59,6	-0,3	2,4	71,8	
Ursynów		108,0	18	60,7	-1,3	2,6	71,5	
Targówek	19.04.2013	104,9	6	192	12,0	1,9	58,5	
Ursynów		108,6	10	111,6	12,3	2,1	55,7	
Targówek	29.07.2013	107,0	14	301,8	32,6	1,1	40,4	
Ursynów		107,4	19	323,0	31,0	1,8	47,5	
Targówek	30.07.2013	107,5	10	108,8	24,6	1,4	68,9	
Ursynów		108,5	11	93,2	24,0	1,5	70,7	
Targówek	9.08.2013	102,5	6	276,8	24,2	1,5	64,3	
Ursynów		107,4	12	346,9	24,9	1,9	62,2	

do 192 W·m⁻², oraz temperaturę powietrza od -2,0 do 12,3°C, a prędkość wiatru była nieznacznie większa (1,9–2,6 m·s⁻¹) w porównaniu z epizodami „letnimi”. Epizody „letnie” utrzymywały się dłużej i charakteryzowały się dużym natężeniem promieniowania (93,2–346,9 W·m⁻²) i wysoką temperaturą powietrza (24,0–32,6°C) oraz prędkością wiatru nieprzekraczającą 2,0 m·s⁻¹. Występowanie epizodów w okresie lata jest znane i szeroko opisywane w literaturze, natomiast znamienym jest występowanie epizodów wiosennych, które w jakiś sposób odbiegają od ogólnie przyjętych kryteriów zwłaszcza pod względem warunków meteorologicznych. Jednak występowanie tych epizodów na obszarze Warszawy świadczy o sprzyjających wa-

runkach do formowania się ozonu, również w okresie wiosennym.

W celu określenia związków statystycznych między warunkami meteorologicznymi podczas dni z podwyższonym stężeniem O₃, a także poszczególnymi analizowanymi zanieczyszczeniami powietrza i parametrami meteorologicznymi wykonano analizy statystyczne. Analiza związków statystycznych między stężeniem ozonu a parametrami meteorologicznymi podczas dni z epizodami podwyższonego stężenia ozonu wykazała, że w uzyskanych równaniach regresji wystąpiły 4–6 zmienne niezależne. Wszystkie równania są istotne statystycznie na poziomie 1%. Uzyskana wartość współczynnika korelacji wielokrotnej dla związku między stężeniem

ozonu a parametrami meteorologicznymi wyniosła odpowiednio $R = 0,27$ (Ursynów) oraz $R = 0,34$ (Targówek). Wartości współczynnika korelacji wielokrotnej wzrosły, na obu stacjach, po uwzględnieniu w analizie statystycznej dodatkowo

stężeń zanieczyszczeń, tj. NO_2 , PM_{10} czy C_6H_6 razem z parametrami meteorologicznymi, odpowiednio $R = 0,57$ (Targówek) i $R = 0,65$ (Ursynów). Uzyskane równania regresji przedstawiono w tabelach 7 i 8.

TABELA 7. Równania regresji wyznaczone między stężeniem O_3 a parametrami meteorologicznymi dla dni ze stężeniem ośmiogodzinnym O_3 powyżej $100 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ dla stacji: Ursynów i Targówek

TABLE 7. Multiple regression equations between O_3 concentration above $100 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ for 8-hourly values and meteorological elements for Ursynów and Targówek stations

Stacja/Station	Równanie regresji/ Regression equation	R	R^2_{adj}	BS	F	L.p.
Warszawa-Targówek	$\text{O}_3 = 89,679 - 0,033 \cdot t - 0,071 \cdot f + 0,034 \cdot T + 0,232 \cdot v$	0,27	0,05	11,67	3,19	168
Warszawa-Ursynów	$\text{O}_3 = 92,481 + 0,127 \cdot t - 0,116 \cdot f + 0,038 \cdot T + 0,240 \cdot v$	0,34	0,09	10,98	4,52	144

Objaśnienia: R – współczynnik korelacji, R_{adj} – współczynnik korelacji wielokrotnej skorygowany ze względu na liczbę stopni swobody, BS – błąd standardowy, F – empiryczna wartość testu istotności Fishera-Snedecora, L.p. – liczba przypadków, t – temperatura powietrza [$^{\circ}\text{C}$], f – wilgotność względna powietrza [%], T – natężenie promieniowania całkowitego [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$], v – prędkość wiatru [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$].

Explanations: R – correlation coefficient, R_{adj} – correlation coefficient adjusted, BS – standard error of estimation [$\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$], F – Fisher-Snedecor F-test, L.p. – number of cases, t – air temperature [$^{\circ}\text{C}$], f – relative humidity [%], T – total solar radiation [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$], v – wind speed [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$].

TABELA 8. Równania regresji opisujące związek między stężeniem O_3 a NO_2 , PM_{10} i parametrami meteorologicznymi dla dni ze stężeniem ośmiogodzinnym O_3 powyżej $100 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ dla stacji Targówek i Ursynów

TABLE 8. Multiple regression equations between O_3 and NO_2 , PM_{10} concentration, and meteorological parameters for days above $100 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ for 8-hourly values concentration for Targówek and Ursynów stations

Stacja/Station	Równanie regresji/Regression equation	R	R^2_{adj}	BS	F	L.p.
Warszawa-Targówek	$\text{O}_3 = 89,662 - 0,633 \cdot \text{NO}_2 + 0,206 \cdot \text{PM}_{10} - 0,114 \cdot t + 0,185 \cdot f + 0,107 \cdot T + 0,071 \cdot v$	0,57	0,30	10,03	12,44	168
Warszawa-Ursynów	$\text{O}_3 = 216,478 - 0,712 \cdot \text{NO}_2 - 1,648 \cdot \text{PM}_{10} + 1,289 \cdot t - 0,524 \cdot f + 0,042 \cdot T + 0,010 \cdot v$	0,65	0,39	9,09	13,23	144

Objaśnienia: O_3 – stężenie ozonu troposferycznego [$\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$], NO_2 – stężenie dwutlenku azotu [$\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$], PM_{10} – stężenie pyłu zawieszonego [$\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$], t – temperatura powietrza [$^{\circ}\text{C}$], f – wilgotność względna powietrza [%], T – natężenie promieniowania całkowitego [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$], v – prędkość wiatru [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$], R – współczynnik korelacji, R_{adj} – współczynnik korelacji wielokrotnej skorygowany ze względu na liczbę stopni swobody, R^2_{adj} – współczynnik determinacji wielokrotnej (poprawiony), BS – błąd standardowy, F – empiryczna wartość testu istotności Fishera-Snedecora, L.p. – liczba przypadków.

Explanations: O_3 – troposphere ozone concentration [$\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$], NO_2 – nitrogen dioxide concentration [$\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$], PM_{10} – particulate matter concentration [$\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$], t – air temperature [$^{\circ}\text{C}$], f – relative humidity [%], T – total solar radiation [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$], v – wind speed [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$], R – correlation coefficient, R_{adj} – correlation coefficient adjusted due to number of degrees of freedom, R^2_{adj} – squared correlation coefficient adjusted, BS – standard error of estimation [$\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$], F – Fisher-Snedecor F-test empirical value, L.p. – number of cases.

Kolejnym etapem badań było wyznaczenie związków statystycznych między poszczególnymi analizowanymi parametrami meteorologicznymi a zanieczyszczeniami powietrza (tab. 9 i 10). Współczynniki korelacji liniowej, uznane za istotne statystycznie na poziomie α równy 1 lub 5% zaznaczono w postaci pogrubionego tekstu. Z przeprowadzonych analiz wynika, iż największe wartości współczynnika korelacji liniowej dla stacji Targówek uzyskano

dla wilgotności względnej powietrza ($r = 0,56$), PM_{10} i prędkości wiatru ($r = -0,50$) oraz NO_2 i prędkości wiatru ($r = -0,46$). Z kolei na stacji Ursynów bardzo dużą wartość współczynnika korelacji uzyskano dla PM_{10} i temperatury powietrza ($r = 0,92$). Nieco niższe współczynniki korelacji uzyskano dla benzenu oraz temperatury powietrza ($r = -0,59$), NO_2 i prędkości wiatru ($r = -0,47$) oraz NO_2 i wilgotności względnej powietrza ($r = 0,48$). Na pod-

TABELA 9. Współczynniki korelacji liniowej między t, f, T, v a stężeniem zanieczyszczeń na stacji Targówek

TABLE 9. Correlation coefficients between t, f, T, v and concentration of air pollution on the Targówek station

	NO_2	O_3	t	f	T	v	PM_{10}
NO_2	1,000	-0,520	-0,132	0,560	-0,249	-0,464	0,261
O_3	-0,520	1,000	-0,003	-0,163	0,129	0,266	-0,013
t	-0,132	-0,003	1,000	-0,337	0,344	-0,366	0,387
f	0,560	-0,163	-0,337	1,000	-0,480	-0,307	0,199
T	-0,249	0,129	0,344	-0,480	1,000	0,177	-0,096
v	-0,464	0,266	-0,366	-0,307	0,177	1,000	-0,501
PM_{10}	0,261	-0,013	0,387	0,199	-0,096	-0,501	1,000

Objaśnienia w tekście/Explanations in the text.

TABELA 10. Współczynniki korelacji liniowej między t, f, T a na stacji Ursynów

TABLE 10. Correlation coefficients between t, f, T, v and concentration of air pollution on the Ursynów station

	NO_2	O_3	t	f	T	v	PM_{10}	C_6H_6
NO_2	1,000	-0,482	-0,070	0,476	-0,252	-0,469	-0,189	0,399
O_3	-0,482	1,000	0,077	-0,258	0,190	0,310	0,033	-0,286
t	-0,070	0,077	1,000	-0,198	0,302	-0,238	0,915	-0,599
f	0,476	-0,258	-0,198	1,000	-0,504	-0,420	-0,052	0,440
T	-0,252	0,190	0,302	-0,504	1,000	0,323	0,222	-0,362
v	-0,469	0,310	-0,238	-0,420	0,323	1,000	-0,220	-0,209
PM_{10}	-0,189	0,033	0,915	-0,052	0,222	-0,220	1,000	-0,682
C_6H_6	0,399	-0,286	-0,599	0,440	-0,362	-0,209	-0,682	1,000

Objaśnienia w tekście/Explanations in the text.

stawie otrzymanych wyników analiz statystycznych można stwierdzić występowanie zależności zarówno między warunkami meteorologicznymi a podwyższonymi stężeniami O_3 , podczas dni z epizodami, jak i między poszczególnymi parametrami meteorologicznymi a stężeniem analizowanych zanieczyszczeń na analizowanych stacjach.

Podsumowanie i wnioski

Analiza materiału badawczego pozwalała na sformułowanie następujących wniosków:

1. W analizowanym okresie 2011–2013 zostały przekroczone średnioroczne wartości stężenia NO_2 na wszystkich analizowanych stacjach (Komunikacyjna, Ursynów i Targówek), które wahały się od 114 do 141% dopuszczalnej normy ($40 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$). Wartości średnioroczne stężenia pyłu zawieszonego PM_{10} ($40 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) zostały przekroczone na dwóch stacjach: Komunikacyjna i Targówek. Najwyższe stężenia PM_{10} wystąpiły na stacji Komunikacyjna – średnia z analizowanego okresu wyniosła $42,4 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. W przypadku stężeń ozonu i benzenu nie stwierdzono przekroczeń wartości normowanych. Najwyższe stężenia dla analizowanych zanieczyszczeń były odnotowywane na stacji Komunikacyjna położonej w centrum miasta, która znajduje się w bezpośrednim sąsiedztwie tras komunikacyjnych o dużym natężeniu ruchu, niższe stężenia natomiast obserwowano na stacjach peryferyjnych – Ursynów, Targówek, które są położone w większej odle-

głości od ulic o mniejszym natężeniu ruchu niż stacja Komunikacyjna.

2. W przypadku dni z epizodami podwyższonego stężenia ozonu (wartości stężenia O_3 powyżej $100 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, co odpowiada 83% poziomu docelowego dla wartości 8 h) ze względu na zróżnicowane warunki meteorologiczne i okres wystąpienia wyróżniono dwa typy epizodów: „wiosenne” i „letnie”. Wartości stężenia ozonu podczas epizodów utrzymywały się na zbliżonym poziomie, różniły się natomiast warunki meteorologiczne oraz czas trwania epizodów. Występowanie epizodów na obszarze Warszawy świadczy o sprzyjających warunkach do jego formowania nie tylko w okresie letnim, ale również w okresie wiosennym.
3. Analiza statystyczna między wartościami stężenia O_3 podczas dni z epizodami a parametrami meteorologicznymi i zanieczyszczeniami powietrza wykazała istotne statystycznie zależności: dla stacji Ursynów współczynnik regresji wielokrotnej wyniósł $R = 0,65$, a dla stacji Targówek $R = 0,57$.
4. Analiza statystyczna między poszczególnymi parametrami meteorologicznymi a stężeniem analizowanych zanieczyszczeń wykazała silny związek dla: PM_{10} i temperatury powietrza ($r = 0,92$), C_6H_6 i temperatury powietrza ($r = -0,59$) oraz NO_2 i wilgotności powietrza ($r = 0,47$) na stacji Ursynów. Na stacji Targówek zaś silny związek uzyskano między NO_2 i wilgotnością powietrza ($r = 0,56$), PM_{10} i prędkością wiatru ($r = -0,5$) oraz NO_2 a prędkością wiatru ($r = -0,46$).

Literatura

- Badyda, A. i Majewski, G. (2006). Analiza zmienności stężenia zanieczyszczeń komunikacyjnych w aglomeracji miejskiej na tle natężenia ruchu pojazdów i warunków meteorologicznych. *Przegląd Naukowy Inżynieria i Kształtowanie Środowiska*, 1(33), 146-157.
- Grantz, D., Garner, J.H.B. i Johnson, D.W. (2003). Ecological effects of particulate matter. *Atmospheric Environment*, 29, 213-239.
- Juda-Rezler, K. (2006). *Oddziaływanie zanieczyszczeń powietrza na środowisko*. Warszawa: Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej.
- Majewski, G. i Przewoźniczuk, W. (2009). Study of particulate matter pollution in Warsaw area. *Polish Journal of Environmental Studies*, 18(2), 293-300.
- Raport za rok 2012. Roczna ocena jakości powietrza w województwie mazowieckim (2013) – WIOŚ w Warszawie.
- 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.
- Rozbicka, K. i Rozbicki, T. (2014). Spatiotemporal variations of tropospheric ozone concentrations in the Warsaw Agglomeration (Poland). *Annals of Warsaw University of Life Sciences – SGGW, Land Reclamation*, 46(3), 247-261.
- Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 24 sierpnia 2012 r. w sprawie poziomów niektórych substancji w powietrzu (Dz.U z 2012 r., poz. 1031).
- Wojewódzki Inspektorat Ochrony Środowiska w Warszawie – WIOS (2014). *Stacje pomiarowe funkcjonujące w ramach systemu monitoringu atmosfery*. Pobrano z lokalizacji: <http://www.wios.warszawa.pl>.

Streszczenie

Charakterystyka stężeń zanieczyszczeń komunikacyjnych w powietrzu na obszarze Warszawy (Polska). Celem pracy jest

charakterystyka czasowego i przestrzennego rozkładu zanieczyszczeń komunikacyjnych (NO_2 , PM_{10} , O_3 , C_6H_6) na trzech stacjach monitoringu jakości powietrza na obszarze Warszawy. Analizowany okres to 2011–2013. Uzyskano wyższe stężenia na stacji Komunikacyjna niż na stacjach referencyjnych: Targówek i Ursynów. Wzrost stężeń zanieczyszczeń komunikacyjnych był obserwowany w godzinach szczytu: porannego o 7–11 oraz popołudniowego o 15–20 spowodowanego wzrostem natężenia ruchu drogowego na badanym obszarze. Określono również związek między wartościami stężenia analizowanych zanieczyszczeń i warunkami meteorologicznymi.

Summary

Characteristic of selected air pollutants concentration in Warsaw (Poland).

The aim of this work was to characterize the temporary and spatial distribution of traffic related air pollutants (NO_2 , PM_{10} , O_3 , C_6H_6) and assessment of the relationship between meteorological conditions and air pollution concentration from three monitoring stations in Warsaw area. In the period from 2011 to 2013 average annual values of concentration NO_2 were exceeded on all considered stations Warsaw (i.e. Komunikacyjna, Warszawa-Ursynów and Warszawa-Targówek). The values varied from 114 to 141% of permissible values ($40 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$). In case of PM_{10} concentration permissible concentration of annual average value was exceeded on two stations and in case of ozone and benzene excesses not occurred. The greatest concentration values for analyzed pollutants were recorded on Komunikacyjna station situated in the city center in close proximity of communication routes. The least concentration values were recorded for city suburb areas Ursynów and Targówek situated in greater distance from the biggest traffic streets than Komunikacyjna station. Statistical analysis shows the relationship between meteorological conditions and air pollution concentration.

logical conditions and high concentration of ozone during episode days and between particular meteorological elements and the concentration of analyzed air pollutants.

Authors' address:

Katarzyna Rozbicka
Laboratorium – Centrum Wodne
Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska
SGGW
ul. Ciszewskiego 6
02-776 Warszawa, Poland
e-mail: katarzyna_rozbicka@sggw.pl