

# Zanieczyszczenia powietrza – czym oddychamy w Polsce?

Air pollution – what do we breathe in Poland?

Artur Badyda<sup>1</sup>, Grzegorz Majewski<sup>2</sup>, Wioletta Rogula-Kozłowska<sup>3</sup>, Piotr Dąbrowiecki<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Wydział Instalacji Budowlanych, Hydrotechniki i Inżynierii Środowiska, Zakład Informatyki i Badań Jakości Środowiska, Politechnika Warszawska; kierownik: dr hab. inż. Artur Badyda

<sup>2</sup> Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska, Zakład Meteorologii i Klimatologii, Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie; kierownik: dr hab. inż. Grzegorz Majewski

<sup>3</sup> Zakład Ochrony Powietrza, Instytut Podstaw Inżynierii Środowiska PAN w Zabrze; kierownik: dr inż. Krzysztof Klejnowski

<sup>4</sup> Klinika Chorób Infekcyjnych i Alergologii CSK MON WIM w Warszawie; kierownik: prof. dr hab. n. med. Jerzy Kruszewski

Artykuł powstał na podstawie wykładu przedstawionego podczas VI Konferencji Naukowej im. gen. bryg. dr. hab. n. med. Wojciecha Lubińskiego „Wpływ zanieczyszczeń powietrza na stan zdrowia” 21.04.2016 r. w Wojskowym Instytucie Medycznym w Warszawie.

**Streszczenie.** Zanieczyszczenie powietrza atmosferycznego stanowi obecnie jeden z najbardziej kluczowych czynników warunkujących degradację środowiska naturalnego, wpływających negatywnie zarówno na świat roślin i zwierząt, jak i na konstrukcje oraz materiały budowlane, a przede wszystkim na zdrowie i jakość życia człowieka. Europejska Agencja Środowiska wskazuje, że przedwczesne zgony 520 tys. mieszkańców Unii Europejskiej (w tym ponad 51 tys. Polaków) w skali roku przypisuje się zanieczyszczeniu powietrza bardzo drobnym pyłem (tzw.  $PM_{2,5}$ ), dwutlenkiem azotu i ozonem troposferycznym. W największym stopniu są z tym zjawiskiem związane emisje z sektora komunalno-bytowego oraz z transportu, w mniejszym zaś stopniu z sektora produkcji i dystrybucji energii oraz z przemysłu. Emisje te przekładają się na jedne z największych stężeń zanieczyszczeń powietrza, zwłaszcza pyłów  $PM_{10}$  i  $PM_{2,5}$  oraz benzo(a)pirenu, w skali całej Unii Europejskiej. Skutkiem tej sytuacji jest ponadprzeciętnie duże narażenie Polaków na zanieczyszczone powietrze, skutkujące m.in. wspomnianym dużym wskaźnikiem umieralności na tle pozostałych 27 krajów UE.

**Słowa kluczowe:** zanieczyszczenia powietrza, źródła emisji zanieczyszczeń, jakość powietrza, zagrożenia zdrowotne

**Abstract.** Air pollution is currently one of the most critical determinants of environmental degradation, negatively affecting both plants and animals, but also structures and construction materials, and above all the health and quality of human life. The European Environment Agency indicates that the premature deaths of 520,000 EU citizens (including more than 51,000 Poles) per year are attributed to fine particulate matter (i.e.  $PM_{2,5}$ ), nitrogen dioxide and tropospheric ozone. This phenomenon is to the greatest extent related to emissions from the municipal sector and transport, whereas emissions from the energy production and distribution sector and industry are of less importance. These emissions result in one of the highest concentrations of air pollutants (in particular  $PM_{10}$  and  $PM_{2,5}$  and benzo(a)pyrene) across the whole European Union. The consequence is unusually high exposure of Poles to polluted air, resulting in, among others, the above mentioned high mortality rate in comparison to the remaining 27 countries of the EU.

**Key words:** air pollutants, air pollution emission sources, air quality, health threats

Nadesłano: 5.01.2017. Przyjęto do druku: 9.01.2017

Nie zgłoszono sprzeczności interesów.

Lek. Wojsk., 2017; 95 (1): 46–58

Copyright by Wojskowy Instytut Medyczny

**Adres do korespondencji**

dr hab. inż. Artur Badyda

Wydział Instalacji Budowlanych, Hydrotechniki i Inżynierii

Środowiska, Politechnika Warszawska

ul. Nowowiejska 20, 00-653 Warszawa

e-mail: artur.badyda@pw.edu.pl

## Dlaczego to, czym oddychamy jest ważne?

Jednym z najistotniejszych czynników odpowiedzialnych za degradację środowiska naturalnego jest wprowadzanie do powietrza atmosferycznego substancji o różnych parametrach fizykochemicznych, zmieniających

naturalny skład atmosfery. Ogólnie przyjęto nazywać je zanieczyszczeniami powietrza. Substancje te w sposób bezpośredni (wpływ na roślinność, materiały budowlane itd.) albo pośredni (np. wymywanie do gleb i kumulacja w tkankach roślin), jednak zawsze negatywnie, wpływają praktycznie na wszystkie komponenty środowiska, w tym człowieka.

Według Światowej Organizacji Zdrowia (WHO) zanieczyszczeniom samego powietrza atmosferycznego można było przypisać 3,7 mln przedwczesnych zgonów odnotowanych na świecie w 2012 roku, zaś po włączeniu do tych szacunków także tych zanieczyszczeń, na które narażeni są ludzie przebywający wewnątrz pomieszczeń (zanieczyszczenia w tzw. powietrzu wewnętrznym), liczba ta zwiększa się aż do 8 mln [1]. Wpływ na podane liczby mają głównie zgony notowane w dużych aglomeracjach miejskich, gdzie jakość powietrza jest zła. Na obszarach o mniejszym stopniu urbanizacji jakość powietrza jest z reguły lepsza [2].

Powietrze atmosferyczne zawiera szereg zanieczyszczeń o różnym potencjale wpływu na zdrowie, w tym tlenki azotu ( $\text{NO}_x$ ), tlenki siarki ( $\text{SO}_x$ ), tlenek węgla (CO), ozon troposferyczny ( $\text{O}_3$ ), związki organiczne (m.in. lotne związki organiczne, węglowodory aromatyczne, dioksyny) czy cząstki stałe, klasyfikowane najczęściej jako  $\text{PM}_{10}$  i  $\text{PM}_{2,5}$  (frakcje pyłu zawieszonego o średnicy aerodynamicznej cząstek nieprzekraczającej odpowiednio  $10\ \mu\text{m}$  i  $2,5\ \mu\text{m}$ ). Każda z tych substancji może wpływać na pojawienie się objawów upośledzenia wentylacji w badaniach czynnościowych oddychania, zwiększać częstość występowania nadreaktywności oskrzeli i zakażeń dolnych dróg oddechowych, nasilać objawy istniejących chorób alergicznych (zwłaszcza astmy) i wywoływać zmiany strukturalne w miększym ptuc. Najszerze spektrum chorób ostrych i przewlekłych, w tym przede wszystkim układu oddechowego i sercowo-naczyniowego, związane jest z narażeniem na cząstki stałe w powietrzu.

Dane Europejskiej Agencji Środowiska wskazują, że prawie 470 tys. przedwczesnych zgonów Europejczyków w 2013 roku mogło być związanych z ich narażeniem na oddziaływanie pyłu  $\text{PM}_{2,5}$ . Większość, bo niemal 440 tys., to mieszkańcy Unii Europejskiej, ale z wielu krajów spoza UE brakuje informacji w tym zakresie. Udział Polaków w tym zestawieniu to ponad 48 tys. Tymczasem liczbę przedwczesnych zgonów w Europie i w Polsce, za które odpowiadają łącznie  $\text{NO}_2$  i  $\text{O}_3$ , oceniono odpowiednio na niemal 90 tys. i 2,7 tys. [3]

Zanieczyszczenie powietrza pyłem  $\text{PM}_{10}$  i  $\text{PM}_{2,5}$  stanowi obecnie problem całego świata, przy czym w krajach o niskim i średnim poziomie dochodów jest on trudny lub wręcz niemożliwy do rozwiązania [4]. Ocena faktycznego oddziaływania zanieczyszczeń powietrza, w tym także cząstek stałych, na zdrowie człowieka oraz podejmowanie efektywnych działań ukierunkowanych na ograniczanie narażenia i zmniejszanie jego zdrowotnych następstw uwarunkowane są między innymi rzetelnością i dostępnością danych o stanie faktycznym, a więc o stężeniach substancji w powietrzu, ich zmienności przestrzennej i czasowej, a przede wszystkim o źródłach i udziale tych zanieczyszczeń w notowanych stężeniach. Pozyskiwanie tych danych, dbanie o ich

wiarygodność i reprezentatywność, jak również ich sensowne wykorzystanie powinny stanowić priorytety w zarządzaniu ochroną środowiska.

### Jakie są źródła emisji zanieczyszczeń do powietrza?

Jakość powietrza charakteryzowana jest głównie poprzez stężenia zanieczyszczeń różnego rodzaju. Jako że jest ona monitorowana głównie w miejscach zamieszkiwanych przez ludzi, powszechnie przyjęto, że powietrze jest najbardziej zanieczyszczone w dużych ośrodkach miejskich [5-7]. Co oczywiste, w obszarach sąsiadujących lub znajdujących się blisko takiego ośrodka powietrze również będzie gorszej jakości niż w odległych rejonach [8]. Można sobie zatem wyobrazić, że w skali globalnej ośrodki miejskie stanowią podstawowe źródła zanieczyszczeń powietrza. W skali kraju będą to pojedyncze miasta lub całe aglomeracje miejsko-przemysłowe, a w skali regionu – skupiska miejskie, obszary przemysłowe lub nawet pojedyncze ośrodki, takie jak elektrownia, huta czy osiedle złożone z kilku/kilkunastu budynków mieszkalnych [9,10]. Ta obrazowa klasyfikacja opiera się na założeniu, że zanieczyszczenia powietrza pochodzą wyłącznie ze źródeł antropogenicznych. Trzeba natomiast zaznaczyć, że w skali globalnej niektóre zanieczyszczenia, np. lotne związki organiczne czy pyły, pochodzą w większości (masowo) ze źródeł naturalnych (oceany, roślinność, wulkany, pustynie itp.). Istnieją dwa główne uzasadnienia powszechnego uzależniania jakości powietrza od emisji antropogenicznych. Po pierwsze, większość związków silnie toksycznych lub kancerogennych (np. niektóre metale ciężkie, takie jak ołów, rtęć czy kadm, dioksyny, wielopierścieniowe węglowodory aromatyczne) pochodzi z emisji związanych z działalnością człowieka [11,12]. Po drugie, związki i substancje emitowane ze źródeł naturalnych są mniej więcej równomiernie rozłożone w skali globu i stanowią coś w rodzaju naturalnego tła, a tym samym to nadwyżka w stosunku do tego tła, powodowana emisjami antropogenicznymi w pewnych narażonych na nią obszarach, klasyfikowana jest jako nadmierne zanieczyszczenie powietrza daną substancją [13,14].

Presja na środowisko wynikająca z emisji substancji zanieczyszczających do powietrza atmosferycznego jest korygowana przez lokalne warunki klimatyczne, meteorologiczne czy topograficzne, ułatwiając lub utrudniając rozprzestrzenianie się i przemiany chemiczne zanieczyszczeń w powietrzu, a tym samym zmniejszając lub zwiększając ich stężenia w powietrzu oraz ładunek do pozostałych komponentów środowiska. Niemniej jednak sama wielkość emisji pozostaje kluczowym czynnikiem warunkującym stężenia zanieczyszczeń powietrza, przynajmniej w skali lokalnej. W zmienności czasowej

i przestrzennej stężeń zanieczyszczeń w powietrzu zasadnicze znaczenie mają natomiast same procesy zachodzące w atmosferze, tj. transport powietrza, dyfuzja turbulencyjna, sucha i mokra depozycja czy przemiany fizykochemiczne składników powietrza, w tym zwłaszcza takie, które przyczyniają się do powstawania zanieczyszczeń wtórnych (np. ozonu troposferycznego, wtórnej materii organicznej i nieorganicznej) [15]. Intensywność tych procesów, oprócz samej ilości zanieczyszczeń w powietrzu, zależy od wielu innych czynników, głównie od zagospodarowania i topografii terenu oraz warunków meteorologicznych (typ cyrkulacji atmosferycznej, stan równowagi atmosfery, prędkość i kierunek wiatru, temperatura powietrza i jej pionowy gradient, wysokość warstwy mieszania, wielkość i rodzaj opadów atmosferycznych, natężenie promieniowania słonecznego czy wilgotność powietrza) [15-17].

Przechodząc zatem do skali zupełnie lokalnej, a jednak wciąż pamiętając o tym, że lokalne zanieczyszczenie może być źródłem dla regionalnego, a ten dla krajowego czy globalnego zanieczyszczenia powietrza, można wskazać dominujące źródła emisji antropogenicznych. Należą do nich: produkcja i dystrybucja energii, przemysł (w tym pozyskiwanie i produkcja różnego rodzaju surowców i materiałów, a także przetwarzanie i utylizacja surowców oraz odpadów), tzw. źródła komunalno-bytowe (w tym przede wszystkim gospodarstwa domowe, a także związane z nimi użytkowanie paliw i innych surowców) oraz wszelkiego rodzaju transport (w miastach największe znaczenie ma transport drogowy i związana z nim szeroko rozumiana emisja komunikacyjna) [18,19].

Źródła te klasyfikowane są w inwentaryzacjach emisji jako tzw. sektory. Są one raportowane zgodnie z wymogami Konwencji Genewskiej (*long-range transboundary air pollution* – LRTAP) [20]. Dane z inwentaryzacji emisji prowadzonej w 2014 roku wskazują, iż sektor produkcji i dystrybucji energii jest głównym źródłem emisji tlenków siarki w państwach Unii Europejskiej i ma udział w całkowitej emisji tlenków siarki na poziomie 58% średnio dla wszystkich państw Wspólnoty i 53% w Polsce. Jest to także poważne źródło emisji tlenków azotu (ok. 20% w UE i ok. 34% w Polsce). W przypadku innych zanieczyszczeń udział sektora produkcji i dystrybucji energii w ich całkowitej emisji jest relatywnie mały. Wyjątkiem jest jego dość duży udział w emisji pyłów w Polsce (ponad 14% w przypadku  $PM_{10}$  i niemal 12% w przypadku  $PM_{2,5}$ ). Wydaje się, że wynika to z dużego udziału energetyki węglowej w całkowitym bilansie produkcji energii elektrycznej i ciepłej w Polsce.

Przemysł, czyli tzw. sektor przemysłu (procesy produkcyjne wraz ze zużyciem energii w procesach przemysłowych), jest znaczącym źródłem emisji niemetalicznych lotnych związków organicznych (NMLZO), które w krajach Unii Europejskiej są emitowane z tego sektora średnio w ponad 51%, zaś w Polsce w niemal 45%.

W przypadku emisji większości pozostałych zanieczyszczeń inwentaryzowanych zgodnie ze wspomnianą powyżej konwencją sektor przemysłu jest zauważalnym, choć niedominującym źródłem emisji. Ma on w skali Unii Europejskiej około 24% udziału w całkowitych emisjach tlenku węgla i tlenków siarki, 22% udziału w emisji pyłów  $PM_{10}$  i 17% udziału w emisji pyłów  $PM_{2,5}$  oraz ponad 15% udziału w emisji tlenków azotu i 11% udziału w emisji wielopierścieniowych węglowodorów aromatycznych. W Polsce sektor przemysłowy ma prawie 15% udziału w całkowitej emisji tlenków siarki, natomiast w przypadku pozostałych rodzajów zanieczyszczeń analogiczne udziały są mniejsze (13–15% w przypadku pyłów, ok. 11% w przypadku tlenku węgla, nieco ponad 9% dla tlenków azotu, oraz poniżej 2% dla wielopierścieniowych węglowodorów aromatycznych). Wynika to po części z relatywnie słabiej rozwiniętego przemysłu na terenie Polski niż w niektórych państwach UE, ale jest również efektem inwestycji ze strony zakładów w nowoczesne rozwiązania technologiczne i instalacje, w tym w urządzenia do oczyszczania spalin. Inwestycje te, w pewnym stopniu wymuszone poprzez wciąż zaostrzane przepisy prawa, przyczyniły się do ograniczenia emisji tego sektora na środowisko w Polsce. Obserwowane tendencje mogą po części wynikać również ze znacząco większego, w porównaniu ze średnim dla Unii Europejskiej, udziału w emisji całkowitej innych sektorów, przede wszystkim tzw. sektora komunalno-bytowego.

Sektor komunalno-bytowy jest obecnie zdecydowanie dominującym źródłem emisji pyłów, wielopierścieniowych węglowodorów aromatycznych i tlenku węgla. Średni we wszystkich państwach Unii Europejskiej udział tego sektora w emisji zanieczyszczeń pyłowych to ponad 40% dla  $PM_{10}$  oraz przeszło 56% dla  $PM_{2,5}$ . W przypadku Polski analogiczny udział wynosi 52% dla  $PM_{10}$  i 56% dla  $PM_{2,5}$ . W przypadku wielopierścieniowych węglowodorów aromatycznych i tlenku węgla udział sektora komunalno-bytowego w całkowitej ich emisji utrzymuje się na poziomie odpowiednio 54% i 45% w UE oraz 86% i 65% w Polsce. Jest to szczególnie istotne ze względu na skutki zdrowotne obecności w powietrzu wielopierścieniowych węglowodorów aromatycznych i fakt, że źródła komunalno-bytowe nie są wyposażone w żadne urządzenia do oczyszczania spalin. Emisje z tego sektora gospodarki są z racji specyficznego położenia i konstrukcji odpowiedzialnych za nie źródeł (emisje mają miejsce w rejonie przebywania ludzi, zazwyczaj na niewielkich wysokościach od poziomu gruntu) oraz rodzajów emitowanych substancji (zanieczyszczenia pyłowe, w tym metale toksyczne i metaloidy, węglowodory itd.) szczególnie uciążliwe dla środowiska, a przede wszystkim dla zdrowia człowieka. Uznawane są za kluczowy czynnik warunkujący jakość powietrza w wielu rejonach miejskich Europy, przede wszystkim Środkowo-Wschodniej, w tym Polski [10,21].

Tabela 1. Emisja wybranych zanieczyszczeń powietrza z poszczególnych sektorów gospodarki w 28 państwach Unii Europejskiej w 2014 roku

Table 1. Emission of selected air pollutants from different sectors of economy in 28 European Union countries in 2014

	CO	NMLZO	NO <sub>x</sub>	PM <sub>10</sub>	PM <sub>2,5</sub>	SO <sub>x</sub>	WWA
	[Gg]						[Mg]
<b>łącznie wszystkie źródła</b>	<b>21440,8</b>	<b>6722,6</b>	<b>7819,5</b>	<b>1869,6</b>	<b>1214,4</b>	<b>3082,9</b>	<b>1115,6</b>
produkcja i dystrybucja energii	707,2	628,0	1582,3	110,3	61,7	1773,3	35,5
zuzycie energii w przemyśle	2770,8	134,4	982,7	101,2	81,8	546,5	53,6
transport drogowy	4575,9	715,2	3078,0	214,5	158,7	6,2	59,1
pozostały transport	440,7	99,0	552,1	32,7	25,9	66,5	1,2
sektor komunalny i mieszkaniowy	9726,1	1047,0	1126,7	748,8	684,6	480,0	603,4
procesy produkcyjne i zużycie produktów	2413,9	3319,7	211,5	315,4	125,1	201,4	70,1
rolnictwo	682,9	715,3	275,0	318,9	54,8	6,1	280,9
zagospodarowanie odpadów	110,6	62,9	11,0	25,0	19,4	2,9	10,4
pozostałe źródła	12,7	1,0	0,2	2,8	2,5	0,0	1,6

Na podstawie danych Europejskiej Agencji Środowiska, według stanu na 7 grudnia 2016 r. [www.eea.europa.eu/data-and-maps/data/data-viewers/air-emissions-viewer-lrtap](http://www.eea.europa.eu/data-and-maps/data/data-viewers/air-emissions-viewer-lrtap)

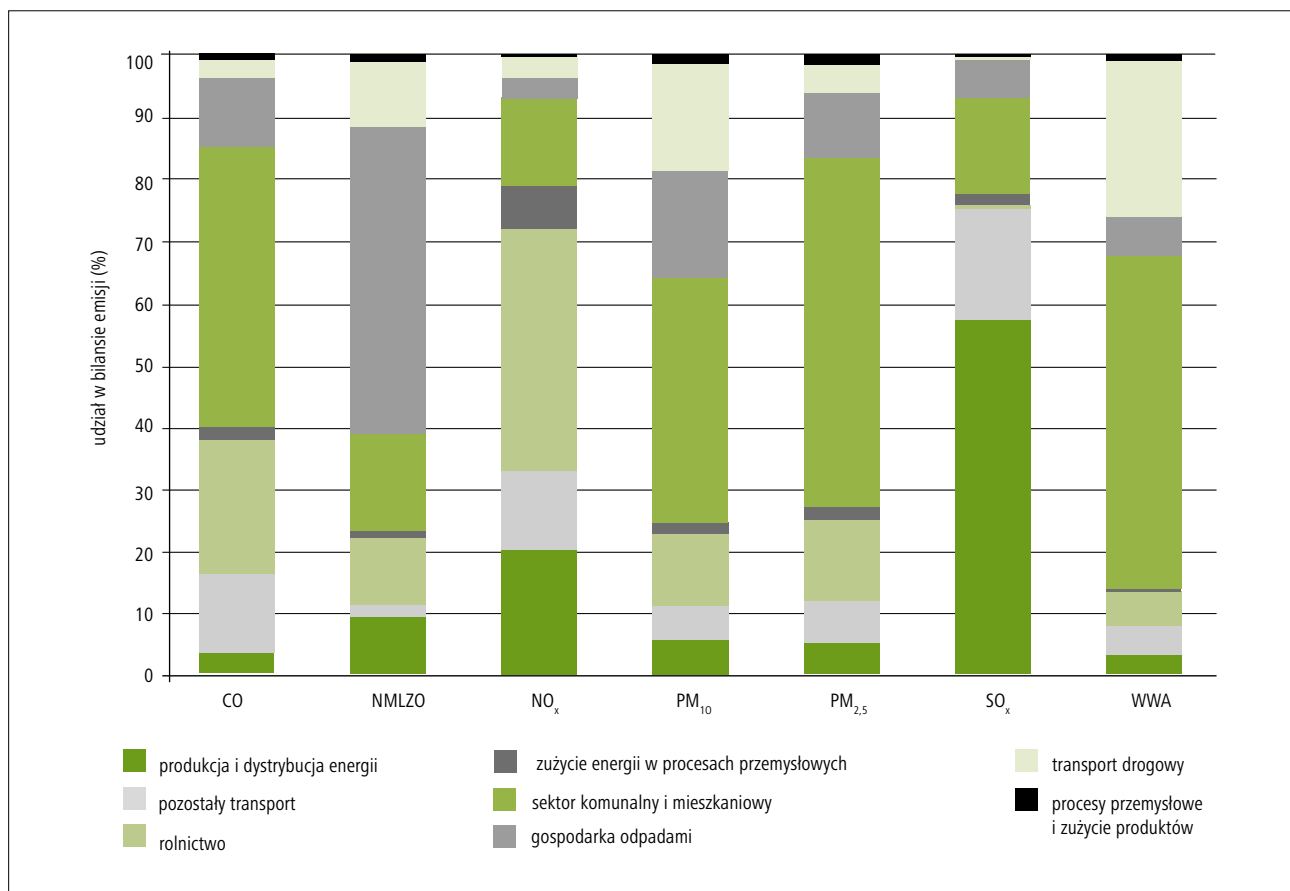
W wielu europejskich obszarach, zwłaszcza w dużych miastach, dominującym źródłem emisji zanieczyszczeń powietrza jest sektor transportu, przede wszystkim drogowego [9,19,22]. W skali UE jest on kluczowym źródłem emisji tlenków azotu (39%) oraz ważnym źródłem emisji tlenku węgla (21%). Znaczący jest również udział tego sektora w emisji lotnych związków organicznych (niemal 11%) oraz zanieczyszczeń pyłowych (12% w przypadku PM<sub>10</sub> i 13% w przypadku PM<sub>2,5</sub>). W Polsce udział sektora transportu w emisji większości z wymienionych zanieczyszczeń jest nieco niższy niż w UE i kształtuje się na poziomie 30%, 21%, 19%, 9% i 13% odpowiednio dla tlenków azotu, tlenku węgla, lotnych związków organicznych, PM<sub>10</sub> i PM<sub>2,5</sub>.

W tabeli 1. zaprezentowano wielkość emisji zanieczyszczeń z podstawowych źródeł (sektorów) na terenie wszystkich państw UE, zaś na rycinie 1. udziały poszczególnych sektorów w całkowitej emisji wybranych substancji zanieczyszczających powietrze na podstawie danych z Europejskiej Agencji Środowiska według stanu na rok 2014.

Z przedstawionych powyżej danych można wnioskować o dysponowaniu znaczną wiedzą w odniesieniu do źródeł emisji i ich udziałów w stężeniach poszczególnych zanieczyszczeń. W rzeczywistości jest to jednak tylko wiedza na poziomie globalnym i krajowym. Zarówno źródła emisji, jak i osoby narażone na oddziaływanie zanieczyszczeń atmosferycznych nie są równomiernie rozmieszczone w skali globu ani nawet kraju czy miasta. Populacja niewielkiej miejscowości (czy podmiejskiego osiedla) nie będzie narażona na oddziaływanie zanieczyszczeń komunikacyjnych czy przemysłowych w takim

samym stopniu jak populacja dużej aglomeracji miejskiej lub miejsko-przemysłowej. Z kolei na peryferyjnych obszarach miast czy terenach pozamiejskich większe narażenie może wynikać z emisji ze źródeł komunalno-bytowych, związanych z intensywnym ogrzewaniem indywidualnym budynków mieszkalnych (zwłaszcza jednorodzinnych), spalaniem odpadów czy biomasy, ale także grillowaniem. Oznacza to, że zmniejszenie w skali całego regionu emisji przemysłowych czy komunikacyjnych nie przełoży się na zmniejszenie narażenia całej populacji, jako że nie w każdym miejscu tego obszaru stężenia danego zanieczyszczenia ulegną takiemu samemu zmniejszeniu.

Innym problemem jest wpływ na rozkład stężeń zanieczyszczeń samego położenia obszaru, zagospodarowania terenu i warunków klimatycznych. W zależności od miejsca i okresu ich stężenia będą się zmieniać nieproporcjonalnie do zmian emisji. Niektóre rejony, w których stężenia zanieczyszczeń powinny być małe (ze względu na brak znaczących źródeł), mogą być narażone na napływ zanieczyszczeń z innych rejonów. W związku z tym dane o emisji zanieczyszczeń, które mają służyć rzetelnej i efektywnej redukcji stężeń, a dalej także narażenia ludzi na zanieczyszczenia, muszą być gromadzone w jak najmniejszej skali, kompleksowo i z uwzględnieniem różnych czynników mogących wpływać na notowane wielkości. Przykładem może być inwentaryzacja emisji ze spalania paliw stałych w domach i mieszkaniach. Aby była ona wiarygodna, powinna uwzględniać nie tylko ilości węgla i drewna spalanych przez mieszkańców danego rejonu, ale również dokładne parametry spalanych paliw (klasa jakościowa



**Rycina 1.** Udział poszczególnych sektorów gospodarki w bilansie emisji wybranych zanieczyszczeń powietrza w Unii Europejskiej w 2014 roku  
**Figure 1.** Percentage in emission balance of selected air pollutants in the European Union in 2014 by economy sectors

węgla, gatunek drewna, wilgotność paliwa itp.), informacje o parametrach procesu spalania (klasy jakościowe urządzeń grzewczych) czy przekształcanych w tych samych paleniskach innych materiałach, zwłaszcza odpadach. Podobnie jest w przypadku emisji związanych z ruchem drogowym. O ile stosunkowo łatwo dokładnie ocenić liczbę samochodów w danym rejonie, ich kategorię (samochód osobowy, dostawczy, ciężarowy, autobus itp.) i wiek, to już znacznie trudniejsze jest określenie profilu prędkości ruchu na określonych odcinkach dróg, a co za tym idzie także ilości zużywanego paliwa, a więc parametrów decydujących o wielkości emisji zanieczyszczeń (w tym bezpośredniej emisji wynikającej ze spalania paliwa, ale także emisji powstającej w wyniku ścierania klocków i tarcz hamulcowych, układów sprzęgłowych, opon czy karoserii). Niemożliwe jest natomiast określenie dokładnego profilu stanu technicznego pojazdów (zwłaszcza wyposażenia, np. w filtr cząstek stałych, sprawny reaktor katalityczny itp.) czy rzeczywistych parametrów spalnego paliwa.

W związku z tymi ograniczeniami prowadzonych jest szereg badań umożliwiających ocenę pochodzenia

zanieczyszczeń w danym punkcie czy obszarze, opartych o analizę stężeń zanieczyszczeń na tym terenie i ich wzajemne relacje. Przyjmuje się założenie, że każde źródło zanieczyszczeń ma swój profil emisji, a zatem mieszana substancja emitowanych z określonego rodzaju źródła ma mniej więcej ustalony skład chemiczny [23-25]. Związki chemiczne występujące u źródła na ogół występują także w punkcie pomiarowym. Daje to możliwość powiązania konkretnych zanieczyszczeń w miejscu pomiaru z lokalnymi źródłami tych zanieczyszczeń, albo szerzej, przy powiązaniu pomiarów stężeń z warunkami meteorologicznymi czy klimatologicznymi, przypisania pochodzenia wybranym zanieczyszczeniom. Na całym świecie, przy wykorzystaniu różnych metod, informacje o składzie chemicznym powietrza na danym obszarze od dawna wykorzystywane są do identyfikacji źródeł zanieczyszczeń powietrza. Z powodzeniem stosowane są zarówno metody najprostsze, oparte na wyznaczeniu korelacji między danymi z monitoringu i warunkami meteorologicznymi (prędkość wiatru, opady, temperatura powietrza, ciśnienie atmosferyczne, wilgotność względna powietrza) [26-30] czy porównywaniu stężeń



zmierzonych w tzw. tle (np. regionalnym) ze stężeniami w wybranych punktach obszarów miejskich (tło miejskie, kanion uliczny itp.) [19,31,32], ale też bardziej zaawansowane metody statystyczne (np. analiza składowych głównych – Principal Component Analysis [PCA] i jej modyfikacje) [10,21,33-35] oraz tzw. modele receptorowe [33,35-38]. W przypadku oddziaływania na punkt pomiarowy kilku źródeł zanieczyszczeń o zbliżonym profilu chemicznym (np. emisja komunikacyjna i emisja z niektórych procesów przemysłowych) trzeba znaleźć i zastosować specyficzne dla zidentyfikowanych źródeł markery emisji [10,21,39,40] lub stwierdzić odpowiednie zależności pomiędzy emitowanymi z tych źródeł składnikami [41-43].

### Jak kształtuje się jakość powietrza w Polsce?

W Polsce brakuje danych zarówno o profilach chemicznych gazów odprowadzanych do powietrza z różnych źródeł, jak i o powiązaniu składu chemicznego powietrza w różnych obszarach ze źródłem zanieczyszczeń powietrza. Większość informacji o składzie spalin i gazów odłotowych z różnych procesów bazuje na tzw. wskaźnikach emisji [44-46]. Istnieje jednak spora baza danych o składnikach pyłów emitowanych z różnych źródeł opracowana na podstawie wieloletnich badań [11,47-49].

Ze względu na kluczowe znaczenie cząstek stałych w ocenie jakości powietrza najwięcej prac dotyczących powiązania danych o składzie chemicznym powietrza w różnych obszarach Polski z pochodzeniem zanieczyszczeń dotyczy pyłów zawieszonych  $PM_{2,5}$  i  $PM_{10}$  [10,50,51]. Analiza publikowanych dotąd danych pozwoliła wykazać, że emisja komunalna w południowej części Polski stanowi najpoważniejsze źródło zanieczyszczenia powietrza. Jest ono w zasadzie niemożliwe do kontrolowania ze względu na rozproszony charakter kluczowych źródeł emisji pyłów (indywidualne gospodarstwa domowe), które w chwili obecnej nie podlegają w zasadzie żadnej kontroli w zakresie emisji zanieczyszczeń do powietrza. Oddziaływanie emisji zanieczyszczeń ze źródeł komunalno-bytowych powoduje zacieranie się różnic między właściwościami (stężeniami i składem chemicznym) pyłu drobnego w lokalizacjach miejskich i pozamiejskich. W zależności od pory roku w miastach na południu Polski (np. Zabrze, Katowice, Racibórz) 50–70%, a w miastach na północy Polski (np. Gdańsk) 15–40% masy pyłu  $PM_{2,5}$  pochodzi z emisji komunalnej i przemysłowej. W miastach na południu kraju, zależnie od pory roku, około 2–8%, a w miastach środkowej części Polski i na północy około 4–15% masy pyłu  $PM_{2,5}$  może pochodzić z transportu drogowego, zaś z energetyki 8–25%. W obszarze stanowiącym tło zanieczyszczenia powietrza dla kraju (Diabla Góra) z sektora produkcji i dystrybucji

energii pochodzi nawet 40% masy pyłu  $PM_{2,5}$ . Oszacowano również udział naturalnych emisji w stężeniach drobnego pyłu. I tak materia mineralna/glebowa stanowi w polskich miastach około 5–15% masy pyłu  $PM_{2,5}$  w zależności od sezonu, a sól morska od 10–15% na obszarze miejskim Polski Północnej.

Monitoring jakości powietrza w Polsce prowadzony jest w ramach Państwowego Monitoringu Środowiska, a zakres informacji wytwarzanych w ramach tego systemu określa ustawa Prawo ochrony środowiska – art. 25 i 26 [52]. Corocznie wojewódzkie inspektoraty ochrony środowiska dokonują oceny jakości powietrza w wyznaczonych strefach ze względu na ochronę zdrowia ludzi i ochronę roślin. Monitorowanych jest łącznie 12 zanieczyszczeń podlegających ocenie. Są to: dwutlenek siarki –  $SO_2$ , dwutlenek azotu –  $NO_2$ , tlenek węgla –  $CO$ , benzen –  $C_6H_6$ , ozon –  $O_3$ , pył zawieszony  $PM_{10}$  i pył zawieszony  $PM_{2,5}$ , a także zanieczyszczenia oznaczane w pyłe  $PM_{10}$  – metale ciężkie (ołów, kadm, nikiel i arsen) oraz benzo(a)piren. Oceny jakości powietrza dokonuje się osobno dla każdego zanieczyszczenia na obszarze każdej z 46 stref (ze względu na ochronę roślin w 16 strefach), obejmujących obszar całego kraju. Podstawę oceny jakości powietrza w Polsce stanowią kryteria określone w odrębnych przepisach [53-56].

Na podstawie wyników rocznej oceny jakości powietrza dokonuje się klasyfikacji stref. Strefy, na terenie których występują obszary z przekroczeniami poziomu dopuszczalnego danego zanieczyszczenia, zalicza się do klasy C, natomiast strefy, gdzie stężenie tej substancji w powietrzu jest mniejsze od dopuszczalnego, czyli takie, na których nie występują przekroczenia wartości dopuszczalnych, zalicza się do klasy A. Zaliczenie strefy do klasy C wskazuje na potrzebę podjęcia stosownych działań naprawczych zmierzających do redukcji stężeń tego zanieczyszczenia, w przypadku którego przekroczenie stężeń dopuszczalnych powoduje zaliczenie go do klasy C.

W tabeli 2. zebrano informacje o liczbie stref sklasyfikowanych jako obszary o najgorszej klasie czystości powietrza – C, według danych z dwóch ostatnich ocen rocznych (lata 2014 i 2015). Jak widać, o zaliczeniu niektórych obszarów w Polsce do klasy C decyduje sześć zanieczyszczeń:  $NO_2$ ,  $O_3$ ,  $PM_{10}$ ,  $PM_{2,5}$ , As i benzo(a)piren. O ile w przypadku  $NO_2$ ,  $O_3$  i As tylko kilka albo wręcz jedna strefa w całej Polsce zaklasyfikowana jest do klasy C, a więc stężenia danego zanieczyszczenia tylko w jej obrębie są większe niż dopuszczalne, to w przypadku cząstek stałych  $PM_{2,5}$ ,  $PM_{10}$  oraz związanego z pyłem  $PM_{10}$  benzo(a)pirenu przekroczenia dotyczą wielu stref i praktycznie wszystkich województw. W 2014 roku wszystkie 46 stref zaliczono do klasy C ze względu na benzo(a)piren, natomiast w roku 2015 42 strefy. Ze względu na pył zawieszony  $PM_{10}$  w 2014 roku klasę C przypisano 42 strefom, a w 2015 roku 39 strefom. Ze względu na pył  $PM_{2,5}$

Tabela 2. Liczba stref zaliczonych do klasy C w poszczególnych województwach w latach 2014 i 2015 (Źródło: Państwowy Monitoring Środowiska – Inspekcja Ochrony Środowiska; 2015; 2016)

Table 2. Number of zones classified as class C in each of regions (voivodeships) of Poland in the years 2014 and 2015 (Source: State Environmental Monitoring – Environmental Protection Inspectorate; 2015; 2016)

województwo	liczba stref w województwie	NO <sub>2</sub>		O <sub>3</sub>		PM <sub>10</sub>		As		B(a)P		PM <sub>2,5</sub>	
		2014	2015	2014	2015	2014	2015	2014	2015	2014	2015	2014	2015
dolnośląskie	4	1	1	1	1	4	4	2	2	4	4	2	3
kujawsko-pomorskie	4					4	4			4	4		1
lubelskie	2					2	2			2	2		2
lubuskie	3					2	1			3	3		
łódzkie	2					2	2			2	2	2	2
małopolskie	3	1	1		1	3	3			3	3	2	2
mazowieckie	4	1	1			4	4			4	4	4	2
opolskie	2			1	1	2	2			2	2	1	1
podkarpackie	2					2	2			2	2	2	1
podlaskie	2					1	1			2	2	1	1
pomorskie	2					2	2			2	2	1	
śląskie	5	1	1	1	3	5	5			5	5	5	5
świętokrzyskie	2					2	2			2	2	1	1
warmińsko-mazurskie	3					2	1			3	2		
wielkopolskie	3					3	3			3	3	1	2
zachodniopomorskie	3					2	1			3	2		
suma	46	4	4	3	6	42	39	2	2	46	44	22	23

Źródło: [www.powietrze.gios.gov.pl/pjp/maps/air/quality/type/R](http://www.powietrze.gios.gov.pl/pjp/maps/air/quality/type/R)

klasę C w 2014 roku przypisano 22 strefom, a w 2015 roku 23 strefom.

W przypadku stężeń większości zanieczyszczeń powietrza stanowiących podstawę oceny jego jakości (SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, CO, C<sub>6</sub>H<sub>6</sub>, O<sub>3</sub>, ołów, kadm, nikiel i arsen) spełnione są przepisy o dopuszczalnym stężeniu tych substancji w powietrzu. Pod względem jednak zanieczyszczenia powietrza PM<sub>10</sub>, PM<sub>2,5</sub> i benzo(a)pirenem jakość powietrza należy uznać za bardzo złą w odniesieniu do niemal całego obszaru Polski. Raporty i doniesienia naukowe w zasadzie potwierdzają taką konkluzję, pokazując, że jakość powietrza w Polsce pod względem tych trzech zanieczyszczeń powietrza należy do najgorszych wśród krajów Unii Europejskiej [3,57]. Sytuacja ta jest niepokojąca ze względu na dwa fakty. Po pierwsze, przekroczenia dotyczą substancji o szczególnie silnym negatywnym wpływie na zdrowie [58-61]. Poza tym w kontekście redukcji emisji zanieczyszczeń pyłowych i ogólnie zanieczyszczeń (w tym również węglowodorów aromatycznych, których przedstawicielem jest benzo(a)piren), jaka nastąpiła w ostatnich kilku dekadach, bardzo skomplikowane wydaje się znalezienie rozwiązania, które pozwoli zredukować w sposób znaczący stężenia pyłów PM<sub>10</sub>,

PM<sub>2,5</sub> i benzo(a)pirenu w powietrzu. Wydaje się, że ograniczanie emisji w sektorze energetycznym, emisji przemysłowych czy z sektora transportu poprzez wprowadzanie kolejnych norm i standardów emisyjnych nie rozwiąże problemu [56]. Najlepszym podparciem tej tezy jest obraz przebiegu długoterminowego stężeń pyłu PM<sub>10</sub> i benzo(a)pirenu w Polsce (tab. 3.-4.).

Stężenia zanieczyszczeń pyłowych i związanych z nimi wielopierścieniowych węglowodorów aromatycznych w Polsce utrzymują się na zbliżonym poziomie od kilkunastu lat, a w niektórych województwach można nawet obserwować narastający ich poziom w ostatnich kilku latach. Należy tu podkreślić, że z roku na rok liczba stacji, w których monitorowane są zanieczyszczenia, ulega zmianie, zaś liczba punktów pomiarowych, a tym samym danych dla danego województwa, wpływa na zmienność obserwowanych wartości. Niemniej jednak maksymalne stężenia notowane w większości województw utrzymują się na poziomie wyższym lub zbliżonym do poziomu uznanego za tzw. dopuszczalny (40 µg/m<sup>3</sup> dla pyłu PM<sub>10</sub> i 1 ng/m<sup>3</sup> dla benzo(a)pirenu, zgodnie z zapisami w dyrektywach 2008/50/WE i 2004/107WE) [54,55]. Dość pesymistyczną

Tabela 3. Średnie stężenia PM<sub>10</sub> (μg m<sup>-3</sup>) w latach 2000–2015 w województwach (średnie stężenie roczne w województwie, średnie roczne minimalne i maksymalne)Table 3. Mean PM<sub>10</sub> concentrations (μg m<sup>-3</sup>) in the years 2000–2015 in Polish regions (voivodeships) (annual mean concentration in region, average annual minimum and maximum)

województwa		2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
dolnośląskie	l. stacji	1	2	2	26	35	43	39	38	37	35	28	29	34	31	24	25
	średnia	36,4	27,3	25,3	24,1	23,3	27,0	29,9	25,3	24,6	27,6	34,5	33,3	31,7	28,4	34,2	32,7
	min	36,4	18,0	13,2	7,6	5,9	8,0	7,4	7,5	8,4	6,1	18,6	16,9	14,3	15,9	20,4	18,7
	max	36,4	36,7	37,4	48,8	61,0	53,2	90,2	51,9	60,2	60,1	71,3	62,1	81,7	47,0	68,6	61,8
kujawsko-pomorskie	l. stacji	1	2	3	8	12	20	25	27	28	24	25	20	22	14	18	21
	średnia	37,0	27,5	30,8	33,5	24,0	27,4	30,2	24,9	25,5	29,3	28,9	28,6	29,5	28,3	33,0	31,5
	min	37,0	23,5	23,5	16,0	15,9	15,8	15,2	10,6	11,8	12,7	13,9	13,4	9,5	10,2	19,3	17,5
	max	37,0	31,4	37,1	57,1	41,9	42,8	53,3	43,1	43,5	59,5	43,4	47,0	39,7	43,7	48,3	43,4
lubelskie	l. stacji		1	5	5	10	10	13	18	18	14	13	8	8	8	7	8
	średnia		15,3	31,7	27,6	26,1	27,2	36,8	30,3	29,8	29,9	32,3	33,9	30,8	29,9	31,9	32,6
	min		15,3	10,7	9,8	13,0	13,2	26,4	24,4	20,0	16,5	18,1	30,6	28,3	27,6	30,1	29,2
	max		15,3	53,2	42,3	37,8	37,5	46,6	37,6	42,4	37,0	40,5	37,6	33,8	33,6	34,1	36,5
lubuskie	l. stacji						4	4	5	8	7	6	5	7	7	11	11
	średnia						29,5	32,2	24,7	26,5	32,4	31,9	32,1	27,6	26,4	29,2	26,0
	min						17,8	19,3	13,0	14,8	15,7	19,5	22,7	20,3	21,6	23,9	20,0
	max						35,3	40,7	31,1	42,7	61,1	45,7	41,3	38,4	31,1	36,1	29,8
łódzkie	l. stacji	1	1	1	9	17	18	15	18	16	17	16	24	22	21	24	26
	średnia	45,8	42,1	41,6	42,7	37,1	33,4	36,7	28,5	27,7	33,7	43,7	44,1	40,7	39,3	39,5	37,3
	min	45,8	42,1	41,6	28,1	22,2	16,6	26,2	19,1	18,6	23,6	28,4	26,6	24,3	24,4	25,2	23,6
	max	45,8	42,1	41,6	61,7	54,3	55,5	60,7	52,6	36,9	61,5	58,3	64,4	60,2	53,3	55,0	55,8
małopolskie	l. stacji	2	2	1	12	20	25	25	23	24	28	29	23	24	22	29	26
	średnia	36,2	34,9	89,1	49,9	40,5	51,9	65,8	55,4	49,6	49,4	57,8	55,0	47,8	43,1	40,0	42,1
	min	35,5	27,3	89,1	30,5	6,3	10,1	19,8	42,6	35,3	25,7	26,7	34,5	34,0	27,2	29,4	27,6
	max	37,0	42,6	89,1	80,6	70,6	88,2	146,8	90,8	80,9	78,5	107,6	87,0	65,8	59,7	63,9	72,4
mazowieckie	l. stacji	1	1	1	5	30	31	31	29	24	25	19	17	18	20	19	18
	średnia	38,0	36,9	40,9	35,2	30,4	32,6	37,1	28,7	31,1	32,4	36,7	36,8	35,6	32,2	33,1	33,2
	min	38,0	36,9	40,9	24,2	18,7	15,4	23,2	17,9	21,8	16,9	30,8	25,0	22,9	21,5	25,3	23,9
	max	38,0	36,9	40,9	41,6	50,8	52,0	59,3	47,1	47,4	50,4	52,4	49,1	43,7	39,7	41,9	43,7
opolskie	l. stacji				3	9	11	10	10	10	9	8	8	7	6	10	10
	średnia				51,7	40,9	34,0	44,9	34,7	32,9	36,6	41,8	47,3	36,6	36,4	37,4	34,1
	min				42,4	27,2	3,3	30,2	27,1	19,5	28,4	35,2	35,4	32,4	29,4	32,2	30,7
	max				64,5	54,6	48,8	61,0	39,7	39,6	47,4	48,3	71,0	41,7	40,5	45,4	39,2
podkarpackie	l. stacji	1	1		2	3	8	10	14	18	16	11	8	11	10	13	14
	średnia	56,5	59,7		53,8	37,3	37,3	36,6	32,3	33,6	34,3	43,7	42,4	37,5	34,1	31,8	32,5
	min	56,5	59,7		31,0	25,0	23,8	21,3	20,9	21,5	22,1	38,2	35,1	15,5	27,9	28,3	29,9
	max	56,5	59,7		76,6	52,6	44,8	52,6	47,3	55,0	49,9	53,8	48,5	49,9	42,7	38,5	44,4



Tabela 3. Średnie stężenia  $PM_{10}$  ( $\mu g m^{-3}$ ) w latach 2000–2015 w województwach (średnie stężenie roczne w województwie, średnie roczne minimalne i maksymalne) – cd.Table 3. Mean  $PM_{10}$  concentrations ( $\mu g m^{-3}$ ) in the years 2000–2015 in Polish regions (voivodeships) (annual mean concentration in region, average annual minimum and maximum)

województwa		2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	
podlaskie	l. stacji			2	3	6	6	5	5	6	6	5	6	6	4	4	5	
	średnia			52,0	40,7	29,3	29,0	32,2	25,9	25,3	28,0	26,4	28,7	26,3	24,1	27,6	27,4	
	min			50,1	26,8	23,6	24,5	26,3	21,9	21,5	23,4	22,1	21,4	19,9	19,2	24,9	24,2	
	max			54,0	53,1	43,4	32,1	37,9	30,7	31,3	34,4	30,2	34,3	30,9	27,3	30,0	32,4	
pomorskie	l. stacji				9	9	10	15	17	19	19	21	22	27	16	26	26	
	średnia				33,4	25,8	28,1	30,6	24,3	22,0	24,9	27,2	24,8	24,5	22,2	27,2	23,4	
	min				22,4	20,4	23,3	17,0	16,4	11,7	14,6	17,0	15,5	10,9	15,9	14,2	14,2	
	max				53,2	32,8	37,9	43,2	41,2	35,0	39,7	44,5	36,0	42,3	38,6	44,6	39,4	
śląskie	l. stacji				10	10	26	33	31	28	31	31	30	30	30	32	32	
	średnia				51,2	40,4	44,7	47,9	36,4	38,2	40,9	51,1	49,8	47,6	43,1	43,5	40,3	
	min				32,9	26,9	23,6	19,4	11,2	13,1	14,7	29,4	26,7	30,0	20,5	27,8	23,2	
	max				71,6	56,4	64,1	72,6	57,6	66,2	69,2	79,9	77,0	77,6	58,3	55,8	52,1	
świętokrzyskie	l. stacji				6	8	10	10	11	8	6	8	7	10	9	10	10	
	średnia				32,3	29,1	33,3	34,4	28,1	28,6	30,6	36,8	34,8	36,2	31,6	33,1	31,8	
	min				26,8	23,7	25,4	25,7	23,5	21,9	22,9	26,8	24,6	23,1	21,9	21,8	22,3	
	max				42,2	35,9	45,7	43,7	33,0	35,8	34,8	53,3	43,5	45,8	38,1	43,1	41,0	
warmińsko-mazurskie	l. stacji				1	3	10	9	9	9	10	9	9	7	7	10	10	
	średnia				26,9	19,9	23,3	27,5	21,1	21,2	22,5	23,5	23,8	22,7	22,7	24,2	24,1	
	min				26,9	17,8	18,0	20,6	15,9	15,7	16,3	18,8	17,0	16,0	15,7	18,8	17,3	
	max				26,9	21,5	28,3	39,2	27,6	34,8	33,3	30,2	31,1	30,1	28,3	29,6	28,5	
wielkopolskie	l. stacji			1	4	8	10	10	9	9	10	12	11	14	13	13	17	
	średnia				53,5	43,7	29,3	31,2	35,1	26,4	27,5	30,4	33,8	34,3	32,7	30,9	34,3	32,0
	min				53,5	34,2	22,0	19,9	17,5	11,8	22,6	24,7	25,8	26,5	24,7	21,0	26,2	26,1
	max				53,5	54,6	46,0	40,3	55,7	31,5	30,4	35,8	39,5	39,5	39,8	41,1	41,8	39,4
zachodnio-pomorskie	l. stacji			1	3	5	8	7	9	13	12	14	12	9	8	12	12	
	średnia				27,7	24,3	18,7	22,5	26,6	20,8	18,1	22,4	27,0	26,6	24,3	23,9	26,9	23,9
	min				27,7	18,1	14,3	14,9	17,2	13,1	11,8	15,4	14,1	13,8	20,7	19,6	21,3	21,4
	max				27,7	28,4	25,8	31,0	33,7	27,2	24,5	33,3	36,3	35,8	29,3	28,0	31,1	27,6

Opracowanie własne na podstawie danych z [www.powietrze.gios.gov.pl/pjp/home](http://www.powietrze.gios.gov.pl/pjp/home)

średnia: średnia ze wszystkich stężeń średniorocznych notowanych w województwie (dla każdej stacji jest jedno)

min: minimalne stężenie średnioroczne odnotowane w województwie (w którejkolwiek stacji)

max: maksymalne stężenie średnioroczne odnotowane w województwie (w którejkolwiek stacji)

perspektywę nakreśla przebieg minimalnych stężeń średniorocznych  $PM_{10}$  i benzo(a)pirenu w województwach. Wartości te są co prawda w większości przypadków zdecydowanie mniejsze niż dopuszczalne, jednak – ogólnie rzecz ujmując – wyraźnie większe w ostatnich latach niż we wcześniejszych okresach.

Przedstawione w tabelach 3. i 4. liczby przeczą więc intuicyjnemu założeniu, że zmniejszenie notowanych wielkości emisji do powietrza raportowanych zgodnie z wymogami Konwencji Genewskiej [20] powinno się przekładać na proporcjonalne zmniejszenie średniorocznych stężeń pyłów  $PM_{10}$  i benzo(a)pirenu w powietrzu. Dzieje

Tabela 4. Średnie stężenia benzo(a)pirenu ( $\mu\text{g m}^{-3}$ ) w latach 2000–2015 w województwach (średnie stężenie roczne w województwie, średnie roczne minimalne i maksymalne)Table 4. Mean benzo(a)pyrene concentrations ( $\mu\text{g m}^{-3}$ ) in the years 2000–2015 in Polish regions (voivodeships) (annual mean concentration in region, average annual minimum and maximum)

województwo		2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
dolnośląskie	l. stacji		3	2	4	6	6	6	7	8	7	9	9	11	13	13	12
	średnia		0,8	2,2	1,7	2,7	2,2	2,8	3,3	3,3	5,1	5,3	5,0	5,7	4,7	5,0	4,9
	min		0,4	1,7	0,7	0,8	0,8	0,9	0,5	0,4	0,8	0,7	0,7	1,2	1,3	1,0	1,8
	max		1,2	2,6	2,9	8,7	4,1	5,7	6,6	9,8	12,5	10,9	12,2	13,6	13,1	17,0	15,3
kujawsko-pomorskie	l. stacji							4	4	13	6	12	9	10	10	9	9
	średnia							2,2	2,0	2,9	3,7	3,0	2,8	2,3	1,8	3,1	4,1
	min							0,0	1,1	1,1	1,8	0,8	1,0	0,4	0,6	0,8	0,6
	max							6,3	2,9	6,9	8,2	6,1	8,3	5,0	4,4	7,7	8,6
lubelskie	l. stacji									8	7	8	5	5	5	5	5
	średnia									0,3	0,9	0,9	0,7	0,7	1,1	2,4	3,9
	min									0,2	0,6	0,4	0,5	0,4	1,0	1,8	2,8
	max									0,5	1,0	1,3	0,8	0,8	1,1	3,2	5,4
lubuskie	l. stacji									2	2	4	3	4	5	6	6
	średnia									1,5	1,9	2,0	1,7	2,3	3,2	3,0	2,6
	min									1,3	1,9	1,6	1,1	1,7	2,0	2,1	2,0
	max									1,7	2,0	2,6	2,5	3,5	4,2	3,9	3,4
łódzkie	l. stacji									3	4	6	6	13	11	14	15
	średnia									3,9	4,3	10,5	7,9	8,9	8,1	7,2	7,1
	min									1,7	2,8	5,2	4,3	4,5	4,0	4,0	3,9
	max									6,3	7,8	24,6	18,0	19,2	14,6	14,6	15,6
małopolskie	l. stacji					1		1		10	11	12	11	13	11	19	16
	średnia					4,2		15,8		8,0	8,4	9,3	9,4	8,8	8,6	7,5	7,3
	min					4,2		15,8		5,7	3,6	5,2	3,3	2,9	4,4	2,6	3,1
	max					4,2		15,8		13,4	12,6	16,5	21,3	19,0	16,2	15,2	12,0
mazowieckie	l. stacji							7	16	19	15	8	6	7	11	11	11
	średnia							5,0	2,5	3,6	3,2	3,4	4,4	5,2	3,8	4,5	2,9
	min							3,0	0,8	0,9	0,4	1,0	3,2	3,1	1,9	2,2	1,5
	max							7,6	6,7	7,6	7,0	5,3	5,5	7,1	5,4	8,0	5,4
opolskie	l. stacji									4	4	5	4	3	3	3	3
	średnia									4,7	5,9	12,2	14,7	5,4	6,5	5,4	6,8
	min									3,6	2,3	7,5	5,5	2,8	4,6	4,5	3,4
	max									6,0	9,8	15,7	33,4	8,9	9,5	6,6	11,0
podkarpackie	l. stacji							1	5	8	7	8	6	8	9	9	10
	średnia							11,9	5,9	4,5	5,1	5,1	5,4	5,0	3,6	3,1	4,7
	min							11,9	4,2	3,3	3,9	3,9	4,1	3,2	2,3	2,7	3,3
	max							11,9	9,1	6,3	8,5	7,1	7,6	6,3	5,2	3,4	7,8

Tabela 4. Średnie stężenia benzo(a)pirenu ( $\mu\text{g m}^{-3}$ ) w latach 2000–2015 w województwach (średnie stężenie roczne w województwie, średnie roczne minimalne i maksymalne) – cd.Table 4. Mean benzo(a)pyrene concentrations ( $\mu\text{g m}^{-3}$ ) in the years 2000–2015 in Polish regions (voivodeships) (annual mean concentration in region, average annual minimum and maximum)

województwo		2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
podlaskie	l. stacji										1	1	1	1	1	2	2
	średnia										2,2	0,9	2,2	1,8	1,7	1,9	1,8
	min										2,2	0,9	2,2	1,8	1,7	1,8	1,8
	max										2,2	0,9	2,2	1,8	1,7	2,1	1,8
pomorskie	l. stacji								1	9	8	11	11	13	6	13	13
	średnia								0,9	2,0	3,0	4,8	3,3	3,1	2,6	2,6	2,9
	min								0,9	0,5	1,4	1,9	0,9	1,2	1,1	0,5	0,4
	max								0,9	3,6	5,8	9,4	7,1	7,4	7,3	6,4	9,8
śląskie	l. stacji						7	7	9	10	15	16	15	15	13	14	14
	średnia						8,1	11,1	5,6	6,0	8,9	9,3	8,8	8,2	6,7	6,6	6,5
	min						3,8	6,3	1,6	1,3	4,1	3,7	3,8	3,4	3,1	3,1	3,0
	max						13,7	19,7	11,4	16,1	15,6	18,2	16,1	15,1	11,3	12,1	10,5
świętokrzyskie	l. stacji										1	1	3	3	4	4	4
	średnia										5,6	3,2	3,9	6,1	6,7	5,0	5,0
	min										5,6	3,2	3,1	5,8	6,0	4,5	4,3
	max										5,6	3,2	5,1	6,6	8,4	5,9	6,1
warmińsko-mazurskie	liczba stacji										3	4	4	4	3	5	5
	średnia										1,3	0,8	2,2	2,3	3,0	2,5	2,3
	min										0,3	0,5	0,7	0,7	0,8	0,6	0,5
	max										2,9	1,3	3,9	3,8	4,9	4,4	3,8
wielkopolskie	l. stacji							2	2	5	6	5	5	6	7	7	7
	średnia							2,5	3,5	2,4	2,4	3,0	1,8	3,9	3,3	3,2	2,6
	min							2,3	3,1	0,9	0,9	1,4	0,5	1,6	2,2	2,0	1,9
	max							2,6	3,9	3,5	4,5	4,4	2,9	5,6	5,1	3,6	3,8
zachodnio-pomorskie	l. stacji						1	1	6	6	5	6	6	6	6	7	7
	średnia						0,9	3,5	2,1	2,1	6,2	4,2	2,9	3,1	3,0	2,8	2,2
	min						0,9	3,5	0,6	0,4	1,4	2,1	1,6	1,8	1,5	1,7	0,9
	max						0,9	3,5	3,8	4,8	13,9	7,6	5,4	5,4	5,6	4,9	4,7

Opracowanie własne na podstawie danych z [www.powietrze.gios.gov.pl/pjp/home](http://www.powietrze.gios.gov.pl/pjp/home)

średnia: średnia ze wszystkich stężeń średniorocznych notowanych w województwie (dla każdej stacji jest jedno)

min: minimalne stężenie średnioroczne odnotowane w województwie (w którejkolwiek stacji)

max.: maksymalne stężenie średnioroczne odnotowane w województwie (w którejkolwiek stacji)

się tak pomimo postępu technologicznego czy systematycznie wprowadzanych od lat 90. XX wieku narzędzi prawnych i administracyjnych w obszarze ochrony powietrza, a także pomimo rosnącej świadomości ekologicznej polskiego społeczeństwa. Pewne wytłumaczenie

obserwowanej sytuacji daje podsumowanie poprzedniego rozdziału. Rejestrowane zmniejszenie dotyczy tych emisji, które są i mogą być skwantyfikowane. Natomiast stale zwiększający się odsetek mieszkańców miast i stopień urbanizacji muszą się przekładać na zwiększenie

emisji zanieczyszczeń do powietrza, zarówno tych z sektora komunalno-bytowego, jak i tych z transportu drogowego. Nie wszystkie jednak da się policzyć i zbilansować. Z drugiej strony, pewne uwarunkowania dotyczące procesów klimatycznych i samego położenia geograficznego Polski determinują wielkość stężeń zanieczyszczeń; dotyczy to zwłaszcza pyłu zawieszzonego [5,62,63].

Oczywiście wyników oceny jakości powietrza w strefach nie należy utożsamiać ze złą jakością powietrza na całym obszarze danej strefy. Stacje monitoringu jakości powietrza znajdują się w kilku lub kilkunastu wybranych punktach, a stężenia zanieczyszczeń, zwłaszcza stężenia  $PM_{10}$ , wykazują silne zróżnicowanie przestrzenne [64]. Ocena ta pokazuje jednak skalę problemu, którego rozwiązanie musi być kompleksowe i wymaga uzgodnionych oraz jednokierunkowych działań ze strony władz centralnych, a także lokalnych samorządów. Prowadzoną dotąd politykę w tym zakresie trudno nazwać proekologiczną. Przykładowo na wielu polskich obszarach sieci ciepłownicze i gazownicze są słabo rozwinięte (co sprawia, że węgiel pozostaje jedynym paliwem, które umożliwia ogrzewanie budynków), a z drugiej strony brakuje skutecznych narzędzi prawnych, które umożliwiłyby wymuszenie obowiązku przyłączania się do sieci ciepłowniczych w miejscach, gdzie takowe istnieją. Innym przykładem jest rozbieżność pomiędzy świadomością zagrożeń związanych z emisją komunikacyjną a bardzo liberalną polityką państwa w zakresie prowadzenia z zagranicy oraz rejestrowania przestarzałych konstrukcyjnie i technologicznie pojazdów czy permanentnym ograniczaniem dostępności publicznych środków transportu przez władze miast.

## Piśmiennictwo

- World Health Organization. Burden of disease from the joint effects of Household and Ambient Air Pollution for 2012. Geneva 2014
- Molina MJ, Molina LT. Megacities and atmospheric pollution. *J Air Waste Manag Assoc*, 2014; 54: 644–680
- European Environment Agency. Air quality in Europe – 2016 report. Publications Office of the European Union, Luxembourg 2016
- World Health Organization. Global health risk. Mortality and burden of disease attributable to selected major risk. Geneva 2009
- Pastuszka JS, Rogula-Kozłowska W, Zajusz-Zubek E. Characterization of  $PM_{10}$  and  $PM_{2.5}$  and associated heavy metals at the crossroads and urban background site in Zabrze, Upper Silesia, Poland, during the smog episodes. *Environ Monit Assess*, 2010; 168: 613–627
- Xie Y, Zhao B, Zhang L, Luo R. Spatiotemporal variations of  $PM_{2.5}$  and  $PM_{10}$  concentrations between 31 Chinese cities and their relationships with  $SO_2$ ,  $NO_2$ , CO and  $O_3$ . *Particuology*, 2015; 20: 141–149
- Kumar P, Morawska L, Martani C, et al. The rise of low-cost sensing for managing air pollution in cities. *Environ Internat*, 2015; 75: 199–205
- Pyta H, Rogula-Kozłowska W, Mathews B. Co-occurrence of  $PM_{2.5}$ -bound mercury and carbon in rural areas affected by coal combustion. *Atmos. Pollut. Res.*, 2016; doi.org/10.1016/j.apr.2016.08.004
- Majewski G, Rogula-Kozłowska W. The elemental composition and origin of fine ambient particles in the largest Polish conurbation: First results from the short-term winter campaign. *Theor Appl Climatol*, 2016; 125: 79–92
- Rogula-Kozłowska W, Majewski G, Błaszczak B, et al. Origin-oriented elemental profile of fine ambient particulate matter in Central European suburban conditions. *Intern J Environ Res Public Health*, 2016; 13: 715 doi:10.3390/ijerph13070715
- Kozielska B, Koniecznyński J. Polycyclic aromatic hydrocarbons in particulate matter emitted from coke oven battery. *Fuel*, 2015; 144: 327–334
- Chow JC. Measurement methods to determine compliance with ambient air quality standards for suspended particles. *J Air Waste Manag Assoc*, 1995; 45: 320–382
- Andreae MO. Climatic effects of changing atmospheric aerosol levels. In: Henderson-Sellers A (ed). *Future climates of the world: a modeling perspective*. Elsevier, Amsterdam 1995
- SMIC. Inadvertent climate modification. Report of the study of man's impact on climate, MIT Press, Cambridge, MA, 1971
- Seinfeld JH, Pandis SN. *Atmospheric chemistry and physics: from air pollution to climate change*. John Wiley & Sons, New York, NY, USA, 2006
- Markiewicz MT. Podstawy modelowania rozprzestrzeniania się zanieczyszczeń w powietrzu atmosferycznym. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2004
- Czarnecka M, Koźmiński C. *Meteorologia a zanieczyszczenie atmosfery*. Wydawnictwo Akademii Rolniczej, Szczecin 2006
- Badyda A. Oddziaływanie zanieczyszczeń powietrza pochodzenia komunikacyjnego na parametry sprawności wentylacyjnej mieszkańców Warszawy. Prace naukowe Politechniki Warszawskiej, Inżynieria środowiska, z. 65. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2013
- Rogula-Kozłowska W, Pastuszka J, Talik E. Właściwości aerozolu ze źródeł komunikacyjnych. *Prace i Studia – Polska Akademia Nauk*. Tom 80. Instytut Podstaw Inżynierii Środowiska. ISN 0208–4112, 2011
- Konwencja Narodów Zjednoczonych w sprawie transgranicznego transportu zanieczyszczeń powietrza na dalekie odległości z 13 listopada 1979 roku (Konwencja Genewska) wraz z odpowiednimi protokołami
- Rogula-Kozłowska W, Majewski G, Czechowski PO. The size distribution and origin of elements bound to ambient particles: A case study of a Polish urban area. *Environ Monitor Assess*, 2015; 187: 240
- Badyda A, Dąbrowiecki P, Lubiński W, et al. Influence of traffic-related air pollutants on lung function. *Adv Exp Med Biol*, 2013; 788: 229–235
- Kulmala M, Vehkamäki H, Petäjä T, et al. Formation and growth rates of ultrafine atmospheric particles: a review of observations. *J Aerosol Sci*, 2004; 35: 143–176
- Zhang R, Khalizov A, Wang L, et al. Nucleation and growth of nanoparticles in the atmosphere. *Chem Rev*, 2011; 112: 1957–2011
- Kumar P, Pirjola L, Ketzler M, et al. Nanoparticle emissions from 11 non-vehicle exhaust sources – A review. *Atmos Environ*, 2013; 67: 252–277
- Rodriguez S, Querol X, Alastuey A, et al. Saharan dust contributions to  $PM_{10}$  and TSP levels in Southern and Eastern Spain. *Atmos Environ*, 2001; 35: 2433–2447
- Gomišček B, Hauck H, Stopper S, et al. Spatial and temporal variations of  $PM_{10}$ ,  $PM_{2.5}$ ,  $PM_{10}$  and particle number concentration during the AUPHEP – project. *Atmos Environ*, 2004; 38 (24): 3917–3934
- Majewski G, Rogula-Kozłowska W, Czechowski PO, et al. The impact of selected parameters on visibility: First results from a long-term campaign in Warsaw, Poland. *Atmosphere*, 2015; 6: 1154–1174
- Majewski G, Kleniewska M, Brandyk A. Seasonal variation of particulate matter mass concentration and content of metals. *Pol J Environ Stud*, 2011; 20: 417–427
- Czarnecka M, Nidzgorzka-Lencewicz J. Impact of weather conditions on winter and summer air quality. *Int Agrophys*, 2011; 25: 7–12
- Puxbaum H, Gomiscek B, Kalina M, et al. A dual site study of  $PM_{2.5}$  and  $PM_{10}$  aerosol chemistry in the larger region of Vienna, Austria. *Atmos Environ*, 2004; 38 (24): 3949–3958
- Harrison RM, Jones AM, Lawrence RG. Major component composition of  $PM_{10}$  and  $PM_{2.5}$  from roadside and urban background sites. *Atmos Environ*, 2004; 38 (27): 4531–4538
- Callén MS, De La Cruz MT, López JM, et al. Comparison of receptor models for source apportionment of the  $PM_{10}$  in Zaragoza (Spain). *Chemosphere*, 2009; 76 (8): 1120–1129

34. Shi GL, Liu GR, Peng X, et al. A comparison of multiple combined models for source apportionment, including the PCA/MLR-CMB, Unmix-CMB and PMF-CMB Models. *Aerosol Air Qual Res*, 2014; 14: 2040–2050
35. Hopke PK (ed). *Receptor modeling for air quality management* (Vol. 7). Elsevier, 1991
36. Hopke PK, Ito K, Mar T, et al. PM source apportionment and health effects: 1. Inter-comparison of source apportionment results. *J Expo Sci Environ Epidemiol*, 2006; 16: 275–286
37. Yatkin S, Bayram A. Source apportionment of PM<sub>10</sub> and PM<sub>2.5</sub> using positive matrix factorization and chemical mass balance in Izmir, Turkey. *Sci Total Environ*, 2008; 390: 109–123
38. Fabretti JF, Sauret N, Gal JF, et al. Elemental characterization and source identification of PM<sub>2.5</sub> using positive matrix factorization: the Malraux road tunnel, Nice, France. *Atmos Res*, 2009; 94: 320–329
39. Pant P, Harrison RM. Estimation of the contribution of road traffic emissions to particulate matter concentrations from field measurements: a review. *Atmos Environ*, 2013; 77: 78–97
40. Galarneau E. Source specificity and atmospheric processing of airborne PAHs: implications for source apportionment. *Atmos Environ*, 2008; 42 (35): 8139–8149
41. Kozielska B, Rogula-Kozłowska W, Klejnowski K. Selected organic compounds in fine particulate matter at the regional background, urban background and urban traffic points in Silesia (Poland). *Int J Environ Res*, 2015; 9 (2): 575–584
42. Rogula-Kozłowska W, Kozielska B, Klejnowski K. Concentration, origin and health hazard from fine particle-bound PAH at three characteristic sites in Southern Poland. *Bull Environ Contam Toxicol*, 2013; 91 (3): 349–355
43. Fabiańska M, Kozielska B, Bielaczyc P, et al. Geochemical markers and polycyclic aromatic hydrocarbons in solvent extracts from diesel engine particulate matter. *Environ Sci Pollut Res*, 2016; 23 (7): 6999–7011
44. Koniecznyński J, Pason-Koniecznyńska A. Scalony wskaźnik emisji substancji zanieczyszczających powietrze w procesie spalania węgla. *Archiw Ochr Środow*, 1999; 25: 29–40
45. Kubica R, Dębski B. Wskaźniki emisji pyłu całkowitego oraz jego subfrakcji ze spalania paliw stałych w sektorach mieszkalnictwa i usług w Polsce w latach 2000–2013. *Przem Chem*, 2016; 95 (3): 464–471
46. Uliasz-Bochenczyk A, Mokrzycki E. Emissions from the Polish power industry. *Energy*, 2007; 32: 2370–2375
47. Kozielska B, Koniecznyński J. Occurrence of polycyclic aromatic hydrocarbons in dust emitted from circulating fluidized bed boilers. *Environ Technol*, 2008; 29: 1199–1207
48. Koniecznyński J, Zajusz-Zubek E, Jabłońska M. The release of trace elements in the process of coal coking. *Sci World J*, 2012. doi.org/10.1100/2012/294927
49. Klejnowski K, Rogula-Kozłowska W, Lusiak T. Some metals and polycyclic aromatic hydrocarbons in fugitive PM<sub>10</sub> emissions from the coking process. *Environ Prot Eng*, 2012; 38: 59–71
50. Samek L, Zwoździak A, Sówka I. Chemical characterization and source identification of particulate matter PM<sub>10</sub> in a rural and urban site in Poland. *Environ Prot Eng*, 2013; 39: 91–103
51. Górka M, Jędrysek MO, Maj J, et al. Comparative assessment of air quality in two health resorts using carbon isotopes and palynological analyses. *Atmos Environ*, 2009; 43: 682–688
52. Ustawa z dnia 27 kwietnia 2001 r. Prawo ochrony środowiska. Dz. U. 2001.62.627 z późn. zm.
53. Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 24 sierpnia 2012 r. w sprawie poziomów niektórych substancji w powietrzu. Dz. U. 2012.0.2031
54. Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 2008/50/WE z dnia 21 maja 2008 r. w sprawie jakości powietrza i czystszy powietrza dla Europy. Dz. U. L 152 z 11.6.2008 1–44
55. Dyrektywa 2004/107/WE Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 15 grudnia 2004 r. w sprawie arsenu, kadmu, rtęci, niklu i wielopierścieniowych węglowodorów aromatycznych w otaczającym powietrzu. Dz. U. L 23 z 26.1.2005: 3–16
56. Toczko B. Pyły drobne w atmosferze. Kompedium wiedzy o zanieczyszczeniu powietrza pyłem zawieszonym w Polsce. Biblioteka Monitoringu Środowiska, Warszawa 2016: 97–105
57. Rogula-Kozłowska W, Klejnowski K, Rogula-Kopiec P, et al. Spatial and seasonal variability of the mass concentration and chemical composition of PM<sub>2.5</sub> in Poland. *Air Qual Atmosph Health*, 2014; 7: 41–58
58. Badyda A, Gayer A, Czechowski PO, et al. Pulmonary function and incidence of selected respiratory diseases depending on the exposure to ambient PM<sub>10</sub>. *Int J Mol Sci*, 2016; 17: 1954
59. Badyda A, Grellier J, Dąbrowiecki P. Ambient PM<sub>2.5</sub> exposure and mortality due to lung cancer and cardiopulmonary diseases in Polish cities. *Adv Exp Med Biol*, 2017; 944: 9–17
60. Dąbrowiecki P, Mucha D, Gayer A, et al. Assessment of air pollution effects on the respiratory system based on pulmonary function tests performed during spirometry days. *Adv Exp Med Biol*, 2015; 873: 43–52
61. Badyda A, Dąbrowiecki P, Czechowski PO, et al. Risk of bronchi obstruction among non-smokers – review of environmental factors affecting bronchoconstriction”. *Respir Physiol Neurobiol*, 2015; 209: 39–46
62. Ośródko L, Klejnowski K, Krajny E. Analiza epizodów smogowych w sezonie zimowym na górnym Śląsku. W: *Ochrona powietrza w teorii i praktyce*. IPIŚ PAN, Zabrze 2006; 2: 197–206
63. Lewandowska AU, Falkowska LM. High concentration episodes of PM<sub>10</sub> in the air over the urbanized coastal zone of the Baltic Sea (Gdynia – Poland). *Atmos Res*, 2013; 120: 55–67
64. Rogula-Kozłowska W, Błaszczak B, Klejnowski K. Concentrations of PM<sub>2.5</sub>, PM<sub>2.5-10</sub> and PM-related elements at two heights in an urban background area in Zabrze (Poland). *Arch Environ Prot*, 2011; 37 (2): 31–47