



**Dr hab. inż. Jacek
Wojciech Kamiński**


jest profesorem IGF
PAN. Jego główne
zainteresowania
naukowe dotyczą
chemii i fizyki
atmosfery,
modelowania
pogody chemicznej,
i derywatów
pogodowych.
jkaminski@igf.edu.pl

**Dr inż. Joanna
Strużewska**

jest adiunktem
Politechniki
Warszawskiej.
Jej główne
zainteresowania
naukowe dotyczą
modelowania
jakości powietrza
oraz wpływu emisji
antropogenicznych
na zmiany klimatu.
[joanna.struzewska
@pw.edu.pl](mailto:joanna.struzewska@pw.edu.pl)

SZAROŚĆ NIEBA

TOMEK/ADOBESTOCK



Czym jest smog i z czego się składa? Jak powstaje?
Jak zadymiona jest Polska w stosunku do innych krajów Europy?

dr hab. inż.**Jacek Wojciech Kamiński**
 Instytut Geofizyki
 Polska Akademia Nauk, Warszawa
dr inż. Joanna Strużewska

Politechnika Warszawska

Zainteresowanie opinii publicznej problemem występowania wysokich stężeń pyłu stale rośnie. Pojawia się wiele inicjatyw społecznych oraz portali mających na celu informowanie społeczeństwa o potencjalnych zagrożeniach. Popularność zdobywa też monitoring personalny. Pomimo rosnącej świadomości społecznej i różnych działań podejmowanych na szczeblu administracji samorządowej i centralnej temat smogu, jego przyczyn i możliwości przeciwdziałania regularnie powraca, zwłaszcza w okresie grzewczym.

Terminem „smog” określa się zjawisko wystąpienia szczególnie wysokich stężeń zanieczyszczeń, pochodzących ze źródeł antropogenicznych, zazwyczaj w okresie bezwietrznej pogody. Zjawiskiem, które w Polsce budzi szerokie zainteresowanie i dyskusje, jest tzw. smog londyński, w skład którego wchodzi zanieczyszczenia pyłowe i gazowe, m.in. tlenki siarki, tlenek azotu i tlenek węgla, a który pojawia się zazwyczaj w chłodnej porze roku. Zanieczyszczenia pyłowe definiowane są jako stałe cząstki zawieszone w powietrzu. Cząstki te nie posiadają jednolitego składu ani rozmiaru, skutkiem czego występuje zróżnicowanie ich szkodliwości. Powszechnie stosuje się podział pyłów ze względu na wielkość cząstek, która wpływa na zasięg transportu od źródła i efektywność procesów usuwania z atmosfery. Ze względu na wielkość wyrażoną tzw. średnicą zastępczą wyodrębnia się zazwyczaj trzy rodzaje cząstek: PM₁₀ – cząstki o średnicy poniżej 10 μm, PM_{2.5} – o średnicy poniżej 2,5 μm i PM_{0.1} – o średnicy poniżej 0,1 μm. Zanieczyszczenia pyłowe są mieszaniną substancji organicznych i nieorganicznych. Pył zawieszony może także zawierać substancje toksyczne, np. wielopierścieniowe węglowodory aromatyczne takie jak B[a]P, metale ciężkie oraz dioksyny i furany.

Kwestia zdrowia

Zanieczyszczenia powietrza wpływają negatywnie na zdrowie ludzkie, zaczynając od nieznacznych zmian w układzie oddechowym po wpływ na długość życia. Do najbardziej zagrożonych należą: dzieci, osoby starsze oraz chore (szczególnie na choroby

związane z układem oddechowym). W przypadku pyłów oddziaływanie na zdrowie ludzkie jest w dużej mierze uzależnione od rozmiaru cząstek. Frakcja gruba pyłu (cząstki PM₁₀ po wyłączeniu frakcji PM_{2.5}) są usuwane z powietrza przez procesy sedymentacji oraz opady atmosferyczne w ciągu kilku godzin od emisji, podczas gdy cząstki PM_{2.5} pozostają w atmosferze znacznie dłużej. Dłuższy czas przebywania cząstek PM_{2.5} sprzyja ich transportowi na dalekie odległości oraz dłuższemu oddziaływaniu na organizm człowieka. Rozmiar ziaren pyłu ma także wpływ na przenikanie cząstek do organizmu i tak frakcja gruba pyłu może się akumulować w górnych drogach oddechowych, natomiast pył PM_{2.5} przenika znacznie głębiej.

Wiele badań podjętych zarówno w Stanach Zjednoczonych, jak i w Europie wykazało, że kiedy stężenie pyłu zawieszonego w powietrzu wzrasta, nawet przy relatywnie niskim poziomie tła, obserwuje się wzrost liczby zgonów z powodu chorób układu oddechowego i krążenia oraz więcej osób wymaga leczenia szpitalnego zapalenia oskrzeli i astmy. W krajach UE według badań przeprowadzonych w ramach programu CAFE (Clean Air for Europe, <http://europa.eu/scadplus/leg/en/lvb/l28o26.htm>) emisje PM_{2.5} wywołane działalnością antropogeniczną powodują skrócenie długości życia średnio o 8,6 miesiąca.

Poziomy stężenie pyłu, na jakie narażeni są mieszkańcy większości miast w krajach rozwiniętych i rozwijających się, mają negatywny wpływ na ich zdrowie. Długookresowa ekspozycja na pyły powoduje ryzyko powstania chorób układu oddechowego, płuc, serca, a także rak płuc.

Normy obowiązujące w Unii Europejskiej dla PM₁₀ to wartość dopuszczalna średniodobowa 50 μg/m³, która nie może być przekroczona więcej niż 35 razy w ciągu roku, oraz wartość średnioroczna na poziomie 40 μg/m³. Dla pyłu PM_{2.5} normowana jest wartość średnioroczna wynosząca 25 μg/m³. Dyrektywa Komisji Europejskiej nie precyzuje dla pyłów progów informowania społeczeństwa ani progów alarmowego. Zgodnie z krajowymi aktami prawnymi dla pyłu PM₁₀ wartości te wynoszą odpowiednio 200 μg/m³ i 300 μg/m³ jako średnia 24-godzinna i mogą być odmienne od stosowanych w innych państwach europejskich. W raporcie Europejskiej Agencji Środowiska o stanie jakości powietrza, opublikowanym w 2017, wskazano, że w roku 2015 10% populacji w miastach europejskich (EU-28) było narażone na stężenia PM₁₀ przekraczające poziom dopuszczalny dla wartości średniodobowej, 53% zaś powyżej wartości WHO. W odniesieniu do PM_{2.5} 7% populacji w miastach europejskich (EU-28) było narażone na stężenia przekraczające poziom dopuszczalny dla wartości średniorocznej, 82% zaś powyżej wartości WHO.

Kwestia źródeł

Zanieczyszczenia pyłowe pochodzą zarówno ze źródeł naturalnych, jak i antropogenicznych. Źródła antropogeniczne to: spalanie paliw, procesy przemysłowe, rolnictwo, a także takie zjawiska jak ścieranie się opon i nawierzchni dróg. Do źródeł naturalnych należy zaliczyć: aerozole morskie, pyły z nad pustyni, wybuchy wulkanów oraz aerozole pochodzące z procesów biogenicznych. Źródła emisji, a zarazem sposób powstawania pyłów dzieli się na pierwotne i wtórne, występujące na skutek reakcji utleniania prekursorów (dwutlenek siarki, tlenki azotu, amoniak, lotne związki organiczne) prowadzących do powstania cząstek aerozolu.

Na terenie Polski największy udział w emisji pyłów ma sektor komunalno-bytowy oraz energetyka zawodowa, oparta na spalaniu stałych paliw kopalnych, głównie węgla kamiennego. Udział poszczególnych frakcji w pyłe emitowanym z poszczególnych sektorów gospodarki jest zróżnicowany, zależy on m.in. od technologii i specyfiki źródła oraz zastosowanych technologii ochrony powietrza, na uwagę zasługuje fakt stosunkowo wysokiej zawartości frakcji PM_{2.5} w pyłe całkowitym emitowanym ze źródeł należących do kategorii transport drogowy.

Analiza pomiarów stężeń na stacjach monitoringu jakości powietrza wskazuje, że najniższe stężenia notowane są na północy i północnym zachodzie Europy (Półwysep Skandynawski, północna Irlandia) oraz regionach położonych na wysokości powyżej 800 m n.p.m. Liczne analizy wskazują, że transport drogowy i przemysł stanowią najbardziej znaczące źródła emisji antropogenicznej dla kontynentalnej części Europy. Prócz tego w regionie śródziemnomorskim istotnym źródłem naturalnym jest pył mineralny transportowany z nad Sahary. Analiza zmian poziomów stężeń na przestrzeni dziesięciolecia wskazuje na istnienie nieznacznego trendu malejącego, zwłaszcza w przypadku stacji monitorujących poziom stężeń w miejskich ciągach komunikacyjnych. Poziomy stężenie pyłu PM₁₀ na stacjach tła miejskiego utrzymują się na zbliżonym poziomie.

Kwestia epizodów

Analiza genezy epizodów pyłowych w Polsce w latach 2013–2016 przeprowadzona na zlecenie Głównego Inspektoratu Ochrony Środowiska wykazała, że wysokie stężenia pyłu PM₁₀, obejmujące znaczną część obszaru kraju, występowały przeważnie w dniach, w których temperatura powietrza ulegała obniżeniu do wartości ujemnych. Wiązało się to ze zwiększeniem emisji powierzchniowej, tzw. niskiej emisji, wynikającym ze wzrostu zapotrzebowania na ciepło do ogrzewania budynków. Prawie we wszystkich przypadkach epizody te występowały w wa-

WHO o smogu

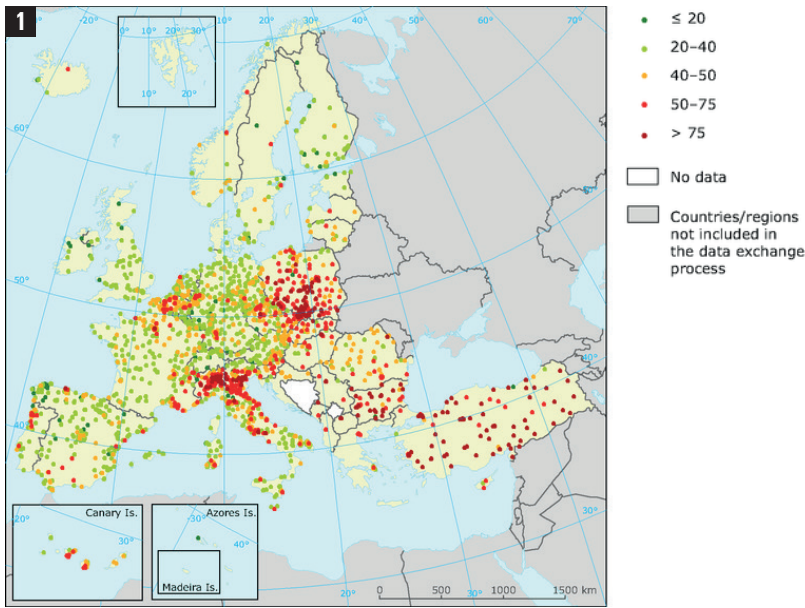
Według Światowej Organizacji Zdrowia (WHO ang. *World Health Organization*) bardzo trudno jest ustalić poziom, poniżej którego nie występuje żadne zagrożenie zdrowia. Poziomy obecnie zalecane przez WHO zostały wyznaczone na podstawie badań przeprowadzonych dla PM_{2.5}. Średnioroczne stężenie na poziomie 10 µg/m³ jest to najniższy poziom, dla którego stwierdzono z 95% prawdopodobieństwem wzrost śmiertelności wywołanej rakiem płuc i chorobami układu naczyniowo-sercowego. Natomiast średnia wartość dobową (25 µg/m³) wyznaczona została na podstawie wartości średniorocznej w taki sposób, aby zapobiegać powstawaniu krótkotrwałym podwyższonym stężeniom. Wartości dla PM₁₀ (odpowiednio 10 µg/m³ dla wartości średniorocznej i 50 µg/m³ dla wartości średniodobowej) zostały wyznaczone na podstawie wartości PM_{2.5} przy założeniu, że stosunek masowy frakcji PM_{2.5} w PM₁₀ wynosi 0,5.

WHO ostrzega:

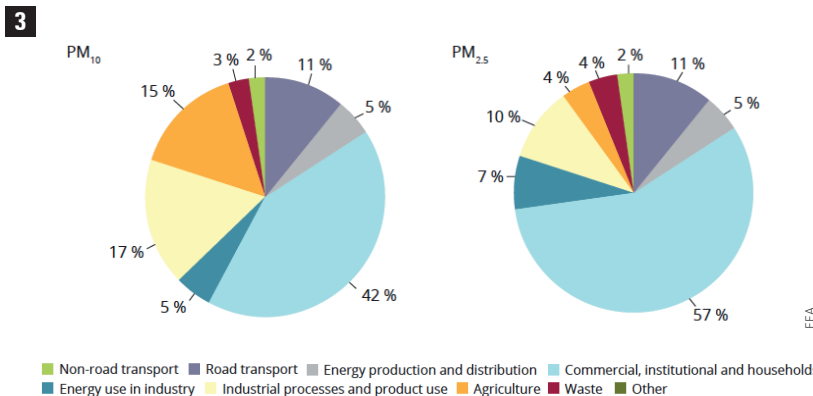
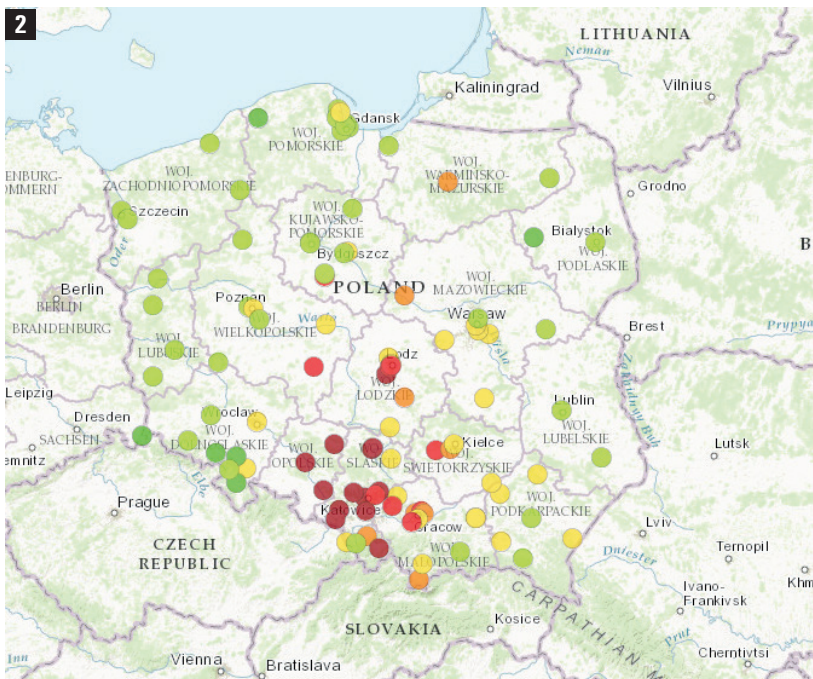
- Pył powoduje wzrost ryzyka śmierci z powodu niewydolności układu oddechowego u niemowląt do 1. roku życia, wpływa negatywnie na tempo rozwoju funkcjonowania płuc, zaostrza astmę i powoduje inne objawy ze strony układu oddechowego, takie jak kaszel i zapalenie oskrzeli u dzieci.
- Pył drobny PM_{2.5} poważnie zagraża zdrowiu, powodując wzrost zgonów w wyniku chorób serca, naczyń krwionośnych, dróg oddechowych oraz raka płuc. Wzrost stężenia pyłu PM_{2.5} powoduje wzrost ryzyka nagłych wypadków wymagających hospitalizacji z powodu problemów z krążeniem i oddychaniem.
- Pył PM₁₀ powoduje zwiększenie zachorowalności na choroby układu oddechowego, na co wskazuje liczba hospitalizacji z powodu chorób układu oddechowego.

runkach stałej lub silnie stałej równowagi atmosfery oraz inwersji temperatury, a także przy słabym wietrze. Warunki te utrudniały dyspersję zanieczyszczeń, prowadząc do ich kumulacji w warstwie przyziemnej atmosfery.

Na podstawie uzyskanych wyników modelowania matematycznego jako główną przyczynę wysokich stężeń pyłu PM₁₀ w Polsce wskazano emisję z licznych, niskich oraz rozproszonych źródeł emisji (tzw. niska emisja, ze źródeł komunalno-bytowych). Dla większości obszaru kraju udział tego typu emisji w kształtowaniu się epizodu wynosił przeważnie od 80 do ponad 90%. W wybranych rejonach, zwłaszcza w okolicach przebiegu głównych tras komunikacyjnych, a także na obszarach aglomeracji i większych miast, znaczny był udział również liniowych źródeł emisji, związanych z transportem samochodowym. Mieścił się on w przedziale od 10 do 30%, sięgając ok. 50% na terenie wybranych aglomeracji (np. warszawskiej). Wpływ źródeł punktowych by-



Rys. 1. Najwyższe stężenia PM10 w Europie w 2012 r. wyrażone jako 90,4 percentyl stężeń PM10 obliczony na podstawie ciągów średniodobowych stężeń PM10 ze stacji monitoringu (w $\mu\text{g}/\text{m}^3$)



ły najmniejsze w rejonach, w których występowały wysokie stężenia pyłu PM10.

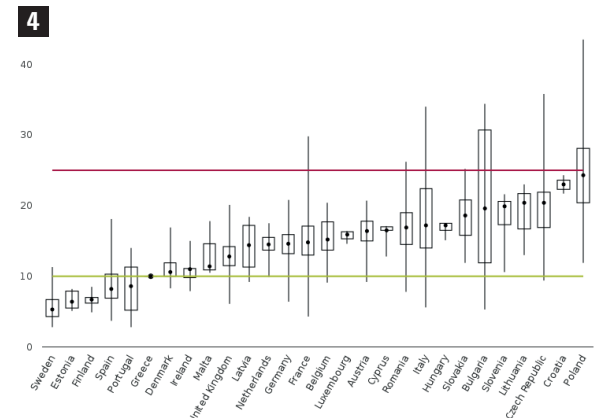
W części przypadków epizodów pyłowych zaznaczał się wpływ źródeł zagranicznych na tworzenie się wysokich stężeń PM10 (z reguły do 10% udziału). Dotyczyło to głównie przygranicznego pasa terenu na południu kraju i udział źródeł z Czech (głównie Śląska Morawskiego, w tym z przemysłowego rejonu Ostrawy) i Słowacji. Udział ten sięgał w wybranych przypadkach 50%. Napływ powietrza z przygranicznego obszaru Niemiec na ogół nie przyczyniał się do występowania przekroczeń progowych wartości stężeń PM10 na większym obszarze Polski. W rejonach, gdzie był największy procentowy udział źródeł emisji położonych za zachodnią granicą Polski, stężenia PM10 z reguły nie były wysokie. Analizy przeprowadzone z wykorzystaniem modelowania oraz symulacje trajektorii wstecznych wskazują na udział, w przypadku części epizodów, źródeł emisji zlokalizowanych na obszarze południowej Polski (głównie Śląska) na kształtowanie się wysokich stężeń w przygranicznych rejonach Słowacji i Czech.

Szczególnie niekorzystne warunki smogowe wystąpiły w okresie zimowym 2017, kiedy w miastach na południu Polski poziomy stężenie PM10, w odniesieniu do maksymalnej wartości godzinnej w ciągu doby, osiągały rekordowe wartości powyżej 1000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

Kwestia monitoringu

Rutynowe pomiary pyłu zawieszonego PM10 oraz PM2.5 prowadzone są w ramach Państwowego Monitoringu Środowiska. Na jakość informacji o stężeniu pyłu zawieszonego decydujący wpływ ma metodyka prowadzenia pomiarów i związana z nią niepewność pomiarowa, kompletność serii pomiarowych oraz lokalizacja (reprezentatywności) stanowisk pomiarowych. Metodykę pomiarów pyłu zawieszonego wskazuje dyrektywa Parlamentu Europejskiego oraz regulacje krajowe.

Cieszące się dużym zainteresowaniem komercyjne niskokosztowe czujniki do pomiarów zanie-



DR HAB. INŻ. JACEK WOJCIECH KAMIŃSKI, DR INŻ. JOANNA STRUŻEWSKA

czyszczeń powietrza, a w szczególności do pomiarów stężeń pyłu zawieszonego PM₁₀ i PM_{2.5} nie są urządzeniami pracującymi zgodnie z metodyką referencyjną. Z powodu braku wykazanej równoważności czujników względem metodyki referencyjnej nie mogą być one traktowane jako źródło wiarygodnych danych, a na ich podstawie nie można określać, czy nastąpiło przekroczenie norm jakości powietrza.

Ze względu na negatywny wpływ pyłu PM_{2.5} na zdrowie ludzi w dyrektywie Parlamentu Europejskiego wprowadzono dodatkowe normy jakości powietrza dla obszarów tła miejskiego w miastach powyżej 100 tys. mieszkańców i aglomeracjach. Dla obszarów tych określono wartość dopuszczalną pyłu PM_{2.5} w powietrzu, którą nazwano pułapem stężenia ekspozycji obliczanym na podstawie wskaźnika średniego narażenia dla miasta o liczbie mieszkańców większej niż 100 tys. i aglomeracji. Ponadto każdy kraj członkowski w oparciu o krajowy wskaźnik średniego narażenia obliczany na podstawie wskaźnika średniego narażenia dla miasta o liczbie mieszkańców większej niż 100 tys. oraz dla aglomeracji w oparciu o kryteria określone w ww. dyrektywie określił krajowy cel redukcji narażenia na pył PM_{2.5}. W Polsce wskaźnik średniego narażenia dla miasta o liczbie mieszkańców większej niż 100 tys. i aglomeracji oblicza się dla 30 miast i aglomeracji

na podstawie danych z 32 stanowisk pomiarowych. W porównaniu z pozostałymi krajami europejskimi poziom zanieczyszczenia pyłem w Polsce nadal utrzymuje się na wysokim poziomie.

Kwestia zanieczyszczenia

Zarówno w Polsce, jak i w Europie obserwowany jest nieznaczny trend spadkowy tła stężeń zanieczyszczeń pyłowych. Narażenie na ponadnormatywne stężenia znacząco wzrasta w miesiącach zimowych i jest związane z występowaniem niekorzystnych warunków meteorologicznych – głównie inwersji temperatury w warunkach słabego wiatru. W przypadku spadków temperatury pojawia się zwiększone zapotrzebowanie na energię i wzrasta intensywność spalania przydomowego. W Polsce spalanie paliw stałych, często z wykorzystaniem pieców o niskiej sprawności, ze źle prowadzonym procesem i znaczną emisją pyłu stanowi czynnik znacznie przyczyniający się do występowania sytuacji smogowych. Taka struktura emisji jest przyczyną, iż w odniesieniu do najwyższych stężeń Polska wyróżnia się negatywnie na tle innych krajów Europy.

JACEK WOJCIECH KAMIŃSKI
JOANNA STRUŻEWSKA

Rys. 2.
Indeks jakości powietrza w Polsce o 8.00 UTC 9.01.2017. Kolor pomarańczowy oznacza przekroczenie dobowej wartości dopuszczalnej, czerwony i bordowy – odpowiednio proggu informowania i alarmowego.

Rys. 3.
Udział w emisji PM₁₀ i PM_{2.5} w 2015 r. (średnia dla EU-28).

Rys. 4.
Średnioroczne stężenie pyłu 2.5 w krajach UE (najniższą, najwyższą i średnią wartość $\mu\text{g}/\text{m}^3$). Prostokąt to 25. i 75. percentyl. Wartość zalecana przez UE jest zaznaczona linią czerwoną, wartość WHO – zieloną.



Naukaonline.pl

portal magazynu Polskiej Akademii Nauk **ACADEMIA**

Trzymamy
stronę
nauki