

MAGDALENA KUCHCIK

PAWEŁ MILEWSKI

Instytut Geografii i Przestrzennego Zagospodarowania
im. St. Leszczyckiego PAN w Warszawie

ZANIECZYSZCZENIE POWIETRZA W POLSCE – STAN, PRZYCZYNY I SKUTKI

Abstract: Air Pollution in Poland – Condition, Causes and Effects. In the recent years the air in Poland seems to be the most polluted in Europe (it is worse only in a few times smaller Bulgaria). The concentration of particulate matter PM10 and PM2.5 and polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs), represented by benzo(a)pyrene are among the highest in European Union countries. They are highly toxic, especially PAHs, which damage the hematopoietic system, accumulate in living organisms leading to a cancerous process, they cause damages to the central nervous system and infertility. It is estimated that high air pollution causes 45-47 thousands premature deaths in Poland every year, as well as growth frequency of allergies and chronic diseases. Polish society loses about 520,000 potential years of life, and the economy of 18.5 million work days. It's a very high price.

The weather determines to a large extent the air pollution. The smog episode is usually accompanied by low wind speed or atmospheric silence, reduction of visibility and thermal inversions. However, the biggest problem is low emission, which is mainly related to individual heating of buildings (78-87% of the total emission of benzo(a)pyrene).

The reasons for such poor sanitary condition of the air in Poland are complex and to a large extent they result from spatial chaos and lack of spatial planning, but also from general policy country. The most important reasons are *i.a.*: the lack of a planning policy and a sustainable transport policy, persistent subsidies for unprofitable coal mines, the lack of a policy promoting renewable energy sources and “clean” technologies, high gas price (the highest in Europe) and no subsidies for the poorest, scattered buildings which hinders access to system heat, inefficient and unsuitable transport based on road transport road and individual cars (often old, Diesel) *etc.*

Keywords: Air pollution, aromatic hydrocarbons, changes, costs, mortality, PM10, Poland, reasons, weather.

Wstęp

Jakość powietrza i jego skład determinują warunki życia człowieka, wpływają na ekosystemy, świat zwierzęcy i produkcję roślinną. Czynniki te w największym stopniu odpowiadają za globalne zmiany klimatu. Zawarte w powietrzu zanieczyszczenia powodują u ludzi dolegliwości układu oddechowego i krwionośnego oraz są przyczyną

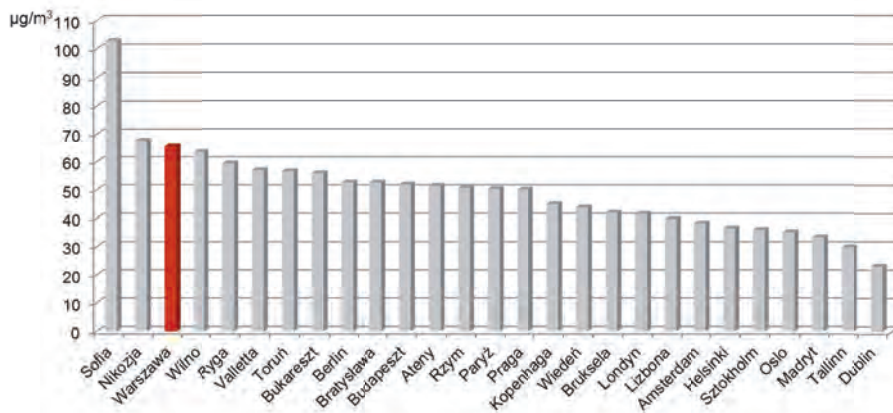
wielu przedwczesnych zgonów. Dlatego największy bezpośredni wpływ zanieczyszczeń powietrza na zdrowie ludzi obserwowany jest w rejonach przemysłowych i zurbanizowanych, a wśród źródeł zanieczyszczeń powietrza dominuje niska emisja i transport. Miasta oddziałują także na zdrowie ludzi w sposób pośredni, przez degradację środowiska przyrodniczego, nieodpowiednią gospodarkę odpadami czy nieadekwatną politykę transportową. Te czynniki z kolei są silnie związane z chaosem przestrzennym, brakiem spójnej polityki przestrzennej, rozlewaniem się miast na obszary podmiejskie i komunikacji opartej na transporcie indywidualnym [ISOCARP 2009].

1. Zanieczyszczenie powietrza w Polsce na tle innych państw europejskich

Przez wiele lat XX w. stężenie zanieczyszczeń powietrza utrzymywało się w Polsce – głównie na Górnym Śląsku i w innych terenach silnie uprzemysłowionych – na stałym i wysokim poziomie. Przemiany polityczne, gospodarcze i społeczne po 1989 r. – upadek wielu gałęzi przemysłu, zamykanie fabryk, zakładów i kopalni – zaowocowały systematycznym spadkiem poziomu zanieczyszczenia powietrza, który od początku XXI w. utrzymuje się w Polsce na podobnym poziomie. Dzieje się tak, mimo że w innych krajach Unii Europejskiej średnia emisja podstawowych substancji zanieczyszczających powietrze stale maleje [EEA 2016].

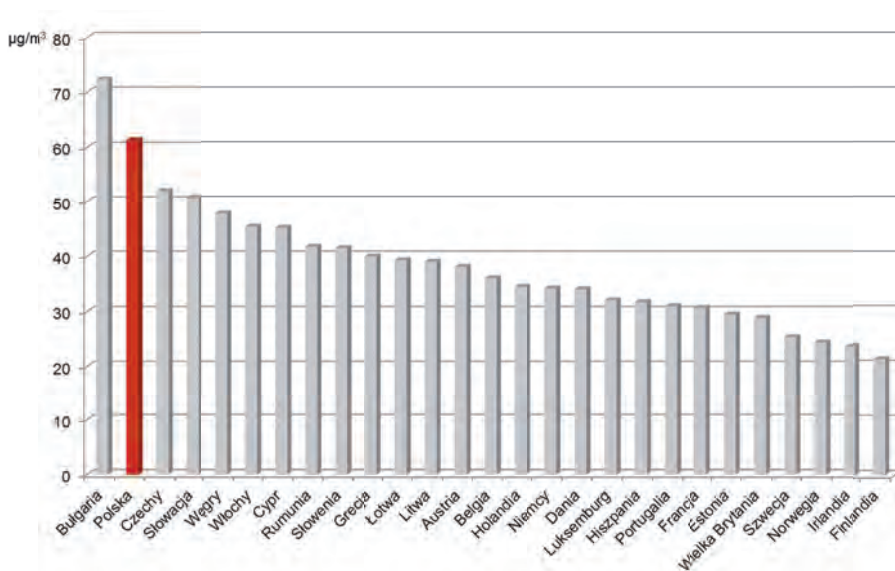
Według Raportu Europejskiej Agencji Środowiska w Europie największym problemem dla stanu sanitarnego powietrza, rozumianego jako ogólny skład atmosfery wraz z domieszkami w danym miejscu i czasie, jest zanieczyszczenie pyłami zawieszonymi (PM10 i PM2,5), ozonem troposferycznym (O₃) i dwutlenkiem azotu (NO₂), a z powodu zanieczyszczeń powietrza umiera przedwcześnie blisko pół miliona ludzi w ciągu roku, z czego w Polsce jest to ponad 47 tys. osób rocznie [EEA 2016].

Normy jakości powietrza były w ostatnich latach przekraczane niemal na całym obszarze Polski. Przekroczenia norm dla stężenia pyłu zawieszonego PM10 występują w 91% stref pomiarowych – szczególnie w województwie śląskim, małopolskim i łódzkim, z wyjątkiem północnych obszarów kraju. Przekraczanie norm dla stężeń silnie kancerogennego benzo(a)pirenu miało miejsce we wszystkich strefach. Na tle Europy wypadamy bardzo źle zarówno pod względem zanieczyszczenia powietrza pyłem PM10, drobniejszym pyłem PM2,5, jak i wielopierścieniowymi węglowodorami aromatycznymi (w tym benzo(a)pirenem). Notowane w Polsce stężenia pyłów PM10 i PM2,5 oraz benzo(a)pirenu należą do najwyższych w państwach Unii Europejskiej [EEA 2016; GIOŚ 2014]. Także stężenie dwutlenku siarki (SO₂) osiąga na Górnym Śląsku wartości znacznie wyższe niż w krajach Europy Zachodniej, choć zbliżone do notowanych w Rumunii i Bułgarii. Tlenki azotu stanowią problem jedynie w największych miastach – zwłaszcza w Warszawie – oraz wzdłuż najbardziej uczęszczanych dróg. Stężenia ozonu w Polsce są przeciętne, a w Europie odzwierciedlają strefy usłonecznienia i poziom zmotoryzowania społeczeństw.



Ryc. 1. Średnie roczne stężenie pyłu zawieszonego PM10 uśrednione dla wszystkich stacji komunikacyjnych w obszarze wybranych stolic europejskich w 2014 r.

Źródło: Opracowanie własne na podstawie danych Europejskiej Agencji Środowiska (ryc. 1-3).



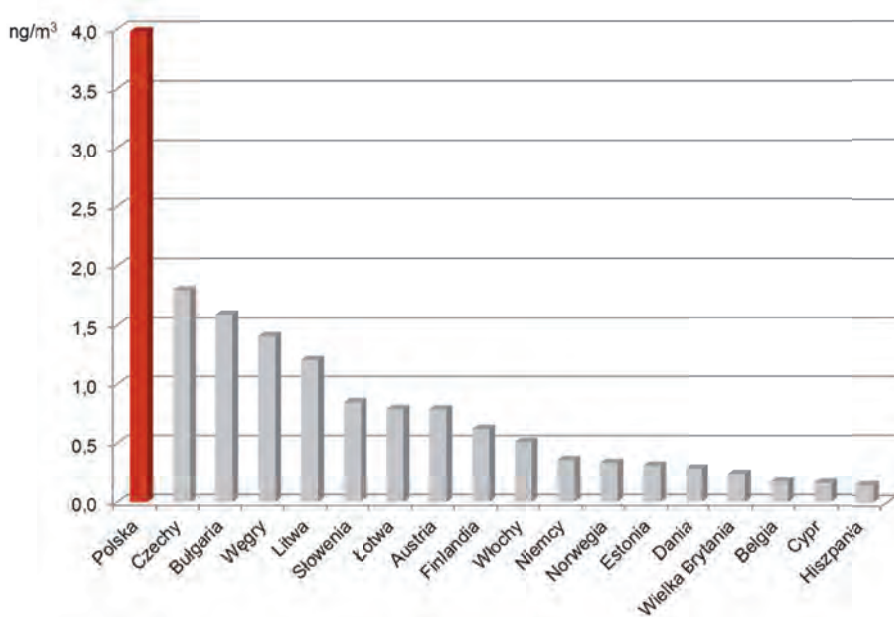
Ryc. 2. Średnie roczne stężenie pyłu zawieszonego PM10 uśrednione dla wszystkich stacji tła (miejskich i pozamiejskich) w wybranych państwach europejskich w 2014 r.

Pod względem średniego rocznego stężenia pyłu zawieszonego PM10 w pobliżu dróg Warszawa plasuje się na trzecim miejscu najbardziej zanieczyszczonych stolic Europy – po Sofii i Nikozji (ryc. 1). Stężenie PM10 mierzone na stacjach regionalnego tła, czyli poza bezpośrednim wpływem zanieczyszczeń komunikacyjnych i poza centrami miast, jest w Polsce prawie najwyższe w Europie. Wyższe stężenie notuje

się jedynie w Bułgarii – kraju trzykrotnie mniejszym, z pięciokrotnie niższą liczbą mieszkańców i o 41% niższym PKB na mieszkańca w porównaniu z Polską (ryc. 2). Oznacza to, że problem zanieczyszczenia powietrza pyłem PM₁₀ jest w Polsce ogromny i dotyczy wszystkich jej mieszkańców. Uwzględniając stężenie pyłu PM_{2,5}, w Polsce leży siedem z dziesięciu najbardziej zanieczyszczonych miast Unii Europejskiej oraz 33 miasta z grupy 50 z najbardziej zanieczyszczonym powietrzem (w 2015 r. miastem z najwyższym średnim rocznym stężeniem pyłu PM_{2,5} w UE był Żywiec, a w latach wcześniejszych była to m.in. Pszczyzna).

Najgroźniejsza jest jednak obecność w powietrzu wielopierścieniowych węglodorów aromatycznych, których stężenie jest w Polsce najwyższe w Europie. W latach 2000-2014 stężenie to nieustannie rosło i wciąż nie maleje, a średnio w roku przekracza dopuszczalną normę o blisko 300% (ryc. 3). Największym źródłem zanieczyszczenia powietrza pyłami PM₁₀, PM_{2,5} oraz benzo(a)pirenem jest niska emisja (indywidualne ogrzewanie budynków) – według GIOŚ [2015] odpowiedzialna za 88% przekroczeń dopuszczalnego średniego dobowego stężenia i 78% całkowitej emisji benzo(a)pirenu z terenu Polski.

Przekroczenia normy dobowej dla stężenia pyłu PM₁₀ obserwuje się przede wszystkim zimą, w czasie sezonu grzewczego, a zatem wtedy, gdy znaczna część Polaków ogrzewa domy z użyciem węgla, drewna, a nierzadko też śmieci.



Ryc. 3. Średnie roczne stężenie benzo(a)pirenu w wybranych państwach europejskich w 2014 r.

Normy zanieczyszczeń, które obowiązują w Polsce, usankcjonowane są *Rozporządzeniem Ministra Środowiska z 24 sierpnia 2012 r. w sprawie poziomów niektórych substancji w powietrzu* (Dz. U. z 2012 r., poz. 1031) (tab. 1).

Tabela 1

Dopuszczalne i docelowe poziomy niektórych substancji ze względu na ochronę zdrowia ludzi oraz okresy, dla których uśrednia się wyniki pomiarów

Nazwa substancji	Okres uśredniania wyników pomiarów	Dopuszczalny poziom substancji w powietrzu ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) ze względu na ochronę zdrowia ludzi oraz dopuszczalna częstość przekraczania poziomu dopuszczalnego w roku kalendarzowym (D)	
Benzen	rok kalendarzowy	5	
Dwutlenek azotu	jedna godzina	200+18D	
	rok kalendarzowy	40	
Dwutlenek siarki	jedna godzina	350+24D	
	24 godziny	125+3D	
Ołów	rok kalendarzowy	0,5	
Pył zawieszony PM10	24 godziny	50+35D	
	rok kalendarzowy	40	
Pył zawieszony PM2,5	rok kalendarzowy	25 ¹ / 20 ²	
Tlenek węgla	8 godzin	10000	
Ozon	8 godzin	120+25D	
Nazwa substancji	Okres uśredniania wyników pomiarów	Docelowy poziom substancji w powietrzu ($\text{ng}\cdot\text{m}^{-3}$)	Termin osiągnięcia poziomu docelowego substancji
Arsen	rok kalendarzowy	6	2013
Benzo(a)piren	rok kalendarzowy	1	2013
Kadm	rok kalendarzowy	5	2013
Nikiel	rok kalendarzowy	20	2013

¹ – Poziom dopuszczalny dla pyłu zawieszzonego PM2,5 do osiągnięcia do 1 stycznia 2015 r.

² – Poziom dopuszczalny dla pyłu zawieszzonego PM2,5 do osiągnięcia do 1 stycznia 2020 r.

Dopuszczalny poziom stężeń i liczba możliwych przekroczeń jest w Polsce zgodna z wytycznymi Unii Europejskiej, choć w przypadku pyłu PM10 i PM2,5 poziom ten jest wyższy niż sugerowany przez Światową Organizację Zdrowia [WHO 2006]. Według WHO bezpieczne dla człowieka średnie roczne stężenie PM10 wynosi $20 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,

a $PM_{2,5}$ – $10 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, zatem obecne normy nie odzwierciedlają prawdziwego, negatywnego oddziaływania tych substancji na organizm człowieka.

Poziom alarmowy $100 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ dla stężenia pyłu PM_{10} , przyjęty w wielu krajach Europy, przekraczany jest w Polsce bardzo często. Gdyby w Polsce przyjąć podobny poziom alarmowania, jak we Włoszech ($75 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$), to rokrocznie liczba dni, w których należałoby ogłosić alarm smogowy (stan wysokiego stężenia pyłów zawieszonych w powietrzu), w Krakowie wynosiłaby ok. 100, a w Łodzi i Zakopanem ok. 30. Ze względu na powyższe, aby nie ogłaszać zbyt często alarmów smogowych, w Polsce zastosowano wybieg prawny w postaci ustanowienia bardzo wysokiego poziomu informowania i poziomu alarmowego (tab. 2). Zmniejszona częstość ogłaszania alarmów smogowych nie zmienia jednak faktu, że Polacy, obok Bułgarów, oddychają najbardziej zanieczyszczonym powietrzem w Europie.

Tabela 2

Poziom informowania i alarmowania dla średniego dobowego stężenia PM_{10} [$\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$] w wybranych państwach europejskich

Kraj	Poziom informowania	Uwagi – poziom informowania	Poziom alarmowy	Uwagi – poziom alarmowy
Belgia	50	prognoza 1-dniowa	70	2 następujące po sobie dni
Bośnia i Hercegowina	50 300 (ostrzeżenie)	prognoza na 3 dni	400	
Czechy	100	-	150	2 następujące po sobie dni
Finlandia	50	prognoza 1-dniowa	50	
Francja	50	prognoza 1-dniowa	80	
Polska	200		300	
Słowacja	100		150	
Szwajcaria	75		100	
Węgry	75		100	2 następujące po sobie dni
Wielka Brytania	76		101	
Włochy (Lombardia)	50		75	7 następujących po sobie dni

Źródło: [https://www.levego.hu/sites/default/files/smog_emergency_schemes_in_europe_201703.pdf].

2. Wpływ zanieczyszczeń powietrza na człowieka

Jak wspomniano na początku, jakość powietrza jest jednym z podstawowych czynników wpływających na zdrowie człowieka. Dorosły człowiek wdycha 10-12 m³ powietrza w ciągu doby, a wraz z powietrzem do organizmu dostają się różne zanieczyszczenia. Stężenie większości zanieczyszczeń zależy od wielkości ich emisji do atmosfery, ale też od specyficznych sytuacji pogodowych (np. zimowa antycyklonalna cyrkulacja atmosferyczna, z niską temperaturą powietrza, małą prędkością wiatru i brakiem opadów atmosferycznych).

Reakcja organizmu na działanie substancji toksycznej ma charakter:

- ostry, wywołany jednorazowym wprowadzeniem do organizmu dużej dawki substancji,
- chroniczny, wywołany długotrwałym wprowadzaniem do organizmu małych dawek substancji,
- utajony, kiedy skutki wprowadzenia do organizmu pewnych dawek substancji toksycznej mogą się ujawnić dopiero po dłuższym czasie [Juda-Rezler 2000].

Wszystkie opisane poniżej związki chemiczne (a także wiele innych) występują w środowisku i wpływają na organizm człowieka równocześnie, zazwyczaj nasilając w ten sposób swe toksyczne oddziaływanie. W powietrzu współistnieją związki siarki, węgla i pyły powstałe ze spalania paliw kopalnych (składniki tzw. smogu redukującego – „londyńskiego”), których największe stężenie notowane jest w sezonie grzewczym, jak i te będące rezultatem przemian fotochemicznych, czyli tlenki azotu, ozon, czy węglowodory, które łącznie tworzą smog utleniający, występujący najczęściej w półroczu ciepłym – tzw. smog typu Los Angeles [Boubel *et al.* 1994]. Dla zdrowia szczególnie niebezpieczne są wielopierścieniowe węglowodory aromatyczne, które zawsze występują w mieszaninie i mają udowodnione silne działanie nowotworowe i mutagenne, a najpopularniejszym ich przedstawicielem jest benzo(a)piren.

Dwutlenek siarki (SO₂) – produkt uboczny spalania paliw kopalnych – prowadzi do skurczu oskrzeli, podrażnienia błon śluzowych dróg oddechowych i spojówek, przekrwienia i obrzęku dolnych odcinków dróg oddechowych, przewlekłego zapalenia oskrzeli, zaostrzenia astmy, chorób układu krążenia, zmniejszonej odporności płuc na infekcje. W warunkach normalnych stężeń, SO₂ zatrzymywany jest w górnych drogach oddechowych, usuwany przez kaszel, kichanie i nie dostaje się do płuc. Łatwe rozpuszczanie dwutlenku siarki w roztworach, a więc i w wydzielinie błon śluzowych, powoduje tworzenie silnie toksycznego kwasu siarkowego. Dlatego szczególnie niebezpieczne jest wysokie stężenie SO₂ współwystępujące z mgłą, gdyż powstający kwas siarkowy przenika do rejonu tchawicowo-oskrzelowego i do przestrzeni pęcherzykowej płuc [Koenig, Covert 1989; Jędrychowski 1995].

Powszechnie uważa się, że negatywne oddziaływanie SO₂ rozpoczyna się przy stężeniu chwilowym 1 ppm, czyli ok. 2,93 mg·m⁻³. Dziesięciominutowa inhalacja powietrzem o stężeniu SO₂ równym 5 ppm powoduje 30% wzrost oporów przepływu

powietrza, a także spadek objętości wydechowej płuc. Zdrowe organizmy, w warunkach przeciętnych stężeń, w większości adaptują się do nich, ale czasem stała ekspozycja na nawet niewielkie stężenia SO_2 prowadzi do powstania chronicznego bronchitu u dorosłych i dzieci oraz istotnego osłabienia układu immunologicznego [Juda, Chróściel 1974; EPA 2016].

Tlenek węgla (CO, czad) pochodzi głównie z wysokotemperaturowego spalania paliw kopalnych oraz z silników spalinowych. Jest dziesięciokrotnie bardziej toksyczny od SO_2 , a na jego najwyższe stężenia narażeni są pracujący w centrach miast i przebywający na ulicach w godzinach szczytu komunikacyjnego. Dostaje się do organizmu głównie przez drogi oddechowe, ale też przez skórę i błony śluzowe. Tlenek węgla szybko łączy się z hemoglobina, a powstała karboksyhemoglobina (HbCO) jest niezdolna do przenoszenia tlenu i prowadzi do głodu tlenowego, który jest szczególnie groźny dla osób cierpiących na chorobę wieńcową serca, dusznicę bolesną i inne przewlekłe choroby układu krążenia.

Średnie stężenie karboksyhemoglobiny we krwi u osób niepalących wynosi 0,5%, u palących ok. 5%. Wzrost stężenia HbCO u człowieka niepalącego do poziomu 5% powoduje przyspieszenie przepływu krwi i zmiany sercowo-naczyniowe, m.in. zmiany pojemności minutowej serca. Pierwszymi objawami zatrucia organizmu jest pogorszenie percepcji różnic oświetlenia. Przy 20% stężeniu HbCO pojawia się ból i zawroty głowy, znużenie. Większe stężenia prowadzą do trwałych zmian w mózgu, utraty mowy, a za wartość krytyczną, prowadzącą do zgonu, przyjmuje się 60% stężenie HbCO. Długotrwała ekspozycja na małe stężenia CO sprzyja adaptacji przejawiającej się zwiększeniem liczby czerwonych krwinek lub przeciwnie – niedokrwistości, która w jeszcze większym stopniu naraża chorego na niedotlenienie [Folinsbee 1992; CIOP 2016].

Głównymi źródłami **tlenków azotu** (NO , NO_2 , NO_x) są: transport drogowy (silniki Diesla), lokalne systemy grzewcze i technologiczne procesy wysokotemperaturowe. Toksyczne oddziaływanie dwutlenku azotu (NO_2) przejawia się osłabieniem funkcji obronnych płuc i zaburzeniem ich wentylacji, zmniejszeniem nasycenia krwi tlenem, obniżeniem zdolności samooczyszczania dróg oddechowych, a tym samym zmniejszeniem odporności na infekcje bakteryjne dolnych odcinków dróg oddechowych. NO_2 wykazuje też działanie niespecyficzne objawiające się pobudzeniem układu wegetatywnego, niepokojem, bezsennością, depresją [Sroczyński 1988]. Wdychany w wysokich dawkach, powyżej $6 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$, powoduje obrzęk płuc, jednak w stężeniach spotykanych w środowisku miejskim – kilkadziesiąt razy niższych – nie jest groźny dla człowieka. Tlenki azotu odgrywają istotną rolę w powstawaniu kwaśnych deszczy, smogu zimowego oraz letniego (fotochemicznego), czyli zjawisk o różnej skali i oddziaływaniu, co stanowi dodatkową trudność w ocenie ich wpływu na człowieka [Seńczuk 2002].

Ozon (O_3) troposferyczny jest zaliczany do tzw. zanieczyszczeń wtórnych, gdyż powstaje wskutek utleniania, pod wpływem promieniowania ultrafioletowego, zanieczyszczeń pierwotnych – gazów będących składnikiem spalin samochodowych: NO_x , CO, CH_4 . Ozon jest głównym składnikiem tzw. smogu fotochemicznego, występującego

przy wysokiej temperaturze powietrza ($>25^{\circ}\text{C}$) [Kozłowska-Szczęśna 1959], wysokim usłonecznieniu, w miastach o dużym natężeniu ruchu samochodowego [Höppe 1995] oraz w sytuacjach inwersji termicznych [Kuchcik 2000, 2001a,b].

Wdychany przez człowieka ozon, z powodu słabej rozpuszczalności w wodzie, przenika głęboko do płuc, powodując wzrost reakcji niespecyficznych, z niewielkim skurczem oskrzeli. Powoduje spadek pojemności życiowej płuc, zmniejszenie wentylacji i objętości wydechowej. Nawet niewielkie stężenia O_3 powodują niszczenie komórek nabłonka w drogach oddechowych, co z kolei prowadzi do nadczynności płuc, która może nasilać reakcje na inne zanieczyszczenia, kwas siarkowy czy alergen [Bell *et al.* 2005; EPA 2016]. Długotrwała ekspozycja na podwyższone stężenia O_3 prowadzi do zwłóknienia tkanki opłucnej, zaś ostre zatrucie przejawia się kaszlem, spadkiem ciśnienia krwi, sennością, bólem w klatce piersiowej, przyspieszeniem tętna, bólem głowy i obrzękiem płuc, który bezpośrednio prowadzi do zgonu [Juda-Rezler 2000].

Pyły zawieszone (PM₁₀, PM_{2,5}) pochodzą w mieście, w okresie grzewczym, głównie ze spalania paliw kopalnych – zwłaszcza w paleniskach indywidualnych przy niskiej temperaturze spalania. Ich źródłem jest też ścieranie asfaltu, opon samochodowych i metali. Mogą pochodzić również z budów czy być wywiewane z powierzchni niepokrytych roślinnością – stąd ich wysoka koncentracja także w porze ciepłej. Szkodliwe działanie wykazuje pył zawieszony PM₁₀ (o średnicy ziaren $<10\ \mu\text{m}$), w tym w szczególności cząstki o wymiarach 3-5 μm i mniejsze [WHO 2013]. Pył PM_{2,5} emitowany jest jako zanieczyszczenie pierwotne, ale też powstaje jako zanieczyszczenie wtórne w wyniku przemian jego prekursorów: SO_2 , NO_2 , NH_3 i lotnych związków organicznych [CIOP-PIB 2016].

Depozycja cząstek w układzie oddechowym zależy od ich wielkości – większe zatrzymywane są w jamie nosowej i gardle, mniejsze niż $5\ \mu\text{m}$ mogą wnikać głębiej. Do dolnych dróg oddechowych docierają cząstki o średnicy $<3\ \mu\text{m}$, czyli tzw. respirabilna frakcja pyłu, która odgrywa największą rolę w patologii płuc [Kirschner 1996]. Zostają wchłonięte przez limfę i krew lub zdeponowane w pęcherzykach płucnych, powodując ich zniszczenie [Jędrychowski 1986; Seńczuk 2002].

Ogólnie, pył zawieszony powoduje nasilenie kaszlu, kichanie (konieczne przy eliminacji większych cząstek z górnych dróg oddechowych), trudności z oddychaniem, chroniczny bronchit, osłabienie czynności płuc, pylicę płuc, rozedmę, czy raka płuc – zwłaszcza wśród pracowników niektórych gałęzi przemysłu. Skutki zdrowotne wdychania pyłów dotyczą najczęściej osób w podeszłym wieku, chorujących na astmę, oraz dzieci, które wdychają o 50% więcej powietrza (w przeliczeniu na kilogram masy ciała) niż dorośli [Seńczuk 2002]. Wiele pyłów roślinnych lub zwierzęcych, unoszących się w powietrzu, może działać alergizująco, powodując np. wystąpienie astmy oskrzelowej [Piekarska *et al.* 2009].

Najbardziej rakotwórcze i toksyczne są wielopierścieniowe węglowodory aromatyczne (WWA), do których zalicza się kilkaset związków, w tym **benzo(a)piren (B(a)P)** – uznawany w Polsce za wyznacznik wszystkich WWA – dibenzo(a,h)antracen, czy

benzo(b)fluorant. Większość z nich jest ściśle powiązana z pyłem zawieszonym. Ich głównym źródłem jest niska emisja powierzchniowa, czyli używanie węgla i biomasy w ogrzewnictwie indywidualnym, w domowych piecach centralnego ogrzewania i w kominkach, niekontrolowane spalanie odpadów, spaliny samochodowe oraz dym tytoniowy. Ocenia się, że emisja związana z indywidualnym ogrzewaniem budynków stanowi od 78% [GIOŚ 2015] do 87% [Wieczorek *et al.* 2011] całkowitej emisji benzo(a)-pirenu z terenu Polski. Główne źródło emisji powoduje, że nawet na terenach nieuprzemysłowionych czy w dzielnicach domów jednorodzinnych, wysoce kancerogenne WWA stanowią poważne zagrożenie dla zdrowia człowieka [Smolik 2010; CIOP 2016].

WWA działają toksycznie przez drogi oddechowe, w kontakcie ze skórą i po spożyciu skażonych pokarmów. Uszkadzają układ krwiotwórczy szpiku kostnego, powodują: skazę krwotoczną, zmniejszenie liczby białych krwinek, niedokrwistość. Tworzą trwałe połączenia z DNA i mają zdolność kumulowania się w organizmach, co bardzo prawdopodobnie prowadzi do procesu nowotworowego (białaczki, nowotworów płuc i pęcherza moczowego). Związki te działają bezprogowo, co oznacza, że każde stężenie powoduje wzrost ryzyka nowotworu [Rusin, Marchwińska-Wyrwał 2014]. Następstwem narażenia może być też uszkodzenie centralnego układu nerwowego i bezpłodność [ATSDR 1995; Irwin *et al.* 1997; Ba *et al.* 2016].

Oprócz tego, że opisane powyżej substancje oddziałują na człowieka w środowisku zewnętrznym, duże znaczenie ma zanieczyszczenie powietrza wewnątrz budynków, w których ludzie spędzają większość dnia. Na stan powietrza w budynkach wpływa zarówno zanieczyszczone powietrze przenikające z zewnątrz, jak i inne źródła emisji: kuchenki gazowe, dym papierosowy, kleje i lakiery wykorzystywane w produkcji mebli i in., zatem prawidłowe oszacowanie wpływu zanieczyszczeń powietrza na ludzi napotyka jeszcze więcej utrudnień.

Na zanieczyszczenia atmosfery najbardziej narażone są dzieci, ludzie w podeszłym wieku, kobiety ciężarne oraz osoby z chorobami dróg oddechowych, w tym z przewlekłą obturacyjną chorobą płuc (POChP). Badania wskazują, że długotrwała ekspozycja na zanieczyszczenia powietrza wywołuje schorzenia naczyniowe, zawały serca, udary, astmę i alergie już na etapie życia płodowego.

Według badań prowadzonych w latach 1970-1990 w Stanach Zjednoczonych, Wielkiej Brytanii, Niemczech, Brazylii oraz w Hiszpanii, średni wzrost stężenia pyłu zawieszonego o $10 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ pociągał za sobą opóźnione o 1-2 dni zwiększenie o 1-4% liczby wizyt w szpitalu, a o 0,5-1,5% – liczby zgonów. W miastach o wysokim zapyleniu powietrza ryzyko śmierci było o 15-25% wyższe niż w miastach o małym zapyleniu, a wzrost stężenia pyłu o $10 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ powodował co najmniej 3% wzrost umieralności ogólnej.

W programie APHEA (1992-1995) badającym krótkoterminowy wpływ pyłu BS (mierzonego metodą reflektometryczną), SO_2 oraz NO_2 na zgony w latach 1990-1996 ujęto Kraków, Łódź, Wrocław i Poznań. Analiza zgodnie wskazuje na istotny statystycznie krótkookresowy wpływ powyższych zanieczyszczeń powietrza na umieralność, zarówno ogółem, jak i z powodu poszczególnych przyczyn (tab. 3) [Rabczenko *et al.* 2005].

Tabela 3

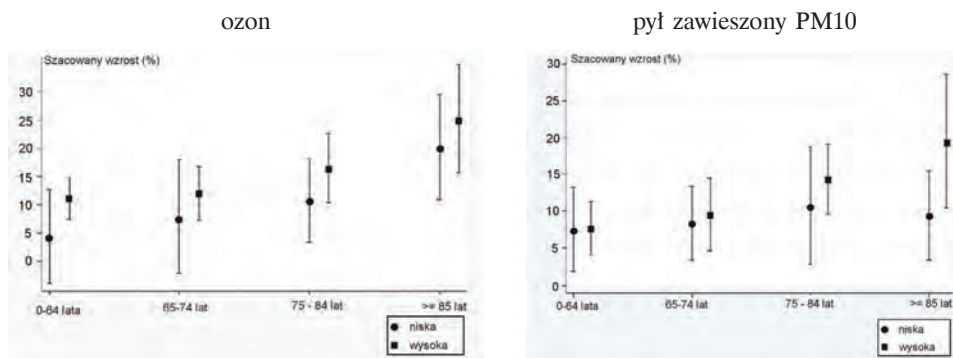
Procent zmiany dziennej liczby zgonów związany ze wzrostem stężenia zanieczyszczeń powietrza o $10 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ SO_2 , BS i NO_2 łącznie w 4 miastach: Krakowie, Łodzi, Wrocławiu i Poznaniu

	Układ krążenia	Układ oddechowy	Ogółem
SO_2	0,4	2,1	0,4
Pył BS	0,1	0,6	0,1
NO_2	0,9	1,7	0,8

Źródło: [Rabczenko *et al.* 2005].

Projekt APHEA 2 (29 miast Europy, lata 1998-2001) wykazał, że wzrost stężenia PM_{10} o $10 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ w miastach z ogólnie wysokim stężeniem pyłów prowadził do średniego wzrostu umieralności ogółem o 0,8% oraz do wzrostu częstości hospitalizacji: o 1,2% dzieci z astmą, o 1,1% dorosłych z astmą i o 1% z przewlekłą obturacyjną chorobą płuc [Samoli *et al.* 2003].

W projekcie EuroHEAT (9 miast w Europie) potwierdzono wyraźnie zwiększenie liczby zgonów w dniach upalnych, w których jednocześnie występował wysoki poziom ozonu (ryc. 4). Wzrost umieralności wynosił 16,2% w grupie osób w wieku 75-84 lata i aż 25% wśród osób powyżej 85 roku życia. W dniach z niskim stężeniem ozonu umieralność była odpowiednio niższa o ok. 5%. Także pył zawieszony okazał się najbardziej niebezpiecznym dla osób powyżej 85 roku życia, ponieważ przy jego wysokim stężeniu, umieralność była wyższa o ok. 10% w stosunku do dni upalnych z czystym powietrzem. W grupie osób w wieku 75-84 lat różnica ta wyniosła ok. 4% [Menne, Matthies 2009].



Ryc. 4. Wzrost liczby zgonów w dniach z wysoką temperaturą powietrza przy niskiej i wysokiej zawartości ozonu oraz pyłu zawieszonyego PM_{10}

Źródło: [Menne, Matthies 2009].

Badania prowadzone w Krakowie i w Zabrzu w latach 70. i 80. XX w. wykazały istotną korelację dodatnią między stężeniem pyłu i SO₂ a zgonami ogółem w okresie zimowym. Wskutek wzrostu stężenia SO₂ o 100 µg·m⁻³ liczba zgonów z powodu chorób układu oddechowego wzrastała o 19%, a układu krążenia o 10%. Latem dowiedziono istotną zależność pomiędzy stężeniem pyłów oraz zgonami z powodu chorób naczyniowych mózgu i pozostałych chorób układu krwionośnego. Przy wzroście zanieczyszczenia notowano także 5-10% wzrost częstości napadów astmy u dzieci. Na najbardziej zanieczyszczonym obszarze Górnośląskiego Okręgu Przemysłowego częstość zaostrzeń astmy u dzieci była wyższa nawet o 50% w porównaniu z terenami mniej zanieczyszczonymi [Morawska-Horawska *et al.* 1984; Jędrychowski 1995].

Korelacja liczby zgonów w Warszawie w latach 1994-1995 z zanieczyszczeniem powietrza (NO_x, SO₂, CO, O₃, PM10) wykazała, że średnio w roku 22% zmienności liczby zgonów z powodu chorób układu krążenia wyjaśnione jest zmianami zanieczyszczenia powietrza: w tym 28% w półroczu chłodnym, a 21% w półroczu ciepłym [Kuchcik 2003].

Analiza zgonów ogółem, zgonów z powodu nowotworu płuca, choroby niedokrwiennej serca i łącznie z powodu chorób krążeniowo-oddechowych oraz zanieczyszczeń powietrza w jedenastu największych miastach Polski wykazała, że w najgorszej sytuacji jest Kraków, a następnie Łódź, Katowice i Warszawa z Bydgoszczą. Naukowcy z Wojskowego Instytutu Medycznego i Politechniki Warszawskiej oszacowali, że wysokie stężenie pyłów PM10 i PM2,5 w Warszawie może być – w zależności od roku – przyczyną 1400-1800 zgonów rocznie z powodu chorób układu krążenia i płuc, w tym w szczególności z powodu POChP, od 600 do 1000 zgonów z powodu choroby niedokrwiennej serca i do 350 zgonów z powodu nowotworu płuc [Badyda 2016].

Analiza z 2005 r. wykazała, że zanieczyszczenie powietrza w pobliżu jednej z głównych arterii komunikacyjnych w Warszawie (al. Niepodległości) powoduje, że ryzyko wystąpienia chorób obturacyjnych u osób niepalących, mieszkających w okolicy jest pięciokrotnie wyższe w porównaniu do grupy kontrolnej. W grupie osób palących ryzyko to jest dwukrotnie wyższe w stosunku do grupy kontrolnej [Badyda 2006].

Wzrost zachorowalności i umieralności z powodu wysokiego poziomu zanieczyszczeń powietrza (w Polsce szacowany w ostatnich latach na 45-47 tys. rocznie), a także wzrost częstości alergii i chorób przewlekłych ponosi za sobą wymierne koszty w postaci: konsultacji lekarskich, leków, hospitalizacji, rent, wcześniejszych emerytur, ale też w postaci obniżonej produktywności i absencji w pracy, czy skrócenia czasu trwania życia. Według Światowej Organizacji Zdrowia [WHO 2015] silne zanieczyszczenie powietrza w Polsce w 2010 r. kosztowało Polaków ok. 102 mld dolarów, co stanowiło 12,9% PKB. Po Federacji Rosyjskiej i Niemczech była to najwyższa suma spośród 50 krajów branych pod uwagę w badaniu. W koszcie tym zawarty jest koszt ekonomiczny obejmujący 19 mln utraconych dni roboczych, będących wynikiem chorób związanych z zanieczyszczeniem powietrza [KE 2017].

Społeczeństwo polskie traci ok. 520 tys. potencjalnych lat życia, a gospodarka 18,5 mln dni pracy [Holland 2014]. W samej Warszawie całkowite koszty zdrowotne

związane z zanieczyszczeniem powietrza wynoszą od 6 mld do 18,3 mld zł [Badyda 2016].

Światowa Organizacja Zdrowia obliczyła też, że z powodu zanieczyszczeń atmosfery długość życia w Europie ulega skróceniu średnio o osiem i pół miesiąca [WHO 2013]. W 2015 r. średnia długość życia mężczyzn w Polsce wyniosła 73,6 lat, zaś kobiet 81,6 lat [GUS 2016]. Mężczyźni w Polsce żyją o 5 lat krócej od Niemców, o 6 lat krócej od Szwajcarów i Szwedów, a kobiety o 1,2-1,4 roku krócej od Brytyjek czy Niemek i o 3,2-3,3 roku krócej od Włoszek czy Hiszpanek.

Kwaśne deszcze będące wynikiem reakcji związków siarki, azotu i węgla z wodą deszczową i mgłą wpływają katastrofalnie nie tylko na ekosystemy naturalne, ale oddziałują niszcząco na budynki, w tym zabytki architektury, rozpuszczając wapien (spoiny murów, rzeźby, kolumny). W samym Krakowie roczny koszt renowacji zabytków zniszczonych wskutek zanieczyszczenia powietrza to 40 mln zł [Sadlok 2014].

3. Wpływ warunków atmosferycznych na stężenie zanieczyszczeń powietrza

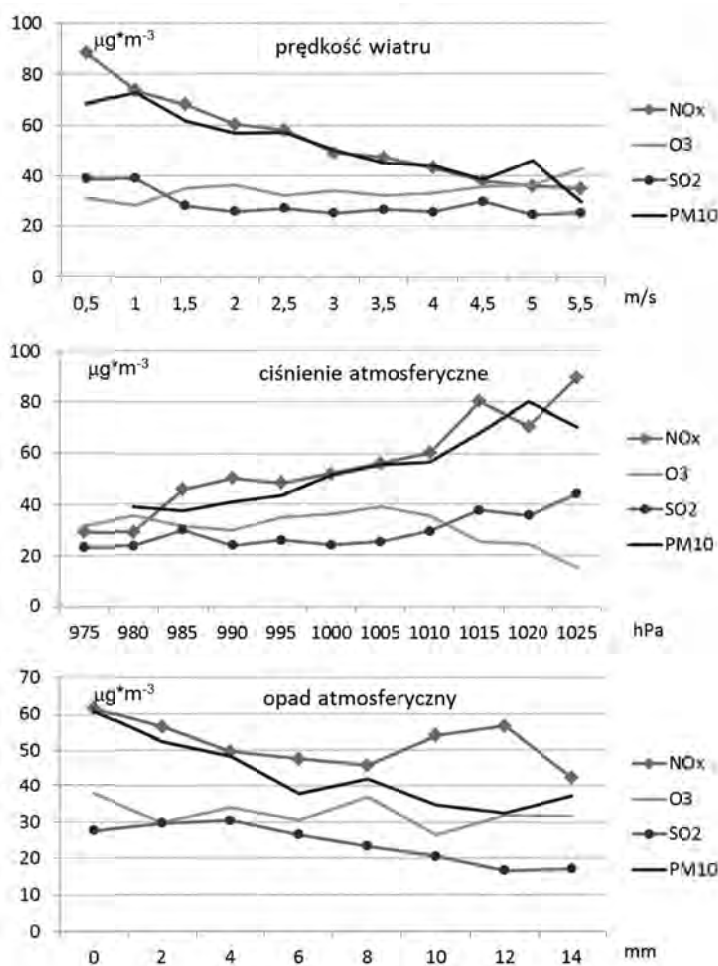
Przy powierzchni ziemi stężenie zanieczyszczeń powietrza zależy od wielu czynników, tj. rodzaju i „efektywności” źródła zanieczyszczenia (powierzchniowe, punktowe), jego wysokości, odległości od źródła, właściwości samego zanieczyszczenia (ciężar właściwy, możliwość przemian chemicznych) i in. [Sorbjan 1983]. Najwięcej mechanizmów dyspersji zanieczyszczeń zależy jednak od warunków atmosferycznych, a zwłaszcza od temperatury powietrza, prędkości wiatru, wysokości i charakteru opadu, ciśnienia atmosferycznego, czy wilgotności powietrza.

Stężenie zanieczyszczeń powietrza jest silnie związane z temperaturą powietrza. Jej spadek powoduje konieczność ogrzewania budynków i zimowy wzrost stężenia SO_2 , CO, PM10, PM2,5, WWA. Wraz ze wzrostem temperatury powietrza wzrasta z kolei koncentracja O_3 .

Największe zagrożenie dla stanu sanitarnego powietrza stanowi cisza atmosferyczna i długotrwały okres z wiatrem słabym. Najwyższe stężenia NO_x i pyłu zawieszonego notuje się na Śląsku, w Krakowie czy w Warszawie (ryc. 5) w dniach z ciszą atmosferyczną lub słabym wiatrem [Cwynar, Romańska 1981; Tomaszewska 1994; Kuchcik 2000].

Opad atmosferyczny, oprócz wymywania pyłów z atmosfery, uczestniczy też w procesie przemian związków gazowych oraz w rozpuszczaniu ich w wodzie opadowej już po spadnięciu na ziemię [Hryniewicz 1982]. Deszcz łatwo usuwa cząstki duże, zaś cząstki małe usuwane są częściej wskutek przemian chemicznych [Hryniewicz 1973]. Opad skutecznie wymywa SO_2 (przemiana w aerozole siarczanowe) [Suryjak, Tomaszewska 1992]. Czasami okazuje się jednak, że mimo wymywania zanieczyszczeń z powietrza, ich koncentracja przy powierzchni ziemi nie tylko nie maleje, lecz nawet

rośnie wskutek intensywnego parowania silnie zmineralizowanego deszczu. Opad, zwłaszcza długotrwały i drobny, uznawany jest za sprzyjający polepszeniu warunków higienicznych powietrza (ryc. 5).



Ryc. 5. Stężenie podstawowych zanieczyszczeń powietrza w Warszawie przy różnych wartościach prędkości wiatru, ciśnienia atmosferycznego i wysokości opadu atmosferycznego w latach 1994-1995

Źródło: [dane niepublikowane, Kuchcik 2000].

Koncentracja zanieczyszczeń w powietrzu jest ściśle związana z ciśnieniem atmosferycznym (ryc. 5) i jego rozkładem przestrzennym, czyli lokalizacją układów barycznych. Od sytuacji barycznej zależy grubość warstwy granicznej, a więc także grubość warstwy mieszania i jej stratyfikacja termiczna. W szerokościach umiarkowanych

pogoda kształtowana jest najczęściej przez systemy frontów atmosferycznych związane z przemieszczającymi się niżami, w których występuje pogoda zmienna, z wiatrem o znacznej prędkości i opadami. W większości obszaru niżu pogoda sprzyja dyspersji zanieczyszczeń, jednak przed linią frontu ciepłego tworzą się inwersje termiczne, które hamują usuwanie zanieczyszczeń.

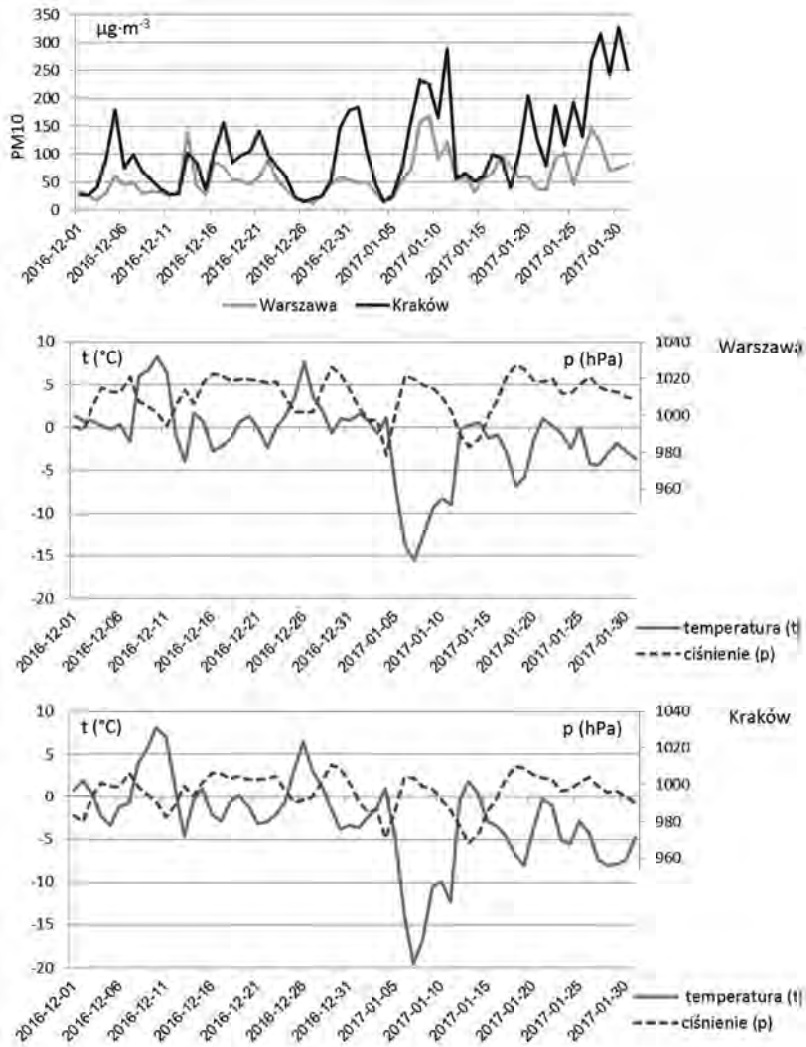
Epizodom smogu towarzyszy zazwyczaj mała prędkość wiatru lub cisza atmosferyczna, zmniejszenie widzialności i inwersje termiczne. Warunki takie kształtują się w silnych układach antycyklonalnych (wyżach), które wolno przemieszczają się lub stagnują nad danym obszarem. Układy te charakteryzują się obecnością dużego zachmurzenia oraz utrudnionym rozwojem pionowych ruchów powietrza. W latach 1994-1995 podczas sytuacji wyżowych stężenie SO_2 było w Warszawie wyższe od średniego o 16%, NO_x o 24%, zaś PM_{10} o 27% [Kuchcik 2000]. Wzrostowi stężenia zanieczyszczeń sprzyjają także sytuacje słabogradientowe [Kuroś, Morawska-Horawska 1989] oraz sytuacje, kiedy po długo zalegającym wyżu nadchodzi niż, poprzedzony inwersją termiczną [Kuchcik 2000]. Wyże atmosferyczne są z natury stabilne. Często przynoszą piękną, słoneczną, bezwietrzną pogodę – upalną latem i mroźną zimą. Zawsze powodują wzrost stężenia zanieczyszczeń powietrza – zimą smog redukcyjny, zaś latem smog fotochemiczny. Wypełniającym się układom wyżowym lub słabogradientowym obszarom wysokiego ciśnienia często towarzyszą mgły, sprzyjające niebezpiecznym przemianom chemicznym zanieczyszczeń powietrza [Niedźwiedź, Ustrnul 1989; Suryjak, Tomaszewska, 1992; Walczewski 1994].

Wpływ warunków atmosferycznych na stężenie zanieczyszczeń powietrza najlepiej obrazuje przykład epizodu smogowego, jaki zimą 2016/2017 objął całą Polskę. Najwyższe średnie dobowe stężenie pyłu PM_{10} w Warszawie osiągnęło 9.01.2017 r. wartość $170,3 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 30.01.2017 r. w Krakowie – $327,2 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ i aż $499,2 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ w Bydgoszczy (9.01.2017 r.) (ryc. 6).

Zestawienie średniego dobowego stężenia pyłu PM_{10} ze średnią temperaturą powietrza i ciśnieniem atmosferycznym dla okresu zimowego 2016/2017 pokazuje wyraźnie, że każdy spadek temperatury znajdował odzwierciedlenie we wzroście stężenia pyłu PM_{10} , tym większym, im niższą temperaturę powietrza notowano. Współistnienie niskich wartości temperatury powietrza i wysokich wartości stężeń pyłów jest bardzo wyraźne. Zmiany temperatury powietrza tłumaczą odpowiednio 40% zmienności stężenia pyłu PM_{10} w Warszawie i 42% w Krakowie. Związek z ciśnieniem atmosferycznym jest wyraźny, choć nie tak istotny.

Jedne z pierwszych epizodów wysokiego stężenia zanieczyszczeń powietrza, które skojarzono z nagłym wzrostem umieralności, wystąpiły w Londynie, w latach 1952, 1956 i 1957. Smog w grudniu 1952 r. był najtragiczniejszym w skutkach i zarazem pierwszym, w którym zebrano dane zarówno o warunkach meteorologicznych, jak i o skutkach zdrowotnych. Przez kilka dni w grudniu utrzymywała się mgła, a stężenie pyłu sięgało blisko $4500 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, zaś SO_2 ponad $3800 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. W czasie epizodu smogu notowano prawie trzykrotny wzrost umieralności ogólnej, ale podwyższona umieral-

ność utrzymywała się przez kilka miesięcy. W sumie szacuje się, że liczba ofiar tego smogu sięgnęła 7000 [Boubel *et al.* 1994]. Przypadki smogu w latach 50. wymusiły na władzach Londynu i całej Wielkiej Brytanii zmiany prawa i wymianę pieców.



Ryc. 6. Średnie dobowe stężenie pyłu zawieszonego PM10, temperatura powietrza i ciśnienie atmosferyczne w Krakowie i w Warszawie w okresie od 1 grudnia 2016 r. do 31 stycznia 2017 r.

Źródło: Dane WIOŚ, opracowanie własne.

Analizy przypadków smogu i wzrostu umieralności nimi spowodowanej prowadzono na całym świecie: w Stanach Zjednoczonych [McCormac 1971], Niemczech [Spix, Wichmann 1996], Grecji [Katsouyanni *et al.* 1993]. W ostatnich dziesięcioleciach w większości krajów rozwiniętych poradzono sobie z problemem epizodów smogu.

Jednak w Polsce problem nadal istnieje. Analizy epizodów wysokich stężeń pyłu PM10 o dużym zasięgu, które wystąpiły w okresie 2011-2014 oraz towarzyszących im sytuacji pogodowych dokonano na zlecenie Głównego Inspektoratu Ochrony Środowiska [Ekometria 2013; IOŚ-PIB 2016], jednak nie rozpatrywano w niej kwestii umieralności. Za poziom graniczny epizodu smogowego przyjęto $75 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. W 2013 r. najwyższe, uśrednione dla wszystkich stanowiska w kraju, stężenia pyłu zawieszonego wystąpiły 24 stycznia. Tego dnia stężenia dobowe pyłu PM10 przekraczały poziom $75 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ na ok. 76% stanowisk pomiarowych, a na 90% stanowisk stężenie było wyższe od wartości 95. percentyla z serii pomiarów dobowych na tych stacjach. W 2013 r. najwięcej przypadków przekroczeń poziomu dopuszczalnego $50 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ wystąpiło na stacji komunikacyjnej w Krakowie (163) oraz na stacjach tła miejskiego w Opocznie (152) i w Wodzisławiu Śląskim (145). Na 30 stanowiskach w pięciu województwach: śląskim (11 stanowisk), małopolskim (10), łódzkim (7), dolnośląskim (1), kujawsko-pomorskim (1) wystąpiło więcej niż 100 dni ze średnim dobowym stężeniem wyższym niż $50 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. W 2014 r. liczba przekroczeń poziomu dopuszczalnego $50 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ była jeszcze wyższa i wyniosła 189 na stacji komunikacyjnej w Krakowie, a łącznie na 33 stanowiskach w ośmiu województwach wystąpiło więcej niż 100 dni ze średnim dobowym stężeniem wyższym niż $50 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ [IOŚ-PIB 2016].

W Skale, leżącej nieopodal Krakowa, stężenie pyłu PM10 sięgało w godzinach wieczornych 31 grudnia 2016 r. poziomu $979 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, co było najwyższą wartością zanotowaną w 2016 r. w Unii Europejskiej. Ten przypadek najlepiej obrazuje skutki stosowania opału słabej jakości, gdyż wystarczy niewielki spadek temperatury, sprzyjające warunki atmosferyczne i obecność ludzi w domach, by w ciągu kilku godzin poziom pyłu przewyższył poziom notowany w najbardziej zanieczyszczonych krajach świata: Chinach, Indiach, Turcji czy Rosji.

4. Główne przyczyny wysokiego stężenia zanieczyszczeń powietrza w Polsce

W Polsce, jak zostało opisane powyżej, olbrzymi problem stanowi zanieczyszczenie powietrza pyłami PM10 i PM2,5 oraz benzo(a)pirenem. Ich najważniejszymi źródłami są:

- niska emisja, czyli spaliny pochodzące z kotłów i pieców na paliwa stałe w gospodarstwach domowych;
- przemysł;
- transport drogowy;
- energetyka.

Przyczyny tak złego stanu sanitarnego powietrza w Polsce w porównaniu z innymi krajami europejskimi są złożone. Poniżej zostaną przytoczone tylko najważniejsze z nich, o różnej randze i zasięgu przestrzennym. W dużej mierze wynikają one z braku planowania przestrzennego i procesu rozlewania się miast na obszary podmiejskie [IAQM 2017]. Najważniejsze w tej grupie przyczyn są:

- brak rozsądnej polityki planistycznej oraz zrównoważonej polityki transportowej, która realizowałaby, pomijane obecnie, zapisy z dokumentów strategicznych miast;
- rozproszona zabudowa (zarówno na wsi, jak i na obrzeżach miast wskutek rozlewania się miast), która utrudnia dostęp do ciepła systemowego;
- niekontrolowane rozlewanie się miast na przedmieścia pociąga za sobą rozwój komunikacji opartej na dużej i stale rosnącej liczbie samochodów indywidualnych [Frane *et al.* 2000; OCFP 2005]. W Polsce dodatkowo są to często pojazdy stare, w złym stanie technicznym, nierzadko typu Diesel (do Warszawy wjeżdża codziennie ok. 1 mln samochodów).

W Polsce badania wpływu braku spójnej polityki przestrzennej i niekontrolowanego rozlewania się miast na obszary podmiejskie na zanieczyszczenie powietrza i stan zdrowia ludzi nie są jeszcze prowadzone, ale polskie procesy rozrastania się miast przypominają te znane z Ameryki Północnej, zatem można przyjąć za nimi pewne wyniki badań.

Badania z dziedziny transportu w USA i Kanadzie wykazują, że rozlewanie się miasta na przedmieścia powoduje, że ludzie posiadają więcej samochodów, rzadziej korzystają z publicznego transportu, spędzają więcej czasu w samochodach i pokonują dłuższe dystanse, a wszystko to powoduje wzrost emisji głównie lotnych związków organicznych, NO_x, CO, pyłów PM_{2,5} i mniejszych – odpowiedzialnych za smog fotochemiczny [Frane *et al.* 2000; OCFP 2005].

Potwierdzeniem tej tezy są m.in. badania dla Amerykańskiej Agencji Ochrony Środowiska, które wskazują, że wzrost populacji zamieszkującej w zabudowie zwartej prowadzi do redukcji emisji zanieczyszczeń powietrza ze źródeł liniowych [Frank *et al.* 2000; Stone *et al.* 2010]. Kolejne badania analizujące ekspozycję na pyły PM_{2,5} w USA pokazują bardziej złożony obraz problemu. Donoszą one, że mimo że zabudowa zwarta, zmniejsza liczbę kilometrów pokonywaną w samochodach przez 1 osobę i tym samym zmniejsza emisję zanieczyszczeń powietrza ze źródeł liniowych, to populacja zamieszkująca zabudowę zwartą staje się bardziej narażona na wysokie stężenie PM_{2,5}. W efekcie umiERALNOŚĆ związana z zapyleniem wśród mieszkańców zwartej zabudowy istotnie wzrasta. Zatem proces rozlewania się miast może prowadzić do zmniejszenia ekspozycji na pyły wśród osób wyprowadzających się na przedmieścia, ale wzrost ekspozycji wśród ludzi mieszkających w coraz bardziej zwartej zabudowie [Mansfield *et al.* 2015]. Ostateczna ocena oddziaływania zjawiska rozlewania się miast na zdrowie ludzi nie jest jednoznaczna ani prosta [Hankey *et al.* 2012; McCarty, Kaza 2015].

Kolejnymi przyczynami złego stanu powietrza w miastach, związanymi z planowaniem przestrzennym i jego brakiem są:

- sukcesywne i stałe zabudowywanie korytarzy wymiany powietrza, tj. obszarów zielonych mających na celu doprowadzanie do centrów miast natlenionego powietrza z zewnątrz i przewietrzanie miasta [Błażejczyk *et al.* 2014];
- lokalizowanie wokół parków gęstej zabudowy wielopiętrowej, która utrudnia oddziaływanie zieleni miejskiej na obszary otaczające [Kuchcik 2015];
- przypadki zabudowywania drobnych obszarów zieleni miejskiej (skwerów, małych parków, ogródków działkowych), które poprawiają jakość powietrza w skali lokalnej [Szulczewska 2015].

Innymi przyczynami złego stanu powietrza w miastach polskich, związanymi z komunikacją są:

- niewydolny i niedostosowany do potrzeb transport publiczny – zaniedbanie rozwoju transportu kolejowego, likwidacja linii i połączeń kolejowych;
- niewystarczająca liczba parkingów „parkuj i jedź” i buspasów.

Duża część przyczyn nie wynika bezpośrednio z braku planowania przestrzennego, ale z ogólnej polityki kraju, zwyczajnej biedy, a często braku refleksji społeczeństwa nad tym, jak zanieczyszcza środowisko i powietrze, którym oddycha:

- brak polityki promującej odnawialne źródła energii i „czyste” technologie (np. istotne dopłaty do instalacji pomp ciepła w nowo budowanych domach jednorodzinnych);
- usilne utrzymywanie dofinansowania dla nierentownych kopalń węglowych;
- wysoka cena gazu (najwyższa w Europie) i brak dopłat dla najuboższych (w miejscowościach zgazyfikowanych ludzie wracają do palenia węglem, ponieważ nie stać ich na opalanie gazem);
- brak norm regulujących jakość opału (palenie tanim węglem z za wschodniej granicy lub miałem węglowym);
- brak polityki dotyczącej standardu pieców grzewczych oraz wymiany pieców o najslabszych parametrach na gazowe (darmowa wymiana dla najuboższych);
- brak skutecznych działań przeciwdziałających paleniu śmieci;
- niekontrolowana wycinka lasów i większych areałów terenów zielonych w obszarach podmiejskich – głównie pod rozproszoną zabudowę mieszkaniową;
- brak szerokiej dyskusji na temat rzeczywistych źródeł zanieczyszczenia powietrza i skutków ich oddziaływania na człowieka;
- brak świadomości ekologicznej w społeczeństwie, brak promocji zrównoważonych środków transportu i zachowań mających na celu ochronę środowiska naturalnego; trywializowanie i szydzenie z takich zachowań;
- niemal najmniejszy w Europie (poza Bułgarią) stopień wykorzystania rozwiązań ekoinnowacyjnych, które mają na celu ograniczenie negatywnego oddziaływania człowieka na środowisko, z jednocześnie wyższym niż średnio w UE dochodzie państwa z podatków środowiskowych;
- bardzo mała produktywność gospodarki Polski i jedna z najwyższych w Europie energochłonność (KE 2017).

Wyrok Trybunału Sprawiedliwości UE z 22.02.2018 r. orzekający, że Polska naruszyła unijne prawo, bo nie przestrzegała dziennych i rocznych dopuszczalnych wartości stężeń pyłu zawieszonego w powietrzu i groźba nawet mld zł kar spowodowały, że władze państwa pilnie zajęły się polityką antysmogową i odpowiednim prawodawstwem. Czas pokaże jak skutecznie.

W miastach, w celu zmniejszenia wysokiego poziomu zanieczyszczenia powietrza należy zrobić wszystko, by usunąć lub umniejszyć wymienione powyżej przyczyny. Ponadto, a może przede wszystkim, należy inwestować w profilaktykę i zwiększanie świadomości ludzi na temat ich wpływu na stan powietrza.

Literatura

- ATSDR, 1995, Public Health Statement for Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs), Agency for Toxic Substances and Disease Registry [<http://www.atsdr.cdc.gov/ToxProfiles/tp69-c1-b.pdf>].
- Ba Q., Huang Ch., Fu Y., Li J., Chu R., Jia X., Wang H., 2016, *Cumulative Metabolic Effects of Low-dose Benzo(a)pyrene Exposure on Human Cells*. *Toxicology Research*, 5: 107-115.
- Badyda A., 2006, *Analiza i ocena efektów oddziaływania wybranych uciążliwości ruchu drogowego na środowisko miejskie w Warszawie*. Praca doktorska, PW, Wydział Inżynierii Środowiska, Warszawa.
- Badyda A., 2016, *Naukowcy na tropie klucza do zdrowego stylu życia. Teraz Środowisko* [<https://www.teraz-srodowisko.pl/aktualnosci/Naukowcy-na-tropie-klucza-do-zdrowego-zycia-2599.html>, 28.09.2016].
- Bell M. L., Dominici F., Samet J. M., 2005, *A Meta-analysis of Time-series Studies of Ozone and Mortality with Comparison to the National Morbidity, Mortality, and Air Pollution Study*. *Epidemiology*, 16(4): 436-445.
- Błażejczyk K., Kuchcik M., Milewski P., Dudek W., Kręcisz B., Błażejczyk A., Szmyd J., Degórska B., Pałczyński C., 2014, *Miejska wyspa ciepła w Warszawie. Uwarunkowania klimatyczne i urbanistyczne*. Wyd. Akademickie SEDNO, Warszawa.
- Boubel R. W., Fox D. L., Turner D. B., Stern A. C., 1994, *Fundamentals of Air Pollution*. Academic Press, Londyn.
- CIOP-PIB 2016, CHEMPYL – baza wiedzy o zagrożeniach chemicznych i pyłowych, Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy [<https://www.ciop.pl>; dostęp 1.04.2016].
- Cwynar B., Romańska A., 1981, *Wpływ warunków fizjograficznych na stan czystości atmosfery w rejonie Legnicy*. *Ochrona Powietrza*, 2: 33-40.
- EEA, 2016, *Air quality in Europe – 2016 report*. Report No 28/2016, European Environment Agency, Kopenhaga, Dania.

- Ekometria*, 2013, Analiza wybranych epizodów wysokich stężeń pyłu PM10 na podstawie danych pomiarowych, meteorologicznych oraz analizy trajektorii, Gdańsk [<http://powietrze.gios.gov.pl/pjp/content/publications>].
- EPA, 2016, United States Environmental Protection Agency [<https://www.epa.gov/criteria-air-pollutants>].
- Folinsbee L. J., 1992, *Human Health Effects of Air Pollution*. Environmental Health Perspectives, 100: 45-56.
- Frank L., Stone B., Bachman W., 2000, *Linking Land-use with Household Vehicle Emissions in the Central Puget Sound: Methodological Framework and Findings*. Transportation research, Part D: 173-196.
- GIOŚ, 2014, Stan Środowiska w Polsce. Raport 2014, Biblioteka Monitoringu Środowiska, Warszawa [www.gios.gov.pl/images/dokumenty/pms/raporty/GIOS_raport_2014.pdf].
- GIOŚ, 2015, Zanieczyszczenia powietrza wielopierścieniowymi węglowodorami aromatycznymi na stacjach tła miejskiego w 2014 r., Główny Inspektorat Ochrony Środowiska, Warszawa [<http://powietrze.gios.gov.pl/pjp/maps/air/quality/type/R>; dostęp 1.04.2016].
- GUS, 2016, Trwanie życia w 2015 r., GUS, Warszawa [www.stat.gov.pl].
- Hankey S., Marshall J., Brauer M., 2012, *Health Impacts of the Built Environment: within Urban Variability in Physical Inactivity, Air Pollution, and Ischemic Heart Disease Mortality*. Environmental Health Perspectives, 120, 2: 247-53.
- Holland M., 2014, *Cost-benefit Analysis of Final Policy Scenarios for the EU Clean Air Package*. Komisja Europejska, [ec.europa.eu/environment/air/pdf/TSA%20CBA.pdf].
- Höppe P., 1995, *Effects of Environmental Ozone on the Lung Function of Senior Citizens*. "International Journal of Biometeorology", 38, 2: 122-125.
- Hryniewicz R., 1982, *Wymywanie zanieczyszczeń z atmosfery przez opady*. Maszyn. IMGW.
- Hryniewicz R., 1973, *Badania nad przechodzeniem SO₂ i NO₂ w aerozole*. Maszyn. IMGW.
- IAQM, 2017, *Land-use Planning & Development Control: Planning for Air Quality*, Institute of Air Quality Management, Londyn, [<http://www.iaqm.co.uk/text/guidance/air-quality-planning-guidance.pdf>].
- IOŚ, 2006, *Stan Środowiska w Polsce na tle celów i priorytetów Unii Europejskiej*. Raport Wskaźnikowy 2004, Biblioteka Monitoringu Środowiska, Warszawa [www.gios.gov.pl/images/dokumenty/pms/raporty/rap_wskaz2004_pl.pdf].
- IOŚ-PIB, 2016, *Analiza wybranych epizodów wysokich stężeń pyłu PM10 z lat 2013-2016. Etap I Epizody z lat 2013-2014*, Warszawa [www.zgora.pios.gov.pl/wp-content/uploads/2016/.../EPIZODY_2013-2014_WWW.pdf].
- Irwin R. J., Moiwerik M. V., Stevens L., Seese M. D., Basham W., 1997, *Environmental Contaminants Encyclopedia Benzo[a]pyrene (bap) Entry* [<http://www.nature.nps.gov/hazards-safety/toxic/benzoapy.pdf>].

- ISOCARP, 2009, *Urban Planning and Human Health in the European City*. Report to the World Health Organization, International Society of City and Regional Planners (ISOCARP) [https://isocarp.org/app/uploads/2014/08/WHO_report_final_version.pdf].
- Jędrzychowski W., 1986, *Epidemiologia. Wprowadzenie i metody*. PZWL, Warszawa.
- Jędrzychowski W., 1995, *Review of Recent Studies from Central and Eastern Europe Associating Respiratory Health Effects with High Levels of Exposure to „Traditional” Air Pollutants*. Environmental Health Perspectives, 103, supp. 2: 15-21.
- Juda J., Chróściel S., 1974, *Ochrona powietrza atmosferycznego*. Wyd. Naukowo-Techniczne, Warszawa.
- Juda-Rezler K., 2000, *Oddziaływanie zanieczyszczeń powietrza na środowisko*. Oficyna Wyd. PW, Warszawa.
- Katsouyanni K., Pantazopoulou A., Toiloumi G., Tselepidaki I., Moustris K., Asimakopoulos D., Pouloupoulou G., Trichopoulos D., 1993, *Evidence for Interaction Between Air Pollution and High Temperature in the Causation of Excess Mortality*. Archives of Environmental Health, 48: 235-242.
- KE 2017, *Przegląd wdrażania polityki ochrony środowiska UE*, Sprawozdanie na temat państwa – POLSKA, Komisja Europejska, Unia Europejska, Bruksela [http://ec.europa.eu/environment/eir/pdf/report_pl_pl.pdf].
- Kirschner H. (red.), 1996, *Zarys medycyny środowiskowej*. WAM, Warszawa.
- Koenig J. Q., Covert D. S., 1989, *Effects of Inhalation of Acidic Compounds on Pulmonary Function in Allergic Adolescent Subjects*. Environmental Health Perspectives, 79: 109-113.
- Kozłowska-Szczęśna T., 1959, *Badania zawartości ozonu w przyziemnej warstwie powietrza na terenie Ciechocinka*. Wiadomości Uzdrawiskowe, IV, ½: 67-77.
- Kuchcik M., 2000, *Wpływ warunków aerosanitarnych i biometeorologicznych na zgony mieszkańców Warszawy*. Maszyn. pracy doktorskiej.
- Kuchcik M., 2001a, *Mortality in Warsaw: Is There any Connection with Weather and Air Pollution?* Institute of Geography and Spatial Organization Polish Academy of Sciences, Geographia Polonica, 74, 1: 29-45.
- Kuchcik M., 2001b, *Wpływ warunków aerosanitarnych i biometeorologicznych na zgony mieszkańców Warszawy*. Prace i Studia Geograficzne, 28: 233-243.
- Kuchcik M., 2003, *The Influence of Aerosanitary and Biometeorological Conditions on the Health and Mortality of the Inhabitants of Warsaw*, [w:] *Studies on the Climate of Warsaw*, M. Stopa-Boryczka (red.). Warsaw University, Faculty of Geography and Regional Studies: 155-166.
- Kuchcik M., 2015, *Klimat osiedli mieszkaniowych i możliwości jego kształtowania*, [w:] *Osiedla mieszkaniowe w strukturze przyrodniczej miasta*, B. Szulczewska (red.). Wyd. SGGW, Warszawa: 64-79.

- Kuroś E., Morawska-Horawska M., 1989, *Wpływ sytuacji synoptycznych na wielkość stężeń zanieczyszczeń powietrza nad Górnośląskim Okręgiem Przemysłowym*. Wiadomości IMGW, 12, 1-2.
- Mansfield T. J., Rodriguez D. A., Huegy J., MacDonald Gibson J., 2015, *The Effects of Urban form on Ambient Air Pollution and Public Health Risk: a Case Study in Raleigh, North Carolina*. Risk analysis: an official publication of the Society for Risk Analysis, 35, 5: 901-918.
- McCarty J., Kaza N., 2015, *Urban Form and Air Quality in the United States*. Landscape and Urban Planning 139: 168-179.
- McCormac B. M., 1971, *Introduction to the Scientific Study of Atmospheric Pollution*. D. Reidel Publishing Company, Dordrecht.
- Menne B., Matthies F. (red.), 2009, *Improving Public Health Responses to Extreme Weather/heat-waves – EuroHEAT*. Technical report, WHO, Regional Office for Europe, Copenhagen, Denmark.
- Morawska-Horawska M., Powroźnik M., Rysz M., Tumidajski T., 1984, *Wpływ warunków meteorologicznych i aerosanitarnych na liczbę interwencji zespołów wyjazdowych pomocy doraźnej w niektórych grupach chorób na terenie Krakowa*. Problemy Uzdrawiskowe ½: 109-114.
- Niedźwiedz T., Ustrnul Z., 1989, *Wpływ sytuacji synoptycznej na występowanie nad Górnośląskim Okręgiem Przemysłowym typów pogody sprzyjających koncentracji lub rozpraszaniu zanieczyszczeń powietrza*. Wiadomości IMGW 12, 1-2: 31-39.
- OCFP, 2015, *The Health Impacts of Urban Sprawl. Air Pollution*. An information series from Ontario College of Family Physicians [<http://ocfp.on.ca/docs/committee-documents/urban-sprawl---volume-1---air-pollution.pdf>].
- Piekarska B., Samoliński B., Furmańczyk K., 2009, *Stan środowiska przyrodniczego a występowanie alergii i astmy w Polsce – wyniki ECAP*. Problemy Higieny i Epidemiologii, 90, 3: 316-321.
- Rabczenko D., Wojtyniak B., Wysocki M., Goryński P., 2005, *Krótkookresowy wpływ zanieczyszczeń powietrza atmosferycznego dwutlenkiem siarki, pyłami zawieszonymi i dwutlenkiem azotu na umieralność mieszkańców miast w Polsce*. Przegląd Epidemiologiczny, 59: 969-979.
- Rusin M., Marchwińska-Wyrwał E., 2014, *Zagrożenia zdrowotne związane ze środowiskowym narażeniem na wielopierścieniowe węglowodory aromatyczne (WWA)*. Medycyna Środowiskowa, 17, 3: 7-13.
- Samoli E., Touloumi G., Zanobetti A., Le Tertre A., Schindler Chr., Atkinson R., Vonk J., Rossi G., Saez M., Rabczenko D., Schwartz J., Katsouyanni K., 2003, *Investigating the Dose-response Relation Between Air Pollution and Total Mortality in the APHEA-2 Multicity Project*. Occupational and Environmental Medicine, 60: 977-982.

- Sadlok R. (red.), 2014, *Przeciwdziałanie niskiej emisji na terenach zwartej zabudowy mieszkalnej*. Stowarzyszenie na rzecz efektywności energetycznej i rozwoju odnawialnych źródeł energii „HELIOS”.
- Seńczuk W., 2002, *Toksykologia*. PZWL, Warszawa.
- Smolik E., 2010, *Wielopierścieniowe Węglowodory Aromatyczne (WWA)*. Instytut Medycyny Pracy i Zdrowia Środowiskowego, Sosnowiec [http://www.ietu.katowice.pl/wpr/Dokumenty/Materialy_szkoleniowe/Szkol2/10-smolik.pdf].
- Sorbjan Z., 1983, *Turbulencja i dyfuzja w dolnej atmosferze*. PWN, Warszawa.
- Sroczyński J., 1988, *Wpływ zanieczyszczeń powietrza atmosferycznego na zdrowie ludzi*. Wyd. PAN, Wrocław.
- Spix C., Wichmann H. E., 1996, *Daily Mortality and Air Pollutants: Findings from Köln, Germany*. “Journal of Epidemiology and Community Health”, 50, suppl.1, 52-58.
- Stone B. Jr., Mednick A. C., Holloway T., Spak S. A., 2010, *Is Compact Growth Good for Air Quality?* “Journal of the American Planning Association”, 73, 4: 404-418.
- Suryjak W., Tomaszewska A., 1992, *Wpływ warunków meteorologicznych na wielkość średniodobowych stężeń SO₂ w Ojcowskim Parku Narodowym*. Wiadomości IMGW, 15, 1-2: 59-68.
- Szulcewska B. (red.), 2015, *Osiedla mieszkaniowe w strukturze przyrodniczej miasta*. Wyd. SGGW, Warszawa.
- Tomaszewska A., 1994, *Zależność stężeń zanieczyszczeń atmosfery w Krakowie od wybranych elementów meteorologicznych w okresie grzewczym 1992/1993*. Wiadomości IMGW, 17, 3: 5-18.
- Walczewski J., 1994, *Problem prognozowania porannej ewolucji warstwy granicznej przy prognozowaniu porannych maksimów immisji*. Wiadomości IMGW, 17, 3: 81-90.
- WHO, 2006, WHO air quality guidelines for particulate matter, ozone, nitrogen dioxide and sulfur dioxide. Global update 2005, Summary of risk assessment, World Health Organization, Geneva [www.who.int/phe/health_topics/outdoorair/outdoorair_aqg/en].
- WHO, 2013, Health effects of particulate matter. World Health Organization, Regional Office for Europe [http://www.euro.who.int/__data/assets/pdf_file/0006/189051/Health-effects-of-particulate-matter-final-Eng.pdf].
- WHO, 2015, Annex to Economic cost of the health impact of air pollution in Europe: Clean air, health and wealth [http://www.euro.who.int/__data/assets/pdf_file/0008/276956/PR_Economics-Annex_en.pdf?ua=1].
- Wieczorek J., Wieczorek Z., Mozolewski W., Pomianowski J., 2011, *Wielopierścieniowe węglowodory aromatyczne w pyłe PM10*. Inżynieria i Aparatura Chemiczna, 50, 2: 26-27.