

Anna GAYER*

PRZEGLĄD METOD OCENY OSOBISTEJ EKSPOZYCJI NA ZANIECZYSZCZENIA PYŁOWE POWIETRZA W ŚRODOWISKU MIEJSKIM STOSOWANYCH W BADANIACH EPIDEMIOLOGICZNYCH

Tradycyjnie, w badaniach epidemiologicznych, osobista ekspozycja na pył zawieszony oceniana była na podstawie pomiarów prowadzonych przez sieć monitoringu powietrza i przez oszacowanie narażenia całej populacji przy użyciu modelowania matematycznego rozprzestrzeniania się zanieczyszczeń atmosferycznych. Wraz z postępem technologicznym wzrósł dostęp do zaawansowanych urządzeń do monitorowania jakości powietrza i opracowano szereg metod oceny osobistej ekspozycji na zanieczyszczenia pyłowe powietrza mieszkańców miast. W niniejszym artykule zaprezentowano wybrane metody oceny narażenia osobistego na pyłowe zanieczyszczenia powietrza obecne w środowisku miejskim powszechnie stosowane m.in. w naukach medycznych do analizy ich wpływu na zdrowie ludzkie. Wśród opisanych metod znajdują się: szacowanie narażenia na podstawie wyników pomiarów prowadzonych przez stacje monitoringu powietrza, pomiarów prowadzonych w określonych lokalizacjach, czy też za pomocą przenośnych pyłomierzy. W artykule opisano również modelowanie imisji zanieczyszczeń pyłowych metodą przestrzennej regresji.

1. WSTĘP

Badania epidemiologiczne [2, 11, 16] wskazują, że zanieczyszczenia pyłowe powietrza przyczyniają się do powstawania i rozwoju chorób układu oddechowego, sercowo-naczyniowego, nerwowego oraz że ekspozycja na nie może powodować przed-

* Politechnika Warszawska, Wydział Inżynierii Środowiska, ul. Nowowiejska 20, 00-653 Warszawa, anna.gayer@is.pw.edu.pl.

wczesną śmierć. Wnioskowanie o wpływie tych czynników na zdrowie ludzkie oparta jest na modelach rozprzestrzeniania się zanieczyszczeń oraz bezpośrednich pomiarach stężeń tych substancji w powietrzu atmosferycznym. Poziom ekspozycji danej osoby na zanieczyszczenia zależy od stężenia substancji zanieczyszczającej obecnej w środowisku, jej właściwości, czasu narażenia oraz częstotliwości kontaktu z tą substancją [10].

Ostatnio prowadzone badania wskazują na potrzebę zwiększenia dokładności oszacowań, szczególnie ze względu na ocenę krótkoterminowego wpływu zmian stężenia zanieczyszczeń i ich konsekwencji zdrowotnych.

Prowadzone w latach 90. epidemiologiczne badania kohortowe opierały się na danych o jakości powietrza pochodzących z pomiarów stacji monitoringu na podstawie, których stworzono i analizowano szeregi czasowych stężeń zanieczyszczeń. Wraz z postępem nauki w dziedzinie badań nad środowiskowymi uwarunkowaniami zdrowia oraz rozwojem techniki (urządzenia do pomiarów zanieczyszczeń powietrza) zwiększa się m.in. stopień szczegółowości prowadzonych badań. W trakcie badań epidemiologicznych możliwe jest zatem ujęcie długo- i krótkoterminowych efektów zdrowotnych ekspozycji na zanieczyszczenia pyłowe powietrza, analizy odpowiedzi organizmu na kontakt z zanieczyszczeniem, a także bardziej szczegółowa identyfikacja źródeł emisji wpływających na stopień ekspozycji mieszkańców terenów zurbanizowanych.

Praca ma na celu przegląd wybranych metod określania narażenia osobistego na zanieczyszczenia pyłowe powietrza obecne w środowisku miejskim stosowanych na potrzeby badań epidemiologicznych.

2. WYBRANE METODY OCENY OSOBISTEJ EKSPOZYCJI NA ZANIECZYSZCZENIA PYŁOWE W ŚRODOWISKU MIEJSKIM

2.1. METODA OCENY EKSPOZYCJI NA PODSTAWIE POMIARÓW STĘŻENIA ZANIECZYSZCZEŃ PYŁOWYCH WYKONANYCH NA STACJACH MONITORINGU POWIETRZA

Dotychczas w badaniach kohortowych ekspozycję na zanieczyszczenia powietrza oceniano na zasadzie oszacowań narażenia całej populacji na średnioroczne stężenie pochodzące z pomiarów stacjonarnej sieci monitoringu. Zmiany stężenia zanieczyszczeń pyłowych powietrza w przeciągu danego okresu czasu stanowiły jeden z czynników analiz związanych z poszukiwaniem przyczyn powstawania i rozwoju chorób oraz umieralności w danej populacji.

W pierwszych badaniach kohortowych [3] (8000 osób z sześciu amerykańskich miast) trwających 14–16 lat na podstawie średniorocznych stężeń m.in. PM_{2,5} oce-

niono, że ogólny wzrost umieralności o 26% oraz wzrost umieralności o 37% z powodu chorób płuc i serca był związany ze wzrostem stężenia pyłu zawieszonego z 10 do 30 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. W badaniach jednej z największych jak dotąd kohort (295000 osób z 50 amerykańskich miast) Pope i in. [12] dowiedli, że wzrost średniorocznego stężenia $\text{PM}_{2,5}$ o 24,5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ skutkowało wzrostem ogólnej umieralności o 17%, a wśród osób z chorobami płuc i serca o 31%.

Najwięcej badań epidemiologicznych powstało w oparciu o tę metodę uzyskiwania danych o jakości powietrza i obejmują one najliczniejsze grupy badawcze. Wnioskowanie o wpływie zanieczyszczeń pyłowych powietrza służy do oceny następstw wielu skutków zdrowotnych. Wśród najpopularniejszych badań znajdują się analizy wpływu pyłu zawieszonego na rozwój chorób układu oddechowego (astmy i POChP, N = 57000 osób) [1], występowania reakcji alergicznych, a także schorzeń układu sercowo-naczyniowego, w tym choroby wieńcowej (N = 450000 osób) [4].

Metoda oceny ekspozycji danych osób na podstawie badań monitoringowych jest jednak obciążona licznymi błędami. Modelowanie narażenia oraz opieranie wnioskowania na wartościach średniorocznych stężeń mogą być niewystarczające do jednoznacznej identyfikacji czynników wpływających na zdrowie osób objętych badaniami. Zaletą tej metody jest możliwość ekstrapolacji ekspozycji danej populacji, na podstawie pomiarów ciągłych prowadzonych przez jednostki państwowe. Pomiar ciągły wykonany w ramach projektu epidemiologicznego który miałby trwać kilkadziesiąt lat byłby zbyt kosztowny oraz zbyt pracochłonny. Zatem w przypadku długookresowych badań nad zmianami stężenia pyłu $\text{PM}_{2,5}$ w środowisku miejskim prowadzonych na dużych kohortach, jak dotąd, nie stosowano metod innych niż opisana powyżej. Dodatkowo, istnieją doniesienia mówiące o reprezentatywności wyników pomiarów wykonywanych tą metodą dla ekspozycji osobistej. Podczas badań nad grupą osób (z Holandii i Finlandii) ze zdiagnozowanymi chorobami serca Janssen i in. [9] zbadali również korelację między wynikami personalnych pomiarów (met. opisana niżej) a tymi, pochodzącymi ze stacji pomiarowej. Współczynnik korelacji stężeń $\text{PM}_{2,5}$ zmierzonych w Amsterdamie wynosił 0,79, a dla pomiarów z Helsinek 0,76.

2.2. METODA OCENY EKSPOZYCJI NA PODSTAWIE POMIARÓW STĘŻEŃ ZANIECZYSZCZEŃ WYKONANYCH NA STANOWISKACH BADAWCZYCH

Celem określenia stężeń zanieczyszczeń pyłowych powietrza w określonych lokalizacjach (miejsce zamieszkania osób badanych, szkoły, środki transportu [17]) oprócz zastosowania metod interpolacji danych z pomiarów stacjonarnych sieci monitoringowych umieszcza się również przyrządy pomiarowe na stanowiskach badawczych w określonych miejscach.

Wśród zalet tej metody jest m.in. wynikająca z kontroli nad urządzeniami dokładność pomiarów w danym miejscu i czasie, czy też możliwość wykonania badań chemizmu pyłów.

Dowodzono bowiem, że niekorzystne skutki zdrowotne ekspozycji na zanieczyszczenia pyłowe mogą się różnić w zależności o właściwości fizykochemicznych cząstek stałych (kształtu, masy, zawartości metali ciężkich), a także biologicznych (wywoływania stresu oksydacyjnego, zdolności do tworzenia rodników hydroksylowych) [8].

Częstotliwość uśredniania poziomu stężeń zależna jest od charakterystyki urządzenia. W przypadku badań zdrowotnych nad krótkotrwałym wpływem zanieczyszczeń powietrza istnieje możliwość zastosowania przyrządów optycznych rejestrujących stężenie pyłu w czasie rzeczywistym, uśredniających wartość stężenia do 1 min.

Koszty pomiarów są nadal na tyle wysokie, że nawet w przypadku dużej liczby osób, dla której wykonuje się badania ich ekspozycji liczba urządzeń jest ograniczona i powoduje to wydłużenie czasu kampanii pomiarowej. Tak, jak w przypadku wyników pochodzących ze stacji monitoringu powietrza w przypadku tej metody istnieje również możliwość interpolacji przestrzennej danych. Mogą one bowiem stanowić dane wejściowe do prostych lub zaawansowanych modeli przestrzennych immisji zanieczyszczeń pyłowych. Jest to szczególnie istotne w kontekście obszarów, na których nie jest dobrze rozwinięta sieć monitoringu powietrza, a dane o poziomach zanieczyszczeń na rozległym terenie pochodzą z pomiarów np. tylko z jednej stacji.

2.3. ZASTOSOWANIE MODELU PRZESTRZENNEGO LUR (LAND-USE REGRESSION MODEL) DO OCENY EKSPOZYCJI OSOBISTEJ NA ZANIECZYSZCZENIA PYŁOWE POWIETRZA

Technika LUR wykorzystuje dane o poziomach stężeń zanieczyszczeń powietrza pochodzące z 40–60 stanowisk pomiarowych do oszacowania stężeń obecnych na obszarze prowadzonych badań epidemiologicznych [5]. W miejsce danych pobieranych z sieci monitoringu powietrza lub zastosowania prostej interpolacji do budowy stochastycznego modelu LUR wchodzi dane przestrzenne: strumienie ruchu, łączna długość dróg, charakterystyki ruchu samochodów ciężarowych, gęstość zaludnienia i powierzchnia terenu .

Zaletą modelowania imisji zanieczyszczeń pyłowych metodą przestrzennej regresji jest znaczna wielkość terenu, dla której można oszacować poziomy PM_{2,5} w powietrzu. Dzięki temu badania mogą objąć również liczną grupę badawczą zamieszkującą lub przebywającą na tym terenie, której poziom ekspozycji ustala się w badaniach środowiskowych uwarunkowań zdrowia. Metody przestrzenne rozwijają się dynamicznie, jednym z kierunków jest stosowanie zdjęć satelitarnych w uzupełnieniu do wejściowych danych modelu pochodzących z pomiarów naziemnych [6].

2.4. BADANIA EKSPOZYCJI OSOBISTEJ NA ZANIECZYSZCZENIA PYŁOWE POWIETRZA ZA POMOCĄ PRZENOŚNYCH PYŁOMIERZY

Jak wskazuje WHO [15] większość ludzi spędza 20% swojego dziennego czasu w pracy lub szkole, lub w innych miejscach nie będących ich miejscem zamieszkania oraz ok. 4% przemieszczając się.

Do oceny ekspozycji danej osoby na zanieczyszczenia powietrza w ciągu doby wyróżniania się zatem tzw. mikrośrodowiska (ME-microenvironments) [7], najczęściej należą do nich „środowisko zewnętrzne miejsca zamieszkania” (outdoor home), „środowisko wewnętrzne miejsca zamieszkania” (indoor home) i analogiczne „wewnątrz/zewnątrz w miejscu pracy/nauki” oraz „transport”. Zauważono bowiem, że jakość powietrza istotnie różni się w zależności od lokalizacji i obecności źródeł emisji w miejscu przebywania osoby, której ekspozycja jest określana.

Bezpośredni pomiar zanieczyszczeń pyłowych powietrza w środowisku otaczającym osobę, dla której szacowany jest poziom ekspozycji możliwy jest dzięki zastosowaniu przenośnych pyłomierzy. Są to niewielkich rozmiarów urządzenia zasilane akumulatorami najczęściej działające na zasadzie pomiarów optycznych.

Wyniki badań prowadzonych za pomocą personalnych przyrządów pomiarowych mają zwykle charakter niereprezentatywny. Ze względu na praco- i czasochłonność oraz wysokie koszty ich uzyskania prowadzone są na małych próbach badawczych. Niemniej mogą być jednak stosowane jako element oceny jakości powietrza w metodyce HIA (Health Impact Assessment) [13].

Istotną zaletą, wyróżniającą tę metodę spośród wyżej zaprezentowanych jest krok czasowy w jakim mogą być prowadzone badania. W czasie rzeczywistym można obserwować zmiany stężenia pyłu zawieszonego obecne w środowisku, w którym znajduje się osoba badana. Dodatkowo umiejscowienie wlotu do przyrządu pomiarowego w okolicy ust i nosa (tzw. breathing zone) [10] umożliwia wnioskowanie o rzeczywistej dawce zanieczyszczeń dostającej się do organizmu człowieka w trakcie wdechu.

1-minutowy pomiar stężenia pyłu pozwala na zwiększenie dokładności w badaniach odpowiedzi organizmu człowieka na kontakt z cząstkami stałymi dostającymi się do wewnątrz w trakcie oddychania.

Między innymi za pomocą tej metody zespół Sorensen [14] badał jak zmiany stężenia PM_{2,5} wpływają na pojawianie się markerów stresu oksydacyjnego we krwi.

Uchwycenie chwilowych zmian stężeń oraz wnioskowanie o źródłach emisji je powodujących jest możliwe w przypadku gdy osoby badane są wyposażone w tzw. dzienniki aktywności oraz moduł GPS. Dziennik służy do zapisu aktywności (w tym miejsca przebywania) wykonywanych w danej chwili przez osobę badaną, mających wpływ na jej ekspozycję na zanieczyszczenia pyłowe (np. przebywanie w miejscu zamieszkania, podróż danym środkiem transportu, przebywanie w miejscu pracy itd.). Natomiast dane o pozycji geograficznej, w jakiej znajduje się osoba badana w danej chwili rejestrowane są przez moduł GPS.

Koncepcja identyfikacji i zapisu miejsc przebywania osoby badanej, na podstawie których szacowana jest krótkoterminowa ekspozycja wykorzystywana jest również w analizie danych o jakości powietrza pochodzących z innych pomiarów. Rejestrowanie znajdowania się w opisanych wyżej „mikrośrodkach” pozwala na wykorzystywanie wyników pomiarów uzyskanych nie tylko dzięki stosowaniu przenośnych mierników, lecz także stacjonarnych (zlokalizowanych np. w miejscu zamieszkania, w miejscu pracy itd. podczas kampanii pomiarowych).

Wśród trudności związanych ze stosowaniem tej metodyki można wyróżnić ograniczenia związane z wytrzymałością baterii znajdującej się w urządzeniu, umożliwiającą prowadzenie pomiaru maksymalnie przez 12 godzin w ciągu doby czy też uciążliwości związanych z przeszkoleniem i z noszeniem sprzętu pomiarowego przez osoby badane.

3. PODSUMOWANIE

Wyniki badań epidemiologicznych prowadzonych w środowisku miejskim w różnych regionach świata wskazują, że poziom zanieczyszczeń pyłowych w powietrzu obserwowany za równo w ujęciu długo- jak i krótkoterminowym negatywnie wpływa na zdrowie ludzkie.

W niniejszym artykule zaprezentowano wybrane metody oceny narażenia osobistego na pyłowe zanieczyszczenia powietrza obecne w środowisku miejskim stosowane w naukach medycznych do analizy ich wpływu na zdrowie ludzkie.

Tradycyjnie w badaniach epidemiologicznych, osobista ekspozycja oceniana była na podstawie pomiarów prowadzonych przez sieć monitoringu powietrza i poprzez oszacowanie narażenia całej populacji przy użyciu interpolacja przestrzennej wyników. Wraz z postępem technologicznym wzrósł dostęp do zaawansowanych urządzeń do monitorowania jakości powietrza, w tym mierników personalnych noszonych przez osoby badane w czasie ich regularnych codziennych zajęć pozwalających na ocenę ich ekspozycji w sposób ciągły i dokładny.

Oprócz opisanych w artykule istnieje szereg innych metod oceny narażenia na zanieczyszczenia pyłowe w środowisku miejskim np. z wykorzystaniem biomarkerów, czy też modeli przedostawania się zanieczyszczeń ze środowiska zewnętrznego do wewnątrz pomieszczeń.

Rozwój badań w tym zakresie stanowi istotny wkład i dostarcza argumentów za zmianą polityk ochrony jakości powietrza, które mogą wpływać m.in. na kierunki rozwoju miast, a co w efekcie może przyczynić się do poprawy jakości życia mieszkańców miast.

LITERATURA

- [1] ANDERSEN Z.J., HVIDBERG M., JENSEN S.S., KETZEL M., LOFT S., SORENSEN M., TJONNELAND, A., OVERVAD K., RAASCHOU-NIELSEN O., *Chronic obstructive pulmonary disease and long-term exposure to traffic-related air pollution: A cohort study*, American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine, 2011, Vol. 183, No. 4, 455–461.
- [2] ARENA V.C., MAZUMDAR S., ZBOROWSKI J.V., i in., *A retrospective investigation of PM10 in ambient air and cardiopulmonary hospital admissions in Allegheny County, Pennsylvania: 1995–2000*, J Occup Environ Med., 2006, Vol. 48, 38–47.
- [3] DOCKERY D.W., POPE C.A., *A Review of the Acute Respiratory Effects of Particulate Air Pollution*, Annu. Rev. Pub. Health, 1994, Vol. 15, 101–132.
- [4] GAN W.Q., KOEHOORN M., DAVIES H.W., DEMERS P.A., TAMBURIC L., BRAUER M., *Long-term exposure to traffic-related air pollution and the risk of coronary heart disease hospitalization and mortality*, Environmental Health Perspectives, 2010, Vol. 119, No. 4, 501–507.
- [5] HOEK R., BEELEN K., DE HOOGH D., VIENNEAU J., GULLIVER P., FISCHER D., BRIGGS, *A review of land-use regression models to assess spatial variation of outdoor air pollution*, Atmospheric Environment, 2008, Vol. 42, 7561–7578.
- [6] JAIME M., KLOOG I., GOLDBERG R., COULL B., MITTLEMAN M., SCHWARTZ J., *Long-term Exposure to PM2.5 and Incidence of Acute Myocardial Infarction*, Environ Health Perspect, 2013, Vol. 121, No. 2, 192–196.
- [7] JANTUNEN M.J., HANNINEN O., KATSOUYANNI K., KNOPPEL H., KUENZLI N., LEBRET E., i in., *Air pollution exposure in European cities: the “EXPOLIS” study*, J Expo Anal. Environ. Epidemiol., 1998, Vol. 8, 495–518.
- [8] KÜNZLI N., MUDWAY I.S., GÖTSCHI T., i in., *Comparison of Oxidative Properties, Light Absorbance, and Total and Elemental Mass Concentration of Ambient PM2.5 Collected at 20 European Sites*, Environmental Health Perspectives, 2006, Vol. 114, No. 5, 684–690.
- [9] JANSSEN N., DE HARTOG J.J., HOEK G., BRUNEKREEF B., LANKI T., TIMONEN K.L., PEKKANEN J., *Personal Exposure to Fine Particulate Matter in Elderly Subjects: Relation between Personal, Indoor, and Outdoor Concentrations*, Journal of the Air & Waste Management Association, 2000, Vol. 50, No. 7, 1133–1143.
- [10] NIEUWENHUIJSEN M.J., *Personal exposure monitoring in environmental epidemiology*, [w:] Spatial epidemiology. Methods and applications, pod red. P. ELLIOTT, J.C. WAKEFIELD, Oxford University, London, 2000, 360–74.
- [11] POPE C.A., BURNETT R.T., THURSTON G.D., i in., *Cardiovascular mortality and long-term exposure to particulate air pollution: epidemiological evidence of general pathophysiological pathways of disease*, Circulation, 2004, Vol. 109, 71–7.
- [12] POPE C.A., THUN M.J., NAMBOODIRI M.M., DOCKERY D.W., EVANS J.S., SPEIZER F.E., HEATH C.W., *Particulate Air Pollution as a Predictor of Mortality in a Prospective Study of U.S. Adults*, Am. J. Respir. Crit. Care Med., 1995, Vol. 151, 669–674.
- [13] QUIGLEY R.L., DEN BROEDER P., FURU A., BOND B., *Health Impact Assessment International Best Practice Principles*, Special Publication Series No. 5. Fargo, USA: International Association for Impact Assessment, 2006.
- [14] SORENSEN M., DANESHVAR B., HANSEN M., DRAGSTED L.O., HERTEL O., KNUDSEN L., LOFT S., *Personal PM(2.5) exposure and markers of oxidative stress in blood*, Environ Health Perspect, 2003, Vol. 111, 161–166.
- [15] WHO – *Principles of characterizing and applying human exposure models*. IPCS harmonization project document, No. 3. Geneva: World Health Organization 2005.

- [16] WONG T.W., TAM W.S., YU T.S., i in., *Associations between daily mortalities from respiratory and cardiovascular diseases and air pollution in Hong Kong, China*, *Occup. Environ. Med.*, 2002, Vol. 59, 30–5.
- [17] ZUURBIER M., HOEK G., OLDENWENING M., LENTERS V., MELIEFSTE K., VAN DEN HAZEL P., BRUNEKREEF B., *Commuters' Exposure to Particulate Matter Air Pollution Is Affected by Mode of Transport, Fuel Type, and Route*, *Environmental Health Perspectives*, 2010, Vol. 118, No. 6, 783–789.

REVIEW OF METHODS FOR EVALUATION OF PERSONAL EXPOSURE TO PARTICULATE AIR POLLUTION IN URBAN ENVIRONMENT USED IN EPIDEMIOLOGICAL RESEARCH

Traditionally, in epidemiological studies, personal exposure was estimated using spatial interpolation based on measurements from fixed air monitoring stations. Technology development has increased access to advanced equipment for the air quality monitoring and brought a number of methods for assessing personal exposure to particulate air pollution in cities. This article presents selected methods for assessing personal exposure to particulate air pollution in urban environments used in the medical sciences to analyze their impact on human health.