

Łukasz SZALAŁATA<sup>1</sup>  
Jerzy ZWOŹDZIAK<sup>2</sup>  
Anna ZWOŹDZIAK<sup>3</sup>  
Łukasz KUŹMIŃSKI<sup>4</sup>

## MODELOWANIE RECEPTOROWE JAKO NARZĘDZIE ZINTEGROWANEGO ZARZĄDZANIA JAKOŚCIĄ POWIETRZA I RYZYKIEM ŚRODOWISKOWYM

Zanieczyszczenie powietrza w miastach oraz ocena jego wpływu na zdrowie ludzi w ostatnim czasie stanowią priorytetowe zagadnienia dla lokalnych władz i wymagają opracowania zintegrowanych strategii zarządzania jakością powietrza i oceny ryzyka środowiskowego. Aby osiągnąć dobrą jakość powietrza w miastach, po pierwsze, należy dokładnie zidentyfikować i określić udziały poszczególnych źródeł emisji w zanieczyszczeniu powietrza, a następnie poszukać i wdrożyć nowe pragmatyczne rozwiązania, mające na celu poprawę jakości powietrza w aglomeracjach miejskich. Dostępne narzędzia zarządzania jakością powietrza oferują serię skomplikowanych badań bez wdrożenia kompleksowych rozwiązań systemowych. Przykładem mogą być Programy Ochrony Powietrza. Skuteczność ich prześledzono oceniając tendencje zmian 24-godzinnych stężeń pyłów PM<sub>2,5</sub> (tj. o średnicach poniżej 2,5 μm) we Wrocławiu w okresie 2011–2014. Pomimo iż działania podejmowane w ramach programu, w celu zmniejszenia stężenia pyłu zawieszonego w powietrzu atmosferycznym zostały podjęte również w rekomendacjach Programu Gospodarki Niskoemisyjnej dla Wrocławia, nadal jednym z głównych problemów jest zły stan jakości powietrza atmosferycznego we Wrocławiu, szczególnie w okresie zimowym. Obserwuje się brak wyraźnej tendencji spadkowej stężeń pyłów w latach 2011–2014. Zmiany stężeń średnich rocznych, rzędu 1 μg/m<sup>3</sup> na rok, były prawdopodobnie wynikiem zmieniających się warunków meteorologicznych w chłodnym sezonie w latach 2011–2014. Skuteczność Programu ochrony powietrza oraz innych podjętych działań wydają się być niewystarczające. Celem pracy było przedstawienie możliwości nowego narzędzia jakości powietrza zarówno w zarządzaniu jakością powietrza i ocenie ryzyka środowiskowego – modelowania receptorowego.

**Słowa kluczowe:** modelowanie receptorowe, zarządzanie, ryzyko środowiskowe, jakość powietrza, PM<sub>2,5</sub>, PM<sub>10</sub>.

---

<sup>1</sup> Dr inż. Łukasz Szalata, Zakład Ekologii i Zarządzania Ryzykiem Środowiskowym, Wydział Inżynierii Środowiska, Politechnika Wrocławska, Pl. Grunwaldzki 9, 50-377 Wrocław, e-mail: lszalata@gmail.com

<sup>2</sup> Prof. dr hab. inż. Jerzy Zwoździak, IMGW – PIB Oddział Warszawa

<sup>3</sup> Dr inż. Anna Zwoździak, Zakład Ekologii i Zarządzania Ryzykiem Środowiskowym, Wydział Inżynierii Środowiska, Politechnika Wrocławska, Pl. Grunwaldzki 9, 50-377 Wrocław

<sup>4</sup> Dr inż. Łukasz Kuźmiński, Katedra Metod Ilościowych w Ekonomii, Uniwersytet Ekonomiczny we Wrocławiu

## 1. WPROWADZENIE

Istnieją dowody, że zmiany sposobu życia i rozwój współczesnej techniki są w dużej mierze przyczyną chorób zwyrodnieniowych. Człowiek nie może przystosować się do swego środowiska idealnie, bowiem świat się zmienia, a to z kolei wymaga ciągłej adaptacji ze strony ludzi do otaczających nas warunków. Koncepcje zdrowia i środowiska doskonałego są utopiami, nie istnieją, stanowią natomiast motyw działania, gdyż wytyczają cele i kierują wszystkie wysiłki w stronę poznania relacji między jakością środowiska a zdrowiem człowieka.

Czyste powietrze jest jednym ze składników dobrej jakości życia mieszkańców. Pojęcie jakości życia jest rozumiane wieloznacznie. Przez jakość życia rozumie się m.in. poczucie bezpieczeństwa wśród obywateli, możliwość korzystania z funkcjonalnej i łatwo dostępnej infrastruktury technicznej i społecznej, życie w czystym i zdrowym środowisku przyrodniczym. Życie ludzi toczy się w ramach ogólnych warunków makroekonomicznych i politycznych, przy określonym poziomie zanieczyszczenia środowiska, w tym zanieczyszczenia powietrza. Aby utrzymać dobrą jakość życia należy więc opracować pewne standardy dla czystego powietrza, które faktycznie najlepiej odpowiadałyby jakości powietrza na obszarach odległych od źródeł zanieczyszczeń, również tych naturalnych. Oczywiście najłatwiej byłoby zlikwidować wszystkie źródła emisji zanieczyszczeń do atmosfery, co oczywiście jest niemożliwe, biorąc pod uwagę źródła naturalne i irracjonalne, uwzględniając poprawę innych standardów jakości życia.

Wielkie osiągnięcia naukowe są często wyrażane prostymi formułami. W takim razie, w jaki sposób najprościej jest wyrazić podstawowe zasady osiągnięcia dobrej jakości powietrza? Są one powszechnie znane – zminimalizować emisję zanieczyszczeń do atmosfery, utrzymać przewietrzanie terenu, chronić przed niekontrolowanym zanieczyszczeniem powietrza. Przez zminimalizowanie emisji rozumie się nie tylko jej ograniczenie, ale i zapobieganie jej powstawaniu. Pytaniem pozostaje, jak to osiągnąć i w jaki sposób skutecznie ograniczać potencjalne ryzyko środowiskowe? Celem pracy było przedstawienie nowego narzędzia zarządzania jakością powietrza – modelowania receptorowego.

## 2. ZARZĄDZANIE JAKOŚCIĄ POWIETRZA

Zarządzanie jakością powietrza stanowi istotny element szeroko rozumianego zarządzania środowiskiem. W ramach zarządzania środowiskiem prowadzone są: oceny ryzyka, tj. przewidywanie występowania potencjalnych i negatywnych oddziaływań zanieczyszczeń na środowisko i zdrowie mieszkańców, oceny zagrożenia, czyli oceny negatywnych skutków zanieczyszczenia środowiska oraz zarządzanie jakością powietrza, tj. m.in. dążenie do utrzymania standardów jakości powietrza<sup>5</sup>.

Istotą nowoczesnych systemów zarządzania jest tworzenie zintegrowanego systemu obejmującego planowanie przestrzenne, zarządzanie jakością powietrza, zarządzanie ryzykiem środowiskowymi informowanie społeczeństwa<sup>6</sup>. Temu celowi służą odpowiednie instrumenty, które powinny charakteryzować się skutecznością, możliwością kontro-

<sup>5</sup> M. Deszka, M. Dworakowska, M. Gos, M. Wąsowicz, *Gospodarowanie zasobami środowiska, Podstawy ekonomii środowiska*, Warszawa 2014, s. 82–102.

<sup>6</sup> A. Kryński, M. Kramer, A.E. Caekelbergh, *Zintegrowane zarządzanie środowiskiem – systemy zależności pomiędzy polityką, prawem, zarządzaniem i techniką*, Warszawa 2013, s. 67–79, 310–313, 332–334.

lowania i niezależnością. Instrumenty, które są lub mogą być stosowane przez wszystkie podmioty nazwijmy adresowanymi, natomiast te stosowane w ramach określonej kategorii instrumentów adresowanych – instrumentami wyspecjalizowanymi (tabela 1).

Tabela 1. Kategorie instrumentów stosowane w polityce środowiskowej

<b>Instrumenty adresowane</b>	<b>Instrumenty wyspecjalizowane</b>
<b>Regulacje prawno-administracyjne</b>	Normy nakazowe
	Standardy działania
	Zakazy i ograniczenia
	Certyfikaty i pozwolenia
	Inne regulacje
<b>Mechanizmy rynkowe i finansowe</b>	Handel emisjami
	Zachęty finansowe
	Oplaty i kary
	Inne mechanizmy(subwencje, podatki, ulgi podatkowe)
<b>Negocjowane porozumienia</b>	
<b>Dobrowolne zarządzanie i odpowiedzialność korporacyjna społeczna</b>	Dobrowolne porozumienia
	„Porządek na własnym podwórku”
<b>Programy wspierające</b>	Przepływ informacji
	Promocja i podnoszenie świadomości
	Kodeksy postępowania i dobre praktyki
	Budowanie potencjału

Źródło: *Air Quality Management*, 2007<sup>7</sup>.

W ramach standardów działań budowane są Programy Ochrony Powietrza (tzw. POP-y)<sup>8</sup>. Istnieją dwa główne cele opracowywania POP-ów:

- wskazanie przyczyn, które w danej strefie doprowadziły do przekroczenia dopuszczalnych stężeń substancji w powietrzu. Dokonuje się tego na podstawie wyników badań i innych przedstawionych dowodów;
- wskazanie rozwiązań, które mogą wyeliminować te przyczyny. Rozwiązania te, to dobrane w odpowiedni sposób tzw. działania naprawcze, których skutkiem ma być poprawa jakości powietrza w strefie.

Trudno jest ocenić skuteczność Programów Ochrony Powietrza m.in. ze względu na krótki okres ich funkcjonowania w Polsce. Prześledźmy jednak, jak kształtowały się poziomy stężeń PM<sub>2.5</sub> na przykładzie aglomeracji wrocławskiej. Dlaczego pyły drobne, bowiem Panel ekspertów pracujących w ramach projektu WHO *Review of evidence on health aspects of air pollution*<sup>9</sup> w ostatnim czasie przygotował odpowiedzi na najbardziej

<sup>7</sup> Air Quality Management Policy Tools Leading Practice Research. 2007. Alberta Environment, ISBN No. 978-0-7785-7205-3, December 2007, p. 16.

<sup>8</sup> POŚ 2001. Ustawa z 27 kwietnia 2001 r. Prawo ochrony środowiska (Dz.U. z 2001 r., nr 62, poz. 627 ze zm.), s. 35–37.

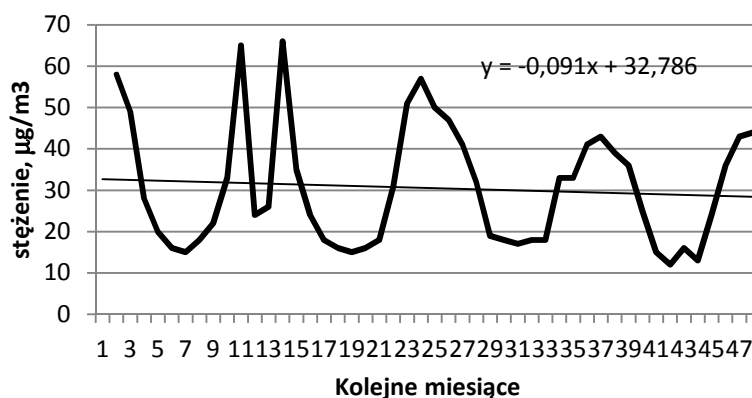
<sup>9</sup> WHO 2013. Review of evidence on health aspects of air pollution – REVIHAAP; WHO Regional Office for Europe, Copenhagen, p. 6–47.

istotne 22 pytania na temat wpływu na zdrowie ludzi drobnego pyłu zawieszonego, ozonu oraz tlenków azotu i innych zanieczyszczeń, identyfikowanych w pobliżu szlaków komunikacyjnych. Eksperci podsumowali, że najnowsze badania potwierdziły wnioski z analizy opublikowanych wcześniej wyników w raporcie WHO z 2005 roku oraz dostarczyły nowych dowodów, że efekty zdrowotne ludzi mogą pojawiać się przy niższych stężeniach pyłów niż proponowano. W ww. raporcie stwierdzono, że w przypadku PM<sub>2,5</sub> i PM<sub>10</sub> istnieje liniowa zależność funkcyjna typu dawka – odpowiedź nawet przy stężeniach zbliżonych do wartości tła. W związku z tym należy opracować bardziej ostre normy zarówno dla stężeń dobowych, jak i średnich rocznych.

### 3. TENDENCJE ZMIAN STĘŻEŃ PM<sub>2,5</sub> W AGLOMERACJI WROCŁAWSKIEJ

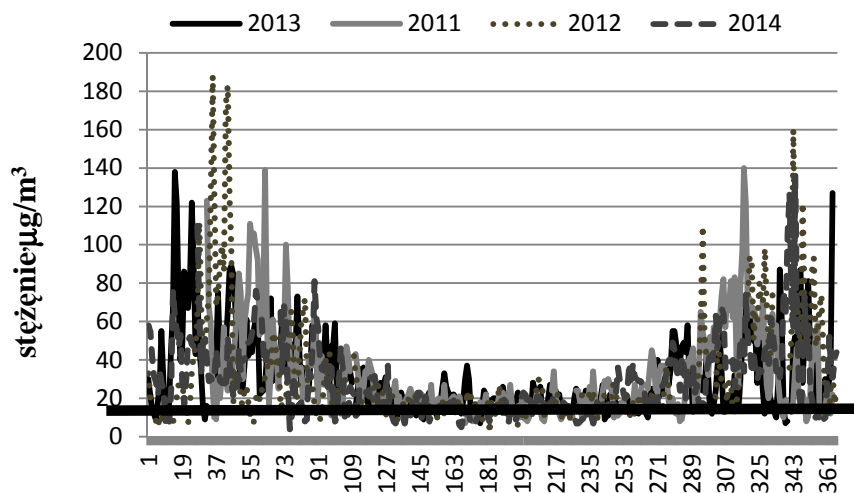
Aby być obiektywnym w ocenie tendencji zmian stężeń pyłów PM<sub>2,5</sub>, na rys. od 1 do 4 przedstawiono różne sposoby interpretacji danych pomiarowych. Rozważania oparto na średnich dobowych wynikach stężeń pyłu PM<sub>2,5</sub> zarejestrowanych w stacji komunikacyjnej Wrocławia (<http://air.wroclaw.pios.gov.pl>) w latach 2011–2014. Analizując stężenia średnie miesięczne (rys. 1) zauważyć można nieznaczny trend spadkowy, rzędu 3% rocznie, co odpowiada ok. 1 µg/m<sup>3</sup>. Nie jest to prognoza optymistyczna w świetle realizacji opracowanych POP-ów dla aglomeracji wrocławskiej. Ponieważ obecnie w UE normowane są wartości średnie roczne pyłu PM<sub>2,5</sub> i wynoszą one 25 µg/m<sup>3</sup> wynika, że wyznaczone na podstawie pomiarów wartości dla: roku 2014 – 28,5 µg/m<sup>3</sup> i odpowiednio dla lat: 2013 – 30,6; 2012 – 33,7; 2011 – 31,6, przekraczają dopuszczalne poziomy.

Na rys. 2 nałożono na siebie serie roczne stężeń średnich dobowych PM<sub>2,5</sub> i nie zauważa się znaczących zmian stężeń w okresie 4 lat. Rysują się natomiast podobne tendencje zmian sezonowych, wyraźny wzrost w okresie pory chłodnej, której odpowiada sezon grzewczy. Wskazuje to na dominujące w tym czasie oddziaływanie procesów spalania, generujących znaczne emisje pyłów, na jakość powietrza we Wrocławiu.



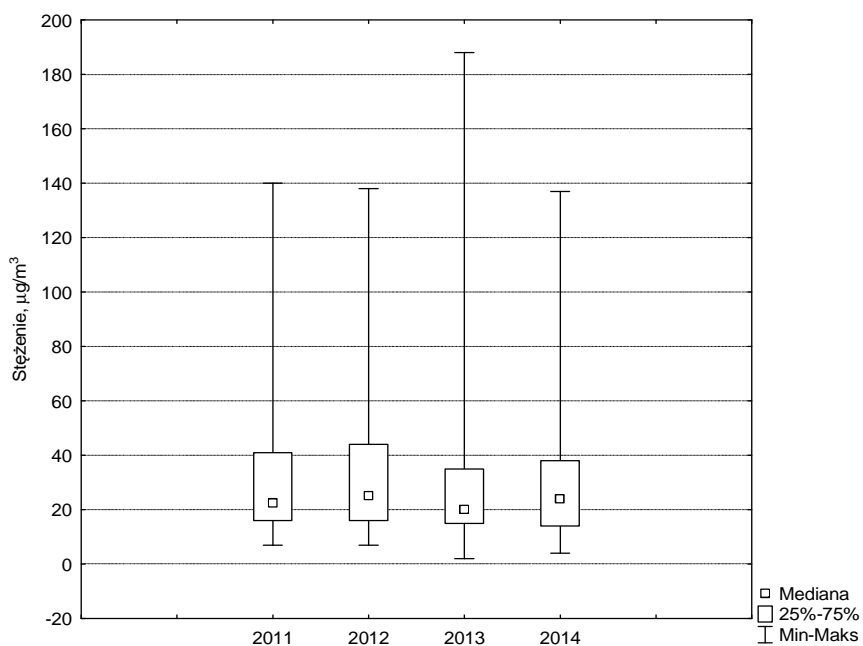
Rys. 1. Przebieg stężeń średnich miesięcznych pyłu PM<sub>2,5</sub> w stacji komunikacyjnej Wrocławia w latach 2011–2014

Źródło: opracowanie własne współautorów.



Rys. 2. Przebieg stężeń średnich dobowych PM<sub>2,5</sub> w stacji komunikacyjnej Wrocławia w latach 2011–2014

Źródło: opracowanie własne współautorów.



Rys. 3. Statystyki opisowe (mediana, rozstęp kwartalny i minimum-maksimum) stężeń średnich dobowych PM<sub>2,5</sub> ze stacji komunikacyjnej Wrocławia dla lat 2011–2014

Źródło: opracowanie własne współautorów.

Czy stężenia zmieniają się istotnie w ciągu tych czterech lat? – wyniki ocenić można na podstawie wykresu w postaci tzw. skrzynki z wąsami (ang. *boxand whiskers*), pokazującego zakresy stężeń PM<sub>2,5</sub> w kolejnych latach oraz statystyki opisowe (mediana, rozstęp kwartalny i minimum-maksimum). Na rys. 3 widać znaczną różnicę w długości „wąsów” i niesymetryczne położenie mediany wskazujące na dużą asymetrię rozkładu. Asymetria taka wyklucza rozkład normalny.

Porównując kolejne lata pod względem stężeń średnich dobowych wykorzystano testy istotności różnic dla prób niezależnych. Testowano różnice między średnimi z 2011, 2012 i 2013 roku a średnią w 2014 roku. Testy te weryfikują hipotezę zerową o równości średnich w dwóch grupach. Ponieważ stężenia mają rozkład log-normalny, toteż poszczególne wartości zlogarytmizowano i takie poddano testowi statystycznemu. Tylko w przypadku roku 2012 należało odrzucić hipotezę zerową o równości średnich stężeń ( $p < 0,05$ ) natomiast w przypadku lat 2011 i 2013 nie było podstawy do odrzucenia ( $p > 0,05$ ). Oznacza to, że średnie dla 2014 r., 2011 r. i 2013 r. nie różniły się istotnie, tylko średnie stężenie w 2012 r. było istotnie wyższe od średniej wartości w 2014 roku.

Podsumowując tę część rozważań wynika, że – jak na razie – nie widać wyraźnej poprawy jakości powietrza w aglomeracji wrocławskiej mimo podjętych działań ograniczających emisję pyłu drobnego. Metoda „małych kroczków” wydaje się mało skuteczna. Wynika z tego, że należy podjąć wyraźne działania systemowe, ale w pierwszej kolejności wskazać należy przyczyny nadmiernych stężeń pyłów drobnych.

#### 4. PROCEDURY ZARZĄDZANIA JAKOŚCIĄ POWIETRZA

W ramach obecnych regulacji prawnych można mówić o dwóch systemach zarządzania jakością powietrza. Pierwszy dotyczy systemu zarządzania jakością powietrza w rozumieniu kształtowania jego jakości, a drugi system zarządzania emisjami zanieczyszczeń powietrza w rozumieniu jego ochrony poprzez ograniczanie i zapobieganie emisjom. W ramach każdego systemu można wyróżnić podsystemy, np. systemu zarządzania jakością powietrza w sytuacjach awaryjnych czy systemu zarządzania jakością powietrza na etapie planowania inwestycji. Każdy system zarządzania oparty jest na danych rzeczywistych, wiedzy i przepływie informacji. Zarządzaniem środowiskiem zajmuje się administracja rządowa, samorządowa, instytucje im podporządkowane oraz podmioty gospodarcze korzystające ze środowiska. Każdy system ma swoje narzędzia, instrumenty i środki zarządzania, służące jego organizacji oraz sterujące oddziaływaniem na obiekt zarządzania. Narzędzia pomagają nam w zrozumieniu istoty zarządzania jakością powietrza i obejmują całość działań od identyfikacji problemu do opracowania strategii i wdrożenia rozwiązań.

Prowadzone w ostatnich latach, w ramach obowiązków ustawowych przez Główny Inspektorat Ochrony Środowiska, oceny jakości powietrza w Polsce wykazują wysoki poziom zanieczyszczenia pyłem o średnicach poniżej 10  $\mu\text{m}$ , tzw. PM<sub>10</sub> i poniżej 2,5  $\mu\text{m}$ , tzw. PM<sub>2,5</sub>; w wielu strefach kraju poziomy zanieczyszczeń kształtują się powyżej wartości dopuszczalnej. Oznacza to konieczność wdrożenia naprawczych programów ochrony powietrza. Informacje nt. źródeł emisji i ich udziału w zanieczyszczeniu powietrza są niezbędne do opracowywania planów działań krótko i długoterminowych. Dlatego też rozwiązaniem staje się obecnie modelowanie jako ważne narzędzie analityczne. Dotyczy to zarówno etapu diagnozy stanu jakości powietrza w całym obszarze strefy, a w nim

wskazania źródeł odpowiedzialnych za przekroczenia, jak i oceny skuteczności budowanych scenariuszy naprawczych<sup>10</sup>.

Modelowanie zjawisk czy procesów fizykochemicznych wymaga wprowadzenia danych wejściowych oraz zastosowania odpowiedniego narzędzia matematycznego, toteż jakość uzyskiwanych wyników obarczona jest zawsze pewną niepewnością wynikającą z jakości danych wejściowych i uproszczeń opisu tych procesów. W praktyce, w ocenie pola stężeń zanieczyszczeń i wpływu na nie konkretnych źródeł emisji, jest stosowanych wiele metod: metody eksploracyjne, inwentaryzacje emisji, modele deterministyczne i receptorowe. Obecnie powszechnie stosowane są dwa podejścia. Pierwsze oparte jest na modelach deterministycznych, popularnie określanymi modelami transportu i rozprzestrzeniania się zanieczyszczeń w powietrzu<sup>11</sup>. Wychodzi się w nich od emisji zanieczyszczeń i sytuacji meteorologicznej oraz wykorzystując znajomość matematycznego opisu procesów fizycznych i chemicznych, przebiegających w atmosferze, ustala się zależność typu emitor-receptor. Wiadomo jest, że jakość powietrza na dowolnym obszarze kształtowana jest nie tylko poprzez emisje lokalne, ale również duże znaczenie mogą mieć zanieczyszczenia napływowe, zarówno z regionu, jak i dalszych odległości. Istotną więc sprawą jest oszacowanie ich udziału w całkowitych stężeniach rejestrowanych w stacjach pomiarowych. Drugim podejściem do oceny źródeł pochodzenia zanieczyszczeń jest modelowanie receptorowe. Ten typ modelowania, którego początki sięgają początku lat 70. ubiegłego wieku<sup>12</sup>, „jest już powszechnie stosowany w praktyce, zarówno w Stanach Zjednoczonych i Kanadzie, jak i w Europie oraz krajach azjatyckich”<sup>13</sup>. Metoda ta, bazując na stanie jakości atmosfery, ocenianym na podstawie stężeń poszczególnych substancji, identyfikuje odpowiedzialne za ten stan typy źródeł emisji. Pozwala ocenić udział źródeł naturalnych w poziomie rejestrowanych stężeń zanieczyszczeń.

<sup>10</sup> E. Kociotek-Balawejder, E. Stanisławowska, *Chemia środowiska*, Wrocław 2012, s. 59–62.

<sup>11</sup> L. Łobocki, *Wskazówki metodyczne dotyczące modelowania matematycznego w systemach zarządzania jakością powietrza*, Warszawa 2003, s. 18–24.

<sup>12</sup> J.W. Winchester, G.D. Nifong, *Water pollution in Lake Michigan by trace elements from pollution aerosol fallout*, *Water, Air, and Soil Pollution* 1, 1971, p. 50–64; M.S. Miller, S.K. Friedlander, G.M. Hidy, *A Chemical Element Balance for the Pasadena Aerosol*, *J. Coll. Interface Sci.*, 1972, No. 39, p. 165–176.

<sup>13</sup> M. Viana, T.A.J. Kuhlbusch, X. Querol, A. Alastuey, R.M. Harrison, P.K. Hopke, W. Winiwarter, M. Vallius, S. Szidat, A.S.H. Prevot, C. Hueglin, H. Bloemen, P. Wahlin, R. Vecchi, A.I. Miranda, A. Kasper-Giebl, W. Maenhaut, R. Hitzenberger, *Source apportionment of particulate matter in Europe: A review of methods and results*, *Aerosol Science*, 2008, 39, p. 827–849; T. Johnson, S. Guttikunda, G. Wells, P. Artaxo, T. Bond, A. Russell, J. Watson, J. West, *Tools for improving air quality management, A Review of Top-down Source Apportionment Techniques and Their Application in Developing Countries*, Energy Sector Management Assistance Program, Report 339/11, The World Bank Group, Washington 2011, p. 25–45; F. Karagulian, C. Belis, *Enhancing Source apportionment with receptor models to foster the air quality directive implementation*, *Int. J. Environ. Poll.* 2012, 50, p. 190–198; S.G. Brown, T. Lee, G.A. Norris, P.T. Robert, J.L. Collett Jr. P. Paatero, D.R. Worsnop, *Receptor modeling of near-roadway aerosol mass spectrometer data in Las Vegas, Nevada with EPA PMF*, *Atmos. Chem. Phys.*, 2012, 12, p. 309–325; C. Belis, B.R. Larsen, F. Amato, I. Haddad, O. Favez, R.M. Harrison, P.K. Hopke, S. Nava, P. Paatero, A. Prevot, U. Quass, R. Vecchi, M. Viana, *European Guide on Air Pollution Source Apportionment with receptor models*, EC JRC, Report EUR 26080EN, 2014, p. 13–21.

Należy podkreślić, że modele receptorowe nie stanowią alternatywy dla modeli dyspersyjnych (deterministycznych), lecz uważać je należy jako modele komplementarne. Idealnie byłoby, aby te dwie techniki modelowania wzajemnie się wzmacniały i w efekcie stworzyły wspólne narzędzie w systemie zarządzania środowiskiem.

Rozwijanie modelowania receptorowego wynika również z przesłanek Dyrektywy Parlamentu Europejskiego i Rady 2008/50/WE z dnia 21 maja 2008 roku w sprawie jakości powietrza i czystszej powietrza dla Europy<sup>14</sup>. W art. 20 rozdz. II stwierdza się, że w przypadku, gdy Komisja zostanie poinformowana o przekroczeniu wartości dopuszczalnych dla danego zanieczyszczenia związanego z udziałem zanieczyszczeń pochodzących ze źródeł naturalnych, przekroczenie to nie jest uznawane za przekroczenie. Z kolei w art. 21 rozdz. II podano, że państwa członkowskie mogą wyznaczyć strefy lub aglomeracje, w których wartości dopuszczalne dla PM10 są przekroczone w powietrzu, w wyniku resuspensji cząstek w następstwie posypywania dróg piaskiem lub solą w okresie zimowym. Jednocześnie należy przekazać informację na temat występujących tam stężeń i źródeł pyłu zawieszonego PM10. W Decyzji Wykonawczej Komisji z dnia 12 grudnia 2011 r., ustanawiającej zasady stosowania dyrektyw 2004/107/WE i 2008/50/WE Parlamentu Europejskiego i Rady w odniesieniu do systemu wzajemnej wymiany informacji oraz sprawozdań dotyczących jakości otaczającego powietrza, w art. 8, w pkt 1, uszczegółowiono, że państwa członkowskie udostępniają informacje dotyczące metod wykazania, iż przekroczenia są wynikiem wpływu źródeł naturalnych lub posypywania dróg piaskiem lub solą w okresie zimowym oraz procedury ich nieuwzględnienia w poszczególnych strefach i aglomeracjach. Zapisy te znalazły odzwierciedlenie w ustawie z 27 kwietnia 2001 roku Prawo ochrony środowiska. W art. 89 ust. 1b stwierdza się, że w przypadku udokumentowania wpływu zanieczyszczeń pochodzących ze źródeł naturalnych lub solenia i piaskowania dróg w okresie zimowym na poziom substancji w powietrzu, wojewódzki inspektor ochrony środowiska może uwzględnić w ocenie poziomów substancji w powietrzu wpływ tych zanieczyszczeń. Do realizacji tego zadania, na obecny stan wiedzy, najlepiej nadają się techniki modelowania receptorowego. W ostatnich dekadach naukowcy z całego świata szeroko stosują metody identyfikacji źródeł emisji, wykorzystując różnego rodzaju dane pomiarowe. Aplikacje modeli receptorowych można znaleźć w wielu pracach polskich, poczynając od 1986 roku<sup>15</sup>.

W ramach proponowanej koncepcji rozwiązań należy podkreślić, iż modelowanie receptorowe dostarcza:

- 1) informacji dotyczących typów źródeł emisji oddziałujących na poziom stężeń w receptorze;
- 2) oceny procentowego udziału poszczególnych typów źródeł emisji w receptorze dla okresu, w jakim prowadzone były pomiary;
- 3) podstawy do opracowania strategii redukcji zanieczyszczenia powietrza, a więc jak najlepiej wpisuje się w przesłanie Dyrektywy Parlamentu Europejskiego i Rady 2008/50/WE (rozdz. II, art. 20 i 21).

<sup>14</sup> Dz. Urz. UE L 152 z 11.06.2008 r.

<sup>15</sup> J. Zwoździak, *Metody identyfikacji źródeł emisji pyłów i ich oddziaływania*, Wrocław 1986, s. 24–67.



Nową wersję metody dodatniej faktoryzacji macierzy<sup>16</sup> (USA EPA 5.0) wykorzystano do identyfikacji źródeł pochodzenia pyłów PM<sub>2,5</sub> w atmosferze miejskiej Wrocławia. Były to badania pilotowe i dotyczyły pomiarów we Wrocławiu w punkcie tła miejskiego w okresie zimowo-wiosennym 2009 roku<sup>17</sup>. Analizy chemiczne prowadzono w ramach współpracy z *Crocker Nuclear Laboratory*, University of California w Davis (UCD), specjalizującego się m.in. w ilościowej analizie pyłów metodą fluorescencyjnej spektrometrii rentgenowskiej (EDXRF). Analizowano tam 23 pierwiastki: S, Cl, K, Ca, Ti, Fe, Mn, Cr, V, Ni, Cu, Zn, As, Pb, Br, Rb, Sr, Na, Mg, Cd, Al i Si. Niepewności pomiarowe zostały oszacowane przez ww. laboratorium dla każdej próbki-pierwiastka, dodatkowo przesłano granice oznaczalności metody dla każdego pierwiastka (MDL). Są to niezbędne dane do uruchomienia programu dodatniej faktoryzacji macierzy. Wykonano szereg obliczeń szukając najlepszego rozwiązania<sup>18</sup>. Ostatecznie wyodrębniono cztery typy źródeł emisji pyłów PM<sub>2,5</sub>: motoryzacja, paleniska domowe, pył drogowy i procesy energetyczne (energetyka zawodowa). Najistotniej wpływającymi źródłami emisji w okresie typowo zimowym były paleniska domowe i energetyka zawodowa, natomiast począwszy od marca motoryzacja i pył drogowy. Jak kształtowały się udziały w całym okresie pomiarowym schematycznie przedstawiono na rys. 4. Porównywalne udziały zanotowano w przypadku palenisk domowych i motoryzacji. Przykładowo, w przypadku siarki i seleniu dominował udział energetyki zawodowej, natomiast w przypadku pierwiastków naturalnie występujących w glebie i skorupie ziemskiej – udział pyłu drogowego.

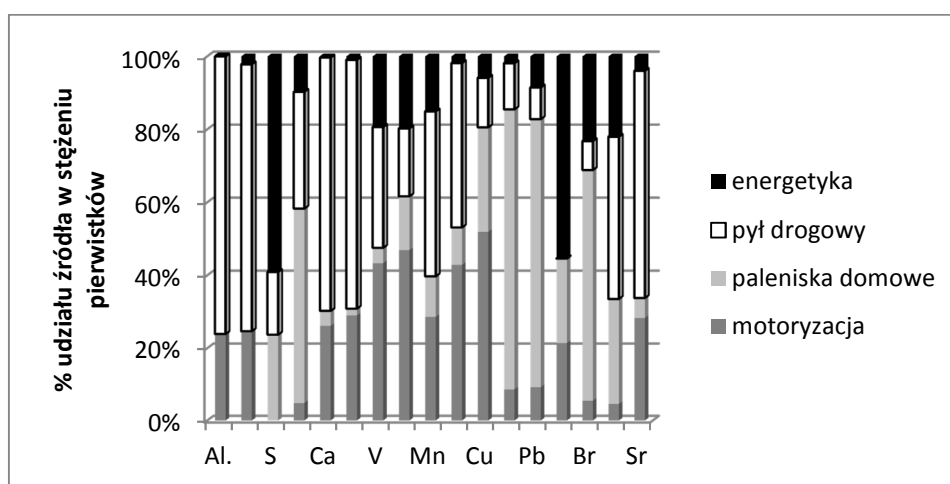
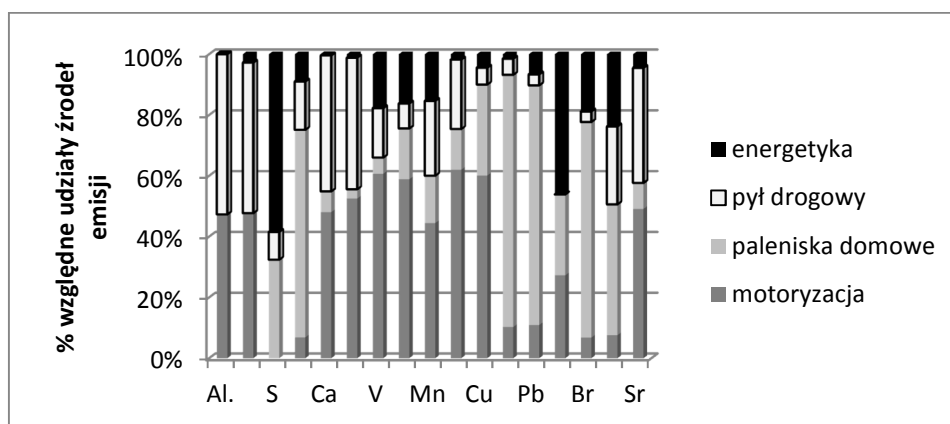
Porównując stężenia pierwiastków pochodzące z tych czterech źródeł emisji wynika, że udział pyłu mineralnego jest wysoki, a więc istotnie wpływa na rejestrowe stężenia pyłu PM<sub>2,5</sub>. Wyniki te są również przydatne w ocenie ryzyka środowiskowego, bowiem ważne jest nie tylko stężenie pyłu drobnego jako całości, ale jego skład. Analiza ta wskazuje źródła emisji najbardziej odpowiedzialne za stężenia pierwiastków śladowych, wśród których wiele jest uznawanych za szkodliwe dla zdrowia ludzi. Dzięki takiej analizie można podjąć wyraźne działania systemowe związane jednocześnie z ograniczeniem emisji pyłów drobnych i wielu szkodliwych substancji w atmosferze. Przykładowo, na rys. 5 przedstawiono udziały zidentyfikowanych źródeł emisji w stężeniach chromu i ołowiu w atmosferze miejskiej. Jak wynika z tych danych, poprzez odpowiednie sterowanie emisjami możemy skutecznie zmniejszyć ryzyko oddziaływania toksycznych substancji na zdrowie ludzi.

---

<sup>16</sup> EPA 2014. Positive matrix factorization PMF 5.0, Fundamentals and User Guide, EPA/600/R-14/108, Washington DC, USA, p. 18-22.

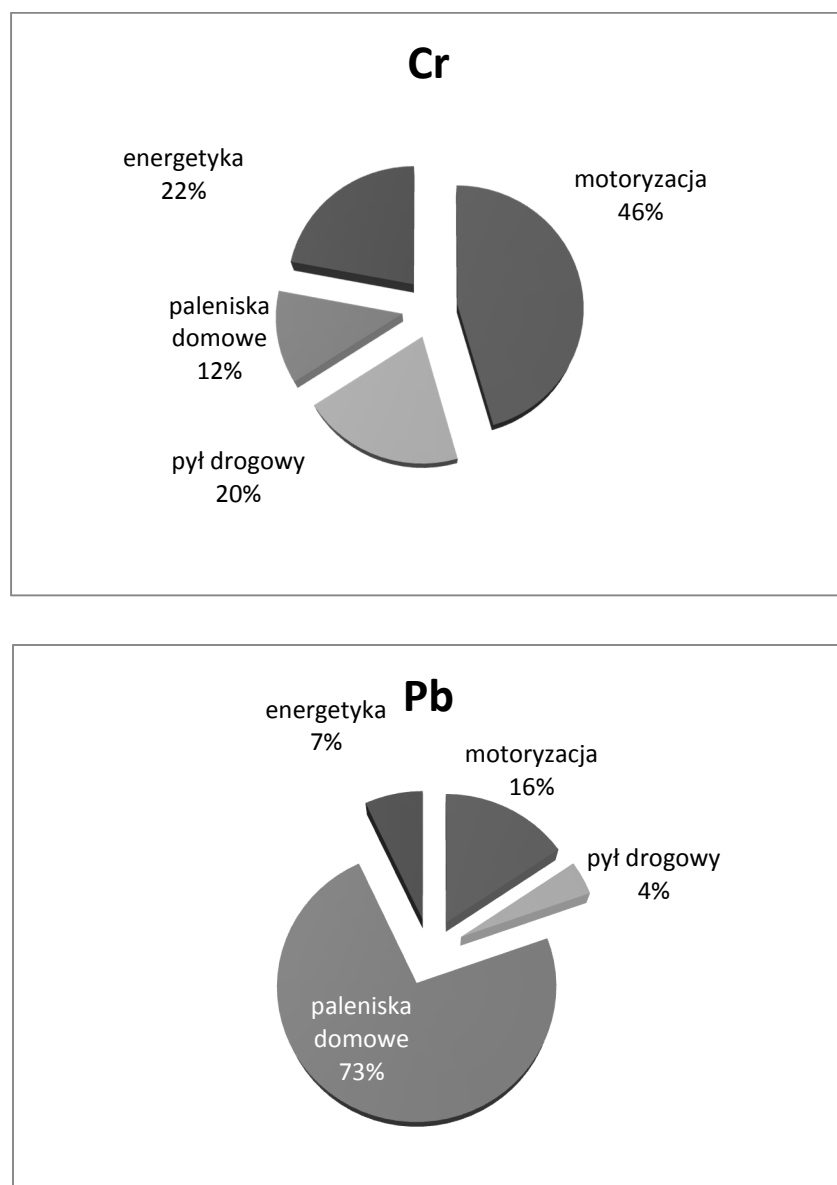
<sup>17</sup> A. Zwoździak, I. Sówka, J. Zwoździak, K. Trzepla-Nabagło, *Analiza zanieczyszczenia powietrza pyłem PM<sub>2,5</sub> w aspekcie potencjalnego ryzyka utraty zdrowotności mieszkańców Wrocławia*, „Medycyna Środowiskowa” 2010, nr 13, s. 25–31.

<sup>18</sup> J. Zwoździak, *Współczesne kierunki w zarządzaniu jakością powietrza atmosferycznego*, Warszawa 2017, s. 116–122.



Rys. 4. Profile źródeł emisji oraz udziały ich w stężeniach pierwiastków rejestrowanych w receptorze

Źródło: opracowanie własne współautorów.

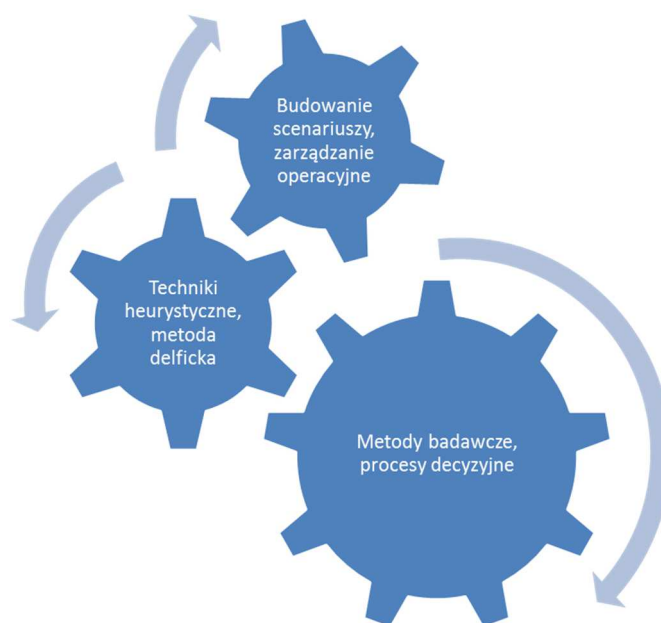


Rys. 5. Procentowe udziały poszczególnych typów źródeł emisji w stężeniach Cr i Pb, zawartych w pyłe PM<sub>2.5</sub>, w atmosferze Wrocławia

Źródło: opracowanie własne współautorów.

## 5. PODSUMOWANIE

Zarządzanie jakością powietrza oraz zarządzanie ryzykiem środowiskowym w obecnym realiach prawno-administracyjnych oraz stale zwiększającej się świadomości ekologicznej populacji stanowią istotne i komplementarne elementy zintegrowanego zarządzania środowiskowego, poprzez wdrażanie operacyjnych pakietów działań prośrodowiskowych/niskoemisyjnych mających na celu ograniczenie do maksimum wystąpienia potencjalnego ryzyka środowiskowego<sup>19</sup>. Metody badawcze stosowane w zarządzaniu ryzykiem środowiskowym (rys. 6) mogą być jednocześnie wykorzystywane w strategiach zarządzania jakością powietrza.



Rys. 6. Metody badawcze stosowane w zarządzaniu ryzykiem środowiskowym

Źródło: opracowanie własne współautorów.

Elementem integrującym powyższe działania jest cel strategiczny polegający na stałej poprawie komfortu/ samopoczucia i zdrowotności mieszkańców poprzez dbałość o stan komponentów środowiska naturalnego i ograniczanie emisji zanieczyszczeń poprzez wdrażanie zasady trwałego zrównoważonego rozwoju.

<sup>19</sup> A. Panasiewicz, *Zarządzanie ryzykiem środowiskowym jako narzędzie wspierania gospodarki bardziej przyjaznej środowisku*, Prace Naukowe Uniwersytetu Ekonomicznego we Wrocławiu. Reserch Papers of Wrocław University of Economics, No. 318, 2013, *Polityka zrównoważonego i zasobooszczędnego gospodarowania*, ISSN 1899–3192, s. 255 i n.; M. Dobler, K. Lajili, D. Zeghal, *Environmental Performance*, Environmental Risk and Risk Management, Business Strategy and the Environmental, Bus. Strat. Env. 2014, No. 23, p. 1–17.

Programy ochrony powietrza oraz Plan Gospodarki Niskoemisyjnej, opublikowany na początku 2016 r., w którym zawarto szereg działań niskoemisyjnych dla Wrocławskiego Obszaru Funkcjonalnego – Wrocławia, zmierzają do poprawy stanu środowiska, a szczególnie jakości powietrza atmosferycznego, redukcji emisji gazów cieplarnianych do atmosfery, ograniczenia zużycia energii oraz poprawy jakości życia mieszkańców. Cały ten pakiet wydaje się być dobrym działaniem, ale – w ujęciu autorów – brakuje kompleksowego systemu działań mających na celu skuteczną poprawę jakości powietrza atmosferycznego.

Obsuwając wielki postępowanie w metodach identyfikacji źródeł emisji zanieczyszczeń w wielu krajach świata, nie pozostaje nic innego, jak wdrożenie modelowania receptorowego w zintegrowanych systemach zarządzania środowiskowego w kraju. Wykorzystanie wyników modelowania receptorowego pozwoli skutecznie ograniczać w aglomeracjach miejskich emisje pyłów drobnych do atmosfery i jednocześnie zmniejszyć potencjalne ryzyko środowiskowe, dzięki sterowaniu emisjami pierwiastków lub związków niebezpiecznych dla zdrowia ludzi.

## LITERATURA

- [1] Air Quality Management Policy Tools Leading Practice Research. 2007. Alberta Environment, ISBN No. 978-0-7785-7205-3, December 2007.
- [2] Belis C., Larsen B.R., Amato F., Haddad I., Favez O., Harrison R.M., Hopke P.K., Nava S., Paatero P., Prevot A., Quass U., Vecchi R., Viana M., *European Guide on Air Pollution Source Apportionment with receptor models*, EC JRC, Report EUR 26080EN, 2014.
- [3] Brown S.G., Lee T., Norris G.A., Robert P.T., Collett Jr. J.L., Paatero P., Worsnop D.R., *Receptor modeling of near-roadway aerosol mass spectrometer data in Las Vegas, Nevada with EPA PMF*, Atmos. Chem. Phys., 2012, 12.
- [4] Deszka M., Dworakowska M., Gos M., Wąsowicz M., *Gospodarowanie zasobami środowiska, Podstawy ekonomii środowiska*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2014.
- [5] Dobler M., Lajili K., Zeghal D., *Environmental Performance*, Environmental Risk and Risk Management., Business Strategy and the Environmental, Bus. Strat. Env., 2014, 23.
- [6] EPA 2014. Positive matrix factorization PMF 5.0, Fundamentals and User Guide, EPA/600/R-14/108, Washington DC, USA
- [7] Johnson T., Guttikunda S., Wells G., Artaxo P., Bond T., Russell A., Watson J., West J., *Tools for improving air quality management*, A Review of Top-down Source Apportionment Techniques and Their Application in Developing Countries, Energy Sector Management Assistance Program, Report 339/11, The World Bank Group, Washington 2011.
- [8] Karagulian F., Belis C., *Enhancing Source apportionment with receptor models to foster the air quality directive implementation*, Int. J. Environ. Poll. 2012, 50.
- [9] Kociotek-Balawejder E., Stanisławowska E., *Chemia środowiska*, Wydawnictwo Uniwersytetu Ekonomicznego we Wrocławiu, Wrocław 2012.
- [10] Kryński A., Kramer M., Caekelbergh A.E., *Zintegrowane zarządzanie środowiskiem – systemy zależności pomiędzy polityką, prawem, zarządzaniem i techniką*, Oficyna Ekonomiczna Grupa Wolters Kluwer, Warszawa 2013.
- [11] Łobocki L., *Wskazówki metodyczne dotyczące modelowania matematycznego w systemach zarządzania jakością powietrza*, Ministerstwo Środowiska, Główny Inspektorat Ochrony Środowiska, Warszawa 2003.

- [12] Miller M.S., Friedlander S.K., Hidy G.M., *A Chemical Element Balance for the Pasadena Aerosol*, J. Coll. Interface Sci, 1972, 39.
- [13] Panasiewicz A., *Zarządzanie ryzykiem środowiskowym jako narzędzie wspierania gospodarki bardziej przyjaznej środowisku*, Prace Naukowe Uniwersytetu Ekonomicznego we Wrocławiu. Reserch Papers of Wrocław University of Economics, no. 318, 2013, Polityka zrównoważonego i zasobooszczędnego gospodarowania, ISSN 1899–3192.
- [14] Ustawa z 27 kwietnia 2001 r. – Prawo ochrony środowiska (tekst jedn. Dz.U. z 2017 r., poz. 519).
- [15] WHO 2013. Review of evidence on health aspects of air pollution – REVIHAAP; WHO Regional Office for Europe, Copenhagen.
- [16] Viana M., Kuhlbusch T.A.J., Querol X., Alastuey A., Harrison R.M., Hopke P.K., Winiwarter W., Vallius M., Szidat S., Prevot A.S.H., Hueglin C., Bloemen H., Wahlin P., Vecchi R., Miranda A.I., Kasper-Giebl A., Maenhaut W., Hitzenberger R., *Source apportionment of particulate matter in Europe: A review of methods and results*, Aerosol Science, 2008, 39.
- [17] Winchester J.W., Nifong G.D., *Water pollution in Lake Michigan by trace elements from pollution aerosol fallout*, Water, Air, and Soil Pollution 1, 1971.
- [18] Zwoździak J., *Metody identyfikacji źródeł emisji pyłów i ich oddziaływania*, Monografie Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1986.
- [19] Zwoździak J., *Nowoczesne kierunki w zarządzaniu jakością powietrza. Monografie Instytutu Meteorologii i Gospodarki Wodnej*, Państwowy Instytut Badawczy (przekazany do druku 2017).

#### RECEPTOR MODELING AS AN INTEGRATED AIR QUALITY MANAGEMENT AND ENVIRONMENTAL RISK ASSESSMENT POLICY TOOL

Urban air pollution is a wide concern for human health and requires the development of integrated air quality management and environmental risk assessment strategies. In order to achieve a good air quality in cities, firstly, pollution sources have to be accurately identified and quantified, secondly, new pragmatic solutions for improving air quality should be found. Existing tools of air quality management present a series of complicated measures without offering systemic solutions. Despite the actions undertaken by the Voivodship Marshal within the air protection program to reduce the concentrations of particulate matter in ambient air, exceedances of PM<sub>10</sub> and PM<sub>2.5</sub> standards remain the key problem of air quality in Wrocław. The lack of a clear downwards trend in PM concentrations was observed in the years 2011–2014. Small changes, in the range of ca. 1 µg/m<sup>3</sup> per year, were probably the result of different meteorological conditions in cool seasons in the years 2011–2014. Air protection program of baby steps seems to be adequate but ineffective. The main purpose of this article is to present a new air quality tool in Poland both in air quality management and in environmental risk assessment – receptor modeling.

**Keywords:** receptor modeling , management, environmental risk, air quality, PM<sub>2.5</sub>, PM<sub>10</sub>.

**DOI:** 10.7862/rz.2017.mmr.10

*Tekst złożono w redakcji: listopad 2016 r.*

*Przyjęto do druku: marzec 2017 r.*