

## Analiza zanieczyszczenia powietrza atmosferycznego na wybranym obszarze aglomeracji miejskiej

### Atmospheric air pollution analysis for a selected area of an urban agglomeration

Tadeusz Kwilosz

*Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy*

**STRESZCZENIE:** Jednym z ważniejszych problemów związanych ze stanem zdrowia ludzi oraz komfortem ich życia jest zanieczyszczenie powietrza atmosferycznego. Problem ten występuje zarówno w dużych aglomeracjach miejskich, jak i w małych miejscowościach. Szczególnie szkodliwe są czynniki zanieczyszczenia utrzymujące się na niskich wysokościach i emitowane przez różne źródła, takie jak: miejskie kotłownie, domowe piece opalane węglem i transport samochodowy. Ze względu na niską wysokość (do 40 m) utrzymywania się substancji szkodliwych w zanieczyszczonym powietrzu zagrażają one ludziom w sposób bezpośredni poprzez wdychane powietrze. Są one jedną z głównych przyczyn groźnych chorób układu oddechowego i układu krążenia. Emisja zanieczyszczeń charakteryzująca się wymienionymi cechami nosi nazwę niskiej emisji. Pojęcie to zostało zdefiniowane w następujący sposób: niska emisja – emisja produktów spalania paliw stałych, ciekłych i gazowych do atmosfery ze źródeł emisji (emiterów) znajdujących się na wysokości nie większej niż 40 m. Wyróżnia się emisję komunikacyjną, emisję wynikającą z produkcji ciepła dla potrzeb centralnego ogrzewania i ciepłej wody użytkowej oraz emisję przemysłową. Do produktów spalania wpływających na występowanie niskiej emisji zaliczyć można gazy: dwutlenek węgla  $\text{CO}_2$ , tlenek węgla  $\text{CO}$ , dwutlenek siarki  $\text{SO}_2$ , tlenki azotu  $\text{NO}_x$ , wielopierścieniowe węglowodory aromatyczne, np. benzo(a)piren oraz dioksyny, a także metale ciężkie (ołów, arsen, nikiel, kadm) i pyły zawieszane  $\text{PM}_{10}$ ,  $\text{PM}_{2,5}$ . Pyły zawieszane, będące przedmiotem badań pracy, występują w postaci aerozoli atmosferycznych, sklasyfikowanych ze względu na wielkość cząstek jako:  $\text{PM}_1$  – o wielkości cząstek do  $1 \mu\text{m}$ ,  $\text{PM}_{2,5}$  – o wielkości cząstek do  $2,5 \mu\text{m}$ ,  $\text{PM}_{10}$  – o wielkości cząstek do  $10 \mu\text{m}$ . Jedną z form kontroli niskiej emisji jest ciągłe monitorowanie zanieczyszczenia powietrza poprzez rozlokowane na terenach miejskich urządzenia pomiarowe – sensory. Rejestrowane wyniki pomiarów, wraz z przetworzonymi charakterystykami, prezentowane są na stronie internetowej pod adresem: <https://airly.eu/map/pl> poprzez portal Airly (Airly Sp. z o.o.). Portal ten udostępnia również, w postaci usługi sieciowej API, dane z wybranych punktów pomiarowych. Celem artykułu jest zaprezentowanie opracowanej metody lokalizacji najbardziej zanieczyszczonych obszarów na podstawie analizy wyników pomiarów zanieczyszczeń powietrza dla wybranego obszaru miejskiego zlokalizowanego w południowo-wschodniej części Polski (miasto Krosno). Analiza została wykonana pod kątem opisanego dynamiki zmian poziomu zanieczyszczenia w czasie oraz wyznaczenia przestrzennych rozkładów.

**Słowa kluczowe:** zanieczyszczenie powietrza, kriging, korelacja wieloraka.

**ABSTRACT:** One of the most important problems related to the human health and the comfort of their lives is air pollution. This problem occurs both in large urban agglomerations and in small towns. Low altitude pollutants emitted by various sources such as municipal boiler rooms, domestic coal-fired stoves and car transport are particularly harmful. Due to the low altitude of persistence of harmful substances in the polluted air (less than 40 m), they pose a direct threat to people through inhaled air. They are one of the main causes of serious respiratory and cardiovascular diseases. The emission of pollutants characterized by these features is called “low emissions”. This concept has been formally defined as follows: low emission — emission of combustion products of solid, liquid and gaseous fuels to the atmosphere from emission sources (emitters) located at an altitude of no more than 40 m. There are transportation/traffic emissions, emissions resulting from production of heat for central heating and domestic hot water, and industrial emissions. Combustion products contributing to the occurrence of low emissions include the following gases: carbon dioxide  $\text{CO}_2$ , carbon monoxide  $\text{CO}$ , sulfur dioxide  $\text{SO}_2$ , nitrogen oxides  $\text{NO}_x$ , polycyclic aromatic hydrocarbons, e.g. benzo(a)pyrene and dioxins, as well as heavy metals (lead, arsenic, nickel, cadmium) and suspended dusts  $\text{PM}_{10}$ ,  $\text{PM}_{2.5}$ . The suspended dusts, which are the subject of the research, are in the form of atmospheric aerosols classified according to the particle size as:  $\text{PM}_1$  – particle size up to  $1 \mu\text{m}$ ,  $\text{PM}_{2.5}$  — particle size up to  $2.5 \mu\text{m}$ ,  $\text{PM}_{10}$  — particle size up to  $10 \mu\text{m}$ . One of the forms of controlling low emissions is the continuous monitoring of air pollution through measuring devices — sensors located in urban areas. The recorded measurement results, along with the processed characteristics, are presented on the website at: <https://airly.eu/map/pl> (Airly Sp. z o.o.). This portal also provides data from selected measurement points in the form of a Web API service. The aim of the article is to present the development a method for identification

Autor do korespondencji: T. Kwilosz, e-mail: [tadeusz.kwilosz@inig.pl](mailto:tadeusz.kwilosz@inig.pl)

Artykuł nadesłano do Redakcji: 18.02.2021 r. Zatwierdzono do druku: 22.09.2021 r.

the most polluted areas based on the analysis of the results of air pollution measurements for a selected urban area located in the south-eastern part of Poland (Krosno city). The analysis was performed to describe the dynamics of changes in the pollution level over time and to determine their spatial distribution.

Key words: air pollution, kriging, multiple correlation.

**Wstęp**

Niska emisja rozumiana jest jako emisja pyłów i gazów unoszących się w powietrzu atmosferycznym na wysokości do 40 m; jest ona przyczyną podstawowych problemów zdrowotnych związanych z oddziaływaniem środowiskowych czynników szkodliwych na organizm (Zajusz-Zubek et al., 2015). Wymienione pyły i gazy pochodzą głównie ze spalania węgla (w szczególności miału węglowego) oraz złej jakości drewna (drewna zawilgoconego) w domowych piecach i kotłowniach, w których spalanie odbywa się w nieefektywny sposób (Juda-Rezler, 2006; Klejnowski et al., 2012; Kaleta, 2014; Bruce et al., 2015; Degórska, 2016). Do najważniejszych czynników stanowiących zagrożenie zdrowia i życia ludzi należą: SO<sub>2</sub>, tlenki azotu NO<sub>x</sub> i pyły zawieszane PM10 i PM2,5 (Kaczmarczyk, 2015). Kolejnym czynnikiem wpływającym na toksyczność niskiej emisji jest zła sprawność techniczna urządzeń grzewczych i przewodów kominowych.

Jednym z elementów pozwalających na prowadzenie przyszłych działań zmierzających do ograniczenia tego szkodliwego zjawiska jest ciągle monitorowanie poziomu zanieczyszczeń oraz wykonywanie, na podstawie uzyskanych wyników pomiarów, analiz służących do identyfikacji najbardziej niebezpiecznych źródeł zanieczyszczeń.

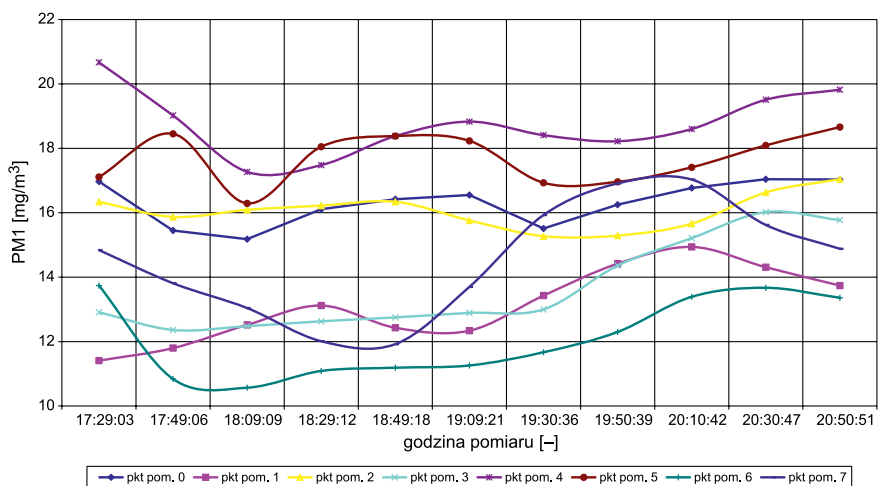
**Dane pomiarowe**

Dane zawierające wyniki pomiarów zanieczyszczenia zostały zaimportowane przy wykorzystaniu usługi sieciowej (ang. *web service*) (Airly, 2020), natomiast dane dotyczące czynników pogodowych występujących na badanym obszarze i skorelowanych czasowo z danymi o zanieczyszczeniach zostały zaimportowane przy wykorzystaniu usługi sieciowej *OpenWeatherMap*. Dane pobrano w dniu 5.12.2020 r. w godzinach 17<sup>30</sup>–20<sup>50</sup>. Serwis Airly udostępnia, poprzez mechanizm

API, dane dotyczące pomiarów stężenia aerozoli atmosferycznych klasyfikowanych jako: PM1, PM2,5 oraz PM10 i takie dane zostały poddane analizie.

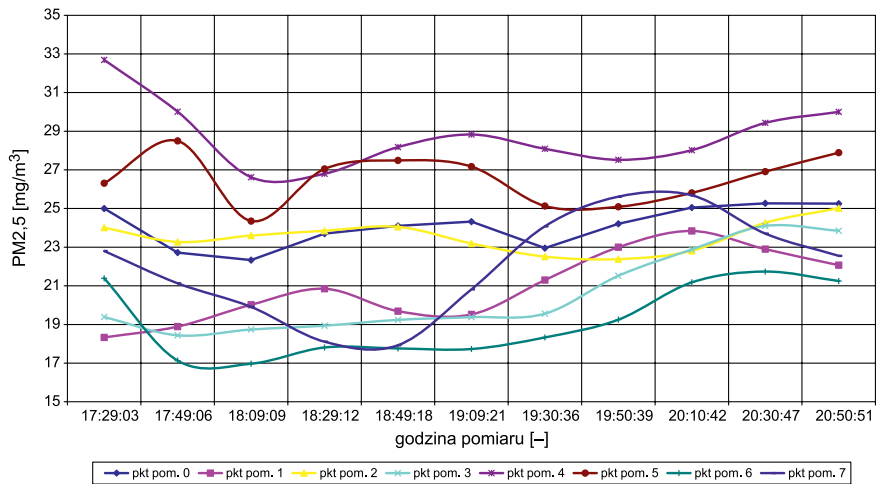
W badanym obszarze miejskim zlokalizowanych jest 14 punktów pomiarowych. Portal Airly stosuje ograniczenie do 100 odczytów na dobę, zawierających wyniki pomiarów, które można zaimportować w sposób automatyczny. Chcąc pobrać serię pomiarów z okresu 4 godzin odczytywanych co 20 minut, ograniczono się do 8 punktów pomiarowych zlokalizowanych w zwartej zabudowie centrum miasta.

Poszczególnym punktom pomiarowym nadano numery – od punktu 0 do punktu 7 (rys. 1–3).



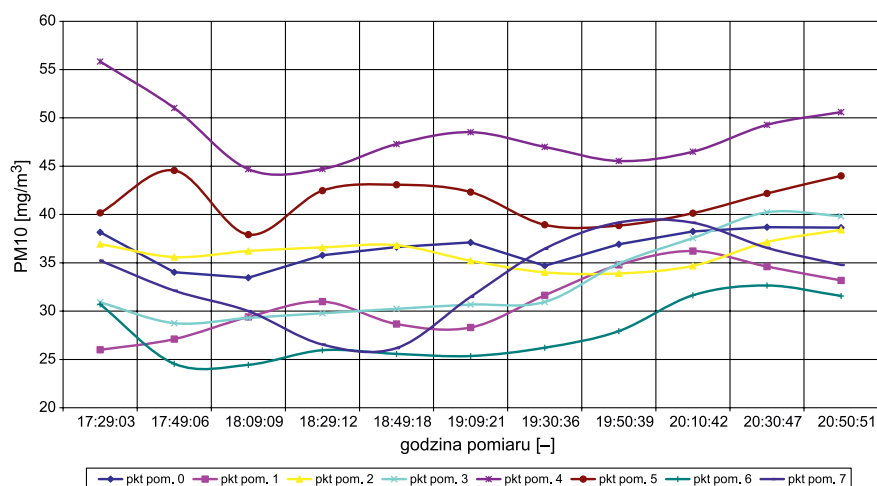
Rys. 1. Wyniki pomiarów dla PM1

Fig. 1. Measurement results for PM1



Rys. 2. Wyniki pomiarów dla PM2,5

Fig. 2. Measurement results for PM2.5



Rys. 3. Wyniki pomiarów dla PM10

Fig. 3. Measurement results for PM10

### Analiza wariogramów

Podstawowym narzędziem służącym do analizy przestrzennej struktury danych jest wariogram (Journel, 1989; Pebesma, 2004; Oh i Hwang, 2015). Wartości wariogramu wyrażają statystyczną zmienność przestrzennej zmiennej losowej  $Z(x, y)$  odpowiadającej danym pomiarowym. Definicja wariogramu korzysta z założenia o lokalnej stacjonarności drugiego rzędu (Isaaks i Srivastava, 1989; Zawadzki et al., 2005; Zawadzki, 2011; Oliver i Webster, 2015) tj.:

- wartość oczekiwana zmiennej  $Z$  nie zależy od położenia  $E[Z(x, y)] = \text{const}$ ;
- wariancja zmiennej  $[Z(x + dx, y + dy) - Z(x, y)]$  jest skończona i zależy jedynie od wielkości  $(dx, dy)$ :  $\text{var}[Z(x + dx, y + dy) - Z(x, y)] = 2\gamma(h)$ ,  
gdzie  $h$  – długość wektora  $[dx, dy]$ .

Te wielkości rozkładu przestrzennej zmiennej  $Z$  pozwalają na zdefiniowanie wariogramu eksperymentalnego.

$$\gamma(h) = 1/2E[(Z(x + dx, y + dy) - Z(x, y))^2] \quad (1)$$

Na podstawie serii danych pomiarowych dokonuje się dopasowania wariogramu teoretycznego do wariogramu eksperymentalnego. Na użytek tego artykułu wykorzystano pojedynczy model sferyczny opisany wzorem:

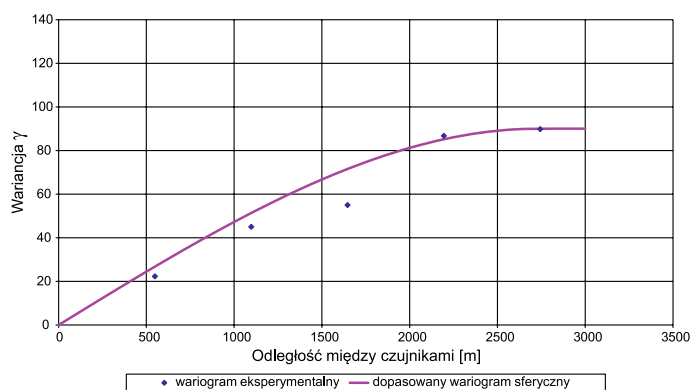
$$\gamma(r) = \begin{cases} b \left[ \frac{2r}{2a} - \frac{1}{2} \left( \frac{r}{a} \right)^3 \right] & \text{dla } r \leq a \\ b & \text{dla } r > a \end{cases} \quad (2)$$

gdzie:

- $a$  – zasięg korelacji (oddziaływania punktów pomiarowych),
- $b$  – wariancja progowa,
- $r$  – odległość między punktami pomiarowymi.

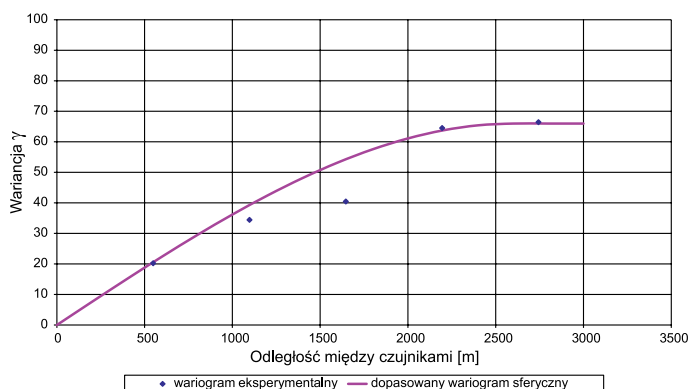
Zaimportowane wyniki pomiarów, pochodzące z 8 punktów pomiarowych (sensorów), rejestrowane były w 20-minutowych odstępach czasowych (krok czasowy). Łącznie zarejestrowano 11 serii pomiarowych (utożsamianych z 11 krokami czasowymi).

Dokonano dopasowania wariogramu teoretycznego do danych eksperymentalnych pomiarów PM1, PM2,5 i PM10 dla wszystkich 11 kroków czasowych. Przykład takiego dopasowania zobrazowano na rysunkach 4 i 5. Założono, że miarą szybkości rozprzestrzeniania się emitowanych zanieczyszczeń są wielkości wyliczonych (za pomocą analizy wariograficznej) zasięgów korelacji.



Rys. 4. Wariogram dla PM10 – krok czasowy nr 8

Fig. 4. Variogram for PM10 – time step 8



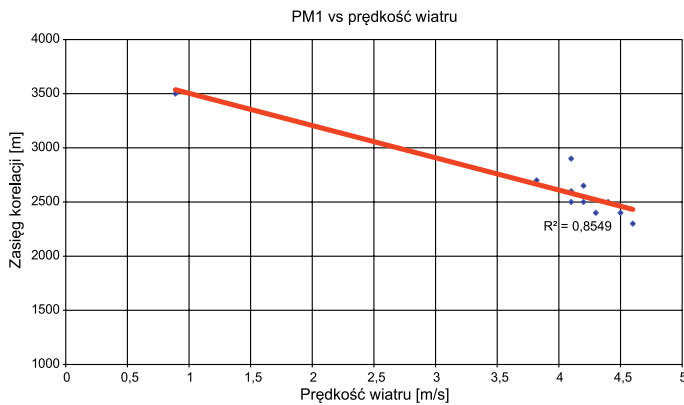
Rys. 5. Wariogram dla PM10 – krok czasowy nr 9

Fig. 5. Variogram for PM10 – time step 9

Uzyskane (w kolejnych 11 krokach czasowych) wartości zasięgów korelacji posłużyły do zbadania, jak szybko rozprzestrzeniają się zanieczyszczenia emitowane przez poszczególne źródła. Postawiono hipotezę, że prędkości wiatru zmierzone dla całego obszaru w odpowiadających pomiarom krokach czasowych, mają wpływ na rozprzestrzenianie się zanieczyszczeń i w związku z tym są skorelowane z odpowiadającymi im wartościami zasięgów korelacji. W celu obalenia lub potwier-

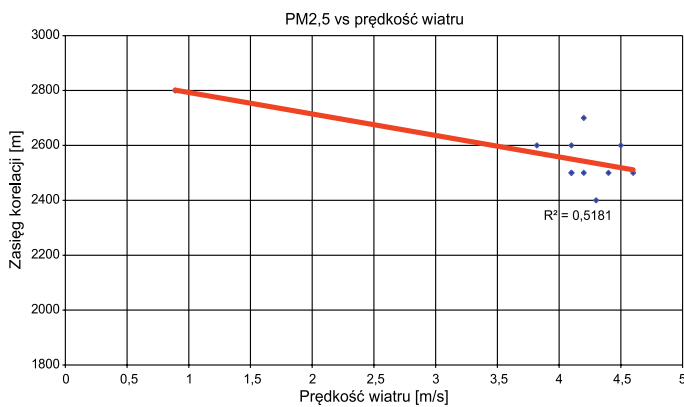
dzienia tej hipotezy posłużono się wyliczonymi współczynnikami korelacji Pearsona (Ebel et al., 1997; Granier et al., 2004; Bieser et al., 2011; Hławiczka et al., 2011). Ich analiza wskazuje, że dla zanotowanych w czasie badania prędkości wiatru

(do 4,6 m/s) występuje pomiędzy badanymi wielkościami, według klasyfikacji Guilforda (1965), korelacja wysoka ( $R^2 = 0,518$  – rys. 7 i  $R^2 = 0,660$  – rys. 8) oraz korelacja bardzo wysoka ( $R^2 = 0,854$  – rys. 6).



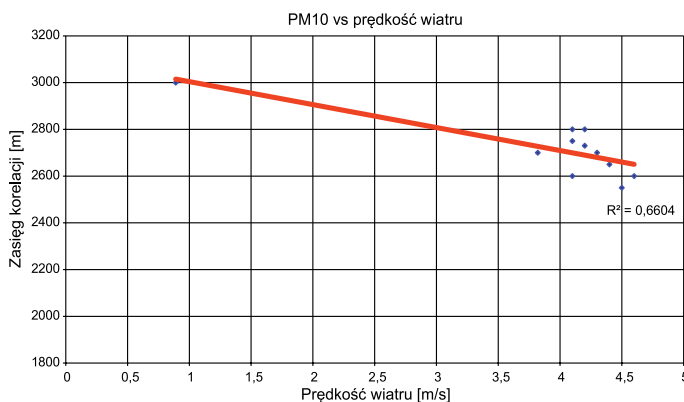
**Rys. 6.** Dopasowanie wartości zasięgów korelacji wyliczonych dla pomiarów PM1 w 11 krokach czasowych do prędkości wiatru zmierzonych w tych samych krokach czasowych

**Fig. 6.** Fitting the values of the correlation ranges calculated for the PM1 measurements in 11 time steps to the wind speed measured in the same time steps



**Rys. 7.** Dopasowanie wartości zasięgów korelacji wyliczonych dla pomiarów PM2,5 w 11 krokach czasowych do prędkości wiatru zmierzonych w tych samych krokach czasowych

**Fig. 7.** Fitting the values of the correlation ranges calculated for the PM2.5 measurements in 11 time steps to the wind speed measured in the same time steps



**Rys. 8.** Dopasowanie wartości zasięgów korelacji wyliczonych dla pomiarów PM10 w 11 krokach czasowych do prędkości wiatru zmierzonych w tych samych krokach czasowych

**Fig. 8.** Fitting the values of the correlation ranges calculated for the PM10 measurements in 11 time steps to the wind speed measured in the same time steps

**Przestrzenne rozkłady badanych parametrów**

W celu wygenerowania przestrzennych rozkładów badanych parametrów użyto metody krigingu zwykłego (Journel, 1989; Deutsch, 2002; Caineta, 2010). Zastosowanie tej metody wiąże się z występowaniem efektu wygładzania, polegającego na przeszacowaniu niskich i niedoszacowaniu wysokich wartości parametrów w węzłach sieci interpolacyjnej. Mimo to jednak

należy uznać, że jest to metoda opierająca się na założeniu minimalizacji estymatora  $\sigma^2(x)$  przy respektowaniu warunku nieobciążenia estymatora.

Kriging jest metodą liniowej interpolacji ważonej pomiędzy danymi kontrolnymi, której wagi spełniają warunek minimalizacji błędu interpolacyjnego. Niech  $\{(x_i, y_i)\}_{i=1, \dots, N} = \{\mathbf{r}\}_{i=1, \dots, N}$  oznacza współrzędne  $N$  punktów, w których znane są wartości parametrów i niech  $\{Z\}_{i=1, \dots, N}$  oznaczają te wartości. Niech



wymieniony rozkład opisany jest wariogramem  $\gamma(\mathbf{r})$ . Wówczas wartość parametru  $Z(\mathbf{r}_0)$  w dowolnym punkcie  $\mathbf{r}_0$  pochodząca od rozkładu statystycznego wyraża się wzorem:

$$Z(\mathbf{r}_0) = \sum_{i=1}^N \lambda_i(\mathbf{r}_0)(Z)_i \quad (3)$$

gdzie:

$\lambda_i$  – jest rozwiązaniem układu  $N + 1$  równań

$$(A)(\lambda) = (\gamma_0)$$

gdzie:

$(A)$  – oznacza macierz  $(N + 1) \times (N + 1)$  elementów taką, że:

$$(A)_{ii} = 0 \quad i = 1 \dots N + 1$$

$$(A)_{ij} = \gamma(\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j) \quad i \neq j \quad i, j = 1 \dots N$$

$$(A)_{N+1,i} = (A)_{i,N+1} = 1 \quad i = 1 \dots N$$

$(\gamma_0)$  – oznacza  $(N + 1)$ -elementowy wektor stałych

$$(\gamma_0)_i = \gamma(\mathbf{r}_0 - \mathbf{r}_i) \quad i = 1 \dots N$$

$$(\gamma_0)_{N+1} = 1$$

$(\lambda)$  – oznacza  $(N + 1)$ -elementowy wektor rozwiązań  $\lambda_i(\mathbf{r}_0)$

$$(\lambda)_i = \lambda_i(\mathbf{r}_0) \quad \text{dla } i = 1 \dots N$$

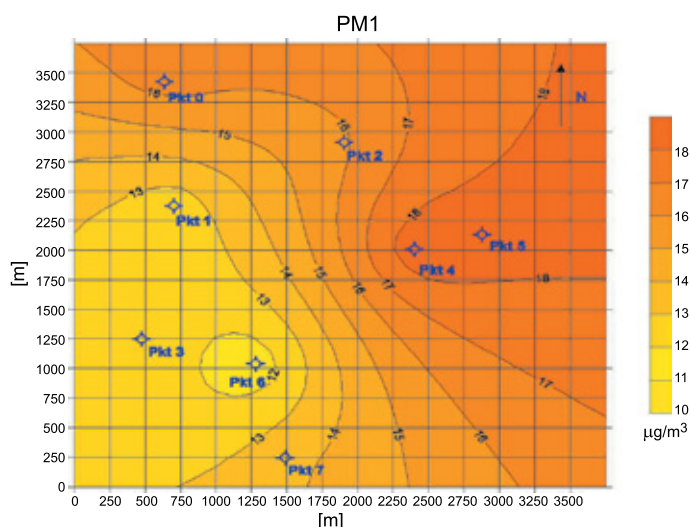
$(\lambda)_{n+1} = \mu$  dodatkowa niewiadoma

(mnożnik Lagrange'a).

$Z$  powyższego przedstawienia widać, jaka jest zależność generowanej wartości  $Z$  od parametrów rozkładu. Zależność ta obejmuje:

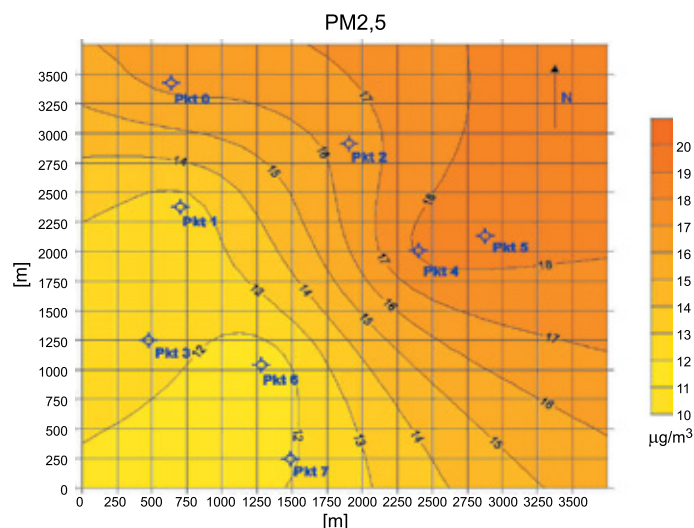
- parametry charakteryzujące wariogram  $\gamma(\mathbf{r})$  (typowo 2–4 parametry);
- położenia punktów i wartości pomiarowe w tych punktach (traktowane jako wielkości znane i niezmienne).

Ponieważ kriging jest liniową kombinacją danych kontrolnych, to jego wyniki zachowują rozkład normalny, o ile dane te posiadają taką własność.



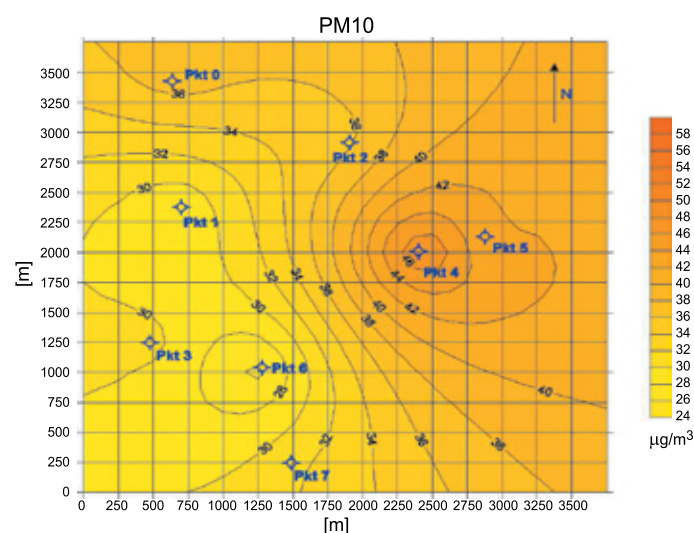
**Rys. 9.** Rozkład przestrzenny stężenia pyłów PM1 [ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ] – krok czasowy 6

**Fig. 9.** Spatial distribution of PM1 [ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ] dust concentration – time step 6



**Rys. 10.** Rozkład przestrzenny stężenia pyłów PM2,5 [ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ] – krok czasowy 6

**Fig. 10.** Spatial distribution of PM2,5 [ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ] dust concentration – time step 6



**Rys. 11.** Rozkład przestrzenny stężenia pyłów PM10 [ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ] – krok czasowy 6

**Fig. 11.** Spatial distribution of PM10 [ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ] dust concentration – time step 6

Przy zastosowaniu krigingu sporządzono mapy przestrzennych rozkładów PM1, PM2,5 i PM10 dla wszystkich 11 kroków czasowych. Przykładowe mapy rozkładów pokazano na rysunkach 9–11. Prezentowane rozkłady zostały wybrane w taki sposób, aby zademonstrować najbardziej reprezentatywne i wyraziste wyniki analiz spośród przebadanych przypadków, dotyczących wszystkich kroków czasowych. Na podstawie uzyskanych wyników dla prezentowanego kroku czasowego numer 6 można stwierdzić, że największy poziom zanieczyszczeń rejestrowany jest w obszarze północno-wschodnim opomiarowanym przez czujniki zainstalowane w punktach: 5, 4 oraz 2. Zarejestrowany w czasie badania kierunek wiatru (mierzony azymutem do N) zmieniał się

w zakresie 90–185° (głównie 142°), co wskazuje na wiatr z kierunku południowo-wschodniego.

Można z tego wywnioskować, że w okolicach punktów o numerach: 5, 4 oraz 2 znajdują się źródła emitujące zanieczyszczenia o najwyższych stężeniach i wiatr (o prędkościach mierzonych w czasie pomiarów) nie odgrywał istotnego znaczenia lub w rejonie południowo-wschodnim, nieobjętym pomiarem, zlokalizowane są źródła o wysokim poziomie emisji zanieczyszczeń.

W celu wykonania przestrzennych rozkładów mierzonych parametrów dokonano transformacji współrzędnych geograficznych punktów pomiarowych do współrzędnych modelu obejmującego obszar o rzeczywistych rozmiarach 3750 m × 3750 m.

### Korelacja wieloraka

Podczas badań środowiskowych, jak badanie natężenia wibracji czy hałasu, czujniki pomiarowe ustawia się w pobliżu źródeł takich jak silniki pompy itp. oraz w z góry określonych miejscach wypełniających obszar objęty pomiarem. W opisywanym przypadku urządzenia pomiarowe rozlokowano przypadkowo (na dachach budynków), niezależnie od potencjalnych źródeł zanieczyszczeń. Z tego względu na podstawie odczytu samych wyników nie można stwierdzić, w jakich obszarach źródła te są zlokalizowane. Pewnej informacji dostarcza analiza przestrzennych rozkładów – prezentowana w poprzednim rozdziale. Dotyczy ona jednak rozkładu zanieczyszczeń opisanych w każdym z kroków czasowych oddzielnie. W poprzednim rozdziale zaprezentowano wyniki dotyczące 6. kroku czasowego. Aby dokonać bardziej pogłębionej analizy tego zjawiska, polegającej na uwzględnianiu zmian poziomu zanieczyszczeń w poszczególnych krokach czasowych, posłużono się metodą korelacji wielorakiej. W tym celu połączono na mapie odcinkami punkty pomiarowe, tworząc siatkę obszarów podzielonych na trójkąty (analogicznie jak siatka triangulacyjna w geodezji). Otrzymano w ten sposób 9 obszarów wyznaczonych przez trójki punktów pomiarowych. Uzyskany w ten sposób rozkład obszarów zobrazowano na rysunkach 12–14. Podziału tego dokonano w celu próby zbadania, w którym z wyznaczonych obszarów znajdują się źródła zanieczyszczeń mające największy wpływ na odczyty rejestrowane w poszczególnych punktach pomiarowych. Przyjęto założenie, że jeśli dla danej pary punktów pomiarowych występuje istotna korelacja w dynamice zmian odczytów w czasie (utożsamianym z godzinami rejestrowanymi w kolejnych krokach czasowych), to na wartość pomiarów mierzonych w tych punktach istotny wpływ mają te same źródła zanieczyszczeń. Poprzez dynamikę zmian odczytów dla danego punktu pomiarowego w czasie należy rozumieć

obserwowany charakter zmienności odczytów wartości mierzonego parametru w poszczególnych krokach czasowych. Istotne jest, aby zbadać, czy dla poszczególnych par, a następnie trójek punktów pomiarowych występuje podobieństwo zmian wartości odczytów w odpowiadających sobie krokach czasowych. Aby określić wartość siły wzajemnej korelacji trójek punktów pomiarowych definiującej dany obszar, posłużono się miarą korelacji wielorakiej.

Korelacja wieloraka jest miarą związku jednej cechy z kilkoma ujętymi łącznie. W rozpatrywanym przypadku wyliczono, jaka jest siła korelacji danych reprezentujących każdy punkt pomiarowy (opisany przez serię danych odczytanych dla wszystkich kroków czasowych) z danymi (dotyczącymi odpowiadających sobie kroków czasowych) z dwóch pozostałych punktów każdego regionu. W ogólnym przypadku wzór na współczynnik korelacji wielorakiej ma postać:

$$R_{1,23\dots k} = \sqrt{1 - \frac{\det D}{\det R}} \quad (4)$$

gdzie:

- $R_{1,23\dots k}$  – współczynnik korelacji wielorakiej pomiędzy zmienną 1, a pozostałymi zmiennymi od 2 do  $k$ ,
- $\det D$  – wyznacznik macierzy korelacji zmiennych od 2 do  $k$  ze zmienną 1,
- $\det R$  – wyznacznik macierzy korelacji zmiennych od 2 do  $k$ .

W przypadku trzech zmiennych wzór na współczynnik korelacji zmiennej 1 ze zmiennymi 2 i 3 przyjmuje postać:

$$R_{1,23} = \sqrt{1 - \frac{r_{12}^2 + r_{13}^2 - 2 \cdot r_{12} \cdot r_{13} \cdot r_{23}}{1 - r_{23}^2}} \quad (5)$$

gdzie:

$r_{ij}$  – jest współczynnikiem korelacji zmiennej  $i$  ze zmienną  $j$ .

Wyliczone współczynniki korelacji wielorakiej dla 9 obszarów pomiarów PM1, PM2,5 i PM10 zamieszczono w tabelach 1–3. Rozkład obszarów wymienionych w cytowanych tabelach wraz z zaznaczonymi punktami pomiarowymi został zaprezentowany na rysunkach 12–14.

Wybór regionów mających największy wpływ na wartości odczytów w punktach pomiarowych przebiega według następującego schematu:

1. Wybierany jest region zdefiniowany przez punkty pomiarowe  $x$ ,  $y$  i  $z$ .
2. Wyliczane są współczynniki korelacji wielorakiej  $R_{x,yz}$ ,  $R_{y,xz}$  i  $R_{z,xy}$ .
3. W narożniku każdego trójkąta (obszaru) oznaczonego numerem danego punktu pomiarowego wpisywana jest wartość współczynnika korelacji zmiennej reprezentującej ten punkt z pozostałymi dwoma zmiennymi reprezentującymi kolejne punkty tego trójkąta (obszaru).

**Tabela 1.** Współczynniki korelacji wielorakiej dla PM1**Table 1.** Multiple correlation coefficients for PM1

Numer obszaru	Numery punktów pomiarowych			Współczynniki korelacji wielorakiej dla PM1		
	$x$	$y$	$z$	$R_{x,yz}$	$R_{y,xz}$	$R_{z,xy}$
1	0	1	2	0,631	0,451	0,595
2	1	2	4	0,196	0,436	0,447
3	2	4	5	0,586	0,448	0,530
4	1	4	6	0,873	0,931	0,942
5	1	3	6	0,843	0,929	0,842
6	3	6	7	0,804	0,814	0,691
7	4	6	7	0,770	0,863	0,706
8	0	1	3	0,783	0,855	0,917
9	4	5	7	0,563	0,562	0,562

**Tabela 2.** Współczynniki korelacji wielorakiej dla PM2,5**Table 2.** Multiple correlation coefficients for PM2.5

Numer obszaru	Numery punktów pomiarowych			Współczynniki korelacji wielorakiej dla PM2,5		
	$x$	$y$	$z$	$R_{x,yz}$	$R_{y,xz}$	$R_{z,xy}$
1	0	1	2	0,644	0,569	0,561
2	1	2	4	0,388	0,392	0,504
3	2	4	5	0,564	0,476	0,593
4	1	4	6	0,928	0,931	0,940
5	1	3	6	0,855	0,939	0,863
6	3	6	7	0,830	0,837	0,657
7	4	6	7	0,562	0,758	0,655
8	0	1	3	0,822	0,860	0,930
9	4	5	7	0,597	0,653	0,565

**Tabela 3.** Współczynniki korelacji wielorakiej dla PM10**Table 3.** Multiple correlation coefficients for PM10

Numer obszaru	Numery punktów pomiarowych			Współczynniki korelacji wielorakiej dla PM10		
	$x$	$y$	$z$	$R_{x,yz}$	$R_{y,xz}$	$R_{z,xy}$
1	0	1	2	0,610	0,563	0,523
2	1	2	4	0,470	0,417	0,571
3	2	4	5	0,595	0,441	0,559
4	1	4	6	0,945	0,932	0,941
5	1	3	6	0,838	0,948	0,903
6	3	6	7	0,881	0,886	0,659
7	4	6	7	0,406	0,702	0,649
8	0	1	3	0,826	0,846	0,926
9	4	5	7	0,502	0,580	0,524

4. Po wykonaniu pkt 1–3 dla wszystkich obszarów porównywane są wartości wpisanych współczynników korelacji w sąsiadujących ze sobą obszarach. Jeśli w dwóch sąsiadujących obszarach wartości współczynników korelacji się różnią, to na boku wspólnym dwóch trójkątów

rysowana jest symboliczna strzałka skierowana od obszaru o niższym współczynniku korelacji do sąsiedniego obszaru. Możliwa jest sytuacja, z której wynika, że dwie pary wyników przypisanych sąsiadującym obszarom i dotyczących danego punktu pomiarowego wskazują na inny

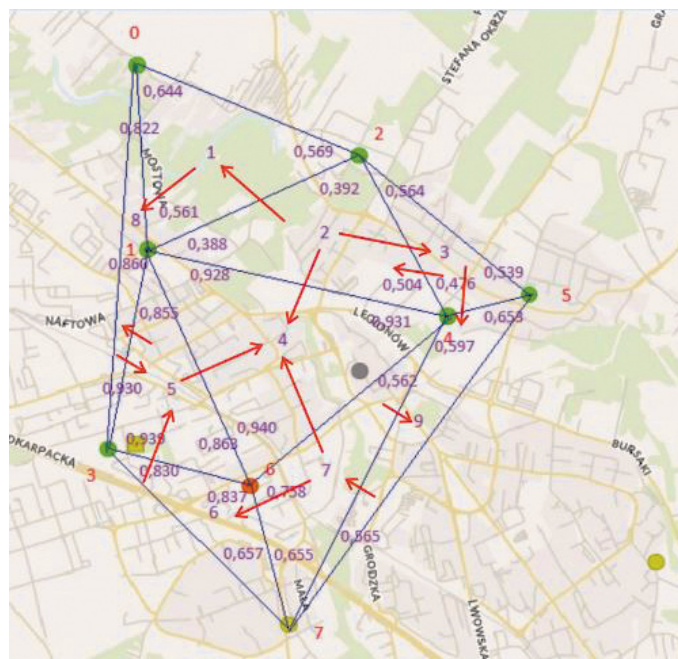


zwrot strzałki niż w przypadku innej pary wyników, przypisanych do tych samych obszarów, ale dotyczących innego punktu pomiarowego. W takiej sytuacji na boku wspólnych trójkątów rysowane są dwie strzałki o przeciwnych zwrotach.

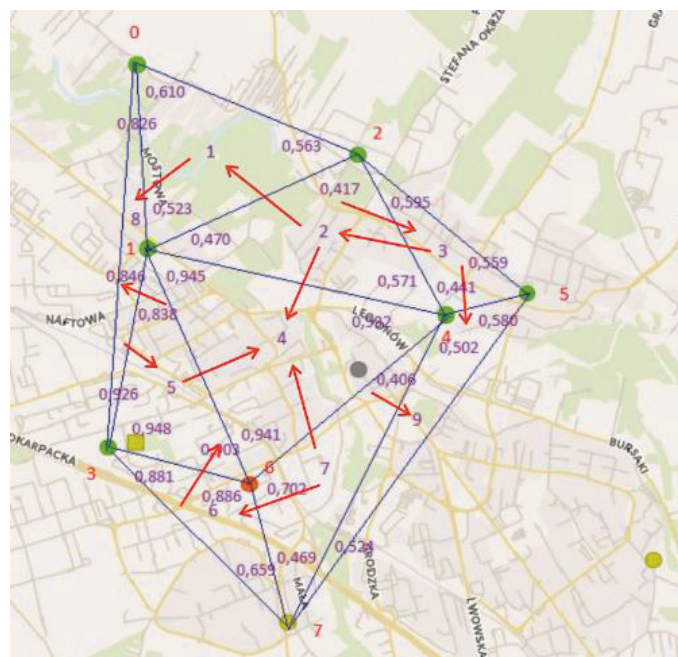
- Po wykonaniu całej procedury wybierane są obszary, do których wnętrza skierowane są strzałki. Wnioskuje się, że w tych obszarach zlokalizowane są źródła emisji, które w największym stopniu odpowiadają za wartości odczytów w punktach zlokalizowanych w wierzchołkach obszarów. W przypadku dwóch strzałek o przeciwnych zwrotach priorytet (co do interpretacji źródeł emisji) ma strzałka opisująca większą bezwzględną różnicę wartości współczynników korelacji.

Opisana powyżej procedura jest pomysłem autora artykułu. Wyniki tej procedury zaprezentowano na rysunkach 12–14.

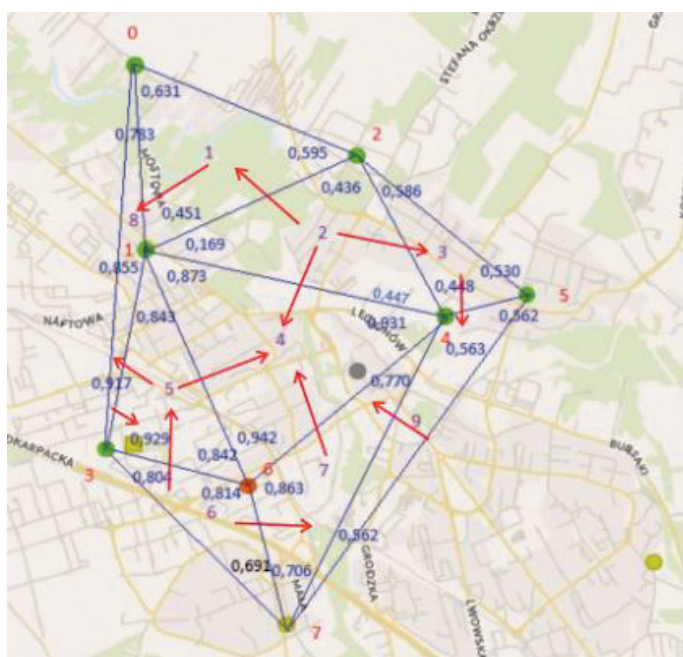
Z analizy uzyskanych rezultatów wynika, że we wszystkich przypadkach (PM1; PM2,5; PM10) obszar nr 4 wyróżnia się większymi współczynnikami korelacji wielorakiej w porównaniu z obszarami z nim sąsiadującymi. Wszystkie strzałki są zwrócone do wnętrza tego obszaru. Można zatem wnioskować, że w obszarze tym zlokalizowane są źródła o największym poziomie emisji pyłów do atmosfery. Formułowanie wniosków dotyczących bardziej szczegółowych wyników wymaga kontynuacji badań oraz zastosowania szerszego wachlarza zaawansowanych metod geostatystycznych, jak symulacje warunkowe itp. (Vann et al., 2002; Nowak i Verly, 2005; Webster i Oliver, 2007; Manchuk i Deutsch, 2012).



**Rys. 13.** Podział rejonu badań na obszary ze wskazaniem miejsc o najwyższych poziomach emisji zanieczyszczeń dla pyłów PM2,5  
**Fig. 13.** Division of the research area into areas with the indication of places with the highest levels of pollutant emissions for PM2.5



**Rys. 14.** Podział rejonu badań na obszary ze wskazaniem miejsc o najwyższych poziomach emisji zanieczyszczeń dla pyłów PM10  
**Fig. 14.** Division of the research area into areas with the indication of places with the highest levels of pollutant emissions for PM10



**Rys. 12.** Podział rejonu badań na obszary ze wskazaniem miejsc o najwyższych poziomach emisji zanieczyszczeń dla pyłów PM1  
**Fig. 12.** Division of the research area into areas with the indication of places with the highest levels of pollutant emissions for PM1

### Wnioski

- W celu opracowania i przetestowania metod lokalizacji obszarów aglomeracji miejskiej, w których zlokalizowane są źródła zanieczyszczeń powietrza o największym poziomie



- emisji, wykorzystano dwie metody analizy danych: (i) generowania przestrzennych rozkładów badanych parametrów metodą krigingu oraz (ii) korelacji wielorakiej.
- Zastosowana metoda krigingu pozwoliła na zobrazowanie przestrzennego rozkładu poziomu zanieczyszczeń na badanym obszarze w odniesieniu do każdego kroku czasowego oddzielnie. Ograniczenie tej metody polega na tym, że każdy analizowany rozkład jest, w pewnym sensie, fotografią opisującą jeden punkt czasowy. Dodatkowe utrudnienie w interpretacji uzyskanych wyników stanowi fakt, że metoda krigingu „traktuje” punkty pomiarowe jak źródła emisji zanieczyszczeń, co nie jest zgodne ze stanem faktycznym.
  - Metoda korelacji wielorakiej, będąca pomysłem autorskim, usuwa pewne ograniczenia krigingu. Uwzględnia wyniki pomiarów wykonanych we wszystkich krokach czasowych równocześnie i wskazuje obszary, w których mogą być zlokalizowane źródła generujące największe zanieczyszczenia powietrza.
  - Dokonano próby zbadania, w jaki sposób prędkość i kierunek wiatru wpływają na rozprzestrzenianie się zanieczyszczeń. W tym celu wyznaczono siłę korelacji prędkości wiatru z tym, jak mierzone wartości badanych parametrów w punktach pomiarowych wpływają na siebie wzajemnie. Miarę tej interferencji zinterpretowano jako zasięgi korelacji, wyznaczone dla każdego kroku czasowego i uzyskane przy zastosowaniu analizy wariograficznej. Pomimo otrzymania wyników świadczących o silnej korelacji badanych parametrów ( $R^2$  w zakresie 0,518–0,855) należy ostrożnie podchodzić do płynących stąd wniosków – ze względu na zbyt małą liczbę punktów pomiarowych i niewielkie zróżnicowanie zmierzonych prędkości wiatru.
  - Zasadna jest kontynuacja badań w tym zakresie, uwzględniająca większą liczbę pomiarów (kroków czasowych) zebranych z większej liczby punktów pomiarowych z uwzględnieniem analizy kierunków i siły wiatru.
  - Uzyskane wyniki i opracowane metody dają dobrą podstawę do prac związanych z wytworzeniem skomercjalizowanego narzędzia deweloperskiego – użytecznego dla jednostek samorządu terytorialnego.

Artykuł powstał na podstawie pracy statutowej pt. *System analizy dynamiki zmian zanieczyszczenia powietrza dla wybranego obszaru kraju* – praca INiG – PIB na zlecenie MNiSW; nr zlecenia: 0098/KP/2020, nr archiwalny: DK-4100-0086/2020.

## Literatura

- Airly <<https://airly.eu/map/pl>> (dostęp: 05.12.2020).
- Bieser J., Aulinger A., Matthias V., Quante M., Builtjes P., 2011. SMOKE for Europe – adaptation, modification and evaluation of a comprehensive emission model for Europe. *Geoscientific Model Development*, 4(1): 47–68. DOI: 10.5194/gmd-4-47-2011.
- Bruce N., Pope D., Rehfuess E., Balakrishnan K., Adair-Rohani H., Dora C., 2015. WHO indoor air quality guidelines on household fuel combustion: Strategy implications of new evidence on interventions and exposure-risk functions. *Atmospheric Environment*, 106: 451–457. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2014.08.064.
- Caineta J.A.R., 2010. Applying Spatial Bootstrap and Bayesian Update in uncertainty assessment at oil reservoir appraisal stages. *arXiv*: 1702.04450v1.
- Degórska A., 2016. Źródła emisji pyłu pierwotnego. [W:] Juda-Rezler K., Toczko B. (red.). *Pyły drobne w atmosferze. Kompendium wiedzy o zanieczyszczeniu powietrza pyłem zawieszonym w Polsce: 22–25. Główny Inspektorat Ochrony Środowiska, Warszawa*. ISBN 978-83-61227-73-1.
- Deutsch C.V., 2002. *Geostatistical Reservoir Modeling*. Oxford University Press, Oxford. ISBN 9780195138061.
- Ebel A., Friedrich R., Rodhe H., 1997. Transport and Chemical Transformation of Pollutants in the Troposphere Tropospheric Modelling and Emission Estimation. *Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg*. DOI: 10.1007/978-3-662-03470-5.
- Granier G., Artaxo P., Reeves C.E. (eds.), 2004. Emissions of Atmospheric Trace Compounds. *Kluwer Academic Publishers*. DOI: 10.1007/978-1-4020-2167-1.
- Guilford J.P., 1965. *Fundamental Statistics in Psychology and Education*. McGraw-Hill, New York.
- Hławiczka S., Kliś C., Cenowski M., Strzelecka-Jastrzab E., Długosz J., Bronder J., 2011. Nowe podejście do oceny niskiej emisji z ogrzewania mieszkań w kształtowaniu stężeń pyłu na obszarze gminy. I. Inwentaryzacja źródeł emisji i modelowanie emisji. *Ochrona Środowiska i Zasobów Naturalnych*, 47: 22–46. <<https://yadda.icm.edu.pl/yadda/element/bwmeta1.element.agro-7b7a122d-49d7-4790-ae81-7fb0aaa40d67>> (dostęp: 10.09.2021).
- Isaaks E.H., Srivastava R.M., 1989. *Applied Geostatistics*. Oxford University Press, New York. ISBN 978-0-19-505013-4.
- Journel A.G., 1989. *Fundamentals of Geostatistics in Five Lessons*. American Geophysical Union, Washington. <<https://www.nrc.gov/docs/ML0227/ML022770097.pdf>> (dostęp: 10.09.2021).
- Juda-Rezler K., 2006. Oddziaływanie zanieczyszczeń powietrza na środowisko. *Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej*. ISBN 83-7207-211-6.
- Kaczmarczyk M. (red.), 2015. *Niska emisja – od przyczyn występowania do sposobów eliminacji*. Geosystem Burek, Kotyza s.c., Kraków. ISBN 978-83-64339-02-8.
- Kaleta D., 2014. State of Air Pollution in Silesia Province Including Low Emission Sources. *Architecture Civil Engineering Environment Journal*, 7(4): 79–87. <<http://yadda.icm.edu.pl/yadda/element/bwmeta1.element.baztech-16fa6482-8031-4830-852c-c806b799354d>>(dostęp: 10.09.2021).
- Klejnowski K., Pastuszka J., Rogula-Kozłowska W., Talik E., Krasa A., 2012. Mass Size Distribution and Chemical Composition of the Surface Layer of Summer and Winter Airborne Particles in Zabrze, Poland. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 88: 255–259. DOI: 10.1007/s00128-011-0452-3.
- Manchuk J.G., Deutsch C.V., 2012. A flexible sequential Gaussian simulation program: USGSIM. *Computers & Geosciences*, 41: 208–216. DOI: 10.1016/j.cageo.2011.08.013.
- Nowak M., Verly G., 2005. The Practice of Sequential Gaussian Simulation. [W:] Leuangthong O., Deutsch C.V. (eds.). *Geostatistics Banff 2004. Quantitative Geology and Geostatistics*, vol. 14. Springer, Dordrecht. DOI: 10.1007/978-1-4020-3610-1\_39.
- Oh D.-R., Hwang C.S., 2015. A Comparative Study on the Spatial Statistical Models for the Estimation of Population Distribution. *Journal of the Korean Society of Surveying, Geodesy,*

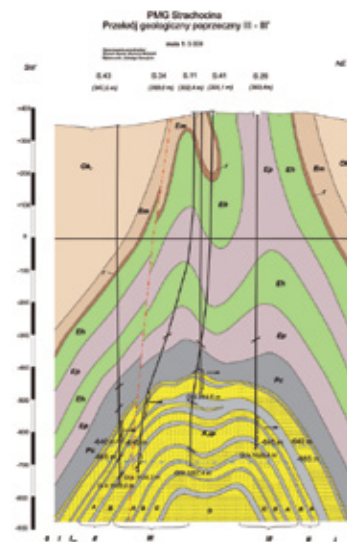
- Photogrammetry and Cartography*, 3(3): 145–153. DOI: 10.7848/ksgpc.2015.33.3.145.
- Oliver M., Webster R., 2015. Basic Steps in Geostatistics: The Variogram and Kriging. *Springer, Cham*. DOI: 10.1007/978-3-319-15865-5.
- Pebesma E., 2004. Multivariable geostatistics in S: the gstat package. *Computers & Geosciences*, 30(7): 683–691. DOI: 10.1016/j.cageo.2004.03.012.
- Vann J., Bertoli O., Jackson S., 2002. An overview of geostatistical simulation for quantifying risk. *Proceedings of the Geostatistical Association of Australasia Symposium „Quantifying Risk and Error”*.
- Webster R., Oliver M.-A., 2007. Geostatistics for Environmental Scientists. *John Wiley & Sons, Ltd, Chichester, England*. ISBN 978-0-470-02858-2.
- Zajusz-Zubek E., Mainka A., Korban Z., Pastuszka J.S., 2015. Evaluation of highly mobile fraction of trace elements in PM10 collected in Upper Silesia (Poland): Preliminary results. *Atmospheric Pollution Research*, 6(6): 961–968. DOI: 10.1016/j.apr.2015.05.001.
- Zawadzki J., 2011. Metody geostatystyczne dla kierunków przyrodniczych i technicznych. *Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa*. ISBN 978-83-7207-953-4.
- Zawadzki J., Cieszewski C.J., Zasada M., Lowe R.C., 2005. Applying geostatistics for investigations of forest ecosystems using remote sensing imagery. *Silva Fennica*, 39(4): 599–617. DOI: 10.14214/sf.369.



Dr Tadeusz KWIŁOSZ  
 Adiunkt w Zakładzie Podziemnego Magazynowania Gazu  
 Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy  
 ul. Lubicz 25A  
 31-503 Kraków  
 E-mail: [tadeusz.kwilosz@inig.pl](mailto:tadeusz.kwilosz@inig.pl)

## OFERTA BADAWCZA ZAKŁADU PODZIEMNEGO MAGAZYNOWANIA GAZU

- analiza struktur geologicznych złóż gazu ziemnego, ropy naftowej oraz obiektów zawodniomych, pod kątem możliwości ich przekształcenia w PMG;
- szczegółowa analiza warunków geologiczno-złożowych, ocena dotychczasowej eksploatacji złoża, warunków hydrodynamicznych, zdolności wydobywczych odwiertów;
- ocena stanu technicznego istniejącej infrastruktury w aspekcie jej wykorzystania w pracy PMG;
- wykonywanie cyfrowych modeli geologicznych PMG, złóż gazu ziemnego i ropy naftowej;
- wykonywanie projektów budowy PMG;
- analiza dotychczasowej pracy istniejących PMG w celu optymalizacji parametrów dalszej eksploatacji magazynów na bazie symulacji komputerowej;
- opracowanie projektów prac geologicznych, dotyczących poszukiwania i rozpoznawania złóż gazu ziemnego i ropy naftowej;
- opracowanie dokumentacji geologicznych złóż ropy naftowej i gazu ziemnego;
- opracowanie programu optymalnej eksploatacji złoża, wydajności poszczególnych odwiertów, tempa szczyrpywania itp.



Kierownik: mgr inż. Bogdan Filar Adres: ul. Armii Krajowej 3, 38-400 Krosno  
 Telefon: 13 436 89 41 w. 5202 Faks: 13 436 79 71 E-mail: [bogdan.filar@inig.pl](mailto:bogdan.filar@inig.pl)



INSTYTUT NAFTY I GAZU  
 – Państwowy Instytut Badawczy