

**Andrzej BRANDYK<sup>1</sup>, Grzegorz MAJEWSKI<sup>2</sup>, Laura PORRETTA<sup>1</sup>**

Katedra Inżynierii Wodnej i Rekultywacji Środowiska SGGW

Department of Hydraulic Engineering and Environmental Recultivation of WAU

<sup>1</sup>Zakład Hydrologii i Zasobów Wodnych, <sup>2</sup>Zakład Meteorologii i Klimatologii

<sup>1</sup>Subdepartment of Hydrology and Water Resources, <sup>2</sup>Subdepartment of Meteorology and Climatology

**Próba zastosowania metody krigingu do wykonania map izolinii stężenia pyłu zawieszonego PM10 dla rejonu aglomeracji warszawskiej**  
**Attempt of kriging method application for the creation of isoline maps of particulate matter PM10 concentration for Warsaw agglomeration**

**Słowa kluczowe:** pył zawieszony PM10, interpolacja, zmienność przestrzenna

**Key words:** particulate matter PM10, interpolation, spatial variability

### **Wprowadzenie**

Pomimo że jakość powietrza atmosferycznego w ostatnich latach uległa wyraźnej poprawie, to jednak zdarzają się „epizody”, podczas których wartości stężenia zanieczyszczeń wzrastają ponad dopuszczalne normy. Zanieczyszczeniem powszechnie występującym szczególnie w miastach i przekraczającym wartości stężenia dopuszczalnego jest pył zawieszony PM10 (frakcje o średnicy mniejszej niż 10  $\mu\text{m}$ ). Zanieczyszczenie to ciągle stanowi istotny, nierozwiązany problem w większości krajów

w Europie. Dodatkowo doniesienia o szkodliwości pyłu zawieszonego PM10 na przebieg ważnych funkcji życiowych organizmów żywych (w tym człowieka) wskazują na to zanieczyszczenie jako potencjalny czynnik zagrożenia zdrowotnego (Warych 1999, Harrison i in. 2000, WHO 2005).

Wielkość zapylenia powietrza jest w dużym stopniu kształtowana pod wpływem warunków meteorologicznych. Pewne typy pogody stwarzają warunki korzystne dla rozprzestrzeniania się zanieczyszczeń, natomiast inne sprzyjają ich stagnacji i koncentracji w pobliżu miejsca emisji.

Ze względu na ścisły wpływ pyłu zawieszonego PM10 na stan sanitarny powietrza atmosferycznego próba odzwierciedlenia rozkładu przestrzennego

wartości jego stężenia jest ważnym zagadnieniem w ocenie jakości powietrza atmosferycznego. Wykonane w niniejszej pracy orientacyjne mapy izolinii wartości stężenia pyłu zawieszonego PM10 mogą stanowić podstawę do sporządzenia wyżej wymienionej oceny poprzez określenie granic obszarów występowania danego zakresu wartości stężenia pyłu zawieszonego PM10.

## Material i metody

Dane pomiarowe wykorzystane w niniejszej pracy pochodziły z 11 stacji pomiarowych imisji pyłu zawieszonego PM10 z aglomeracji warszawskiej: MzWarszSGGW – ul. Nowoursynowska, MzWarszBernWoda – ul. Bernardyńska Woda, MzWarszZeganWSSE – ul. Żegańska, MzWarszBorKomWSSE – ul. Bora Komorowskiego, MzWarszKrucza – ul. Krucza, MzWarszZelazWSSE – ul. Żelazna, MzWarszAKrzWSSE – ul. Anieli Krzywoń, MzWarszUrsynów – ul. Wokalna, MzWarszNiepodlKom – al. Niepodległości, MzWarszBielany – ul. Tołstoja, MzWarszTarKondra – ul. Kondratowicza, oraz 4 stacji z rejonu aglomeracji warszawskiej: MzLegionZegIMGW – Legionowo (ul. Zegrzyńska), MzPiastowPulask – Piastów (ul. Puła-

skiego), MzOtwockBrzozWSSE – Otwock (ul. Brzozowskiego), MzPiaseczDworWSSE – Piaseczno (ul. Dworska). Dane zostały udostępnione przez WIOŚ w Warszawie.

Różnice w zmierzonych wartościach pyłu PM10 na stacjach w rejonie aglomeracji warszawskiej wynikały z odmiennych warunków meteorologicznych w analizowanych dobach (tab. 1 i 2). W tabeli 1 dodatkowo przedstawiona została wartość meteorologicznego wskaźnika WZ (Majewski i Przewoźniczuk 2006). Wskaźnik WZ daje możliwość przybliżonego opisu warunków dyspersji, ujmuje łączne wskaźniki cząstkowe, odniesione do różnych elementów meteorologicznych (temperatura powietrza, prędkość wiatru, występowanie niskiej warstwy inwersyjnej, opad atmosferyczny i ciśnienie atmosferyczne) – Walczewski (2000). Czym większa wartość obliczonego wskaźnika, tym większe prawdopodobieństwo wystąpienia podwyższonych wartości stężenia pyłu zawieszonego PM10.

W celu wykonania map przedstawiających izolinie rozkładu stężenia pyłu zawieszonego PM10 wykorzystano wartości dobowe stężenia pyłu zawieszonego, wyrażone w  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , zarejestrowane na wszystkich 15 stacjach pomiarowych (tab. 2).

TABELA 1. Warunki meteorologiczne w analizowanych dniach  
TABLE 1. Meteorological conditions in the analysed days

Data Date	WZ [-] WZ indicator	$T_{\text{sr}}$ [°C] Mean air temperature	$V_{\text{sr}}$ [m·s <sup>-1</sup> ] Mean wind speed	$f$ [%] Mean relative humidity	Dominujący kierunek wiatru w dobie Dominating wind speed direction
20.02.2005	5	-1,2	0,8	86,9	SW
21.02.2006	3	-2,0	1,2	87,2	NE
22.02.2006	2	-0,3	2,9	88,4	E

TABELA 2. Wartości stężeń pyłu zawieszonego PM10 w rozpatrywanych dniach  
 TABLE 2. Particulate matter concentration values in the analysed days

Nazwa stacji Station name	Numer Number	Wartości stężenia [ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ] Concentration values		
		20.02.2005	21.02.2006	22.02.2006
MzWarszSGGW	1	102,80	83,40	48,40
MzWarszUrsynow	8	81,10	63,20	35,80
MzWarszTarKondra	11	81,20	76,10	42,80
MzWarszNiepodlKom	9	96,50	74,20	39,70
MzWarszBernWoda	2	32,00	13,00	20,00
MzWarszKrucza	5	70,00	60,00	57,00
MzWarszBielany	10	88,20	82,10	51,10
MzWarszZeganWSSE	3	133,00	61,00	25,00
MzWarszBorKomWSSE	4	70,00	53,00	36,00
MzWarszZelazWSSE	6	75,00	50,00	24,00
MzWarszAKrzWSSE	7	71,00	37,00	22,00
MzPiaszowPulask	13	29,00	16,00	16,00
MzLegionZegrzIMGW	12	58,00	55,00	36,00
MzOtwockBrzozWSSE	14	100,00	75,00	30,00
MzPiaseczDworWSSE	15	95,00	60,00	21,00

Do konstrukcji izolinii stężenia pyłu zawieszonego PM10 wykorzystano metodę krigingu. Metoda ta składa się z dwóch etapów. Pierwszy etap polega na określeniu przestrzennej korelacji opisywanego zjawiska. Do opisanie takiej korelacji stosuje się najczęściej wariogram lub kowariancję (Cressie 1991). W drugim etapie na podstawie danych pomiarowych i wariogramu wykonywana jest interpolacja. Dokładność wariogramu silnie determinuje dokładność interpolacji. Ogólne równanie wariogramu eksperymentalnego ma postać:

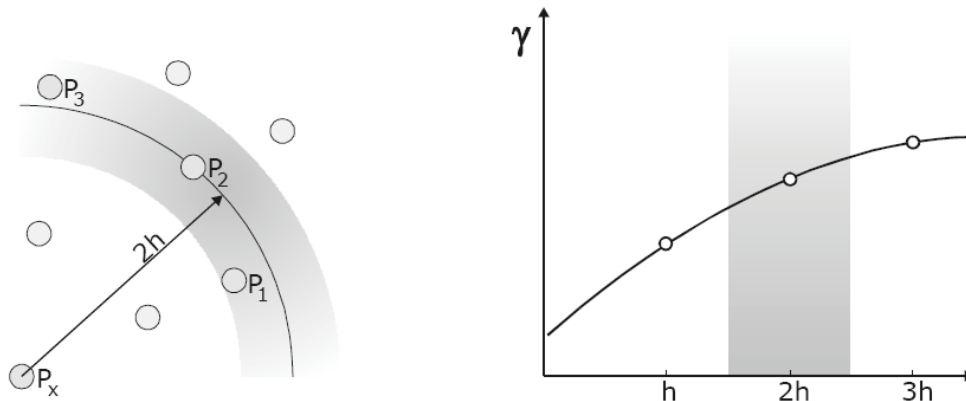
$$\gamma(h) = \frac{1}{2N_h} \sum_{i=1}^{N_h} (P_x - P_i)^2 \quad (1)$$

gdzie:

$\gamma(h)$  – wartość wariogramu dla dystansu  $h$ ,  
 $N_h$  – liczba par punktów dla dystansu  $h$ ,

$P_x$  – wielkość obserwowana w punkcie  $x$ ,  
 $P_i$  – wielkość obserwowana w punkcie  $i$ .

Wyznaczenie wartości wariogramu dla określonych dystansów (1 km, 2 km itd.) nie jest możliwe ze względu na nieregularne rozmieszczenie punktów pomiarowych. W tym celu definiuje się tolerancję dystansów, którą zwykle przyjmuje się jako połowę kroku pomiędzy kolejnymi dystansami (rys. 1). Wartość wariogramu dla dystansu  $2h$  obliczana jest ze wzoru (1), w którym uwzględnia się wszystkie punkty z zakresu  $2h \pm$  tolerancja. Przebieg wariogramu eksperymentalnego wyznaczają punkty obliczone dla poszczególnych dystansów. Ze względu na niejednorodność zmienności procesów środowiskowych względem kierunków świata wariogramy empiryczne, oprócz odległości, są także funkcją kierunku. W sytuacji występowania



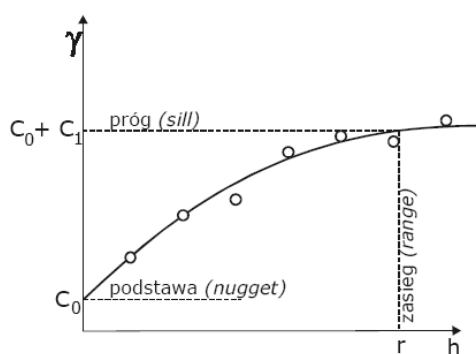
RYSUNEK 1. Zasada tworzenia wariogramu eksperymentalnego (Szczepanek 2003)  
 FIGURE 1. The rule for creating an experimental variogram (Szczepanek 2003)

dominującego kierunku zmienności danego zjawiska rozpatruje się wariogram kierunkowy, a w przypadku przyjęcia jednakowej zmienności danego zjawiska względem wszystkich kierunków świata rozpatruje się wariogram wielokierunkowy.

Wyznaczenie punktów wariogramu eksperymentalnego umożliwia znalezienie równania matematycznego opisującego jego przebieg. Tworzony jest wariogram teoretyczny (rys. 2), do którego

opisu wykorzystywane są następujące parametry:

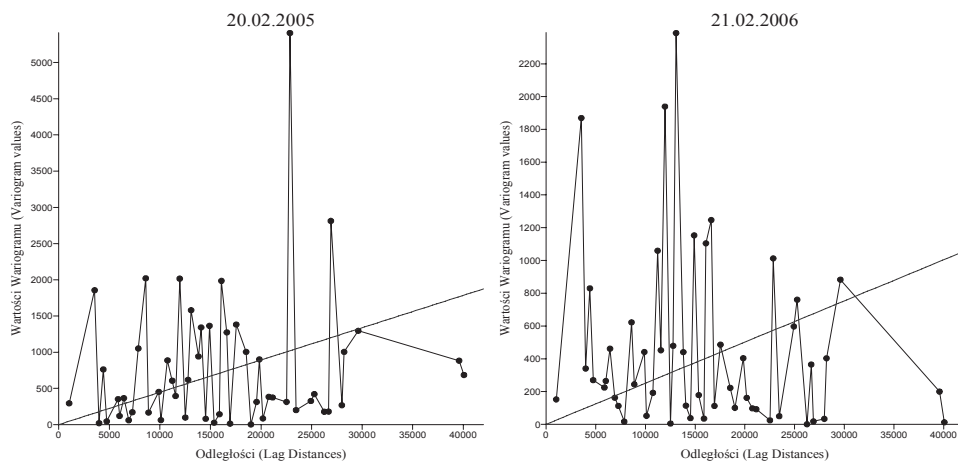
- zasięg oddziaływania – dystans, powyżej którego wartość wariogramu jest quasi-stała,
- wartość progowa (próg) – wartość wariogramu odpowiadająca zasięgowi oddziaływania,
- podstawa – wartość wariogramu dla dystansu zbliżonego do zera, nazywana także „efektem samorodków”.



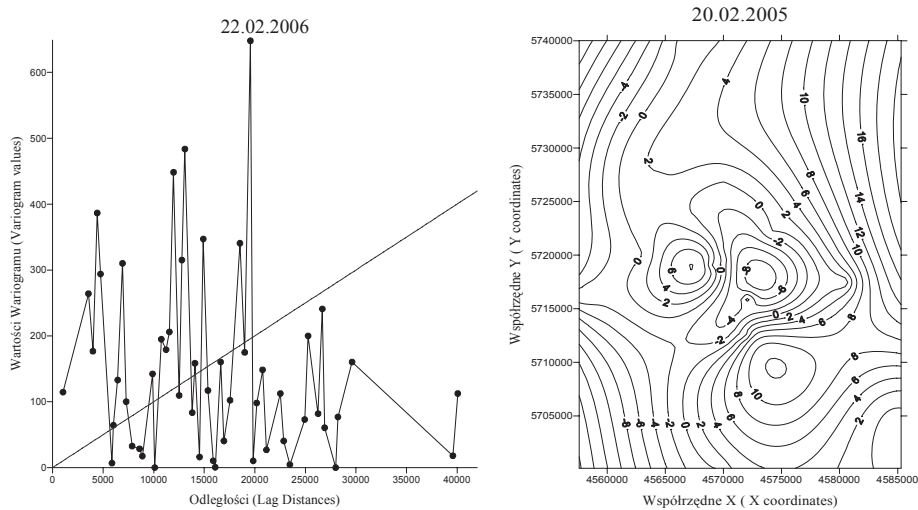
RYSUNEK 2. Parametry wariogramu teoretycznego (Shibli 1997)  
 FIGURE 2. Parameters of theoretical variogram (Shibli 1997)

## Dyskusja wyników

Wariogramy empiryczne, sporządzone dla wartości stężenia pyłu zawieszonego PM10, odznaczały się nieregularnym przebiegiem (rys. 3 i 4), który spowodował znaczne trudności w znalezieniu funkcji teoretycznych, umożliwiających dokładną aproksymację tych wariogramów. Nieregularny przebieg wariogramów empirycznych wynikał z małej liczby punktów pomiarowych wykorzystanych do ich konstrukcji. Należy jednak podkreślić, że każdy z punktów pomiarowych stanowiła stacja mo-



RYSUNEK 3. Wariogramy empiryczny oraz teoretyczny dla stężenia w dniach 20.02.2005 roku oraz 21.02.2006 roku  
 FIGURE 3. Empirical and theoretical variograms for the PM10 concentrations for 20.02.2005 and 21.02.2006



RYSUNEK 4. Wariogramy empiryczny oraz teoretyczny dla stężenia pyłu zarejestrowanego 22.02.2006 roku oraz różnice w wartościach interpolowanych dla dnia 20.02.2005 roku przy zastosowaniu funkcji potęgowej i wykładniczej  
 FIGURE 4. Theoretical and empirical variograms for the concentration of 22.02.2006 and differences in interpolated values implementing power and exponential function for 20.02.2005

monitoringu stężenia pyłu i pomimo że na potrzeby interpolacji wartości stężenia pyłu PM10 liczba punktów pomiarowych równa 15 jest niewystarczająca, to biorąc pod uwagę wymogi monitoringu jakości

powietrza w aglomeracji warszawskiej, liczba stacji równa 15 tworzy spójną i systematyczną sieć pomiarową. Autorzy wykorzystali do konstrukcji wariogramów wszystkie dostępne punkty po-

miarowe zlokalizowane w obrębie aglomeracji warszawskiej i oczywiste jest, że nie istnieje możliwość uzyskania tak dużej ich liczby, jak na przykład punktów pomiaru rzędnej wysokości terenu nad poziomem morza. W związku ze znacznymi trudnościami w znalezieniu funkcji teoretycznych do aproksymacji sporządzonych wariogramów podjęto arbitralną decyzję o zastosowaniu w tym celu funkcji liniowej, o nachyleniu w zakresie (0,001; 0,1) oraz funkcji wykładniczej:

$$\gamma(h) = C(1 - e^{-h}) \quad (2)$$

i funkcji potęgowej:

$$\gamma(h) = C(h^n) \quad (3)$$

gdzie:

$C$  – wartość progowa,

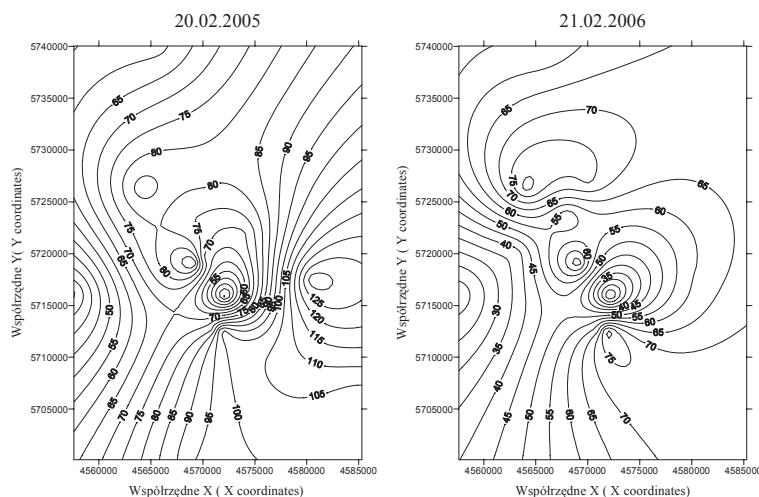
$A$  – zasięg oddziaływania,

$h$  – względny dystans pomiędzy punktami dobieganymi w parę podczas two-

żenia wariogramu, stanowiący iloraz odległości pomiędzy tymi punktami i zasięgu oddziaływania  $h = \frac{\sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2}}{A}$ ,

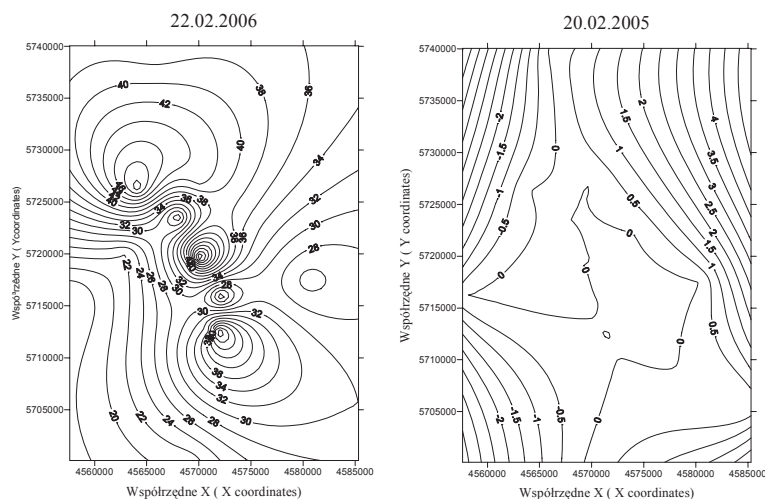
$n$  – wykładnik funkcji potęgowej.

W kolejnym kroku wykonano interpolację wartości stężenia pyłu zawieszonego PM10 dla trzech rozpatrywanych dni z wykorzystaniem wyżej wymienionych funkcji, jako arbitralnie wybranych wariogramów teoretycznych, oraz porównano uzyskane w ten sposób mapy izolinii stężenia pyłu PM10 (rys. 5 i 6). Nie stwierdzono istotnych różnic pomiędzy wartościami interpolowanymi, które uzyskano dla każdego z rozpatrywanych dni w wyniku przyjęcia równań funkcji liniowej o nachyleniach dobieganymi z wyżej wymienionego przedziału. Różnice pomiędzy wartościami stężenia interpolowanymi przy zastosowaniu funkcji liniowej a wartościami stężenia interpolowanymi przy zastosowaniu funkcji wykładniczej są również niewielkie



RYSUNEK 5. Mapy izolinii stężenia pyłu zawieszonego dla dni 20.02.2005 roku oraz 21.02.2006 roku

FIGURE 5. PM10 isoline maps for 20.02.2005 and 21.02.2006



RYSUNEK 6. Izolinie wartości stężenia pyłu zawieszonego PM10 dla dnia 22.02.2006 roku oraz różnice w wartości interpolowanego stężenia dla dnia 20.02.2005 roku przy zastosowaniu funkcji liniowej i wykładniczej

FIGURE 6. PM10 isoline maps for 22.02.2006 and differences in interpolated values implementing linear and exponential function for 20.02.2005

(rys. 6). Istotne różnice zauważono podczas porównania wyników interpolacji otrzymanych przy zastosowaniu funkcji wykładniczej z wynikami uzyskanymi przy wykorzystaniu funkcji potęgowej (rys. 4).

## Podsumowanie

Uzyskane mapy izolinii stężeń pyłu zawieszonego PM10 należy potraktować jako orientacyjne ze względu na małą liczbę punktów pomiarowych dostępnych do wykonania interpolacji wartości stężenia pyłu metodą krigingu. Niewielka wiarygodność sporządzonych map jest uwarunkowana arbitralnie przyjętymi funkcjami wariogramów teoretycznych, a nie jest poparta wynikiem korelacji przestrzennych istniejących w zbiorze danych. Konstrukcja map izolinii stężenia pyłu zawieszonego, odznaczających

się wysokim stopniem wiarygodności, wymagałaby dostępności dużej liczby punktów obserwacyjnych. Dostępność dużej liczby punktów rejestracji stężenia pyłu zapewniłaby z jednej strony szeroki zakres punktów wykorzystywanych do przeprowadzenia interpolacji metodą krigingu, a z drugiej strony zagwarantowałaby odpowiedni zbiór materiału obserwacyjnego do weryfikacji dokładności tej metody. Stworzone w niniejszej pracy rozkłady stężenia pyłu zawieszonego PM10, uwzględniające wszystkie zarejestrowane wartości, mogą być użyteczne w identyfikacji miejsc odznaczających się silnym wpływem warunków lokalnych na stężenie pyłu PM10.

## Literatura

CRESSIE N. 1991: Statistics for Spatial Data. John Wiley and Sons, New York.

- HARRISON R. i inni 2000: Particulate Matter in the Atmosphere: Which Particle Properties are Important for Effects on Health? *The Science of the Total Environment* 249: 85–101.
- ISAAKS E., SRIVASTAVA M. 1989: An Introduction to Applied Geostatistics. Oxford University Press, New York.
- MAJEWSKI G., PRZEWOŹNICZUK W. 2006: Characteristics of the particulate matter PM10 concentration field and an attempt to determine the sources of air pollution in the living district of Ursynów. *Annals of Warsaw Agricultural University, Land Reclamation* 37: 55–67.
- SZCZEPANEK R. 2003: Czasoprzestrzenna struktura opadu atmosferycznego w zlewni górskiej. Rozprawa doktorska. Politechnika Krakowska, Kraków.
- SHIBLI S. 1997: Geostatistics FAQ (<http://www.ai-geostats.org/faqs.htm>).
- WARYCH J. 1999: Zanieczyszczenie powietrza cząstkami aerozolowymi i wynikające stąd problemy. *Ochrona Powietrza i Problemy Odpadów* 33, 3, maj-czerwiec.
- WHO 2005: Health risks of particulate matter from long-range transboundary air pollution. Draft 5. European Centre for Environment and Health, Bonn Office.

was made to apply kriging method for the creation of isoline maps of particulate matter PM10 concentration for Warsaw agglomeration for the following days: 20.02.2005, 21.02.2006, 22.02.2006, either distinguished by the presence of different meteorological conditions. Obtained empirical variograms of PM10 concentration values were of irregular course on account of a low number of measurement points availability (15 monitoring stations of particulate matter concentration). Those irregular courses of empirical variograms caused the arbitrary selection of theoretical functions for their approximation. Applying the arbitrarily selected functions for particulate matter concentration interpolation done by kriging method resulted in creating approximate PM10 concentration isoline maps. It was stressed that obtaining reliable isoline maps of related concentrations would require the availability of a wide range of measurement points.

## Summary

**Attempt of kriging metod application for the creation of isoline maps of particulate matter PM10 concentration for Warsaw agglomeration.** In this paper an attempt

### Authors' address:

Andrzej Brandyk, Grzegorz Majewski, Laura Porretta  
 Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego  
 Katedra Inżynierii Wodnej i Rekultywacji Środowiska  
 ul. Nowoursynowska 159, 02-776 Warszawa  
 Poland