

Jacek MUCHA

Zbigniew KOKESZ

Akademia Górniczo-Hutnicza

ZASTOSOWANIE GEOSTATYSTYKI I KRIGINGU
W USTALANIU ZASOBÓW WĘGLA KAMIENNEGO
I PROGNOZOWANIU PARAMETRÓW ZŁOŻA

Streszczenie. Przedstawiono podstawy geostatystycznego modelowania zmienności parametrów złożowych oraz zasady procedury krigingu. Opisaną metodykę wykorzystano do charakterystyki zmienności miąższości pokładów, zawartości siarki i popiołu w warunkach polskich złóż węglowych. Stwierdzono dużą różnorodność struktur zmienności dla każdego analizowanego parametru i typu litostratygraficznego pokładów. Wynika stąd konieczność indywidualnego traktowania każdego pokładu oraz parametru złożowego przy opisie jego zmienności. Zróżnicowanie miąższości pokładów i zawartości siarki ma w większości analizowanych przypadków charakter nielosowy, a zawartości popiołu - losowy. Wśród nielosowych modeli zmienności dominują modele: liniowy i Matherona. Uzyskane wyniki wskazują na możliwość efektywnego zastosowania procedury krigingu do oceny zasobów złóż węgla oraz średnich miąższości pokładów i średniej zawartości siarki w węglu. W odniesieniu do zawartości popiołu nie należy oczekiwać wzrostu dokładności oceny wartości średnich tego parametru z tytułu zastosowania procedury krigingu. Można w tym przypadku stosować z powodzeniem klasyczne metody statystyczne. Zwrócono uwagę na czynniki utrudniające uzyskanie wiarygodnych semiwariogramów empirycznych zawartości siarki i popiołu. Należą do nich: skromne liczebnościowo zbiory danych w obrębie pojedynczych pokładów, skrajnie nierównomierne rozmieszczenie punktów pomiarowych oraz wykonywanie analiz na zawartość siarki i popiołu przez różne laboratoria.

WSTĘP

W ostatnich latach zauważa się znaczący wzrost zainteresowania zastosowaniem metod geostatystycznych (geostatystyki) w geologii złożowej i górniczej. Poważne nadzieje wiąże się z geostatystycznym opisem zmienności parametrów złożowych, stanowiącym punkt wyjścia w rozwiązywaniu problemów geologiczno-górniczych, jakie napotyka się w trakcie rozpoznawania i eksploatacji złoża. Do ważniejszych z nich należą:

- ocena wielkości średnich parametrów złożowych i zasobów złoża oraz oszacowanie błędów tej oceny,
- określenie optymalnej gęstości i geometrii sieci rozpoznawczej otworów wiertniczych oraz sieci opróbowań wyrobisk górniczych,

- ocena anizotropii zmienności parametrów złożowych,
- ustalenie optymalnej orientacji frontu eksploatacji,
- określenie stopnia rozpoznania złoża.

Stosowane dotychczas powszechnie do rozwiązywania wymienionych zagadnień klasyczne metody statystyczne są powoli wypierane przez metodę geostatystyczną. W odróżnieniu od tych pierwszych, geostatystyka uwzględnia strukturę zmienności parametrów złożowych wyrażoną za pomocą semiwariogramu, co pozwala na pełniejsze wykorzystanie dostępnych informacji o złożu.

Silny rozwój geostatystyki datuje się od początku lat sześćdziesiątych, a cezurę stanowi tu opublikowanie przez G. Matherona w latach 1962-1963 obszernej monografii, zawierającej podstawy teoretyczne geostatystyki, pod tytułem: "Traité de géostatistique appliquée". Ponad dwudziestoletnia historia geostatystyki notuje liczne przykłady udanych zastosowań jej metod, głównie w odniesieniu do złóż rud metali (złota, uranu, żelaza, cynku i ołowiu). W ostatnich kilku latach obserwuje się również liczne próby zastosowań metod geostatystycznych do oceny złóż węgla kamiennych. Przedmiotem badań były m.in. takie zagadnienia, jak: charakterystyka przestrzennej zmienności parametrów złożowych, ocena średnich wartości parametrów i zasobów, strategia rozpoznania złóż węgla kamiennego [1], [2], [3], [7], [9], [10].

Dotychczasowe zastosowania geostatystyki w odniesieniu do złóż węgla kamiennego prowadzone były w dwóch kierunkach: opisowym i praktycznym. Pierwsze podejście miało na celu wykrycie i scharakteryzowanie prawidłowości zróżnicowania parametrów złożowych, drugie zaś racjonalizację rozpoznania złoża, która ma sens ściśle ekonomiczny. Ma ona na celu wypracowanie takiej strategii rozpoznania, która zapewniałaby osiągnięcie zakładanej z góry dokładności oceny parametrów złożowych przy minimalnych nakładach finansowych na wykonanie rozpoznania.

W Polsce jedyną opublikowaną dotychczas pozycją z omawianego zakresu jest praca J. Peronia [8], który badał zmienność parametrów złożowych dla pokładów kopalń GZW i ROW. Problematyka geostatystycznej oceny złóż węgla kamiennego została przyjęta również w 1983 r. w Instytucie Hydrogeologii i Geologii Inżynierskiej AGH przy współpracy z Głównym Instytutem Górnictwa i Centralnym ośrodkiem Informatyki Górnictwa w Katowicach [5], [6].

1. ZARYS GEOSTATYSTYCZNEGO OPISU ZMIENNOŚCI I ZASADY PROCEDURY KRIGINGU

Zmienność parametrów złożowych najczęściej wyrażana jest za pomocą prostych miar statystycznych - wartości średniej, odchylenia standardowego, wariancji lub współczynnika zmienności. Przy ograniczeniu się do wyżej wymienionych wskaźników traci się informację o regionalności (zlo-

kalizowaniu) cechy. Zakłada się bowiem niezależność poszczególnych pomiarów, co jest niekiedy zbyt dużym uproszczeniem.

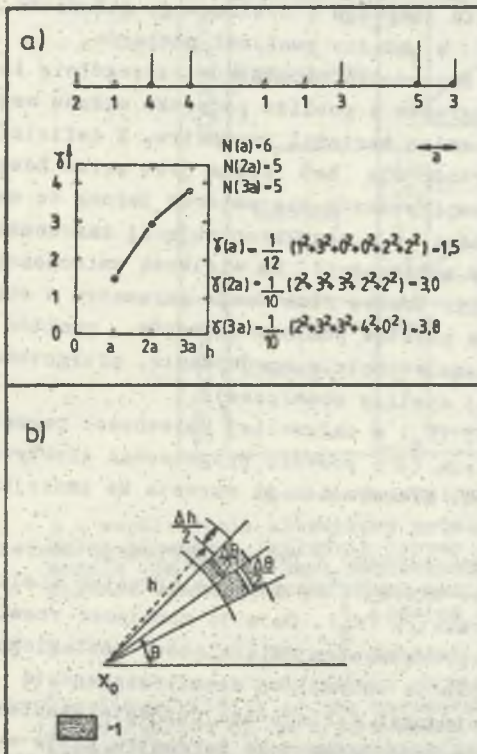
W metodzie geostatystycznej G. Matherona [4], w odróżnieniu od metody statystycznej, zmienność parametrów złożowych opisuje nie pojedynczy wskaźnik liczbowy, lecz funkcja wyrażająca zarazem strukturę ich zmienności. Funkcja ta nosi nazwę wariogramu $2\gamma(h)$ lub semiwariogramu $\gamma(h)$ i ujmuje zależności występujące między zróżnicowaniem wartości parametru i odległością między punktami ich pomiaru.

Dla dyskretnej i regularnej sieci pomiarów (opróbowań) wartości semiwariogramu $\gamma(h)$ ustala się ze wzoru:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2n_h} \sum_{i=1}^{n_h} (Z_{i+h} - Z_i)^2$$

gdzie:

- Z_{i+h}, Z_i - wartości parametru złożowego we wszystkich punktach pomiarowych oddalonych o "h",
- n_h - liczba par pomiarów oddległych o "h".



Rys. 1. Schemat obliczania semiwariogramu dla regularnie (a) i nieregularnie (b) rozmieszczonych danych

1 - obszar grupowania danych (wszystkim obserwacjom zlokalizowanym w strefie zakropkowanej przypisana zostanie odległość h oraz kąt θ

$$\bar{h} = \frac{\sum_{i=1}^n h_i}{n}$$

gdzie: h_i - odległości poszczególnych punktów obserwacyjnych względem punktu X_0 ; n - liczba obserwacji zlokalizowanych w strefie zakropkowanej).

Fig. 1. A semivariogram calculation scheme for regularly (a) and irregularly (b) distributed data

1 - area of data grouping (all the observations located in the dotted region are appropriated the distance h and the angle

$$\bar{h} = \frac{\sum_{i=1}^n h_i}{n}$$

where: h_i - distances of the particular observation point towards point X_0 , n - number of observations located in the dotted region

Sposób obliczania wartości semiwariogramu dla kolejnych wartości argumentu h (odległości między punktami pomiaru) wyjaśnia rys. 1. Dla regularnej siatki pomiarowej obliczenia są bardzo proste. W przypadku obserwacji rozmieszczonych nieregularnie stosuje się przybliżoną metodę obliczeń, grupując dane w klasy odległości i w klasy przedziałów kątowych dla ustalonych kierunków obliczeń funkcji $\gamma(h)$. W praktyce obliczenia wariogramu kontynuuje się do momentu, gdy odległość h nie przekroczy połowy długości ciągu opróbowań. Analiza postaci określonych w ten sposób semiwariogramów empirycznych pozwala na wykrycie i charakterystykę prawidłowości występujących w zróżnicowaniu wartości analizowanych parametrów złożowych.

Semiwariogram empiryczny, przedstawiony w formie graficznej, jest przydatny do jakościowego opisu zmienności parametru. Ilościowa ocena zmienności wymaga przybliżenia semiwariogramów empirycznych prostymi funkcjami matematycznymi, które traktuje się jako geostatystyczne modele zmienności (rys. 2).

Poza przedstawionymi na rys. 2 prostymi modelami zmienności, występują również modele złożone, stanowiące kompozycję dwóch lub więcej modeli podstawowych.

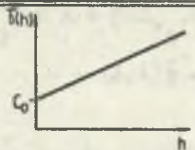
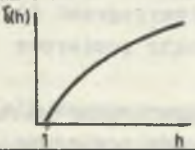
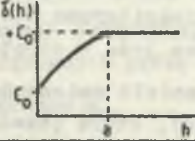
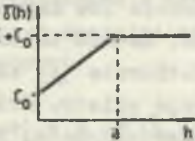
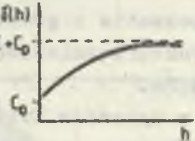
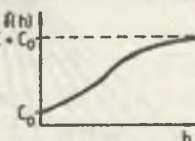
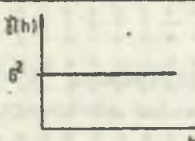
Analiza wariogramów pozwala na określenie zasięgu autokorelacji wartości parametru "a" (rys. 2) i udziału losowego i nielosowego składnika zmienności dla dowolnej odległości h między punktami pomiarów.

Z punktu widzenia informacji o zmienności parametrów szczególnie interesujący jest przebieg semiwariogramów w pobliżu początku układu współrzędnych. Świadczy on o płynności zmian wartości parametru. Z definicji semiwariogramu wynika, że jego wartość dla $h=0$ równa jest zero. Zdecydowana większość semiwariogramów empirycznych nie zmierza jednak do zera przy $h \rightarrow 0$, lecz do pewnej wartości C_0 charakteryzującej zmienność lokalną parametru (składnik losowy zmienności). Na wielkość zmienności lokalnej C_0 wpływają dwa czynniki: losowe fluktuacje parametru w skali mniejszej od podstawowego rozstępu punktów pomiaru (otworów, punktów opróbowań) i błędy losowe popełnione w trakcie opróbowania, przygotowania prób do analizy chemicznej i samej analizy chemicznej.

Udział (U_L) zmienności lokalnej (C_0) w całkowitej zmienności parametru wyrażonej wariancją statystyczną (σ^2) pozwala prognozować efektywność stosowania metod geostatystycznych. Efektywność ta wzrasta ze zmniejszaniem się zmienności lokalnej.

W oparciu o semiwariogram można obliczać a priori wariancję teoretyczną parametru w dowolnym fragmencie złoża (σ^2), a także określać wielkości błędu oceny średniej wartości parametru (σ_E^2). Daje to możliwość rozwiązywania szeregu zadań związanych z prowadzeniem działalności geologiczno-górnicznej na złożu, m.in. wyznaczania optymalnej sieci rozpoznania (opróbowania) złoża, ustalania kategorii dokładności poznania zasobów.

Błąd wynikający z założenia, iż średnia wartość parametru złoża w ocenianej jego części jest równa średniej arytmetycznej wartości parametru

$\gamma(h)$	Model	Wykres-semiwarigram	Równanie
nieograniczony wzrost	liniowy		$\gamma(h) = C_0 + p \cdot h$
	de Wijs'a		$\gamma(h) = 3\alpha \cdot \ln h$
ograniczony wzrost	Matherona	sferyczny	 $\gamma(h) = C \left[\frac{3}{2} \frac{h}{a} - \frac{h^2}{2a^2} \right] + C_0$ dla $h \leq a$ $\gamma(h) = C_0 + C - C \cdot \frac{h^2}{a^2}$ dla $h \geq a$
		liniowy	 $\gamma(h) = C_0 + \frac{C}{a} \cdot h$ dla $h \leq a$ $\gamma(h) = C_0 + C - C \cdot \frac{h^2}{a^2}$ dla $h \geq a$
	Formery'ego	 $\gamma(h) = C \left(1 - e^{-\frac{h}{a}} \right) + C_0$ dla $h \rightarrow \infty$ $\gamma(h) \rightarrow C + C_0 - C \cdot \frac{h^2}{a^2}$	
		Gaussa	 $\gamma(h) = C \left(1 - e^{-\frac{h^2}{2a^2}} \right) + C_0$ dla $h \rightarrow \infty$ $\gamma(h) \rightarrow C + C_0 - C \cdot \frac{h^2}{a^2}$
	$\gamma(h) = \text{const.}$	losowy	

Rys. 2. Geostatystyczne modele zmienności

p - współczynnik kierunkowy prostej, C_0 - wartość wyrażająca zmienność lokalną parametru (składnik losowy zmienności dla $h \rightarrow 0$), α - parametr modelu de Wijs'a (tzw. współczynnik absolutnego rozproszenia), $C_0 + C$ - amplituda semiwarigramu (równa wariancji teoretycznej, a zasięg warigramu (zasięg autokorelacji)

Fig. 2. Geostatistical variability models

p - directional coefficient of the straight line, C_0 - value expressing local variability of the parameter (chance variation component for $h \rightarrow 0$), α - parameter of de Wijs's model (the so-called coefficient of absolute scattering), $C_0 + C$ - semi-variogram amplitude equal to theoretical variance, a - variogram range (auto-correlation range)

określonych w punktach pomiarowych (opróbowania), nosi w geostatystyce nazwę błędu ekstensji ($\frac{2}{E}$). Wielkość tego błędu określa ogólny wzór:

$$\sigma_{\frac{2}{E}}^2 = 2 \cdot \bar{f}(S,A) - \bar{f}(S,S) - \bar{f}(A,A)$$

gdzie:

$\bar{f}(S,A)$ - średnia wartość semiwariogramu dla wszystkich możliwych odcinków łączących punkty pomiarowe (opróbowania) - S - z ocenianym obszarem - A,

$\bar{f}(S,S)$ - średnia wartość semiwariogramu dla wszystkich możliwych odcinków łączących punkty pomiarowe (opróbowania),

$\bar{f}(A,A)$ - średnia wartość semiwariogramu dla wszystkich możliwych odcinków, których końce leżą w obrębie ocenianego obszaru.

Znajomość geostatystycznego modelu zmienności umożliwia stosowanie specjalnej procedury (tzw. krigingu), która pozwala szacować wartości parametrów złoża w dowolnym jego punkcie lub średnich ich wartości w dowolnej części złoża z minimalnym błędem. Metoda ta zaproponowana przez D. Krige'a, a rozwinięta później przez G. Matherona [4] zdobyła w ostatnich latach dużą popularność ze względu na swoje zalety. Kriging cechuje się w porównaniu z innymi metodami większą efektywnością. Przy ocenie złoża uwzględniana jest geometria sieci rozpoznania i geometria bloku obliczeniowego, ich wzajemne położenie oraz struktura zmienności analizowanych parametrów wyrażona za pomocą semiwariogramów.

Estymator wartości średniej w metodzie Krig'e'a Z_k^x jest średnią ważoną napisaną w formie:

$$Z_k^x = \sum_{i=1}^n W_i \cdot Z_{V_i}$$

gdzie:

W_i - współczynnik wagowy, przypisany "i"-temu punktowi rozpoznania,

Z_{V_i} - wartość badanego parametru złożowego w "i"-tej próbie o objętości V,

n - liczba danych uwzględniona w ocenie średniej wartości parametru.

Istota krigingu zawiera się w sposobie określania współczynników wagowych. Są one ustalane w oparciu o dwa postulaty: nieobciążalności estymatora Z_k^x oraz minimalizacji błędu oszacowania średniej wartości parametru (wariancji oceny).

Spełnienie obu postulatów prowadzi do określenia wielkości współczynników wagowych (W_i) metodą Lagrange'a z układu równań:

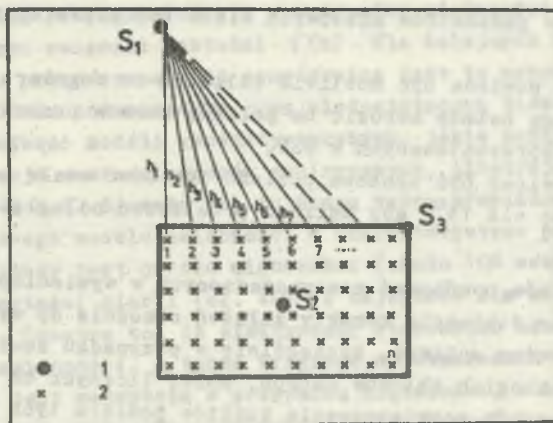
$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{j=1}^n W_j \cdot \bar{\gamma}(S_{v_1}, S_{v_j}) + \lambda = \bar{\gamma}(S_{v_1}, A) \quad (i=1, \dots, n) \\ \sum_{i=1}^n W_i = 1 \end{array} \right.$$

gdzie:

- $\bar{\gamma}(S_{v_1}, S_{v_j})$ - średnia wartość semiwariogramów dla wszystkich możliwych odcinków łączących próbę S_{v_1} z próbą S_{v_j} ,
- $\bar{\gamma}(S_{v_1}, A)$ - średnia wartość semiwariogramu dla wszystkich możliwych odcinków łączących próbę S_{v_1} z ocenianym blokiem A,
- λ - mnożnik Lagrange'a.

Zminimalizowany, przez zastosowanie wyznaczonych z układu równań współczynników wagowych, błąd oceny średniej wartości parametru, zwany błędem krigingu, wyznacza się ze wzoru:

$$\sigma_K^2 = \sum_{i=1}^n W_i \cdot \bar{\gamma}(S_{v_1}, A) + \lambda - \bar{\gamma}(A, A)$$



Rys. 3. Przykład określenia średnich wartości semiwariogramów $\bar{\gamma}(S, A)$ przy zastosowaniu maszyny cyfrowej

1 - punkt rozpoznania złoża (otwór wiertniczy), 2 - punkty zliczeń wartości semiwariogramów między blokiem obliczeniowym A i punktem rozpoznania S_1

Fig. 3. Example of determining semivariogram mean values $\bar{\gamma}(S, A)$ using digital computer

1 - point of deposit exploration (bore hole), 2 - point of totting of semivariogram values between the calculating block A and exploration point S_1

gdzie:

$\bar{\gamma}(A,A)$ - średnia wartość semiwariogramu dla wszystkich możliwych odcinków zawartych w ocenianym bloku A.

Średnie wartości wariogramu, zdefiniowane wyrażeniami: $\bar{\gamma}(S,A)$, $\bar{\gamma}(S,S)$, $\bar{\gamma}(A,A)$, ustalane są najczęściej drogą obliczeń komputerowych, w których całkowanie funkcji $\gamma(h)$ zastępowane jest procedurą dyskretnej symulacji (oceniany blok traktowany jest tu jako zbiór punktów równo w nim rozmieszczonych). Sposób realizacji obliczeń wyjaśnia rys. 3.

Kriging dzięki swoim zaletom stanowi optymalną metodę prognozowania parametrów złożowych i wykorzystywany jest przy szacowaniu zasobów, a także jako procedura interpolacyjna przy kreśleniu map izarytm parametrów złożowych.

2. CHARAKTERYSTYKA MATERIAŁU PODSTAWOWEGO

Badaniami objęto 5 kopalń GZW ("Lenin", "Manifest Lipcowy", "Piast", "Sośnica", "Staszic") i kilka pokładów LZW. Łącznie obliczono semiwariogramy empiryczne dla 13 pokładów GZW i 6 pokładów LZW.

Do badania zmienności wytypowano trzy ważniejsze parametry opisujące złoża węgla kamiennego: miąższość, zawartość siarki i popiołu w węglu. Przy wyborze pokładów węgla kierowano się następującymi zasadami:

- liczba pomiarów parametrów złożowych winna być odpowiednio duża (powyżej 50),
- sieć pomiarowa powinna być możliwie zbliżona do regularnej,
- szczególną uwagę należy zwrócić na pokłady warstw orzeskich i rudzkich najliczniej reprezentowanych w GZW,
- pokłady węgla winny być ułożone poziomo lub mieć stałe nachylenie, jednak nie większe niż 15° , aby uniknąć przeliczeń odległości między punktami pomiarów.

Przegląd wyników opróbowań przeprowadzonych w wymienionych kopalniach zmusił autorów do dokonania korekty założeń odnośnie do wyboru pokładów. Nie udało się bowiem uniknąć, szczególnie w przypadku zawartości siarki i popiołu, zbyt ubogich zbiorów danych, mniej licznych od przyjętych założeń. Również sposób rozmieszczenia punktów pomiaru tych parametrów zdecydowanie odbiega od regularnego. Z tego względu do opisu zmienności zawartości siarki i popiołu wykorzystano dane pochodzące z 4 kopalń. Wybrane do analizy zmienności pokłady są najbliższe spełnieniu przyjętych zasad.

Liczebności zbiorów danych dla poszczególnych parametrów wynosiły: miąższość od 29-479, zawartość siarki od 28-98 i zawartość popiołu od 29-98.

Dane dotyczące miąższości pokładów pochodziły z pomiarów dokonanych w otworach wiertniczych i wyrobiskach górniczych. Otwory wiertnicze nie są rozmieszczone w sieci regularnej, ale gęstość ich rozmieszczenia jest w

przybliżeniu jednakowa. Pomiary miąższości w wyrobiskach górniczych były wykonane przy zachowaniu stałego na ogół rozstępu między kolejnymi punktami pomiarowymi.

Pomiary zawartości siarki i popiołu były wykonane w punktach o skrajnie nierównomiernym rozmieszczeniu. Dodatkowym elementem utrudniającym interpretację geostatystycznego opisu zmienności jest w tym przypadku wykonywanie analiz na zawartość siarki i popiołu przez różne laboratoria.

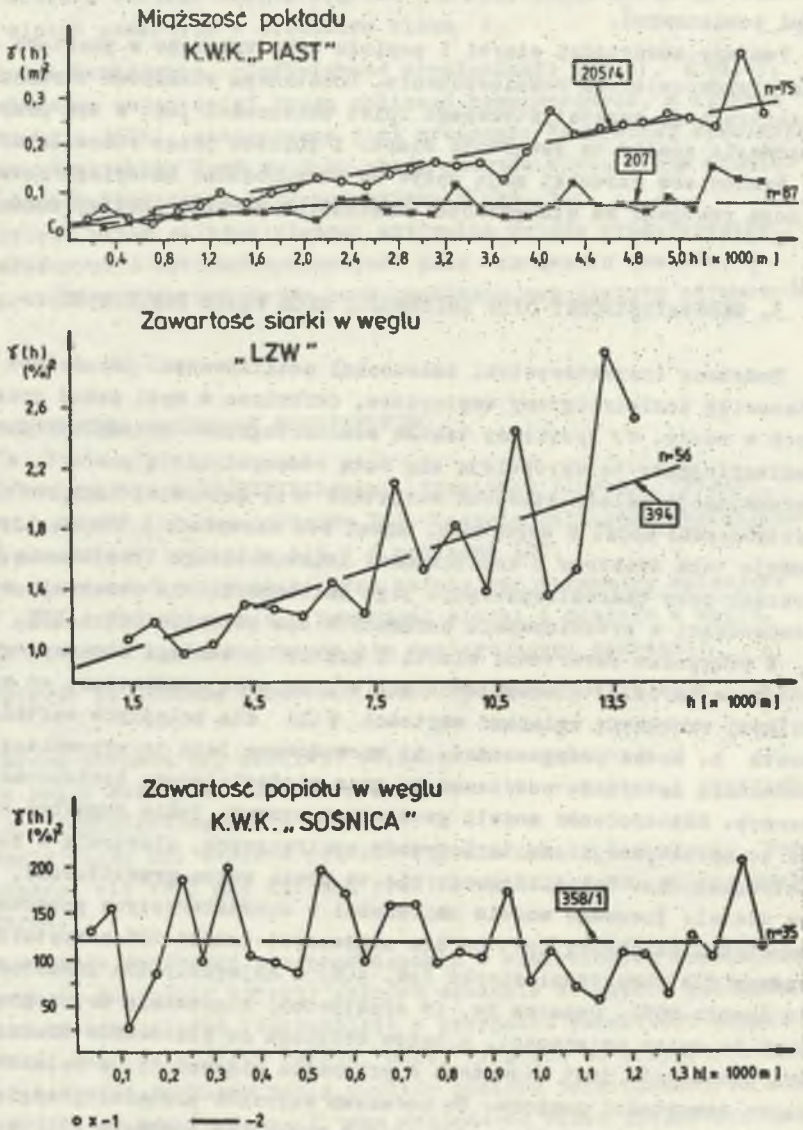
Wymienione czynniki mają wpływ na jednorodność materiału podstawowego i mogą rzutować na wiarygodność uzyskanych wyników analizy zmienności.

3. GEOSTATYSTYCZNY OPIS ZMIENNOŚCI ZŁOŻ WĘGLA KAMIENNEGO

Podstawę charakterystyki zmienności analizowanych parametrów złożowych stanowiły semiwariogramy empiryczne, określone w myśl zasad przedstawionych w rozdz. 1. Przykłady takich semiwariogramów przedstawiono na rys.4. Semiwariogramy te wyróżniają się dużą różnorodnością postaci, a do ich aproksymacji należy stosować wszystkie trzy generalne typy modeli geostatystycznych: model z asymptotą, model bez asymptoty i losowy (rys. 2). Sytuacja taka świadczy o konieczności indywidualnego traktowania każdego pokładu przy charakteryzowaniu jego zmienności. Nie obserwuje się ponadto odmienności w zróżnicowaniu parametrów dla pokładów GZW i LZW.

W przypadku zawartości siarki i popiołu przebiegi semiwariogramów są znacznie bardziej nieregularne niż w przypadku miąższości, co wyraża się silnymi skokowymi zmianami wartości $\gamma(h)$ dla kolejnych wartości argumentu h . Można przypuszczać, iż spowodowane jest to wspomnianą niejednorodnością materiału podstawowego oraz niedostateczną liczebnością zbioru danych. Różnorodność modeli geostatystycznych, jakie mogą być zastosowane do aproksymacji semiwariogramów empirycznych, ilustrują w formie syntetycznej rys. 5 i 6. Zauważa się tu pewną ważną prawidłowość, polegającą na udziale losowego modelu zmienności w charakterystyce poszczególnych parametrów. Najniższy jest on dla miąższości (około 10% wszystkich modeli), wyższy dla zawartości siarki (ok. 40%) i najwyższy dla zawartości popiołu (około 65%). Oznacza to, iż efektywność stosowania metod geostatystycznych do opisu zmienności, a także krigingu do szacowania średnich wartości parametrów jest najwyższa w przypadku miąższości, a najniższa w przypadku zawartości popiołu. Do podanych wniosków prowadzi przegląd średnich wskaźników (U_L) określających udział składnika losowego (C_0) w całkowitej zmienności parametru wyrażonej wariancją (σ^2). Dla poszczególnych parametrów w badanych pokładach wynosi on odpowiednio: dla miąższości - 32%, zawartości siarki - 53%, zawartości popiołu - 86%.

Zestawienie to dowodzi wysokiego udziału nielosowego składnika zmienności dla miąższości i znaczącego dla zawartości siarki oraz znikomego dla zawartości popiołu. W wymienionej kolejności będzie się również ob-



Rys. 4. Przykłady semiwariogramów empirycznych badanych parametrów złożowych

1 - punkty semiwariogramów empirycznych, 2 - model zmienności. W ramkach zaznaczone numery pokładów: n - liczność zbioru danych, w oparciu o który wyznaczono semiwariogram

Fig. 4. Example of empirical variograms of the deposit parameters studied
1 - points of empirical semiwariograms, 2 - variation model. Framed are the numbers of beds: n - amount of the set of data on the basis of which the semiwariogram was plotted

Model		Wykres seminariogramu	K.W.K. Piaś	K.W.K. Staszic	K.W.K. Sośnica	K.W.K. Lenin	K.W.K. Manifest Lipcowy	L.Z.W. K-4 K-8
liniowy			205/4 206/1		407/1	349		385/2 397
de Wijsa								
Matherona	sferyczny			404/5		(349)		382 392
	liniowy		207	364	358/1 406/2			
Formery'ego				405				391 394
Gausa								
losowy						401	403/1	


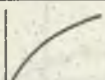
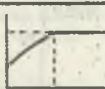
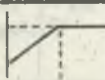
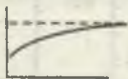
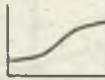
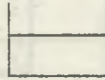
Rys. 5. Zestawienie typów modeli zmienności miąższości dla kopalń i pokładów

Fig. 5. Specification of the types of thickness variability models for collieries and seams

nizac efektywność szacowania średnich wartości parametru z tytułu zastosowania metod geostatystycznych.]

Jak wynika z rys. 5 i 6, dominującymi modelami zmienności są: model liniowy i modele Matherona. Dla analizowanych parametrów udział tych modeli w całkowitej liczbie modeli typu nielosowego kształtuje się następująco: miąższość - ok. 82%, zawartość siarki - 88%, zawartość popiołu - 60%. Przyjęcie jednolitych modeli zmienności może mieć ogromne znaczenie, ułatwiające w praktyce stosowanie procedury kriginu.

Uzyskane wyniki wskazują na możliwość i celowość wykorzystania metod geostatystycznych do opisu zmienności złóż węgla kamiennego. W szczególności mogą być one przydatne do szacowania zasobów złoża, zwłaszcza w wyższych kategoriach rozpoznania, na ogół już w kategorii C_1 , a prawie zawsze w kategoriach B i A. Mimo dużego zróżnicowania seminariogramów empirycznych w większości przypadków można założyć liniowy model zmienności przy szacowaniu zasobów w blokach o wymiarach od kilku do kilkudziesięciu hektarów.

Model		Wykres semiwariogramu	K.W.K. Piast	K.W.K. Sesnia	K.W.K. Manifest Lipowy	L.Z.W. K-4 K-8
liniowy			A 206/1 A 207			A 391 S 391 S 394 S 397
de Wijsa					A 403/1	
Matherona	sferyczny					
	liniowy		S 205/4 S 206/1 S 207			
Formery'ego					A 403/1	A 382 S 392
Gausa						
losowy			A 205/4	A 358/1 A 406/2 A 407/1 S 358/1 S 406/2	A 403/1 S 403/1	A 385/2 A 392 A 394 A 397 S 382 S 385

Rys. 6. Zestawienie typów modeli zmienności zawartości siarki i popiołu dla kopalń i pokładów

Fig. 6. Specification of the types of sulphur and ash content variability models for collieries and seams

Aktualnie w Instytucie Hydrogeologii i Geologii Inżynierskiej AGH prowadzone są prace, których celem jest zweryfikowanie przydatności procedury krigingu w warunkach złóż LZW.

WNIOSKI

- 1) Parametry złóż węgla kamiennych charakteryzują się dużą różnorodnością struktur zmienności. Zmienność miąższości pokładów i zawartości siarki w węglu, w większości analizowanych przypadków, ma charakter nielosowy, zaś zawartość popiołu w węglu losowy. Spośród nielosowych modeli zmienności dominują modele: liniowy i Matherona.
- 2) Nie stwierdzono zależności między typami litostratygicznymi pokładów węgla i typami zmienności parametrów złożowych, określonymi przez

modele geostatystyczne. Nie obserwuje się również odmienności typu zróżnicowania parametrów złożowych dla pokładów GZW i LZW.

- 3) Wyniki przeprowadzonych badań dowodzą konieczności indywidualnego rozpatrywania każdego pokładu i parametru przy analizie ich zmienności oraz wykorzystania wyników tej analizy do szacowania zasobów złoża i średnich wartości parametrów w oparciu o procedurę krigingu.
- 4) Stosowanie metod geostatystycznych do opisu zmienności zawartości siarki i popiołu w warunkach polskich złóż węgla kamiennych jest utrudnione wskutek skrajnie nierównomiernego rozmieszczenia punktów pomiarowych, skromnych liczebnościowo zbiorów danych dla pojedynczych pokładów oraz wykonywania analiz przez różne laboratoria. Wymienione czynniki mogą mieć poważny wpływ na niejednorodność materiału podstawowego, a w konsekwencji zniekształcać obraz zmienności tych parametrów przedstawiony za pomocą semiwariogramów. Celowe i pożyteczne byłoby wprowadzenie w tym przypadku przynajmniej quasi-regularnej sieci opróbowań.
- 5) Nielosowy, w zdecydowanej większości analizowanych przypadków charakter zmienności miąższości pokładów wskazuje na możliwość efektywnego zastosowania procedury krigingu do szacowania zasobów złóż węgla i średnich wartości tego parametru. Procedura ta może być stosowana z powodzeniem również do oceny średnich zawartości siarki. Nie należy natomiast oczekiwać wzrostu dokładności oceny średnich zawartości popiołu przy zastosowaniu krigingu w porównaniu z klasycznymi metodami statystycznymi.

LITERATURA

- [1] Burger H., Schoele R., Skala W.: Kohlenvorratsberechnung mit Hilfe geostatistischer Methoden. "Glückauf-Forschungshefte", 1982; 43, z. 2, s. 63-67.
- [2] Fang J.H., Starks T.H.: Geostatistical estimation of coal seam characteristics and coal reserves. "Annual Progress Report", 1980, July 1; 1981; June 30.
- [3] Kim V.C., Martino F., Chopra J.K.: Application of geostatistics in a coal deposit. "Mining Engineering" 1980 Feb. s. 1476-1481.
- [4] Matheron G.: Osnovy prikladnoj geostatistiki. Wyd. Mir, Moskwa, 1968, s. 407.
- [5] Mucha J. i in.: Geostatystyczna analiza zmienności pokładów węgla kamiennego. Oprac. nie publ. 1984, Archiwum IHIGI AGH, s. 34.
- [6] Nieć M. i in.: Opracowanie metodyki oceny średnich wartości parametrów pokładów i zasobów metodą krigingu dla złóż węgla kamiennego. Oprac. nie publ., 1985, Archiwum IHIGI AGH, s. 55.
- [7] Pauncz J., Nixon T.R.: Application of geostatistics for a more precise statement of coal reserves. "Australian Coal Industry Research Laboratories" 1980, s. 76.

- [8] Peron J.: Opis parametrów złożeń węgla z wykorzystaniem EMC. "Technika Poszukiwań Geologicznych", 1984, nr 5-6, s. 36-43.
- [9] Royle A.G.: Using geostatistics to estimate coal reserves. "World Coal", 1982, vol. 8, nr 5, s. 93-94.
- [10] Wood J.D.: An application of geostatistics in the eastern transvaal coal fields. "Transactions of the Geological Society of South Africa". Geostatistical Division Symposium, January-April 1985, v. 88, p. 1, s. 81-82.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Kazimierz Chmura

ПРИМЕНЕНИЕ ГЕОСТАТИСТИКИ И КРАЙГИНГА В ОПРЕДЕЛЕНИЕ РЕСУРСА КАМЕННОГО УГЛЯ

Р е з ю м е

В статье представлены основы геостатистического моделирования изменчивости параметров залежей и принципы процедуры крайгинга. Описанную методику использовано для характеристики изменчивости толщины пластов, количества серы и пепла в условиях польских угольных месторождений. Установлена большая разновидность структур изменчивости для каждого анализируемого параметра и литостратиграфического типа залежей. Из этого следует необходимость в индивидуальной трактовке каждой залежи и её параметры при описании изменчивости. Дифференциация толщины пластов и наличия серы имеет в большинстве случаев неслучайный характер а наличие пепла - случайный. Среди детерминистических моделей доминируют модели: линейная и Матерона.

Полученные результаты показывают на возможность эффективного применения процедуры крайгинга для оценки ресурса залежей угля а также средней толщины пластов и среднего количества серы в угле. По отношению к количеству пепла не надо ожидать повышения точности оценки средних этого параметра за счёт применения процедуры крайгинга. В этом случае можно успешно применять статистические методы.

Обращено внимание на факторы затрудняющие получение достоверных субваграмм наличия серы и пепла.

APPLICATION OF GEOSTATISTICS AND KRIGING TO THE DETERMINATION OF HARD COAL RESERVES AND PREDICTION OF THE PARAMETERS OF THE DEPOSIT

S u m m a r y

The basis of geostatistical modelling of deposit parameters variability and principles of kriging procedure have been presented. This methodics was used to characterize the variability of seam thicknesses, sulphur and ash content in the conditions of Polish coal deposits. Great variety

of variability structures has been found for each of the parameters analyzed and lithostratigraphic type of seam. Hence, the necessity of individual treatment of each seam, as well as of the deposit parameter, when describing its variability.

The variations in the bed thicknesses and sulphur content are in most of the analyzed cores, of nonrandom character, whereas the ash content, of a random one. Among nonrandom variability models, predominant are linear model and Matheron's Model. The results obtained point, at the possibility of an effective application of the kriging procedure for an estimate of coal deposit reserves and medium seam thicknesses, as well as medium sulphur content in coal. In relation to the ash content, an increase of the accuracy of assessment of the mean values of this parameter should not be expected, as a result of using the procedure of kriging. In this case, the classic statistical methods may successfully be used.

Attention has been called to the factors which hinder the obtaining of reliable semivariograms of the empirical sulphur and ash contents. Here belong modest sets of data within single beds, extremely nonuniform distribution of measuring points, as well as the performing of analyses for the sulphur and ash content by various laboratories.