

Zbigniew KOKESZ

Akademia Górniczo-Hutnicza

Kraków

GEOSTATYSTYCZNA PROCEDURA OBLICZANIA ZASOBÓW
NIESFAŁDOWANYCH ZŁÓŻ WĘGLA KAMIENNEGO^{x)}

Streszczenie. Nielosowy charakter zmienności miąższości pokładów uzasadnia zastosowanie geostatystycznej procedury tzw. krigingu do oceny średnich wartości tego parametru, a tym samym do szacowania zasobów złóż węgla. Kriging umożliwia szacowanie wartości parametrów pokładu z minimalnym błędem, którego wielkość każdorazowo można określić. Dotychczasowe wyniki badań wskazują na celowość stosowania tej metody w warunkach złóż węgla kamiennego rozpoznanych w kat. A + B, C₁.

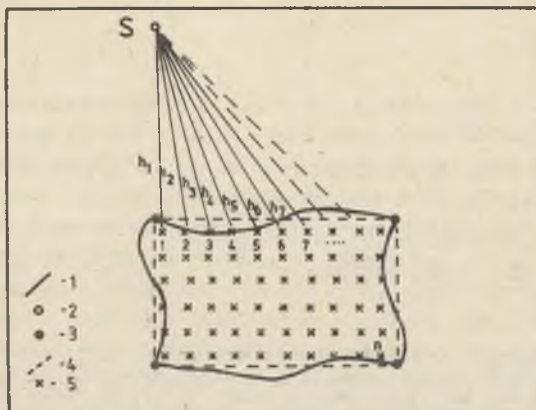
W artykule przedstawiono metodykę obliczania zasobów niesfałdowanych złóż węgla kamiennego, opartą na procedurze geostatystycznej. Podano formuły obliczeniowe oraz scharakteryzowano działanie pakietu programów obliczeniowych. Na złożu "Oświęcim-Polanka", rozpoznanym w kat. C₂ przeprowadzono obliczenia procedurą geostatystyczną. Wyniki badań dowodzą, że metoda ta może być również stosowana w odniesieniu do złóż rozpoznanych w kat. C₂. Wykazano, że przy obliczaniu zasobów tą metodą granice złoża (zasobów bilansowych i pozabilansowych) powinny być wyznaczone techniką krigingu punktowego.

WSTĘP

Przeprowadzone w ostatnich latach badania [2], [7], [8], [9], [10] dostarczyły cennych informacji o strukturze zmienności pokładów węgla kamiennego.

Pokłady węgla cechuje duża różnorodność struktur zmienności. Obserwuje się przy tym wyraźną prawidłowość: zmienność miąższości pokładów i zawartości siarki w węglu ma na ogół charakter nielosowy, a wartości opałowej i zawartości popiołu w węglu - losowy. Dominującymi modelami zmienności miąższości pokładów są model liniowy, liniowy Matherona oraz sferyczny (rys. 1). W konsekwencji w blisko położonych punktach rozpoznawczych obserwuje się wzajemne skorelowanie obserwacji miąższości pokładów. Interpretowany na podstawie semiwariogramów zasięg skorelowania jest zróżnicowany i wynosi od ok. 0,7 km do ok. 7,0 km. Nielosowy charakter zmienności parametrów pokładów

^{x)} Praca wykonana w ramach Centralnego Programu Badawczo-Rozwojowego 1.7.



Rys. 1. Schemat obliczania średniej wartości semiwariogramu $\bar{\gamma}(S, V)$ przy zastosowaniu emc

1 - oceniany blok (obszar), 2 - punkt rozpoznania złoża, 3 - punkty konturujące oceniany blok (obszar), 4 - kontur bloku (obszaru) przyjęty do obliczeń, 5 - punkty symulujące oceniany obszar (punkty zliczeń wartości semiwariogramu)

Fig. 1. Scheme of semivariogram mean values $\bar{\gamma}(S, V)$ calculation using computer

1 - estimated block (area), 2 - point of deposit exploration, 3 - points contouring of estimated block (area), 4 - block (area) boundary considered in calculation, 5 - points simulating the estimated area (points of totting of semivariogram values)

uzasadnia stosowanie metod geostatystycznych w ocenie złóż węgla kamiennego.

Uzyskane wyniki wskazują na możliwość wykorzystania geostatystycznej procedury, tzw. krigingu do szacowania zasobów złóż węgla i oceny średnich wartości parametrów pokładów. Przeprowadzone w warunkach złóż LZW badania [6] dowiodły efektywności tej metody.

Na kilku obszarach pola K1-K8 zastosowano technikę krigingu punktowego, szacując tą metodą miąższości pokładów węgla w wytypowanych otworach wiertniczych. Zanotowano wysoką zgodność oszacowanych i stwierdzonych wartości miąższości w punktach pomiarowych.

1. METODYKA SZACOWANIA ZASOBÓW

Kriging jest metodą, która umożliwia szacować wartości parametrów złoża w dowolnym jego punkcie (point kriging) lub średnich ich wartości w dowolnej części złoża (block kriging). Stosowanie tej metody jest szczególnie efektywne w przypadku skorelowania wartości parametrów złożowych w sąsiednich obserwacjach. Przy ocenie wykorzystuje się informacje o współzależności

między obserwacjami określonej przebiegiem semiwariogramu - funkcji $\hat{\gamma}(h)$, opisanej wzorem:

$$\hat{\gamma}(h) = \frac{1}{2n_h} \sum_{i=1}^{n_h} (z_{i+h} - z_i)^2$$

gdzie:

z_{i+h}, z_i - wartości parametru złożowego w punktach pomiarowych oddalonych o h ,

n_h - liczba par punktów pomiarowych oddalonych o h .

Określone na podstawie danych eksperymentalnych semiwariogramy empiryczne parametrów złożowych przybliża się za pomocą prostych funkcji analitycznych, które traktowane są jako geostatystyczne modele zmienności.

Dotychczasowe wyniki badań wskazują na celowość stosowania krigingu w warunkach złóż węgla kamiennego rozpoznanych w kat. A + B, C₁. Wynika to z zasięgu skorelowania obserwacji miąższości.

Kriging można stosować jednak tylko wtedy, gdy jest dostatecznie dużo danych do konstrukcji semiwariogramu. Model teoretyczny, który wykorzystywany jest w obliczeniach powinien być określony na podstawie co najmniej 30-50 par obserwacji [4]. Praktyka dowodzi, że w celu przeprowadzenia obliczeń zbiorów danych winien obejmować minimum 25-30 obserwacji.

Kriging pozwala szacować średnie wartości parametrów złoża z minimalnym błędem, którego wielkość każdorazowo można określić [4]. Średnią wartość parametru w wyznaczonym fragmencie złoża z_k^x wylicza się ze wzoru:

$$z_k^x = \sum_{i=1}^n a_i \cdot z_{v_i} \quad (1)$$

gdzie:

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

z_{v_i} - wartość badanego parametru złożowego w "i"-tej próbie o objętości v_i ,

n - liczba danych uwzględnionych w ocenie średniej wartości parametru.

Współczynniki wagowe wyznacza się na podstawie modelu semiwariogramu parametru złożowego z układu równań, które gwarantują nieobciążoność estymatora z_k^x oraz minimalizację błędu oszacowania średniej wartości parametru:

$$\sum_{j=1}^n a_j \cdot \bar{\gamma}(S_{v_i}, S_{v_j}) + \lambda = \bar{\gamma}(S_{v_i}, V) \quad (i = 1, \dots, n)$$

$$\sum_{i=1}^n a_i = 1$$

gdzie:

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

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

$$\sigma_k^2 = \sum_{i=1}^n a_i \cdot \bar{f}(S_{v_i}, V) - \lambda - \bar{f}(V, V) \quad (3)$$

gdzie:

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

W metodzie tej w celu dokonania oceny wartości średniej parametru konieczne jest wyliczenie układu równań (2), którego rozmiary determinowane są liczebnością uwzględnianych w ocenie obserwacji. Przy "n" danych układ równań krigingu obejmuje $n + 1$ równań z $n + 1$ niewiadomymi. Ocena jest więc możliwa przy stosunkowo niedużej liczbie obserwacji (ok. 40). Ilość informacji zależy z kolei w dużej mierze od wielkości obszaru, dla którego dokonuje się oszacowania. Ponadto obliczenia semiwariogramów prowadzi się do odległości $h < \frac{L}{2}$, gdzie L odpowiada największej odległości między obserwacjami. Uniemożliwia to dokonywanie ocen w granicach dużych bloków. Kriging jest zatem metodą, która pozwala szacować średnie wartości parametru w niewielkich partiach złoża. Ocenę globalną w granicach dużych jednostek lub w obszarze całego złoża przeprowadza się sumując efekty lokalnych ocen tą metodą.

Zastosowanie krigingu w warunkach niesfałdowanych złóż węgla kamiennego jest szczególnie dogodne. Do obliczania zasobów tych złóż powszechnie wykorzystuje się metodę bloków geologicznych: złożo dzieli się na małe jednostki, tzw. parcele obliczeniowe, dla których oddzielnie określa się zasoby. Za pomocą procedury geostatystycznej istnieje możliwość szacowania średniej miąższości pokładu w pojedynczych parcelach i obliczania w nich zasobów. Zasoby w ocenianym bloku wynoszą wówczas:

$$Q = F \cdot \bar{m}_k \cdot \rho_0$$

(4)

gdzie:

- F - powierzchnia parceli,
 \bar{m}_k - średnia miąższość pokładu bez przerostów ustalona metodą krigingu,
 $\bar{\rho}_O$ - gęstość przestrzenna węgla,

a ich względny błąd oszacowania określa wzór:

$$\frac{\sigma_Q}{Q} = \sqrt{\frac{\sigma_{m_k}^2}{\bar{m}_k^2} + \frac{\sigma_{\rho_O}^2}{\bar{\rho}_O^2} + \frac{\sigma_F^2}{F^2}} \quad (5)$$

gdzie:

- σ_{m_k} - błąd oceny średniej miąższości pokładu metodą krigingu,
 $\sigma_{\rho_O}, \sigma_F$ - błędy oceny średniej gęstości przestrzennej węgla i powierzchni bloku obliczeniowego.

Na dokładność szacowania zasobów w głównej mierze rzutuje błąd określenia średniej miąższości pokładu węgla. Błędy ponoszone z tytułu oceny gęstości przestrzennej węgla oraz pomiaru powierzchni parceli są znacznie mniejsze od błędu oceny miąższości pokładu. Zmienność gęstości przestrzennej jest dużo mniejsza niż zmienność miąższości. Badania statystyczne wykazują, że dla pojedynczego pokładu w granicach kopalni gęstość przestrzenna węgla charakteryzuje się bardzo małą zmiennością, zwykle nie większą niż 10% (znacznie mniejszą niż pozostałe parametry pokładu). Z tego względu przy obliczaniu zasobów przyjmuje się średnią wartość gęstości przestrzennej węgla, stałą dla całego złoża, różnicując jej wartość jedynie w zależności od typu węgla. Dla węgla niskopopiołowych przyjmuje się $\bar{\rho}_O = 1,3$, a dla węgla wysokopopiołowych $\bar{\rho}_O = 1,4$ (t/m³). Błąd oceny średniej gęstości przestrzennej węgla w pojedynczych blokach obliczeniowych nie powinien przekraczać kilku procent. Zagadnienie dokładności pomiaru powierzchni przy obliczaniu zasobów szczegółowo analizował A. Guziel [3]. Według niego sumaryczny błąd względny pomiaru powierzchni (obejmujący dokładność lokalizacji otworów, naniesienia ich na mapę oraz planimetrywania powierzchni) wynosi dla skali 1:1000 od ok. 1,5% dla powierzchni 2500 m² do 0,75% dla powierzchni 10000 m², a więc na ogół nie przekracza 2%. Można więc przyjąć, że:

$$\frac{\sigma_Q}{Q} \approx \frac{\sigma_{m_k}}{\bar{m}_k} \quad (6)$$

Przy założeniu normalności rozkładu błędu oceny miąższości możemy oczekiwać, że z prawdopodobieństwem 95,5% średnia miąższość pokładu oszacowana metodą krigingu będzie się różnić od rzeczywistej o wartość nie większą niż $\pm 2 \sigma_{m_k}$ [4]. Można więc przyjąć, że maksymalny prawdopodobny błąd oszacowania zasobów w parceli obliczeniowej wynosi:

$$\varepsilon_Q = \frac{2\sigma_{m_k}}{\bar{m}_k} \cdot 100\% \quad (7)$$

Ocena zasobów metodą geostatystyczną obejmuje dwa zasadnicze etapy:

- wyliczenie semiwariogramu empirycznego miąższości pokładu bez przerostów na podstawie wyników pomiarów parametru we wszystkich punktach rozpoznawczych (otworach wiertniczych, punktach opróbowania i pomiaru miąższości) oraz jego aproksymację modelem teoretycznym,
- oszacowanie średniej miąższości pokładu oraz obliczenie zasobów i ocene dokładności ich oszacowania.

W celu usprawnienia obliczeń opracowano w Zakładzie Geologii Górniczej AGH w Krakowie pakiet programów na mikrokomputer serii IBM. Obejmuje on trzy programy o nazwach: WARI, KRIG, MAPA. Program WARI służy do obliczania semiwariogramów w przestrzeni dwuwymiarowej. Umożliwia obliczać semiwariogramy w dowolnych kierunkach przy regularnie i nieregularnie rozmieszczonych danych, a także wyliczać uśrednione dla obszarów semiwariogramy. Program KRIG przeznaczony jest do szacowania średnich wartości parametrów złoża w wydzielonych jego partiach (parcelach obliczeniowych).

Ocena dokonywana jest metodą średniej arytmetycznej i krigingiem. Równocześnie wyliczane są błędy oszacowań objęma metodami. Obliczenia mogą być realizowane przy liniowym, liniowym Matherona lub sferycznym modelu zmienności parametru.

Program MAPA służy do sporządzania map izolinii. Jako procedurę interpolacyjną zastosowano kriging punktowy. W wyniku obliczeń otrzymywane są mapy izarytm parametru oraz mapy błędów interpolacji.

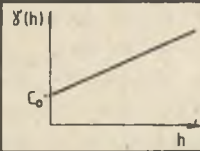
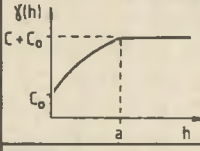
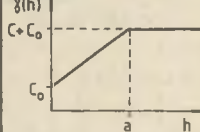
Aproksymację semiwariogramów empirycznych modelami teoretycznymi można przeprowadzić sposobem graficznym wyznaczając z wykresu parametry modelu oraz metodą najmniejszych kwadratów realizując obliczenia na emc. Odrębna aproksymacja daje w praktyce zadowalającą dokładność. W przypadku aproksymacji przeprowadzonej metodą najmniejszych kwadratów poszczególnym wartościom semiwariogramu empirycznego należy przypisać wagi proporcjonalne do ilości par obserwacji, na podstawie których zostały wyliczone.

Przy dopasowywaniu modeli teoretycznych przedstawionych na rys. 1 należy przestrzegać następujących zasad:

- wartość C_0 powinna odpowiadać wartości semiwariogramu w punkcie przecięcia się wykresu modelu z osią rzędną,
- wartość "a" w modelach: sferycznym i liniowym Matherona jest to odległość h między obserwacjami, po przekroczeniu której wartości $\gamma(h)$ mają wartość stałą (wartości semiwariogramu empirycznego wahają się wokół prostej równoległej do osi odciętych),
- wartość $C + C_0$ w modelach sferycznym i liniowym Matherona odpowiada wartości semiwariogramu dla $h = a$,

- w modelu sferycznym styczna do wykresu modelu teoretycznego poprowadzona z punktu C_0 powinna osiągnąć wartość $C + C_0$ w punkcie o odciętej $h = 2/3 a$.

Przy szacowaniu średniej miąższości w obrębie bloku - ze względu na skorelowanie obserwacji - możliwe jest wykorzystanie informacji z punktów leżących poza jego granicami. W ocenie wystarczy ograniczyć się do obserwacji punktów najbliższej usytuowanych, występujących w zasięgu promienia skorelowania "a" (rys. 1). Punkty znajdujące się w odległości wykraczającej poza zakres obliczeń semiwariogramu lub poza zakres stosowalności przyjętego modelu zmienności nie mogą być uwzględniane w procedurze kriginu. W ocenie mogą zostać pominięte punkty rozpoznania "zasłonięte" przez inne bliżej leżące; uwzględnianie ich - jak wykazały badania - nie przynosi zwiększenia dokładności oceny. Zasadę doboru punktów rozpoznania, które mają być wykorzystane do oceny złoża w bloku obliczeniowym, przedstawia rys. 2.

Model	Wykres semiwariogr.	Równanie
Liniowy		$\gamma(h) = C_0 + b \cdot h$
Sferyczny		$\gamma(h) = C \left[\frac{3}{2} \frac{h}{a} - \frac{h^3}{2a^3} \right] + C_0$ dla $h \leq a$ $\gamma(h) = C_0 + C = \delta^2$ dla $h \geq a$
Liniowy Matherona		$\gamma(h) = C_0 + \frac{C}{a} \cdot h$ dla $h \leq a$ $\gamma(h) = C_0 + C = \delta^2$ dla $h \geq a$

Rys. 2. Typowe modele zmienności miąższości pokładów węgla

C_0 - wartość wyrażająca zmienność lokalną parametru, $C_0 + C$ - amplituda semiwariogramu równa wariancji teoretycznej, a - zasięg semiwariogramu (zasięg autokorelacji)

Fig. 2. Typical coal seams thickness variability models

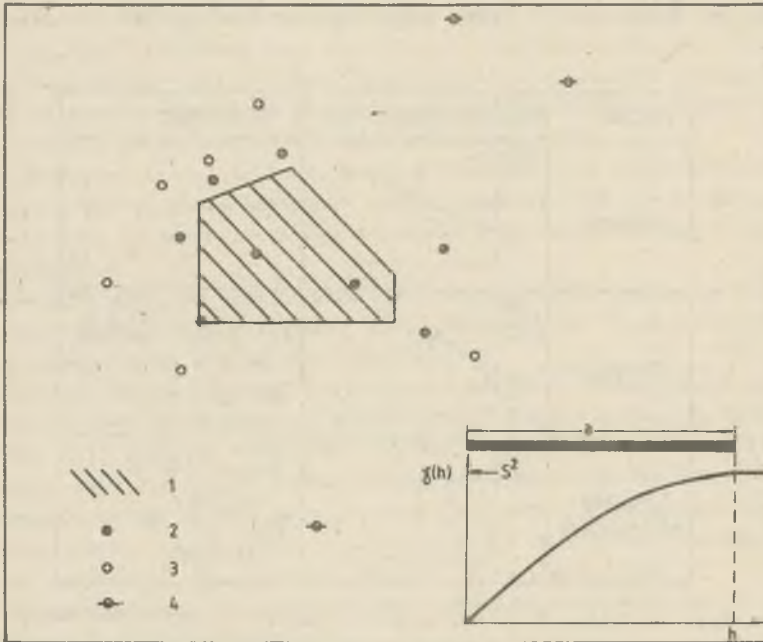
C_0 - value expressing local thickness variability, $C + C_0$ - semivariogram sill value, a - range of semivariogram (autocorrelation)

W programie KRIG przyjęto dwuwymiarowy model estymacji. Obliczenia prowadzone są w przestrzeni dwuwymiarowej, tj. na płaszczyźnie (x, y).

W związku z tym bloki obliczeniowe traktowane są jako figury płaskie, a otwory oraz obserwacje dołowe w wyrobiskach górniczych - jako punkty pomiaru

parametru. W sytuacji niesfałdowanych pokładów węgla takie uproszczenie jest możliwe do przyjęcia zarówno przy szacowaniu średniej miąższości pokładu, jak i przy ocenie średnich wartości parametrów jakościowych węgla z uwagi na znikomą objętość rdzenia wiertniczego oraz prób bruzdowych w stosunku do objętości ocenianego bloku. Pola obliczeniowe zasobów określa się współzrzednymi punktów konturujących. Punkty te winny być lokalizowane na linii ograniczającej oceniany obszar w miejscach jej załamania.

Średnie wartości semiwariogramu, zdefiniowane wyrażeniami: $\bar{\gamma}(S, V)$, $\bar{\gamma}(V, V)$ - będące elementami układu równań Krigingu oraz wzoru na wariancję krigingu - są ustalane metodą dyskretnej symulacji. Pole obliczeniowe zadaje się na emc współzrzednymi punktów przecięcia się linii konturujących. Oceniany obszar traktowany jest jako zbiór punktów równo w nim rozmieszczonych (rys. 3).



Rys. 3. Zasady doboru obserwacji przy ocenie złoża metodą krigingu

a - zasięg autokorelacji, 1 - oceniany blok, 2 - punkty rozpoznania uwzględnione przy ocenie złoża, 3, 4 - punkty rozpoznania nie uwzględnione przy ocenie złoża z powodu: (3) - niekorzystnego położenia względem bloku (pozostają w cieniu punktów 2), (4) - zbyt dużej odległości od bloku, przekraczającej zasięg autokorelacji, s^2 - wariancja statystyczna

Fig. 3. Rules of observations selection for block kriging

a - auto-correlation range, 1 - estimated block, 2 - exploratory points considered in deposit estimation, 3, 4 - exploratory points ruled out because of: (3) inconvenient position in relation to the estimated block (lie in "shadow" of points 2), (4) the distance from a block exceeding the auto-correlation range, s^2 - dispersion variance

Średnia wartość semiwariogramu $\bar{\gamma}(V, V)$ ustalana jest poprzez uśrednienie wartości funkcji $\gamma(h)$, wyliczonych między wszystkimi punktami zadawanej siatki, która ulega kolejnym zagęszczeniom. Obliczenia prowadzone są do momentu, aż spełniony jest warunek, zapewniający dostatecznie dokładne wyliczenie wartości $\bar{\gamma}(V, V)$:

$$\frac{|\bar{\gamma}_{i-1}(V, V) - \bar{\gamma}_i(V, V)|}{\bar{\gamma}_i(V, V)} \cdot 100\% \leq \% \epsilon_1 \quad (8)$$

gdzie:

i - etap zagęszczenia punktów symulujących oceniany obszar,

$\% \epsilon_1$ - zadawana dokładność obliczeń (na ogół 5%).

Wartości $\bar{\gamma}(S, V)$ ustalane są w podobny sposób. Wartości $\bar{\gamma}(S, V)$ i $\bar{\gamma}(V, V)$ wyliczane są z określonym błędem, którego wielkość zależy od założonej dokładności $\% \epsilon_1$ w procedurze symulacji, a w przypadku pól obliczeniowych o nieregularnych krzywoliniowych granicach - także od dokładności okonturowania. Wielkość błędu $\% \epsilon_1$ jest z góry znana, zadawana w programie komputerowym. W obliczeniach często przyjmuje się $\epsilon_1 = 5\%$. Błąd ten wpływa w sposób nieznaczny na wynik końcowy obliczeń, tj. na wyliczoną wartość średnią parametru \bar{m}_k oraz na wielkość błędu krigingu σ_k . Informacji o wielkości błędu ponoszonego z tytułu niedokładnego opisu granic pól obliczeniowych dostarczają przeprowadzone badania [5].

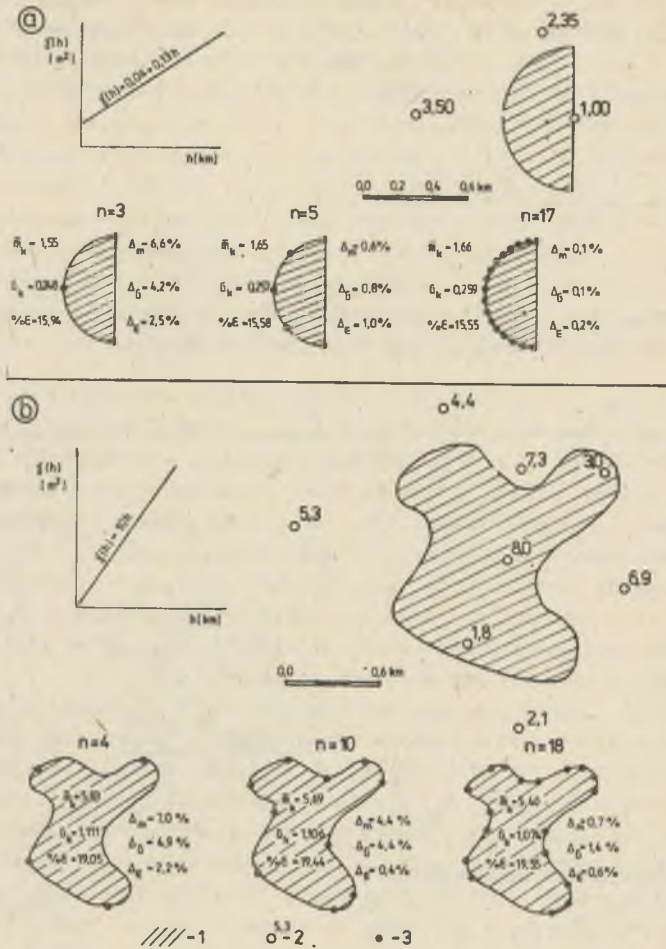
Analizując różnice pomiędzy wynikami obliczeń, uzyskiwanymi przy kolejnych etapach zagęszczania punktów konturujących, rozpatrzono wpływ liczebności punktów na wynik obliczeń metodą krigingu. Badano zróżnicowanie estymatora wartości średniej \bar{m}_k , wielkości błędu krigingu σ_k , a także względnego błędu oszacowania $\% \epsilon$. Obliczenia przeprowadzono dla różnych sytuacji szacowania, w których przyjęto odmienne modele zmienności miąższości pokładu oraz różny kształt pól obliczeniowych. Przyjęto 5-6 etapów zagęszczania punktów konturujących. W pierwszej kolejności (etapie) punkty te sytuowano w miejscach wyraźnych zmian przebiegu granic obszaru, a następnie (w kolejnych etapach) w coraz to mniej wyraźnie zaznaczających się załamaniem linii ograniczającej oceniany obszar (rys. 4). Dokładność obliczenia parametru (\bar{m}_k , σ_k , $\% \epsilon$) ustalono ze wzoru:

$$\Delta_P = \frac{|P_i - P_m|}{P_m} \cdot 100\% \quad (9)$$

gdzie:

P_i - wartość parametru w "i"-tym etapie zagęszczania punktów konturujących obszar,

P_m - wartość parametru wyliczona przy największej liczbie punktów konturujących (przy 40-50 punktach).



Rys. 4. Wpływ geometryzacji obszaru na wynik obliczeń metodą kriginu
 a, b - sytuację szacowania, 1 - oceniany blok, 2 - obserwacje miąższości pokładu uwzględnione w ocenie, 3 - punkty konturujące oceniany blok, n - liczba punktów konturujących blok, \bar{m}_k - średnia miąższość pokładu według oceny kriginem, σ_k - błąd kriginu, $\% \varepsilon$ - względny błąd oszacowania miąższości pokładu, Δ_m - błąd wyliczenia wartości \bar{m}_k , Δ_σ - błąd wyliczenia σ_k , Δ_ε - błąd wyliczenia wartości $\% \varepsilon$

Fig. 4. Influence of area geometrizing on kriging results
 a, b - block kriging examples, 1 - estimated block, 2 - measured seam thickness, 3 - points contouring the estimated block, n - number of contouring points, \bar{m}_k - mean seam thickness estimated by kriging, σ_k - kriging error, $\% \varepsilon$ - relative error of seam thickness estimation, Δ_m - error of \bar{m}_k value calculation, Δ_σ - error of σ_k value calculation, Δ_ε - error of $\% \varepsilon$ value calculation

Jak wynika z badań, w przypadku szacowania zasobów w parcelach o bardzo nieregularnych kształtach, maksymalny błąd w obliczeniach może dochodzić do ok. 10% z tytułu niedostatecznego okonturowania. W analizowanych sytuacjach przy niewielkiej liczbie punktów konturujących (3-5) dokładność obliczeń wynosiła 0,5-8% (rys. 4).

Wraz ze wzrostem stopnia zagęszczenia punktów konturujących znacznie wzrasta dokładność wyliczania wartości \bar{m}_k , σ_k , $\% \epsilon$. Na ogół okonturowanie powierzchni parceli 8-15 punktami zapewnia bardzo wysoką dokładność obliczeń (< 1%). Zastosowanie specjalnego urządzenia o nazwie Digitizer do automatycznego odczytywania współrzędnych winno usprawnić prowadzenie obliczeń metodą krigingu. Za pomocą tego urządzenia można dokładnie konturować pola obliczeniowe i tym samym automatycznie wyliczać ich powierzchnie.

Procedura geostatystyczna może być stosowana również do złóż sfałdowanych. W obliczeniach należy wówczas uwzględnić zmiany kąta upadu pokładu. Aktualnie w Zakładzie Geologii Górniczej AGH prowadzone są prace nad zastosowaniem metody geostatystycznej w ocenie sfałdowanych złóż węgla kamiennego.

2. PRZYKŁAD ZASTOSOWANIA KRIGINGU

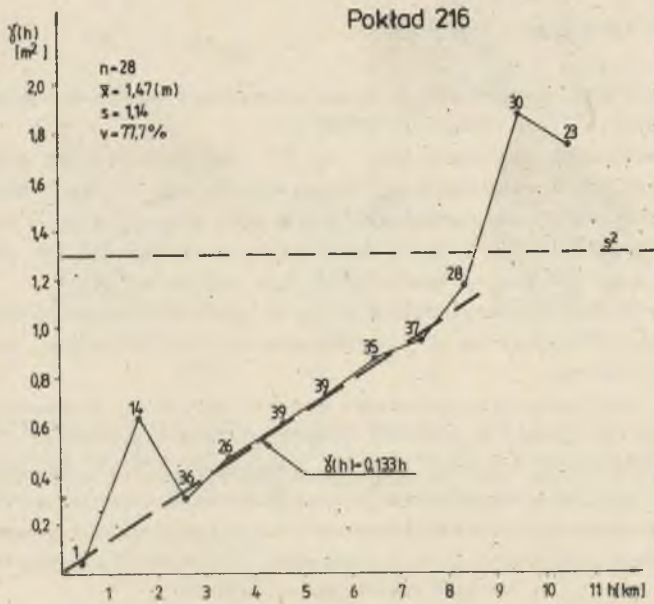
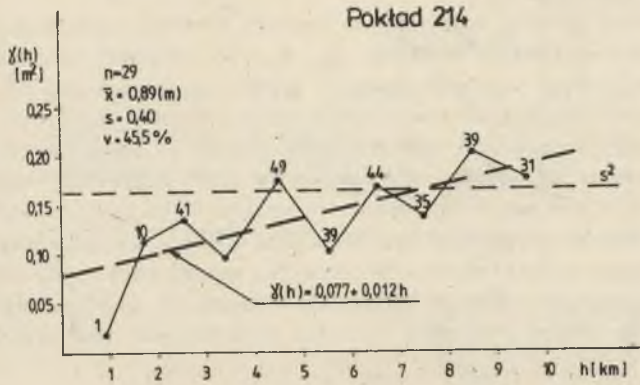
Procedurę krigingu zastosowano do oceny miąższości pokładów węgla występujących na obszarze złoża "Oświęcim-Polanka".

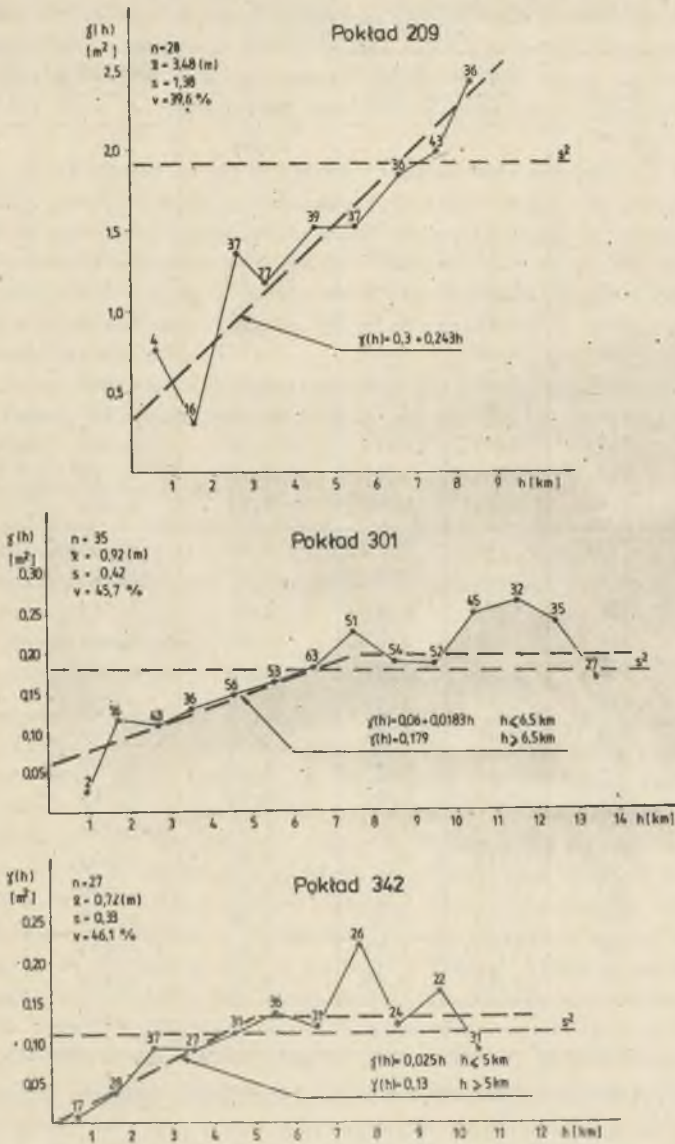
Złoże udokumentowane zostało w kat. C_2 [1]. Położone jest na granicy województw bielskiego i katowickiego. Powierzchnia jego 133 km². Badane złoże leży na obszeżu południowego skrzydła niecki głównej GZW, w związku z czym utwory karbońskie zalegają tu monoklinalnie. Zapadanie ich jest łagodne w kierunku północnym i północno-wschodnim pod kątem 4-12°.

Złoże "Oświęcim-Polanka" rozpoznane zostało otworami wiertniczymi. Sieć wierzeń nie jest całkowicie regularna. Odległości między otworami wahają się od 1300-3000 metrów.

W pierwszej kolejności przeprowadzono badania struktury zmienności złoża. Dokonano analizy zmienności miąższości pięciu wybranych pokładów: 209, 214, 216, 301, 342. Określono wartości liczbowe podstawowych miar zmienności, tj. średnią arytmetyczną, odchylenie standardowe, współczynnik zmienności. W ramach geostatystycznego opisu wyliczono semiwariogramy analizowanych parametrów, a następnie dokonano ich aproksymacji prostymi funkcjami teoretycznymi (rys. 5).

Badane pokłady charakteryzują się różną zmiennością. Najmniej zmienny jest pokład 209 ($v = 39,6\%$). Większą zmienność wykazują pokłady: 214, 301, 342 ($v = 45,5-46,1\%$). Bardzo zmienny jest pokład 216 ($v = 77,7\%$). Każdy pokład charakteryzuje się odmiennym stylem zmienności, co przejawia się w różnych postaciach modeli semiwariogramów lub w różnych wartościach ich parametrów. Wszystkie semiwariogramy miąższości mają charakter nielosowy, co uwidacznia się wyraźnie zaznaczoną tendencją wzrostową ich wartości wraz ze





Rys. 5. Semiwariogramy miąższości pokładów węgla bez przerostów

n - liczba obserwacji, \bar{x} - średnia arytmetyczna, s - odchylenie standardowe, v - współczynnik zmienności, s^2 - wariancja statystyczna

Fig. 5. Semivariograms of pure coal seams thickness (without barren intercalations)

n - number of observations, \bar{x} - arithmetic mean, s - standard deviation, v - variation coefficient, s^2 - dispersion variance

Tabela 1

Zestawienie wyników oceny miąższości pokładów węgla krigingiem i metodą przyjętą w dokumentacji

Numer pokładu	Numer bloku (parceli oblicz.)	Średnia miąższość pokładu (m)		Zróżnicowanie wyników oceny $ \bar{m}_O - \bar{m}_K $	Dokładność oszacowania metodą krigingu	
		\bar{m}_O	\bar{m}_K		$2\sigma_k$ (m)	% ϵ
209	3	0,90	0,86	0,04	0,791	92,0
	201	0,90	2,05	1,15	1,660	81,0
	209	1,25	1,92	0,67	0,978	51,0
	402	4,80	4,12	0,68	1,046	25,4
	406	2,50	2,62	0,12	0,914	34,9
	407	2,35	2,50	0,15	0,768	30,8
	411	3,95	4,13	0,18	0,890	21,6
	419	2,55	3,13	0,58	0,986	31,5
	609	2,55	2,69	0,14	0,979	36,5
616	2,40	2,73	0,33	0,944	34,6	
301	4	1,10	1,10	0,00	0,249	22,6
	204	1,00	0,67	0,33	0,367	54,5
	206	1,05	0,80	0,20	0,364	45,6
	211	1,30	1,24	0,06	0,291	23,5
	401	1,10	0,81	0,29	0,335	41,2
	411	0,90	1,08	0,18	0,335	31,1
	604	0,90	0,95	0,05	0,303	32,0
	605	0,75	0,89	0,14	0,300	33,5
	606	0,90	0,93	0,03	0,279	29,9
	610	1,35	1,40	0,05	0,298	21,2
	613	1,15	1,12	0,03	0,252	22,5
	802	0,75	0,91	0,16	0,336	36,9
	809	0,90	0,70	0,20	0,339	48,2
	815	0,95	1,03	0,08	0,325	31,5
1002	0,90	0,85	0,05	0,440	51,9	

\bar{m}_O - średnia miąższość pokładu węgla bez przerostów wg dokumentacji,

\bar{m}_K - średnia miąższość pokładu węgla bez przerostów wg oceny krigingiem,

σ_k - błąd krigingu, % ϵ - względny błąd oceny (przy poziomie ufności

$1 - \alpha = 95,5\%$) wyliczony ze wzoru (7).

wzrostem odległości między punktami pomiarów (otworami). Zmienność miąższości pokładów 209, 214, 216 charakteryzuje liniowy model semiwariogramu, natomiast zmienności miąższości pokładów 301, 342 - model liniowy Matherona. Zasięgi wzajemnego skorelowania obserwacji miąższości węgla są duże, wynoszącą od 5,0-8,5 km i są zbliżone do obserwowanych na innych złożach węgla [9], [10].

Uzyskane wyniki wskazują na możliwość i celowość zastosowania kriginu do oszacowania zasobów węgla w analizowanych pokładach.

Stosując procedurę kriginu oszacowano miąższość węgla w wybranych parcelach obliczeniowych pokładów 209 i 301 charakteryzujących się odmienną strukturą zmienności (rys. 5). Obliczenia zrealizowano na minikomputerze korzystając z programu KRIG. Wyniki obliczeń zestawiono z danymi z dokumentacji geologicznej w tabeli 1.

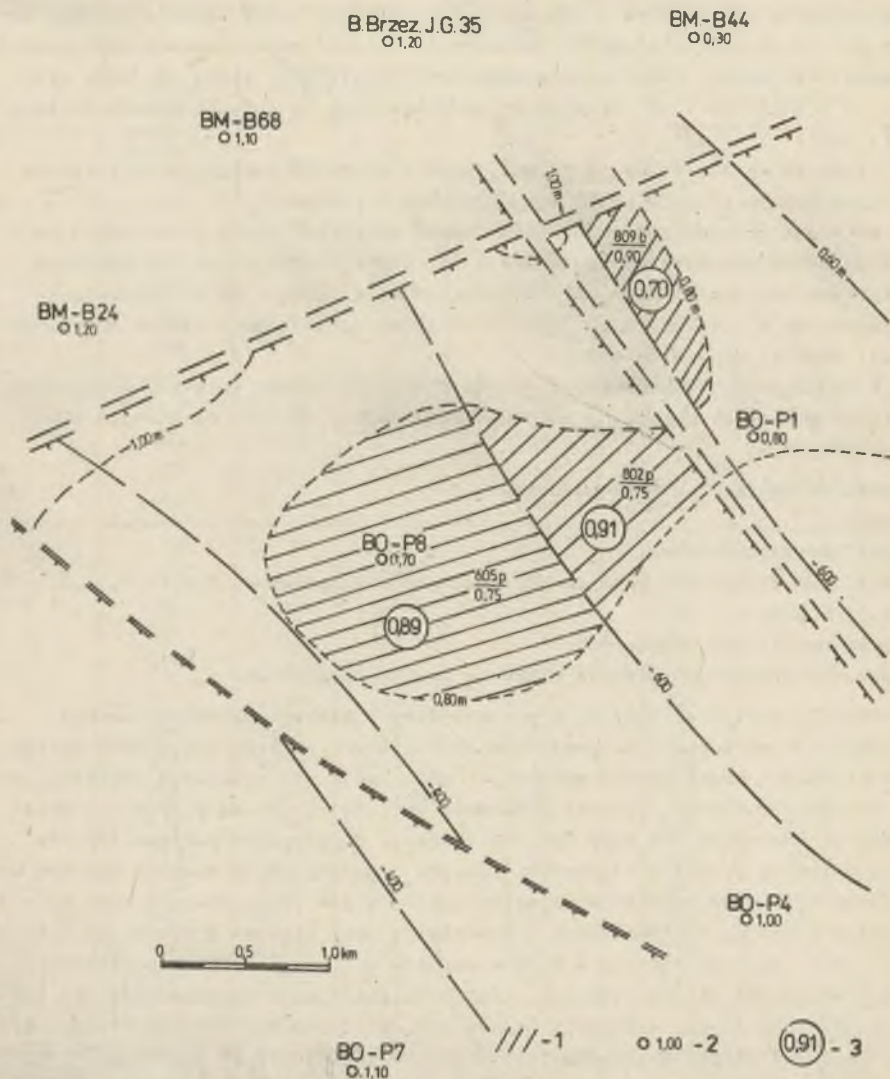
W sporządzonej dokumentacji geologicznej [1] zasoby kopaliny w poszczególnych pokładach obliczono metodą bloków geologicznych, za granicę których przyjęto:

- granicę dokumentowanego obszaru,
- uskoki,
- poziomy obliczeniowe,
- izoliny miąższości pokładu poprowadzone w interwałach 0,6, 0,8, 1,0, 1,5, 3,0 m,
- granice filarów ochronnych,
- granicę występowania węgla nisko- i wysokopopiołowego.

Średnią miąższość pokładu w poszczególnych blokach określono metodą średniej arytmetycznej na podstawie najbliższych punktów stwierdzeń pokładu, a w przypadku braku blisko położonych obserwacji - z przebiegu izoliny.

Pomiędzy wynikami obliczeń procedurą kriginu i metodą przyjętą w dokumentacji obserwuje się dość istotne różnice. W przypadku pokładu 301 różnice w ocenie średniej miąższości pokładu w pojedynczych blokach wynoszą od 0,03 do 0,33 m. W pokładzie bardziej zmiennym 209 zróżnicowanie ocen kriginem i metodą zastosowaną w dokumentacji jest większe i wynosi od 0,04 do 1,15 m. Daje to różnice w ocenie zasobów w typowym bloku o powierzchni 1 km² wysokości ok. 30-1150 tys. ton. Największe różnice obserwuje się w tych partiach złoża, w których otwory rozmieszczone są skrajnie nierregularnie względem siebie i ocenianych bloków, zwłaszcza gdy są one rozpoznane niewielką liczbą otworów. Dotyczy to szczególnie bloków usytuowanych blisko konturu złoża.

Zwracają uwagę wyraźne różnice w ocenie miąższości pokładu w blokach, których granice stanowi izolina 0,8 m odpowiadająca bilansowej miąższości pokładu (rys. 6). Pociąga to za sobą rozbieżności w ocenie złoża bilansowego. Według oceny kriginem w pozabilansowych blokach 605, 802 okonturowanych izolinią 0,8 m średnia miąższość pokładu 301 wynosi odpowiednio 0,89 i 0,91 m. Z kolei w przyległym do nich bilansowym bloku 809 średnia miąższość pokładu oszacowana metodą kriginu wynosi 0,70 m, a więc mniej niż



Rys. 6. Wyniki oszacowań w blokach ograniczonych izoliną bilansowej miąższości pokładu

1 - oceniane bloki, 2 - miąższość pokładu stwierdzona w otworze wiertniczym,
3 - średnia miąższość pokładu oszacowana metodą krigingu

Fig. 6. Kriging results in blocks limited by isoline of payable thickness value

1 - estimated block, 2 - measured seam thickness in a borehole, 3 - mean seam thickness estimated by kriging

kryterium bilansowości. Według oceny geostatystycznej granice złoża bilansowego mają więc inny przebieg. Dowodzi to, że przy obliczaniu zasobów metodą kriginu granice złoża powinny być wyznaczone techniką kriginu punktowego.

Zmienna geometria bloków i sieci rozpoznawczej sprawia, iż są one rozpoznane z różną dokładnością. Błąd oceny średniej miąższości węgla w pojedynczych blokach pokładu 209 waha się od $\pm 0,77$ do $\pm 1,66$ m (z prawdopodobieństwem 95%). Wyrażony w jednostkach względnych wynosi od 21,6 do 92,0%. Z większą dokładnością udokumentowane są zasoby pokładu 301. Błędy oszacowania średniej miąższości pokładu w poszczególnych blokach wynoszą od $\pm 0,25$ m do $\pm 0,44$ m, a w jednostkach względnych od 21,2 do 54,5%.

WNIOSKI

1. Analiza zmienności pokładów węgla złoża "Oświęcim-Polanka" potwierdziła wyniki wcześniejszych badań co do nielosowego charakteru zmienności miąższości pokładów oraz zindywidualizowania pokładów w zakresie ich struktury zmienności.

2. Wyniki badań wskazują na możliwość i celowość zastosowania geostatystycznej procedury obliczania zasobów - kriginu przy dokumentowaniu złóż węgla kamiennego. Metoda ta może być stosowana zarówno na etapie rozpoznania szczegółowego (A + B, C₁), jak i wstępnego w kat. C₂. Zastosowanie tej metody stwarza możliwość pozyskiwania dokładniejszych informacji o zmienności pokładów węgla, a tym samym dokładniejszej oceny zasobów. Metoda ta w odróżnieniu od dotychczas stosowanych daje możliwość oceny dokładności oszacowania zasobów (miąższości pokładu) w pojedynczych parcelach obliczeniowych, co może być pomocne w klasyfikowaniu zasobów do odpowiedniej kategorii rozpoznania, a także przy planowaniu lub prowadzeniu eksploatacji.

3. Zasoby powinny być obliczane oddzielnie dla poszczególnych pokładów na podstawie wyników geostatystycznej oceny ich zmienności. Obliczanie zasobów metodą kriginu obejmuje dwa zasadnicze etapy:

- wyliczenie semiwariogramu empirycznego miąższości pokładu i dopasowanie do niego modelu teoretycznego,
- oszacowanie średniej miąższości pokładu w pojedynczych parcelach i obliczenie w nich zasobów wraz z oceną dokładności oszacowania.

4. Przy szacowaniu zasobów metodą geostatystyczną izolinie bilansowej i pozabilansowej miąższości pokładu (granice zasobów bilansowych i pozabilansowych) powinny być wyznaczone procedurą kriginu punktowego.

5. Błędy popełniane przy wyliczaniu wartości $\bar{F}(S, V)$ i $\bar{F}(V, V)$ z tytułu symulacji pól obliczeniowych, a także ich geometryzacji są nieznaczące i w niewielkim stopniu wpływają na końcowy wynik obliczeń metodą kriginu. W celu zapewnienia wysokiej dokładności obliczeń parcele o bardzo nieregularnych i krzywoliniowych granicach powinny być konturowane 8-15 punktami.

Zastosowanie specjalnego urządzenia do automatycznego odczytywania współrzędnych (Dygitizer) winno usprawnić prowadzenie obliczeń tą metodą.

LITERATURA

- [1] Dokumentacja geologiczna złoża węgla kamiennego "Oświęcim-Polanka" w kat. C₂. Arch. Przeds. Geol., Katowice 1987.
- [2] Dzedzej Cz., Kaziuk H.: Próba klasyfikacji zmienności miąższości pokładu w oparciu o model geostatystyczny. Mat. Konf. Matem. Met. i Techn. Komput. w Górn., t. III, Szklarska Poręba 1987.
- [3] Guziel A.: Analiza dokładności ustalania ilości zasobów. Przegl. Geol., nr 3, 4. Warszawa 1961.
- [4] Journel A.G., Huijbregts Ch.I.: Mining Geostatistics. London, New York, San Francisco 1978.
- [5] Kokesz Z., Dolik M.: Opracowanie zasad stosowania krigingu w szacowaniu zasobów niesfałdowanych złóż węgla kamiennego. Sprawozdanie z badań w roku 1987. Maszynopis. Archiwum IHiGI AGH, Kraków 1987.
- [6] Kokesz Z., Mucha J.: Prognozowanie wartości parametrów złóż węgla metodą krigingu w warunkach LZW. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, s. Górnictwo, z. 155, Gliwice 1987.
- [7] Mikrut J.: Możliwości i korzyści ze stosowania metod geostatystycznych w geologii. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, s. Górnictwo, z. 149, Gliwice 1986.
- [8] Mikrut J., Polak P.: Próba zastosowania metod geostatystycznych do oceny parametrów pokładu 404 w KWK Wieczorek. Mat. Konf. Matem. Met. i Techn. Komput. w Górn., t. III, Szklarska Poręba 1987.
- [9] Mucha J., Nieć M., Kokesz Z., Górecki J., Blajda R.: Geostatystyczna analiza zmienności pokładów węgla kamiennego. Maszynopis. Archiwum IHiGI AGH, Kraków 1984.
- [10] Mucha J., Kokesz Z.: Zastosowanie geostatystyki i krigingu w ustalaniu zasobów węgla kamiennego i prognozowaniu parametrów złoża. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, s. Górnictwo, z. 149, Gliwice 1986.

Recenzent: doc. dr hab. inż. Józef Bendkowski

Wpłynęło do redakcji w kwietniu 1988 r.

ГЕОСТАТИСТИЧЕСКАЯ ПРОЦЕДУРА ПОДСЧЕТА ЗАПАСОВ
НЕСКЛАДЧАТЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ КАМЕННОГО УГЛЯ

Р е з ю м е

Неслучайный характер изменчивости мощности пластов даёт возможность применения геостатистической процедуры называемой кригингом в оценке средних значений этого параметра тоже самым в оценке запасов месторождений каменного угля.

Кригинг позволяет оценивать значения пластовых параметров допуская минимальную ошибку величину которой можно всегда определить. Результаты исследований полученные до сих пор показывают на целесообразность применения этого метода в условиях каменного угля разведённых по категориям A+B, C₁. В статье представлен метод подсчета запасов нескладчатых залежей каменного угля основанный на геостатистической процедуре. Даны расчётные формулы представлены также алгоритмы вычислительных программ. На месторождении "Oświęcim Polanka" разведённым по категории C₂ применено геостатистический метод. Полученные результаты показывают на возможность применения этого метода тоже в условиях залежей каменного угля разведённых по категории C₂. Доказано, что для проведения подсчета запасов контур месторождений (балансовых и забалансовых запасов) должен быть определённый методом точечного кригинга.

GEOSTATISTICAL RESERVES CALCULATION OF UNFOLDED HARD
COAL DEPOSITS

S u m m a r y

Non random thickness variability of hard coal seams makes possible to apply geostatistical procedure (kriging) for estimation of mean thickness and coal resources. Kriging allows to estimate the mean values of seam parameters with minimal error which can be determined. The method can be applied if there is enough data for calculation so most often at the advanced stages of exploration in A + B, C₁ category.

The paper presents geostatistical methodology of reserves calculation of unfolded coal deposits. The calculation formulas and computer programmes are presented. The method was tested on Oświęcim-Polanka coal deposit explored in C₂ category. It was found that kriging could be also applied at such preliminary stages of deposit investigation. It was demonstrated that point kriging should be used for determination of economic reserves (interpolation of cut off coal thickness).