

Zbigniew KOKESZ*

Anizotropia i niejednorodność złóż w świetle badań geostatystycznych

Streszczenie: W artykule przedstawiono wyniki geostatystycznych badań struktury zmienności złóż kopalin stałych. Szczególną uwagę zwrócono na kierunkowe i obszarowe zróżnicowanie zmienności parametrów złożowych.

Stwierdzono, że złoża mogą cechować się różnym typem anizotropii i niejednorodnością. Anizotropia, jak i obszarowe zróżnicowanie struktury zmienności parametrów złożowych, znajdują najczęściej wytłumaczenie w budowie geologicznej złóż.

Badania wskazują na potrzebę głębszego analizowania struktur zmienności złóż i uwzględniania jej wyników przy projektowaniu prac rozpoznawczych, ocenie jakości kopaliny, szacowaniu zasobów, a także przy prowadzeniu eksploatacji.

Słowa kluczowe: złoża kopalin, geostatystyka, anizotropia, niejednorodność

Anisotropy and heterogeneity of mineral deposits in the light of geostatistical studies

Abstract: The results of geostatistical studies of variability structures of selected mineral deposits have been presented in the paper. Special attention has been paid to anisotropy and heterogeneity of variability structures of deposit parameters.

It has been pointed out that the variability of the parameters can be marked by different types of anisotropy and also by heterogeneity. It is interesting to note that directional differentiation of the variabilities and non-homogeneity most frequently finds its explanation in geology.

It has been emphasized that the variability structures of the parameters should be analysed more deeply. When anisotropy or heterogeneity is evident, it should be taken into account in planning of geological exploration, determination of quality of raw materials, resources/reserves estimation, projecting of raw materials exploitation.

Key words: mineral deposits, geostatistics, anisotropy, heterogeneity

* Dr inż., Wydział Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska, AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Kraków;
e-mail: zkokesz@geol.agh.edu.pl

Wprowadzenie

Znajomość zmienności jest istotna dla projektowania rozpoznania złoża, a przede wszystkim dla określania gęstości sieci rozpoznawczej, szacowania jakości i ilości kopaliny w złożu, projektowania sposobu jego zagospodarowania i eksploatacji. Znajomość kierunkowej zmienności złoża jest niezbędna dla ustalania kierunków jego wybierania. Poznanie niejednorodności złoża i rozmieszczenia części uznanych za jednorodne ułatwia prognozowanie cech jakościowych wydobywanej kopaliny i planowanie eksploatacji.

Obecność anizotropii zmienności złoża oraz jego niejednorodność warunkują efektywność stosowania geostatystycznej metody krigingu zwyczajnego w ocenie złóż.

Stosowanie metody krigingu w jej podstawowej wersji wymaga przyjęcia pewnych założeń odnośnie obiektu, stanowiącego przedmiot oceny. Zgodnie z założeniem metody, przyjmuje się stacjonarność funkcji losowej opisującej zróżnicowanie wartości analizowanego parametru (Armstrong 1998; Namysłowska-Wilczyńska 2006). Zakłada się tym samym, że oczekiwana średnia jego wartość nie ulega zmianom w granicach złoża lub przynajmniej w granicach poszczególnych bloków obliczeniowych zasobów, a także, że przebieg funkcji strukturalnej parametru jest identyczny w poszczególnych jego częściach. Wyrazem tego, w praktycznych zastosowaniach krigingu, jest uwzględnianie w obliczeniach jedynie uśrednionych semiwariogramów skonstruowanych dla całego złoża.

Jednocześnie zazwyczaj przyjmuje się, że zmienność badanych parametrów złożowych ma charakter izotropowy. Znacznie upraszcza to obliczenia realizowane procedurą krigingu. Unika się wówczas na ogół dość kłopotliwego modelowania kierunkowego zróżnicowania zmienności, które wymaga od dokumentatora dobrej znajomości geostatystyki, a ponadto dysponowania odpowiednim oprogramowaniem geostatystycznym.

Skuteczne stosowanie metody krigingu w dokumentowaniu złóż zależy zatem w znacznym stopniu od wiarygodności przyjmowanych w obliczeniach założeń odnośnie struktury zmienności złoża.

W artykule przedstawiono wyniki geostatystycznego badania kierunkowego i obszarego zróżnicowania struktury zmienności parametrów złożowych.

Do opisu zmienności wykorzystano semiwariogramy. Funkcje te przedstawiają zależności występujące między zróżnicowaniem wartości parametrów złożowych a odległością między miejscami ich pomiarów, a zatem strukturę ich zmienności. W celu scharakteryzowania anizotropii dokonano obliczenia semiwariogramów kierunkowych parametrów wybranych złóż kopalni stałych. Dla potrzeb oceny niejednorodności dokonano obliczenia semiwariogramów parametrów złożowych w mniejszych wydzielonych fragmentach badanych złóż.

Celem pracy jest poszerzenie zakresu informacji o kierunkowym i obszarowym zróżnicowaniu zmienności parametrów złożowych. Wyprowadzone wnioski dotyczą metodyki badania zmienności złóż i wykorzystania wyników tych badań przy dokumentowaniu złóż. Prowadzone badania mają również szerszy aspekt poznawczy i praktyczny.

1. Metodyka badań

1.1. Anizotropia i metodyka jej badania

Przez anizotropię zmienności złoże rozumie się zróżnicowanie jego zmienności w poszczególnych kierunkach. Według A.B. Každana (1974) różnica między anizotropową i izotropową budową złoże zawiera się w tym, że w pierwszym przypadku elementy budowy złoże są rozmieszczone w sposób mniej lub bardziej uporządkowany, w drugim zaś przypadku w sposób chaotyczny.

Do opisu anizotropii zaproponowano dotychczas szereg metod. Optymalną metodą oceny anizotropii zmienności jest analiza geostatystyczna. W podejściu geostatystycznym miarą anizotropii jest zakres zróżnicowania semiwariogramów obliczonych w różnych kierunkach z formuły (np. Armstrong 1998; Namysłowska-Wilczyńska 2006):

$$\gamma_{\theta}(h) = \frac{1}{2n_h} \sum_{i=1}^{n_h} (z_{i+h} - z_i)^2 \quad (1)$$

gdzie:

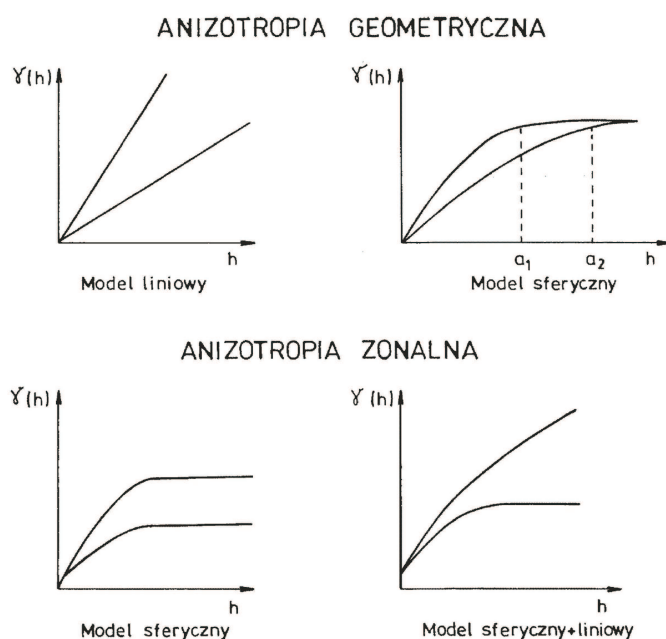
- z_{i+h}, z_i – wartości badanego parametru w punktach odległych o h w kierunku θ ,
- n_h – liczba par punktów pomiarowych odległych o h w kierunku θ .

W przypadku, kiedy zróżnicowanie semiwariogramów kierunkowych jest wyraźne, przyjmuje się anizotropowy charakter zmienności parametru. Jeśli zróżnicowanie postaci semiwariogramów nie jest zbyt wielkie, przyjmuje się praktycznie, iż struktura zmienności parametru jest izotropowa. W tej sytuacji, w obliczeniach krigingiem wykorzystuje się semiwariogramy uśrednione z poszczególnych kierunków.

W geostatystyce wyróżnia się zasadniczo dwa rodzaje anizotropii (np. Armstrong 1998; Namysłowska-Wilczyńska 2006): anizotropię geometryczną i anizotropię zonalną (rys. 1).

W przypadku anizotropii geometrycznej wykresy semiwariogramów w różnych kierunkach związane są ze sobą przekształceniem afinicznym (Namysłowska-Wilczyńska 2006). Drogą prostego przekształcenia współrzędnych możliwe jest zastąpienie warunków anizotropowych izotropowymi. Istnieje zatem możliwość sprowadzenia wykresu semiwariogramu opracowanego w kierunku maksymalnej zmienności do wykresu semiwariogramu sporządzonego w kierunku minimalnej zmienności jedynie poprzez odpowiednie zwiększenia skali odległościowej wykresu. W warunkach anizotropii geometrycznej wykresy semiwariogramów liniowych różnią się nachyleniem, a wykresy wariogramów sferycznych – zasięgiem (a). W przypadku anizotropii geometrycznej wielkość anizotropii da się wyrazić liczbowo za pomocą współczynnika. Miarą anizotropii stanowi wówczas stosunek nachylenia wykresów semiwariogramów liniowych lub stosunek maksymalnego i minimalnego zasięgu semiwariogramów sferycznych.

Anizotropia zonalna nie może być zredukowana poprzez prostą liniową transformację współrzędnych. Anizotropia ta związana jest z występowaniem złożonych struktur zmienności charakteryzujących się obecnością różnych źródeł, z których każde cechuje się od-



Rys. 1. Podstawowe typy anizotropii w strukturze zmienności parametrów złożowych
 $\gamma(h)$ – semiwariogram parametru, h – odległość, a – zasięg semiwariogramu

Fig. 1. Basic types of anisotropy in variability structures of deposit parameters
 $\gamma(h)$ – semi-variogram, h – distance, a – range of the semi-variogram

miennym typem kierunkowego zróżnicowania zmienności. Do opisu takich struktur najczęściej wykorzystuje się modele złożone semiwariogramów, stanowiące kompozycję modeli podstawowych. Anizotropia zonalna często związana jest z występowaniem większej (lub mniejszej) zmienności w dwóch wymiarach złoża w porównaniu z trzecim. Sytuacja taka ma miejsce w złożach warstwowych, w których w kierunku zgodnym z miąższością obserwuje się często znacznie większą zmienność parametru niż w płaszczyźnie prostopadłej do miąższości (Namysłowska-Wilczyńska 2006).

Metody geostatystyczne były już wcześniej wykorzystywane do oceny kierunkowego zróżnicowania zmienności wybranych parametrów złożowych. Obiektem badań były złoża rud Cu-Ag monokliny przedsudeckiej (Namysłowska-Wilczyńska 1993), złoża siarki rodzimej (Kaczmarczyk i in. 2012; Kokesz 1991), śląsko-krakowskie złoża rud Zn-Pb (Mucha 2002), złoża węgla brunatnego i kamiennego (Bartuś 2012; Kokesz 2006; Naworyta 2008). Anizotropia zmienności i jej wpływ na wyniki interpolacji wartości parametrów złożowych były przedmiotem badań Muchy i Wasilewkiej-Błaszczuk (2012).

Niniejsza praca stanowi kontynuację tych badań. W celu scharakteryzowania wektorowego zróżnicowania zmienności złóż dokonano obliczenia semiwariogramów kierunkowych wytypowanych parametrów złożowych. Konstruowano semiwariogramy w sześciu różnych kierunkach odchylonych względem siebie o 30 stopni. Modelowanie zmienności parametrów złożowych dokonano w przestrzeni dwuwymiarowej 2D. Analizowano zmienność miąższości i zasobności jednostkowej złóż, a także ważniejszych cech jakościowych

kopalin. Badaniami objęto złoża siarki rodzimej, węgla kamiennego i brunatnego, kruszywa naturalnego, wapieni i kopaliny skaleniowej.

Ustalono wielkości współczynnika anizotropii zmienności poszczególnych parametrów złożowych. W przypadku anizotropii geometrycznej za miarę anizotropii przyjęto stosunek nachylenia wykresów semiwariogramów liniowych lub stosunek maksymalnego i minimalnego zasięgu semiwariogramów sferycznych. Jako miarę anizotropii zonalnej przyjęto największe stosunki wartości semiwariogramów obliczonych w kierunku maksymalnej i minimalnej zmienności.

Do oceny zmienności wytypowanych złóż siarki wykorzystano dane z otworów eksploatacyjnych zgromadzone w archiwach kopalnianych. Zmienność pokładów węgla w granicach poszczególnych kopalń analizowano na podstawie danych pochodzących z opróbowania otworów wiertniczych i wyrobisk górniczych. Wykorzystano również obserwacje i pomiary miąższości pokładów dokonane w wyrobiskach górniczych przez kopalnianą służbę geologiczną. Stopień rozpoznania pokładów odpowiadał kat. A + B + C₁. Ocenę kierunkowego zróżnicowania zmienności zawartości siarki w węglu brunatnym, w wybranym poziomie eksploatacyjnym Kopalni Bełchatów, oparto na wynikach opróbowania otworów rozpoznawczych i ścian odkrywki (próbach bruzdowych). Podstawę charakterystyki zmienności złóż kruszywa naturalnego, wapieni i kopaliny skaleniowej stanowiły dane z otworów rozpoznawczych pozyskane z dokumentacji geologicznych.

Liczebność zbiorów danych wynosiła od około 40 do około 1000 obserwacji. Ich wielkość uzależniona była od rozmiaru badanego obiektu i stanu jego rozpoznania.

1.2. Niejednorodność i metodyka jej badania

Niejednorodność złóż nie była dotychczas przedmiotem odrębnych badań, niemniej jednak na jej obecność zwracano już wcześniej uwagę.

Przez niejednorodność złoża na ogół rozumie się zróżnicowanie poszczególnych jego części ze względu na analizowany parametr, rodzaj mineralizacji, typ wykształcenia złoża. Za jednorodną uważa się tę część złoża, w której zróżnicowanie rozpatrywanej cechy jest zanedbywalnie małe.

Wydzielenie w złożu części jednorodnych, różniących się średnimi wartościami parametrów, umożliwia najczęściej analiza rozkładów. Krzywe wielomodalne często sugerują, że badane złożo jest niejednorodne z uwagi na zróżnicowanie parametru. Ocenę tę można zweryfikować za pomocą analizy wariancyjnej. Na niejednorodność złoża wskazywać może obecność silnie zaznaczonego trendu w zróżnicowaniu wartości parametru złożowego.

W przypadku, gdy zmienność parametru ma charakter nielosowy, można oczekiwać, że jego zróżnicowanie na niewielkich obszarach będzie dużo mniejsze niż w granicach całego złoża. W takich przypadkach małe fragmenty złóż – odpowiadające na ogół rozmiarom parcel wydzielanych do obliczeń zasobów – można najczęściej traktować za quasi-homogeniczne z uwagi na zróżnicowanie wartości parametrów złożowych.

Na większych obszarach często obserwuje się zróżnicowanie średnich wartości parametrów złożowych. Również najczęściej obecność wyraźnego trendu zaznacza się dopiero na większych obszarach, przekraczających znacznie rozmiary ocenianych parcel zasobowych. Wyniki badań złóż rud miedziowo-srebrnych (Namysłowska-Wilczyńska 1988,

1993), siarki rodzimej (Kokesz 1991) oraz węgla kamiennego (Kokesz 1990, 2006) dowodzą, że quasi-jednorodne partie mogą mieć różne rozmiary. W złożach rud miedziowo-srebrowych minimalne powierzchnie takich pól osiągają najczęściej 2 ha. Na innych badanych złożach są one często większe. Zróżnicowanie poszczególnych części złoża ze względu na analizowany parametr stanowi utrudnienie w efektywnym stosowaniu krigingu. W przypadku złóż rozpoznanych rzadką siecią otworów, obszarowe zróżnicowanie średnich wartości parametrów złożowych może istotnie wpływać na dokładności interpolacji, a zarazem na wiarygodność sporządzanych map izoliniowych parametrów (Wasilewska-Błaszczuk, Mucha 2005).

Niejednorodność może się także przejawiać zróżnicowaniem charakteru zmienności parametrów złożowych, a zatem różną strukturą zmienności. Za jednorodne uważa się te części złoża, dla których opracowane semiwariogramy praktycznie nie różnią się między sobą. Występowanie obszarów, na których wyliczone semiwariogramy parametru istotnie się różnią, wskazuje na niejednorodność.

Obserwowane różnice w przebiegu semiwariogramów sporządzonych dla różnych części złoża mogą być wywołane tzw. efektem proporcjonalności. Efekt ten polega na występowaniu zależności pomiędzy wariancją i średnią wartością parametru. Wyraża się to na ogół poprzez uzyskiwanie wyższych wartości semiwariogramów w bogatszych partiach złóż. Niekiedy jednak obserwuje się odwrotny efekt, polegający na występowaniu niższych wartości semiwariogramów w partiach charakteryzujących się wyższymi średnimi wartościami parametrów złożowych. W celu stwierdzenia efektu proporcjonalności wskazane jest konstruowanie i porównywanie przebiegów semiwariogramów względnych obliczonych dla poszczególnych wydzielonych partii złoża różniących się średnią wartością analizowanego parametru (Cressie 1985). Brak znaczących różnic w przebiegu semiwariogramów względnych, przy obserwowanych rozbieżnościach w wartościach semiwariogramów obliczonych klasyczną formułą G. Matherona, wskazuje na obecność efektu proporcjonalności.

W niniejszej pracy dokonano analizy stabilności struktury zmienności złóż. Badanie stabilności struktury zmienności złóż sprowadzało się głównie do oceny obszarowego zróżnicowania charakteru zmienności wybranych parametrów złożowych. W celu przesłedzenia niejednorodności dokonano obliczenia semiwariogramów parametrów złożowych w mniejszych wydzielonych fragmentach badanych złóż oraz semiwariogramów względnych. Semiwariogramy relatywne obliczono ze wzoru (Namysłowska-Wilczyńska 2006):

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

gdzie:

- z_{i+h}, z_i – wartości badanego parametru w punktach odległych o h ,
- n_h – liczba punktów pomiarowych odległych o h .

Modelowania zmienności parametrów złożowych dokonano, podobnie jak w przypadku oceny anizotropii, w przestrzeni dwuwymiarowej 2D. Analizowano strukturę zmienności

zasobności Cu w złożu rud miedziowo-srebrowych kopalni Rudna oraz zasobności złoża siarki rodzimej Jeziórko.

Materiał podstawowy badań stanowiły wyniki rozpoznania złóż. Podstawę charakterystyki zmienności zasobności Cu w złożu rud miedziowo-srebrowych kopalni Rudna stanowiły dane pochodzące z opróbowania wyrobisk górniczych. Do oceny struktury zmienności złoża siarki wykorzystano dane z otworów eksploatacyjnych.

2. Charakterystyka anizotropii

Jak wynika z przeprowadzonych badań, zmienność parametrów złożowych ma często charakter izotropowy, względnie zbliżony do izotropowego (tab. 1). Wykresy semiwariogramów sporządzonych w poszczególnych kierunkach tylko nieznacznie się różnią, co uzasadnia możliwość przyjęcia warunków quasi-izotropowych.

W większości przebadanych przypadków obserwowano jednak zróżnicowanie przebiegu wykresów semiwariogramów kierunkowych, wskazujące na obecność anizotropii. Często anizotropia ta uwidacznia się dopiero na większych obszarach.

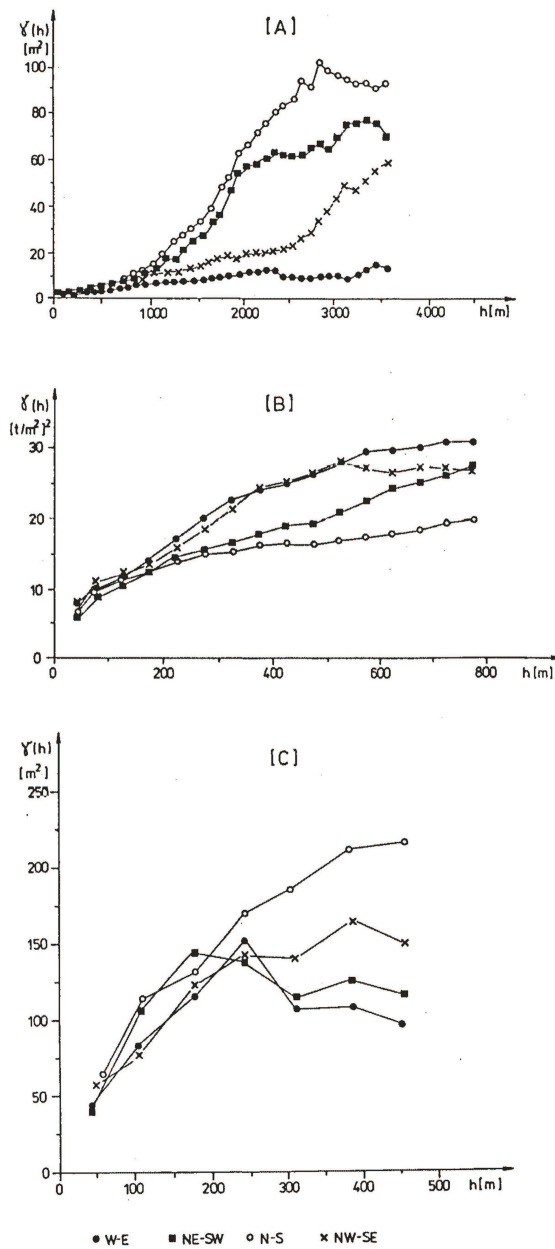
Na rysunku 2 przedstawiono przykłady semiwariogramów kierunkowych opracowanych w przestrzeni dwuwymiarowej (w planie) dla kilku wybranych złóż kopalni stałych. Zwraca uwagę fakt, że wektorowe zróżnicowanie zmienności parametrów złożowych zaznacza się w tych złożach dopiero na większych odległościach. Wykresy semiwariogramów charakteryzują się zbliżonym przebiegiem do pewnych odległości, które wyznaczają rozmiary pól izotropowych.

Wyniki badań ujęte w tabeli 2 prowadzą do wniosku, że kierunkowe zróżnicowanie zmienności zaznacza się często dopiero na większych obszarach, nierzadko w blokach o rozmiarach w planie powyżej 250×250 m. Na małych obszarach zmienność ma charakter zbliżony do izotropowego. Obserwacje pozwalają wnioskować, że przy prognozowaniu wartości parametrów złożowych oraz obliczaniu zasobów w niewielkich blokach można

TABELA 1 Zestawienie badanych parametrów złożowych charakteryzujących się izotropową lub quasi-izotropową zmiennością

TABLE 1. Deposits in which isotropy or quasiisotropy has been observed

| Nazwa kopaliny | Nazwa złoża (kopalni) | Badany fragment złoża | Badany parametr złożowy |
|--------------------|--|-----------------------------------|--|
| Węgiel kamienny | KWK Kazimierz- Juliusz KWK Staszic | pokład 349, 409/1-2 pokład 401 | miąższość miąższość |
| Siarka rodzima | Grzybów | pole S | zasobność |
| Kruszywo naturalne | obszar obejmujący złoża: Bieńkowice Wschód, Bieńkowice Zachód, Racibórz I – Zbiornik obszar obejmujący złoża: Lubomia III, Nieboczowy III, Racibórz II – Zbiornik | | punkt piaskowy zawartość pyłów mineralnych punkt piaskowy |



Rys. 2. Semiwariogramy ukazujące występowanie anizotropii zmienności parametrów złożowych na większych obszarach
 A – miąższość pokładu węgla 510 w KWK Kazimierz-Juliusz, B – zasobność złoża siarki rodzimej Jeziórko (pole eksploatacyjne IX), C – miąższość złoża kopaliny skaleniowej Karpniki

Fig. 2. Directional semi-variograms showing anisotropy on sizable areas
 A – seam thickness no. 510 in the Kazimierz-Juliusz coal mine, B – sulphur accumulation for the Jeziórko deposit (IX mining field), C – thickness of the Karpniki feldspar deposit

TABELA 2 Charakterystyka kierunkowego zróżnicowania zmienności badanych parametrów złożowych i jego przyczyn

TABLE 2. Characterization of anisotropy of studied deposit parameters and its geological background

| Nazwa kopaliny | Nazwa złoża (kopalni) | Badany fragment złoża | Badany parametr złożowy | Rodzaj anizotropii | Współczynnik anizotropii | Przyczyny obserwowanej anizotropii |
|------------------|--|--|---|-----------------------------|--------------------------|--|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| Węgiel kamienny | KWK Bielszowice KWK Kazimierz-Juliusz KWK Staszic KWK Wirek | pokład 418 pokład 510 pokład 510 pokład 416 | miąższość | zonalna ^w (350) | 1,5 | występowanie stref roznych i wycienień pokładów, |
| | | | miąższość | n.o. ^w (1000) | 5,0 | wyklinowywanie się i rozszczepianie pokładów |
| | | | miąższość | zonalna ^w (1000) | 2,0 | |
| | | | miąższość | zonalna ^w (650) | 1,6 | |
| Węgiel brunatny | KWB Belchatów | poziom VIII | zawartość siarki | z zonalna | 1,7 | nietciąglność warstw, rozszczepianie się ław przy północnej i południowej granicy złoża |
| | | | | | | |
| Siarka rodzima | Grzybów Jeziórko | pole W pole II, IV i VIII (wschód) | zasobność | zonalna ^w (250) | 1,5 | zmiennie wykształcenie serii złożowej, ubożenie złoża w pobliżu jego granic, występowanie wapieni płonnych i gipsów w partiach przykonturowych złoża |
| | | | miąższość | zonalna ^w (350) | 2,3 | |
| | | | zawartość siarki | zonalna ^w (350) | 2,0 | |
| | | | zasobność | zonalna ^w (350) | 2,2 | |
| | miąższość | zonalna ^w (200) | 3,2 | | | |
| | zawartość siarki | zonalna ^w (200) | 1,6 | | | |
| | zasobność | zonalna ^w (200) | 3,5 | | | |
| | miąższość | zonalna ^w (250) | 1,6 | | | |
| zawartość siarki | zonalna ^w (250) | 1,5 | | | | |
| zasobność | zonalna ^w (250) | 1,7 | | | | |
| zasobność | zonalna ^w (450) | 1,3 | | | | |
| Wapienie | Strzelce Opolskie | poziom II | zawartość CaO, Al ₂ O ₃ , Fe ₂ O ₃ | zonalna | 1,7–1,8 | monoklinalne ułożenie utworów węglanowych o silnie zróżnicowanych parametrach jakościowych |
| | | | | | | |

TABELA 2. cd.
TABLE 2. cont.

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
|---------------------|---|---|-----------------------------|---|-------------------|--|
| Kopalina skaleniowa | Karpniki | | miąższość | zonalna ^w (250) | 1,7 | morfologia stropu złoża warunkowana powierzchnią stropową masywu granitowego |
| | obszar obejmujący złoża: Racibórz I – Zbiornik, Bieńkowiec Wschód, Bieńkowiec Zachód | | miąższość | zonalna ^w (600) | 1,8 | zmienna morfologia stropu złoża i jego podłoża, występowanie rynnien erozyjnych wypełnionych piaskami |
| Kruszywo naturalne | obszar obejmujący złoża: Lubomia III, Nteboczowy III, Racibórz II – Zbiornik Radłów | | miąższość punkt piaskowy | n.o. ^w (750) zonalna ^w (300) zonalna ^w (200) | 1,8 1,6 1,8 | zmienna morfologia stropu złoża i jego podłoża, kierunkowe zmiany miąższości warstwy piasków rozdzielającej utwory zwirowo-piaszczyste |
| | Trzydniaki | | miąższość | geometryczna | 2,0 | zmienna morfologia stropu złoża i jego podłoża |

x – w przypadku anizotropii zonalnej największe stosunki wartości semiwariogramów obliczonych w kierunku maksymalnej i minimalnej zmienności, n.o. – anizotropii nie da się opisać wyłącznie za pomocą semiwariogramów z powodu obecności wyraźnego trendu w zmienności parametru, w – wektorowe zróznicowanie zmienności zaznacza się dopiero na większych odległościach, (250) – odległość w metrach, do której obserwuje się zblizony przebieg wykresów semiwariogramów kierunkowych.

w wielu przypadkach przyjmować warunki quasi-izotropowe i posługiwać się w obliczeniach semiwariogramami uśrednionymi (wielokierunkowymi).

Tego typu kierunkowe zróżnicowanie zmienności wynika najczęściej z niejednorodności złoża, objawiającej się obszarowym zróżnicowaniem średnich wartości parametrów złożowych. Niejednokrotnie obserwowano, że kierunki największej zmienności pokrywają się z kierunkami występowania rejonów różniących się istotnie średnimi wartościami parametrów złożowych. Przyczyną takiej anizotropii może być na przykład ubożenie złoża w pobliżu jego granic. Złoże charakteryzuje się wówczas w tych strefach znacznie niższymi parametrami niż na pozostałym obszarze. Często niejednorodność i anizotropia znajdują wy tłumaczenie w obecności trendu w zróżnicowaniu wartości parametrów złożowych.

Anizotropię można również obserwować w złożach uznanych za jednorodne. Zarówno środowisko niejednorodne, jak i jednorodne, może być izo- jak i anizotropowe (Rac 1968). Niejednorodność nie jest zatem jedynym czynnikiem powodującym wektorowe zróżnicowanie zmienności parametrów złożowych.

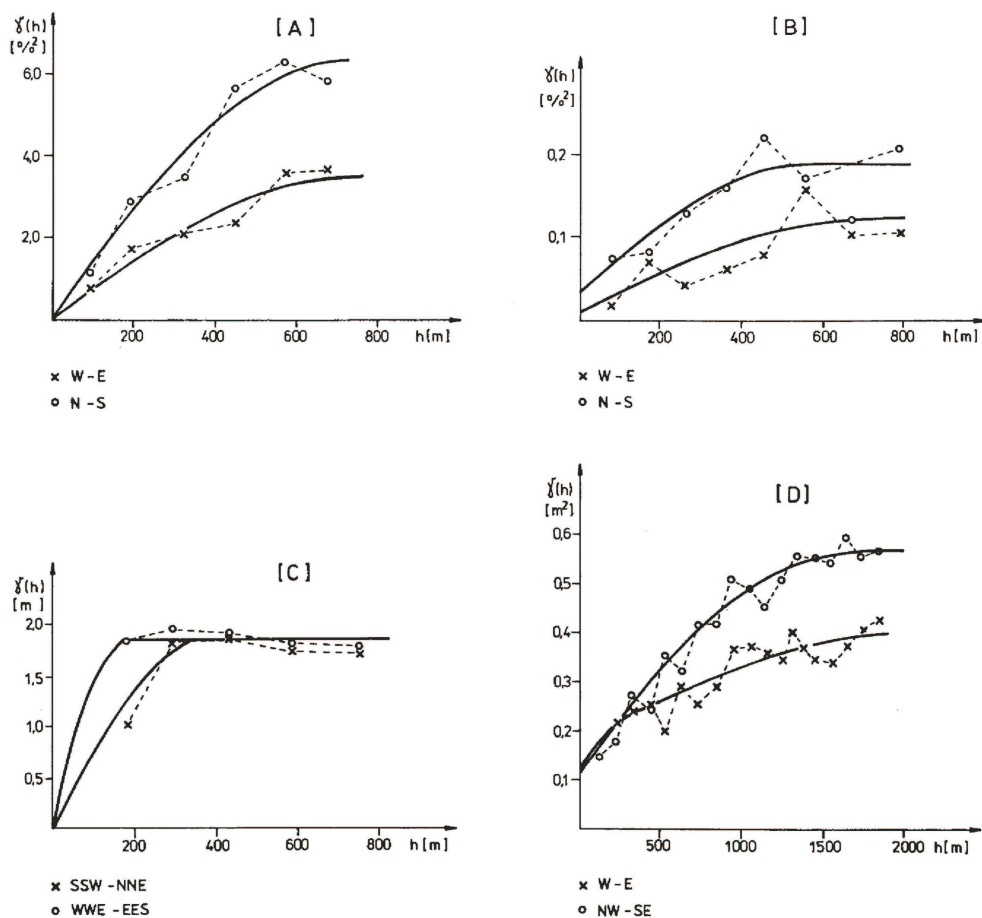
W niektórych złożach kierunkowe zróżnicowanie zmienności może uwidaczniać się wyłącznie na małych odległościach. Tego typu zróżnicowanie zmienności występuje przy anizotropii geometrycznej, jeśli model zmienności parametru opisuje model sferyczny (rys. 3C). Zaznacza się wówczas zróżnicowanie zmienności tylko na odległościach nie przekraczających obserwowanego na semiwariogramach maksymalnego zasięgu autoskorelowania obserwacji (a).

Przedstawione w tabeli 2 oraz na rysunku 3 wyniki badań wskazują, że mogą być różne typy anizotropowych struktur zmienności złóż.

Zmienność parametrów złożowych może cechować się anizotropią geometryczną (rys. 3C). Jak wynika jednak z przeprowadzonych badań, kierunkowe zróżnicowanie zmienności ma często bardziej złożony charakter (np. rys. 2, 3A, 3B, 3D). Obserwowanej na semiwariogramach anizotropii nie da się wówczas ocenić liczbowo za pomocą konkretnych wartości. W warunkach anizotropii zonalnej można ją scharakteryzować przy użyciu odpowiednich równań semiwariogramów opisujących zmienność parametru w dowolnym kierunku i uwzględniać w procedurach estymacyjnych. Nierzadko jednak znalezienie równań opisujących obserwowaną postać anizotropii zmienności parametru bywa znacznie utrudnione. W niektórych przypadkach semiwariogramy kierunkowe reprezentują bardziej złożony model zmienności, który należałoby interpretować jako połączenie kilku modeli podstawowych i sugerują kierunkowe zróżnicowanie również zmienności lokalnej parametru (np. rys. 3B). Ponadto kierunki maksymalnej i minimalnej zmienności parametrów złożowych nie zawsze krzyżują się pod kątem prostym. Niekiedy ich ułożenie odbiega od prostopadłego, co utrudnia geostatystyczne modelowanie zmienności i wykorzystanie jego wyników w estymacji procedurą krigingu.

Ważne jest zatem, aby przy geostatystycznym modelowaniu anizotropii zmienności parametrów złożowych uwzględniać informacje o budowie geologicznej złoża. Znajomość procesów geologicznych, budowy złoża i jego genezy winna ułatwiać właściwą interpretację anizotropii.

Na ogół w zmienności podstawowych parametrów złożowych, takich jak: miąższość, zasobność złoża lub cechy charakteryzujące jakość kopaliny, kierunkowe zróżnicowanie zaznacza się niezbyt silnie. Parametry te charakteryzują się przeważnie przeciętną anizotropią. Ma ona najczęściej charakter anizotropii zonalnej (tab. 2). W anizotropii zonalnej wielkość



Rys. 3. Przykłady anizotropowych struktur zmienności złóż

A – zawartość CaO w wapieniach triasowych, II poziom wydobywczy, kamieniołom Strzelce Opolskie, B – zawartość siarki w węglu, poziom VIII, KWB Bełchatów, C – miąższość złoża kruszywa naturalnego, złożo Trzydniaki, D – miąższość pokładu węgla 418, KWK Bielszowice

Fig. 3. Examples of anisotropic variability structures of deposit parameters

A – CaO content in triassic limestones, V level at Strzelce Opolskie opencast mine, B – sulphur content in lignite, VIII level at Bełchatów opencast mine, C – thickness of Trzydniaki natural aggregate deposit, D – thickness of seam no. 418 in Bielszowice hard coal mine

kierunkowego zróżnicowania zmienności nie da się wyrazić liczbowo za pomocą współczynnika. Jak wynika z danych ujętych w tabeli 2, w przypadku obserwowanego kierunkowego zróżnicowania struktury zmienności parametrów złóżowych, maksymalne stosunki wartości semiwariogramów obliczonych w kierunku maksymalnej i minimalnej zmienności wynoszą najczęściej 1,5–1,8, rzadko przekraczają 2,0. Większe różnice w przebiegu wariogramów obserwuje się gdy w zmienności parametru zaznacza się wyraźny trend.

Uzyskane wyniki sugerują istnienie pewnych prawidłowości. Badania wskazują, że częściej i na ogół nieco silniej anizotropia zmienności uwidacznia się w zróżnicowaniu

miąższości oraz zasobności jednostkowej złóż. Rzadziej i słabiej zaznacza się ona w zmienności parametrów charakteryzujących jakość kopaliny.

W tabeli 2 scharakteryzowano przyczyny obserwowanej anizotropii. Kierunkowe zróżnicowanie zmienności parametrów złożowych znajduje najczęściej wy tłumaczenie w budowie geologicznej złóż. Pozostaje ono w związku z procesami, które doprowadziły do ich powstania. Złożony charakter tych procesów uniemożliwia jednak często sformułowanie jednoznacznych wniosków, co do zależności występującej między obserwowaną anizotropią a genezą złoża. Dodatkową trudność stanowi fakt, że obserwowana anizotropia stanowi jedynie przybliżony obraz faktycznego zróżnicowania zmienności parametrów złożowych. Na jej postać ma bowiem wpływ nie tylko sam geologiczny obiekt, ale również wiarygodność konstruowanych semiwariogramów. Reprezentatywność semiwariogramów zależy między innymi od dokładności z jaką złożo zostało rozpoznane.

3. Charakterystyka niejednorodności

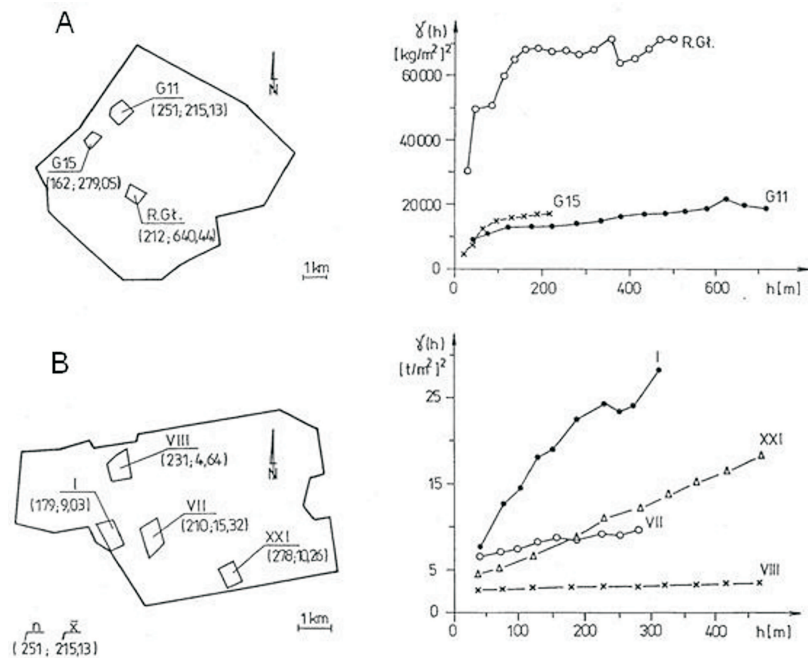
Rozmieszczenie analizowanych partii złóż wraz z liczebnością zbiorów danych zilustrowano na rysunku 4. Na rysunku tym przedstawiono również wykresy semiwariogramów skonstruowanych dla wydzielonych części złóż.

Obserwuje się dość wyraźne różnice w przebiegu wykresów semiwariogramów dla poszczególnych rejonów badanych złóż. Świadczy to o obszarowym zróżnicowaniu struktury zmienności. Przedstawione przykłady wskazują, że przyjęcie założenia odnośnie stabilności struktury zmienności parametrów w granicach całego złoża bywa często zbyt dużym uproszczeniem. Zwracano na to już wcześniej uwagę (np. Kokesz 2006; Kokesz, Mucha 1987; Mucha 2001; Wasilewska-Błaszczyk, Mucha 2006). W niektórych przypadkach zróżnicowanie geostatystycznych modeli opisujących zmienność parametrów w różnych partiach złoża nie pozwala na ustalenie jednolitego modelu zmienności.

Jak wynika z przeprowadzonych badań, obserwowane zróżnicowanie struktury zmienności często nie znajduje uzasadnienia w efekcie proporcjonalności. Semiwariogramy relatywne wyliczone dla poszczególnych fragmentów złóż nadal różnią się przebiegiem. Świadczą o tym dane przedstawione na rysunku 5. Zwraca uwagę zróżnicowanie semiwariogramów względnych badanych parametrów złożowych.

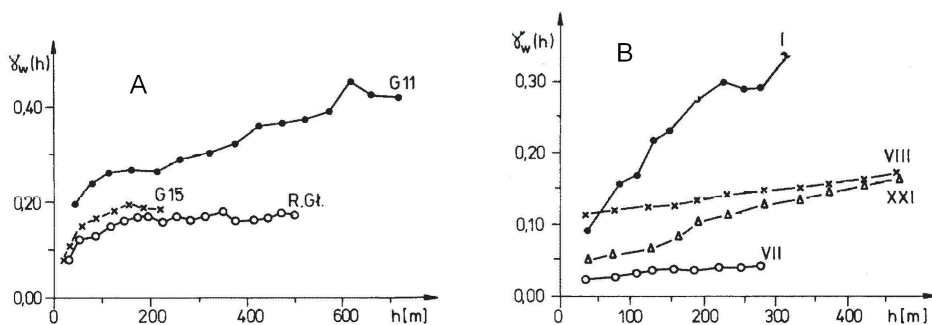
Wyniki badań pokładu 418 w KWK Bielszowice sugerowałyby jednak, że małe fragmenty złóż mogą stanowić quasi-homogeniczne rejony z uwagi na zmienność parametrów złożowych (Kokesz 2006). Do podobnych wniosków prowadzi również analiza struktury zmienności miąższości pokładu węgla 510 w KWK Kazimierz-Juliusz (Kokesz 1990).

Obszarowe zróżnicowanie struktury zmienności parametrów złożowych, podobnie jak anizotropia, znajdują często wy tłumaczenie w budowie złóż. Na geologiczne uwarunkowania obserwowanych struktur zmienności parametrów złożowych zwracano już wcześniej uwagę (np. Kokesz 1991; Mucha, Szuwarzyński 1994; Nieć, Mucha, Kokesz 1988). Częstą przyczyną obserwowanej niejednorodności miąższości i zasobności jednostkowej jest zmienne wykształcenie serii złożowej. Również urozmaicona morfologia stropu lub spągu złóż może prowadzić do niestabilności struktury zmienności tych parametrów złożowych. Obszarowe zróżnicowanie struktury zmienności zawartości składników użytecznych znajduje niekiedy dodatkowo uzasadnienie w występowaniu w złożach odmiennych typów mineralizacji.



Rys. 4. Przykłady obszarowego zróżnicowania struktury zmienności parametrów złóżowych
 A – zasobność Cu w złożu rud miedziowo-srebrowych kopalni Rudna, B – zasobność złoża siarki rodzimej Jeziórko; G15, VII – analizowane partie złóż, n – liczba danych, – średnia arytmetyczna wartość parametru

Fig. 4. Examples of semi-variograms differentiation within deposits
 A – Cu accumulation for copper-silver ore deposit of Rudna mine, B – native sulphur accumulation for Jeziórko deposit; G15, VII – studied parts of the deposits; n – number of data, – arithmetic mean values of the parameters



Rys. 5. Badanie efektu proporcjonalności za pomocą semiwariogramów względnych
 A – zasobność Cu w złożu rud miedziowo-srebrowych kopalni Rudna, B – zasobność złoża siarki rodzimej Jeziórko; G15, VII – analizowane części złóż

Fig. 5. Study of a proportional effect with relative semi-variograms
 A – Cu accumulation for copper-silver ore deposit of Rudna mine, B – native sulphur accumulation for Jeziórko deposit; G15, VII – studied parts of the deposits

Podsumowanie

Z przeprowadzonych badań wynika, że zmienność parametrów złożowych ma często charakter izotropowy albo zbliżony do izotropowego. Niekiedy jednak obserwuje się zróżnicowanie przebiegu wykresów semiwariogramów kierunkowych, wskazujące na obecność anizotropii. Znajduje ona wówczas najczęściej wytłumaczenie w budowie geologicznej złóż.

Różne mogą być typy anizotropii zmienności parametrów złożowych. Kierunkowe zróżnicowanie zmienności może uwidaczniać się wyłącznie na małych odległościach. Może także występować tylko na większych obszarach. Tego typu kierunkowe zróżnicowanie zmienności wynika najczęściej z niejednorodności złoża objawiającej się obszarowym zróżnicowaniem średnich wartości parametrów złożowych. W niektórych przypadkach semiwariogramy kierunkowe reprezentują bardziej złożony model zmienności, który należałoby interpretować jako połączenie kilku modeli podstawowych i sugerują kierunkowe zróżnicowanie również zmienności lokalnej parametru.

Wyniki prac wskazują na niezbyt silnie kierunkowe zróżnicowanie zmienności podstawowych parametrów złożowych. Parametry takie jak miąższość, zasobność złoża – cechy charakteryzujące jakość kopaliny – charakteryzują się przeważnie przeciętną anizotropią.

Zebrany materiał pokazuje pewne prawidłowości, których istnienie powinno zostać potwierdzone na szerszym materiale obserwacyjnym.

Badania wskazują, że anizotropia zmienności najczęściej zaznacza się dopiero na większych odległościach. W takich przypadkach kierunkowe zróżnicowanie zmienności często obserwuje się w blokach o rozmiarach w planie powyżej 250×250 m. W małych partiach złóż zmienność ma często charakter zbliżony do izotropowego. A zatem, w praktycznych zastosowaniach krigingu, najczęściej możliwe jest wykorzystywanie izotropowych modeli semiwariogramów parametrów złożowych. Rzadko występuje anizotropia geometryczna, częściej natomiast anizotropia zonalna. Badania sugerują, że częściej i na ogół nieco silniej anizotropia zmienności zaznacza się w zróżnicowaniu miąższości oraz zasobności jednostkowej złóż. Rzadziej i słabiej uwidacznia się ona w zmienności parametrów charakteryzujących jakość kopaliny.

Jak wynika z przeprowadzonych badań, na większych obszarach często obserwuje się zróżnicowanie średnich wartości parametrów złożowych. Małe fragmenty złóż – odpowiadające na ogół rozmiarom parcel wydzielanych do obliczeń zasobów – można najczęściej traktować za quasi-homogeniczne z uwagi na zróżnicowanie wartości parametrów złożowych, co z kolei upoważnia do stosowania w ich ocenie metody krigingu zwyczajnego.

Zwraca uwagę niestabilność struktur zmienności złóż. Zróżnicowanie struktury zmienności daje się obserwować w złożach jednego typu, a nawet w obrębie pojedynczych złóż. Wyraża się to bądź odmienną postacią geostatystycznego modelu zmienności (np. pokłady węgla kamiennego), bądź różną wielkością parametrów opisujących model (np. złoża siarki rodzimej). Zróżnicowanie to dotyczy może poszczególnych pól, pięter, poziomów kopalnianych, a także poszczególnych pokładów w przypadku złóż wielopokładowych. Wyniki badań sugerowałyby jednak, że małe fragmenty złóż mogą stanowić quasi-homogeniczne rejony z uwagi na zmienność parametrów złożowych.

Dotychczasowa praktyka wskazuje na potrzebę głębszego analizowania struktury zmienności parametrów złożowych. Ocena anizotropii powinna stanowić jeden z elementów opisu zmienności parametrów złożowych. Geostatystyczne modelowanie anizotropii powinno być

oparte na wnikliwej analizie informacji o budowie złoża. Znajomość procesów geologicznych, budowy złoża i jego genezy winna ułatwiać właściwą interpretację kierunkowego zróżnicowania zmienności parametrów złożowych.

Analiza wyników rozpoznania złoża powinna obejmować również ocenę jego jednorodności. Wykrycie niejednorodności złoża niejednokrotnie umożliwia analiza rozkładów parametrów złożowych. Opracowanie statystyczne wyników rozpoznania winno zatem poprzedzać modelowanie struktury zmienności złoża. Podział złoża na części jednorodne powinien być jednak oparty na kryteriach geologicznych. Jak wynika bowiem z dotychczasowych badań, obserwowane obszarowe zróżnicowanie parametrów złożowych oraz struktury ich zmienności, często znajduje odzwierciedlenie w budowie złoża. Pomocne w tym względzie mogą być mapy izolinii parametrów złoża, a także mapy trendów.

Badanie anizotropii, jak i niejednorodności złoża wymaga dysponowania dostateczną liczbą obserwacji, a zatem najczęściej jest ono możliwe w przypadku dokumentowania dużych złóż, złóż rozpoznanych w wyższych kategoriach poznania lub poddanych już eksploatacji. Jeśli złożo rozpoznane zostało niewielką liczbą wyrobisk, zbadanie kierunkowego zróżnicowania zmienności lub niejednorodności napotyka na znaczne trudności, a wynik oceny na ogół obciążony jest znacznym błędem.

Dysponowanie niedostateczną liczbą danych skłania często do przyjmowania założeń odnośnie izotropii zmienności, a także jednorodności w skali całego złoża. Przyjęcie takich założeń znajduje najczęściej uzasadnienie przy dokumentowaniu złóż w niższych kategoriach rozpoznania z uwagi na obowiązujące w stosunku do nich nieco niższe wymagania co do dokładności poznania poszczególnych parametrów złożowych.

Anizotropia i niejednorodność winny być uwzględniane przy dokumentowaniu zasobów i ocenie jakości kopaliny, a także przy projektowaniu sposobu zagospodarowania i eksploatacji złoża. W przypadku stwierdzenia wyraźnego kierunkowego zróżnicowania zmienności wskazane jest prowadzenie estymacji krigingiem z uwzględnieniem anizotropowych modeli semiwariogramów parametrów złoża. Jeżeli występuje efekt proporcjonalności, uzasadnione jest prowadzenie estymacji procedurą krigingu opierając się na ustalonym dla całego złoża semiwariogramie względnym parametru. W przeciwnym przypadku, jeśli występują istotne różnice w semiwariogramach względnych, celowym wydaje się prowadzenie obliczeń tą metodą oddzielnie w partiach uznanych za jednorodne na podstawie ustalonych dla nich modeli semiwariogramów. Powinno to prowadzić do podwyższenia efektywności prognozowania jakości kopaliny i szacowania zasobów.

Praca wykonana w ramach badań statutowych Katedry Geologii Złożowej i Górniczej AGH nr 11.11.140.320

Literatura

- Armstrong M., 1998 – Basic Linear Geostatistics. Springer, Berlin.
- Bartuś T., 2012 – Anizotropia zmienności głównych parametrów jakościowych węgla brunatnego w polu Belchatów. *Gospodarka Surowcami Mineralnymi*, t. 28, z. 2, 5–29.
- Cressie N., 1985 – When are relative variograms useful in Geostatistics. *Mathematical Geology*, 17, 7, 693–702.
- Kaczmarczyk i in. 2012 – Kaczmarczyk M., Nieckula M., Mucha J., Wasilewska-Błaszczak M., 2012 – Praktyczne konsekwencje geostatystycznego badania struktury zmienności parametrów złoża węgla brunatnego Gubin i siarki Osiek. *Zesz. Nauk. IGSMiE PAN*, nr 83.

- Kaźdan A.B., 1974 – Metodologiczeskije osnovy razwiedki poleznych iskopajemych. Moskwa.
- Kokesz Z., 1990 – Struktura zmienności parametrów wybranych pokładów węgla z KWK Kazimierz-Juliusz. *Gospodarka Surowcami Mineralnymi* t. 6, z. 1, 97 – 105.
- Kokesz Z., 1991 – Geostatistical reserves estimation for native sulphur deposits mined by underground melting. *Science de la Terre, ser. Inf.*, nr 31, Nancy, 223–238.
- Kokesz Z., 2006 – Geostatystyczna charakterystyka pokładów węgla w Górnośląskim Zagłębiu Węglowym. *Górnictwo Odkrywkowe*, nr 1–2, 66–75.
- Kokesz Z., Mucha J., 1987 – Dotychczasowe doświadczenia w zastosowaniu metod geostatystycznych w geologii górniczej w Polsce. *Materiały Seminarium nt. Metody matematyczne i technika komputerowa w górnictwie*, Szklarska Poręba, Wyd. GIG, t. 3, 45–55.
- Mucha J., 2001 – Bariery i ograniczenia geostatystycznej oceny parametrów złożowych. *Zeszyty Naukowe AGH, Geologia* t. 27, z. 2–4, 641–658.
- Mucha J., 2002 – Struktura zmienności zawartości Zn i Pb w śląsko-krakowskich złożach rud Zn-Pb; *Studia, Rozprawy, Monografie* nr 108, IGSMiE PAN, Kraków.
- Mucha J., Szuwarzyński M., 1994 – Geological aspects of geostatistical modelling of the Polish Zn-Pb deposits. *Science de la Terre, ser. Inf.*, nr 32, Nancy, 317–330
- Mucha J., Wasilewska-Błaszczuk M., 2012 – Variability anisotropy of mineral deposits parameters and its impact on resources estimation – a geostatistical approach. *Gospodarka Surowcami Mineralnymi* t. 28, z. 4, 113–135.
- Namysłowska-Wilczyńska B., 1988 – Application of kriging to the determination of homogenous blocks of Cu ore deposits. *Science de la Terre, ser. Inf.*, nr 27, Nancy, 279–290.
- Namysłowska-Wilczyńska B., 1993 – Zmienność złóż rud miedzi na monoklinie przedsudeckiej w świetle badań geostatystycznych. *Prace Naukowe Instytutu Geotechniki i Hydrotechniki Politechniki Wrocławskiej*, s. *Monografie*, nr 21.
- Namysłowska-Wilczyńska B., 2006 – Geostatystyka – Teoria i zastosowania. *Wyd. Politechniki Wrocławskiej*.
- Naworyta W., 2008 – Analiza zmienności parametrów złożowych węgla brunatnego pod kątem sterowania jakością strumienia urobku. *Gospodarka Surowcami Mineralnymi*, t. 24, z. 2/4, 97–110.
- Nieć M., Mucha J., Kokesz Z., 1988 – Geological background for geostatistical models. *Science de la Terre, ser. Inf.*, nr 27, Nancy, 263–278.
- Rac M.B., 1968 – Nieodnorodnost gornych porod i ich fizycznych swojstw. Moskwa.
- Wasilewska-Błaszczuk M., Mucha J. 2005 – Dokładność interpolacji zawartości siarki i popiołu w wybranych pokładach węgla kamiennego GZW. *Gospodarka Surowcami Mineralnymi* t. 21, z. 1, 7–21.
- Wasilewska-Błaszczuk M., Mucha J. 2006 – Dokładność szacowania średnich wartości parametrów złożowych pokładów węgla kamiennego w blokach obliczeniowych metodą krigingu zwyczajnego. *Przeegl. Górn.* Nr 11, 10–17.

