



## Niejednorodność złóż w świetle badań geostatystycznych

### Heterogeneity of mineral deposits in the light of geostatistical studies

Dr inż. Zbigniew Kokesz<sup>\*)</sup>

**Treść:** W pracy scharakteryzowano zjawisko niejednorodności złóż polegające na obszarowym zróżnicowaniu średnich wartości parametrów złożowych oraz zróżnicowaniu struktury ich zmienności opisaną za pomocą semiwariogramów. Zwrócono w nim uwagę na niestabilność struktur zmienności parametrów złożowych. Stwierdzono, że obserwowane różnice w przebiegu semiwariogramów sporządzonych dla różnych części złoża rzadko są wywołane tzw. efektem proporcjonalności, a obszarowe zróżnicowanie struktury zmienności parametrów złożowych znajduje najczęściej wytłumaczenie w budowie geologicznej złóż. Wyniki badań sugerują, że małe fragmenty złóż mogą stanowić quasi-homogeniczne rejony. Badania wskazują na potrzebę głębszego analizowania struktur zmienności złóż i uwzględniania jej wyników przy prognozowaniu jakości kopaliny i szacowania zasobów metodą krigingu.

**Abstract:** The results of geostatistical studies of variability structures of the Polish mineral deposits have been presented. Special attention has been paid to the 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 heterogeneity. It is interesting to note that non-homogeneity most frequently finds its explanation in deposit geology. It has been emphasized that the variability structures of the parameters should be analysed more deeply. When heterogeneity is evident it should be taken into account during determination of the quality of mineral raw materials and estimation of resources/reserves by kriging.

#### Słowa kluczowe:

złoża kopalin, geostatystyka, niejednorodność

#### Key words:

mineral deposits, geostatistics, heterogeneity

## 1. Wprowadzenie

Poznanie niejednorodności złoża i rozmieszczenia części uznanych za jednorodne ułatwia prognozowanie cech jakościowych wydobywanej kopaliny i planowanie eksploatacji.

Niejednorodność złoża ma wpływ na efektywność stosowania geostatystycznej metody krigingu zwyczajnego w ocenie złóż. Stosowanie tej metody wymaga przyjęcia pewnych założeń odnośnie obiektu stanowiącego przedmiot oceny. Zgodnie z założeniem metody, przyjmuje się stacjonarność funkcji losowej opisującej zróżnicowanie wartości analizowanego parametru [1, 16]. Zakłada się tym samym, że oczekiwana średnia jego wartość nie ulega zmianom w granicach złoża lub przynajmniej w granicach poszczególnych bloków obliczeniowych zasobów oraz, 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. Skuteczne stosowanie metody krigingu w dokumentowaniu złóż zależy zatem w znacznym stopniu od wiarygodności przyjmowanych w obliczeniach założeń odnośnie struktury zmienności złoża.

W artykule scharakteryzowano zjawisko niejednorodności złóż. Zwrócono w nim uwagę na obszarowe zróżnicowanie wartości parametrów złożowych, a zwłaszcza na zróżnicowa-

nie struktury ich zmienności opisaną za pomocą semiwariogramów. Semiwariogramy są to funkcje, które przedstawiają zależności występujące między zróżnicowaniem wartości parametrów złożowych a odległością między miejscami ich pomiarów, a zatem strukturę ich zmienności.

Niejednorodność złóż nie była dotychczas przedmiotem odrębnych badań, niemniej jednak na jej obecność zwracano już wcześniej uwagę. W celu poszerzenia zakresu informacji o obszarowym zróżnicowaniu zmienności parametrów złożowych dokonano analizy stabilności struktury zmienności wybranych złóż kopaliny stałych. Wytypowane do badań złoża reprezentują różne rodzaje kopaliny i typy morfogenetyczne.

Przeprowadzone badania mają aspekt poznawczy i praktyczny. Wyprowadzone wnioski dotyczą metodyki badania zmienności złóż i wykorzystania wyników tych badań przy dokumentowaniu złóż.

## 2. Niejednorodność i metodyka jej badania

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 zaniedbywalnie małe.

Wydzielenie w złożu części jednorodnych, różniących się średnimi wartościami parametrów, umożliwia najczęściej

<sup>\*)</sup> AGH w Krakowie, Wydział Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska

analiza rozkładów. Krzywe wielomodalne często sugerują, że badane złoża 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. Do wydzielania bloków jednorodnych stosować można technikę krigingu blokowego [15]. Kryterium wyznaczenia granic takich powierzchni stanowi wówczas istotność różnic wartości średnich badanego parametru oszacowanych dla bloków elementarnych.

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.

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.

Postać semiwariogramu opartą na klasycznej formule Matherona określa wzór [16]

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

gdzie:

$z_{i+h}, z_i$  – wartości badanego parametru w punktach odległych o  $h$ ,

$n_h$  – liczba punktów pomiarowych odległych o  $h$ .

Niekiedy 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 (relatywnych), obliczonych dla poszczególnych wydzielonych partii złoża, różniących się średnią wartością analizowanego parametru [3].

Postać semiwariogramu relatywnego przedstawia formuła [16]

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

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 homogeniczności struktury zmienności sprowadzało się głównie do oceny obszarowego zróżnicowania charakteru zmienności wybranych parametrów złożowych. W celu prześledzenia niejednorodności dokonano obliczenia semiwariogramów parametrów złożowych w mniejszych wydzielonych fragmentach badanych złóż.

Modelowanie zmienności parametrów dokonano w przestrzeni dwuwymiarowej 2D. Badaniem objęto cztery złoża różnych kopalni. Analizowano strukturę zmienności miąższości użytecznej węgla w poziomie V KWB Bełchatów, miąższości pokładu węgla 407/1 w KWK Staszic, zasobności Cu w złożu rud miedziowo-srebrowych kopalni Rudna oraz zasobności złoża siarki rodzimej Jeziórko.

Materiał podstawowy badań stanowiły wyniki rozpoznania złóż. Ocenę zróżnicowania zmienności miąższości użytecznej węgla w poziomie V KWB Bełchatów oparto na wynikach opróbowania otworów rozpoznawczych i ścian odkrywki (próbach bruzdowych). Zmienność pokładu węgla 407/1 w KWK Staszic analizowano w oparciu o dane pochodzące z otworów wiertniczych i wyrobisk górniczych. 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.

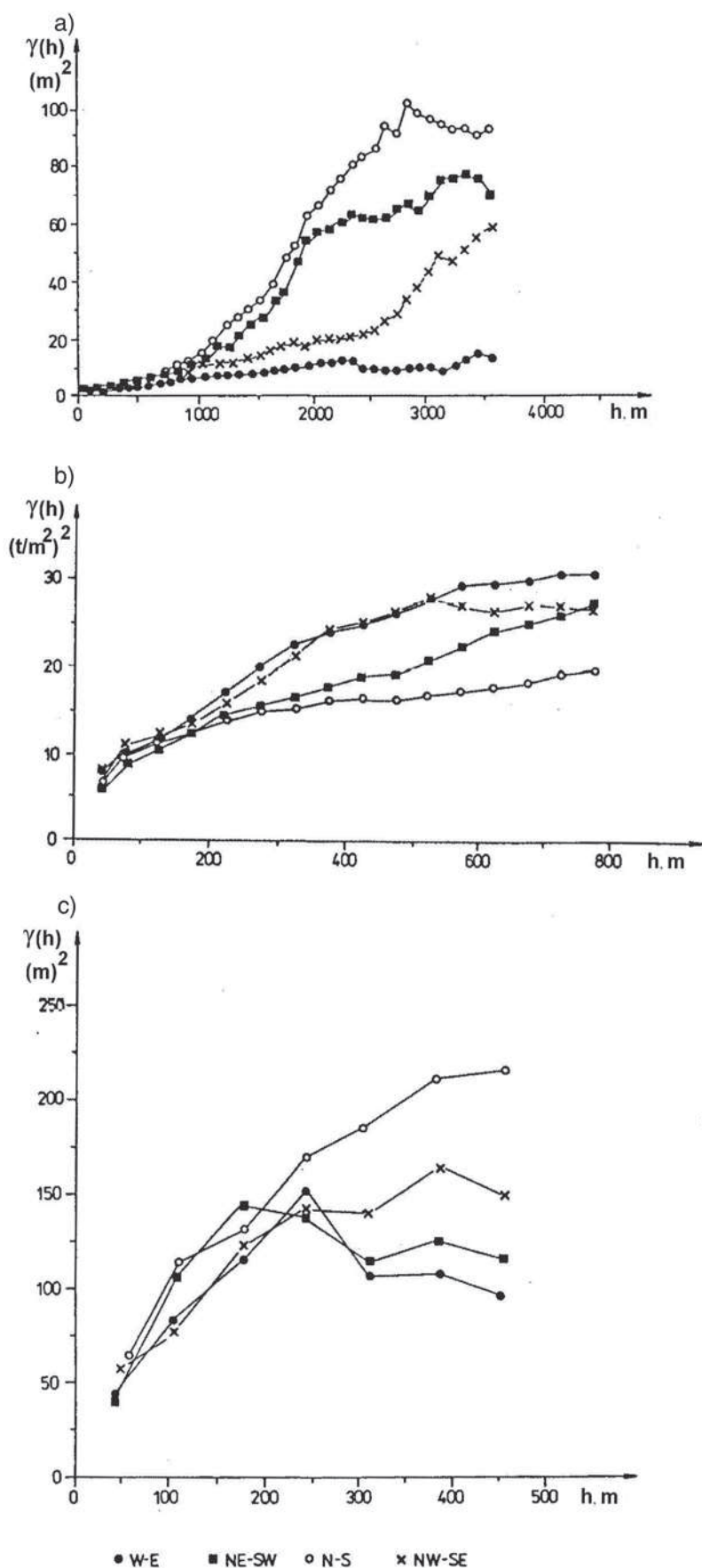
### 3. Charakterystyka niejednorodności

Jak wynika z dotychczas prowadzonych badań geostatystycznych, na większych obszarach często obserwuje się zróżnicowanie średnich wartości parametrów złożowych. Najczęściej obecność wyraźnego trendu zaznacza się dopiero na obszarach przekraczających znacznie rozmiary ocenianych parcel zasobowych. Wyniki badań złóż rud miedziowo-srebrowych [14, 15], siarki rodzimej [5] oraz węgla kamiennego [4, 6] 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 zwyczajnego do obliczania zasobów złoża lub konstrukcji map izolinii parametrów. 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. Jako przykład służyć mogą wyniki analizy dokładności interpolacji zawartości siarki i popiołu w wybranych pokładach KWK Murcki [20].

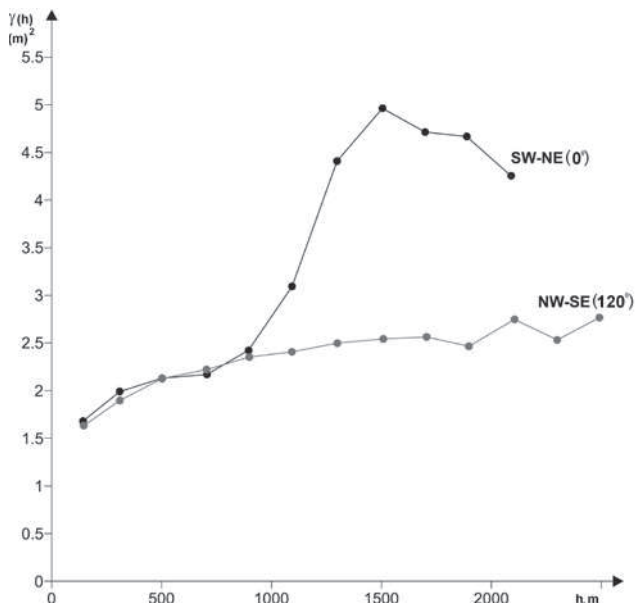
Obszarowe zróżnicowanie średnich wartości parametrów złożowych może wyrażać się w anizotropii. W takich przypadkach kierunkowe zróżnicowanie zmienności najczęściej zaznacza się dopiero na większych odległościach (rys. 1). Wykresy semiwariogramów charakteryzują się wówczas zbliżonym przebiegiem do pewnych odległości, które wyznaczają rozmiary quasi-izotropowych partii złoża. W partiach tych złoża jednocześnie charakteryzuje się większą jednorodnością. Niekiedy obserwowano, że kierunki największej zmienności pokrywają się z kierunkami występowania rejonów różniących się istotnie średnimi wartościami parametrów złożowych. Przyczyną takiej niejednorodności może być na przykład ubożenie złoża w pobliżu jego granic. Złoża charakteryzuje się wówczas w tych strefach znacznie niższymi parametrami niż na pozostałym obszarze. Często niejednorodność i anizotropia znajdują wyraz w obecności trendu („dryftu”) w zróżnicowaniu wartości parametrów złożowych.

Na rys. 2 przedstawiono wyniki badania zróżnicowania zmienności miąższości warstwy złożowej kruszywa naturalnego w dolinie górnej Odry w rejonie Raciborza. Przebieg semiwariogramów wskazuje, że zmienność miąższości na małych odległościach ma charakter izotropowy, a kierunkowe zróżnicowanie zmienności parametru ujawnia się dopiero na odległościach ponad 750 m w kierunku SW – NE (30°).



Rys. 1. Semiwariogramy ukazujące występowanie anizotropii zmienności parametrów złożowych na większych obszarach [9]  
 a) miąższość pokładu węgla 510 w KWK Kazimierz-Juliusz, b) zasobność złoża siarki rodzimej Jeziorko (pole eksploatacyjne IX), c) miąższość złoża kopaliny skaleniowej Karpniki

Fig. 1. Directional semi-variograms presenting anisotropy on sizable areas [9]  
 a) seam thickness no. 510 in the Kazimierz-Juliusz coal mine, b) sulphur accumulation for the Jeziorko deposit (IX mining field), c) thickness of the Karpniki feldspar deposit



Rys. 2. Semiwariogramy kierunkowe miąższości warstwy kruszywa naturalnego w dolinie Odry (obszar badań obejmuje złoża: Lubomia III, Nieboczowy III oraz fragment złoża Racibórz II – zbiornik) [9]

Fig. 2. Directional semi-variograms of thickness of natural aggregate in Odra valley (studied area includes: Lubomia III and Nieboczowy III deposits, part of Racibórz II deposit – zbiornik) [9]

Obserwowana na semiwariogramach anizotropia znajduje wy tłumaczenie w niejednorodności złoża. Na mapie izoliniowej parametru obserwuje się występowanie na kierunku SW - NE stref o zróżnicowanej miąższości, których szerokość wynosi przeciętnie 750 m (rys. 3). Miąższość kopaliny wyraźnie maleje w kierunku NE, w miarę oddalania się od koryta rzeki. Przyczyny obserwowanej anizotropii należałoby upatrywać w zróżnicowanych warunkach akumulacji materiału okruchowego w zależności od odległości od koryta rzeki.

Niejednorodność nie musi się ujawniać w postaci kierunkowego zróżnicowania zmienności parametrów złożowych. Według M.B. Raca [19] zarówno środowisko niejednorodne, jak i jednorodne może być izo-, jak i anizotropowe. Relacje między tymi pojęciami ujmuje tab. 1.

W przypadku losowego charakteru zmienności obszarowe, skokowe zmiany wartości parametrów złożowych mogą powodować, że obserwowane semiwariogramy parametrów mają z początku przebieg równoległy do osi odciętych, a po przekroczeniu pewnej wartości h raptownie rosną, po czym ponownie stabilizują się wokół prostej równoległej do osi wartości argumentu h (rys. 4). Tego typu przebieg mają semiwariogramy zawartości popiołu i kaloryczności w pokładzie 349 oraz zawartości siarki w pokładzie 510 w KWK Kazimierz-Juliusz [6]. Widoczny na semiwariogramach obraz zróżnicowania parametrów jakościowych węgla znajduje odzwierciedlenie na mapach opróbowania złoża. Na mapach tych można prześledzić występowanie rejonów różniących się jakością węgla (rys. 4). Rozmiary tych stref odpowiadają odległościom, przy których następuje raptowny wzrost wartości semiwariogramów.

Na rys. 5 przedstawiono rozmieszczenie analizowanych partii złóż wraz z liczebnością zbiorów danych oraz wykresy semiwariogramów skonstruowanych dla wydzielonych rejonów. Wyniki przeprowadzonych badań wskazują, że przyjęcie założenia odnośnie stabilności struktury zmienności parametrów w granicach całego złoża bywa często zbyt du-



Rys. 3. Mapa izolunii miąższości warstwy kruszywa naturalnego w dolinie Odry sporządzona metodą kriginu zwykłego (obszar badań obejmuje złoża: Lubomia III, Nieboczowy III oraz fragment złoża Racibórz II – zbiornik) [9] 1 – otwory wiertnicze

Fig. 3. Contour map of thickness of natural aggregate in Odra valley obtained by ordinary kriging (studied area includes: Lubomia III and Nieboczowy III deposits, part of Racibórz II deposit – zbiornik) [9] 1 – boreholes

żym uproszczeniem. Zwracają uwagę dość wyraźne różnice w przebiegu wykresów semiwariogramów skonstruowanych dla poszczególnych rejonów. Świadczy to o obszarowym zróżnicowaniu struktury zmienności badanych parametrów złożowych. Zwracano na to już dawno uwagę [np. 10, 11, 18].

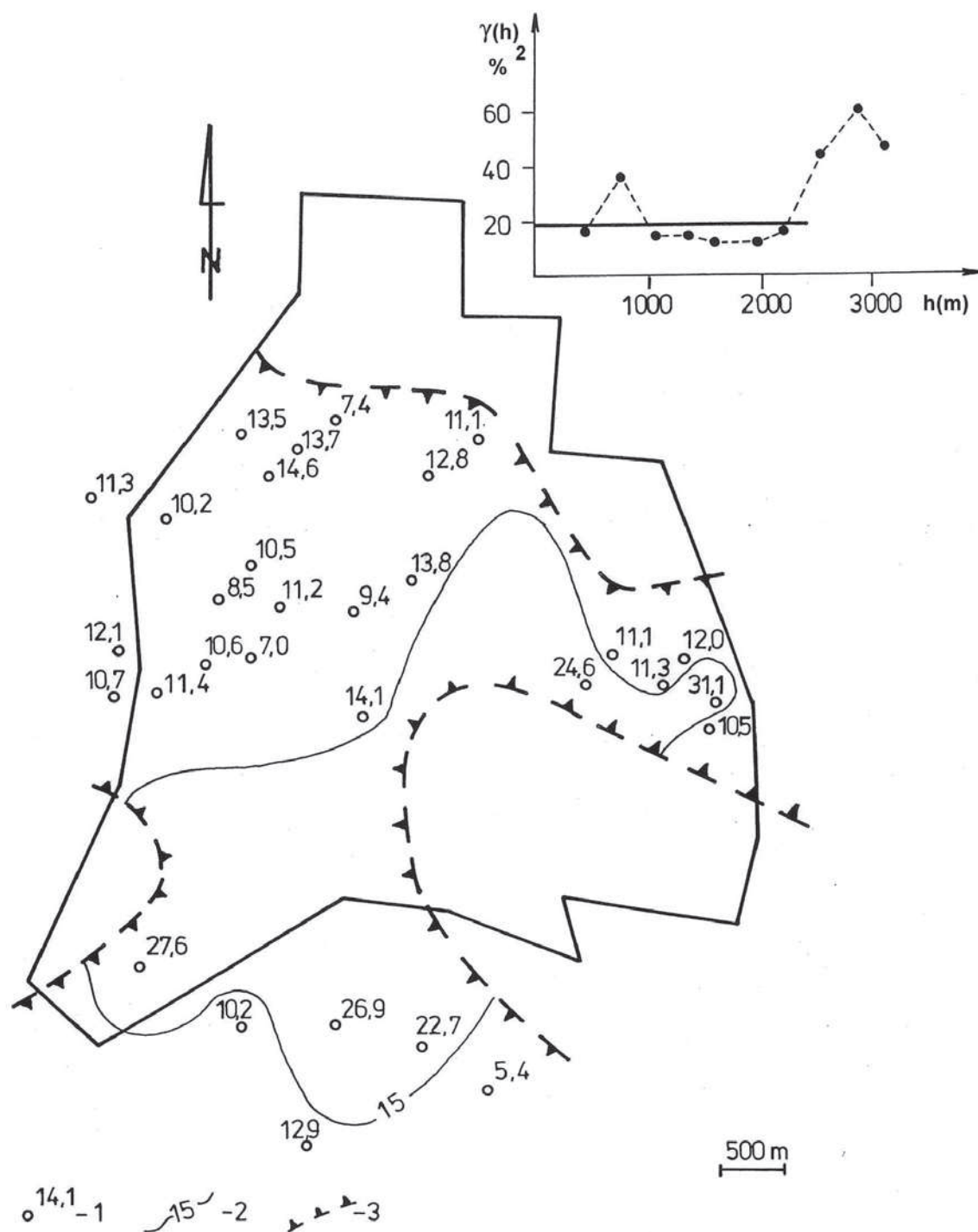
Obszarowe zróżnicowanie zmienności parametrów złożowych obserwowano w śląsko-krakowskich złożach rud cynku i ołowiu. Według Muchy [12] zróżnicowanie zawartości zarówno Zn jak i Pb w tych złożach cechuje duże podobieństwo

Tablica 1. Charakterystyka obiektów geologicznych wg M.B. Raca [19]

Table 1. Characteristics of geological objects acc. to M.B. Rac [19]

Środowisko	Jednorodne	Niejednorodne
Izotropowe	Cechy złoża nie zależą od kierunku badania i położenia punktów obserwacji	Cechy złoża zależą od położenia punktów obserwacji, lecz nie zależą od kierunku badania
Anizotropowe	Cechy złoża zależą od kierunku badania, lecz nie zależą od położenia punktów obserwacji	Cechy złoża zależą od kierunku badania i położenia punktów obserwacji



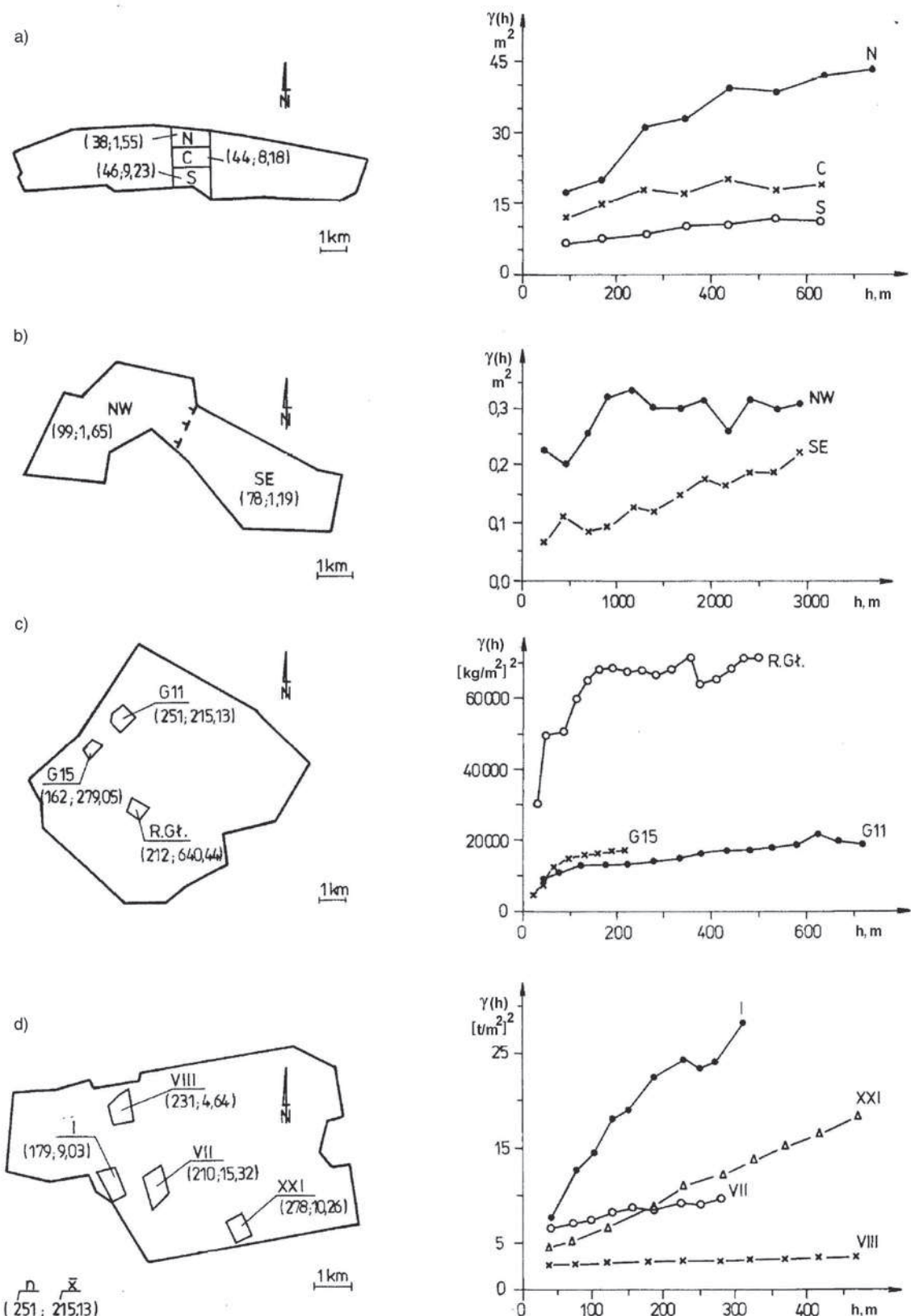


Rys. 4. Mapa zawartości popiołu w węglu - pokład 349 w KWK Kazimierz-Juliusz [4]

1 – otwór wiertniczy wraz z pomiarem popiołu, 2 – izolinia zawartości popiołu rozgraniczająca populacje, 3 – wychodnia pokładu

Fig. 4. Map of ash content in coal – seam no. 349 in Kazimierz-Juliusz hard coal mine [4]

1 – borehole and ash content measurement, 2 – isoline dividing two populations, 3 – outcrop of the seam



Rys. 5. Przykłady obszarowego zróżnicowania semiwariogramów parametrów złożowych  
 a) miąższość użyteczna węgla w poziomie V KWB Belchatów, b) miąższość pokładu węgla, 407/1 w KWK Staszic,  
 c) zasobność Cu w złożu rud miedziowo-srebrowych kopalni Rudna, d) zasobność złoża siarki rodzimej Jeziórko;  
 N, NW, G15, VII – wydzielone części złoża, n – liczba danych,  $\bar{x}$  – średnia arytmetyczna wartość parametru  
 Fig. 5. Examples of semi-variograms differentiation within deposits  
 a) useful thickness of lignite for V level at Belchatów opencast mine, b) thickness of seam no. 407/1 in Staszic hard coal mine, c) Cu accumulation for copper-silver ore deposit of Rudna mine, d) native sulphur accumulation for Jeziórko deposit;  
 N, NW, G15, VII – studied parts of the deposits; n – number of data,  $\bar{x}$  – arithmetic mean values of the parameters

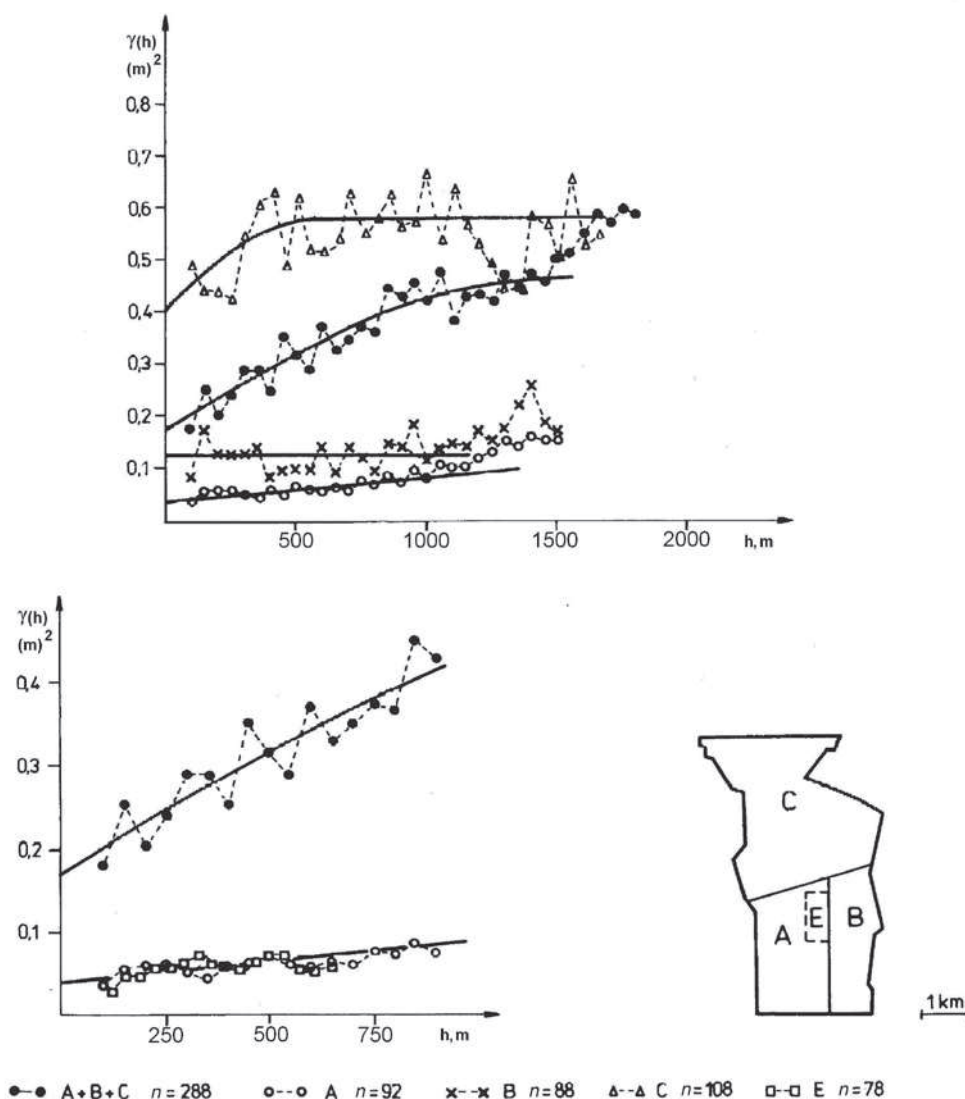
struktur zmienności wyrażające się identycznym sferycznym typem modelu semiwariogramu. Zróżnicowanie wartości parametrów modeli sferycznych opisujących zmienność metali w odmiennie wykształconych częściach złóż, charakteryzujących się innym typem form skupień kruszców, wyklucza jednak możliwość określenia jednolitego geostatystycznego modelu zmienności.

Obszarowe zróżnicowanie zmienności parametrów złóżowych rejestrowano również w złóżach węgla kamiennego [6, 7, 8, 10] i brunatnego [17]. W złóżach węgla kamiennego zaznacza się nie tylko zróżnicowanie struktury zmienności miąższości pokładów, ale także zmienność parametrów jakościowych węgla. Obserwuje się obszarowe zróżnicowanie semiwariogramów opisujących zmienność tych parametrów w obrębie pojedynczych pokładów na obszarze całego GZW, a także w granicach pojedynczych kopalń [6, 7, 8]. Wyraża się to odmienną postacią geostatystycznych modeli zmienności lub różną wielkością parametrów opisujących jej model.

Wyniki badań pokładu 418 w KWK Bielszowice sugerowałyby, że małe fragmenty pokładów mogą stanowić quasi-homogeniczne rejonu z uwagi na zmienność parametrów

złożowych [6]. Do podobnych wniosków prowadzi również analiza struktury zmienności miąższości pokładu węgla 510 w KWK Kazimierz-Juliusz [4].

Na rys. 6 przedstawiono wyniki analizy zmienności pokładu 418 w KWK Bielszowice. W celu prześledzenia obszarowych zmian zmienności miąższości dokonano podziału pokładu na 3 parcele, oznaczając je umownie A, B, C. Dodatkowo w obrębie parceli A wydzielono do badań mniejszy fragment pokładu, oznaczając go symbolem E. Zwraca uwagę fakt, że semiwariogramy miąższości pokładu wyliczone dla całego obszaru górniczego kopalni i wydzielonych fragmentów złoża A, B i C zdecydowanie się różnią. Świadczy to o obszarowym zróżnicowaniu struktury zmienności parametru na większych obszarach. Największą zmienność wykazuje pokład w rejonie C, w którym występują liczne strefy wycieńień i rozmyć pokładu. Semiwariogram obliczony dla tego rejonu charakteryzuje się wyższymi wartościami i ukazuje dużą zmienność lokalną. Zbliżony przebieg semiwariogramów skonstruowanych dla rejonu D i E wskazuje na jednorodny, względnie quasi-jednorodny charakter zmienności miąższości pokładu w mniejszych jego parcelach.



Rys. 6. Semiwariogramy miąższości pokładu 418 w wydzielonych parcelach w KWK Bielszowice [6]  
A, B, C, E – wyróżnione części pokładu, n – liczba danych

Fig. 6. Sami-variograms of thickness of the seam no. 418 for selected parts in Bielszowice hard coal mine [6]  
A, B, C, E - studied parts of the seam, n - number of data

W złożach wielopokładowych zróżnicowanie charakteru zmienności dotyczy poszczególnych pokładów, co wyraża się zindywidualizowaniem ich struktury zmienności. Przykładem są złoża węgla kamiennego (rys. 7) [6, 10, 21]. Obserwuje się przy tym pewne zależności modelu zmienności miąższości pokładów, wartości opałowej, zawartości popiołu oraz zawartości siarki w węglu od pozycji litostratygraficznej pokładu [6, 7, 8].

Jak wynika z przeprowadzonych badań, obserwowane zróżnicowanie struktury zmienności najczęściej nie znajduje uzasadnienia w efekcie proporcjonalności. Semiwarioramogramy względne (relatywne) wyliczane dla poszczególnych fragmentów złóż mogą nadal różnić się przebiegiem. Świadczą o tym dane przedstawione na rys. 8. Zwraca uwagę zróżnicowanie semiwarioramogramów względnych badanych parametrów złożowych. Jedynie wykresy semiwarioramogramów miąższości pokładu węgla 407/1 w KWK Staszyc sugerują występowanie zależności pomiędzy wariancją i średnią wartością parametru.

Również w śląsko-krakowskich złożach cynku i ołowiu obserwuje się obszarowe zróżnicowanie względnych semiwarioramogramów zawartości metali. Zastosowanie tych semiwarioramogramów prowadzi co prawda do znacznego zbliżenia wartości parametrów geostatystycznych, ale ich zróżnicowanie pozostaje nadal zbyt duże, aby można było skonstruować jeden wspólny model dla całych złóż [12].

Obszarowe zróżnicowanie struktury zmienności parametrów złożowych znajduje często wytłumaczenie w budowie złóż. Na geologiczne uwarunkowania obserwowanych struktur zmienności parametrów złożowych zwracano już wcześniej uwagę [np. 6, 13, 18]. Częstą przyczyną niejednorodności miąższości i zasobności jednostkowej jest zmienne wykształcenie serii złożowej.

W złożach siarki rodzimej do czynników determinujących strukturę zmienności parametrów należy zaliczyć obecność gipsów, płonnych wapieni oraz ilów w serii chemicznej. Również urozmaicona morfologia stropu lub spągu złóż może prowadzić do niestabilności struktury zmienności parametrów złożowych. Obszarowe zróżnicowanie struktury zmienności zawartości składników użytecznych znajduje dodatkowo uzasadnienie w występowaniu w złożach odmiennych typów mineralizacji.

Do czynników determinujących strukturę zmienności miąższości pokładów węgla należy zaliczyć rozmycia erozyjne oraz zmiany facjalne [6, 18]. W pokładach, w których obserwuje się liczne rozmycia i wyklinowania zaznacza się większy udział składnika losowego w obserwowanej zmienności parametru. Częściej stwierdza się modele losowe semiwarioramogramów. Również obecność przerostów wpływa na strukturę zmienności miąższości pokładów węgla. Także tektonika ciągła może determinować strukturę ich zmienności. Przykładowo występowanie quasi-homogenicznych partii w pokładzie 510 w KWK Kazimierz-Juliusz należałoby po części wiązać z elementami głównych struktur tektoniki ciągłej. Jak wynika z przeprowadzonych badań największe zróżnicowanie miąższości występuje na skłonie niecki kazimierzowskiej i w strefach antyklinalnych, najmniejsze natomiast w strefie osiowej niecki [4].

Występowanie substancji mineralnej rozproszonej w węglu, a także przerostów skał płonnych ma wpływ na obserwowaną strukturę zmienności parametrów jakościowych pokładów węgla (rys. 9) [7, 8, 18]. W publikacji [18] podany jest model zależności semiwarioramogramu od budowy pokładu. Strukturę zmienności wartości opałowej, zawartości popiołu oraz siarki może determinować również wyklinowywanie się i rozszczepianie pokładów, którym najczęściej towarzyszy wzrost substancji nieorganicznych w węglu.

Niejednokrotnie ustalenie związków pomiędzy obserwowanymi na semiwarioramogramach strukturami zmienności parametrów a budową geologiczną złoża bywa utrudnione lub wręcz niemożliwe, przede wszystkim z uwagi na niedostateczny stopień rozpoznania struktur zmienności. Wynika to na ogół ze stosunkowo małej liczby obserwacji, rzadkiej sieci rozpoznawczej lub skrajnie nieregularnego rozmieszczenia punktów pomiarowych. Reprezentatywność semiwarioramogramów zależy w znacznym stopniu od dokładności z jaką złożo zostało rozpoznane. Uzasadnia to dokonywanie interpretacji geologicznej semiwarioramogramów skonstruowanych dla złóż dostatecznie rozpoznanych. Na obserwowaną strukturę zmienności parametru ma również wpływ skala obserwacji. Należy mieć na uwadze, że zwiększając rozmiary badanego fragmentu złoża, uwzględnia się coraz to nowe elementy jego budowy, rzutujące na ogólną zmienność parametrów złożowych. Dla potrzeb analizy stabilności struktury zmienności wybrane do badań fragmenty złóż powinny mieć zbliżone wymiary.

## 5. Podsumowanie

Jak wynika z dotychczas 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 jednak najczęściej traktować za quasi-homogeniczne z uwagi na zróżnicowanie wartości parametrów złożowych, co z kolei upoważnia do stosowania w ich ocenie metody kriginu zwyczajnego.

Obszarowe zróżnicowanie średnich wartości parametrów złożowych może prowadzić do anizotropii zmienności. W takich przypadkach kierunkowe zróżnicowanie zmienności najczęściej zaznacza się dopiero na większych odległościach.

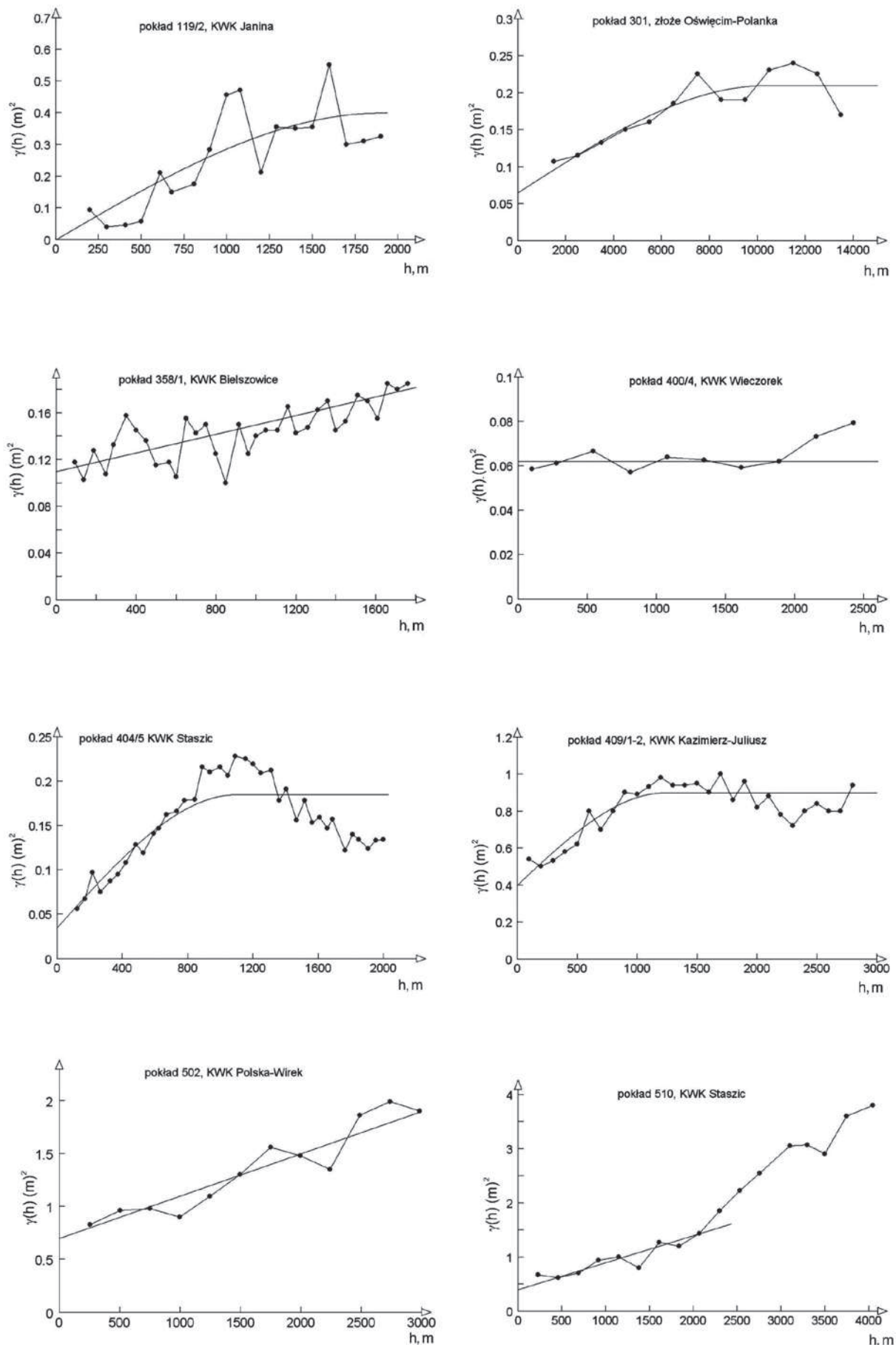
Zwraca uwagę niestabilność struktur zmienności złóż. Uzyskane wyniki potwierdzają spostrzeżenia poczynione na etapie wcześniej prowadzonych badań, co do małej homogeniczności struktur zmienności złóż. Zróżnicowanie struktury zmienności daje się obserwować w złożach jednego typu, a nawet w obrębie pojedynczych złóż. Wyraża się to bądź odmienną postacią geostatystycznego modelu zmienności (np. pokładów węgla kamiennego) bądź różną wielkością parametrów opisujących model (np. w złożach rud Zn-Pb, złożach rud Cu-Ag). Zróżnicowanie to dotyczy może poszczególnych pól, pięter, poziomów kopalnianych, a także poszczególnych pokładów w przypadku złóż wielopokładowych.

Najczęściej obserwowane zróżnicowanie geostatystycznych modeli opisujących zmienność parametrów w różnych partiach złoża nie pozwala na ustalenie jednolitego modelu zmienności.

Wyniki badań sugerowałyby jednak, że małe fragmenty złóż mogą stanowić quasi-homogeniczne rejony z uwagi na zmienność parametrów złożowych.

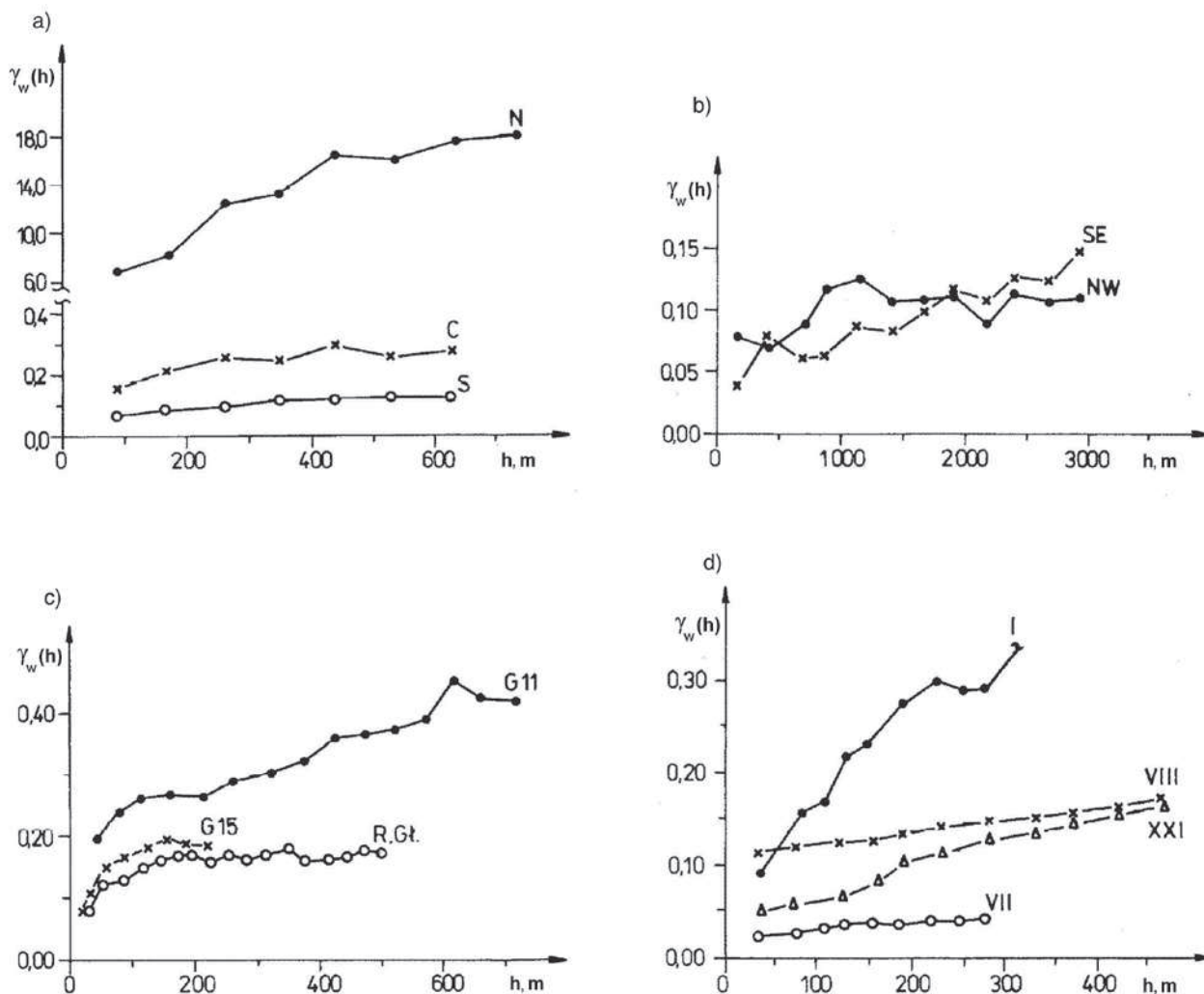
Dotychczasowa praktyka wskazuje na potrzebę głębszego analizowania struktury zmienności parametrów złożowych w nawiązaniu do budowy geologicznej złoża i zróżnicowania ich cech charakteryzujących rodzaj i jakość kopaliny (np. form mineralizacji). Analiza wyników rozpoznania złoża powinna obejmować również 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





Rys. 7. Semiwariogramy miąższości wybranych pokładów węgla w GZW [6]

Fig. 7. Sami-variograms of thicknesses of selected seams in Upper Silesian Coal Basin [6]



Rys. 8. Badanie efektu proporcjonalności przy pomocy semiwariogramów względnych

a) miąższość użyteczna węgla w poziomie V KWB Belchatów, b) miąższość pokładu węgla 407/1 w KWK Staszic, c) zasobność Cu w złożu rud miedziowo-srebrnych kopalni Rudna, d) zasobność złoża siarki rodzimej Jeziórko; N, NW, G15, VII – wydzielone części złoża przedstawione na rys. 5.

Fig. 8. Study of a proportional effect with relative semi-variograms

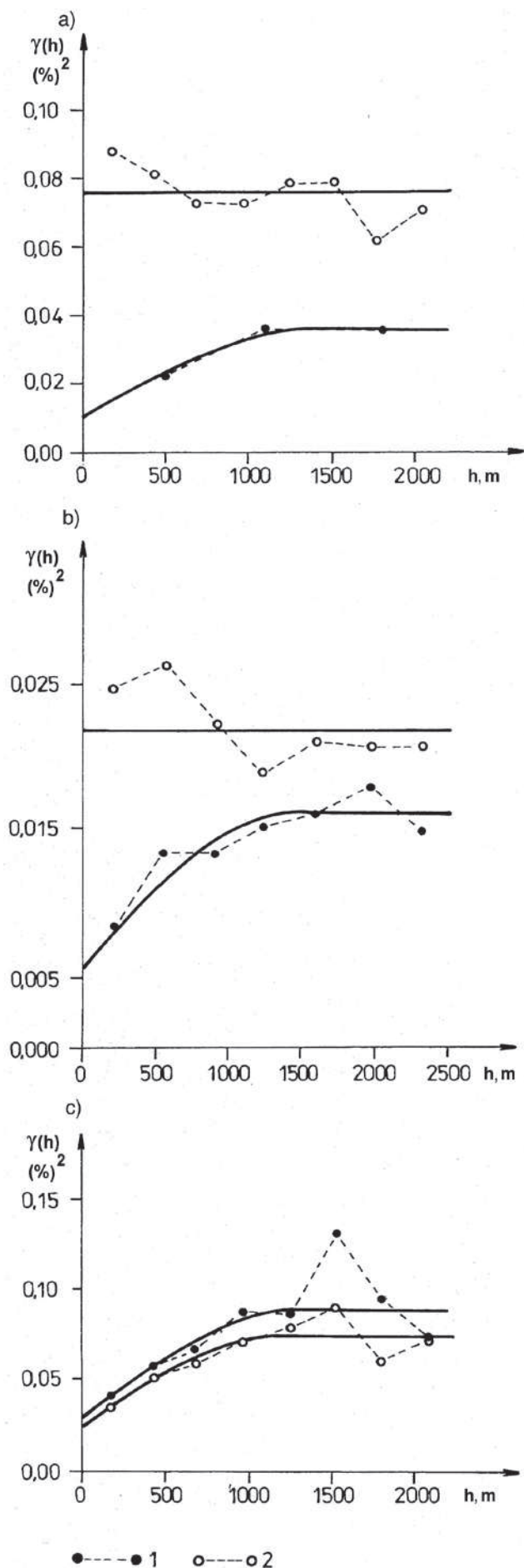
a) useful thickness of lignite for V level at Belchatów opencast mine, b) thickness of seam no. 407/1 in Staszic hard coal mine, c) Cu accumulation for copper-silver ore deposit of Rudna mine, d) native sulphur accumulation for Jeziórko deposit; N, NW, G15, VII – studied parts of the deposits;  $n$  – number of data,  $\bar{x}$  – arithmetic mean values of the parameters

złoża. Znajomość procesów geologicznych, budowy złoża i jego genezy winna ułatwiać właściwą interpretację obszarowego zróżnicowania zmienności parametrów złożowych. Pomocne w tym względzie mogą być mapy izolinii parametrów złoża, a także mapy trendów.

Szczególnie atrakcyjną do badania niejednorodności złóż wydaje się być ocena krzyżowa (*cross validation*). Znajduje ona zastosowanie do ustalania optymalnych modeli semiwariogramów opisujących zmienność badanych parametrów złoża [2]. Procedura ta stwarza możliwość analizowania efektywności interpolacji wartości parametrów złożowych przy różnych modelach ich zmienności. Porównanie wyników estymacji opartej na modelach semiwariogramów skonstruowanych dla całego złoża i wydzielonych rejonów umożliwia weryfikację stopnia jednorodności struktury zmienności badanego obiektu złożowego.

Badanie 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 podanych już eksploatacji. Jeśli złożo rozpoznane zostało niewielką liczbą wyrobisk, zbadanie niejednorodności napotyka na znaczne trudności, a wynik oceny na ogół obarczony jest znacznym błędem.

Dysponowanie niedostateczną liczbą danych skłania często do przyjmowania założeń odnośnie 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.



Rys. 9. Wpływ przerostów na obserwowaną strukturę zmienności miąższości pokładów węgla [6]

a) pokład 349, KWK Wesola, rejon W; b) pokład 349, KWK Wesola, rejon E; c) pokład 404/1, KWK Wieszorek; d) pokład 358/1, KWK Sośnica

1 – semiwariogram miąższości pokładu wraz z przerostami, 2 – semiwariogram miąższości pokładu bez przerostów

Fig. 9. Influence of the dirty partings (intercalations) on the observed variability structure of thicknesses of hard coal seams [6]

a) seam no. 349, region W- Wesola hard coal mine, b) seam no. 349, region E- Wesola hard coal mine, c) seam no. 404/1, Wieszorek hard coal mine, d) seam no. 358/1, Sośnica hard coal mine

1 – semi-variogram of the thickness of the coal seam (excluding intercalations), 2 – semi-variogram of the thickness of the coal seam with intercalations

Niejednorodność winna być uwzględniana przy dokumentowaniu zasobów i ocenie jakości kopaliny, a także przy projektowaniu sposobu zagospodarowania i eksploatacji złoża.

W przypadku stwierdzenia wyraźnego obszarowego zróżnicowania zmienności wskazane jest prowadzenie estymacji kriginem zwyczajnym, oddzielnie w partiach uznanych za jednorodne, w oparciu o ustalone dla nich modele semiwariogramów parametrów złoża. Jeżeli występuje efekt proporcjonalności, uzasadnione jest prowadzenie estymacji procedurą kriginu w oparciu o ustalony dla całego złoża semiwariogram względny parametru. W przypadku obecności wyraźnego trendu („dryftu”) w zmienności parametru, wskazane jest korzystanie z zalecanej dla warunków niestacjonarnych techniki kriginu uniwersalnego. Powinno to prowadzić do podwyższenia efektywności prognozowania jakości kopaliny i szacowania zasobów.

## Literatura

1. *Armstrong M.*: Basic Linear Geostatistics. Springer, Berlin 1998.
2. *Clark I.*: The art of cross validation in geostatistical application. Proceedings, 19th APCOM Symposium, Penn State 1986.
3. *Cressie N.*: When are relative variograms useful in Geostatistics. *Mathematical Geology*, 1985, 17, 7: 693-702.
4. *Kokesz Z.*: Struktura zmienności parametrów wybranych pokładów węgla z KWK Kazimierz – Juliusz. „Gospodarka Surowcami Mineralnymi” 1990, 5, t. 6, z.1: 97 – 105.
5. *Kokesz Z.*: Geostatistical reserves estimation for native sulphur deposits mined by underground melting. *Science de la Terre, ser. Inf.*, 1991, nr 31, Nancy: 223-238.
6. *Kokesz Z.*: Geostatystyczna charakterystyka pokładów węgla w Górnośląskim Zagłębiu Węglowym. „Górnictwo Odkrywkowe” 2006, nr 1-2: 66-75.
7. *Kokesz Z.*: Geostatystyczna charakterystyka zmienności zawartości popiołu i wartości opalowej węgla w wybranych pokładach Górnośląskiego Zagłębia Węglowego. „Przegląd Górniczy” 2010, nr 11, 103-110.
8. *Kokesz Z.*: Geostatystyczna analiza zmienności zawartości siarki w wybranych pokładach węgla GZW. „Gospodarka Surowcami Mineralnymi” 2010, t.26, z.3, 95-110.
9. *Kokesz Z.*: Badania anizotropii zmienności złóż z wykorzystaniem metod geostatystycznych. „Przegląd Górniczy” 2013, nr 12.
10. *Kokesz Z., Mucha J.*: 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, 1987, t. 3: 45-55.

11. *Mucha J.*: Bariery i ograniczenia geostatystycznej oceny parametrów złożowych. „Zeszyty Naukowe AGH, Geologia” 2001, nr 6, t.27, z. 2-4: 641-658.
  12. *Mucha J.*: Struktura zmienności zawartości Zn i Pb w śląsko – krakowskich złożach rud Zn-Pb; Studia, Rozprawy, Monografie, 2002, nr 108, IGSMiE PAN, Kraków.
  13. *Mucha J., Szuwarzynski M.*: Geological aspects of geostatistical modelling of the Polish Zn-Pb deposits. Science de la Terre, ser. Inf., 1994, nr 32, Nancy: 317-330.
  14. *Namysłowska – Wilczyńska B.*: Application of kriging to the determination of homogenous blocks of Cu ore deposits. Science de la Terre, ser. Inf., 1988, nr 27, Nancy: 279-290.
  15. *Namysłowska – Wilczyńska B.*: Zmienność złóż rud miedzi na monoklinie przedsudeckiej w świetle badań geostatystycznych. „Prace Naukowe Instytutu Geotechniki i Hydrotechniki Politechniki Wrocławskiej, s. Monografie” 1993, nr 21.
  16. *Namysłowska – Wilczyńska B.*: Geostatystyka – Teoria i zastosowania. Wyd. Politechniki Wrocławskiej, 2006.
  17. *Naworyta W.*: Analiza zmienności parametrów złożowych węgla brunatnego pod kątem sterowania jakością strumienia urobku. „Gospodarka Surowcami Mineralnymi” 2008, t. 24, z. 2/4, 97 – 109.
  18. *Nieć M., Mucha J., Kokesz Z.*: Geological background for geostatistical models. Science de la Terre, ser. Inf., 1988, nr 27, Nancy: 263-278.
  19. *Rac M. B.*: Nieodnorodność gornych porod i ich fizycznych swojstw. Moskwa 1968.
  20. *Wasilewska-Błaszczuk M., Mucha J.*: Dokładność interpolacji zawartości siarki i popiołu w wybranych pokładach węgla kamiennego GZW. „Gospodarka Surowcami Mineralnymi” 2005, t. 21, z.1, 7 – 21.
  21. *Wasilewska-Błaszczuk M., Mucha J.*: Dokładność szacowania średnich wartości parametrów złożowych pokładów węgla kamiennego w blokach obliczeniowych metodą krigingu zwyczajnego. „Przeгляд Górnicy” 2006, nr 11, 10-17.
- 
-