

WIESŁAWA SAŁACKA*, JERZY SAŁACKI*

Przegląd metod prognozowania okruszcowania złoże w bloku obliczeniowym na przykładzie złoże rud miedzi

Słowa kluczowe

Zasoby surowców mineralnych, złoże rud miedzi, prognozowanie parametrów złożowych, systemy informatyczne

Streszczenie

W artykule omówiono metody prognozowania parametrów złoże w bloku obliczeniowym stosowane w kopalniach rud miedzi LGOM. Prognozowanie przeprowadzono za pomocą systemów informatycznych wykonanych w Instytucie Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN. Podstawą prognozy są parametry złoże wyliczane dla prób bruzdowych położonych w obszarze bloku obliczeniowego oraz w pewnym jego otoczeniu. W artykule przedstawiono zestaw parametrów złoże podlegających prognozie oraz stosowane metody prognozowania, a mianowicie: metodę plasterkowania, metodę średnich oraz metodę geostatystyczną. W artykule przedstawiono także metodę prognozowania rozkładu wartości parametrów złoże, wykorzystującą metody geostatystyczne, a w szczególności kriging blokowy.

W artykule omówiono zalety i wady każdej z metod oraz okoliczności, w których powinny być stosowane.

Wprowadzenie

Jedną z podstawowych operacji wykorzystywanych przy rozwiązywaniu zagadnień związanych z gospodarką zasobami jest prognozowanie parametrów złoże w wybranym obszarze. W praktyce kopalnianej obszarem tym jest blok obliczeniowy. Obszar złoże stanowiący blok obliczeniowy może być wydzielony z uwagi na jego rolę w procesie wybierania złoże lub też może stanowić przedmiot badań i jest wtedy traktowany w modelu jako blok roboczy. W obu przypadkach do prognozowania parametrów złoże w bloku obliczeniowym stosuje się takie same metody badawcze i wykorzystuje się te same struktury baz danych.

* Mgr., Instytut Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN, Kraków.

Wyniki analiz parametrów złoza w bloku obliczeniowym mogą być wykorzystane w różnorodnych analizach technicznych i ekonomicznych, w szczególności przy sporządzaniu bilansu zasobów. Wyniki można także wykorzystać do wyznaczania jednorodnych pod względem okruszczenia obszarów złoza, w celu planowania robót wybierkowych. Wykonując wielowariantowe obliczenia można także badać parametry okruszczenia złoza jako funkcje parametrów kryteryjnych, takich jak minimalna brzeżna i minimalna średnia zawartość miedzi lub składnika ekwiwalentnego w rudzie. Funkcje te są wykorzystywane przy konstruowaniu kryteriów przemysłowości.

Opisywane w artykule metody prognozowania rozkładu wartości parametrów złoza w blokach obliczeniowych realizowane są za pomocą systemów informatycznych eksploatowanych w kopalniach LGOM. Do ważniejszych należą:

- system GEOLOG do zarządzania bazą danych geologicznych i wykonywania podstawowej analizy parametrów złożowych w próbach bruzdowych oraz do prognozowania parametrów złoza w blokach obliczeniowych metodą plasterkowania i metodą średnich,
- system GST do analizy parametrów złoza metodami geostatystycznymi.

Niezależnie od stosowanej metody, prognozowanie parametrów złoza wymaga szczegółowej analizy masowych pomiarów parametrów złoza w próbach bruzdowych.

Metody prognozowania parametrów złoza w bloku obliczeniowym można podzielić na dwie kategorie. W pierwszej z nich nie uwzględnia się przestrzennego rozkładu prób bruzdowych w obszarze bloku. Zakłada się, że wartość parametru w badanym obszarze jest zmienną losową o nieznanym rozkładzie. Prognoza wartości parametru sprowadza się do pobrania próbki pozwalającej estymować wartość oczekiwaną z dostateczną dokładnością. Próbką jest tu zestaw wartości analizowanego parametru w próbach bruzdowych pobranych w obszarze bloku i jego najbliższym otoczeniu, a estymatorem jest średnia arytmetyczna. W praktyce stosowane są różne odmiany metod prognostycznych opartych na powyższych założeniach. W górnictwie rud miedzi stosowane są dwie metody wykorzystujące opisane wyżej założenia. Są to metody plasterkowania oraz średnich.

Metodą prognozowania uwzględniającą przestrzenny rozkład prób bruzdowych w obszarze bloku i jego otoczeniu jest metoda geostatystyczna. Jest ona oparta na założeniu, że wartości parametru w próbach bruzdowych leżących blisko siebie są skorelowane.

W artykule przedstawiono zarys wymienionych metod na tle realizujących je systemów informatycznych oraz dokonano analizy celowości ich stosowania dla rozwiązania praktycznych zadań stojących przed służbami geologicznymi kopalń.

1. Charakterystyka danych będących podstawą prognozowania parametrów złoza w bloku obliczeniowym

Podstawą prognozowania wartości parametrów złoza rud miedzi w blokach obliczeniowych są wartości tych parametrów stwierdzone w próbach bruzdowych przypisanych blokowi. Próby bruzdowe pobierane są w wyrobiskach górniczych z rozstępem wynikającym ze zmienności parametrów złoza. Typowe próby bruzdowe pobierane są na ociosach wyrobisk. W miejscach pobrania prób ociosowych pobiera się niekiedy próby w przybierkach stropu i spągu, a także

wykonuje się dowierty. Rozmieszczenie miejsc pobierania prób bruzdowych wynika w sposób oczywisty z rozwoju robót górniczych i jest na ogół nieregularne. Materiał z prób bruzdowych analizowany jest w laboratoriach, a wyniki przesyłane do Działów Geologicznych kopalni, gdzie są gromadzone w bazach danych systemów informatycznych.

Użyte wyżej sformułowanie „prób przypisanych blokowi” oznacza, że dokonujący prognozy musi podjąć decyzję, które próby bruzdowe z otoczenia analizowanego bloku należy uwzględnić o obliczeniach. Zależy to od stosowanej metody prognozowania, a także od doświadczenia osoby wykonującej obliczenia. W sposób naturalny blokowi przypisuje się próby bruzdowe należące do jego obszaru. Ponadto blokowi przypisuje się także próby leżące w jego bezpośrednim otoczeniu, jeżeli w bloku obliczeniowym nie ma prób leżących w pobliżu granicy bloku.

Metody prognozowania różnią się interpretacją wartości prognozowanego parametru w próbach bruzdowych. W metodzie średnich prognozowana wartość parametru jest średnią arytmetyczną wartości parametru stwierdzonych w próbach bruzdowych. W metodzie geostatystycznej prognozowana wartość parametru jest średnią ważoną wartości parametru stwierdzonych w próbach bruzdowych, gdzie wagi wyliczane są za pomocą złożonych metod matematycznych. W obu przypadkach należy więc wyznaczyć, dla każdej próby bruzdowej przypisanej blokowi, wartość prognozowanego parametru. W metodzie plasterkowania podstawą analizy jest uśredniony profil złoża w bloku, uzyskany przez nałożenie profili prób bruzdowych przypisanych blokowi i przy obliczaniu parametrów złoża w bloku posługujemy się takimi samymi metodami obliczeniowymi jak dla próby bruzdowej.

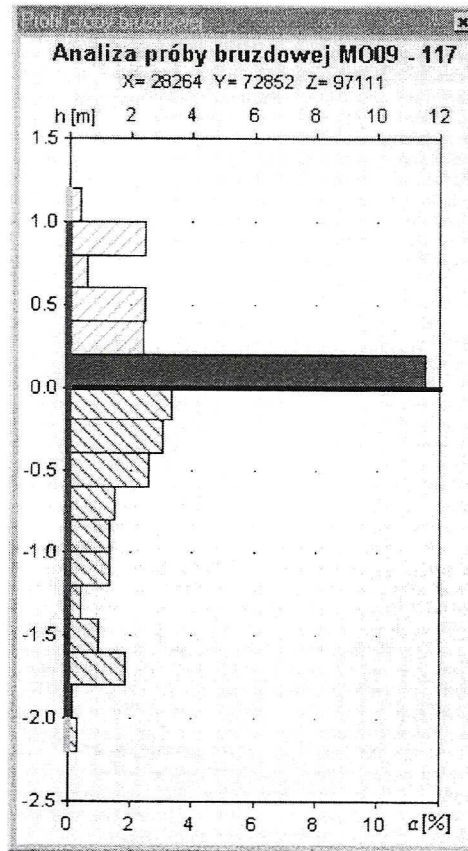
We wszystkich wymienionych wyżej metodach występuje element analizy wartości prognozowanego parametru w próbce bruzdowej. Poprawnie pobrana próba bruzdowa pozwala na odtworzenie profilu pionowego złoża w miejscu jej pobrania. Profil taki powinien zawierać okruszcowanie złoża miedzią w poszczególnych warstwach profilu oraz granice serii litologicznych. Przykładowy profil próby bruzdowej przedstawiono na rysunku 1. Jeżeli przedmiotem prognozy jest okruszcowanie złoża łącznie miedzią i srebrem (tzw. składnik ekwiwalentny), to próby powinny mieć wykonane także oznaczenie Ag, analogicznie jak Cu. Oznaczenia takie wykonywane są w około 30% prób. Próby bruzdowe pobrane w wyżej opisany sposób mogą być podstawą do prognozowania parametrów złoża w wielu wariantach. Niżej przedstawiono prognozowane za pomocą prezentowanych systemów informatycznych stosowanych w Działach Geologicznych kopalń rud miedzi parametry złoża oraz warianty ich obliczeń.

1.1. Podstawowe parametry złoża prognozowane na podstawie danych z prób bruzdowych

Podstawowymi parametrami złoża wyliczanymi na podstawie danych z atestów prób bruzdowych są:

- miąższość złoża ,
- zawartość składnika użytecznego w złożu [%],
- wydajność składnika użytecznego w złożu [kg/m^2],
- wydajność rudy [Mg/m^2].

Parametry te wyliczane są dla całego profilu pionowego złoża oraz dla serii litologicznych (węglanów, łupków, piaskowców) w niżej opisanych wariantach.



Rys. 1. Profil próby bruzdowej

Fig. 1. Drill sample profile

1.2. Warianty obliczeń wynikające ze sposobu określenia analizowanego przedziału pionowego złoża

Najczęściej analizowanym przedziałem jest przedział spełniający kryteria bilansowości lub przemysłowości. Może być on wyznaczony z uwzględnieniem minimalnej miąższości lub przy założeniu, że jest ona równa zero. W praktyce stosuje się także przedziały spełniające inne kryteria, a mianowicie:

- przedział o zadanej zawartości brzeżnej,
- przedział o zadanej zawartości średniej,
- przedział o zadanej miąższości,
- przedział o zadanej wydajności,
- przedział o zadanej miąższości, położony nad złożem bilansowym lub przemysłowym,
- przedział o zadanej miąższości, położony pod złożem bilansowym lub przemysłowym,
- przedział o zadanym położeniu jego końców względem stropu piaskowca.

1.3. Warianty obliczeń związane z analizowanym składnikiem użytecznym

Parametry podstawowe, zdefiniowane dla każdego z wymienionych wyżej wariantów przedziałów, mogą być wyliczane dla miedzi lub dla tzw. składnika ekwiwalentnego. Uzyskuje się go przeliczając zawartość srebra w poszczególnych próbkach elementarnych próby bruzdowej na zawartość miedzi za pomocą przelicznika ustalonego odpowiednimi przepisami.

W zależności od stosowanej metody prognozowania parametrów złoża w bloku obliczeniowym, wyniki obliczeń dla prób bruzdowych przechowywane są do dalszego wykorzystania (metoda geostatystyczna) lub wykorzystywane są do bieżącego wyliczania wartości parametrów (metoda plasterkowania i metoda średnich).

Opisane warianty obliczania parametrów podstawowych dają pojęcie o złożoności procedur obliczeniowych oraz konieczności stosowania złożonych systemów informatycznych do prognozowania parametrów złoża w bloku obliczeniowym.

2. Prognozowanie parametrów złoża w bloku obliczeniowym metodą plasterkowania, realizowane przez aplikacje systemu GEOLOG

W metodzie plasterkowania każda próba bruzdowa dzielona jest na przedziały o zadanej miąższości, jednakowej dla wszystkich prób. Podział przeprowadzany jest od stropu piaskowca w górę i w dół. Parametry tak otrzymanych warstewek uśredniają się w poziomie stosując średnią arytmetyczną. Otrzymujemy w ten sposób uśredniony profil złoża w bloku, który podlega dalszej analizie. Uśrednianie parametrów warstewek w poziomie nie jest jednoznaczne, gdy na danym poziomie profilu bloku nie są reprezentowane wszystkie próby bruzdowe. Zdarza się to szczególnie często na poziomach odległych od poziomu odniesienia, którym jest strop piaskowca. Wynika to z faktu, że w poszczególnych próbach bruzdowych oznaczenia zawartości miedzi wykonywane są w warstewkach sięgających na ogół do różnych poziomów profilu bloku.

Profil wypadkowy bloku może być wyznaczony jedną z trzech opisanych niżej metod:

- metoda „według wszystkich prób”,
- metoda „według prób biorących udział w obliczeniach”,
- metoda „według prób kompletnych”.

W metodzie wyznaczania parametrów złoża w bloku obliczeniowym „według wszystkich prób” zakłada się, że w warstewkach próby bruzdowej nie reprezentowanych na danym poziomie zawartość składnika użytecznego w rudzie jest równa zero. Zawartość w warstewce k wyniesie:

$$\alpha_{ki} = \frac{\sum_{i=1}^n \alpha_i}{n} \quad [\%] \quad [1]$$

gdzie:

- n — liczba prób bruzdowych w bloku,
- α_i — zawartość składnika użytecznego w rudzie w i -tej próbce bruzdowej.

W metodzie wyznaczania parametrów złoża w bloku obliczeniowym „według prób biorących udział w obliczeniach” zakłada się, że w warstewkach próby bruzdowej nie reprezentowanych na danym poziomie zawartość składnika użytecznego w rudzie jest średnio taka, jak w próbach na tym poziomie reprezentowanych. Zawartość w warstwie k wyniesie:

$$\alpha_{k2} = \frac{\sum_1^n \alpha_i}{n - m} \quad [\%] \quad [2]$$

gdzie:

- n, α_i — oznaczenia jak w poprzedniej metodzie,
- m — liczba prób nie reprezentowanych w warstwie k.

W metodzie wyznaczania parametrów złoża w bloku obliczeniowym „według prób kompletnych” zakłada się, że w warstewkach prób bruzdowych nie reprezentowanych na danym poziomie, zawartość składnika użytecznego w rudzie jest równa zero, jeżeli próba jest kompletna. W przeciwnym razie przyjmuje się, że zawartość w warstewce jest średnio taka, jak w próbach reprezentowanych na tym poziomie. Próba jest kompletna z góry lub z dołu, jeżeli odpowiednio górny lub dolny koniec jej przedziału bilansowego leży w granicach próby bruzdowej.

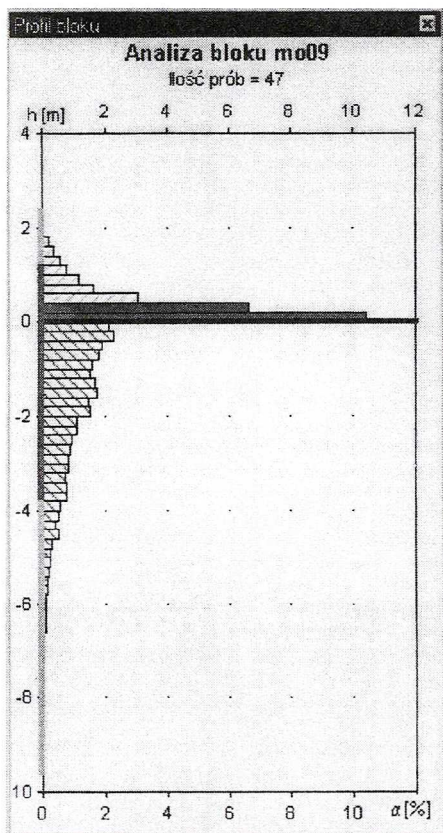
Oznaczając przez α_{k3} zawartość w warstewce k wyliczoną metodą „według prób kompletnych”, można określić relację między zawartością wyliczoną według opisanych metod:

$$\alpha_{k2} \geq \alpha_{k3} \geq \alpha_{k1} \quad [3]$$

W przypadku obliczeń dla składnika ekwiwalentnego, tworzony jest najpierw uśredniony profil złoża dla srebra ze względu na fakt, że srebro oznaczone jest tylko dla około 30% prób bruzdowych. Uśredniony profil złoża dla srebra jest łączony (z uwzględnieniem przelicznika Ag/Cu) z uśrednionym profilem dla miedzi. Uzyskujemy w ten sposób uśredniony profil złoża dla składnika ekwiwalentnego.

Na rysunku 2 przedstawiono wypadkowy profil pionowy wybranego bloku. Porównując go z profilem próby bruzdowej przedstawionym na rysunku 1 łatwo zauważyć, że jest on bardziej regularny.

Uśredniony profil złoża w bloku obliczeniowym, uzyskany jedną z opisanych metod, podlega dalszej analizie. Polega ona na wyznaczeniu w profilu pionowym pewnego przedziału, dla którego obliczone będą parametry złoża. Warianty obliczeń wynikające ze sposobu określania analizowanego przedziału pionowego złoża przedstawiono w rozdziale 2. Do wyboru wariantu służą okienka dialogowe przedstawione na rysunkach 3 i 4. Na rysunku 3 przedstawiono okienko umożliwiające określenie kryteriów bilansowości lub przemysłowości oraz stosowanych przeliczników Ag/Cu. Rysunek 4 przedstawia okienko umożliwiające wybór analizowanego przedziału pionowego złoża oraz rodzaj składnika użytecznego. W prawej górnej części okienka umieszczono przełącznik służący do wyboru metody wyznaczania uśrednionego profilu pionowego złoża dla bloku. W tym miejscu należy zauważyć, że w przypadku wyboru metody



Rys. 2. Profil bloku obliczeniowego mo09

Fig. 2. mo09 analytical block profile

Kryteria bilansowości i moc parametry

<=H1 >H1

Granice głębokości zalegania złoża
H1 [m] = 1250

Minimalna miąższość [m] = 0

Przelicznik Ag/Cu
w kryteriach bilansowości: 0.01
w kryteriach przemysłowości: 0.01

Ciężary objętościowe
węglany: 26
łupki: 25
piaskowce: 23

Numery Ag w słownikach
analiz pełnych: 2
analiz skróconych: 1

Ruda bilansowa
 α_b [%] = 0.7
 α_s [%] = 0.7
Wmin [kg/m²] = 50

Ruda pozabilansowa
 α_b [%] = 0.7
 α_s [%] = 0.5
Wmin [kg/m²] = 35

Bez zmian Anuluj Zatwierdź

Rys. 3. Okienko do wprowadzania kryteriów bilansowości lub przemysłowości

Fig. 3. Data loading window

Opcje określające wariant obliczeń

Analizowany przedział

- Przedział bilansowy
- Przedział o zadanej zawartości brzeźnej
 αb [%]=
- Przedział o zadanej zawartości średniej
 αs [%]=
- Przedział o zadanej miąższości
 m [m]=
- Przedział o zadanej wydajności
 W [kg/m²]=
- Przedział zadany względem repera
 gg [m]= gd [m]=
- Przedział nad złożem bilansowym
 h [m]=
- Przedział pod złożem bilansowym
 h [m]=

Metodyka obliczeń

Metoda wyznaczania parametrów złoża

- wg wszystkich prób
- wg prób biorących udział w obliczeniach
- wg prób kompletnych

Miąższość warstwy elementarnej [m]=

Głębokość zalegania złoża

- ≤ 1250
- > 1250

Obliczenia dla ...

- miedzi
- składn. ekwiwalentnego

Zubożenie [%]=

Rys. 4. Okienko do określania wariantu obliczeń

Fig. 4. Calculating window

„według prób kompletnych”, analizowany przedział pionowy musi być wyznaczony przy takich samych kryteriach, jakich używano dla stwierdzenia czy próby bruzdowe są kompletne.

W uśrednionym profilu złoża zaznaczony jest uwzględniony w obliczeniach przedział oraz wyliczane są parametry złoża w poszczególnych warstewkach i narastająco od repera. Wyliczane są także średnie parametry złoża w bloku w analizowanym przedziale i poza nim. Średnie parametry złoża w analizowanym przedziale wyliczane są dla serii węglanowo-lupkowej, piaskowcowej oraz łącznie dla całego przedziału.

Metoda plasterkowania uniemożliwia wydzielenie serii lupkowej. Do oszacowania parametrów dla serii lupkowej zastosowano metodę średniej arytmetycznej. W czasie realizacji algorytmu obliczeniowego wyliczane są, niejako przy okazji, parametry złoża dla serii lupkowej dla poszczególnych prób bruzdowych. Są to w szczególności:

- W_{rl} — wydajność rudy w serii lupkowej, [Mg/m²],
- W_{ml} — wydajność miedzi w serii lupkowej, [kg/m²],
- h_l — miąższość serii lupkowej, [m].

Oznaczając indeksem i parametry i -tej próby brzdowej dla serii łupkowej oraz przyjmując, że w bloku obliczeniowym jest n prób brzdowych, średnie parametry dla serii łupkowej wyrażają się wzorami:

— średnia wydajność rudy:

$$WRl = \frac{\sum_1^n WRl_i}{n} \quad [Mg / m^2] \quad [4]$$

— średnia wydajność miedzi:

$$WRl = \frac{\sum_1^n WMI_i}{n} \quad [kg / m^2] \quad [5]$$

— średnia zawartość Cu:

$$\alpha_1 = \frac{\sum_1^n WMI_i}{\sum_1^n WRl_i} \quad [\%] \quad [6]$$

— średnia miąższość:

$$hl = \frac{\sum_1^n h_i}{n} \quad [m] \quad [7]$$

Uśrednione parametry dla serii węglanowej wyznaczane są na podstawie parametrów dla serii węglanowo-łupkowej i łupkowej tak, aby wszystkie serie bilansowały się w analizowanym przedziale profilu pionowego złoża.

Wyniki obliczeń przedstawione są w tabeli średnich parametrów złoża w bloku obliczeniowym dla miedzi lub składnika ekwiwalentnego. Parametry okruszczenia złoża w przedziale zadanym lub wyznaczonym zgodnie z kryteriami wyliczane są dla poszczególnych serii litologicznych (węglanowo-łupkowej, węglanowej, łupkowej i piaskowcowej) oraz łącznie dla całego przedziału i poza nim. Dla opisanych wyżej przedziałów i poza przedziałami wyznaczane są:

- miąższość [m],
- zawartość procentowa Cu lub składnika ekwiwalentnego w rudzie [%],
- wydajność Cu lub składnika ekwiwalentnego w rudzie [kg/m²],
- wydajność rudy [Mg/m²],
- strop i spąg przedziału względem stropu piaskowca [m]

Tabelaryczny profil bloku

Analiza bloku mo09

Ruda bilansowa Ruda pozabilansowa Skala pionna

Warstwa elementarna			Narastająco od repera		
od repera	ilość prób	zawartość	miąższość	zawartość	wydajność
		[%]	[cm]	[%]	[kg/m ²]
12	41	0,00	240	2,07	128,34
11	41	0,03	220	2,26	128,31
10	41	0,07	200	2,48	128,15
9	43	0,28	180	2,75	127,76
8	46	0,44	160	3,07	126,31
7	47	0,61	140	3,44	124,01
6	47	0,86	120	3,92	120,82
5	47	1,18	100	4,55	118,36
4	47	1,86	80	5,40	110,25
3	47	3,09	60	6,89	101,62
2	47	6,68	40	8,56	85,56
1	47	10,43	20	10,43	52,16
1	47	2,16	20	2,16	9,96
2	47	2,29	40	2,23	20,48
3	47	1,93	60	2,13	29,37
4	47	1,86	80	2,06	37,94
5	47	1,63	100	1,97	45,42
6	47	1,57	120	1,91	52,62
7	44	1,73	140	1,88	60,57
8	35	1,81	160	1,87	68,88
9	31	1,54	180	1,83	75,95
10	29	1,56	200	1,81	83,13

Rys. 5. Zestawienie wartości parametrów wzdłuż profilu złoża w bloku (metoda plasterkowania)

Fig. 5. Parameter values of deposit profile in analytical block (method of slicing)

Srednie parametry złoża

ANALIZA BLOKU OBLICZENIOWEGO mo09

Ilość prób bruzdowych = 47

Interwał	Miąższość	Zawartość	Wydajność	Wydajność	Strop	Spąg	
	m	%	kg/m ²	Mg/m ²			
Nad przedziałem	1.20	0.2439	7.609	3.120	2.40	1.20	
W przedziale	wH	1.20	3.9387	121.311	3.080	1.20	0.00
	w	0.87	2.0859	46.737	2.241	1.20	0.33
	t	0.33	8.8639	74.574	0.839	0.33	0.00
	p	3.80	1.4079	123.053	8.740	0.00	-3.80
	Suma	5.00	2.0674	244.364	11.820	1.20	-3.80
Pod przedziałem	5.80	0.1751	23.358	13.340	-3.80	-9.60	

Rys. 6. Przykładowe wartości prognozowanych parametrów dla bloku mo09

Fig. 6. Forecast of parameters-values in mo09 analytical block

Wyniki można przedstawić na tle pełnego uśrednionego profilu złoża z zaznaczeniem repera (stropu piaskowca) i granic zadanych lub wynikających z przyjętych kryteriów. Dodatkowo wyliczana jest miąższość, zawartość i wydajność miedzi lub składnika ekwiwalentnego następująco od repera.

Na rysunku 5 przedstawiono tabelaryczne zestawienie parametrów złoża w bloku na poszczególnych poziomach, a na rysunku 6 średnie wartości parametrów w profilu.

3. Prognozowanie parametrów złoża w bloku obliczeniowym metodą średnich, realizowane przez aplikacje systemu GEOLOG

W metodzie średnich prognozowanie parametru złoża w bloku obliczeniowym polega na wyliczeniu wartości parametru w każdej próbie bruzdowej przypisanej blokowi, w przedziale profilu pionowego próby wyznaczonym zgodnie z wybranym wariantem obliczeń i estymowaniu wartości oczekiwanej parametru za pomocą średniej arytmetycznej. Wyliczana jest ponadto wariancja parametru oraz oszacowanie błędu przy zadanym poziomie prawdopodobieństwa.

W przypadku obliczeń dla składnika ekwiwalentnego tworzony jest na wstępie uśredniony profil zawartości srebra, na podstawie danych z prób bruzdowych, dla których jest ono oznaczone. Obliczanie parametrów ekwiwalentnych dla poszczególnych prób bruzdowych wykonywane jest według następujących zasad:

— parametry ekwiwalentne dla prób oznaczonych na srebro wylicza się na podstawie stwierdzonych zawartości miedzi i srebra w próbie,

— parametry ekwiwalentne dla prób nie oznaczonych na srebro wylicza się na podstawie stwierdzonej zawartości miedzi oraz uśrednionego profilu zawartości srebra dla bloku obliczeniowego.

Sposób wybierania wariantu obliczeń i prezentacji średnich parametrów złoża jest analogiczny jak w metodzie plasterkowania.

4. Prognozowanie parametrów złoża w bloku obliczeniowym metodami geostatystycznymi, realizowane przez aplikacje systemu GST

Prawidłowości opisujące parametry złoża są trudne do zdefiniowania z uwagi na złożoność procesów przyrodniczych kształtujących złożo. Sytuacja taka każe traktować wartości parametrów złoża jako realizację pewnych zmiennych losowych. Stosując do badania tych zmiennych różne metody statystyki matematycznej, można uzyskać lepszą lub gorszą prognozę wartości parametrów złoża.

W geologii złóż coraz większe uznanie zdobywa sobie stworzona przez G. Matherona metoda geostatystycznej oceny parametrów złóż. Niżej przedstawione zostaną definicje i zależności opisujące metodę geostatystyczną w zakresie, w jakim zostały wykorzystane w algorytmach obliczeniowych systemu GST (Kokesz, Nieć 1992; Mucha 1994; Namysłowska-Wilczyńska 1993).

4.1. Definicje i zależności opisujące metodę geostatystyczną wykorzystywane w algorytmach obliczeniowych systemu GST

U podstaw metod geostatystycznych leży założenie, że wartości parametrów złoża w punktach leżących blisko siebie są skorelowane. Założenie to, jakkolwiek każdorazowo wymaga potwierdzenia, jest na ogół spełnione. W takim przypadku geostatystyka oferuje metody szacowania wartości parametrów efektywniejsze niż statystyka klasyczna. Wnioskowanie o wartości parametru w badanym obszarze na podstawie jego wartości w punktach rozpoznania złoża wymaga przyjęcia określonych i uzasadnionych założeń o charakterze zmienności parametru. W geostatystyce parametr złoża traktowany jest jako zmienna zregionalizowana, której przypisane są cechy zmiennej losowej o nieznanym prawdopodobieństwie. Aby do tak zdefiniowanej zmiennej można było stosować interpretację statystyczną, należy nałożyć na nią pewne ograniczenia. Trzeba założyć mianowicie słabą stacjonarność zarówno zmiennej zregionalizowanej, jak i jej przyrostów. Wariancja przyrostów zmiennej zregionalizowanej jest podstawową funkcją opisującą charakter zmienności parametrów złoża. Jest ona w geostatystyce zwana wariogramem.

$$D^2 [Z(x+h) - Z(x)] = E[Z(x+h) - Z(x)]^2 = 2\gamma(h) \quad (8)$$

gdzie:

- D^2 — operator wariancji,
- E — operator wartości oczekiwanej,
- $2\gamma(h)$ — wariogram,
- $Z(x+h), Z(x)$ — wartości zmiennej zregionalizowanej w punktach odległych od siebie o h .

W algorytmach obliczeniowych częściej używana jest funkcja $\gamma(h)$ zwana semiwariogramem. Semiwariogram przedstawia średnie zróżnicowanie wartości parametru złoża, w zależności od odległości pomiędzy punktami rozpoznania. Opisuje on zatem strukturę zmienności parametru. Przy dowolnym rozmieszczeniu punktów rozpoznania złoża w badanym obszarze, semiwariogram wyraża się następującym wzorem:

$$\gamma(h) = \frac{2}{2n_h} \sum_1^{n_h} (Z_i - Z_{i+h})^2 \quad (9)$$

gdzie:

- N_h — liczba par punktów odległych o h ,
- Z_i, Z_{i+h} — wartości parametru złoża w punktach odległych o h .

Tak zdefiniowany semiwariogram nosi nazwę semiwariogramu empirycznego. Semiwariogramy empiryczne nie mogą być wykorzystane bezpośrednio do rozwiązywania zadań praktycznych. Na ich podstawie tworzone są funkcje analityczne, które traktowane są jako geostatystyczne modele zmienności. Opisują one wariancję przyrostów wartości parametru jako funkcję odległości punktów badanego obszaru:

$$\gamma(h) = f(h) \quad [10]$$

gdzie

- $2\gamma(h)$ — wariancja,
 $f(h)$ — analityczna postać funkcji aproksymującej semiwariogram empiryczny.

W geostatystyce stosuje się ograniczoną klasę modeli zmienności, które praktycznie wyczerpują potrzeby zastosowań. Do najczęściej stosowanych modeli należą:

— Model liniowy:

$$\gamma(h) = C_o + a \cdot h \quad [11]$$

gdzie:

- C_o — zmienność lokalna badanego parametru złoża (tzw. stała efektu samorodków),
 a — współczynnik nachylenia prostej.

— Model liniowy Matherona:

$$\begin{aligned} \gamma(h) &= C_o + C \cdot \frac{h}{d} & \text{dla } h \leq d \\ \gamma(h) &= C_o + C = \sigma^2 & \text{dla } h > d \end{aligned} \quad [12]$$

gdzie:

- σ^2 — wariancja parametru,
 d — zasięg oddziaływania autokorelacji parametru.

— Model sferyczny Matherona:

$$\begin{aligned} \gamma(h) &= 0,5 \cdot C \cdot \left[3 \cdot \frac{h}{d} - \left(\frac{h}{d} \right)^3 \right] + C_o & \text{dla } h \leq d \\ \gamma(h) &= C_o + C = \sigma^2 & \text{dla } h > d \end{aligned} \quad [13]$$

(oznaczenia jak wyżej).

— Model losowy:

$$\gamma(h) = \sigma^2 \quad [14]$$

gdzie:

- σ^2 — wariancja parametru.

W literaturze przedmiotu proponuje się znacznie bogatszy wybór teoretycznych modeli zmienności jednak — jak wykazały badania wykonane dla złoża rud miedzi (Namysłowska-Wilczyńska 1993; Sałacki i in. 1995) oraz doświadczenia eksploatacyjne — opisane modele są wystarczające do opisu zmienności strukturalnej parametrów złoża rud miedzi LGOM.

Znajomość modelu zmienności strukturalnej parametrów w badanym obszarze złoża pozwala na zastosowanie podstawowej w geostatystyce procedury krigingu do szacowania średniej wartości parametrów. Estymatorem w metodzie krigingu jest średnia ważona:

$$Z^0 = \sum_1^n W_i \cdot Z_i \quad (15)$$

gdzie:

- Z_i — wartość parametru w i-tym punkcie pomiarowym,
- W_i — waga przypisana i-temu punktowi pomiarowemu,
- n — liczba punktów pomiarowych.

Istota metody krigingu polega na takim dobraniu zestawu wag, aby błąd oceny prognozowanej wartości parametru był najmniejszy. Wariancja oszacowania wartości parametru może być wyrażona za pomocą średnich wartości semiwariogramu w postaci:

$$\sigma^2 = 2 \sum_1^n W_i \cdot \bar{\gamma}(Z_i, V) - \sum_1^n \sum_1^n W_i \cdot W_j \cdot \gamma(Z_i, Z_j) - \bar{\gamma}(V, V) \quad (16)$$

gdzie:

- $\gamma(Z_i, Z_j)$ — wartość semiwariogramu dla odcinka łączącego punkty pomiarowe i oraz j,
- $\bar{\gamma}(Z_i, V)$ — średnia wartość semiwariogramu dla wszystkich odcinków łączących i-ty punkt pomiarowy z ocenianym obszarem,
- $\bar{\gamma}(V, V)$ — średnia wartość semiwariogramu dla wszystkich odcinków, których końce leżą wewnątrz obszaru.
- n — liczba punktów pomiarowych.

Z analizy matematycznej wiadomo, że warunkiem koniecznym osiągnięcia minimum przez funkcję wielu zmiennych jest zerowanie się pierwszych pochodnych względem poszczególnych zmiennych. W naszym przypadku należy zażądać, aby

$$\frac{\partial \sigma^2}{\partial W_i} = 0 \quad \text{dla } i = 1, 2, 3, \dots, n \quad (17)$$

Od średniej wartości parametru wymaga się także, aby nie była obciążona systematycznym błędem. Warunek ten sprowadza się do żądania, aby suma wag była równa 1:

$$\sum_1^n W_i = 1 \quad (18)$$

Pomijając zawiłości matematyczne, powyższe warunki pozwalają na sformułowanie układu równań liniowych, w których niewiadomymi są wagi (W_i) oraz mnożnik Lagrange'a.

$$\begin{bmatrix} \gamma(Z_1, Z_1) \gamma(Z_1, Z_2) \dots \gamma(Z_1, Z_n) & 1 \\ \gamma(Z_2, Z_1) \gamma(Z_2, Z_2) \dots \gamma(Z_2, Z_n) & 1 \\ \dots & \dots \\ \dots & \dots \\ \dots & \dots \\ \gamma(Z_n, Z_1) \gamma(Z_n, Z_2) \dots \gamma(Z_n, Z_n) & 1 \\ 1 & 1 & \dots & 1 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} W_1 \\ W_2 \\ \dots \\ \dots \\ W_n \\ \lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{\gamma}(Z_1, V) \\ \bar{\gamma}(Z_2, V) \\ \dots \\ \dots \\ \bar{\gamma}(Z_n, V) \\ 1 \end{bmatrix} \quad (19)$$

Znaczenie poszczególnych elementów macierzy i wektorów zostało opisane wyżej. Rozwiązanie powyższego układu równań pozwala na określenie liczbowych wartości wag oraz wariancji estymacji średniej wartości parametru, zwanej wariancją krigingu. Wyraża się ona wzorem:

$$\sigma_k^2 = \sum_{i=1}^n W_i \cdot \bar{\gamma}(Z_i, V) - \bar{\gamma}(V, V) + \lambda \quad (20)$$

Powyższy wzór obowiązuje, gdy wagi W_i wyznaczone zostały z układu równań [19]. W ogólniejszym przypadku, gdy wagi dobierane są dowolnie, wariancja estymacji średniej wyraża się wzorem [16]. W szczególności, gdy przyjmiemy wagi równe $1/n$, co jest równoważne przyjęciu za estymator średniej arytmetycznej, wzór na wariancję przyjmie postać:

$$\sigma_E^2 = 2 \cdot \bar{\gamma}(Z, V) - \bar{\gamma}(Z, Z) - \bar{\gamma}(V, V) \quad (21)$$

σ_E^2 nazywane jest wariancją ekstensji i pozwala ocenić błąd oszacowania średniej arytmetycznej, jeżeli wiadomo, że istnieje autokorelacja wartości badanego parametru.

4.2. Charakterystyka algorytmów obliczeniowych stosowanych w systemie GST

Jak wynika z przytoczonych wyżej zależności, metoda krigingu w istotny sposób wykorzystuje autokorelację wartości parametrów złożowych wyrażoną semiwariogramami. W szczególności, w układzie równań [19] oraz we wzorze na wariancję krigingu [20] występują średnie wartości semiwariogramów dla wszystkich odcinków łączących punkty pomiarowe z punktami badanego obszaru oraz średnie wartości semiwariogramów dla wszystkich odcinków, których końce leżą wewnątrz badanego obszaru. Średnie te wyrażają się odpowiednimi wzorami całkowymi. W obliczeniach komputerowych do obliczania całek stosuje się metody numeryczne, które wymagają wyznaczenia na badanej powierzchni regularnej sieci punktów dyskretyzacji. Gęstość sieci dyskretyzacji ma istotny wpływ na dokładność wyników obliczeń.

Jak wspomniano na wstępie, do prognozowania wartości parametrów złoża rud miedzi wykorzystywany jest system informatyczny GST. Przedmiotem analizy w tym systemie jest

blok obliczeniowy, któremu przypisane są próby bruzdowe rozmieszczone na jego obszarze i w pewnym otoczeniu. Próby bruzdowe są źródłem informacji o wartości parametrów złoża w miejscu ich pobrania.

W programach komputerowych systemu GST realizującego obliczenia geostatystyczne, na blok obliczeniowy nakładana jest sieć dyskretyzacji o kwadratowych oczkach. Gęstość sieci dyskretyzacji dobierana jest w zależności od założonej dokładności obliczeń. Zastosowanie metody krigingu musi być także poprzedzone, jak to wynika z przytoczonych wyżej zależności, wyznaczeniem semiwariogramu dla badanego parametru. Wykonuje się to za pomocą odpowiednich programów systemu GST.

W pierwszym etapie obliczania wartości parametru złoża metodą krigingu blokowego konstruowany jest układ równań krigingowych. W układzie równań oraz we wzorach na wariancję krigingu występują elementy, których wartości muszą być wyliczane za pomocą całkowania numerycznego. Są to w szczególności:

- średnia wartość semiwariogramu dla wszystkich odcinków łączących próbę Z_i z blokiem obliczeniowym,
- średnia wartość semiwariogramu dla wszystkich odcinków łączących punkty bloku obliczeniowego.

Jak wspomniano wyżej, wymaga to nałożenia na blok obliczeniowy siatki dyskretyzacji umożliwiającej wyliczenie powyższych parametrów metodami numerycznymi. Ponieważ wielkość oczka siatki w istotny sposób wpływa na dokładność obliczeń, po przeprowadzeniu serii obliczeń eksperymentalnych przyjęto zasadę, że zmniejszanie oczek siatki następuje w trakcie obliczeń dotąd, aż wyniki otrzymane w dwóch kolejnych krokach będą się różniły mniej niż 5%. Wielkość ta jest zapisana w stałych systemu i może być łatwo zmieniona, gdy potrzeba taka wyniknie z doświadczeń eksploatacyjnych.

5. Analiza rozkładu wartości parametrów złoża rud miedzi za pomocą krigingu blokowego

Przedstawione wyżej zasady stosowania metod geostatystycznych można wykorzystać do prognozowania rozkładu wartości parametrów złoża rud miedzi w wybranym obszarze. Metoda sprowadza się do utworzenia siatki obliczeniowej o kwadratowych oczkach, pokrywającej analizowany obszar złoża, a następnie do wyznaczenia wartości parametrów w oczkach siatki metodą krigingu blokowego.

Metodyka obliczeń musi być dostosowana do łatwego korzystania z zasobów danych zgromadzonych w bazach danych systemów informatycznych eksploatowanych w Dziale Geologicznym kopalni. W dalszej części artykułu nawiązywać będziemy, tam gdzie jest to konieczne, do systemów informatycznych realizujących opisywaną metodę.

Niżej przedstawiono przebieg czynności i obliczeń realizujących metodę prognozowania rozkładu parametrów złoża rud miedzi wykorzystującą metody geostatystyczne.

Wybór badanego obszaru przez wskazanie jego brzegu

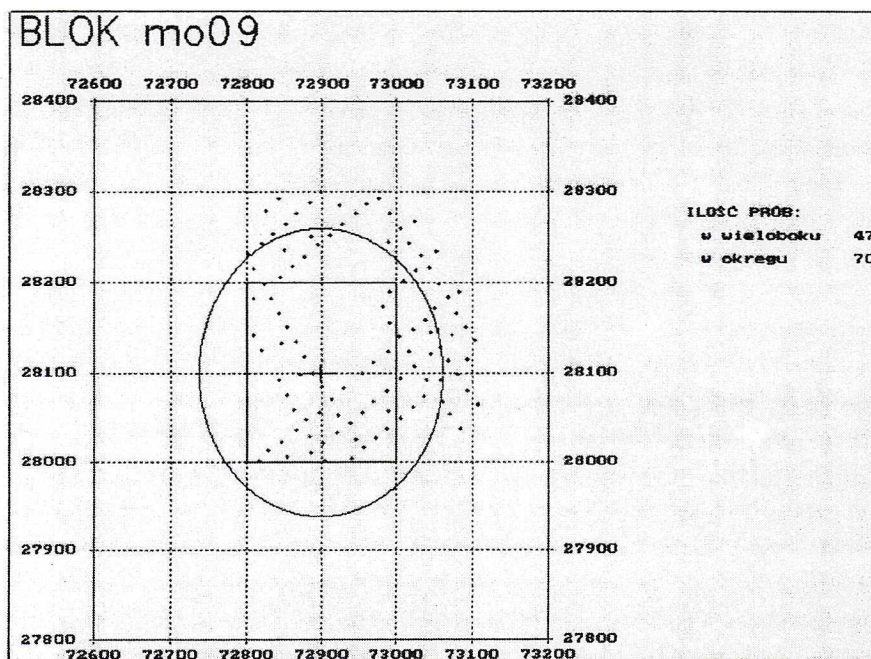
Obszar złoża, który poddany będzie badaniom musi być zdefiniowany przez określenie współrzędnych brzegu obszaru. Formalnie należy założyć blok obliczeniowy za pomocą odpo-

wiedniego programu systemu GST i zapisać go w bazie danych bloków obliczeniowych systemu GEOLOG. Nie ogranicza to zakresu obliczeń, ponieważ bloki mogą być definiowane dowolnie. Jedynym ograniczeniem jest tu pojemność pamięci komputera.

Przyporządkowanie obszarowi prób bruzdowych

W prezentowanej metodzie przyjęto izotropowy model strukturalny semiwariogramów. Przyjęto ponadto, że w badanym obszarze stosowany będzie do obliczeń jeden semiwariogram. Założenie takie powinno być poprzedzone badaniem zmienności strukturalnej analizowanego parametru w celu stwierdzenia, jak duże obszary można w ten sposób analizować. System GST zawiera opcję umożliwiającą przyporządkowywanie badanemu obszarowi prób bruzdowych w trybie graficznym. W sposób naturalny obszarowi przyporządkowane są próby leżące w jego granicach. Ponadto obszarowi można przyporządkować próby bruzdowe należące do okręgu, o środku położonym w środku ciężkości obszaru i promieniu ustalonym przez użytkownika tak, aby wszystkie wierzchołki brzegu obszaru znalazły się w okręgu. Na rysunku 7 przedstawiono próby bruzdowe przyporządkowane blokowi **mo09**, który będzie stanowił ilustrację opisywanej metody.

Należy zwrócić uwagę, że opisany wyżej sposób przyporządkowania obszarowi prób bruzdowych wykorzystany będzie jedynie do konstrukcji semiwariogramu przedstawiającego zmienność strukturalną wartości analizowanego parametru w otoczeniu badanego obszaru. Przyporządkowanie to nie będzie stosowane przy obliczaniu wartości parametru metodą kringingu blokowego, co byłoby niedopuszczalne.



Rys. 7. Przyporządkowanie prób bruzdowych badanemu obszarowi przy wykorzystaniu jednej z opcji systemu GST

Fig. 7. Studying area drill samples assign with the use of GST system

Wyliczenie wartości parametru w próbach bruzdowych

Kolejnym etapem realizacji opisywanej metody jest wyznaczenie wartości podstawowych parametrów złoza dla prób bruzdowych przyporządkowanych badanemu obszarowi. System informatyczny GST realizujący opisywaną metodę prognozowania rozkładu parametrów umożliwia analizę szerokiego ich spektrum. W szczególności, mogą być analizowane:

- miąższość złoza, [m]
- wydajność Cu w złożu, [kg/m²]
- wydajność rudy w złożu, [Mg/m²]
- zawartość Cu w złożu, [%]

dla poszczególnych serii litologicznych oraz razem. Wyniki obliczeń przechowywane są w bazie danych systemu GEOLOG.

Mówiąc o wartości podstawowych parametrów złoza mamy na myśli parametry wynikające z zastosowania określonych kryteriów bilansowości lub przemysłowości. Kryteria te można ustalić bezpośrednio przed wykonaniem obliczeń.

Konstruowanie semiwariogramów empirycznych i przyporządkowanie im modeli teoretycznych

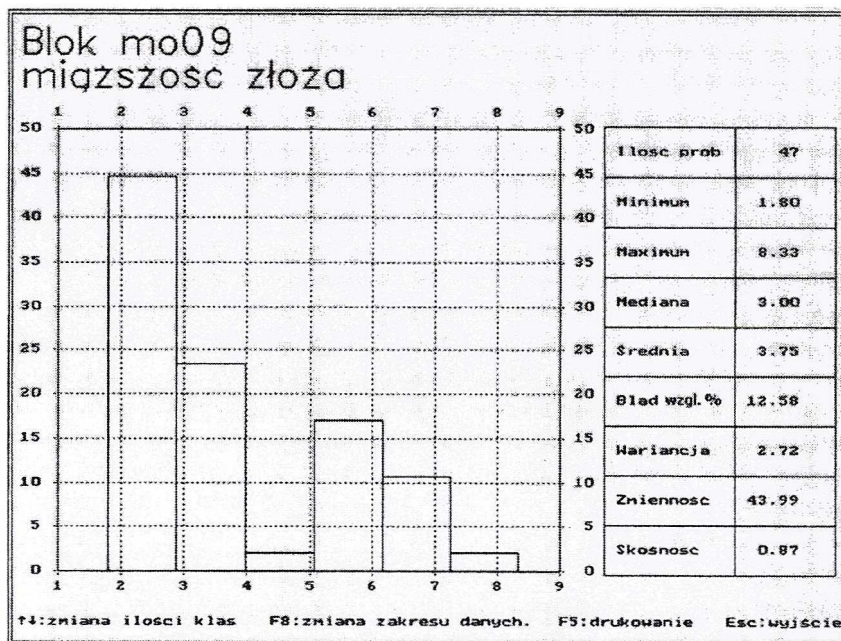
Przed przystąpieniem do konstruowania semiwariogramu należy zdecydować, które próby bruzdowe należy przyporządkować analizowanemu obszarowi. Sposoby przyporządkowania prób stosowane w systemie GST zostały opisane wyżej. Doświadczenia autorów wskazują, że do obliczeń należy przyjmować najmniejszą liczbę prób, pozwalającą skonstruować poprawny semiwariogram. Liczbę tę można ustalić przez wielokrotne próby, biorąc pod uwagę fakt, że wyznaczenie semiwariogramu za pomocą programów systemu GST nie przekracza kilku minut.

Przy konstrukcji semiwariogramu należy także zdecydować, jaki model należy zastosować. System GST pozwala na stosowanie klasycznych semiwariogramów Matherona oraz semiwariogramów typu InvCov (inverted covariance). Te drugie stosuje się w przypadku stwierdzenia istotnej asymetrii dodatniej analizowanego parametru. Dla jej stwierdzenia można wykorzystać jeden z programów systemu GST, służący do analizy statystycznej wybranego parametru. Przykładowe wyniki takiej analizy przedstawiono na rysunku 8. Użytkownik może zmieniać rozstęp danych oraz długość klasy histogramu. Ponadto program wylicza podstawowe parametry rozkładu, w szczególności skośność opisującą jego asymetrię.

Wyznaczenie semiwariogramu dla analizowanego parametru przebiega w następujących etapach:

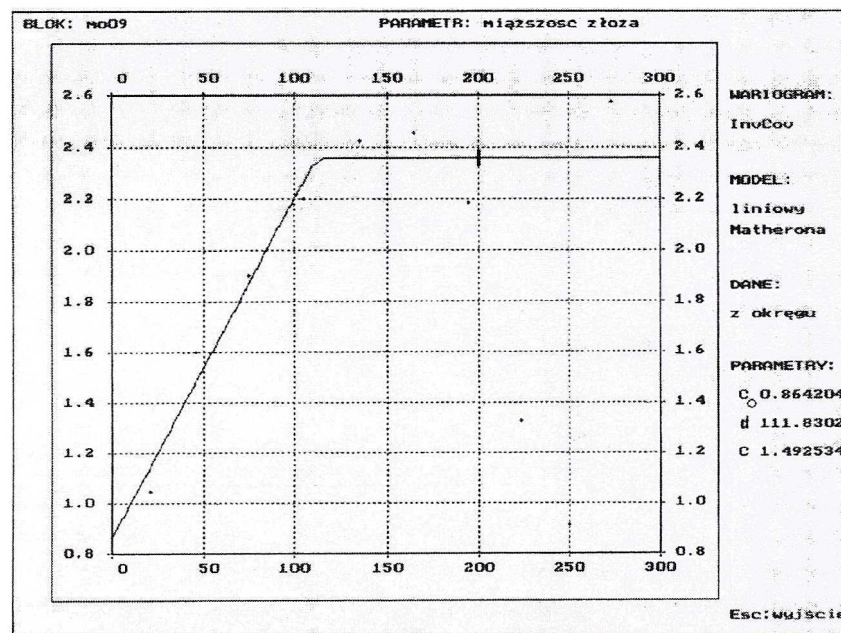
- wyświetlenie układu współrzędnych z naniesionymi punktami semiwariogramu empirycznego,
- oszacowanie na podstawie przebiegu semiwariogramu empirycznego, zasięgu semiwariogramu,
- wybór modelu semiwariogramu teoretycznego,
- aproksymacja punktów semiwariogramu empirycznego wybranym modelem teoretycznym.

Na rysunku 9 przedstawiono semiwariogram typu InvCov dla miąższości złoza w bloku **mo09**. Na marginesie rysunku podano model semiwariogramu, sposób przyporządkowania prób bruzdowych analizowanemu obszarowi oraz parametry jego postaci analitycznej. Na tym rysunku zaznaczono także zasięg semiwariogramu.



Rys. 8. Analiza statystyczna mięszości złoza w bloku mo09

Fig. 8. Statistical analysis of the deposit thickness in block mo09



Rys. 9. Semiwariogram mięszości złoza dla bloku mo09

Fig. 9. Semivariogram of deposit thickness for block mo09

Nalożenie na badany obszar siatki obliczeniowej o kwadratowych oczkach (Dk), ustalenie promienia przeszukiwania (Rprz) oraz minimalnej ilości prób bruzdowych w oczku siatki (Nmin)

Kolejnym etapem obliczeń jest nałożenie na badany obszar siatki obliczeniowej o kwadratowych oczkach. Czynność ta jest wykonywana przez programy systemu GST, po ustaleniu przez użytkownika rozmiaru oczka siatki.

Na decyzję o wielkości oczka siatki obliczeniowej wpływają wielkość analizowanego obszaru złoża oraz gęstość opróbowania. Rozmiar oczka siatki obliczeniowej musi być dobrany do wielkości analizowanego obszaru w tym sensie, że musi zapewnić zróżnicowanie wartości parametru na powierzchni bloku z dokładnością oczekiwaną przez użytkownika. Gęstość opróbowania wpływa na wielkość oczka siatki obliczeniowej w tym sensie, że należy zagwarantować ustaloną, minimalną ilość prób w oczku obliczeniowym. W programach systemu GST przyjęto ustalone wymiary oczek siatki obliczeniowej, a mianowicie: 20, 25, 50 oraz 100 m. Dotychczasowe doświadczenia autorów wskazują, że zaproponowane wymiary wyczerpują potrzeby użytkowników, co jest zgodne z wynikami wcześniejszych badań (Namyśłowska-Wilczyńska 1993).

Średnia wartość parametru w oczku kwadratowej siatki obliczeniowej wyznaczana jest metodą krigingu blokowego. Metoda ta umożliwia przypisanie blokowi, dla którego wyznaczana jest średnia, punktów pomiarowych leżących poza blokiem. Znajduje tu wyraz istota metody geostatystycznej, zakładającej korelację pomiędzy punktami leżącymi w odległości mniejszej niż promień autokorelacji. W przypadku obliczeń prowadzonych dla oczka siatki obliczeniowej uzyskuje się to przez wprowadzenie promienia przeszukiwania Rprz.

Promień przeszukiwania określa otoczenie analizowanego oczka siatki, na podstawie którego dokonuje się prognozy wartości parametru. Do otoczenia zalicza się punkty pomiarowe, których odległość od analizowanego punktu (środką oczka siatki) nie przekracza Rprz.

W proponowanej metodyce obliczeń kwadratowi stanowiącemu oczko siatki obliczeniowej przyporządkowuje się próby leżące w okręgu położonym w środku kwadratu i o promieniu

$$Rprz = \frac{a}{\sqrt{2}} \quad [22]$$

gdzie:

a — długość boku kwadratu stanowiącego oczko siatki.

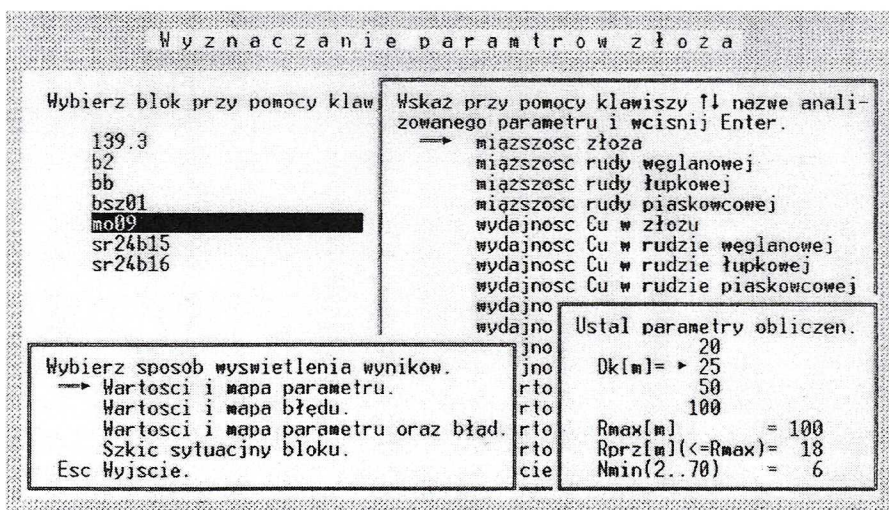
Tak zdefiniowany okrąg jest najmniejszym okręgiem opisującym oczko siatki. Użytkownik ma możliwość zwiększania promienia przeszukiwania według własnego uznania. Należy przy tym pamiętać o dwóch zasadach:

- przy istotnym zwiększaniu promienia przeszukiwania należy uwzględnić wielkość zasięgu oddziaływania autokorelacji,
- nie należy zwiększać promienia przeszukiwania poza pierścień prób „ekranujących” oczko sieci.

Wyznaczanie średnich parametrów złoża w oczkach siatki obliczeniowej przy ustalonym promieniu przeszukiwania będzie realizowane przez program komputerowy, bez możliwości ingerencji

użytkownika w proces obliczeniowy. Może się więc zdarzyć, że w otoczeniu niektórych oczek obliczeniowych będzie zbyt mało prób bruzdowych. Może to uniemożliwić wyliczenie dla tych oczek wartości parametru lub spowodować, że błąd prognozy będzie zbyt duży. Aby temu zaradzić, wprowadzono parametr Nmin określający minimalną liczbę prób bruzdowych, która musi być przyporządkowana każdemu oczku obliczeniowemu. Jeżeli dla zadanego globalnie promienia przeszukiwania w otoczeniu któregoś z oczek nie wystąpi Nmin parametrów, to należy dla tego oczka zwiększyć promień przeszukiwania tak, aby w otoczeniu oczka znalazło się Nmin prób bruzdowych. Określenie wartości Nmin kończy definiowanie sposobu przebiegu obliczeń. Dla każdego oczka siatki obliczeniowej utworzony zostanie układ równań krigingowych i określona zostanie średnia wartość estymowana parametru złożowego oraz standardowe odchylenie estymacji (krigingu).

Na rysunku 10 przedstawiono zestaw okienek dialogowych umożliwiających użytkownikowi wybór badanego obszaru, wybór analizowanego parametru, określenie opisanych wyżej parametrów Dk, Rprz, Nmin oraz sposób i zakres prezentacji wyników obliczeń.



Rys. 10. Zestawienie okienek dialogowych do określania zakresu i sposobu wykonywania obliczeń związanych z prognozowaniem parametrów złoża

Fig. 10. Dialog boxes for deposit parameters forecast

Wyniki obliczeń

W okienku dialogowym przedstawionym na rysunku 10 zestawiono sposoby prezentacji wyników obliczeń.

Wyświetlenie wartości i mapy parametrów. Wybranie tej opcji spowoduje wyświetlenie na ekranie monitora wyskalowanej siatki obliczeniowej. Poszczególne oczka siatki będą cieniowane proporcjonalnie do średniej wartości estymowanej parametru złożowego, wyliczonej dla oczka. Wartość ta wyświetlona będzie w środku oczka siatki.

Wyświetlenie wartości i mapy błędu. Wybranie tej opcji spowoduje wyświetlenie na ekranie monitora wyskalowanej siatki obliczeniowej. Poszczególne oczka będą cieniowane

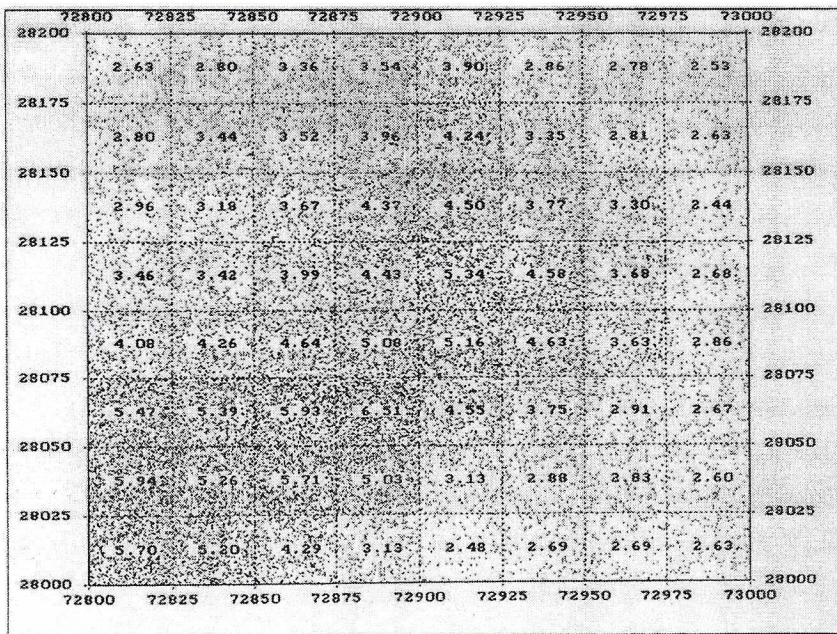
proporcjonalnie do dokładności względnej oszacowania średniej wartości estymowanej parametru, przy poziomie prawdopodobieństwa 0,95 (wyrażonej w % średniej wartości estymowanej parametru). Wartość ta wyświetlona będzie w środku oczka siatki.

Wyświetlenie wartości i mapy parametru oraz błędu. Wybranie tej opcji spowoduje wyświetlenie na ekranie monitora wyskalowanej siatki obliczeniowej. Poszczególne oczka będą cieniowane proporcjonalnie do średniej wartości estymowanej parametru złożowego wyliczonej dla oczka. W środku oczka siatki wyświetlana będzie wartość parametru oraz dokładność względna oszacowania średniej wartości estymowanej parametru.

Szkic sytuacyjny bloku. Wybranie tej opcji spowoduje wyświetlenie na ekranie wyskalowanej w układzie kopalnianym siatki obliczeniowej. Na jej tle wyświetlany będzie brzeg badanego obszaru złoża oraz miejsca pobrania prób bruzdowych. Analiza rozmieszczenia prób bruzdowych w analizowanym obszarze złoża może dostarczyć istotnych wniosków dotyczących błędu prognozy analizowanego parametru złoża.

Na rysunku 11 przedstawiono rozkład parametru miąższości złoża w badanym bloku **mo09**. W oczkach siatki podana jest miąższość złoża, a zastosowane cieniowanie pozwala orientacyjnie ocenić rozkład miąższości w badanym obszarze.

Przedstawiona wyżej metoda prognozowania rozkładu wartości parametrów złoża w wybranym obszarze w sposób organiczny związana jest z systemami informatycznymi GEOLOG i GST eksploatowanymi w Działach Geologicznych kopalń rud miedzi. Pozwala to na bardzo sprawne wykonywanie analiz. Wynika to z przyjętej technologii obliczeń, której istotnymi zasadami jest to, że:



Rys. 11. Rozkład miąższości złoża w bloku **mo09**

Fig. 11. Distribution of deposit thickness in **mo09** analytical block

- badane obszary złoża mogą być definiowane w dowolnym czasie i przechowywane w bazie danych systemu GEOLOG,
- konstruowanie semiwariogramów dla wybranych parametrów może być wykonywane w dowolnym czasie, a wyniki obliczeń przechowywane w bazie danych systemu GEOLOG,
- prognozowanie rozkładu parametrów może być wykonywane w dowolnym czasie i w wielu wariantach.

Doświadczenia eksploatacyjne wskazują, że wykonanie pełnego cyklu obliczeń nie przekracza kilkunastu minut.

Uwagi końcowe

Opisane wyżej metody prognozowania parametrów złoża są stosowane w zależności od celu, jakiemu ma służyć prognoza. Każda z nich charakteryzuje się bowiem pewnymi zaletami i wadami, które decydują o okolicznościach ich stosowania.

Podstawową i najczęściej stosowaną metodą prognozowania parametrów złoża w górnictwie rud miedzi jest metoda plasterkowania. Podstawową zaletą tej metody jest możliwość analizy wypadkowego profilu złoża. Umożliwia to prognozowanie parametrów złoża na wybranych poziomach. Zaletą jej jest także łatwość sporządzania charakterystyk parametrów złoża, bardzo przydatnych w wielu analizach geologicznych. Do wad metody plasterkowania zaliczyć należy słabe podstawy teoretyczne, co związane jest z nie uwzględnianiem w algorytmach obliczeniowych położenia punktów pomiarowych (prób bruzdowych) na powierzchni badanego obszaru. Aplikacje systemu GEOLOG wyliczają wprawdzie podstawowe statystyki dla warstewek profilu wypadkowego, lecz wyznaczone na ich podstawie oszacowanie estymowanej wartości parametru jest pesymistyczne. Wynika to z faktu, że w algorytmach obliczeniowych nie jest uwzględniana autokorelacja wartości badanego parametru.

Metoda plasterkowania wykorzystywana jest nie tylko do analizy profilu złoża w bloku obliczeniowym, lecz także do szacowania wartości parametru złoża w bloku. Szacowanie błędu takiej prognozy jest kłopotliwe, z uwagi na różne sposoby konstruowania profilu wypadkowego i wynikające stąd teoretyczne trudności wyrażenia statystyk profilu wypadkowego jako funkcji statystyk poszczególnych warstewek.

Metoda średnich stosowana jest w górnictwie rud miedzi jako metoda sprawdzająca. Podobnie jak w metodzie plasterkowania, położenie punktów pomiarowych (prób bruzdowych) na powierzchni badanego obszaru jest nieokreślone, a więc nie ma możliwości uwzględnienia w algorytmach obliczeniowych autokorelacji analizowanych parametrów.

Systemy informatyczne eksploatowane w kopalniach rud miedzi pozwalają na bardzo sprawne wykonywanie dużej ilości prognoz metodami plasterkowania oraz średnich.

Metoda geostatystyczna jest zdecydowanie najlepszą metodą prognozowania parametrów złoża rud miedzi. Ma ona głębokie podstawy teoretyczne i pozwala na precyzyjne szacowanie błędu prognozy. Metoda ta, odpowiednio stosowana, pozwala także na prognozowanie rozkładu wartości parametru w zadanym obszarze złoża, w szczególności w bloku obliczeniowym.

Z uwagi na złożone algorytmy obliczeniowe i technologię obliczeń jest ona stosowana w przypadkach wymagających szczególnej precyzji prognozy lub w celu weryfikacji wyników

prognozy wykonanej innymi metodami. Wykonanie prognozy dla każdego parametru wymaga wyznaczenia semiwariogramu teoretycznego. Aplikacje systemu GST wyposażone są w mechanizmy dopasowujące modele teoretyczne do semiwariogramów empirycznych oraz w mechanizmy umożliwiające użytkownikowi dokonywanie korekt. Zdaniem autorów, proponowane przez aplikację modele semiwariogramów powinny być weryfikowane przez osoby mającą odpowiednie doświadczenie. Niemożliwe jest więc zautomatyzowanie obliczeń w takim stopniu jak w przypadku metody plasterkowania i średnich.

LITERATURA

- Kokosz Z., Nieć M., 1992 — Metody geostatystyczne w rozpoznawaniu i dokumentowaniu złóż oraz ochronie środowiska. Wydawnictwo CPPGSMiE PAN, Kraków.
- Mucha J., 1994 — Metody geostatystyczne w dokumentowaniu złóż. AGH, Wydział Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska, Katedra Geologii Kopalnic, Kraków.
- Namysłowska-Wilczyńska B., 1993 — Zmienność złóż rud miedzi na monoklinie przedsudeckiej w świetle badań geostatystycznych. Prace Naukowe Instytutu Geotechniki i Hydrogeologii Politechniki Wrocławskiej, Monografie nr 21, Wrocław.
- Sałacki J., i in. — Dostosowanie algorytmów obliczeniowych systemu Geolog do nowoczesnych metod prognozowania parametrów złożowych. — System informatyczny GST do prognozowania parametrów złoża w bloku obliczeniowym. CPPGSMiE PAN, grudzień 1994 (praca niepubl.).
- Sałacki J. i in. — Analiza zmienności parametrów złoża rud miedzi na terenie OG Polkowice pod kątem stosowalności metody geostatystycznej w określaniu średnich parametrów i zasobów złoża. CPPGSMiE PAN, styczeń 1995 (praca niepubl.).
- Sałacki J. i in. — Modernizacja i rozszerzenie systemów informatycznych obejmujących gospodarkę złożem w kopalniach KGHM Polska Miedź S.A. CPPGSMiE PAN. Etap I styczeń 1995. Etap II wrzesień 1996 (praca niepubl.).

WIESŁAWA SAŁACKA, JERZY SAŁACKI

THE REVIEW OF ORE-CHARACTERISTICS FORECASTING IN ANALYTICAL BLOCK BASED ON THE EXAMPLE OF THE COPPER-ORE DEPOSIT

Key words

Mineral resources, copper ores, forecasting of ore-characteristics, computer methods

Abstract

The article discusses all the methods of forecasting of deposit characteristics in analytical block, used in the copper-ore mines situated in Legnica-Głogów copper region. The forecasting is made with the help of computer software worked out at Polish Academy of Sciences Mineral and Energy Economy Research Institute. Basis of the forecasting are deposit parameters calculated for the drill samples drawing from inside or some from close neighbourhood outside of analytical block zone. Results of deposit parameter analysis can be used in various technical and economical analyses – particularly during balancing of resources. The outcomes of analysis can also be used during delimiting of relatively homogeneous parts of the deposit for stoping planning.

The article depicts a range of all forecasting deposit parameters and applied methods of forecasting, namely: method of slicking, method of averages and geostatistical method, particularly block kriging.

Methods of slicing and averages do not take into consideration spatial distribution of drill samples in the block area. It is assumed that parameter value is a random variable with unknown statistical distribution. In the method of slicing averaging profile of deposit is constructed. That is a base for forecasting of deposit parameters in the block. In the method of averages a forecast of the value of parameter consists in sample taking and estimating of expected value of parameter with arithmetic average. The sample is the set of values of parameter of drill samples, taking from inside of from close neighbourhood outside of the block.

The only method, which takes into account spatial distribution of drill samples inside of block area and its neighbourhood as well, is the geostatistical method. The method assumes that parameter values in drill samples, lying close each other are correlated.

In the article has been presented an outline of methods above-mentioned against of the background of implemented computer systems. There have been also discussed the advantages and shortcomings of these methods, and circumstances of their implementation as well.