

JACEK MUCHA*, MONIKA WASILEWSKA-BŁASZCZYK**

Prognozowanie jakości urobku metodami geostatystyki 3D – perspektywy i ograniczenia

Wprowadzenie

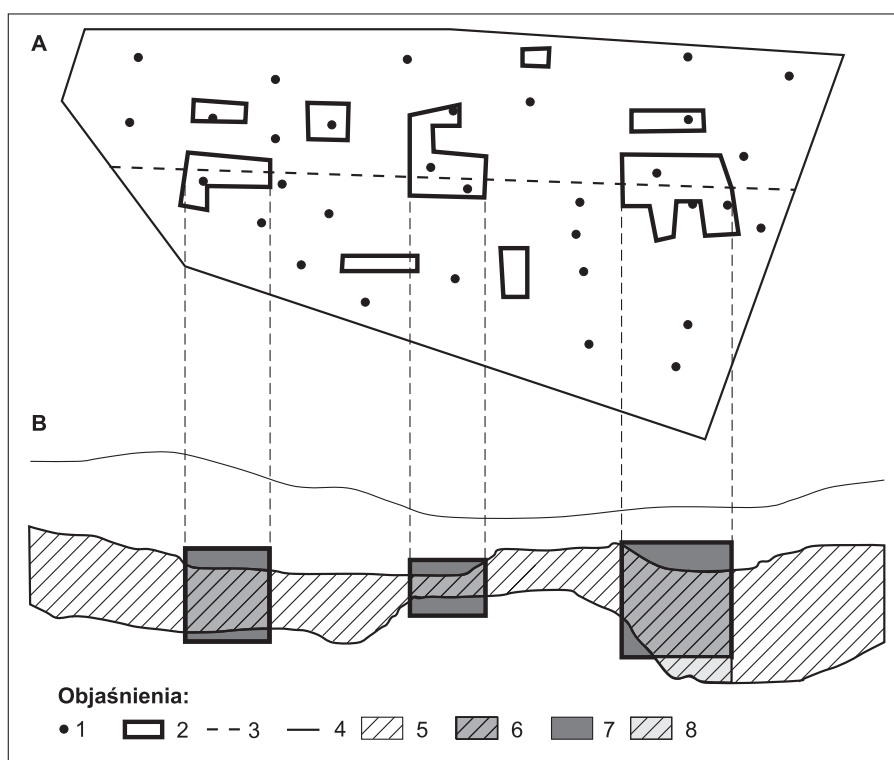
Prognozowanie jakości urobku polegające na oszacowaniu zawartości składników użytecznych lub szkodliwych w częściach złoża przewidzianych do wydobycia na podstawie danych rozpoznania złoża *in situ* nie należy do zadań łatwych, szczególnie w złożach rud eksploatowanych podziemnie. Możliwe do uzyskania dokładności takiej prognozy przygotowywanej przez geologów kopalnianych często rozmiągają się z oczekiwaniami jej odbiorców, którymi są projektanci górniczy lub zakłady wzbogacania. Głównymi przyczynami nadmiernie wysokich błędów prognoz mogą być: zbyt rzadka sieć opróbowań, duża zmienność jakości kopaliny, niewłaściwa metodyka prognozy oraz konieczność przybierek skał płonnych lub pozostawiania niewybranych części złoża. Ten ostatni czynnik wynika z uwarunkowań technicznych eksploatacji uniemożliwiających idealne dopasowanie konturów bloków eksploatacyjnych do konturów złoża.

Krótkoterminowe scenariusze eksploatacji dużych złóż (miesięczne, półroczne, roczne) przewidują z reguły jednoczesne wydobycie kopaliny w wielu (kilkunastu–kilkudziesięciu) blokach eksploatacyjnych (przodkach). Oszacowania jakości w takich blokach obarczone są błędami o różnej wielkości z uwagi na zróżnicowanie rozmiarów bloków oraz zróżnicowanie lokalizacji i liczby miejsc opróbowań złoża względem bloków. Powoduje to dodatkową trudność prognozy jakości urobku dostarczanego w pewnym okresie czasu z wielu przodków.

* Dr hab inż., prof. AGH, ** Dr inż., Katedra Geologii Złożowej i Górniczej AGH, Kraków;
e-mail: mucha@geol.agh.edu.pl; monika.wasilewska@agh.edu.pl

Stosowanie do prognozy jakości urobku klasycznych metod szacowania zasobów bilansowych lub przemysłowych jest zadaniem żmudnym i pracochłonnym, z uwagi na konieczność sięgania do danych podstawowych i ponownego uśredniania parametrów opisujących jakość kopaliny w obrębie projektowanej furty o wysokości różnej od miąższości złoża (rys. 1). Wadą tych metod jest brak możliwości oceny dokładności samej prognozy.

W sensie metodycznym duże nadzieje na precyzyjniejszą prognozę jakości urobku można wiązać z trójwymiarowym modelowaniem złóż (Mucha, Wasilewska 2009a, b). Jest ono możliwe w odniesieniu do dużych złóż opróbowanych w sieci przestrzennej (3D) Sytuacja taka ma miejsce w złóżach rozpoznanych siecią otworów wiertniczych, których rdzenie opróbowano i analizowano odcinkami (np. złoża wapieni, dolomitów) lub opróbowanych w wyrobiskach górniczych za pomocą serii próbek punktowych (cząstkowych)



Rys 1. Szkic ilustrujący plan rocznej eksploatacji hipotetycznego złoża w obrębie zespołu bloków eksploatacyjnych (A) i przekrój przez złożo bilansowe z lokalizacją bloków (B)
 1 – punkt opróbowania, 2 – kontur bloku eksploatacyjnego, 3 – linia przekroju, 4 – granica złoża, 5 – złożo bilansowe, 6 – złożo bilansowe w obrębie bloku eksploatacyjnego, 7 – przybierka skały pónnej, 8 – straty

Fig. 1. Sketch of exploitation block location in a hypothetical deposit mined during one year (A) and a cross-section through the economic deposit with locations of exploitation blocs (B)
 1 – sampling site, 2 – mining block, 3 – line of cross-section, 4 – a border of deposit,
 5 – an economic deposit, 6 – an economic deposit within a mined block, 7 – barren rock, 8 – losses

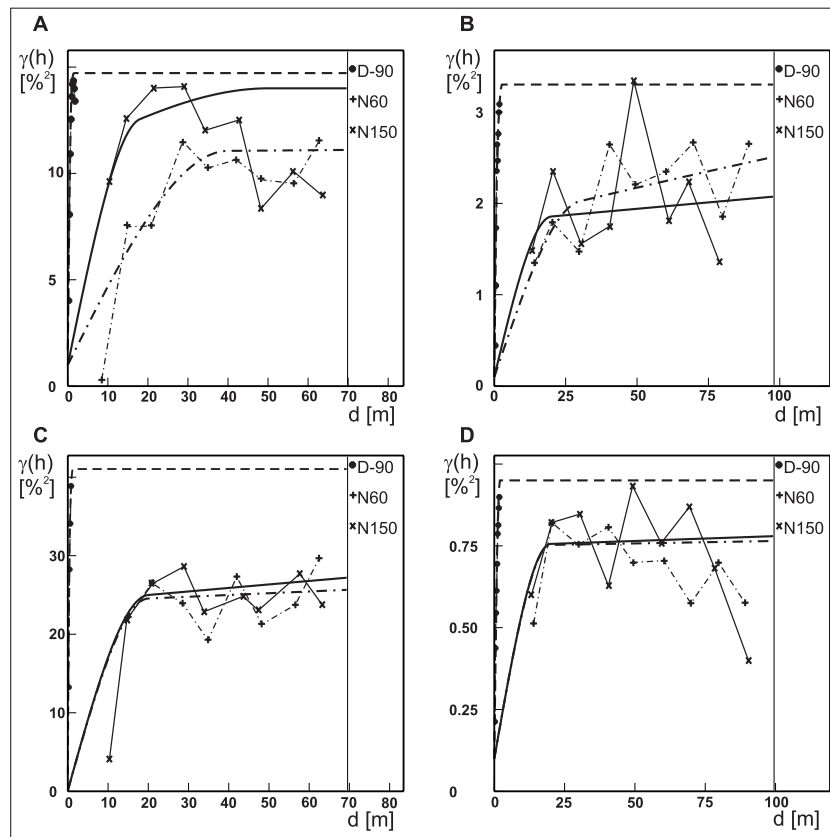
pobieranych wzdłuż linii pionowej (np. złoża Cu-Ag LGOM). W obu przypadkach dysponuje się informacją o zmianach zawartości badanego składnika nie tylko w płaszczyźnie poziomej, ale i profilu pionowym złoża.

Dla skonstruowania modeli 3D rozmieszczenia zawartości składnika wykorzystuje się interpolatory deterministyczne (np. oparte na metodach: wagowania na odwrotność odległości, minimalnej krzywizny, radialnych funkcji bazowych) lub interpolatory geostatystyczne, w różnych wersjach: parametrycznych i nieparametrycznych (Mucha, Wasilewska 2006). W ostatnich latach coraz większą popularność zdobywa metoda krigingu 3D ze względu na swoje zalety i pewne przewagi nad metodami przestrzennej interpolacji deterministycznej, przedstawione w dalszej części artykułu.

1. Zasady modelowania złóż z wykorzystaniem krigingu zwyczajnego 3D

Z punktu widzenia prognozowania jakości urobku istotne jest modelowanie rozmieszczenia zawartości składników użytecznych (lub szkodliwych) zarówno w złożu bilansowym jak i jego najbliższym otoczeniu. Procedura szacowania zawartości składników przy zastosowaniu najprostszej wersji krigingu 3D zwanego krigingiem zwyczajnym obejmuje kilka niezbędnych kroków, a mianowicie:

1. Regularyzację próbek cząstkowych, które z reguły różnią się wielkością, poprzez odpowiednie ujednoczenie ich długości i przypisanie utworzonym sztucznie nowym próbkom zawartości badanego składnika w oparciu o algorytm średniej ważonej (Sinclair, Blackwell 2002).
2. Opis struktury zmienności zawartości składnika w przestrzeni złożowej za pomocą semiwariogramów i ich modeli teoretycznych, czyli funkcji ukazujących zależność między zróżnicowaniem wartości parametru i średnią odległością między punktami opróbowania (rys. 2). Ważnym elementem tego opisu jest liczbowa charakterystyka anizotropii zmienności, która ujawnia się w większości złóż, a w szczególności rud metali. Ilustruje to wyrażenie przykład opisu zmienności zawartości Cu we fragmencie złoża Cu-Ag Polkowice-Sieroszowice za pomocą semiwariogramów kierunkowych (rys. 2). Semiwariogramy obliczono dla czterech zbiorów danych reprezentujących: całe złożo bilansowe, bez rozdzielenia na serie litologiczne (rys. 2A) oraz trzy serie litologiczne (rys. 2B-D). We wszystkich przypadkach pionowa zmienność zawartości Cu wielokrotnie przewyższa zmienność Cu w kierunkach poziomych. Ta cecha zmienności opisana za pomocą geostatystycznych modeli teoretycznych może mieć istotny wpływ na wyniki oszacowań zawartości składnika oraz ocenę wielkości błędów tych oszacowań.
3. Oszacowanie zawartości składnika w obrębie elementarnych bloków obliczeniowych – niewielkich brył przestrzeni złożowej – zwanych dalej miniblokami przy zastosowaniu krigingu blokowego 3D z wykorzystaniem algorytmu średniej ważonej oraz ocena błędów tych oszacowań (rys. 3). Na potrzeby prognozy jakości urobku, z uwagi na nieznaną wysokość furty na etapie modelowania złoża, szacowanie zawartości

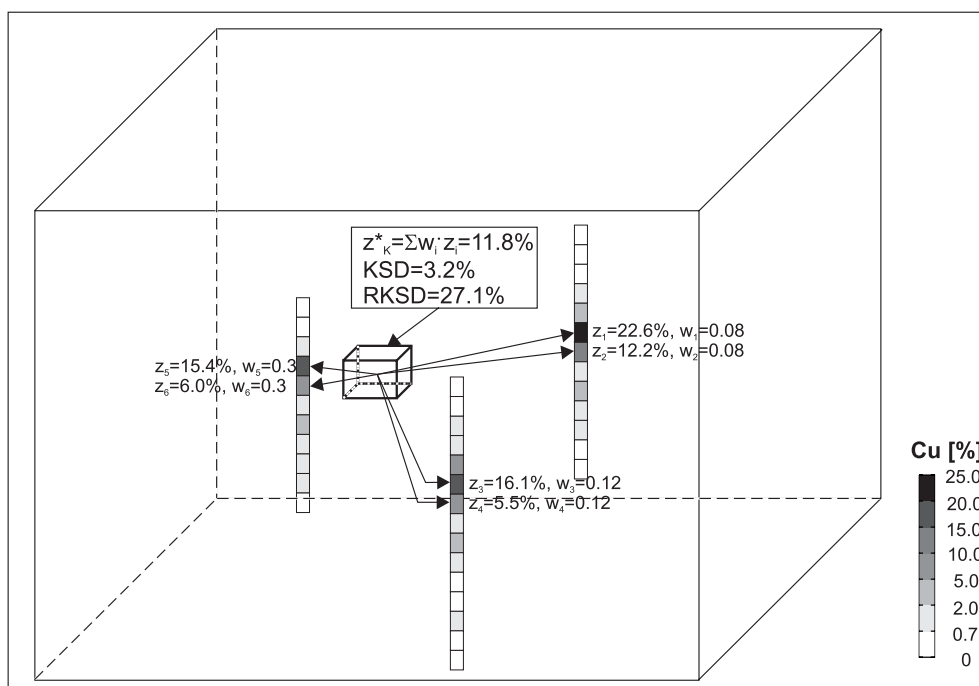


Rys. 2. Przykłady semiwariogramów przestrzennych zawartości Cu we fragmencie złoża Polkowice-Sierszowice dla wszystkich serii litologicznych razem (A) i z rozdzielaniem na serie litologiczne: węglanową (B), łupkową (C) i piaskowcową (D) (wykonano w programie ISATIS, v.9.05). oś rzędnych – średnie zróżnicowanie zawartości Cu, oś odciętych – średnia odległość między punktami złoża, D-90 – zmienność pionowa zawartości Cu, N60 i N150 – zmienność zawartości Cu w płaszczyźnie poziomej w kierunkach odchylonych od północy odpowiednio o 60° i 150°

Fig. 2. Examples of 3D semivariograms of the Cu content in a part of Polkowice-Sierszowice deposit
 A – an economic deposit, types of ore: B – dolomite ore, C – shale ore, D – sandstone ore,
 D-90 – vertical variability of the Cu content, N60 and N150 – horizontal variability of the Cu content
 in directions with azimuths 60° and 150°

składników w minibłokach należy prowadzić powyżej stopu i poniżej spągu złoża bilansowego. Uzyskany obraz mozaikowy rozmieszczenia zawartości składnika może być pomocny przy planowaniu wydobycia, a w szczególności przy podejmowaniu decyzji co do optymalnej wysokości furty.

- Oszacowanie średniej zawartości składnika w bryle złoża przewidzianej do eksploatacji (tzn. po ustaleniu wysokości furty w bloku eksploatacyjnym) za pomocą prostej średniej arytmetycznej z zawartości oszacowanych w minibłokach, których centra mieszczą się w konturach bloku eksploatacyjnego.



Rys. 3. Przykład oszacowania zawartości Cu w pojedynczym minibloku w oparciu o najbliższe dwie próbki cząstkowe w pionie z trzech prób bruzdowych (wykonano w programie ISATIS, v.9.05)
 w_i – wagi przypisywane próbkom, uzyskane z układu równań kriginu, zapewniające możliwie najdokładniejsze oszacowanie zawartości składnika w minibloku, z_i – zawartość Cu w i-tej próbce, z^*_k – oszacowanie średniej zawartości Cu w minibloku, KSD i RKSD – odpowiednio: bezwzględny i względny błąd standardowy kriginu otrzymany z odpowiednich formuł geostatystycznych

Fig. 3. An example of the Cu content estimation in an elementary calculation block on the basis of two nearest point samples (in vertical profile) from three channel samples
 (a part of the Polkowice-Sierszowice deposit)

w_i – weights obtained from kriging equations, z_i – the Cu content in sample "i",
 z^*_k – estimation of the mean Cu content in elementary block, KSD and RKSD – respectively:
 kriging standard deviation and relative kriging standard deviation

5. Ocena dokładności oszacowań zawartości średniej składnika w bloku eksploatacyjnym (a zarazem dokładności oszacowań jakości urobku) za pomocą kriginu poligonalnego 3D. Konwencjonalną miarą dokładności jest tzw. standardowy błąd kriginu: bezwzględny (KSD) lub względny (RKSD) pokazujący możliwy zakres odchylenia prognozowanej zawartości składnika od nieznaney, rzeczywistej jego zawartości w urobku. Przy założeniu normalności rozkładu tych odchylenia w 68% przypadków rzeczywisty błąd prognozy nie powinien przekroczyć wartości standardowego błędu kriginu.

Formuły matematyczne prowadzące do oszacowań zawartości składnika w miniblokach oraz oceny błędów tych oszacowań zawarte są we wszystkich podstawowych podręcznikach geostatystyki (np. Journel, Huijbregts, 1978) lub licznych publikacjach z tego zakresu (np. Mucha 2002; Mucha, Wasilewska 2006).

2. Zalety krigingu zwyczajnego 3D

Podstawową korzyścią wynikającą z trójwymiarowego modelowania, zarówno przy wykorzystaniu interpolatorów deterministycznych jak i geostatystycznych, jest uzyskanie obrazu przestrzennego rozmieszczenia składników użytecznych lub szkodliwych, ułatwiające precyzyjniejsze wyznaczenie granic złoża bilansowego oraz szybkie przeliczenie jakości i zasobów kopaliny przy zmianie kryteriów bilansowości. Zbudowany model jakości złoża jest przede wszystkim niezbędny do szybkiego oszacowania średnich zawartości składnika w projektowanych blokach eksploatacyjnych o dowolnych rozmiarach. W odpowiednim oprogramowaniu komputerowym konieczne jest tylko wprowadzenie danych wyznaczających kontury bloków eksploatacyjnych.

Na tle metod deterministycznych modelowanie złoża wykorzystujące procedurę krigingu 3D posiada dodatkowe walory, do których należą:

- uwzględnianie struktury zróżnicowania szacowanego składnika, a w szczególności anizotropii zmienności, która ujawnia się w większości złóż (rys. 2); skutkuje to możliwością bardziej precyzyjnego wyznaczania granic złoża i oszacowania jakości urobku jaki można uzyskać z danego bloku eksploatacyjnego,
- sposób wagowania w algorytmie obliczeniowym zawartości składnika w miniblokach, uzależniony nie tylko od odległości punktów opróbowań od minibloków, lecz również od ich wzajemnej konfiguracji oraz struktury zmienności składników, gwarantujący minimalizację błędów oszacowań składnika (rys. 3),
- możliwość przybliżonej oceny dokładności oszacowań parametrów złożowych w miniblokach i blokach eksploatacyjnych, co w konsekwencji stwarza podstawy do klasyfikacji dokładności rozpoznania złoża w blokach eksploatacyjnych.

3. Trudności modelowania z zastosowaniem krigingu 3D

Stosowanie metody krigingu 3D posiada również swoje ograniczenia. Niektóre z nich są wspólne dla metod dwuwymiarowych i trójwymiarowych zarówno deterministycznych jak i geostatystycznych.

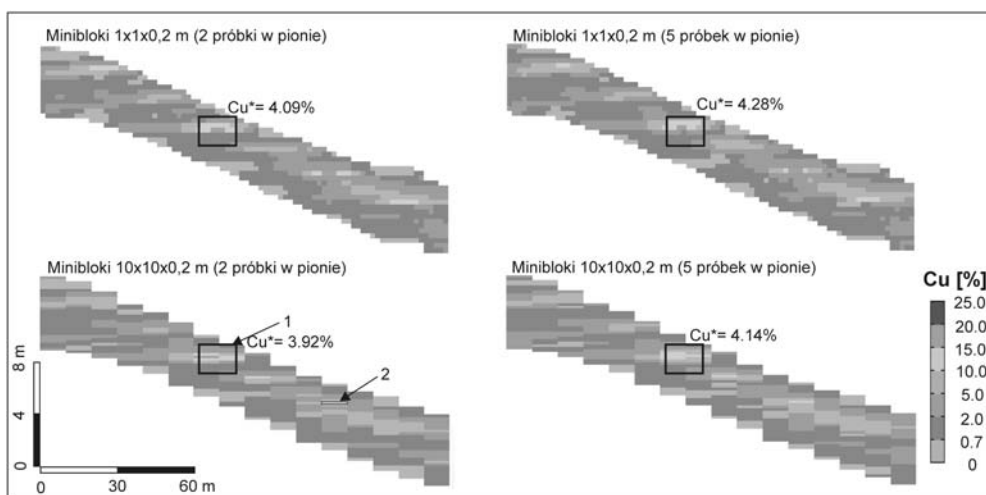
Precyzyjne modelowanie rozmieszczenia składników warunkujące dokładne oszacowanie ich zawartości jest zazwyczaj utrudnione w złożach wyróżniających się dużą zmiennością kopaliny, a zwłaszcza w złożach rud metali. Specyfika szacowania składników w miniblokach, a następnie w blokach eksploatacyjnych pogłębia te trudności z uwagi na małe rozmiary bloków i rzadką sieć opróbowań. Skutkuje to nierzadko brakiem danych pochodzących z wnętrza bloku lub jego najbliższego otoczenia (rys. 1). Nie można wówczas oczekiwać dużej dokładności prognozy jakości urobku, co znajduje swój wyraz w wysokiej wartości błędu krigingu, i jedyną drogą jej zwiększenia jest wykonanie dodatkowego opróbowania.

Doświadczenia i wykonania wielu prób może wymagać dobór właściwych rozmiarów minibloków, których suma tworzy bryłę złoża przewidzianą do wydobywania. Dobór zbyt

małych rozmiarów minibloków ogranicza wiarygodność oszacowań składnika w ich obrębie oraz może powodować problemy obliczeniowe z uwagi na ich ogromną liczbę. Dobór zbyt wielkich rozmiarów minibloków skutkuje z kolei nieregularnymi granicami złoża i trudnościami z wpisaniem ich w kontury bloku eksploatacyjnego (rys. 4).

Istotny wpływ na wyniki modelowania ma także liczba próbek wykorzystywanych w procedurze szacowania zawartości składnika w miniblokach. Założenie w programie obliczeniowym zbyt dużej liczby takich próbek skutkuje nadmiernym uśrednieniem obrazu rozmieszczenia składników. Konieczne jest tu znalezienie metodą prób i błędów rozwiązania optymalnego. Niektórzy autorzy zalecają dobór tylko dwóch najbliższych danemu minibloki próbek w pionie, ale pochodzących, co najmniej z trzech najbliższych otworów lub próbek punktowych w układzie liniowym (Sinclair, Blackwell 2002).

W dużej skali obserwacji oba wymienione czynniki nie wpływają istotnie na obraz rozmieszczenia składnika w złożu i jego otoczeniu, ale w skali lokalnej, zbliżonej do rozmiarów bloku eksploatacyjnego mogą prowadzić do zauważalnych różnic oszacowań średniej zawartości składnika. W przykładzie zamieszczonym na rysunku 4 różnice oszacowań średniej zawartości Cu w bloku eksploatacyjnym o rozmiarach $15 \times 15 \times 3$ m dla dwóch wariantów wielkości minibloków i liczby próbek cząstkowych (w pionie) wynoszą 5–10%, jednak dla innych lokalizacji bloków mogą one być znacznie większe.

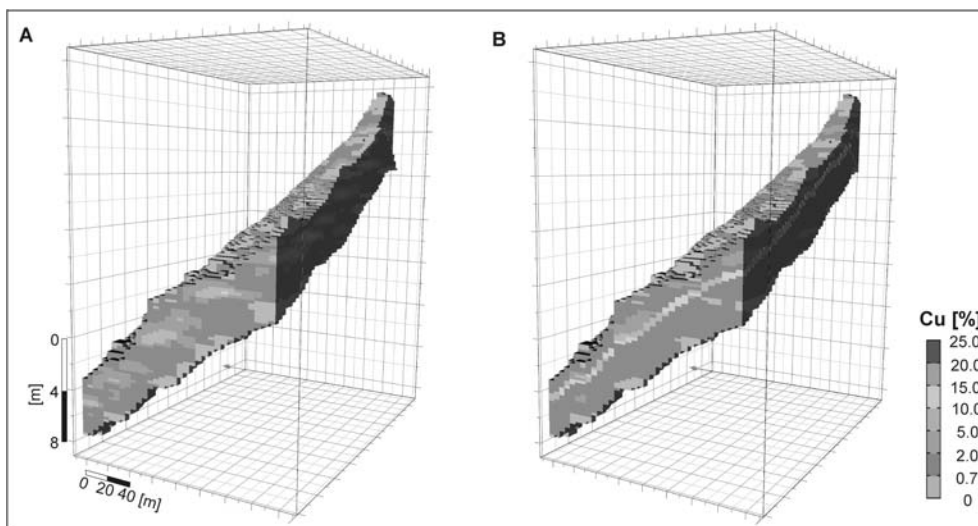


Rys. 4. Przekrój przez model przestrzenny rozmieszczenia zawartości Cu we fragmencie złoża Polkowice-Sieroszowice i przykład oszacowania średniej zawartości Cu w bloku eksploatacyjnym metodą krigingu 3D dla dwóch wariantów wielkości minibloków i liczby próbek cząstkowych (w pionie) uwzględnianych w algorytmie obliczeniowym (wykonano w programie ISATIS, v.9.05)
1 – blok eksploatacyjny o wymiarach $15 \times 15 \times 3$ m, 2 – miniblok o wymiarach $10 \times 10 \times 0,2$ m

Fig. 4. Cross-section through the 3D model of the Cu content spatial distribution within the part of the Polkowice-Sieroszowice deposit and example of the mean Cu content estimation in the exploitation block with 3D kriging method for two variants of sizes of elementary blocks and number of point (chip) samples
1 – dimensions of an exploitation block: $15 \times 15 \times 3$ m, 2 – dimensions of an elementary calculation block: $10 \times 10 \times 0,2$ m

Podstawowym problemem, właściwym wyłącznie dla metod geostatystycznych, jest skonstruowanie wiarygodnego modelu przestrzennej zmienności składnika (modelu semiwariogramu). Ten niezbędny element procedury krigingu 3D może być trudny do zrealizowania z powodu nierównomiernego rozmieszczenia punktów opróbowań złoża, w kierunkach pionowym i poziomym. Przykładowo, opróbowanie złóż Cu-Ag w kierunku pionowym za pomocą próbek cząstkowych (odcinkowych) można uznać za ciągłe, podczas gdy rozstaw takich próbek w kierunku poziomym wynosi 20–40 m. W tej sytuacji, przebieg semiwariogramów poziomych w zakresie odległości do 20 m musi być z konieczności wyinterpretowany, co zawsze wiąże się z niepewnością co do poprawności geostatystycznego modelu zmienności (rys. 2). Rozwiązanie tego problemu wymaga wykonania specjalnego opróbowania przestrzennego złoża w lokalnej skali obserwacji, podobnie jak to uczyniono w złożach rud Zn-Pb (Mucha 2002) i w złożu węgla brunatnego Bełchatów (Bartuś, Słomka 2009).

W przypadku złóż LGOM dodatkową trudność w modelowaniu zawartości Cu sprawia niejednorodność jej rozmieszczenia w złożu bilansowym wyrażająca się znacznie wyższymi zawartościami tego metalu w obrębie łupków niż w rudzie węglanowej i piaszczawcowej. Model 3D rozmieszczenia zawartości Cu uzyskany dla danych ze wszystkich serii łącznie (oparty na pojedynczym semiwariogramie) oraz model 3D uzyskany dla danych ze wszystkich serii rozpatrywanych oddzielnie (każdą serię reprezentował inny semiwariogram) mogą wykazywać znaczące różnice, szczególnie przy lokalnym wyraźnym zapadaniu złoża (rys. 5). Poprawne jest w tym przypadku drugie podejście (rys. 5B). W pierwszym przypadku



Rys. 5. Modele przestrzenne rozmieszczenia zawartości Cu uzyskane geostatystyczną metodą krigingu 3D dla wszystkich serii łącznie (A) i dla serii rozpatrywanych oddzielnie (B) (wykonano w programie ISATIS, v.9.05)

Fig. 5. 3D models of the Cu content spatial distribution obtained with the geostatistical method of 3D kriging; A – an economic deposit, B – types of ore considered separately

oszacowanie zawartości Cu w miniblokach zlokalizowanych przykładowo w węglanach, ale przy granicy z łupkami może być silnie zawyżone wskutek uwzględnienia próbek pobranych w bezpośrednim sąsiedztwie z łupka. Skutkuje to widocznym „rozmyciem” stref o wysokich zawartościach Cu (rys. 5A).

Nierzadko kłopotliwa może okazać się także ocena teoretycznego błędu oszacowania jakości urobku przewidzianego do uzyskania w zespole bloków eksploatacyjnych uruchamianych w danym okresie rozliczeniowym. Przyczyną trudności poprawnej oceny błędu jest przynajmniej częściowe skorelowanie oznaczeń metalu w próbkach pobranych blisko siebie oraz wykorzystywanie w algorytmach obliczeniowych średnich zawartości składnika w różnych blokach tych samych próbek. W takich przypadkach formuły pozwalające ocenić teoretycznie błąd oszacowań są wyjątkowo skomplikowane, a ich stosowanie w praktyce niemożliwe.

Podsumowanie i wnioski

Modelowanie przestrzenne złóż stwarza nowe perspektywy i szanse wizualizacji rozmieszczenia składników użytecznych w złożu i w konsekwencji możliwości dokładniejszych oszacowań parametrów złożowych w małych fragmentach złoża.

Procedura krigingu 3D zapewnia teoretycznie dokładniejszą prognozę jakości urobku niż inne metody, ale nie zawsze gwarantuje uzyskanie dokładności oczekiwanej przez odbiorców wyników, z reguły geologów kopalnianych. W takich przypadkach sygnalizuje ona jednak niedostateczność rozpoznania, wynikającą ze zbyt rzadkiej w poziomie sieci opróbowań lub dużej zmienności szacowanego składnika.

Poprawne modelowanie złóż z zastosowaniem procedury krigingu 3D wymaga dużych umiejętności i doświadczenia, a także konieczności empirycznego weryfikowania wyników oszacowań. To pierwsze oznacza przede wszystkim umiejętność geostatystycznego modelowania zmienności przestrzennej parametrów opisujących jakość złoża, jak również umiejętność właściwego doboru punktów opróbowań włączanych do oszacowań kopalni w miniblokach oraz samych rozmiarów minibloków.

Możliwości sprawdzenia poprawności przestrzennego modelowania złóż są w praktyce geologiczno-górnicznej bardzo ograniczone. Pozornie najprostszą metodą weryfikacji wydaje się skonfrontowanie uzyskanych na podstawie modelowania 3D prognoz jakości kopaliny w konkretnym bloku eksploatacyjnym z wynikami produkcji. Rzadko jest to jednak możliwe, gdyż zazwyczaj dysponuje się jedynie danymi sumarycznymi z produkcji uzyskanej z wielu przodków w pewnym okresie czasu. Większe szanse wiarygodnej weryfikacji wyników modelowania pojawiają się w przypadku, gdy dysponuje się wynikami opróbowań kontrolnych (Proberz, Wasilczyk 2005) lub wynikami opróbowań wykonywanych bezpośrednio przed rozpoczęciem lub w trakcie eksploatacji pewnego fragmentu złoża, np. w kopalniach węgla brunatnego dla poprawy jakości rozpoznania wykonuje się po zdjęciu nadkładu dodatkowe odwierty ze stropu pokładu (Naworyta 2008). W tym drugim

przypadku można założyć, że powtórne oszacowania średniej zawartości składników w blokach eksploatacyjnych dokonane z uwzględnieniem nowych danych będą bliskie rzeczywistym, co umożliwi wprowadzenie odpowiednich korekt do procedury modelowania przestrzennego złoża.

Warto także zwrócić uwagę na możliwości oceny błędu oszacowań jakości kopaliny w blokach eksploatacyjnych, jakie stwarza procedura kriginu poligonowego 3D. Jej efektem może być kategoryzacja dokładności rozpoznania bloków w oparciu o teoretycznie wyznaczony błąd standardowy kriginu i wprowadzenie dodatkowego kryterium, jakim jest prawdopodobieństwo, że oszacowana zawartość składnika użytecznego przekracza zawartość brzeżną (Mucha, Wasilewska 2009). Celowe wydaje się ponadto przetestowanie możliwości modelowania przestrzennego polskich złóż przy wykorzystaniu bardziej zaawansowanych, nieparametrycznych wariantów kriginu, takich jak krigin indyktorowy lub probabilistyczny, oraz metod symulacji geostatystycznej.

Dysponowanie odpowiednim oprogramowaniem umożliwiającym modelowanie 3D złóż (np. ISATIS firmy Geovariances, ArcGIS firmy ESRI, SURPAC firmy Surpac Group, MineScape firmy MINCOM) może rodzić pokusę bezkrytycznego spojrzenia na uzyskane rezultaty, a zarazem budzić złudną nadzieję na uzyskanie wiarygodnych wyników bez ingerencji i kontroli geologa. W rzeczywistości nie ma w tym zakresie gotowych rozwiązań i recept, które należy dopiero wypracować osobno dla każdego ze złóż z uwzględnieniem specyfiki jego rozpoznania i cech geologicznych.

Praca wykonana została w ramach badań statutowych KGZiG AGH nr 11.11.140.562.

LITERATURA

- Bartuś T., Słomka T., 2009 – Geostatystyczna estymacja parametrów jakości węgla brunatnego w polu Bełchatów wykorzystująca znajomość zmienności lokalnej. *Gospodarka Surowcami Mineralnymi*, t. 25, z. 2, s. 5–22.
- Journel A.C., Huijbregts Ch.J., 1978 – *Mining Geostatistics*. London Academic Press.
- Mucha J., 2002 – Struktura zmienności zawartości [Zn] i [Pb] w śląsko-krakowskich złożach rud Zn-Pb. PAN IGSMiE, *Studia Rozprawy Monografie*, nr 108, Kraków, s. 149.
- Mucha J., Wasilewska M., 2006 – Nieparametryczne metody geostatystyczne interpolacji parametrów złożowych. *Przegląd Górniczy*, nr 1, s. 24 – 30.
- Mucha J., Wasilewska M., 2009a – Trójwymiarowe modelowanie wartości parametrów złożowych metodą kriginu zwyczajnego 3D. *Geologia, Kwartalnik AGH*, t. 3, z. 2/1, s. 169–176.
- Mucha J., Wasilewska M., 2009b – Trójwymiarowe modelowanie złóż metodą kriginu 3D dla prognozowania jakości urobku – szanse i trudności. *Mat. XIX Konf.: Aktualia i perspektywy gospodarki surowcami mineralnymi. IGSMiE PAN, Rytro 4–6 listopada 2009*, s. 223–231.
- Naworyta W., 2008 – Analiza zmienności parametrów złożowych węgla brunatnego pod kątem sterowania ich jakością. *Gospodarka Surowcami Mineralnymi*, t. 24, z. 2/4, s. 97–110.
- Probiez K., Wasilczyk A., 2005 – Weryfikacja dokładności map parametrów jakości węgla koksowego za pomocą kontrolnych próbek bruzdowych. *Zeszyty Nauk. Polit. Śl., Górnictwo*, z. 268, s. 183–193.
- Sinclair A.J., Blackwell G.H., 2002 – *Applied Mineral Inventory Estimation*. Cambridge University Press, s. 1–381.

PROGNOZOWANIE JAKOŚCI UROBKU METODAMI GEOSTATYSTYKI 3D – PERSPEKTYWY I OGRANICZENIA**Słowa kluczowe**

Modelowanie 3D, geostatystyka, kriging, 3D, złoże Cu

Streszczenie

Przedstawiono zasady przestrzennego modelowania złóż z zastosowaniem geostatystycznej procedury krigingu 3D. Wskazano na zalety i przewagi metody krigingu 3D dla prognozowania jakości urobku nad klasycznymi metodami 2D wizualizacji złóż. Zwrócono uwagę na ograniczenia i trudności modelowania geostatystycznego 3D, a w szczególności na kwestie modelowania zmienności przestrzennej parametrów złożowych za pomocą semiwariogramów, doboru wielkości bloków elementarnych (minibloków) i liczby próbek uwzględnianych w algorytmach obliczeniowych. Podkreślono konieczność weryfikacji oszacowań jakości urobku uzyskanych na podstawie modeli 3D złóż przez porównanie ich z danymi z produkcji lub opróbowania wykonywanego w trakcie eksploatacji. Wymienione problemy zilustrowano na przykładzie oszacowań fragmentu jednego ze złóż Cu-Ag LGOM.

THE OUTPUT QUALITY PREDICTION WITH THE 3D KRIGING METHOD – PROSPECTS AND LIMITATIONS**Key words**

3D modeling, geostatistics, 3D kriging, Cu ore deposit

Abstract

The principles of modeling of deposits using geostatistical procedure of the 3D kriging have been outlined. The advantages of the 3D modeling for the mean grade prediction in mining blocs over the 2D methods of deposit visualization have been pointed out. The basic limitations and difficulties of using the 3D kriging procedure have been reviewed, especially: proper modeling of 3D variability by means of semivariograms, selection of optimal number of data taken for estimation of grades in elementary calculation blocks and choice of proper dimensions of these blocks. The necessity of verification of 3D modeling results by comparing them with the data from mining and/or denser sampling has been emphasized. The problems mentioned have been illustrated by an example of the Cu content estimation in the Cu-Ag Polish ore deposits.

