

MODELOWANIE TRÓJWYMIAROWE ZŁÓŻ POLIMETALICZNYCH W PROJEKTACH EKSPLORACYJNYCH

A 3D MODELLING OF POLYMETALLIC DEPOSITS IN EXPLORATION PROJECTS

MATEUSZ NIEDBAŁ¹, JACEK PYRA¹

Abstrakt. W artykule zaprezentowano wpływ modelowania złóż polimetalicznych różnego typu z zastosowaniem technik geostatystycznych na ułatwienie prowadzenia prac eksploracyjnych. Skrótkowo omówiono metodykę analizy za pomocą modeli blokowych oraz zastosowanie oprogramowania modelującego w przestrzeni do złóż o skomplikowanej budowie geologicznej. Wybór sieci opróbowania, budowa bazy danych geologiczno-złóżowych czy prawidłowy dobór parametrów szacowania mają zasadniczy wpływ na osiągnięte wyniki. Przedstawienie parametrów obliczeniowych oraz wariantów wyników modelowania złóża typu stratoidalnego stało się podstawą do określenia możliwości najlepszej metody dla przeprowadzenia procesu modelowania w danych warunkach. Oprócz technicznej i geostatystycznej strony modelowania zwrócono uwagę na bardzo ważny geologiczny aspekt modelowania złóż, warunkujący kształt złóża i przestrzenne rozmieszczenie kopaliny użytecznej. Takie podejście ma zasadniczy wpływ w dalszych etapach modelowania na właściwe oszacowanie zasobów złóża i projekt eksploatacji. Przedstawione w pracy przykłady prezentacji wyników mogą usprawnić prowadzenie prac eksploracyjnych poprzez optymalny dobór miejsca i liczby otworów rozpoznawczych, wyznaczenie granic złóża czy ułatwienie interpretacji struktur geologicznych.

Słowa kluczowe: modelowanie 3D, poszukiwanie złóż, złóża polimetaliczne, geostatystyka.

Abstract. The article presents modelling problems with using geostatistical techniques of various polymetallic deposits. The authors describe the method and application of modelling software for polymetallic and complicated deposits. Selection of optimal grid of samples, database construction and appropriate parameters for resource calculation has a fundamental influence on the expected results. The presented calculation parameters and variants of modelling results for stratified deposit became the basis for defining the best method for the modelling process in specific conditions. The right choice of modelling method can make work faster and easier for deposit reconstruction specialists. In the second section of the article, the authors pay more attention to geological aspect in computer modelling.

Key words: 3D modelling, geological prospecting, polymetallic deposits, mining, geostatistics.

WSTĘP

Modelowanie przestrzenne złóż stanowi obecnie nieodzowny element dokumentowania geologicznego, dzięki któremu możliwe jest dokładne oszacowanie zasobów i planowanie eksploatacji górniczej. Przeprowadzenie procesu modelowania i osiągnięcie wiarygodnego modelu złóża jest zadaniem często obciążonym wieloma problemami, w których rozwinięciu pomaga właściwe wykorzystanie zaawansowanego oprogramowania geologicznego.

Budowa modelu przestrzennego złóża jest wieloetapowa. Stosowane techniki modelowania powierzchni (DTM – *digital terrain modelling*), będące często wstępnym etapem modelowania blokowego złóża, pozwalają na szerokie możliwości interpretacji m.in. struktury i tektoniki złóża. W artykule skupiono się przede wszystkim na modelowaniu blokowym struktur geologicznych złóż oraz optymalizacji sieci otworów rozpoznawczych poprawiających jakość oszacowania, a zarazem kategorii rozpoznania zasobów tych złóż.

¹ KGHM CUPRUM sp. z o.o. Centrum Badawczo-Rozwojowe, ul. Gen. Władysława Sikorskiego 2, 53-659 Wrocław; j.pyra@cuprum.wroc.pl

METODYKA ANALIZY ZASOBÓW ZŁO A

Modelowanie przestrzenne złó z wykorzystaniem technik geostatystycznych w interpolacji i estymacji, z uwagi na mo liwo analizy zmienno ci badanego zjawiska w przestrzeni, znacz co wspiera mo liwie najdokładniejsze przedstawienie naturalnej budowy złó a, prezentacji wielko ci zasobów i rozkładu przestrzennego parametrów złó owych. Mnogo wariantów oblicze , które s stosowane w analizach geostatystycznych, pozwala na dobranie odpowiedniej techniki dla okre lonego typu złó a, anomalii lub wyst piecia mineralizacji. Mog one by wykorzystane zarówno podczas prac eksploracyjnych na ró nych stopniach zaawansowania, jak i na etapie eksploatacji.

PRZYGOTOWANIE BAZY DANYCH

Zasadnicze znaczenie dla powodzenia ka dego projektu dotycz tego zasobów maj dane. Nadanie zarejestrowanym informacjom geologicznym logicznej i spójnej formy jest dla działania programu spraw najwa niejsz . Programy do geologiczno-górnicyj obsługi kopal i projektów eksploracyjnych ułatwiaj zarówno budow bazy danych, jak i integracj z istniej cymi relacyjnymi bazami danych, danymi rastrowymi, danymi z programów CAD, GIS. Pozwalaj tak e na zarz dzanie nimi w czasie rzeczywistym przez wielu u ytkowników z ró nymi uprawnieniami. Takie podej cie zapewnia elastyczny system przechowywania, zarz dzania i analizowania danych.

Programy te zawieraj procedury kontroli poprawno ci danych, sprawdzaj ce je przed wprowadzeniem do centralnej bazy danych. Automatycznie eliminowane s nakładaj ce si próbki, powtarzaj ce si rekordy oraz dane, których warto ci wykraczaj poza dopuszczalny zakres.

OBLICZENIE WARIOGRAMU EMPIRYCZNEGO

Podstaw geostatystycznego opisu zmienno ci stanowi funkcja wariogramu $\gamma(h)$, ł cz ca zale no mi dzy rednim zró nicowaniem warto ci badanego parametru okre lonego w punktach opróbowania a odległo ci mi dzy tymi punktami. Zale no ta wyra ona jest jako (Namysłowska-Wilczy ska, 2006):

$$\gamma(h) = \frac{1}{2n_h} \sum_{i=1}^{n_h} (Z_{i+1} - Z_i)^2 \quad [1]$$

gdzie:

- Z_i, Z_{i+1} – warto ci parametru w punktach opróbowania, oddalonych o odległo h ,
- n_h – liczba par punktów opróbowania, oddalonych o odległo h .

Wariogram empiryczny w formie wykresu punktowego nie mo e by wykorzystany do rozwi zywania zada estymacyjnych. W tym celu nale y go przybli y jedn z funkcji

analitycznych, które w dalszym post powaniu traktowane s jako modele geostatystyczne zmienno ci i nazywane s modelami teoretycznymi wariogramów.

Jednak nie ka da funkcja analityczna mo e by aproksymat wariogramu empirycznego. W sytuacji gdy posta wariogramu empirycznego jest złó ona, mo na go aproksymowa za pomoc kompozycji dwóch lub wi cej modeli podstawowych (Mucha, 1994; Wackernagel, 1998). Wybrany modelem teoretycznym wariogramu zawarto ci Cu w przedstawionym poni ej przykądzie złó a stratyfikowanego miedzi był model sferyczny (fig. 3), o równaniu:

$$\gamma(h) = C_1 \left(\frac{3h}{2a} - \frac{h^3}{2a^3} \right) + C_0 \quad \text{dla } h \leq a \quad [2]$$

$$\gamma(h) = C_0 + C_1 \quad \text{dla } h \geq a \quad [3]$$

gdzie:

- h – odległo mi dzy próbami,
- a – zasi g oddziaływania wariogramu,
- C_0 – wariancja efektu samorodków,
- C_1 – wariancja progowa.

KRIGING

Technika krigingu jest geostatystyczn metod szacowania rednich warto ci badanych parametrów (np. zawarto ci pierwiastków w złó ach) w punktach nieopróbowanych. Wykorzystuje ona znajomo struktury zmienno ci, przedstawion za pomoc funkcji wariogramu. W tej technice interpolowane s warto ci dla punktów lub bloków sieci z uwzgl dnieniem wag przypisanych warto ciom z otoczenia szacowanego punktu lub bloku.

Estymator krigingu zwyczajnego Z^* ma posta warto ci redniej wa onej badanego parametru i okre lony jest ogólnym wzorem (Mucha, 1994; Wackernagel, 1998; Namysłowska-Wilczy ska, 2006):

$$Z^* = \sum_{i=1}^n w_{ik} Z_i \quad [4]$$

gdzie:

- w – współczynnik wagowy krigingu,
- Z_i – warto analizowanego parametru w i -tym punkcie opróbowania.

Znacz c zalet techniki krigingu jest mo liwo uzyskania warto ci wariancji dla ka dego oszacowanego bloku lub punktu. Warto ta, zwana wariancj krigingu, jest określana zgodnie ze wzorem:

$$\sigma_k^2 = \sum_{i=1}^n w_{ik}^2 \sigma_i^2(x_1, x_0) \quad [5]$$

gdzie:

- λ – mno nik Lagrange'a,
- w – współczynnik wagowy krigingu,
- $\sigma_i^2(x_i, x_0)$ – rednia warto wariogramu mi dzy punktami opróbowania, uwzgl dnianymi w estymacji, a szacowanym blokiem.

Kriging jest zatem metodą oceny średnich wartości parametru zró nicowanego w przestrzeni (zregionalizowanego) z uwzgl dnieniem współzależności między obserwacjami, wyrażającej się ich autokorelacją. Zapewnia ocenę tej średniej z minimalną wariancją oszacowania, a więc w porównaniu do innych metod cechuje się wysz efektywnością.

KONSTRUKCJA MODELU BLOKOWEGO I PARAMETRY ESTYMACJI

Model blokowy rozpatrywanego złoża a stratyfikowanego miedzi umieszczono w przestrzeni w miejscu istniejących danych i poza nimi z kilkusetmetrowym marginesem. Został on usytuowany w przestrzeni zgodnie z osiami x, y, z. Model ten jest modelem uproszczonym, nieuwzgl dniającym geologii złoża, która może być determinowana przez kierunkowo struktur złóżowych, mających wpływ na ustawienie modelu blokowego zgodnie z ich przebiegiem w przestrzeni. Wymiary bloków obliczeniowych podstawowych przyjęto następujące: 100×100×1 m, a subbloków, czyli bloków po średnich, odpowiednio 50×50×0,5 m (fig. 1). Taka wielkość bloku jednostkowego została ustalona ze względu na doświadczenia z odległości pomiędzy otworami (danymi) – od około 300 do około 1500 m, i małe mierzony serie zmineralizowanej (z reguły kilka, kilkanaście metrów). Pozostałe przyjęte parametry krigingu to:

- maksymalna liczba informacyjnych próbek dla estymowanego bloku 15,
- minimalna liczba informacyjnych próbek dla estymowanego bloku 3.

Obliczenia wariogramów eksperymentalnych dla zawartości Cu przeprowadzono na podstawie długości klasy podstawowej wynoszącej 275 m i liczby klas 10, dla 8 kierun-

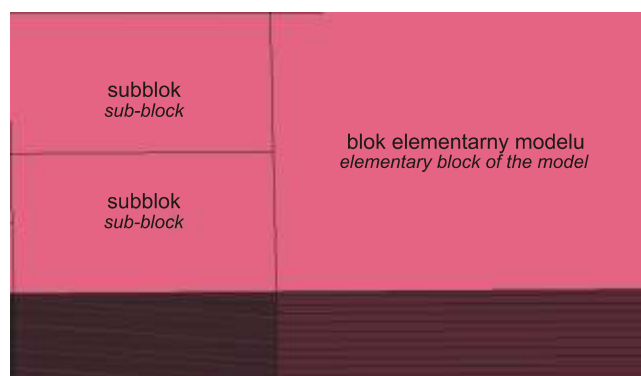


Fig. 1. Wycinek modelu blokowego

Tabela 1

Parametry modelu sferycznego wariogramu eksperymentalnego zawartości Cu

Spherical model parameters of experimental variogram for Cu content

Azymut	Efekt samorodków C [%]	Wariancja czystkowa C [%]	Wariancja progowa C [%]	Zasięg oddziaływania a [m]
135°	0,089	0,937	1,026	795

ków badania (N, NE, E, SE, S, SW, W, NW). Najlepszym do przybliżenia przebiegu wariogramu przez model teoretyczny i charakteryzującym się najlepszymi wynikami walidacji modelu teoretycznego okazał się wariogram obliczony dla kierunku NW–SE (azymut 135°) (tab. 1).

PREZENTACJA I ANALIZA WYNIKÓW MODELOWANIA

Po wywietleniu bloków o średnich estymowanych zawartościach miedzi w złożu powyżej wartości brzojnej 0,7% otrzymano kształt złoża (fig. 2).

Ze względu na wielkość obszaru, a także jego cięgiłość, ekonomicznie interesującym może być tylko jego fragment. Dlatego na podstawie rozkładu zawartości miedzi wyznaczono granice złoża o najlepszej zasobności i cięgiłości. W rozpatrywanym przypadku najbardziej zasobną wydaje się być centralna część złoża, którą oznaczono jako P1 i dla której obliczono zasoby rudy miedzi (tab. 2).

Zakres i sposób wywietlania bloków modelu można ustalić w programie w dowolny sposób. Kształt złoża można ograniczyć, przyjmując nie tylko jeden parametr, lecz wiele różnych parametrów powiązanych zależnościami, np. wywietlić bloki z zawartością miedzi powyżej wartości brzojnej wraz z formułą ekwiwalentności srebra. Można także poprzez zdefiniowanie zakresów wielkości wariancji krigingu i liczby próbek biorących udział w procesie estymacji wyznaczyć przedziały kategorii rozpoznania złoża (fig. 3).

W celu lepszego rozpoznania złoża zaprojektowano w pierwotnym projekcie prac geologicznych analizowanego

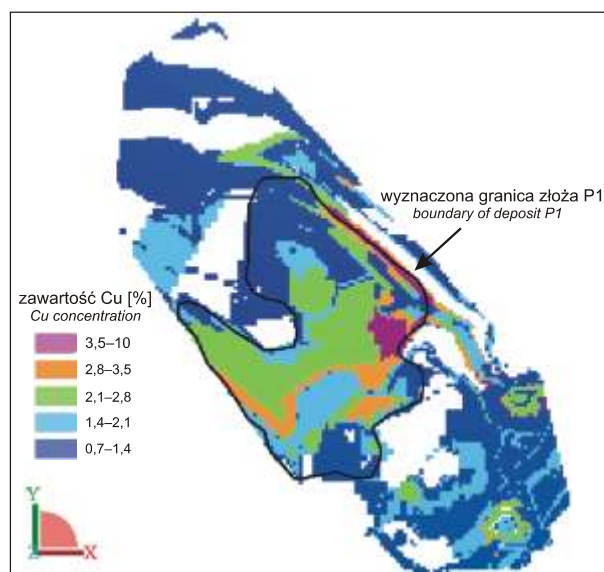


Fig. 2. Rozkład zawartości Cu w złożu (widok z góry)
Spatial distribution of Cu content in the deposit (from the top)

Tabela 2

Raport zasobowy z wyznaczonego obszaru złota owego P1 dla przy tej zawartości brzo nej (cutoff) 0,7% Cu

Resources report from deposit area P1 for cutoff 0,7% Cu

Zawarto Cu [%]	Obj to [m]	Masa [t]	rednia zawarto Cu [%]
0,7–1,2	30 142 500	80 480 475	1,007
1,2–1,7	26 771 250	71 479 237	1,379
1,7–2,2	40 656 250	108 552 187	2,029
2,2–2,7	45 338 750	12 1054 463	2,417
2,7–6,0	25 208 750	67 307 363	4,062
Suma	168 117 500	448 873 725	2,152

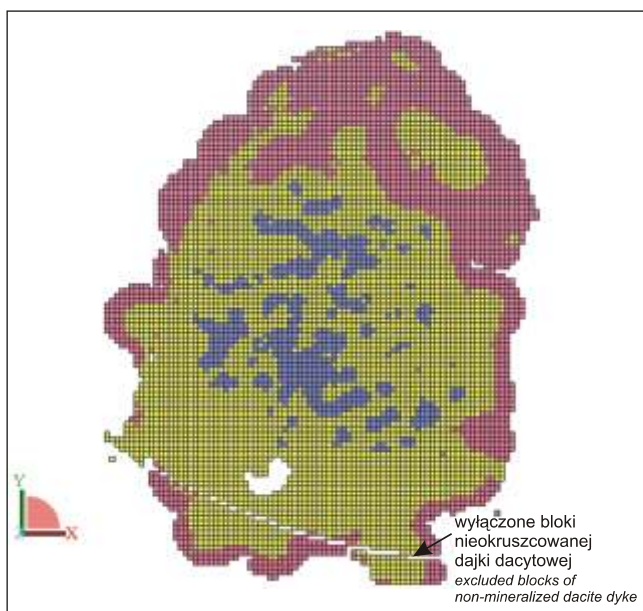


Fig. 3. Kształt złota miedzi porfirowej z zaznaczoną kategorią rozpoznania zasobów, wyznaczony na podstawie wartości bloków o określonych wartościach parametrów geostatystycznych otrzymanych z estymacji metod krigingu. Kategorie rozpoznania zasobów: niebieski – stwierdzone, żółty – udokumentowane, czerwony – wnioskowane

Shape of the copper deposit with marked category of resources outlined on the base of blocks determined by values of geostatistical parameters obtained from the estimation with the kriging method. Categories of mineral resources: blue – measured, yellow – indicated, red – inferred

złota stratyfikowanego, opracowanego metodami klasycznymi, 34 otwory rozpoznawcze (fig. 4). Niektóre otwory zostały zaprojektowane w miejscu już odwierconych, z uwagi na brak wielu informacji z wnętrza. Po przeprowadzeniu procesu modelowania i określeniu granicy interesującej cz...

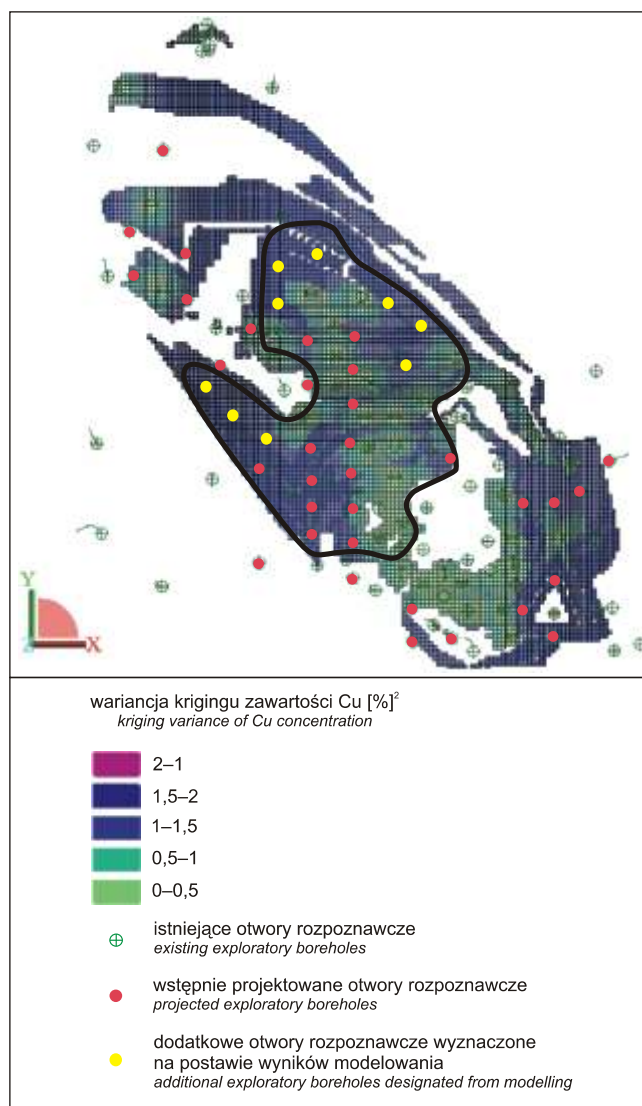


Fig. 4. Zaprojektowane i proponowane otwory rozpoznawcze na tle wartości wariancji krigingu

Designed and proposed prospect drillholes on the background of kriging variance values

złota można na lokalizację tych otworów zweryfikować, przesuwać otwory w miejsca, gdzie rozpoznanie jest mniejsze, lub zaprojektować dodatkowe otwory rozpoznawcze. Otwory proponowane do odwiercenia, określone na podstawie trójwymiarowego modelu złota, zostały zlokalizowane w rejonach, gdzie błąd oszacowania wynikający z wielkości wariancji krigingu jest największy. Ma to na celu z jednej strony minimalizację wariancji, a z drugiej potwierdzenie oszacowanych zawartości miedzi.

Likwidacja otworów z projektu prac geologicznych w miejscach, gdzie wyniki estymacji wskazują niskie zawartości Cu, może sprzyjać bardziej racjonalnemu gospodarowaniu środkami finansowymi przeznaczonymi na prace eksploracyjne.

WERYFIKACJA OTRZYMANYCH MODELI ZŁÓ A

We wcze niejszych rozdziałach zaprezentowano skróto-wo etap modelowania blokowego i analizy złó , bez korzystania z przesłanek geologicznych. Podczas takiego działania mo liwe jest wydzielenie pewnych struktur geologicznych na podstawie np. oszacowanej zawarto ci metalu w blokach elementarnych modelu i liczby prób u ytych w procesie estymacji. Dzi ki temu wyinterpretowanie strefy rozdzielania si złó a bilansowego na dwa oddzielne pokłady jest wyra nie przedstawione (fig. 5).

Fig. 5. Fragment modelu blokowego z zaznaczon kolorem liczb prób wykorzystanych w procesie estymacji i widocznym rozdzielaniem si pokładów złó a o zawarto ci miedzi powy ej 0,7%

Fragment of the block model – the colour indicates number of samples used in the estimation process and with visible separation of the deposit layers by the content of copper above

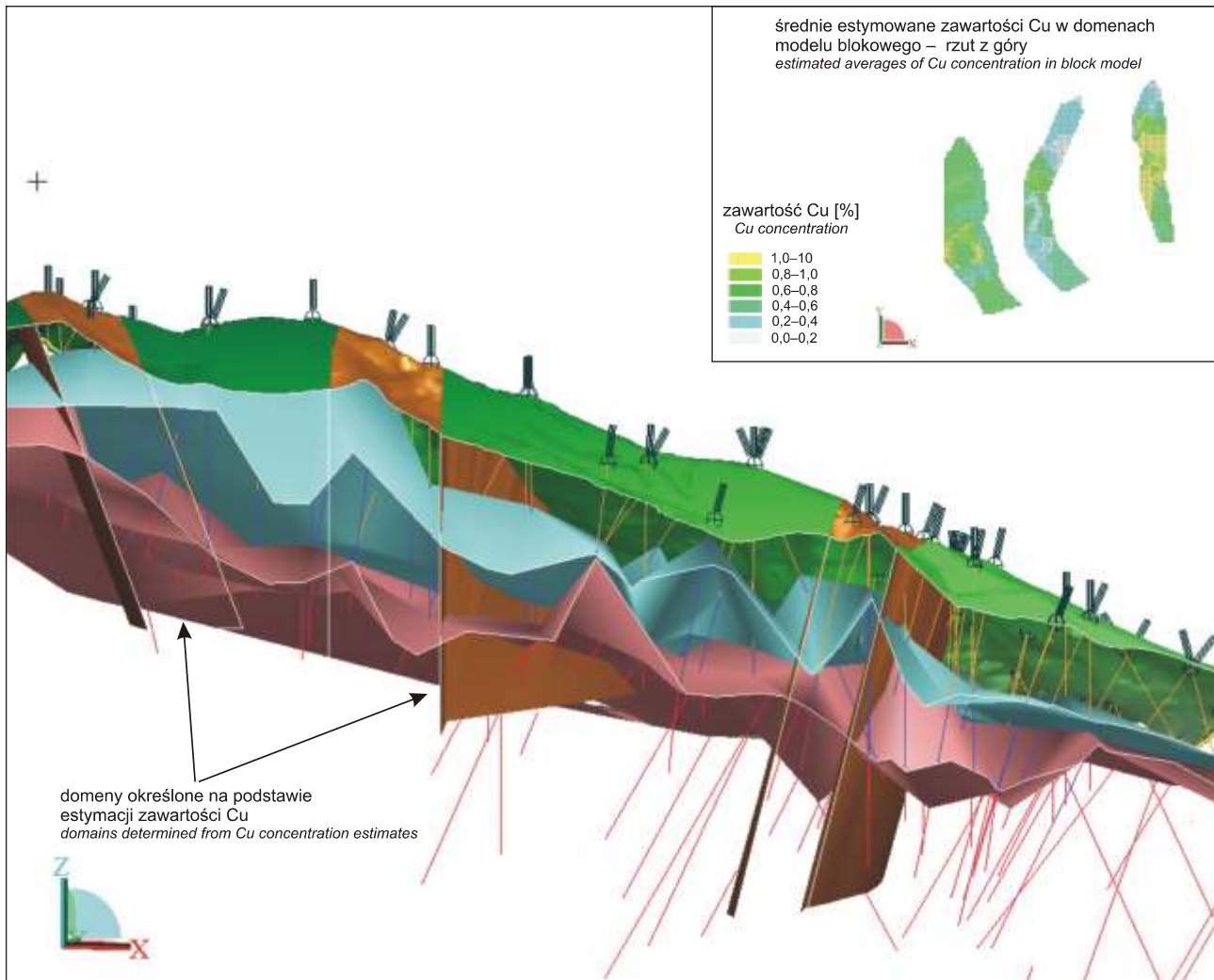
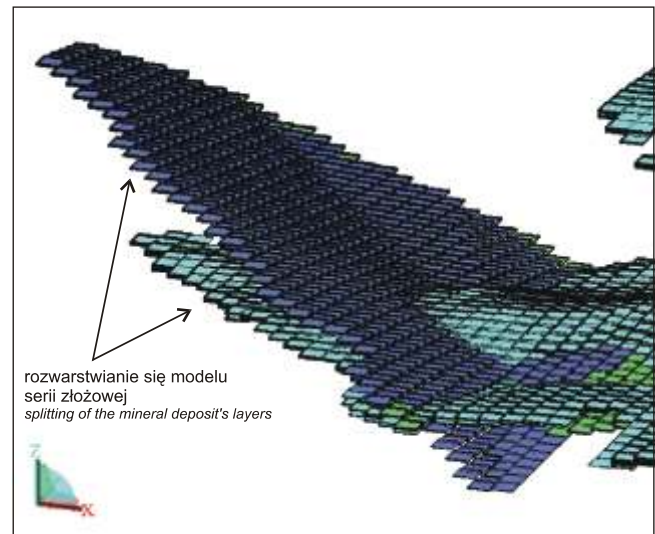


Fig. 6. Przykładowy przekrój przez złó e porfirowe z zaznaczonymi domenami dla ró nych estymacji metalu w modelu blokowym

Sample section through the porphyry deposit with marked domains for different estimations of metal in the block model

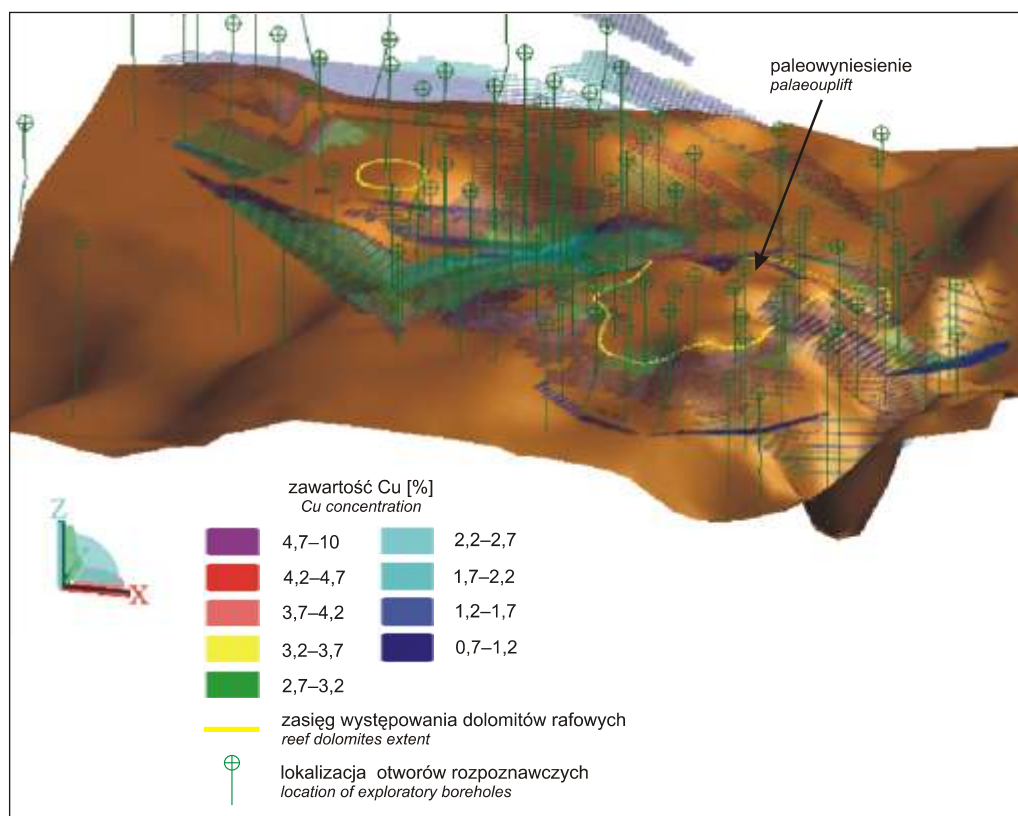


Fig. 7. DTM morfologii podłoża krystalicznego z wyinterpretowanym zasięgiem występowania w głanowych skałach rafowych

Morphology DTM of crystalline basement with the interpreted localization of reef carbonate rocks

Zaprezentowane podejście, znane jako globalna estymacja, odnosi się do obliczeń na początku realizacji projektu podczas badania zasadniczo i dalszego, bardziej szczegółowego rozpoznania złoża. W trakcie postępu prac eksploracyjnych, gdy liczba prób zwiększa się i przeprowadzane są analizy geologiczne (np. litologiczne, przeobrażenia, tektoniczne), możliwe jest określenie oddzielnych domen do obliczeń geostatystycznych, czyli obszarów o charakterystycznych właściwościach, podobnej zmienności analizowanego parametru i o liczbie danych optymalnej dla techniki krigingu. Sytuację tak przedstawia przykład modelowania złoża porfirowego miedzi, gdzie model geologiczny oprócz podziału na trzy strefy poziome: utlenion (malachit), wtórnie zmineralizowaną (chalkozyn, kowelin) i pierwotnie zmineralizowaną (chalkopiryt), podzielono także w pionie w miejscach występowania stref tektonicznych,

zaburzających rozkład mineralizacji w strefach poziomych (Roberts i in., 1988) – figura 6.

W analizowanym wcześniej rozdziale przykładzie modelu złoża stratyfikowanego miedzi interpretacja morfologii podłoża krystalicznego, stworzonego za pomocą metod statystycznych do modelowania powierzchni (metoda odwrotnych odległości), pozwoliła zweryfikować i skorelować wysokie zawartości metalu w obniżeniach, a brak mineralizacji złożowej na paleowyniesieniu, gdzie występują rafowe skały w głanowe (Baraska-Buslik i in., 2006) – fig. 7. Z tego powodu DTM morfologii podłoża krystalicznego w analizowanym przykładzie powinien postać jako powierzchnia graniczna stopnia złoża w modelu blokowym, aby nie popełnił błąd korelacji wysokiej zawartości metalu w otworach usytuowanych w obniżeniach pomiędzy nieokruszowanymi w głanowymi skałami rafowymi na paleowyniesieniu.

WNIOSKI

1. Ocena projektów geologiczno-górnictw przy zastosowaniu oprogramowania do modelowania złóż przebiega znacznie szybciej i sprawniej, a uzyskane wyniki są bardziej precyzyjne, niż w przypadku zastosowania klasycznych me-

tod analizy i oceny złóż. Ponadto dzięki temu uzupełnieniu bazy danych możliwe jest prace różnych specjalistów na aktualnym w danym momencie modelu przestrzennym złoża i górotworu.

2. Algorytmy obliczeniowe zawarte w oprogramowaniach do geologiczno-górnictwej obsługi kopalń z powodzeniem stosowane są w analizach złóż na świecie, zatem programy te mogą służyć do weryfikacji projektów prac geologicznych i programów badań eksploracyjnych.

3. Wspomaganie procesu decyzyjnego związanego z oceną i realizacją projektów geologiczno-górnictwych w postaci zaprezentowanej w artykule sprzyja trafności i wiarygodności przyszłych działań i inwestycji.

4. Tworzenie modeli trójwymiarowych złóż na podstawie globalnej estymacji, bez odniesienia do budowy geologicznej (struktur, tektoniki, genezy itp.), może spowodować błędnych interpretacji, a tym samym przyczyni się do przeszacowania albo niedoszacowania zasobów tych złóż. Jednak właściwe użycie programów do modelowania 3D złóż na wczesnych etapach rozpoznania sprzyja identyfikacji i interpretacji struktur geologicznych oraz wskazuje mniejsze obszary domen geostatystycznych.

LITERATURA

- BARAŃSKA-BUSLIK A., NIEDBAŁ M., PIÓREWICZ R., PYRA J., 2006 – 3D surface modeling and its influence on resource's calculation in a deposit. Mat. Symp. Rapid Mine Development, 7–8 czerwiec 2006 r., Aachen, Niemcy: 409–425. RWTH Aachen University, Institute of Mining Engineering in cooperation with Deutsche Bergbautechnik GmbH – Deutsche Steinkohle AG – Euromines.
- MUCHA J., 1994 – Metody geostatystyczne w dokumentowaniu złóż. Wyd. AGH, Kraków.
- NAMYSŁOWSKA-WILCZYŃSKA B., 2006 – Geostatystyka. Teoria i zastosowania. Oficyna Wyd. PWroc., Wrocław.
- ROBERTS R.G., SHEAHAN P.A. 1988 – Ore deposit models. Geoscience Canada Reprint Series 3.
- WACKERNAGEL H., 1998 – Multivariate geostatistics: an introduction with applications. 2 ed., Springer, Berlin.