

Geostatistical methods used to estimate Sieroszowice copper ore deposit parameters

Anwendung geostatistischer Methoden zur Bestimmung der Parameter der Kupferlagerstätte Sieroszowice

Szacowanie parametrów złoża rud Cu Sieroszowice z zastosowaniem metod geostatystycznych

BARBARA NAMYSŁOWSKA-WILCZYŃSKA, Wrocław

Key words: copper deposit, variation in deposit parameters, structural analysis, estimation, variogram, ordinary kriging, 2D geostatistical modelling, reserves, quality, effectiveness of estimation, unique, moving neighbourhood.

Abstract

The paper presents the methodology used in geostatistical investigations of polymetallic copper ore deposit variation in area S-1 of the Sieroszowice mine and in estimations of average deposit parameters in 2D by the kriging technique. No longer mined section S-1 (400,000 m² in area) located in the E part of the Sieroszowice mine is the subject of the investigations. The S-1 depth ordinates are in a range of 950 to 1000 m. Deposit databases were used for the spatial analyses. Quantitative information on Cu grade and deposit thickness for groove – samples uniformly distributed (at a spacing of 15 to 20 m) in section S-1 and on deposit accumulation (including coordinates X and Y) was collected in the databases. The variation of the main deposit parameters: the Cu grade and the deposit thickness of the deposit (balance) series were analyzed. The geostatistical analyses were carried out using the isotropic and directional variogram functions and the ordinary (block) kriging estimation technique. The deposit parameter variation structure and the percentages of random and non-random components in it were identified from the variograms. The character and degree of the anisotropy of the particular deposit parameters were determined from the directional variogram rose. Also the directions of the greatest and smallest variation of the parameters were determined. The shapes of the isotropic empirical variograms were approximated by analytical theoretical functions. Then using previously determined geostatistical models parameters, i.e. nugget effect C_0 , sill variance C and the influence range, the ordinary (block) kriging with a grid of rectangular elementary blocks was applied. Not only the main geostatistical parameters, i.e. estimated averages Z^* and standard estimation deviation σ_k , as well as coordinates X and Y, but also other parameters indicating the effectiveness and quality of the estimations, i.e. the spatial correlation coefficient (r) of the original Z values and estimated averages $(Z^*-Z)/Z^*$, covariance C of Z/Z^* and $Z1^*/Z^*$, the variance of averages Z^* , the number of neighbors, the average distance and weight of the average for the analyzed parameter, the sum of weights, the sum of positive weights, the slope of Z/Z^* regression line and the Lagrange multiplier, were calculated for the centers of elementary blocks. Raster maps of superficial distributions were made for the above geostatistical parameters. As a result of the spatial analyses, homogeneously mineralized deposit blocks were distinguished. The highest estimated averages Z^* of the Cu grade were found in the N and the NE parts of mine section S-1 while the maximum averages Z^* of deposit thickness and ore accumulation were found in the NW and W parts of S-1. Finally, deposit reserves Q in block S-1 were calculated and the confidence limits were determined.

Zusammenfassung

Geostatistische Methoden wurden in den hoch entwickelten westlichen Ländern schon seit vielen Jahren angewendet, um die Variation der Parameter verschiedener mineralischer Rohstoffe effizient zu untersuchen und deren Vorräte einzuschätzen sowie zahlreiche andere geologische und bergbauliche Probleme zu lösen (GUARASCIO & DAVID 1976, 1988, DAVID & HUIJBREGTS 1975, 1976; JOURNAL 1974, JOURNAL & HUIJBREGTS 1978; KRIGE 1976; PARKER 1983; RENDU 1979, 1980a,

1980b; ROYLE, CLARK, BROOKER et al. 1980; VERLY, DAVID & JOURNAL 1984; WACKERNAGEL 1995, 1998). Sie haben auch in Polen zunehmend an Attraktivität gewonnen und sind dort seit einigen Jahrzehnten in der Bergbaugeologie eingesetzt worden, insbesondere für die räumliche Analyse und Vorratsberechnung von Zn-Pb-Erzen, Steinkohle, Kupfererz, Schwefel und anderen Minerallagerstätten. Im letzten Jahrzehnt sind sie ebenfalls im Umweltengineering genutzt worden (KOKESZ & NIEĆ 1992, MUCHA 1994, MUCHA, 2002, MUCHA & NIEĆ 1996, NAMYSŁOWSKA-WILCZYŃSKA 1987, 1988, 1990, 1993, 1995, 2006, 2007a, 2007b, 2008a, 2008b, 2009, NAMYSŁOWSKA-WILCZYŃSKA & RUSAK 2003, 2005, NAMYSŁOWSKA-WILCZYŃSKA & PYRA 2005, NIEĆ & KOKESZ 1988, ZAWADZKI 2002).

Der Beitrag befasst sich mit der Methodologie geostatistischer Untersuchungen über die Veränderlichkeit der polymetallischen Kupferlagerstätte im Block S-1 der Sieroszowice-Grube in der Vorsudetischen Monoklinale (PIESTRZYŃSKI 2007) und mit der (geostatistischen) Abschätzung der durchschnittlichen Lagerstättenparameter in zweidimensionaler Darstellung mittels Krigingtechniken (NAMYSŁOWSKA-WILCZYŃSKA 1993, 2006). Die untersuchte auflässige Sektion S-1 mit 400 000 m² Fläche ist im Ostteil der Sieroszowice-Grube gelegen. Sie umfasst Teufenbereiche von 950 bis 1000 m unter GOK.

Die Datenbasis der Lagerstätte wurde für die räumliche Analyse herangezogen (ISATIS 2001, 2006a, 2006b, 2006c). Aus dieser Datenbasis wurden quantitative Informationen zum Kupfergehalt und zur Lagerstättenmächtigkeit des Blockes S-1 aus gleichförmig im Abstand von 15 bis 20 m verteilten Schlitzproben gewonnen. Außerdem entstammen ihr Angaben zur Metallschüttung und die X- und Y-Koordinaten (NAMYSŁOWSKA-WILCZYŃSKA 1993, 2006). Untersucht wurde die Variation der wesentlichen Lagerstättenparameter Kupfergehalt, Mächtigkeit und Erzschüttung (Abb. 1 bis 3; Tab. 1 bis 3). Die geostatistische Analyse beruht auf isotropen und gerichteten Variogrammfunktionen und Ordinary Block Kriging (OK) (Tab. 7 bis 11). Sie ist in zwei Varianten durchgeführt worden: mit konstanter (einheitlicher) Krigingnachbarschaft (undifferenziert das gesamte Gebiet S-1) und mit gleitender Krigingnachbarschaft (Berechnungsraum als Teilgebiet innerhalb des Blockes S-1) (Abb. 31 a und b). Die räumliche Variabilität, d. h. die Anteile zufälliger und nicht-zufälliger Komponenten wurden aus den Variogrammen abgeleitet (Kupfergehalt – Abb. 4, Mächtigkeit – Abb. 11, Erzschüttung – Abb. 18). Typ und Grad der Anisotropie der Parameter sind aus gerichteten Variogrammmrosen bestimmt worden (Kupfergehalt – Abb. 5 bis 10, Mächtigkeit – Abb. 12 bis 17, Erzschüttung – Abb. 19 bis 24). Ferner wurden die Richtungen der größten und der geringsten Veränderlichkeit der Parameter ermittelt, also die Hauptachsen der Anisotropieellipse.

Die experimentellen Variogramme (isotrop und gerichtet) sind durch analytische Modellfunktionen approximiert worden (Tab. 4 bis 6). Anschließend wurde das OK auf einem Gitter rechteckiger Elementarblöcke angewendet, wobei die zuvor bestimmten geostatistischen Modellparameter Nuggeteffekt C_0 , Sillvarianz C und Reichweite a verwendet wurden. Neben den wesentlichen Lagerstättenparametern, also den (geostatistisch) geschätzten Durchschnittswerten Z^* für den Kupfergehalt (Abb. 25 und 32), die Mächtigkeit (Abb. 27 und 34) sowie die Schüttung (Abb. 29) und den Kriging-Standardabweichungen σ_k für den Kupfergehalt (Abb. 26 und 33), die Mächtigkeit (Abb. 28 und 35) und die Schüttung (Abb. 30) sowie den Koordinaten X und Y wurden auch andere Kennziffern berechnet, welche es erlauben, die Effizienz und Qualität der Schätzparameter zu beurteilen: der räumliche Korrelationskoeffizient r zwischen den Originalwerten Z und den berechneten Mittelwerten $(Z^*-Z)/Z^*$ für den Kupfergehalt (Abb. 36 und 39), die Mächtigkeit (Abb. 44 und 45), die Schüttung (Abb. 52); die Kovarianz C von Z/Z^* für den Kupfergehalt (Abb. 38 und 39), die Mächtigkeit (Abb. 46 und 47) sowie die Schüttung (Abb. 53), die Varianz der Mittelwerte Z^* für den Kupfergehalt (Abb. 40 und 41), die Mächtigkeit (Abb. 48 und 49) und die Schüttung (Abb. 54), die Anzahl der Nachbarn, durchschnittlicher Abstand und Kriginggewichte der Daten für die analysierten Parameter, Summe der Gewichte, Summe der positiven Gewichte, Anstieg der Regressionsgeraden Z/Z^* für den Kupfergehalt (Abb. 42 und 43), die Mächtigkeit (Abb. 50 und 51) und, die Schüttung (Abb. 55) sowie der Lagrange-Multiplier für die Zentren der Elementarblöcke.

Für die genannten geostatistisch geschätzten Lagerstättenparameter sind 2D-Rasterkarten angefertigt worden (Abb. 25 bis 55). Schließlich sind als Ergebnis der räumlichen Analyse homogen mineralisierte Lagerstättenblöcke ausgehalten worden. Die höchsten Schätzwerte Z^* der Kupfergehalte wurden in den östlichen und nordöstlichen Teilen des Blockes S-1 gefunden, während die Maximalwerte für die Mächtigkeit und die Schüttung in den nordwestlichen und westlichen Bereichen ermittelt wurden. Letztendlich sind die Lagerstättenvorräte Q im Block S-1 zusammen mit ihren Konfidenzintervallen bestimmt worden.

Streszczenie

Metody geostatystyczne wykorzystywane są już od wielu lat w wysoko rozwiniętych zachodnich krajach w przeprowadzaniu skutecznych badań zmienności parametrów różnorodnych surowców mineralnych i do oszacowania ich zasobów, jak również w rozwiązywaniu innych zagadnień geologicznych i górniczych. Również w Polsce techniki te stają się coraz bardziej atrakcyjne i już od kilkudziesięciu lat stosuje się je w geologii górniczej (szczególnie stosowane w odniesieniu do złóż rud Zn-Pb, węgla kamiennego, złóż rud Cu i innych surowców mineralnych), zaś od 10 lat używane także w inżynierii środowiskowej.

W artykule przedstawiono metodykę badawczą, związaną z analizą strukturalną zmienności polimetalicznych złóż rud miedzi w rejonie S-1 kopalni Sieroszowice i szacowaniem wartości średnich parametrów złożowych w układzie 2D,

z zastosowaniem techniki krigingu. Przedmiot analiz przestrzennych stanowi oddział górniczy S-1, wyłączony już z eksploatacji, znajdujący się w E części kopalni Sierszowice, o powierzchni obszaru, wynoszącej 400 000 m². Rzędne głębokościowe oddziału S-1 wahają się w granicach od 950–1000 m ppt. Podstawę badań geostatystycznych stanowiła zawartość opracowanych baz danych złożowych. W bazach danych zgromadzono informacje ilościowe, dotyczące średnich ważonych zawartości Cu i miąższości złoża, wyznaczonych dla prób bruzdowych, rozmieszczonych równomiernie na oddziale S-1, w rozstawie 15–20 m oraz zasobności złoża, wraz z wartościami współrzędnych X i Y, określających lokalizację prób. Analizowano zmienność podstawowych parametrów złożowych, tj. zawartości Cu i miąższości, a w dalszej kolejności zasobności serii złożowej (bilansowej). Badania geostatystyczne przeprowadzono z zastosowaniem funkcji wariogramu izotropowego i kierunkowego oraz procedury estymacyjnej: krigingu zwyczajnego (blokowego). Analiza wariogramów empirycznych pozwoliła na rozpoznanie struktury zmienności parametrów złożowych wraz z określeniem procentowego udziału czynników: nielosowego i losowego w tej strukturze. Na podstawie obrazu różny wariogramów kierunkowych scharakteryzowano charakter i stopień anizotropii różnicowania wartości poszczególnych parametrów złoża, wyznaczając kierunki ich największych i najmniejszych zmian. Przebiegi izotropowych wariogramów empirycznych aproksymowano analitycznymi funkcjami teoretycznymi (tzw. modelami geostatystycznymi).

Wykorzystując w obliczeniach wcześniej wyznaczone wartości parametrów przyjętych modeli teoretycznych, tj. efektu samorodków C_0 , wariancji progowej C i zasięgu oddziaływania, w dalszej kolejności zastosowano kriging zwyczajny (blokowy). Podczas stosowania tej techniki użyto siatki prostokątnych bloków elementarnych. Oprócz oszacowania wartości takich parametrów geostatystycznych, jak średnie estymowane Z^* i standardowe odchylenia estymacji σ_k oraz współrzędne X i Y w centrach bloków siatki elementarnej, pokrywającej oddział S-1 i poza jego granicami, obliczono też inne parametry pokazujące skuteczność i jakość dokonanych estymacji. Są to takie parametry jak: współczynnik przestrzennej korelacji r wartości oryginalnych Z i średnich estymowanych $Z^* - Z/Z^*$, przestrzenna kowariancja C wartości Z/Z^* i wariancja średnich estymowanych Z^* , a także liczba próbek (sąsiednich punktów pomiarowych), średnia odległość i waga średniej dla analizowanego parametru, suma wag, suma dodatnich wag, nachylenie linii regresji wartości Z/Z^* oraz mnożnik Lagrange'a. W dalszej kolejności sporządzono mapy rastrowe powierzchniowych rozkładów wartości wybranych parametrów geostatystycznych.

Efektom przestrzennych analiz jest wydzielenie jednorodnie zmineralizowanych bloków złoża w obrębie oddziału S-1. Największe średnie estymowane Z^* zawartości Cu w złożu stwierdzono w N, NE części oddziału S-1, natomiast maksymalne średnie Z^* miąższości i zasobności złoża cechują NW i W części bloku S-1. W końcowym etapie badań geostatystycznych obliczono wielkość zasobów Q złoża w bloku S-1, określając granice przedziału ufności.