



Jacek MUCHA\*, Ryszard KOTLIŃSKI\*\*, Monika WASILEWSKA-BŁASZCZYK\*

### ***Metodyka szacowania parametrów zasobowych złóż konkrecji polimetalicznych w obszarze Interoceanmetal na Pacyfiku***

Streszczenie: Scharakteryzowano czynniki wpływające na wybór optymalnej metody szacowania zasobności konkrecji występujących na dnie Pacyfiku w obszarze Interoceanmetal i zawartych w nich metali, a w szczególności sposób rozpoznania złoża i strukturę zmienności zasobności konkrecji. Opisano zasady: geostatystycznej analizy zmienności, procedury krigingu zwyczajnego, weryfikacji poprawności modeli geostatystycznych oraz korygowania niekorzystnego efektu wygładzania rezultatów krigingu zwyczajnego metodą Yamamoto. Przedstawiono rezultaty zastosowań metody geostatystycznej w warunkach obszaru złożowego IOM na Pacyfiku. Wskazano na stosunkowo małą dokładność oszacowań zasobności konkrecji w polach rudnych z medianą teoretycznych błędów standardowych krigingu rzędu 30%. Wynika ona z rzadkiej sieci opróbowań oraz stosunkowo dużej zmienności zasobności konkrecji ze współczynnikiem zmienności rzędu 60%. Dla wiarygodnej oceny oszacowania zasobów konkrecji konieczne jest zbadanie dokładności szacowania powierzchni pól rudnych.

Słowa kluczowe: konkrecje, Pacyfik, kriging zwyczajny, efekt wygładzania

### ***Methods of resource parameters estimation of polymetallic nodule deposit in the Interoceanmetal area in the Pacific***

Abstract: The factors affecting the choice of the optimal method of nodule abundance and valuable metal contents estimation on the Pacific bottom in the Interoceanmetal (IOM) area have been described, focusing particularly on the sampling density and the structure variability of nodule accumulations. The principles of geostatistical analysis of variability, geostatistical modelling of deposit parameters, cross-validation procedure and correcting of smoothing effect have been shortly outlined. The results of application of the ordinary kriging with Yamamoto correction for the deposit parameters estimation have been presented. It has been stated that accuracy of mean nodule accumulation in the ore fields is low with median of standard kriging errors equal to ca. 30%. Such a low

\* Dr hab. inż., dr inż., AGH Akademia Górniczo-Hutnicza Kraków; e-mail: mucha@geol.agh.edu.pl

\*\* Prof. dr hab., Uniwersytet Szczeciński

accuracy is an effect of widely spaced sampling sites and relatively high variability of nodule accumulation with variation coefficient about 60%. The necessity of accuracy analysis of ore fields surfaces evaluation for the reliable nodule resources estimation has been emphasized.

Key words: nodules, the Pacific Ocean, ordinary kriging, smoothing effect

## **Wprowadzenie**

Oceaniczne złoża konkrecji polimetalicznych należą do złóż perspektywicznych, których znaczenie będzie wzrastać w miarę wyczerpywania się złóż lądowych oraz rosnących cen metali. Konkrecje polimetaliczne, stanowiące unikalny rodzaj kopaliny, zbudowane są z tlenków oraz uwodnionych tlenków Fe i Mn. Konkrecje mają formę brył o średnicy nie przekraczającej z reguły 15 cm. Ich wartość podnosi współwystępowanie cennych metali, takich jak Co, Cu i Ni, dające przyszłym producentom możliwości dodatkowych przychodów. Prognozuje się, że ich eksploatacja na skalę przemysłową rozpocznie się po 2020 roku.

Od 2001 r. międzynarodowa organizacja Interoceanmetal Joint Organization (IOM) z siedzibą w Szczecinie ma, aktualnie obok 6 innych organizacji, status tzw. kontraktora Międzynarodowej Organizacji Dna Morskiego powołanej przez ONZ. Członkami tej organizacji założonej w 1987 r. są obecnie: Bułgaria, Czechy, Kuba, Polska, Rosja i Słowacja.

IOM ma wyłączne prawo do prowadzenia działalności gospodarczej na dwóch działkach usytuowanych na Pacyfiku, w strefie uskokowej Clarion–Clipperton (1000 mil morskich na zachód od Meksyku), o łącznej powierzchni 75 000 km<sup>2</sup> (Kotliński 2010).

### **1. Czynniki wpływające na wybór metody szacowania parametrów zasobowych**

Podstawowymi parametrami zasobowymi złóż konkrecji polimetalicznych są: zasobność konkrecji (gęstość występowania konkrecji) definiowana jako masa konkrecji przypadająca przeciętnie na 1 m<sup>2</sup> dna oceanicznego, zasobność głównych metali (Co, Cu, Ni, Mn) oraz powierzchnia pól rudnych. Dotychczasowe badania (Kotliński i in. 2008, 2011) wykazały, że zasobność konkrecji i zasobności wymienionych metali są ze sobą silnie skorelowane liniowo, ze współczynnikami korelacji nie mniejszymi od 0,95. Oznacza to w praktyce możliwość wystarczająco dokładnego szacowania zasobności metali opartego na modelu regresji liniowej, wiążącego ją z zasobnością konkrecji. W tej sytuacji poszukiwania właściwej metody szacowania parametrów zasobowych wystarczy odnosić do zasobności konkrecji.

Dokładność oszacowania średniej zasobności konkrecji oraz powierzchni pól rudnych uzależniona jest w głównej mierze od metodyki rozpoznania (opróbowania) złoża i struktury zmienności zasobności konkrecji. Wpływa ona jednocześnie na dokładność szacowania zasobów konkrecji, jako iloczynu obu tych wielkości.

Specyfika występowania złóż konkrecji wyrażająca się ich ogromną rozległością (510 × × 150 km) i dużą głębokością (ponad 4 km) powoduje trudności techniczne i ekonomiczne ich wiarygodnego rozpoznania. Średni rozstaw punktów opróbowania w rejonie IOM wynosi 11–15 km, a tylko we fragmencie tego rejonu o zagęszczonym opróbowaniu wykonanym

w dwóch etapach – 7 km. Kształt pól rudnych jest bardzo nieregularny i złożony, co wynika z konieczności spełnienia nie tylko warunku opłacalności eksploatacji (kryterium minimalnej zasobności konkrecji – orientacyjnie około  $10 \text{ kg/m}^2$ ) oraz technicznych możliwości przyszłej eksploatacji (nachylenie dna oceanicznego poniżej  $7^\circ$ ).

Ważnym i niezbędnym elementem rozpoznania złóż, towarzyszącym ich opróbowaniu, jest profilowanie akustyczne i teleprofilowanie zdjęciowe dna oceanicznego ułatwiające doprecyzowanie przebiegu granic pól rudnych.

Zmienność zasobności konkrecji w obszarze IOM ze współczynnikiem zmienności około 60% można określić jako dużą. W strukturze zmienności tego parametru dominuje składnik losowy zmienności (w dostępnej skali obserwacji wyznaczonej przez rozstaw prób) oraz stosunkowo niewielki zakres autokorelacji (rzędu 10–30 km), co ogranicza miarodajne szacowanie parametru w małych parcelach i punktach złoża. Zmienność ma charakter słabo anizotropowy i zaznacza się jedynie w większej skali obserwacji (>50 km). Kierunek maksymalnej zmienności o przebiegu zbliżonym do N-S jest zgodny z wydłużeniem pól rudnych. Kierunek minimalnej zmienności jest do niego prostopadły i przecina naprzemiennie występujące strefy rudne i bezrudne.

## **2. Dobór metody szacowania parametrów zasobowych**

Przedstawione w rozdziale 1 cechy rozpoznania złóż konkrecji i struktury zmienności zasobności konkrecji determinują zestaw możliwych do zastosowania metod szacowania parametrów zasobowych. Biorąc pod uwagę przydatny charakter rozmieszczenia konkrecji, w warstwie o zanedbywalnie małej miąższości, ogromną rozległość złoża i silne deniwelacje dna oceanicznego, można przyjąć jako model geometryczny złoża cienką powyginaną płytę. Taki, praktycznie dwuwymiarowy model złoża wyklucza możliwość stosowania trójwymiarowych metod szacowania zasobów konkrecji. Z kolei sposób rozpoznania złoża i cechy struktury zmienności wykluczają wykorzystanie klasycznych, tradycyjnych metod geologicznych, takich jak metoda przekrojów geologicznych (z uwagi na dwuwymiarowy charakter złoża) lub metody izolinii i wieloboków (z uwagi na dominację losowego składnika zmienności i mały zakres autokorelacji zasobności konkrecji). W tej sytuacji optymalne wydaje się zastosowanie klasycznych metod statystycznych lub bardziej zaawansowanych metod geostatystycznych wykorzystujących różne wersje procedury krigingu. Te ostatnie były już stosowane wcześniej dla złóż będących w dyspozycji innych kontraktorów na Pacyfiku (np. Chautru i in. 1987; ISA 2010; Zhang Fuyuan i in. 1997).

## **3. Zasady krigingu zwyczajnego z korektą Yamamoto**

Procedura krigingu zwyczajnego jest jednym z najstarszych wariantów metody geostatystycznej, służącej możliwie najdokładniejszemu oszacowaniu wartości parametru złożowego w punktach interpolacji (kriging punktowy) lub ich średnich wartości w obrębie prostokątnych parcel obliczeniowych (kriging blokowy) lub parcel o formie dowolnych wieloboków (kriging poligonowy) z uwzględnieniem:

- wzajemnego usytuowania punktów opróbowania,

- lokalizacji punktów opróbowań względem parceli obliczeniowej,
- wielkości i kształtu parceli obliczeniowej,
- stylu i intensywności zmienności (struktury zmienności) parametru złożowego wyrażonej za pomocą semiwariogramu.

Wartość parametru szacuje się na podstawie algorytmu średniej ważonej:

$$z^*_{KA} = \sum_{i=1}^n w_{iK} \cdot z_i$$

gdzie:

- $z^*_{KA}$  – oszacowana wartość parametru w punkcie lub parceli A,
- $z_i$  – wartość parametru określona w  $i$ -tym punkcie opróbowania znajdującym się w założonym otoczeniu punktu lub parceli A,
- $w_{iK}$  – współczynnik wagowy przypisywany  $i$ -temu punktowi opróbowania.

Istotą procedury krigingu jest sposób wyznaczania współczynników wagowych minimalizujących teoretyczną wariancję błędów oszacowania wartości parametrów geologicznych. Wyznaczane są one z układu równań krigingu, w którym uwzględniane są wymienione wcześniej elementy opisujące relacje odległościowe między punktami opróbowania i punktami (parcelami) obliczeniowymi oraz cechy geometryczne parcel (Journel, Huijbregts 1978; Mucha 1994). Relacje te są wyrażane za pomocą modelu zmienności, który obrazuje wielkość średniego zróżnicowania wartości parametru dla różnych odległości punktów w przestrzeni złożowej. W geostatystyce zróżnicowanie takie opisuje się za pomocą funkcji zwanej semiwariogramem, który mierzy średni kwadrat różnic wartości parametru dla wzrastających odległości (w pewnych przedziałach) między punktami opróbowań. Semiwariogram może być obliczony bez uwzględnienia orientacji linii łączących punkty opróbowań, a więc jedynie jako funkcja ich odległości lub oddzielnie dla różnie zorientowanych względem siebie linii obliczeniowych, a więc jako funkcja odległości punktów opróbowań i kierunku badania. W pierwszym przypadku wyznaczony semiwariogram i dopasowany do niego model teoretyczny nosi nazwę semiwariogramu (modelu) uśrednionego lub izotropowego, natomiast w drugim przypadku semiwariogramu (modelu) kierunkowego lub anizotropowego.

Cenną zaletą procedury krigingu jest możliwość teoretycznej oceny wielkości błędu oszacowania zwanego błędem krigingu. Przy założeniu normalności rozkładu błędów szacowania, standardowy błąd krigingu wyznacza wokół oszacowanej średniej przedział wartości parametru, w obrębie którego z prawdopodobieństwem 68% winna się mieścić jego prawdziwa średnia wartość. W praktyce geologicznej częściej stosuje się podwojony błąd standardowy krigingu, dla którego prawdopodobieństwo to wynosi 95%, co oznacza, że możliwość nie pokrycia przez wyznaczony przedział prawdziwej średniej wartości parametru jest mało prawdopodobna i nie większa od 5%.

Niezbędnym elementem kompleksowego, geostatystycznego opisu zmienności jest weryfikacja wiarygodności dopasowanego modelu semiwariogramu. Realizuje się ją za pomocą specjalnej procedury zwanej krosvalidacją (cross-validation procedure). Polega ona na zastosowaniu procedury krigingu punktowego dla szacowania wartości parametru

w testowym zbiorze punktów próbek wydzielonych ze zbioru podstawowego i nie uwzględnianych w obliczeniach semiwariogramu. Punkty te powinny być rozmieszczone losowo w złożu. Oszacowania wartości parametru w punktach testowych dokonane na podstawie wyłącznie danych z otoczenia porównywane są z wartościami rzeczywistymi parametru pomierzonymi w tych punktach. Pozwala to na uzyskanie zbioru różnic oszacowanych i pomierzonych wartości parametru zestandaryzowanych na wielkość błędu krigingu ze wzoru:

$$\varepsilon_i = \frac{z_{iK}^* - z_i}{\sigma_{iK}}$$

gdzie:

- $z_{iK}^*$  – oszacowana metodą krigingu punktowego wartość parametru w  $i$ -tym testowym punkcie próbowania,
- $z_i$  – pomierzona (rzeczywista) wartość parametru w  $i$ -tym testowym punkcie próbowania,
- $\sigma_{iK}$  – teoretyczny błąd krigingu punktowego.

W przypadku, gdy model jest dobrany poprawnie, rozkład wartości jest zbliżony do normalnego ze średnią wartością bliską zeru i odchyleniem standardowym bliskim jedności.

Wadą krigingu zwyczajnego, podobnie jak i wielu innych, nie geostatystycznych metod interpolacyjnych bazujących na średniej ważonej, jest niekorzystne zjawisko „wygładzania” wartości szacowanego parametru polegające na przeszacowaniu niskich i niedoszacowaniu wysokich rzeczywistych wartości parametrów złożowych w punktach interpolacji. Prowadzi to do zafałszowania rzeczywistej zmienności rozpatrywanego parametru i przejawia się znacznym ograniczeniem prawdziwego zakresu zmian jego wartości. Rekonstrukcja rzeczywistej zmienności możliwa jest (przynajmniej w znacznej części) przez zastosowanie poprawki Yamamoto (2005), opartej na wynikach procedury krosvalidacyjnej (Wasilewska, Mucha 2006). Skorygowanie rezultatów procedury krigingu zwyczajnego metodą Yamamoto zwiększa wiarygodność mapy izoliniowej wartości parametru złożowego skonstruowanej na oszacowaniach punktowych parametru w węzłach sieci interpolacyjnej.

#### **4. Metodyka szacowania parametrów zasobowych złóż konkrekcji przy zastosowaniu krigingu zwyczajnego**

Pierwszym krokiem poprzedzającym oszacowanie średniej zasobności konkrekcji jest okonturowanie pól rudnych przy założonej, w zależności od podejścia, brzeżnej minimalnej zasobności konkrekcji (przykładowo 10 kg/m<sup>2</sup>) lub brzeżnej minimalnej zasobności niklu ekwiwalentnego (przykładowo 0,35 kg/m<sup>2</sup>). Ten drugi parametr wyznaczania granic pól rudnych uwzględnia zawartość czterech podstawowych metali według formuły, której postać zmienia się wraz ze zmieniającymi cenami metali. Przykładowo zasobność ekwiwalentna niklu kilka lat temu była określana ze wzoru:

$$q(\text{Ni}) [\text{kg/m}^2] = 0,07 (1,0\text{Ni} [\%] + 0,25\text{Cu} [\%] + 5,0\text{Co} [\%] + 0,13\text{Mn} [\%])$$

Granice pól rudnych wyznaczają izolinie zasobności konkretacji lub niklu ekwiwalentnego o wartościach równych wartościom brzeżnych parametrów. Przebieg izoliny określa się na podstawie wyników interpolacji wartości parametrów kryterialnych dokonanej przy zastosowaniu procedury kriginu zwyczajnego punktowego z korektą Yamamoto.

Dla wykonania kriginu punktowego konieczna jest geostatystyczna analiza zmienności parametrów kryterialnych obejmująca:

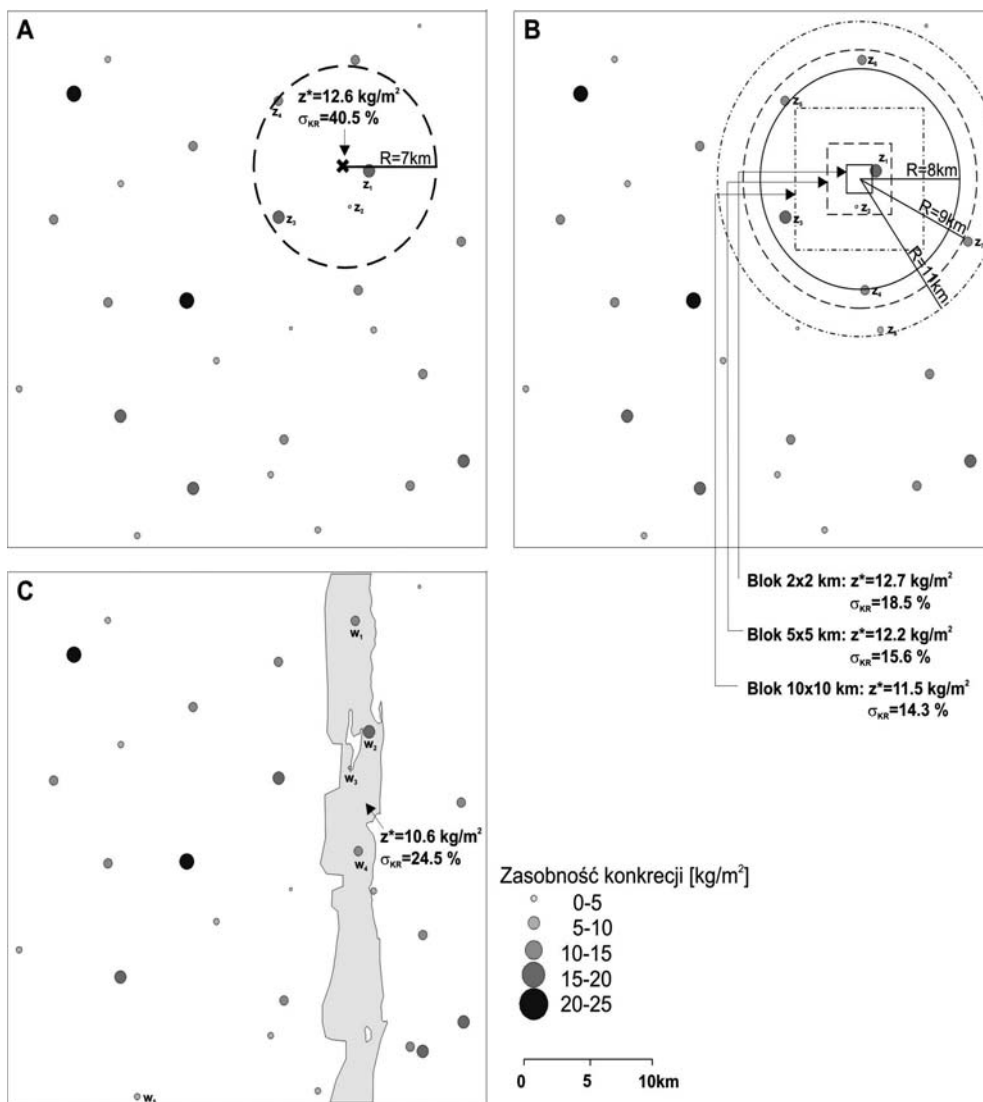
- badanie zmienności kierunkowej za pomocą semiwariogramów mające na celu stwierdzenie anizotropowej lub izotropowej struktury zmienności,
- skonstruowanie modelu izotropowego lub anizotropowego struktury zmienności przez odpowiednie przybliżenie semiwariogramów izotropowych lub anizotropowych za pomocą dozwolonych w geostatystyce funkcji analitycznych ciągłych,
- weryfikację poprawności modelu za pomocą procedury krosvalidacyjnej.

Procedura kriginu punktowego dokonana w odpowiednio gęstej sieci interpolacyjnej i po skorygowaniu jej wyników metodą Yamamoto stanowi bazę dla skonstruowania mapy izoliniowej, pozwalającej wydzielić granice pól rudnych, a więc zarazem oszacować ich powierzchnie oraz opisać sposób rozmieszczenia zasobności konkretacji w ich obrębie.

Po określeniu granic i powierzchni pól rudnych, z uwagi na skomplikowany i nieregularny przebieg granic, należy oszacować średnie zasobności konkretacji przy zastosowaniu procedury kriginu poligonowego. Oszacowanie obu tych parametrów pozwala po ich wymnożeniu na obliczenie zasobów konkretacji. Jednocześnie obok oszacowania średnich zasobności konkretacji krigin poligonowy umożliwia ocenę błędów oszacowania.

Przykłady zastosowań procedury kriginu punktowego, blokowego i poligonowego we fragmentach obszaru złożowego IOM przedstawiono na rysunku 1. Na rysunku 2 zilustrowano efekt wygładzania danych przez zestawienie map izoliniowych sporządzonych po interpolacji wyników opróbowań metodą kriginu zwyczajnego (rys. 2A) i po zastosowaniu korekty wyinterpolowanych wartości parametru metodą Yamamoto (rys. 2B). Wykorzystanie jako procedury interpolacyjnej kriginu zwyczajnego pozwala na zarysowanie jedynie ogólnej tendencji rozmieszczenia wartości analizowanego parametru, natomiast korekta Yamamoto pozwala na przynajmniej częściowe odtworzenie lokalnego zróżnicowania wartości parametru.

Dokładność szacowania średnich zasobności konkretacji w partiach obszaru IOM jest mała, co wynika ze stosunkowo dużej zmienności tego parametru i rzadkiej sieci opróbowań. Teoretyczne błędy tych oszacowań są dodatkowo silnie zróżnicowane w zależności od wielkości i kształtu pól rudnych. Mediana relatywnych (standardowych) błędów oszacowań średniej zasobności w polach rudnych wynosi około 30%. Niewiele większa jest mediana błędów oszacowań zasobności konkretacji w punktach interpolacji rzędu 35%. Przytoczone wielkości dowodzą małej dokładności oszacowań tego parametru w wydzielonych polach rudnych oraz niezadowalającej dokładności map opartych na interpolacji punktowej parametru przy obecnym zagęszczeniu sieci opróbowań dna oceanicznego. Akceptowalne rezultaty odnotowuje się dopiero w przypadku oszacowań dokonywanych w dużych parcelach obliczeniowych o rozmiarach  $10 \times 10$  km i  $20 \times 20$  km, dla których mediany prognozowanych błędów są rzędu 10–15%. Teoretyczne wielkości błędów znajdują potwierdzenie w wynikach porównania oszacowań dokonanych we fragmencie obszaru IOM o powierzchni około 5000 km<sup>2</sup>, w którym opróbowanie przeprowadzono dwukrotnie (Kotliński i in. 2011). Mediana różnic absolutnych oszacowań w blokach  $20 \times 20$  km na



Rys. 1. Przykłady oszacowań zasobności kongrecji:

A – w punkcie (kriging punktowy), B – w blokach o rozmiarach:  $2 \times 2$ ,  $5 \times 5$  i  $10 \times 10$  km (kriging blokowy), C – w polu rudnym (kriging poligonowy) – granice pola rudnego przybliżono za pomocą odcinków prostej tworzącej wielobok

R – promień założonej, kołowej strefy zliczania danych, – oszacowana zasobność kongrecji,

$z_i$  – zasobność kongrecji w punkcie opróbowania,  $\sigma_{KR}$  – względny, standardowy błąd oszacowania (krigingu)

Fig. 1. Examples of the nodule abundance estimation:

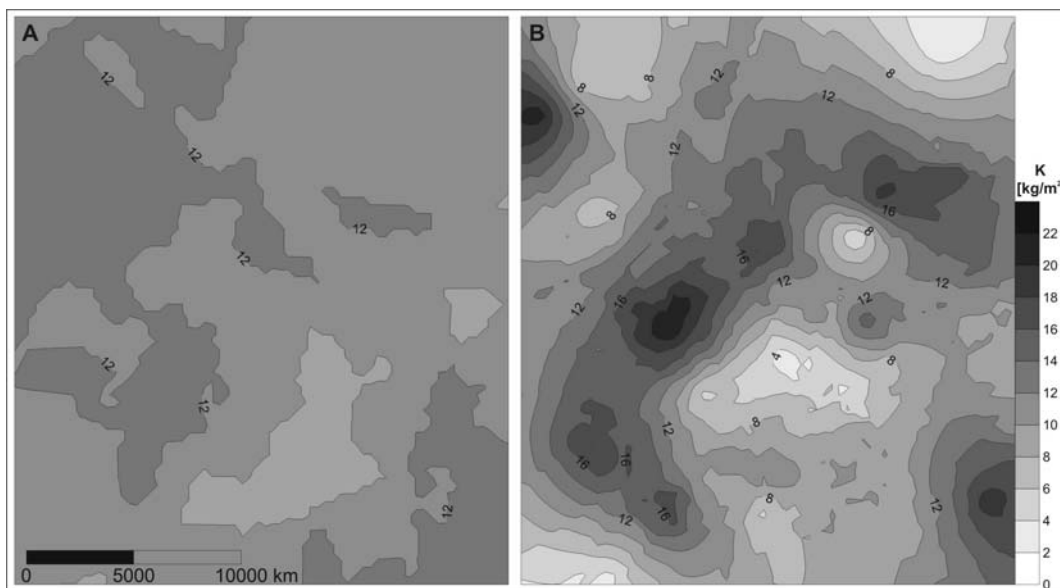
A – in the point (point kriging), B – within the blocks:  $2 \times 2$ ,  $5 \times 5$ ,  $10 \times 10$  km (block kriging),

C – within ore field (polygonal kriging)

R – search radius, – estimate of nodule abundance,  $z_i$  – nodule abundance measured in sampling

point,  $\sigma_{KR}$  – relative kriging error





Rys. 2. Mapy izoliniowe zasobności конкреcji skonstruowane na podstawie interpolacji parametru metodą kriginu punktowego zwyczajnego (A) i kriginu punktowego zwyczajnego z poprawką Yamamoto (B)

Fig. 2. Contour maps of the nodule abundance performed on the basis of the ordinary point kriging (A) and the ordinary point kriging with Yamamoto correction (B)

podstawie danych obu faz opróbowania wynosi 13%, natomiast różnica oszacowań średniej zasobności w całym fragmencie obszaru stanowi zaledwie 7%.

Drugim elementem wpływającym na dokładność oszacowania zasobów конкреcji jest trudny do ilościowej oceny błąd oszacowania powierzchni pól rudnych. Jego wiarygodna ocena wymaga dodatkowych informacji pochodzących z zagęszczenia dotychczasowej sieci opróbowania i wyników teleprofilowania zdjęciowego i akustycznego dna oceanicznego. Teoretycznie błąd ten może być wyznaczony metodą geostatystyczną pod warunkiem, że sieć opróbowania jest regularna lub zbliżona do niej (Journel, Huijbregts 1978).

Znajomość błędu oszacowania powierzchni pól rudnych jest niezbędna do oceny względnego błędu oszacowania zasobów конкреcji ze wzoru:

$$\varepsilon_{KR}(Q) = \sqrt{\varepsilon_{KR}^2(q_K) + \varepsilon_R^2(F)}$$

gdzie:

- $\varepsilon_{KR}(Q)$  – błąd względny oszacowania zasobów конкреcji,
- $\varepsilon_{KR}^2(q_K)$  – błąd względny oszacowania średniej zasobności конкреcji,
- $\varepsilon_R^2(F)$  – błąd względny oszacowania powierzchni F złoża bilansowego.



## 5. Problemy wymagające rozwiązania

1. Dla wyboru optymalnej, geostatystycznej metody szacowania parametrów zasobowych oceanicznych konkrecji polimetalicznych celowe jest przeanalizowanie efektywności innych, bardziej zaawansowanych wariantów procedury krigingu (np. krigingu indykatowego, probabilistycznego lub rozłącznego) oraz symulacji geostatystycznej. Podjęcie ostatecznej decyzji powinno opierać się na praktycznej weryfikacji ich dokładności, w miarę uzyskiwania nowych informacji w trakcie kolejnych etapów rozpoznania obszaru IOM, a w szczególności wyników opróbowania oraz teleprofilowania zdjęciowego i akustycznego.
2. Konieczne jest podjęcie badań mających na celu ocenę wielkości błędu oszacowania powierzchni pól rudnych, tym bardziej, że kolejne etapy rozpoznania złoża niewątpliwie skomplikują ich obraz wskutek wykrycia partii bezrudnych niemożliwych do ujawnienia przy rzadszej sieci rozpoznania. Umożliwi to bardziej wiarygodną ocenę dokładności oszacowania zasobów konkrecji w polach rudnych.
3. Pożyteczne i celowe jest również przeanalizowanie różnic wielkości oszacowań zasobów i średnich zasobności konkrecji w zależności od przyjętych parametrów kryterialnych wyznaczania granic pól rudnych (brzeżnych zasobności konkrecji lub niklu ekwiwalentnego).

Praca wykonana częściowo w ramach badań statutowych Katedry Geologii Żyłowej i Górnictwa AGH nr 11.11.140.562

## Literatura

- Chautru J.M., Morel Y., Herrouin G., 1987 – Geostatistical simulation of a commercial polymetallic nodule mining site. Proc. of 12<sup>th</sup> APCOM 87. vol. 3., Geostatistics, Johannesburg, SAIMM, s. 177–185.
- ISA, 2010 – A geological model of polymetallic nodule deposits in the Clarion Clipperton fracture zone. Technical Study No 6. Kingston, Jamaica.
- Journel A.G., Huijbregts Ch.J., 1978 – Mining Geostatistics. London Academic Press.
- Kotliński R., 2010 – Activities of the Interoceanmetal Joint Organization (IOM) in relation to deep seabed mineral resources development. Proc. “SEABED: THE NEW FRONTIER”, ISA, Madrid, Spain, p. 29.
- Kotliński R., Mucha J., Wasilewska M., 2008 – Problemy szacowania zasobów złóż konkrecji polimetalicznych na Pacyfiku. Gospodarka Surowcami Mineralnymi, t. 24, z. 2/4 Kraków, s. 257–266.
- Kotliński R., Mucha J., Wasilewska-Błaszczuk M., 2011 – Dokładność szacowania zasobów pacyficznych konkrecji polimetalicznych w obszarze IOM. Górnictwo Odkrywkowe, R. 52, nr 1–2, s. 31–36.
- Mucha J., 1994 – Metody geostatystyczne w dokumentowaniu złóż. Skrypt AGH, Kraków.
- Wasilewska M., Mucha J., 2006 – Korekta efektu wygładzenia w procedurze interpolacyjnej krigingu zwyczajnego. Przegląd Górniczy, nr 1, s. 31–36.
- Yamamoto J.K., 2005 – Correcting the smoothing effect of ordinary kriging estimates. Mathematical Geology, Vol. 37, No. 1, s. 69–94.
- Zhang Fuyuan, Shen Huati, Han Xiqiu, 1997 – Geostatistical Analysis of the Abundance and Grade of the Polymetallic Nodule Enriched Area of the Clarion Clipperton Zone in the Pacific. Acta Sedimentologica Sinica.

