

PREDYKCJA ZASOBNOŚCI WYTYPOWANYCH METALI W ZŁOŻU KONKRECJI NA PACYFIKU OPARTA NA MODELACH REGRESYJNYCH (STREFA CLARION-CLIPPERTON, OBSZAR INTEROCEANMETALU)

PREDICTION OF ABUNDANCE OF SELECTED METALS IN THE NODULES DEPOSIT IN THE PACIFIC OCEAN BASED ON REGRESSION MODELS (CLARION-CLIPPERTON FRACTURE ZONE, THE INTEROCEANMETAL EXPLORATION AREA)

Jacek Mucha, Monika Wasilewska-Błaszczyk, Justyna Auguścik, Jerzy Wójtowicz - Katedra Geologii Złóżowej i Górniczej, Wydział Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska, AGH Akademia Górniczo-Hutnicza

Zweryfikowano metodami statystycznymi poprawność predykcji zasobności metali (Cu, Mn, Ni) w złóżach konkrecji polimetalicznych na Pacyfiku (strefa Clarion-Clipperton, obszar INTEROCEANMETALU) na podstawie liniowych i nieliniowych modeli regresyjnych wiążących je z zasobnościami konkrecji. Stwierdzono, pełną przydatność prostych liniowych modeli regresji do prognozy zasobności metali przy założeniu, że dysponuje się wiarygodnymi oznaczeniami zasobności konkrecji. Metoda ta może mieć duże znaczenie w najbliższej przyszłości po wdrożeniu metody pośredniego określania zasobności konkrecji na podstawie rejestracji fotograficznej dna pacyficznego.

Słowa kluczowe: konkrecje polimetaliczne, Pacyfik, zasobności metali i konkrecji, regresja liniowa i nieliniowa

Correctness of prediction of metals abundance (Cu, Mn, Ni) in deposit of polymetallic nodules (the Pacific Ocean, Clarion-Clipperton zone, the INTEROCEANMETAL exploration area) was verified using statistical methods. The prediction was based on linear and non-linear regression models describing dependences between metals and nodules abundances. Usefulness of simple linear models for predictions was confirmed. This method can be of great importance in the nearest future after implementation of indirect method of defining of nodules abundance based on photographic registration seabed of the Pacific.

Keywords: polymetallic nodules, Pacific Ocean, metal and nodules abundance, linear and non-linear regression

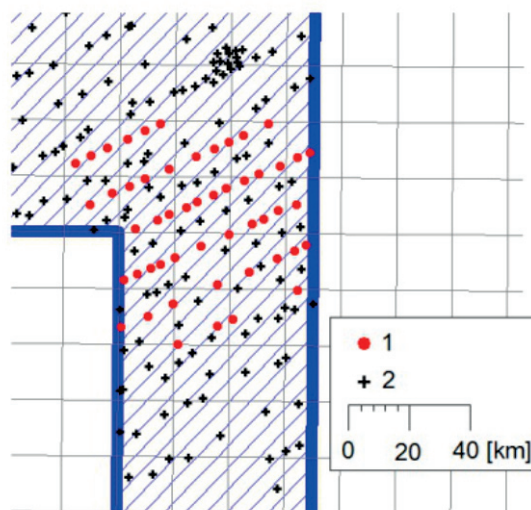
O znaczeniu ekonomicznym złóż konkrecji polimetalicznych w strefie Clarion-Clipperton na Pacyfiku decydują w głównej mierze zasoby czterech metali: Co, Cu, Mn, Ni. Dotychczasowe badania tych złóż, których wyniki rzadko były przedmiotem publikacji, wskazywały na silną zależność korelacyjną zasobności metali (mas metali przypadających przeciętnie na 1 m² powierzchni dna oceanicznego) z zasobnością konkrecji polimetalicznych. Może ona mieć szczególne znaczenie w perspektywie zastosowania w bliskiej przyszłości pośredniej oceny zasobności konkrecji opartej na rejestracji fotograficznej dna pacyficznego, np. z wykorzystaniem urządzeń typu AUV-Autonomous Underwater Vehicle [6]. Metoda ta umożliwi uzyskanie ogromnej liczby danych, co w przypadku braku znaczących błędów systematycznych oceny pośredniej, będzie skutkować znaczącym doprecyzowaniem przebiegiem granic ciał rudnych i wybitnym zwiększeniem dokładności oszacowań zasobów konkrecji polimetalicznych. Potwierdzenie silnych zależności korelacyjnych między zasobnościami konkrecji i zasobnościami metali pozwoli na uzasadnioną i szybką predykcję wartości tych drugich w oparciu o skonstruowane regresyjne modele zależności, bez konieczności wykonywania kosztownych i

pracochłonnych analiz chemicznych co przy ogromnej liczbie pomiarów pośrednich zasobności konkrecji będzie prowadzić również do dokładnych oszacowań zasobów metali.

Weryfikację zależności korelacyjnych przeprowadzono dla wyników opróbowań dna pacyficznego wykonanych w części obszaru administrowanego przez Wspólną Organizację INTEROCEANMETAL (IOM), kontraktora Międzynarodowej Organizacji Dna Morskiego [1, 2, 4].

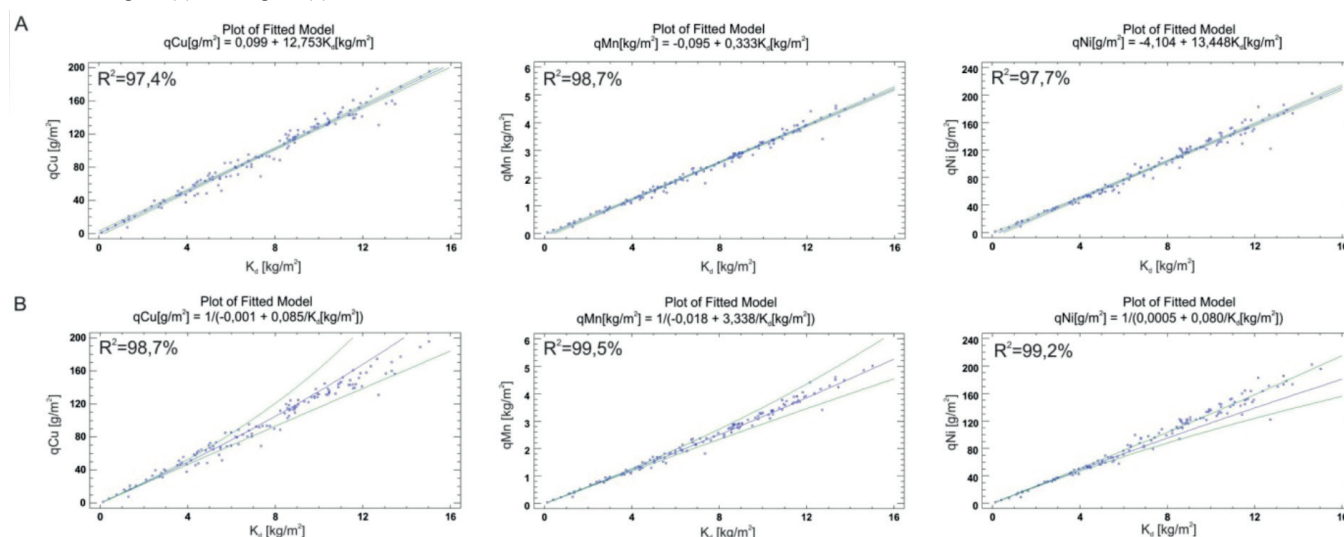
Jako zbiór treningowy przyjęto wyniki oznaczeń zasobności konkrecji i zasobności trzech metali (Cu, Mn, Ni) w 128 próbach pobranych w centralnej części obszaru IOM w trakcie rejsu odbytego w 2006 r (rys. 1). Średni rozstaw prób wynosił około 11 km. Zasobności konkrecji i metali w tym rejonie charakteryzują się umiarkowaną zmiennością ze współczynnikiem zmienności rzędu 40%. Przestrzenna struktura zróżnicowania tych parametrów ujawnia zdecydowaną dominację losowego składnika zmienności.

Wyznaczone dla danych zbioru treningowego (przy zastosowaniu programu STATGRAPHICS Centurion XVII) regresyjne modele liniowe i nieliniowe zależności zasobności trzech metali (Cu, Mn, Ni) od zasobności konkrecji ujęto na rysunku 2. Bardzo



Rys. 1. Lokalizacja punktów opróbowania we fragmencie obszaru IOM; zbiór testowy (1), zbiór treningowy (2)

Fig. 1. Location of sampling points in the part of the IOM area; testing set (1), training set (2)



Rys.2. Modele liniowe (A) i nieliniowe (B) zależności empirycznych zasobności metali q(Cu, Mn, Ni) od zasobności konkrecji polimetalicznych w stanie suchym K_d (zbiór treningowy – rys. 1); R² – współczynnik determinacji

Fig. 2. Linear (A) and non-linear (B) models of empirical dependences between the abundance of metals q(Mn, Cu, Ni) and dry nodules abundance K_d (for the training set – Fig. 1); R² – the coefficient of determination

Tab. 1. Wyniki statystycznej weryfikacji występowania błędów systematycznych (stałego i proporcjonalnego) w predykcji zasobności metali z modelu regresji liniowej i nieliniowej (dla poziomu istotności $\alpha=0,05$)

Tab. 1. The results of statistical verification of occurrence of systematic errors (fixed bias and proportional bias) in the prediction of metals abundance based on models of linear and non-linear regression (significance level $\alpha=0,05$)

Zasobności metali		qCu		qMn		qNi	
Parametry modelu liniowego		b ₀	b ₁	b ₀	b ₁	b ₀	b ₁
Predykcja na podstawie regresji liniowej	t	1.317	0.522	-0.132	-1.502	-1.435	2.840
	P	0.097(+)	0.302(+)	0,448(+)	0,070 (+)	0.079(+)	0.003(-)
Predykcja na podstawie regresji nieliniowej	t	6.250	-7.472	0.569	-0.596	-12.878	7.431
	P	0.000(-)	0.000(-)	0.286(+)	0.277(+)	0.000(-)	0.000(-)

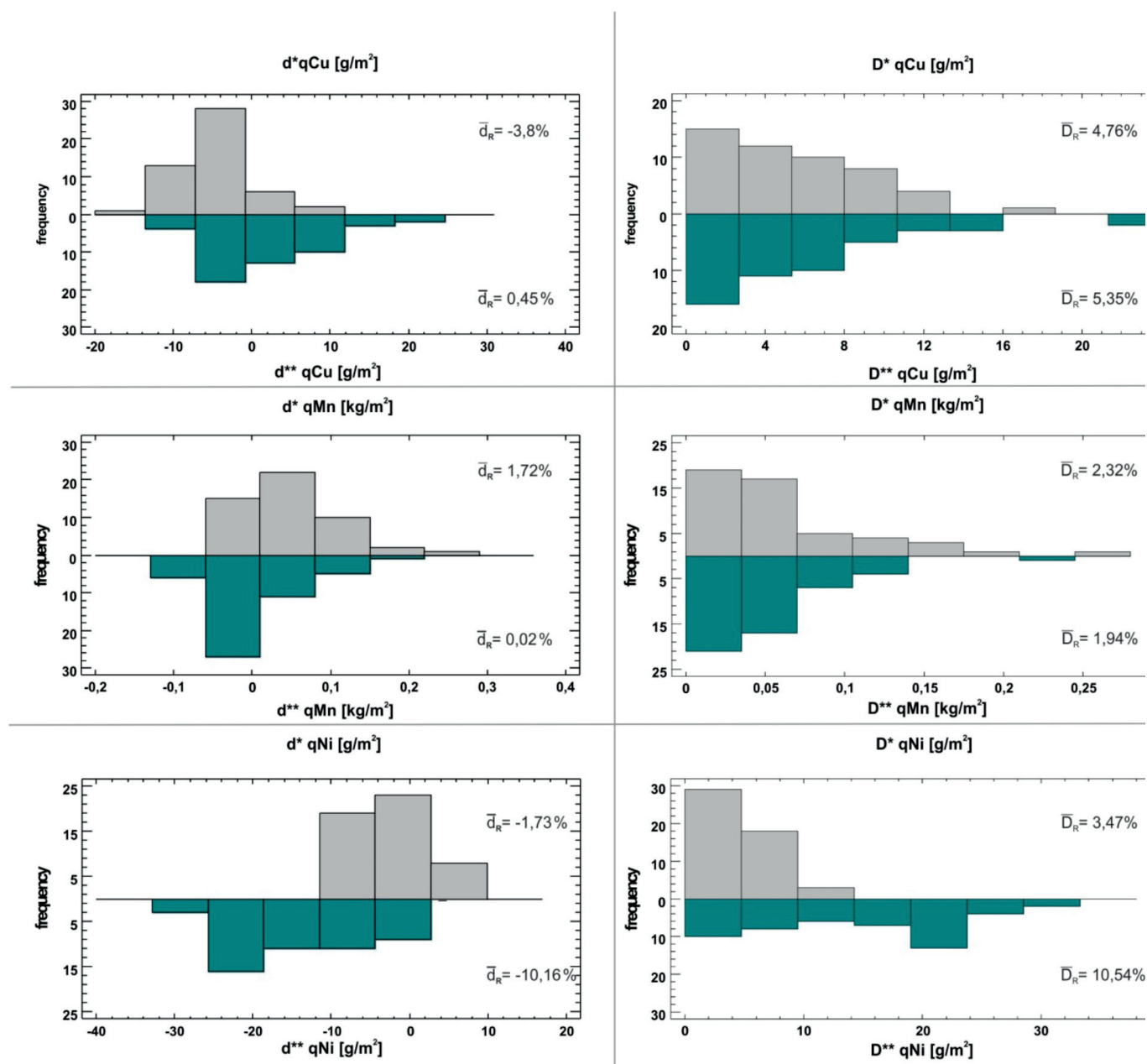
Objaśnienia:

b₀ i b₁ – parametry modelu liniowego (odpowiednio: wyraz wolny i współczynnik kierunkowy prostej) wiążącego zasobności metali określone z równań regresji i stwierdzone w punktach opróbowania; znak „+” i zielona barwa oznacza brak podstaw do odrzucenia hipotezy o niewystępowaniu błędu systematycznego dla referencyjnego poziomu istotności $\alpha=0.05$ ($P>\alpha$); znak „-” i czerwona barwa oznacza występowanie błędu systematycznego z ryzykiem 5% ($P<\alpha$); t – wartość statystyki testującej o rozkładzie t-Studenta, P – empiryczny poziom istotności (w uproszczeniu: prawdopodobieństwo prawdziwości hipotezy zerowej)

wysokie wartości współczynników determinacji ($R^2>97\%$) jednoznacznie potwierdzają znakomite dopasowanie modeli do zależności empirycznych przy czym tylko nieznacznie lepsze rezultaty uzyskano dla modeli nieliniowych.

Uzyskane wyniki nie są jednak wystarczające dla definitywnego stwierdzenia przydatności modeli regresyjnych do prognozy zasobności metali w punktach opróbowania (lub pomiarowych), w których określono jedynie w sposób bezpośredni lub pośredni zasobności konkrecji. Konieczna jest weryfikacja dokładności predykcji zasobności metali w oparciu o zbiór testowy.

Zbiór testowy stanowiły wyniki opróbowania zagęszczającego (50 prób) w rozpatrywanym fragmencie obszaru IOM wykonanego w ramach rejsu w roku 2009 (rys.1). Dane te nie były uwzględniane przy określaniu modeli regresyjnych (rys. 2). W oparciu o wartości zasobności konkrecji określone w punktach opróbowania zbioru testowego, z równań regresji (rys. 2) wyznaczono zasobności metali Cu, Mn, Ni oraz porównano je zasobnościami metali określonymi w tych punktach bezpośrednio na podstawie klasycznego opróbowania. Dokładność predykcji



Rys. 3. Histogramy różnic (d) i różnic absolutnych (D) między zasobnościami metali określonymi z regresji liniowej (*) i nieliniowej (**) oraz zasobnościami metali określonymi na podstawie opróbowania (zbiór testowy)

Fig. 3. Histograms of differences and absolute differences between metals abundance defined from regression models: linear (*) and non-linear (**), and on the basis of sampling results (test set)

Objaśnienia: $\bar{d}_R$ – średnia relatywnych różnic, $\bar{D}_R$ – średnia relatywnych absolutnych różnic;

$$\bar{d}_R = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{q_i^* - q_i}{q_i} * 100\% \quad \bar{D}_R = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{|q_i^* - q_i|}{q_i} * 100\%$$

gdzie: N – liczba danych, q_i^* i q_i – zasobności metali określone odpowiednio z modelu regresji i stwierdzone w punktach opróbowania zbioru testowego

oceniono za pomocą dwóch wskaźników: średniej z relatywnych różnic ($\bar{d}_R$) oraz średniej z relatywnych absolutnych różnic ($\bar{D}_R$) między zasobnościami metali prognozowanymi z równań regresji i określonymi w punktach opróbowania. Pierwszy z nich może być traktowany jako miara błędu systematycznego natomiast drugi jako miara błędu losowego (rys. 3).

Uzyskane wyniki zilustrowano w formie graficznej za pomocą histogramów na rysunku 3. W przypadku wszystkich modeli liniowych oraz modeli nieliniowych dla zasobności Cu

i Mn można je uznać za satysfakcjonujące z punktu widzenia dokładności prognozy, gdyż oba rodzaje błędów predykcji są stosunkowo niewielkie i nie przekraczają 5%. Prognoza zasobności Ni w oparciu o model nieliniowy pomimo znikomo małego błędu systematycznego charakteryzuje się już dość wysokim błędem losowym przekraczającym 10%.

Dla bardziej dogłębnego zbadania roli błędów systematycznych w predykcji zasobności metali (stałego i proporcjonalnego) wykonano analizę korelacji i regresji liniowej zasobności metali określonych bezpośrednio w punktach opróbowania zbioru testowego i zasobności określonych z modeli regresyjnych.

W przypadku braku błędów systematycznych modele liniowe powinny cechować się wyrazem wolnym (b_0) nie różniącym się w sposób statystycznie istotny od zera (brak błędu systematycznego stałego) oraz współczynnikiem kierunkowym prostej (b_1) nie różniącym się w sposób statystycznie istotny od jedności (brak błędu systematycznego proporcjonalnego) [3]. Hipotezy te zweryfikowano przy zastosowaniu testu t-Studenta z jednostronnym obszarem krytycznym (tab. 1).

Z punktu widzenia poprawności predykcji zasobności metali w oparciu o równania regresji, wyniki ujęte w tabeli 1 wskazują generalnie na przewagę prostszych w praktycznym zastosowaniu modeli liniowych nad modelami nieliniowymi.

W przypadku predykcji zasobności Cu i Mn na podstawie liniowych modeli regresyjnych wiążących je z zasobnościami konkrecji jako hipotezę roboczą można przyjąć brak występowania statystycznie istotnych błędów systematycznych. W przypadku zasobności Ni stwierdzono, występowanie błędu systematycznego proporcjonalnego z ryzykiem błędu takiego twierdzenia mniejszymi od 1% (tab. 1). Nie jest on jednak znaczący z praktycznego punktu widzenia, o czym świadczy wartość średniego relatywnego błędu predykcji mniejsza od 2%.

Wnioski

Wyniki przeprowadzonej analizy wskazują, że proste liniowe modele regresji mogą być efektywnie stosowane do predykcji zasobności miedzi, manganu i niklu w oparciu o znajomość wartości zasobności konkrecji polimetalicznych w punktach klasycznego opróbowania lub punktach pomiarów pośrednich. Podobne konkluzje można wysnuć w odniesieniu do zasobności innych metali w obszarze IOM: molibdenu [4] i kobaltu [5]. Modele regresyjne mogą mieć istotne znaczenie w ograniczeniu kosztów i pracochłonności procesu opróbowania dna oceanicznego, a szczególnie w perspektywie zastosowania w bliskiej przyszłości pośredniej oceny zasobności konkrecji opartej na rejestracji fotograficznej dna pacyficznego. Przy założeniu, braku znaczących błędów systematycznych określania zasobności konkrecji, metoda ta z uwagi na ogromną liczbę danych (fotografii dna) umożliwi doprecyzowanie granic ciał rudnych oraz znaczące obniżenie błędów oszacowań zasobów konkrecji i metali.

Praca zrealizowana została w ramach badań statutowych Katedry Geologii Złożowej i Górniczej AGH

Literatura

- [1] Abramowski T., Kotliński R. A., *Współczesne wyzwania eksploatacji oceanicznych kopalni polimetalicznych*. *Górnictwo i Geoinżynieria*, 2011, R 35, z.4/1: 41–61. ISSN 1732-6702
- [2] Kotliński R., *Activities of the Interoceanmetal Joint Organization (IOM) in relation to deep seabed mineral resources development*. Proc. SEABED: THE NEW FRONTIER, Madrid, Spain, ISA, 29 p., 2010
- [3] Mucha J., Wasilewska M., *Ocena błędów opróbowania złóż – statystyczny niezbędnik geologa górniczego*. *Górnictwo Odkrywkowe*, 2009, R. 50, nr 2-3: 84-90. ISSN 0043-2075
- [4] Mucha J., Wasilewska-Błaszczuk M., Kotliński R.A., Maciąg Ł., *Variability and Accuracy of Polymetallic Nodules Abundance Estimations in the IOM Area – Statistical and Geostatistical Approach*. Proc. of the Tenth ISOPE Ocean Mining and Gas Hydrates Symposium Szczecin, Poland, September 22-26, 27-31, 2013. ISSN 1946-0066
- [5] Mucha J., Wasilewska-Błaszczuk M., Auguścik J., *Variability and indirect method of cobalt abundance estimation in the polymetallic nodules, the INTEROCEANMETAL exploration area, Pacific Ocean*. Proceedings of IAMG 2015 Freiberg, September 5-13, 2015. The 17th Annual Conference of the International Association for Mathematical Geosciences, 1372 pages, Helmut Schaeben, Raimon Tolosana Delgado, K. Gerald van den Boogaart, Regina van den Boogaart (Eds.) (2015), 1085-1092. ISBN 978-3-00-050337-5 (DVD)
- [6] Okazaki M., Tsune A., *Exploration of Polymetallic Nodule Using AUV in the Central Equatorial Pacific*. Proc. 10th Ocean Mining & Gas Hydrates Symp. ISOPE, Szczecin, Poland, 32–38, 2013. ISSN 1946 0066

* * *