

*Jacek Mucha**, *Monika Wasilewska-Błaszczuk**, *Tomasz Sekuła**

WIARYGODNOŚĆ PROGNOZY WIELKOŚCI ZASOBÓW I JAKOŚCI POKŁADÓW WĘGLA KAMIENNEGO W OBSZARZE DĄB (GZW)

1. Wprowadzenie

Jednym z warunków zakwalifikowania złoża lub jego części do określonej kategorii rozpoznania jest zgodnie z Rozporządzeniem Ministra Środowiska [8] odpowiednia dokładność oszacowania zasobów i średnich wartości parametrów złoża. Wyrażona jest ona dopuszczalnymi (maksymalnymi) błędami względnymi oszacowań wynoszącymi dla kategorii C₂, C₁, B i A kolejno 40%, 30%, 20% i 10%. Oceny wielkości rzeczywistych błędów oszacowań parametrów złoża można dokonać metodami geostatystycznymi lub statystycznymi przyjmując poziom ufności 0.95 [3, 5, 7]. Zastosowanie pierwszej, bardziej zaawansowanej i wszechstronnej metody wymaga dość licznej zbioru danych pomiarowych (rzędu 50), co we wstępnych etapach rozpoznania złoża jest praktycznie nieosiągalne. Dysponując nielicznymi danymi można dokonać jedynie bardzo przybliżonej oceny błędów metodami statystycznymi, przyjmując nieweryfikowalną w tych warunkach hipotezę o czysto losowej zmienności wartości parametrów. Z tego względu racjonalne i uzasadnione wydaje się wykorzystanie danych uzyskanych w punktach rozpoznania usytuowanych w najbliższym otoczeniu rozpatrywanego obszaru złoża, o ile takie zostały wykonane. Można oczekiwać, że powiększony zbiór danych podstawowych będzie dostatecznie liczny dla geostatystycznego opisu struktury zmienności parametrów i umożliwi analizę wiarygodności szacowania zasobów i jakości pokładów węgla przy zastosowaniu procedury krigingu.

Dobrym obiektem do przetestowania przydatności geostatystycznej procedury krigingu, jako metody szacowania zasobów i jakości węgla, jest rozpoznawany obecnie obszar złożowy Dąb usytuowany między Libiążem i Jaworzniem. Z uwagi na możliwą w przy-

* Akademia Górniczo-Hutnicza, Kraków

szości eksploatację w o/Dąb do analizy wybrano dwa pokłady krakowskiej serii piaszczysto-węglowej 118 (warstwy libiąskie) i 207 (warstwy łaziskie). Są to pokłady przewodnie dla swoich warstw, a na podstawie przesłanek geologicznych zakłada się pełne wykształcenie tych pokładów w obrębie obszaru prognoz.

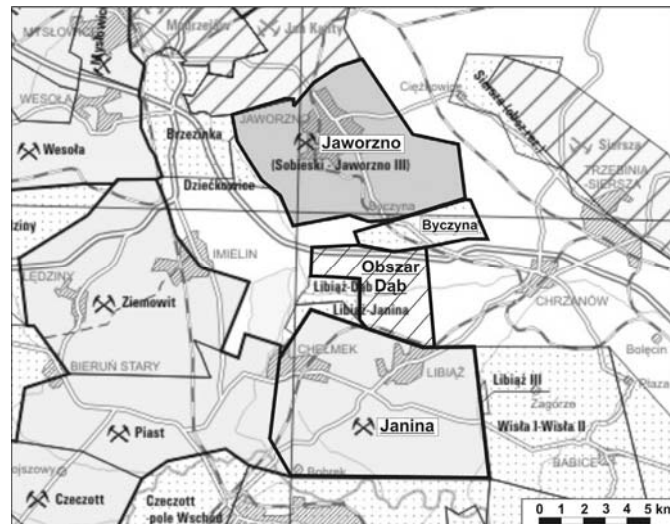
Autorzy postawili sobie za cel badań ocenę:

- 1) dokładności oszacowania zasobów i jakości węgla kamiennego na podstawie kilku (3–5) punktów rozpoznania (otworów) zlokalizowanych wewnątrz dokumentowanego obszaru;
- 2) możliwości znaczącego podwyższenia dokładności oszacowania zasobów węgla przez powiększenie zbioru danych o dane otworowe z najbliższego otoczenia dokumentowanego obszaru;
- 3) możliwości dostatecznie dokładnego oszacowania zasobów węgla wyłącznie w oparciu o dane z otoczenia dokumentowanego obszaru.

Przedmiotem bezpośredniej analizy były następujące parametry złożowe: miąższość pokładów, zawartość popiołu, wartość opałowa, zawartość siarki oraz gęstość przestrzenna.

2. Lokalizacja obszaru badań

Obszar Dąb o powierzchni około 17 km² usytuowany jest we wschodniej części Górnośląskiego Zagłębia Węglowego, między Jaworzniem i Libiążem (rys. 1). W badaniach wykorzystano dane z obszarów złożowych przylegających bezpośrednio do obszaru Dąb:



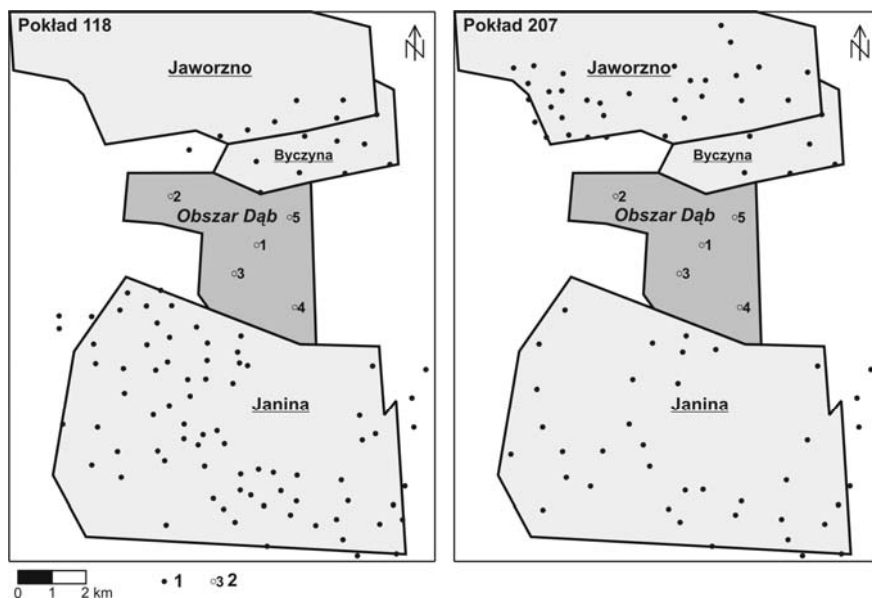
Rys. 1. Lokalizacja obszaru badań Dąb na tle kopalń wschodniej części GZW (PIG 2009)

od północy Jaworzno i Byczyna (eksploatowanych przez Zakład Górniczy Sobieski) i południa Janina (eksploatowanych przez Zakład Górniczy Janina). Oba zakłady górnicze należą do Południowego Koncernu Węglowego S.A.

3. Materiał podstawowy badań

Lokalizację punktów pomiarów miąższości pokładów 118 i 207 w otoczeniu obszaru Dąb przedstawiono na rysunku 2. Ich rozmieszczenie jest nieregularne, ale zapewnia w miarę jednolite pokrycie obszarów badań. Liczebności pomiarów miąższości dla obu pokładów (90 i 76) są wystarczające dla zastosowania podstawowej analizy geostatystycznej. Nieco mniej liczne są oznaczenia pozostałych parametrów, ale nadal wystarczające dla opisu struktury ich zmienności warunkującego zastosowanie procedury geostatystycznej (tab. 1).

W przeprowadzonej analizie nie uwzględniono wyników opróbowań pokładów w wyobiskach górniczych. Specyficzne, gniazdowe w skali rozpatrywanych obszarów złożowych, rozmieszczenie punktów opróbowań tego rodzaju skutkuje niespójnością danych wiertniczych i górniczych wyrażającą się silnym zróżnicowaniem rozkładów prawdopodobieństwa i oszacowań średnich miąższości pokładów [6].



Rys. 2. Lokalizacja punktów pomiarów miąższości w otworach wiertniczych (1) oraz zasymulowanych punktów pomiarów w rozpatrywanym obszarze Dąb (2)

TABELA 1

Statystyka parametrów pokładu 118 i 207 w otoczeniu obszaru Dąb

Parametry pokładu	Pokład	Liczba danych	Średnia arytmetyczna	Współczynnik zmienności
Miąższość M [m]	118	90	3.15	28
	207	76	3.30	37
Zawartość popiołu A ^f [%]	118	88	13.4	50
	207	72	13.4	39
Wartość opałowa Q _i ^f [MJ/kg]	118	88	22.2	11
	207	67	22.8	7
Zawartość siarki S _t ^f [%]	118	85	2.0	62
	207	72	1.30	61
Gęstość pozorna γ ₀ [Mg/m ³]	118	83	1.38	7
	207	65	1.35	6

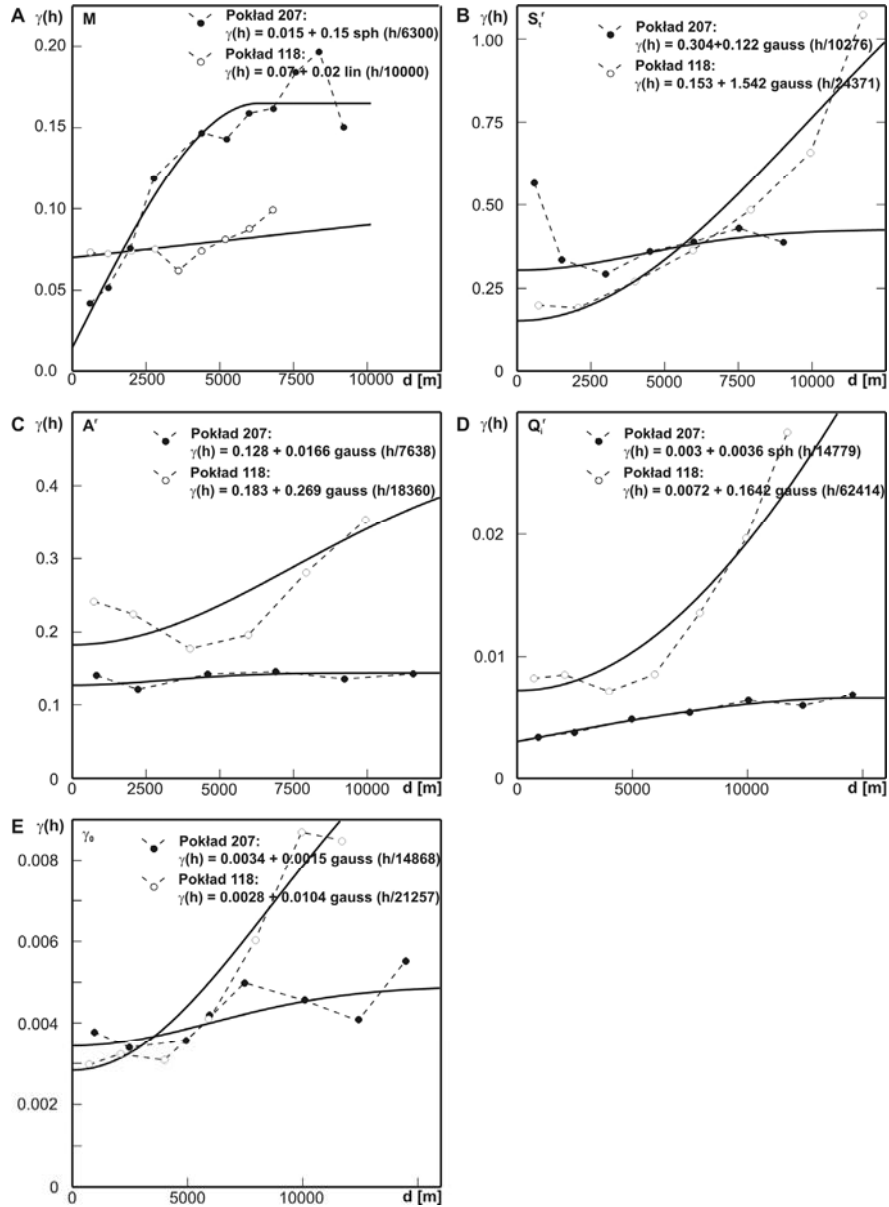
Największą zmiennością charakteryzują się zawartości siarki i popiołu (ze współczynnikiem zmienności $v = 40\text{--}60\%$), umiarkowaną miąższość pokładów ($v = 30\text{--}40\%$) i małą wartość opałowa i gęstość pozorna węgla ($v < 10\%$). Ważne znaczenie ma potwierdzenie poglądu o znikomo małej zmienności gęstości pozornej węgla, co pozwala przyjąć w praktyce, że błąd względny prognozy wielkości zasobów węgla jest równy błędowi względnemu oszacowania średniej miąższości pokładu.

4. Struktura zmienności parametrów złożowych

W geostatystyce opis struktury zmienności parametrów złożowych za pomocą semiwariogramów jest pierwszym i nieodzownym krokiem oceny wielkości błędów ich oszacowań w obszarze dokumentowania przy zastosowaniu procedury krigingu. Semiwariogramy wyrażają liczbowo siłę zróżnicowania wartości parametrów w zależności od odległości punktów pomiarowych. Geostatystyczne modele zmienności parametrów złożowych uzyskuje się przez przybliżenie semiwariogramów za pomocą funkcji analitycznych ciągłych.

Dla danych otworowych z otoczenia obszaru Dąb obliczono przy zastosowaniu programu ISATIS tzw. izotropowe semiwariogramy relatywne, opisujące zróżnicowanie parametrów w stosunku do średnich wartości tych parametrów i uśrednione dla wszystkich możliwych kierunków badania (rys. 3). Dostępne zbiory danych są jednak liczebnością zbyt skromne dla wiarygodnego opisu i modelowania anizotropii zmienności parametrów złożowych. Uwzględnienie tej cechy zmienności w procedurze krigingu zwiększa zaufanie do oszacowanych średnich wartości parametrów.

Zastosowanie semiwariogramów relatywnych jest wygodne gdyż ich wykorzystanie w procedurze krigingu prowadzi bezpośrednio do wyznaczenia błędów względnych dla



Rys. 3. Izotropowe semiwariogramy relatywne (punkty) i przybliżające je modele geostatystyczne zmienności badanych parametrów złożowych (linie ciągłe): $\gamma(h)$ – średnie zróżnicowanie wartości parametrów, d – średnia odległość między punktami rozpoznania pokładów (otworami), A – miąższość pokładów (M), B – zawartość siarki (S_i¹), C – zawartość popiołu (A¹), D – wartość opałowa (Q_i¹), E – gęstość pozorna węgla (γ_0)

dowolnej konfiguracji punktów rozpoznania bez konieczności znajomości wartości szacowanego parametru. Semiwariogramy badanych parametrów i ich modele dla obu rozpatrywanych pokładów 118 i 207 (rys. 3) charakteryzują się dość znacznym zróżnicowaniem świadczącym o odmienności stylu i siły ich zmienności. Zróżnicowana jest także jakość aproksymacji semiwariogramów za pomocą modeli teoretycznych. Słabe dopasowanie modeli odnotowuje się w przypadku semiwariogramów zawartości siarki w pokładzie 118 i popiołu w pokładzie 207, co może wynikać z niejednorodności rozmieszczenia tych substancji spowodowanej złożonymi procesami formującymi pokłady węgla. Nie można również wykluczyć istotnego wpływu błędów opróbowań i analiz chemicznych na obserwowaną zmienność tych parametrów. Te i inne czynniki wpływające na postać semiwariogramów i przybliżających je modeli szerzej scharakteryzował Kokesz [2].

Porównanie semiwariogramów parametrów dla obu pokładów ujawnia prawidłowości, które generalizując można podsumować następująco:

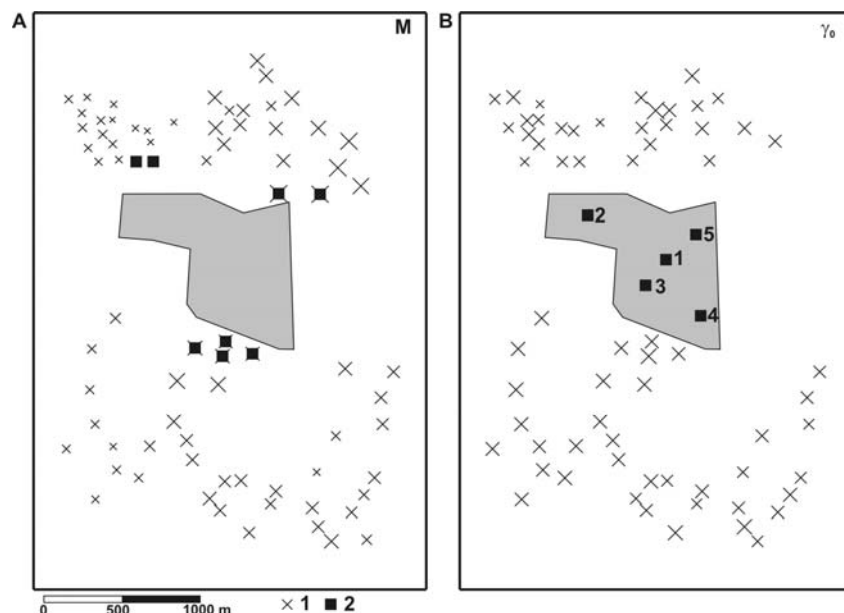
- pokład 207 cechuje silne zróżnicowanie miąższości i dominacja nielosowego składnika zmienności miąższości (wyrażona konsekwentnym i silnym wzrostem wartości modelu semiwariogramu w zakresie odległości do około 6 km), natomiast pokład 118 charakteryzuje znacznie mniejsze zróżnicowanie zmienności miąższości w której dominuje składnik losowy (wyrażony nieznaczącym wzrostem wartości modelu semiwariogramu),
- w przypadku wszystkich pozostałych parametrów w pokładzie 118 ich zróżnicowanie jest znacznie silniejsze a składnik nielosowy zmienności silniej zaakcentowany niż w pokładzie 207.

Wymienione cechy struktury zmienności znajdują swoje odzwierciedlenie w ocenach wielkości błędów oszacowań średnich wartości parametrów.

5. Metodyka badań

Dokładność prognozy zasobów węgla oraz średnich wartości badanych parametrów złożowych w obszarze Dąb oceniono przy wykorzystaniu geostatystycznej procedury krigingu zwyczajnego [1, 4]. Polegała ona na wyznaczeniu wartości standardowych błędów względnych oszacowań parametrów dla trzech różnych lokalizacji zbiorów danych podstawowych (rys. 4):

- z sąsiedztwa obszaru Dąb (w czterech wariantach: 4, 8, 12 i 16 najbliższych pomiarów);
- zasymulowanych punktów rozpoznania w obrębie obszaru Dąb (od 1 do 5);
- połączonych pomiarów z sąsiedztwa obszaru Dąb i zasymulowanych pomiarów we wnętrzu obszaru Dąb.



Rys. 4. Przykład doboru danych do oszacowań średniej miąższości (A) i gęstości pozornej węgla (B) w pokładzie 207: A – 8 najbliższych pomiarów miąższości z otoczenia obszaru Dąb, B – 5 zasymulowanych punktów pomiarowych w obszarze Dąb.
Objaśnienia: 1 – otwory wiertnicze, 2 – punkty rozpoznania uwzględniane w szacowaniu parametrów

Jako podstawową miarę dokładności oszacowania średnich wartości parametrów w obszarze Dąb przyjęto wielkość standardowego, względnego błędu krigingu, którego wielkość obliczano z formuły (1) [1, 4]:

$$\sigma_{KR} = \sqrt{2 \cdot \sum_{i=1}^N w_{iK} \cdot \bar{\gamma}_R(S_i, A) + \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N w_{iK} w_{jK} \cdot \gamma_R(S_i, S_j) - \bar{\gamma}_R(A, A)} \quad (1)$$

gdzie:

- N – liczba punktów rozpoznania uwzględnionych w procedurze krigingu,
- w_{iK} – współczynnik wagowy przypisany w procedurze krigingu i-tej obserwacji,
- $\bar{\gamma}_R(S_i, A)$ – wartość średnia semiwariogramu dla odległości między obserwacją (S_i) i obszarem szacowania (A),
- $\gamma_R(S_i, S_j)$ – wartość semiwariogramu dla odległości między obserwacjami (S_i) i (S_j),
- $\bar{\gamma}_R(A, A)$ – wartość semiwariogramu dla wszystkich par punktów w obrębie obszaru szacowania.

Wielkość błędu krigingu uzależniona jest od struktury zmienności rozpatrywanego parametru (geostatystycznego modelu zmienności), wzajemnego usytuowania miejsc pomiaru jego wartości i ich lokalizacji względem obszaru szacowania, jak również od wielkości i kształtu tego obszaru.

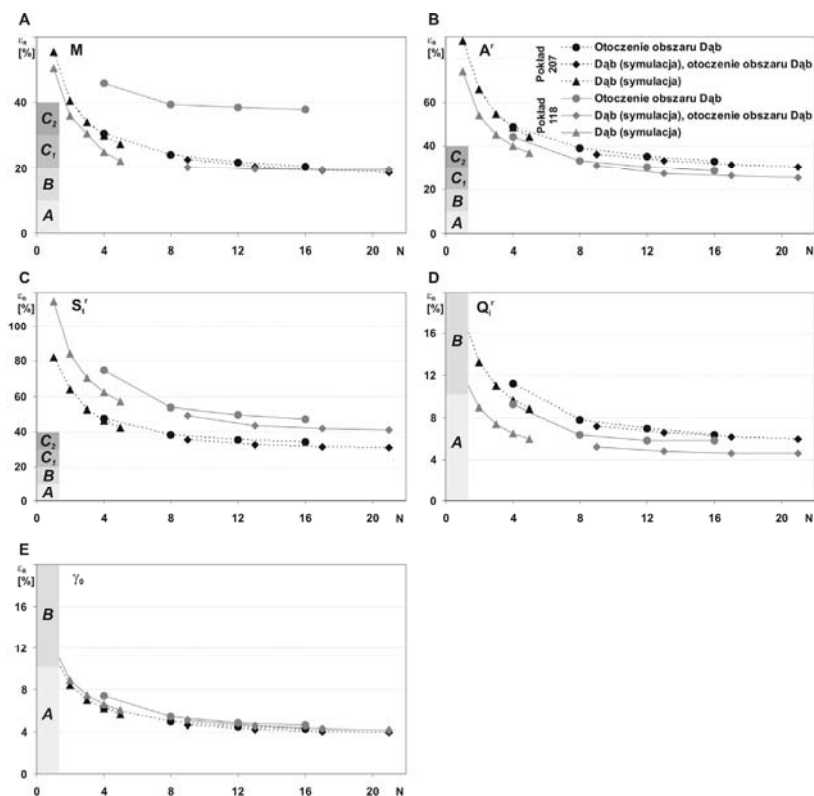
Zakładając normalny rozkład błędów, można oczekiwać, że podwojone wartości błędów standardowych krigingu ($2\sigma_{KR}$) będą w przybliżeniu odpowiadać błędom oszacowań na poziomie ufności (prawdopodobieństwa) równym 0.95 ($\epsilon_R = 2\sigma_{KR}$). Tak wyznaczone błędy oszacowań, stanowią podstawę oceny stopnia dokładności prognozy średnich wartości parametrów złożowych przez porównanie ich z wielkościami dopuszczalnymi błędów w poszczególnych kategoriach rozpoznania złoża [8].

5. Wyniki badań

Oceny wielkości błędów prognozy średnich wartości analizowanych parametrów złożowych dla obu pokładów w obrębie obszaru Dąb zestawiono w formie wykresów na rysunku 5. Ich analiza pozwala wyróżnić 3 grupy parametrów złożowych z punktu widzenia dokładności ich szacowania:

- wartość opałowa i gęstość pozorna węgla szacowane są z największą dokładnością bez względu na lokalizację danych (w obrębie lub w sąsiedztwie obszaru Dąb); przewidywany, teoretyczny błąd oszacowania jest mniejszy od 20%;
- miąższość pokładów szacowana jest z umiarkowanym błędem, mniejszym od 40% już dla 3 punktów rozpoznania z obszaru Dąb lub 8 z otoczenia obszaru Dąb;
- zawartości popiołu i siarki szacowane są z najmniejszą dokładnością; uzyskanie błędów szacowania mniejszych od 40% wymaga co najmniej 8 punktów rozpoznania.

W odniesieniu do obszaru Dąb oznacza to, że dokładność szacowania miąższości i w praktyce zasobów geologicznych węgla w pokładach 118 i 207 wymagana w kategorii C_2 może być osiągnięta nawet bez konieczności rozpoznania rozpatrywanego obszaru a jedynie w oparciu o 8 lub więcej najbliższych punktów rozpoznania z otoczenia tego obszaru. W przypadku miąższości pokładów najwyraźniej ujawnia się wpływ struktury zmienności parametru na dokładność jego szacowania. Dominacja nielosowego składnika zmienności miąższości pokładu 207 sprawia, że o dokładności oszacowania średniej miąższości decydują przede wszystkim punkty rozpoznania zlokalizowane w obrębie obszaru Dąb. Poszerzenie zbioru danych z otoczenia obszaru nie przynosi zauważalnej poprawy oszacowania. Odwrotną prawidłowość obserwuje się w przypadku miąższości pokładu 118, w zmienności którego dominuje składnik losowy. Uwzględnianie w szacowaniu średniej wartości tego parametru jego pomiarów z otoczenia obszaru zauważalnie obniża błąd oszacowania.



Rys. 5. Wykres wielkości względnych błędów oszacowania (ϵ_R): miąższości M (A), zawartości popiołu A^r (B), zawartości siarki S_1^r (C), wartości opałowej Q_1^r (D) i gęstości pozornej węgla γ_0 (E) w zależności od liczby pomiarów N i ich lokalizacji w pokładach 118 i 207 obszaru Dąb

Przy tej samej liczbie 8 punktów rozpoznania oszacowanie średniej wartości opałowej i gęstości przestrzennej węgla spełnia z formalnego punktu widzenia wymagania dokładności co najmniej dla kategorii B. Najmniejszą wiarygodnością charakteryzują się oszacowania zawartości popiołu z dokładnością odpowiadającą wymaganiom co najwyżej kategorii C_2 i zawartości siarki z dokładnością odpowiadającą wymaganiom kategorii D lub co najwyżej C_2 .

6. Podsumowanie i wnioski

1. Rozpoznanie pokładów 118 i 207 w obszarze Dąb kilkoma (3–5) otworami jest teoretycznie wystarczające dla oszacowania zasobów węgla z dokładnością wymaganą

w kategorii C₂. Efektywność zwiększenia dokładności oszacowania poprzez włączenie punktów rozpoznania z najbliższego sąsiedztwa obszaru uzależniona jest od struktury zmienności miąższości. Jest ona znacząca przy dominacji składnika losowego w obserwowanej zmienności miąższości i praktycznie niezauważalna przy dominacji składnika nielosowego.

2. Oszacowanie zasobów węgla z dokładnością wymaganą w kategorii C₂ możliwe jest także do osiągnięcia w oparciu o dane pochodzące wyłącznie z otoczenia dokumentowanego obszaru: z co najmniej 4 punktów rozpoznania w przypadku pokładu 118 i z co najmniej 8 w przypadku pokładu 207.
3. Wymienione w punktach 1 i 2 minimalne liczebności punktów rozpoznania mogą służyć jako wskazówki przy wstępnej kategoryzacji rozpoznania zasobów węgla w innych pokładach GZW pod warunkiem umiarkowanej zmienności ich miąższości (ze współczynnikiem zmienności < 40%). Pokłady o takiej zmienności miąższości przeważają w GZW.
4. Oszacowania średniej wartości opalowej i gęstości pozornej węgla w pokładach 118 i 207 charakteryzują się wysoką dokładnością, z błędem standardowym nieprzekraczającym 5% już przy 4–5 punktach pomiarowych bez względu na lokalizację punktów rozpoznania, wewnątrz dokumentowanego obszaru albo w jego najbliższym otoczeniu. Najmniej wiarygodne są oszacowania średnich zawartości popiołu i zawartości siarki.
5. Zwiększenie wiarygodności oszacowań wartości parametrów wymaga bardziej szczegółowych analiz geostatystycznych obejmujących przede wszystkim modelowanie anizotropii zmienności wartości parametrów oraz badanie trendu ich zmian. W tym pierwszym przypadku konieczne jest jednak dysponowanie dużym zbiorem danych rzędu 100–150 pomiarów rozmieszczonych równomiernie w złożu.

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

LITERATURA

- [1] *Journel A.G., Huijbregts Ch.J.*: Mining Geostatistics. Academic Press, London – New York – San Francisco 1978.
- [2] *Kokosz Z.*: Geostatystyczna charakterystyka zmienności miąższości pokładów węgla w GZW na potrzeby szacowania zasobów. *Przegląd Górniczy*, t. 63, nr 4, s. 27–36, 2007.
- [3] *Krajewski R.*: Określenie zmienności złoża i stopnia rozpoznania zasobów metodą rachunku statystycznego. *IG, Prace*, t. 30, s. 447–468, 1962.
- [4] *Mucha J.*: Metody geostatystyczne w dokumentowaniu złóż. Skrypt Ucz., AGH, Kraków 1994.
- [5] *Mucha J., Nieć M., Wasilewska M., Sobczyk E.J., Saługa P.*: Dokładność szacowania zasobów węgla kamiennego jako element oceny ryzyka inwestycyjnego. Wyd. AWK GEO, Kraków 2007.
- [6] *Mucha J., Wasilewska-Błaszczak M., Sekuła T.*: Dokładność geostatystycznej prognozy wielkości zasobów węgla we wstępnych etapach rozpoznania złoża. *Mat. XXXIII Symp. Nauk. na temat: „Geologia formacji węglonośnych Polski”*, s. 59–64, Kraków 2010.

- [7] *Nieć M.* (red.): Zasady dokumentowania złóż kopalin stałych. Ministerstwo Środowiska, Komisja Zasobów Kopalin, Warszawa 2002.
- [8] Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 6 lipca 2005 r. w sprawie szczegółowych wymagań, jakim powinny odpowiadać dokumentacje geologiczne złóż kopalin. Dz. U. Nr 136, poz. 1151.