



MONIKA WASILEWSKA-BŁASZCZYK*, WOJCIECH NAWORYTA**

Geostatystyczna analiza parametrów złoża węgla brunatnego w funkcji postępów projektowanej eksploatacji

Wprowadzenie

Uwarunkowania ekologiczne i ekonomiczne w sektorze energetycznym powodują konieczność ustawicznego podnoszenia sprawności procesu wytwarzania energii. Jednym ze sposobów osiągnięcia tego celu w elektrowniach opartych na paliwach kopalnych jest dostarczanie surowca o określonych i relatywnie stabilnych parametrach jakościowych.

W przypadku złóż węgla brunatnego zmienność przestrzenna miąższości pokładów węgla i charakteryzujących je głównych parametrów jakościowych jest duża. Pod względem zmienności, złoża węgla brunatnego zalicza się zwykle do II grupy. Współczynnik zmienności V [%], zdefiniowany jako stosunek odchylenia standardowego do wartości średniej, podstawowych parametrów mieści się zwykle w przedziale od 30 do 60%. Jest to zmienność przeciętna lub duża według klasyfikacji zmienności złóż Baryszewa (Nieć i in. 2012). Wyjątkiem jest wartość opałowa, która w stosunku do innych parametrów wykazuje małą względną zmienność w zakresie od 9 do 16% (tab. 1).

* Dr inż., AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska, Kraków;
e-mail: monika.wasilewska@agh.edu.pl

** Dr inż., AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Górnictwa i Geoinżynierii, Kraków;
e-mail: naworyta@agh.edu.pl

Tabela 1, Współczynniki zmienności V [%] wybranych parametrów złóż węgla brunatnegoTable 1, The variation coefficients V [%] of selected parameters of lignite deposits

	Pątnów IV	Drzewce	Tomisławice	Głowaczów	Jastrzębia	Gubin
S_i^r [%]	23,8	35,0	60,8	25,0	31,2	40,7
M [m]	43,4	31,9	51,3	53,2	47,1	26,6
Q_i^r [MJ/kg]	16,1	15,0	10,5	15,5	9,4	8,9
A^r [%]	44,9	35,5	66,5	29,7	21,0	36,5

S_i^r – zawartość siarki całkowitej, M – miąższość pokładu, Q_i^r – wartość opałowa węgla, A^r – zawartość popiołu

Dla utrzymania stabilnych parametrów surowca podejmuje się działania określone mianem zarządzania jakością strumienia urobku. Proces ten zaczyna się wraz z dokumentowaniem złoża i realizuje do czasu zakończenia eksploatacji.

Sterowanie jakością można podzielić na kilka etapów:

1. Rozpoznanie i modelowanie złoża:
 - ◆ inspekcja wiarygodności wyników opróbowań,
 - ◆ analiza jakości,
 - ◆ modelowanie zmienności parametrów jakościowych złoża.
2. Projektowanie eksploatacji (planowanie długoterminowe):
 - ◆ określenie miejsca udostępnienia złoża,
 - ◆ określenie kierunków i postępów eksploatacji.
3. Planowanie średnioterminowe.
4. Eksploatacja i kontrola (planowanie operacyjne):
 - ◆ planowanie zadań maszyn podstawowych,
 - ◆ analiza jakości strugi urobku, transport,
 - ◆ składowanie i homogenizacja.

Przedmiotem badań jest analiza jakości kopaliny w niezagospodarowanym dotąd złożu węgla brunatnego Gubin. Badania dotyczą długoterminowego planowania eksploatacji, opartego na informacjach zawartych w dokumentacji geologicznej złoża. Przedstawione w pracy analizy mają istotne znaczenie dla określenia parametrów technologicznych elektrowni, w której będzie produkowana energia na bazie węgla z przedmiotowego złoża. Jej parametry technologiczne muszą odpowiadać właściwościom paliwa, czyli surowca w złożu. Parametry procesu spalania w elektrowni powinny być dostosowane nie tylko do parametrów średnich charakterystycznych dla całego złoża, ale również do parametrów, jakie będą występowały w funkcji czasu, w trakcie prowadzenia wydobywania. Rzetelna informacja o średnich parametrach złoża powinna zawierać również informację o stopniu dokładności ich prognozy. Od dokładności oszacowań parametrów złożowych, głównie parametrów jakościowych (w kolejności zawartości popiołu, wartości opałowej, zawartości siarki), w mniejszym stopniu od miąższości, zależy ryzyko inwestycji w górnictwie węgla (Mucha i in. 2008).

Ze względu na wstępny etap planowania zagospodarowania złoża oraz długoterminowy charakter planowania jakości surowca dostarczanego do elektrowni, przedstawione szacunki są wstępne i mało dokładne. Po udostępnieniu złoża zostaną wdrożone kolejne etapy planowania – średnio- i krótkoterminowe (operacyjne), których wyniki w miarę pozyskiwania dodatkowych informacji o złożu będą się cechowały odpowiednio wyższą dokładnością.

Artykuł jest kontynuacją problematyki poruszanej we wcześniejszych publikacjach, w których odniesiono się do problemu zmienności parametrów jakościowych złóż węgla brunatnego (Jurek i in. 2013; Kaczmarczyk i in. 2012), sposobów dokumentowania oraz sterowania jakością urabianej kopaliny na etapie planowania długo- i średnioterminowego, a także planowania operacyjnego (Naworyta i Benndorf 2012; Naworyta i Sypniewski 2013; Naworyta i in. 2013).

1. Cel pracy

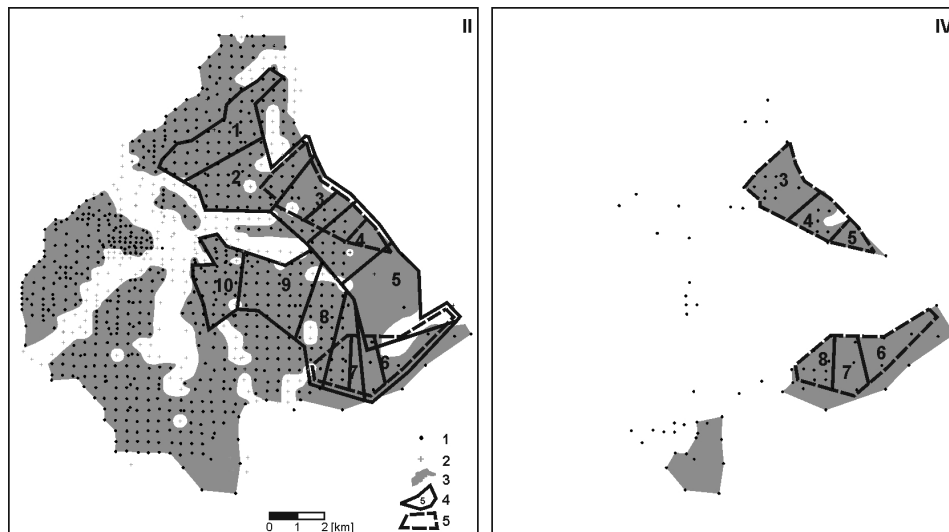
Celem pracy była analiza zmienności parametrów złoża węgla brunatnego w funkcji postępów projektowanej eksploatacji. Do analiz wybrano dwa parametry – miąższość pokładów (M) oraz wartość opałową węgla (Q_i').

Stała miąższość eksploatowanych pokładów ma wpływ na płynność podaży surowca do elektrowni, natomiast od wartości opałowej zależy przede wszystkim wydajność produkcji energii. Parametry te są jednakowo ważne dla projektowania stabilnego procesu wytwarzania energii, gdyż o ilości energii zmagazynowanej w złożu decyduje zarówno ilość węgla, jak i jego wartość opałowa. W sytuacji gdy węgiel w pewnej partii złoża charakteryzuje się niższą niż średnia wartością opałową, dla uzyskania potrzebnej ilości energii konieczne jest wydobycie większej jego ilości. Jeżeli – dodatkowo – w danym miejscu pokład węgla ma małą miąższość, to zadanie utrzymania zakładanego poziomu produkcji energii wiąże się z koniecznością zdejmowania większej ilości nadkładu, co implikuje większe postępy frontów nadkładowych i węglowych.

Ocenę średnich parametrów złoża Gubin na etapie planowania długoterminowego wykonano dla części odpowiadających pięcioletnim okresom eksploatacji. Granice postępów frontów eksploatacyjnych wyznaczono zakładając poziom wydobycia rzędu 85 mln Mg w okresie 5 lat (rys. 1).

W procesie projektowania zagospodarowania złoża wytypowano dwa udokumentowane pokłady – pokład II, który występuje na większości obszaru projektowanej eksploatacji (z wyjątkiem obszarów rynien erozyjnych) oraz głębiej położony pokład IV, którego eksploatację zaprojektowano w dwóch odrębnych obszarach jego występowania (rys. 1).

Istotnym celem niniejszej pracy jest analiza wpływu synchronicznej eksploatacji wymienionych dwóch pokładów węgla na jakość surowca podawanego do elektrowni.



Rys. 1. Lokalizacja otworów rozpoznawczych na tle granic pokładów II i IV w złożu węgla brunatnego Gubin oraz granic obszaru planowanej eksploatacji. Liczby na mapie wskazują kolejność eksploatacji złoża w granicach pięcioletnich postępów eksploatacji w pokładzie II (po lewej) i pokładzie IV (po prawej)
 1 – otwory wiertnicze pozytywne, 2 – otwory wiertnicze negatywne (w obszarze rynien erozyjnych),
 3 – obszar występowania pokładu, 4 – granice 5-letnich obszarów eksploatacji w pokładzie II,
 5 – granice 5-letnich obszarów eksploatacji w pokładzie IV

Fig. 1. Location of the boreholes on the background of the Gubin lignite deposit and the borders of planned operation. The numbers on the map indicate the order of a deposit exploitation within five-year operational progress in the seam II (left) and the seam IV (right)
 1 – positive boreholes, 2 – negative boreholes (in the erode gullies), 3 – the lignite seam,
 4 – boundaries of the 5-year operating areas in the seam II,
 5 – the boundaries of the 5-year operating areas in the seam IV

2. Dane źródłowe

Analizy miąższości pokładu i wartości opałowej węgla wykonano na podstawie złoża węgla brunatnego Gubin, którego zasoby bilansowe oszacowano na poziomie około 1,6 mld Mg. Złoże zostało udokumentowane w latach sześćdziesiątych XX wieku i od ponad 50 lat jest przedmiotem prac studialnych i koncepcyjnych dotyczących jego zagospodarowania. Zgodnie z publikowanymi planami spółki Polska Grupa Energetyczna SA, od roku 2030 projektowana kopalnia ma stanowić źródło surowca do produkcji energii elektrycznej w specjalnie dla tego celu wybudowanej elektrowni o mocy 2700 MW.

Materiał źródłowy do badań stanowiły informacje z 380 otworów wiertniczych zlokalizowanych w granicach projektowanej eksploatacji oraz w najbliższym otoczeniu, zawarte w Dodatku nr 1 do dokumentacji geologicznej złoża „Gubin” (Bogacz i in. 2009). Należy zaznaczyć, że dokument ten wykonano w oparciu o wyniki prac geologicznych wykonywanych na przestrzeni prawie półwiecza (w latach: 1961, 1969, 1992, 2008). Skutkiem

tę, obserwowane różnice parametrów w poszczególnych otworach wiertniczych mogą mieć swoje źródło nie tylko w naturalnej zmienności parametrów złożowych, ale również w ograniczonej wiarygodności materiałów podstawowych, na które składają się m.in. błędy opróbowania związane – przykładowo – z ograniczeniami techniki wiercenń sprzed lat siedemdziesiątych (Mucha i Wasilewska-Błaszczyk 2013). W przypadku niektórych parametrów węgla, np. wartości opałowej lub zawartości popiołu, różnice wynikające ze stosowanych metod opróbowania mogą przekraczać nawet 10% (Mazurek 2003), co należy uwzględnić przy ocenie zmienności parametrów złożowych.

W artykule wykorzystano opublikowane informacje odnoszące się do zagospodarowania złoża, w szczególności lokalizacji projektowanego wkopu udostępniającego oraz kierunku postępu frontów eksploatacyjnych (Naworyta i Sypniowski 2012).

Lokalizację otworów wiertniczych na tle granic pokładu II i IV oraz projektowanych granic zasięgu eksploatacji złoża przedstawiono na rysunku 1.

3. Metodyka

Szacowanie średnich wartości parametrów i prognozę błędów tych oszacowań wykonano z wykorzystaniem metod geostatystycznych. Ich podstawą jest informacja o strukturze zmienności parametru zapisana w postaci semiwariogramu uśrednionego, czyli funkcji ujmującej zależność pomiędzy średnim kwadratem różnic wartości badanych parametrów i średnią odległością między punktami ich pomiaru. Na podstawie informacji z otworów rozpoznawczych wykonano semiwariogramy empiryczne, które aproksymowano funkcjami matematycznymi pełniącymi rolę modeli geostatystycznych.

Dla obliczenia wartości średniej parametrów w zdefiniowanych blokach eksploatacyjnych zastosowano geostatystyczną metodę krigingu poligonowego, opartą na założeniach krigingu zwyczajnego w odmianie blokowej. Pozwala ona oszacować średnią wartość parametru w granicach poligonu o dowolnych kształtach (wieloboku) na podstawie geostatystycznego modelu semiwariogramu oraz wartości parametru w punktach opróbowania znajdujących się w jego wnętrzu lub w granicach obszaru wyszukiwania danych, przylegającego do poligonu.

Szacowana średnia wartość parametru metodą krigingu poligonowego – zgodnie ze wzorem (1) – jest sumą iloczynów wartości parametru określonych w punktach opróbowania oraz współczynników wagowych krigingu:

$$z^* = \sum_{i=1}^N W_{Ki} \cdot z_i \quad (1)$$

- z_i – wartość parametru w i -tym punkcie opróbowania,
- w_{Ki} – współczynnik wagowy przypisany w procedurze krigingu i -tej obserwacji (próbce),
- N – liczba obserwacji uwzględnionych w procedurze krigingu.

Wielkości wag krigingu zależą w szczególności od wielkości i kształtu obszaru, dla którego dokonuje się oszacowania średniej wartości parametru, od rozmieszczenia punktów rozpoznawczych oraz od struktury zmienności parametru opisanej za pomocą dopasowanego do semiwariogramu modelu teoretycznego (Nieć i in. 2012). O skuteczności zastosowania metod geostatystycznych sygnalizuje wstępnie wyrażony w procentach maksymalny udział składnika nielosowego w zmienności parametru, rozumiany jako stosunek wariancji zmienności przestrzennej C i amplitudy semiwariogramu ($C + C_0$). Ten parametr w połączeniu z zasięgiem autokorelacji odniesionym do średniego rozstawu punktów opróbowań pozwala wstępnie ocenić efektywność geostatystycznego szacowania parametrów złożowych (Mucha i Wasilewska-Błaszczyk 2011).

Jako miarę prognozowanej dokładności interpolacji przyjęto wielkość standardowego błędu interpolacji zwanego błędem krigingu σ_K , który wyznacza się ze wzoru (2):

$$\sigma_K = \sqrt{2 \cdot \sum_{i=1}^N W_{Ki} \cdot \bar{\gamma}(S_i, A) + \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N w_i \cdot w_j \cdot \gamma(S_i, S_j) - \bar{\gamma}(A, A)} \quad (2)$$

- ↳ $\bar{\gamma}(S_i, A)$ – wartość średnia semiwariogramu dla odległości między próbką (S_i) i blokiem obliczeniowym (A),
 $\gamma(S_i, S_j)$ – wartość semiwariogramu dla odległości między próbką (S_i) i (S_j),
 $\bar{\gamma}(A, A)$ – wartość średnia semiwariogramu w obrębie bloku A .

Z wystarczającą w praktyce dokładnością, dla prawdopodobieństwa $P = 95\%$ można wyznaczyć przedział ufności dla nieznaney rzeczywistej średniej wartości parametru jako podwojone wartości błędu standardowego krigingu $[-2\sigma_K, +2\sigma_K]$.

Względną wartość błędu krigingu σ_{KR} wyznaczono ze wzoru:

$$\sigma_{KR} = \frac{\sigma_K}{z^*} \cdot 100\% \quad [\%] \quad (3)$$

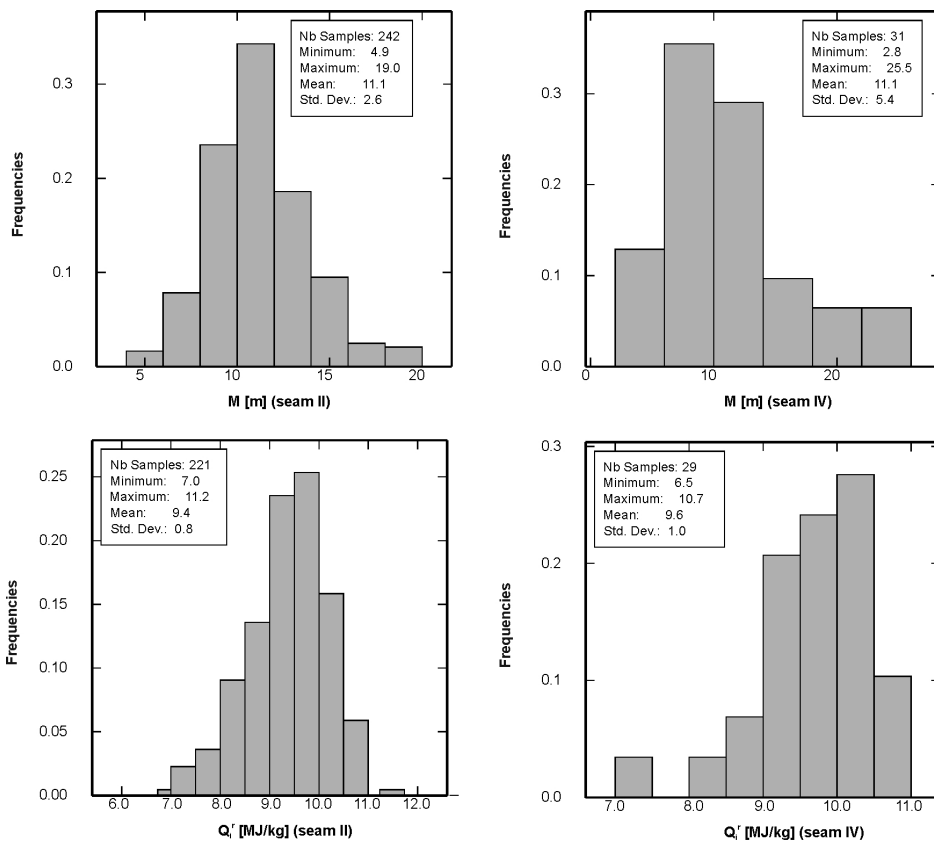
Obliczenia statystyczne oraz geostatystyczne wykonano z wykorzystaniem programu Isatis firmy Geovariances.

4. Dyskusja wyników

Geostatystyczne badanie struktury zmienności miąższości pokładów oraz wartości opałowej poprzedzono analizą statystyczną, której wyniki przedstawiono w postaci histogramów (rys. 2) oraz podstawowych parametrów statystycznych (tab. 2).

Semiwariogramy wraz z dopasowanymi modelami teoretycznymi przedstawiono na rysunku 3, natomiast parametry modeli geostatystycznych zestawiono w tabeli 3.

Wykorzystując modele geostatystyczne wykonano obliczenia wartości średniej parametrów M i Q_i^r metodą krigingu poligonowego w blokach eksploatacyjnych, których granice



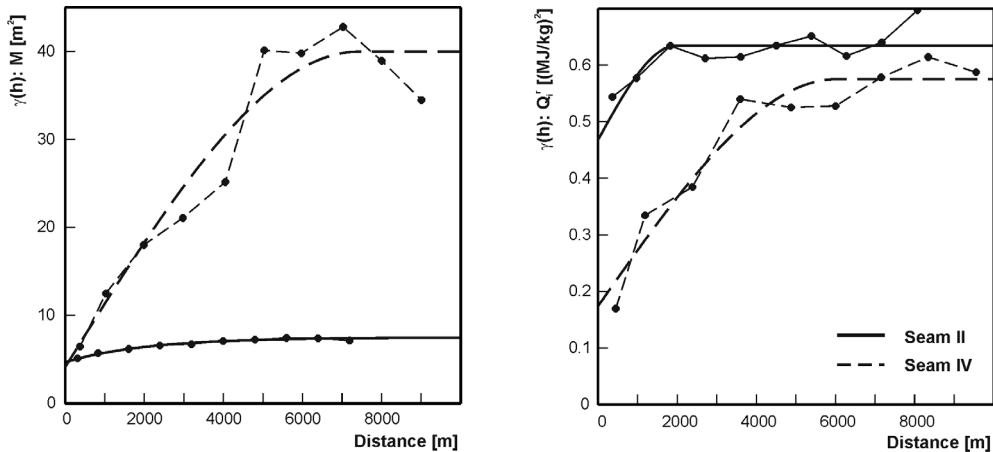
rys. 2. Histogramy miąższości (M) oraz wartości opałowej węgla (Q_i') w pokładach II i IV

Fig. 2. Histograms of the seams' thickness (M) and the calorific value of lignite (CI') in the seams II and IV

Tabela. 2. Statystyki dla miąższości pokładów (M) i wartości opałowej węgla (Q_i')

Table. 2. Statistics for thickness of seams (M) and lignite calorific value (CI')

Pokład	Parametr	Liczba danych	Minimum	Maksimum	Średnia arytmetycz.	Odch. stand.	Wariancja	Współcz. zmienności
II	M [m]	242	4,9	19,0	11,1	2,6	6,8	23,4
	Q_i' [MJ/kg]	221	7,0	11,2	9,4	0,8	649,6	8,6
IV	M [m]	31	2,8	25,5	11,1	5,4	29,2	48,6
	Q_i' [MJ/kg]	29	6,5	10,7	9,6	1,0	915,8	10,0



Rys. 3. Semiwariogramy uśrednione i modele teoretyczne miąższości pokładów II i IV (M) oraz wartości opalowej węgla (Q_i')

Fig. 3. Variograms and geostatistical models of seams' thickness (M) and lignite calorific value (CV)

Tabela 3. Parametry modeli geostatystycznych dla miąższości pokładów (M) i wartości opalowej węgla (Q_i')

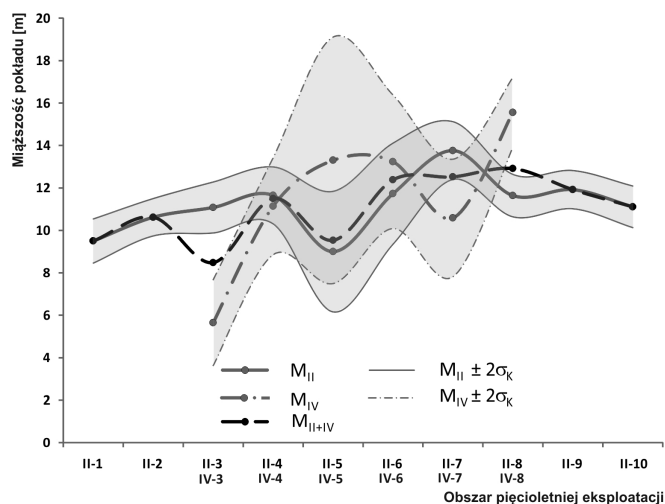
Table 3. Parameters of geostatistical models of seams' thickness (M) and lignite calorific value (CV)

Pokład	Parametr	Typ modelu	C_0	C	a [km]	U_N [%]	$\frac{a}{d_{sr}}$	Efektywność metod geostatystycznych
II	M [m]	wykładniczy	4,7	2,7	7,2	36	17,4	mała
	Q_i' [MJ/kg]	sferyczny	0,47	0,17	2,0	26	4,8	praktyczny brak
IV	M [m]	sferyczny	4,1	35,90	7,4	90	17,9	bardzo wysoka
	Q_i' [MJ/kg]	sferyczny	0,17	0,40	6,0	70	14,5	umiarkowana

C_0 – wariancja zmienności lokalnej, C – wariancja zmienności przestrzennej, a – zasięg semiwariogramu, U_N – wskaźnik maksymalnego udziału składnika nielosowego, $\frac{a}{d_{sr}}$ – zasięg modelu geostatystycznego (a) wyrażony w jednostkach średniego rozstawu punktów rozpoznania (opróbowania) (d_{sr})

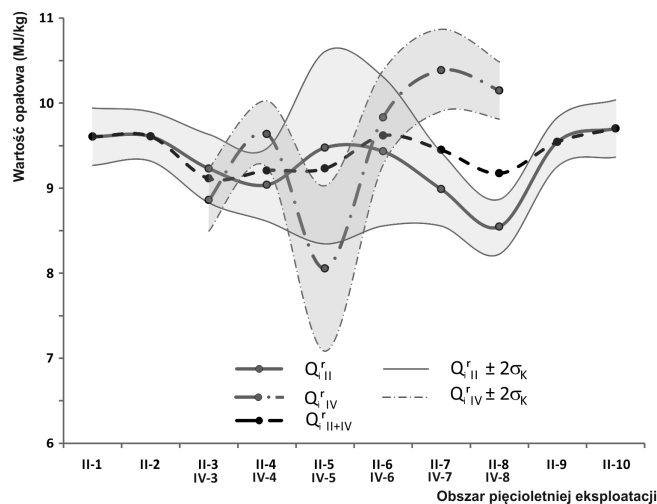
określają projektowane pięcioletnie postępy eksploatacji. Oprócz wartości średniej obliczono również odchylenie standardowe oszacowania wartości średniej, czyli tzw. błąd kriginu. Obliczenia wykonano oddzielnie dla dwóch pokładów węgla (II i IV). Granice bloków eksploatacyjnych zostały zaprojektowane w taki sposób, aby uwzględnić synchroniczną eksploatację dwóch pokładów węgla. Z tego względu w miejscach występowania pokładu IV na strugę węgla podawaną do elektrowni składa się węgiel z pokładu II i IV. Wartość średnia parametrów II i IV pokładu została obliczona jako średnia ważona z uwzględnieniem udziału objętości węgla z pokładów w łącznej objętości węgla w danej pięcioletce.

Wyniki obliczenia średnich wartości parametrów w funkcji pięcioletnich postępów eksploatacji wraz z wielkościami prognozowanych błędów (błędów krigingu) przedstawiono na rysunkach 4 i 5 oraz zestawiono w tabeli 4.



Rys. 4. Średnia miąższość pokładów M w pięcioletnich okresach eksploatacji w pokładach II i IV oraz łącznie dla obydwu pokładów wraz z zakresem prognozowanego błędu krigingu $2\sigma_K$ (dla prawdopodobieństwa $P = 95\%$)

Fig. 4. The average seams' thickness M within five years of the operation progress in the seams II and IV along with the estimation error $2\sigma_K$ (for the probability of $P = 95\%$) and the total value for both seams



Rys. 5. Średnia wartość opałowa Q_i^r w pięcioletnich okresach eksploatacji w pokładach II i IV wraz z zakresem prognozowanego błędu krigingu $2\sigma_K$ (dla prawdopodobieństwa $P = 95\%$) oraz wartości łącznie dla obydwu pokładów

Fig. 5. The average calorific value CV within five years of operation progress in the seams II and IV along with the estimation error $2\sigma_K$ (for the probability of $P = 95\%$) and the total value for both seams

Tabela 4. Oszacowane średnie miąższości pokładów M i wartości opalowej węgla Q_i^f w granicach pięcioletnich postępów eksploatacyjnych oraz prognozowane błędy krigingu (bezwzględne i względne) dla prawdopodobieństwa $P = 95\%$

Table 4. Estimated average thickness of seams M and the lignite calorific value CV within five years progress and estimation kriging errors (absolute and relative) for the probability of $P = 95\%$

Parametr złożowy	Pokład	Parametr	Granica obszaru pięcioletniej eksploatacji									
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Miąższość M	II	z^* [m]	9,5	10,62	11,08	11,65	9	11,73	13,76	11,64	11,92	11,11
		σ_K [m]	1,02	0,86	1,18	1,31	2,78	2,33	1,33	0,98	0,88	0,96
		σ_{KR} [%]	10,7	8,1	10,6	11,3	30,9	19,9	9,7	8,4	7,4	8,6
	IV	z^* [m]			5,65	11,14	13,30	13,23	10,59	15,56		
		σ_K [m]			1,98	2,24	5,69	3,08	2,71	1,61		
		σ_{KR} [%]			35,1	20,1	42,8	23,3	25,6	10,4		
	II + IV	z_w [m]	9,50	10,62	8,48	11,50	9,53	12,38	12,52	12,91	11,92	11,11
Wartość opalowa Q_i^f	II	z^* [MJ/kg]	9,6	9,6	9,2	9,0	9,5	9,4	9,0	8,5	9,5	9,7
		σ_K [MJ/kg]	0,33	0,28	0,39	0,42	1,11	0,86	0,42	0,31	0,28	0,33
		σ_{KR} [%]	3,4	3,0	4,3	,6	11,7	9,1	4,7	3,7	3,0	3,4
	IV	z^* [MJ/kg]			8,9	9,6	8,1	9,8	10,4	10,1		
		σ_K [MJ/kg]			0,36	0,38	0,95	0,54	0,47	0,33		
		σ_{KR} [%]			4,1	4,0	11,8	5,5	4,5	3,2		
	II + IV	z_w [MJ/kg]	9,6	9,6	9,1	9,2	9,2	9,6	9,4	9,2	9,5	9,7

z^* – średnia oszacowana wartość parametru, σ_K – bezwzględny błąd krigingu, σ_{KR} – względny błąd krigingu, z_w – średnia ważona wartość parametru (wagę stanowiła objętość węgla w pokładzie)

Z rysunków 4 i 5 wynika, że zmienność parametrów M i Q_i^f w funkcji postępów eksploatacji będzie dość znaczna. Średnia miąższość pokładu II przyjmuje wartości od 9,5 do 13,8 m. Znacznie większy zakres średnich miąższości stwierdzono dla pokładu IV, od 5,6 do 15,6 m.

Zakres średnich wartości opalowych węgla w pięcioletnich okresach eksploatacji w obu pokładach jest zbliżony i przyjmuje wartości odpowiednio: w pokładzie II od 8,5 do 9,7 MJ/kg, w pokładzie IV od 8,1 do 10,4 MJ/kg.

Parametry w obydwu pokładach naprzemiennie przyjmują średnie wartości maksymalne i minimalne. W miejscu występowania średniej wartości minimalnej parametru w pokładzie II, w pokładzie IV obserwuje się – przeciwnie – wartości wyższe niż średnie.

Dzięki temu zjawisku możliwe jest utrzymanie oczekiwanego poziomu wartości opalowej eksploatowanego węgla na pewnym określonym poziomie poprzez homogenizację

węgla dostarczanego z obydwu pokładów. Jest to wyraźnie widoczne w przebiegu linii wynikowej, w której podano średnią ważoną wartość parametrów w blokach dla obydwu pokładów (rys. 5). Linia ta wykazuje znacznie mniejsze wahania niż krzywe wartości opałowej dla poszczególnych pokładów. Widoczny na wykresach efekt kompensacji wahań wartości parametrów miąższości M i wartości opałowej Q_i^r jest obserwowany dla okresów pięcioletnich. Jest to oszacowanie bardzo ogólne i dające jedynie przesłanki do przyszłego sposobu sterowania jakością strugi urobku. Szczegółowe projektowanie tego procesu będzie możliwe dopiero na etapie planowania średniookresowego i operacyjnego, które będzie wykonywane na podstawie dodatkowych informacji o złożu.

Obok wartości średnich parametrów, przedstawionych na rysunkach 4 i 5, istotne znaczenie interpretacyjne dla wyników analiz ma również wielkość błędu oszacowania wartości średniej w blokach (błąd krigingu zwyczajnego). Dla miąższości pokładu II błąd względny krigingu (dla prawdopodobieństwa 95%) przyjmuje wartości od 7,4 do 30,9%, natomiast w pokładzie IV nieco wyższe wartości, od 10,4 do 42,8%. W przypadku wartości opałowej wielkości względnych błędów krigingu są znacznie niższe i w obu pokładach przyjmują wartości w zbliżonym zakresie od około 3 do 12%.

Szczególnie duże wartości błęd ten przyjmuje dla parametru Q_i^r pokładu II w 5 i 6 pięcioletnim okresie eksploatacji (9–11%) oraz dla M pokładu IV w 3 do 7 pięcioletnim okresie eksploatacji (od 20 do 43%) i pokładu II w 5 i 6 bloku (20–31%). Odnosi się to do części złoża udokumentowanej w kategorii C_2 (rys. 1). Uściślenie prognoz dla tych obszarów wymaga dodatkowych informacji o złożu, pozyskanych na kolejnych etapach dokumentowania (do kategorii C_1).

Wysokie wartości błędów wynikają nie tylko z małej ilości obserwacji w niektórych blokach, ale również z charakteru samego zjawiska, czyli obserwowanej zmienności parametrów M i Q_i^r w pokładach węgla, która obrazowana jest w parametrach dopasowanego do semiwariogramu modelu geostatystycznego. W zmienności wartości opałowej oraz miąższości w pokładzie II obserwuje się stosunkowo niewielki udział składnika nielosowego U_N , który przyjmuje wartości odpowiednio 26 i 36% (tab. 3). W przeciwieństwie do tego udział składnika nielosowego w obserwowanej zmienności parametrów w pokładzie IV jest bardzo wysoki, rzędu 70 i 90% (tab. 3). Warto jednak zwrócić uwagę na przebieg semiwariogramów dla miąższości obydwu pokładów. Zmienność miąższości pokładu II wykazuje niewielki udział składnika nielosowego (36%) w porównaniu do analogicznego wskaźnika w pokładzie IV, jednak wartość wariancji C w pokładzie IV znacznie przekracza wartość wariancji w pokładzie II. Zatem obserwowana zmienność miąższości jest nieporównywalnie wyższa w pokładzie IV niż w pokładzie II. Jest to jednym z powodów obserwowanej dużej wartości błędów oszacowania wartości średniej w pokładzie IV, co widoczne jest szczególnie w 5 i 6 pięcioletnim okresie eksploatacji (rys. 5).

Wstępnej oceny efektywności geostatystycznego szacowania wartości parametrów można dokonać opierając się na zależności łączącej wskaźnik udziału losowego składnika zmienności i zasięg autokorelacji wyrażony w jednostkach średniego rozstawu punktów opróbowań (Mucha i Wasilewska-Błaszczyk 2011). Zgodnie z tą zależnością, mimo znaczą-

cego zasięgu semiwariogramu miąższości pokładu II, przekraczającego 17 średnich rozstawów opróbowania, niewielki udział składnika nielosowego U_N w zmienności tego parametru stawia pod znakiem zapytania zasadność stosowania procedury krigingu do obliczania wartości średniej w blokach (tab. 3). Pomimo tego faktu, zdaniem autorów, zastosowana metoda pozwoli osiągnąć dokładniejsze oszacowania średniej niż klasyczna statystyka. Metoda ta jest jednak bardziej czasochłonna i wymaga zastosowania odpowiednich programów komputerowych.

Niewielki udział składnika nielosowego w zmienności parametrów pokładu II może mieć swoje pierwotne źródło w charakterze samych danych użytych do obliczeń. Warto zwrócić uwagę, że będąca źródłem danych dokumentacja geologiczna jest efektem prac wykonywanych na przestrzeni niemal półwiecza. Badania górotworu wykonywano z różną dokładnością, co mogło być źródłem błędów, które przejawiają się w wysokich wartościach wariancji lokalnej (C_0) oraz niskich wartościach wskaźnika udziału nielosowego (U_N).

Duże wartości błędów oszacowania wartości średniej, widoczne szczególnie w 5 i 6 pięcioletnim okresie eksploatacji powodują, że do przedstawionych wyników należy podchodzić z zastrzeżeniem ich ograniczonej wiarygodności. Uściślenie informacji wymaga dodatkowych danych pozyskanych w kolejnych fazach rozpoznania złoża.

Podsumowanie i wnioski

Przeprowadzone analizy upoważniają do sformułowania następujących wniosków:

1. Średnie wartości opałowe Q_i^r w pięcioletnich okresach eksploatacji wykazują dość duże wahania od 8,5 do 9,7 MJ/kg w pokładzie II i od 8,1 do 10,4 MJ/kg w pokładzie IV.
2. Obserwowana zmienność parametrów ma swoje źródło w naturalnych procesach geologicznych, może być jednak również skutkiem błędów dokumentacji geologicznej, która została wykonana na podstawie badań geologicznych prowadzonych na przestrzeni kilku dekad.
3. Miąższość pokładów i średnia wartość opałowa węgla w granicach pięcioletnich okresów eksploatacji cechują się wysokimi prognozowanymi błędami oszacowania wartości średnich. Wynika to z dużej zmienności parametrów w granicach bloków, jak również z małej gęstości sieci rozpoznawczej. Szczególnie wysokie wartości błędów obserwuje się w 5 i 6 okresie eksploatacji w pokładzie II, gdzie złożo udokumentowano jedynie w kategorii C₂.
4. Naturalna zmienność wartości opałowej Q_i^r w pokładach II i IV umożliwia zaprojektowanie zsynchronizowanej eksploatacji węgla z obydwu pokładów w sposób zapewniający uśrednienie urobku i utrzymanie wartości opałowej strugi urobku na żądanym poziomie.
5. Wyniki przedstawione w pracy odnoszą się do zagospodarowania złoża na etapie planowania długoterminowego. Weryfikacja przedstawionych prognoz będzie możliwa po pozyskaniu większej liczby danych na kolejnych etapach rozpoznania złoża.

LITERATURA

- Bogacz i in. 2009 – Bogacz, A., Sawicka, K., Sokołowski, M. i Kwaśniewska, S. 2009. Dodatek nr 1 do dokumentacji geologicznej złoża węgla brunatnego Gubin w kategorii B + C₁ + C₂. Przedsiębiorstwo Geologiczne w Krakowie, CAG PIG nr 3090/2009, Warszawa.
- Jurek i in. 2013 – Jurek, J., Mucha, J. i Wasilewska-Błaszczyk, M. 2013. Przegląd zastosowań geostatystyki do szacowania parametrów polskich złóż węgla brunatnego. *Zeszyty Naukowe IGSMiE PAN* nr 85, s. 143–153.
- Kaczmarczyk i in. 2012 – Kaczmarczyk, M., Nieckula, M., Mucha, J. i Wasilewska-Błaszczyk, M. 2012. Praktyczne konsekwencje geostatystycznego badania struktury zmienności parametrów złoża węgla brunatnego Gubin i siarki Osiek. *Zeszyty Naukowe IGSMiE PAN* nr 83, s. 51–68.
- Mazurek, S. 2003. Zależność wyników analiz zapopielenia węgla brunatnego od systemu wiercenia i opróbowania, a możliwości prognozowania parametrów dostaw – na przykładzie złóż konińskich. *Węgiel Brunatny* nr 2 (43).
- Mucha, J. i Wasilewska-Błaszczyk, M. 2011. *Praktyczne doświadczenia geostatystycznego modelowania i dokumentowania polskich złóż – przegląd wybranych zastosowań* [W:] *Geomatyka górnicza – praktyczne zastosowania*. Monografia: praca zbiorowa pod red. nauk. Artura Dyczko i Artura Krawczyka. Kraków, Wydawnictwo Fundacji dla AGH.
- Mucha, J. i Wasilewska-Błaszczyk, M. 2013. Opróbowanie złóż do badań chemicznych i jego dokumentowanie – oczekiwania i rzeczywistość. *Górnictwo Odkrywkowe* R. 54, nr 2, s. 52–57.
- Naworyta, W. i Sypniowski, S. 2012. Zagospodarowanie złoża węgla brunatnego Gubin – wybrane problemy projektowania kopalni. *Polityka Energetyczna – Energy Policy Journal* t. 15, z. 3.
- Naworyta, W. i Sypniowski, S. 2013. O problemie sterowania jakością strugi urobku w kopalniach węgla brunatnego w kontekście właściwego rozpoznania parametrów jakościowych złoża, *Górnictwo Odkrywkowe* nr 2.
- Naworyta i in. 2013 – Naworyta, W., Sypniowski, S. i Benndorf, J. 2013. Analiza możliwości sterowania jakością strugi urobku na etapie planowania operacyjnego na przykładzie jednego ze złóż węgla brunatnego. *Polityka Energetyczna – Energy Policy Journal* t. 16, z. 4, s. 233–245.
- Nieć i in. 2012 – Nieć, M., Mucha, J., Sobczyk, E.J. i Wasilewska-Błaszczyk, M. 2012. *Metodyka dokumentowania złóż kopalni stałych. Część IV: Szacowanie zasobów*. Wydawnictwo IGSMiE PAN, Kraków, s. 241.

**GEOSTATYSTYCZNA ANALIZA PARAMETRÓW ZŁOŻA WĘGLA BRUNATNEGO
W FUNKCJI POSTĘPÓW PROJEKTOWANEJ EKSPLOATACJI**

Słowa kluczowe

węgiel brunatny, geostatystyka, sterowanie jakością

Streszczenie

Przedmiotem badań była analiza jakości kopaliny w planowanym do zagospodarowania złożu węgla brunatnego Gubin. Analizy i ich wyniki odnoszące się do długoterminowego planowania eksploatacji mają istotne znaczenie dla określenia parametrów technologicznych elektrowni, w której będzie produkowana energia na bazie węgla brunatnego ze złoża Gubin. Oszacowanie średniej miąższości pokładów (M) i wartości opalowej węgla (Q_i') wykonano dla obszarów złoża w granicach pięcioletnich postępów eksploatacji dla dwóch planowanych do eksploatacji pokładów węgla II i IV. Szacowanie średnich wartości parametrów i prognozę błędów tych oszacowań wykonano z wykorzystaniem metody krigingu poligonowego, opartej na założeniach krigingu zwyczajnego w odmianie blokowej. Oszacowana w pięcioletnich okresach eksploatacji średnia miąższość pokładu II przyjmuje wartości

od 9,5 do 13,8 m, natomiast pokładu IV od 5,6 do 15,6 m. Zakres średnich wartości opałowych węgla w granicach projektowanych pięcioletnich postępów eksploatacji w obu pokładach jest zbliżony i przyjmuje wartości: w pokładzie II od 8,5 do 9,7 MJ/kg, w pokładzie IV od 8,1 do 10,4 MJ/kg. Parametry w obydwu pokładach naprzemiennie przyjmują średnie wartości maksymalne i minimalne. W pięcioletnich okresach eksploatacji, w których w pokładzie II obserwuje się niską wartość opałową węgla, w pokładzie IV przeciwnie, występują wartości wysokie. Dzięki temu zjawisku możliwe jest utrzymanie wartości opałowej złoża na określonym poziomie poprzez odpowiednie mieszanie węgla dostarczanego z obydwu pokładów. Korzystny efekt równoległej eksploatacji obydwu pokładów ilustrują przedstawione na wykresach wypadkowe wielkości miąższości pokładów II i IV oraz wartości opałowych węgla.

Obserwowana zmienność parametrów ma swoje źródło w naturalnych procesach geologicznych, jednak może być również efektem błędów dokumentacji geologicznej, która została wykonana na podstawie badań geologicznych przeprowadzonych na przestrzeni kilku dekad. Obok wartości średnich istotne znaczenie interpretacyjne dla wyników analiz ma wielkość błędu oszacowania wartości średniej w blokach. Dla miąższości pokładu II względny błąd krigingu przyjmuje wartości od 7,4 do 30,9%, który w pokładzie IV osiąga nieco wyższe wartości od 10,4 do 42,8%. W przypadku wartości opałowej wielkości błędów są znacznie niższe; w obu pokładach przyjmują one wartości w zakresie od 3 do 12%. Wielkości błędów oszacowania średniej wynikają nie tylko z liczby obserwacji w blokach, ale również z naturalnej zmienności parametrów miąższości M i wartości opałowej Q_i' w pokładach węgla. Przedstawione oszacowanie ma ogólny charakter, jednak wskazuje na długoterminowe tendencje, które należy uwzględnić w procesie sterowania jakością strumienia urobku. Szczegółowe projektowanie tego procesu będzie możliwe na etapie planowania średniookresowego i operacyjnego, które może być realizowane na podstawie dodatkowych informacji o złożu.

GEOSTATISTICAL ANALYSIS OF LIGNITE DEPOSIT PARAMETERS IN THE FUNCTION OF THE OPERATION PROGRESS

Keywords

lignite, geostatistics, quality control

Abstract

The subject of this paper is an analysis of the lignite quality parameters in the Gubin lignite deposit. Analyses relate to long-term operation plan. Results of analyses are important for determining the technological parameters of the power plant, which will produce energy basing on the Gubin lignite deposit. The average value of lignite parameters has been estimated for areas within the planned five-year progress of the operation. Analyses were performed for two lignite beds – II and IV, which has been designed for parallel exploitation. The estimation of the parameters average values together with the estimation errors has been calculated using the polynomial kriging method, based on the assumptions of ordinary kriging in a variation of the block kriging. The estimated five-year operating periods in the average thickness of the seam II takes values from 9.5 to 13.8 m; in case of the seam IV – from 5.6 to 15.6 m. Ranges of calorific values estimated in five-year periods in the

both seams are similar, and takes values in the seam II of 8.5 to 9.7 MJ/kg; in the seam IV from 8.1 to 10.4 MJ/kg. The parameters of both deposit seams take the average maximum and minimum values alternately. In periods, in which the lignite of the seam II has a low calorific value in the seam IV on the contrary values are high. Thus random phenomenon is possible to maintain the calorific value at the certain level mixing the lignite supplied from the both exploited seams. The total calorific value illustrate the beneficial effect resulting from parallel operation of seams II and IV. The observed parameter variability has its origin in the natural geological processes, but can also be the result of geological information errors. The documentation has been done basing on studies conducted over several decades. Besides the average values of vital importance for the interpretation of the presented results is the value of estimation error (kriging error). For thickness of the seam II relative kriging error ranges from 7.4 to 30.9%; slightly higher in the seam IV – from 10.4 to 42.8%. The relative kriging error of the calorific value is much lower; for both seams II and IV range from 3 to 12%. The values of the estimation errors result not only of the number of the observations in estimation blocks, but also from the natural variability of thickness M and calorific value CV in the lignite seams. The results presented in the paper are of a general nature, however, point to the long-term trends that should be considered in the process of the lignite output quality control. Detailed design of the output quality control process can be implemented in the next phase of the mine design basing on additional information about the deposit.

