



Małgorzata KACZMARCZYK*, Monika NIECKULA**, Jacek MUCHA***,
Monika WASILEWSKA-BŁASZCZYK****

Praktyczne konsekwencje geostatystycznego badania struktury zmienności parametrów złoża węgla brunatnego Gubin i siarki Osiek

Streszczenie: Badaniom geostatystycznym poddano parametry niezagospodarowanego złoża węgla brunatnego Gubin i aktualnie eksploatowanego złoża siarki rodzimej Osiek. Scharakteryzowano podstawowe cechy geologiczne złóż, sposób ich rozpoznania oraz obliczono statystyczne miary zmienności parametrów złożowych. W ramach analizy geostatystycznej wyznaczono semiwariogramy uśrednione i kierunkowe oraz określono zasięgi autokorelacji parametrów i maksymalne udziały składników nielosowych w ich obserwowanej zmienności. Większych trudności nastęrcza modelowanie semiwariogramów parametrów złoża węgla brunatnego, co można tłumaczyć jego złożoną genezą, a w szczególności wpływem zlodowacenia na ostateczne uformowanie złoża. Wyniki badania anizotropii zmienności parametrów zilustrowano za pomocą map semiwariogramów kierunkowych (indykatrysy zmienności). Stwierdzono, że anizotropia zmienności parametrów złożowych jest słaba lub co najwyżej umiarkowana. Geostatystyczne modele anizotropowe i izotropowe zastosowano do interpolacji wartości parametrów złoża siarki i konstrukcji map izolinowych z wykorzystaniem procedury krigingu punktowego. Weryfikacja dokładności interpolacji nie wykazała zauważalnych różnic w wynikach tej procedury przy zastosowaniu modelu anizotropowego i izotropowego. Stwierdzono, że najlepsze rezultaty interpolacji uzyskuje się przy uwzględnianiu danych z czterech obserwacji, najbliższych kolejnym węzłom interpolacji.

Słowa kluczowe: złoża siarki i węgla brunatnego, semiwariogramy, anizotropia

* Mgr inż., absolwent AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Kraków

** Mgr inż., KWB Sieniawa Sp. z o.o.

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

Practical consequences of a geostatistical study of the varying parameters of the Gubin lignite and Osiek sulphur deposits

Abstract: Geostatistical analysis was performed on the undeveloped Gubin lignite deposit and the currently operational Osiek sulphur deposit. This paper characterizes the geological position and state of the exploration of the deposits. The basic statistical measures of deposit parameters were calculated. The paper geostatistically describes the structure of 2D spatial variation of deposit parameters by means of omnidirectional and directional semivariograms. The modeling of the semivariograms enabled a definition of the range of parameters' autocorrelation and the maximal contributions of non random components of parameter variability. Modeling the sample semivariograms of the lignite deposits is very difficult due to the complex genesis of this deposit. The results of the anisotropy study were presented by maps of directional semivariograms. The isotropic and anisotropic models of variability were applied to the construction of contour maps using the geostatistical procedure of ordinary kriging. It was found that the anisotropy of deposit parameters is weak or moderate. Because of this, the contour maps made for isotropic and anisotropic geostatistical models are very similar.

Key words: sulphur and lignite deposits, semivariograms, anisotropy

Wprowadzenie

Znajomość struktury zmienności parametrów złożowych stanowi niezbędną podstawę rozwiązywania wielu zagadnień geologiczno-górnicznych, związanych z dokumentowaniem złóż i projektowaniem ich eksploatacji. W szczególności opis struktury zmienności ujęty w postaci modelu matematycznego 2D lub 3D jest pomocny przy wyznaczaniu granic złoża, szacowaniu jakości kopaliny i zasobów złoża, projektowaniu sieci opróbowań i planowaniu eksploatacji złoża.

Spośród kilku metod badania struktury zmienności w ostatnim dwudziestolecu zdecydowanie największą popularnością cieszy się, licząca pół wieku, metoda geostatystyczna Matherona (1962–1963), nadal rozwijana teoretycznie i możliwa do łatwego stosowania dzięki szerokiej ofercie regularnie aktualizowanego oprogramowania komputerowego.

Do określenia przestrzennej struktury zmienności w geostatystyce stosuje się dyskretne funkcje zwane semiwariogramami próbkowymi, opisujące zależność średniego zróżnicowania wartości parametru od średniej odległości między obserwacjami (punktami opróbowań).

Semiwariogramy próbkowe, obliczone dla wszystkich kierunków badania złoża noszą nazwę semiwariogramów uśrednionych, natomiast obliczone wyłącznie dla jednakowo zorientowanych linii badania określa się jako semiwariogramy kierunkowe. Porównanie semiwariogramów kierunkowych dla różnie zorientowanych linii pozwala rozstrzygnąć, czy dany parametr cechuje się zmiennością izotropową czy anizotropową. W zastosowaniach praktycznych semiwariogramy próbkowe i kierunkowe przybliża się za pomocą funkcji analitycznych ciągłych pełniących rolę geostatystycznych modeli zmienności.

Podstawowa analiza struktury zmienności obejmuje ponadto:

- ocenę udziału składnika nielosowego wyrażającego siłę prawidłowości zmian parametru w przestrzeni złożowej,
- wyznaczenie zasięgu autokorelacji wartości parametru czyli maksymalnej odległości między obserwacjami, do której wykazują one zależność korelacyjną.

Geostatystyczne badania struktury zmienności wykonano dla wytypowanych parametrów dwóch złóż: niezagospodarowanego złoża węgla brunatnego Gubin (miąższość,

zawartość popiołu, zawartość siarki oraz wartość opałowa), a także jedyne eksploatowanego aktualnie w Polsce złoża siarki rodzimej Osiek (miąższość, zawartość siarki oraz zasobność jednostkowa).

Wcześniej przedmiotem analiz geostatystycznych były inne polskie złoża węgla brunatnego (np. Mucha i in. 2004; Naworyta 2008; Bartuś 2012) i złoża siarki (np. Nieć 1977; Kokesz 1991, 2006).

1. Cechy geologiczne badanych złóż

Sedymentacyjne złożo Gubin rozciąga się na obszarze Dolnych Łużyc i Ziemi Lubuskiej i należy do węglonośnych utworów mioceńskiej formacji brunatnowęglowej. Można je zaliczyć do złóż wielopokładowych, pozostających pod silnym wpływem tektoniki sudeckiej, charakteryzującej się licznymi dyslokacjami, przesunięciami pionowymi i brakiem odkształceń plastycznych o charakterze fałdowym. Obszar złoża łagodnie zapadający w kierunku wschodnim budują utwory czwartorzędu oraz trzeciorzędu, podścielone utworami starszego podłoża o wieku od permu do górnej kredy. Specyfiką złoża Gubin jest budowa geologiczna, którą złożo zawdzięcza erozyjnej działalności plejstocęńskiego łądolodu. Podzielił on złożo na pięć izolowanych od siebie tzw. kier węglowych, przedstawiających niewielkie, oderwane płyty pokładów węgla o erozyjnym charakterze granic i wzrastającej w kierunku wschodnim miąższości dwóch pokładów bilansowych tego złoża. Obszary węglowe, na które składają się pola: Strzegów, Sadzarzewice, Mielno–Brzozów, Węgliny oraz Grabice, zajmują 60% powierzchni złożowej, pozostałe 40% wypełniają rynny subglacialne wyżłobione przez łądolód, rozdzielające poszczególne pola węglowe. Wymycia erozyjne przekraczają miejscami głębokość 120 m, a ich szerokość wynosi około 1500 m. Węgiel brunatny ze złoża Gubin jest w całości węglem energetycznym bardzo dobrej jakości, o średniej popielności i od niskiej do podwyższonej zawartości siarki (Nieć 1996; Kasiński 2008).

Położone w zachodniej części Niziny Nadwiślańskiej złożo siarki rodzimej Osiek ma charakter epigenetyczny, a jego powstanie jest ściśle związane z genezą północnej części Zapadliska Przedkarpackiego. Głównym procesem prowadzącym do jego powstania była metasomatoza gipsów przy udziale bakterii. Obszar złoża cechuje typowa tektonika uskokuwa (blokowa) przy współdziałaniu dużych dyslokacji podłużnych i mniejszych o przebiegu równoleżnikowym. Utwory mioceńskie budujące złożo Osiek, składają się z kilku charakterystycznych członów litostratygraficznych. Są to piaszczysto-wapienne osady zaliczane do warstw baranowskich, siarczanowa seria chemiczna lokalnie z utworami pogipsowymi, margliste osady warstw pektenowo-spiralisowych oraz ilaste osady sarmatu. Siarka usytuowana jest w wapieniach siarkonośnych, rzadziej marglach występujących w obrębie serii chemicznej (Dytkowski i in. 2008).

2. Materiał badawczy

W złożu Gubin badaniom poddane zostały dwa bilansowe pokłady węgla, pokład I (dolny), charakteryzujący się lepszą jakością węgla, oraz pokład II (górny) o nieco gorszych

parametrach chemicznych węgla brunatnego. Dla tych dwóch pokładów zgromadzono dane zaczerpnięte z dokumentacji geologicznej złoża (Engel i in. 1969; Różycki i in. 1992), dotyczące czterech najważniejszych parametrów złożowych, tj.: miąższości, zawartości popiołu w stanie suchym (A^d [%]), zawartości siarki całkowitej w stanie suchym (S^d_t [%]) i wartości opałowej w stanie roboczym (Q^r_i [kJ/kg]). Do badania struktury zmienności tych parametrów wykorzystano dane z 320 otworów złożowych dokumentacyjnych, odwierconych nieregularnie na złożu w średniej odległości około 350 m. Z podstawowego zbioru danych po wstępnej analizie odrzucono dane z 63 otworów uznanych za negatywne. Rdzenie otworów wiertniczych, w których nawiercono węgiel brunatny o miąższości przekraczającej 2,0 m, były systematycznie poddawane opróbowaniu w jednometrowych odstępach, przy czym w partiach spągowych i stropowych pokładu węgla próbki pobierano co 0,5 m. W pobranych próbkach oznaczono laboratoryjnie wartości parametrów jakościowych węgla.

W kopalni siarki rodzimej Osiek eksploatacja prowadzona jest metodą podziemnego wytopienia, co pozwoliło wykorzystać w analizie liczny zbiór danych pochodzących z opróbowania 862 otworów eksploatacyjnych Rejonu I Eksploatacji Kopalni (Kowalik i in. 1979). Otwory eksploatacyjne rozmieszczone są w odstępach około 40-metrowych.

3. Cechy statystyczne zbiorów danych

Wykorzystane w analizie geostatystycznej zbiory wartości parametrów złożowych scharakteryzowano za pomocą prostych statystycznych miar zmienności ujętych w tabelach 1 i 2. Z dwóch badanych pokładów złoża węgla brunatnego Gubin (tab. 1) lepszymi parametrami wyróżnia się pokład I (dolny). Świadczą o tym wyższe średnie miąższości i wartości opałowe dla tego pokładu oraz mniejsze zawartości popiołu i siarki. Współczynniki zmienności wskazują na małą zmienność względną wartości opałowej (<15%) oraz umiarkowaną lub dużą (ale niezbyt silnie wyrażoną) zmienność pozostałych parametrów złożowych (30–50%). Rozkłady miąższości pokładów cechuje słaba asymetria dodatnia. Podobnie jak w większości złóż węgla brunatnego i kamiennego wartość opałową charakteryzują ujemne współczynniki asymetrii o umiarkowanych lub wyraźnych wartościach. Zbliżonymi wartościami bezwzględnymi cechuje się dodatnia asymetria rozkładów zawartości popiołu i siarki (0,5–1,5) (Nieckula 2010).

Złoże siarki rodzimej Osiek cechuje się dobrymi parametrami, na co wskazują średnie ich wartości przewyższające wyraźnie wartości brzeżne parametrów ujęte w kryteriach bilansowości (tab. 2). Zmienność badanych parametrów złożowych można określić jako małą (zawartość siarki) lub umiarkowaną (miąższość złoża i zasobność siarki). Asymetria rozkładów parametrów złożowych jest słaba i w praktyce można traktować je jako symetryczne (Wójcikowska 2010).

Przedstawiona skrótkowo statystyczna charakterystyka parametrów złożowych dowodzi braku skrajnych wartości parametrów statystycznych, co z punktu widzenia geostatystycznego opisu struktury zmienności za pomocą semiwariogramów oznacza, że nie zachodzi potrzeba transformacji danych lub stosowania specjalnych estymatorów semiwariogramów.

TABELA 1. Podstawowe miary statystyczne zmienności parametrów złożowych w pokładzie I oraz II złoża węgla brunatnego Gubin (wszystkie pola)

TABLE 1. Basic statistics of parameters of seam 1 and seam 2 of the Gubin lignite deposits (all areas)

Parametry statystyczne	Pokład I (dolny)				Pokład II (górnny)			
	miąższość [m]	zawartość popiołu [%]	zawartość siarki [%]	wartość opałowa [kJ/kg]	miąższość [m]	zawartość popiołu [%]	zawartość siarki [%]	wartość opałowa [kJ/kg]
Liczba danych	237	203	203	203	223	190	190	190
Średnia arytmetyczna	6,50	16,80	0,88	9 400	3,56	19,94	1,51	9 037
Wartość minimalna	1,30	5,70	0,26	6 410	1,00	2,40	0,28	3 448
Wartość maksymalna	14,30	40,20	2,64	11 158	8,70	53,10	3,50	11 233
Współczynnik zmienności	31	48	48	11	35	45	34	14
Współczynnik asymetrii	0,26	0,72	1,32	-0,67	0,58	1,06	0,35	-1,19

TABELA 2. Podstawowe miary statystyczne zmienności parametrów złoża siarki rodzimej Osiek

TABLE 2. Basic statistics of parameters of the Osiek sulphur deposits

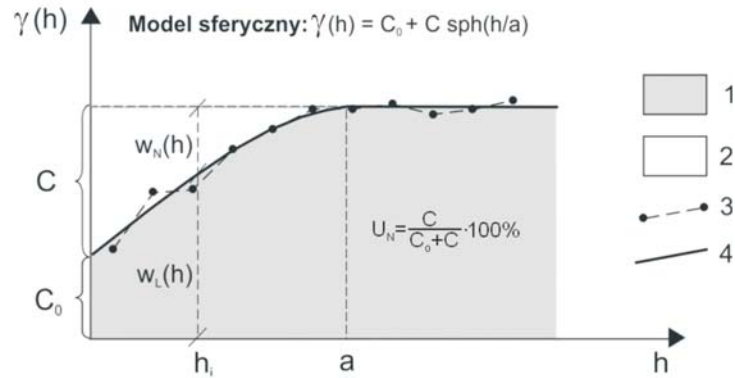
Parametry statystyczne	Miąższość złoża [m]	Zawartość siarki [%]	Zasobność siarki [Mg/m ²]
Liczba danych	860	860	862
Średnia arytmetyczna	19,88	21,73	9,72
Mediana	20,0	21,6	9,62
Wartość minimalna	2,4	6,8	1,16
Wartość maksymalna	35,2	33,0	33,97
Współczynnik zmienności	31	15	37
Współczynnik asymetrii	-0,30	0,00	0,43

4. Geostatystyczny opis i modelowanie struktury zmienności

Zgodnie z przyjętym tokiem postępowania w pierwszej kolejności obliczono i sporządzono wykresy semiwariogramów uśrednionych, a następnie dopasowano do nich geostatystyczne modele zmienności (modele izotropowe).

Modele zaproponowane dla parametrów złoża Gubin (rys. 1–4) są modelami z asymptotą, tzn. osiągającymi maksymalną wartość dla pewnej odległości między obserwacjami zwanej zasięgiem autokorelacji.

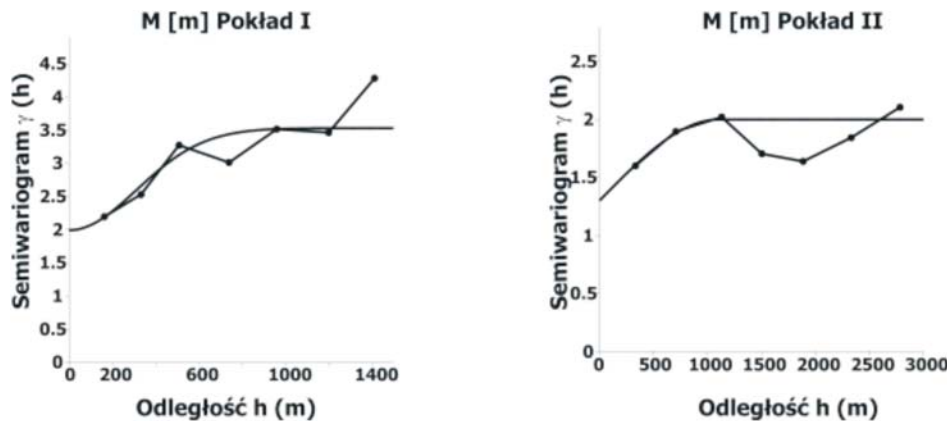
Geostatystycznym modelem zmienności wszystkich parametrów złożowych złoża węgla brunatnego Gubin jest tzw. model sferyczny (rys. 1). Wyjątek stanowi jedynie semiwariogram miąższości dla pokładu I, który został aproksymowany modelem Gaussa.



Rys. 1. Przykładowy semiwariogram próbkowy i teoretyczny model sferyczny zmienności parametru 1 – pole zmienności losowej, 2 – pole zmienności nielosowej, 3 – semiwariogram, 4 – model teoretyczny sferyczny, C_0 – wariancja losowego składnika zmienności parametru, C – wariancja nielosowego składnika zmienności parametru, a – zasięg semiwariogramu (autokorelacji), $w_N(h)$ – nielosowy składnik zmienności, $w_L(h)$ – losowy składnik zmienności dla średniej odległości h między punktami pobrania próbek (pomiarów)

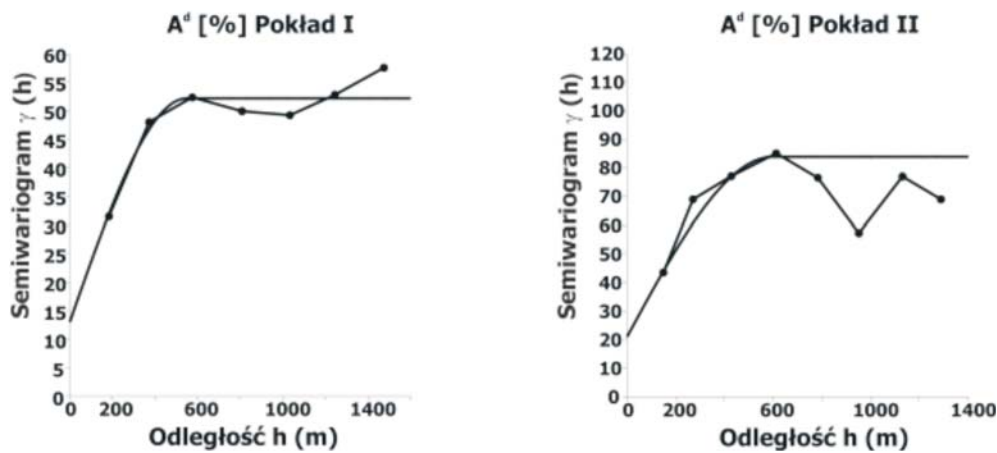
Fig. 1. Example of sample semivariogram with theoretical spherical model

$$\text{Model sferyczny: } \gamma(h) = c_0 + c \operatorname{sph}\left(\frac{h}{a}\right) = c_0 + c \left[\frac{3h}{2a} - \frac{1}{2} \left(\frac{h}{a}\right)^3 \right] \text{ dla } h \leq a \text{ i } \gamma(h) = c_0 + c \text{ dla } h \geq a$$



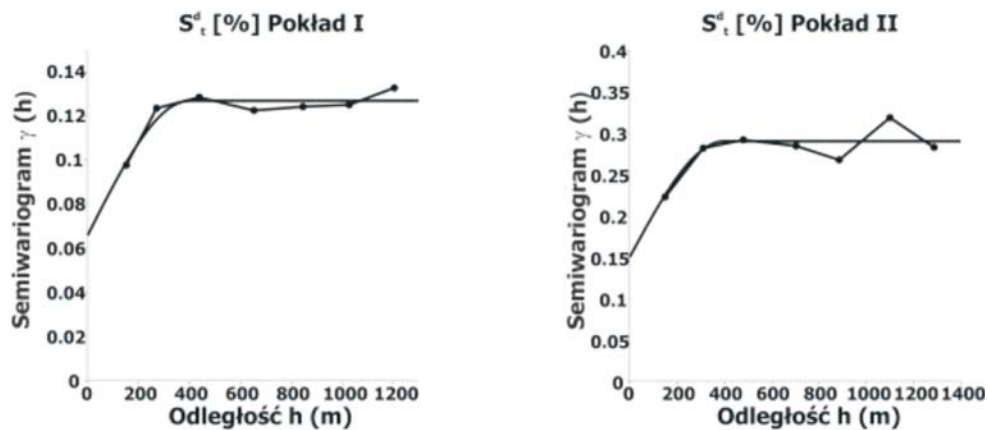
Rys. 2. Uśrednione semiwariogramy miąższości pokładu I (dolny) oraz II (górny) złoża Gubin wraz z modelami Gaussa i sferycznym

Fig. 2. Omnidirectional semivariograms of the thickness of seam I and seam II of the Gubin deposit with Gauss and spherical models



Rys. 3. Uśrednione semiwariogramy zawartości popiołu w pokładzie I oraz II złoży Gubin wraz z modelami sferycznymi

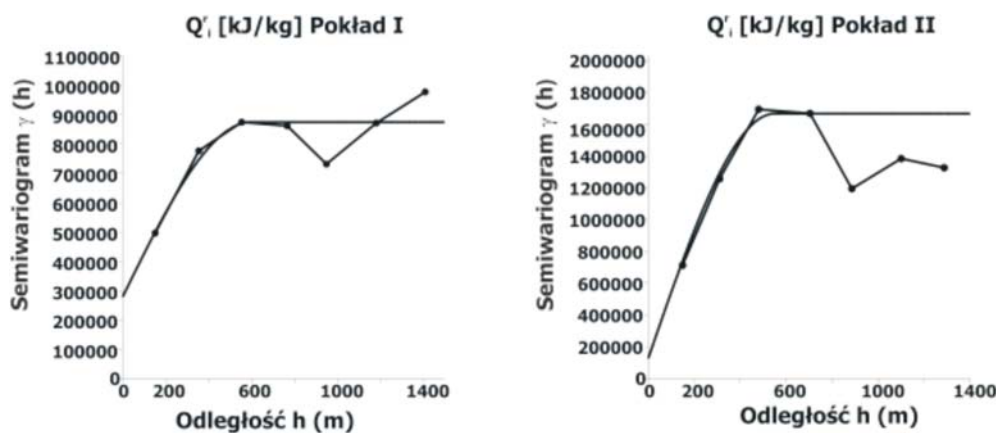
Fig. 3. Omnidirectional semivariograms of the ash content in seam I and seam II of the Gubin deposit with spherical models



Rys. 4. Uśrednione semiwariogramy zmienności zawartości siarki w pokładzie I oraz II złoży Gubin wraz z modelami sferycznymi

Fig. 4. Omnidirectional semivariograms of the sulphur content in seam I and seam II of the Gubin deposit with spherical models

Do opisu struktury zmienności wykorzystuje się zasięgi autokorelacji i maksymalne udziały składnika nielosowego w obserwowanej zmienności parametrów obliczane w sposób pokazany na rysunku 1. Zasięgi autokorelacji parametrów złoży węgla brunatnego wynoszą od 400 do 1100 m, przy czym najniższe wartości obserwowano dla zawartości siarki w obu pokładach (400 m), a najwyższe dla miąższości w pokładzie II (1100 m) (tab. 3). Zwraca uwagę fakt, że zasięgi autokorelacji wielokrotnie (>10-krotnie) przewyższają średnie rozstawy otworów. Udziały maksymalne składników nielosowych zmienności są silnie zaznaczone i wynoszą od 50 do 92%. Wyjątek stanowi jedynie miąższość pokładu II, dla



Rys. 5. Uśrednione semiwariogramy zmienności wartości opałowej w pokładzie I oraz II złoża Gubin wraz z modelami sferycznymi

Fig. 5. Omnidirectional semivariograms of the calorific value in seam I and seam II of the Gubin deposit with spherical models

którego składnik nielosowy jest słabo zaznaczony i wynosi zaledwie 38%. Interesujący jest również brak podobieństwa pomiędzy semiwariogramami miąższości w przypadku pokładu I oraz II (rys. 2). Analizując ich przebieg można stwierdzić odmienną strukturę zmienności pomiędzy tymi pokładami. Pokład I cechuje większy udział składnika nielosowego (54%), podczas gdy w pokładzie II udział składnika nielosowego jest wyraźnie mniejszy i wynosi 38%. Oba semiwariogramy aproksymowane są przez dwa różne modele oraz mają znacznie zróżnicowany zasięg autokorelacji (440 m i 1100 m). To zróżnicowanie ma zapewne związek z erozyjno-akumulacyjną działalnością lodowca i wód fluwioglacjalnych, które w większym stopniu oddziaływały na górny pokład.

TABELA 3. Zestawienie zasięgów autokorelacji i udziałów składnika nielosowego zmienności badanych parametrów złożowych w pokładzie I oraz II złoża Gubin

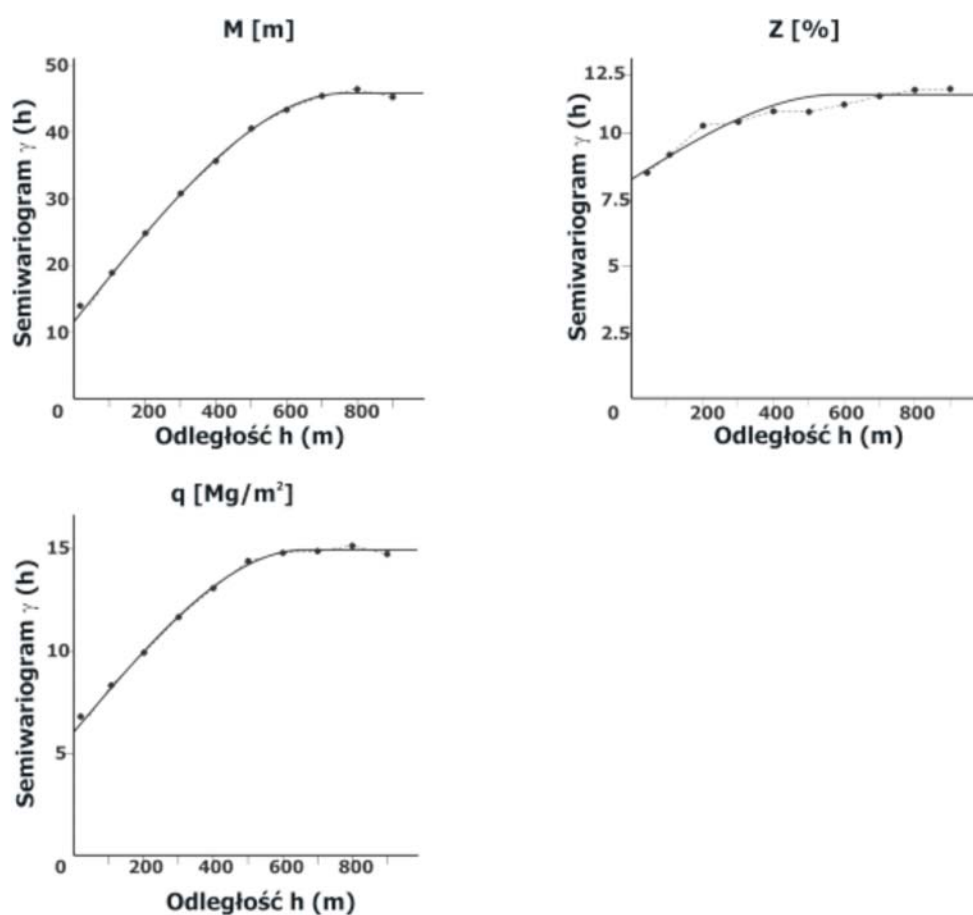
TABLE 3. Ranges of autocorrelation and contributions of non-random component of parameters variability for seam I and seam II of the Gubin deposit

Parametr złożowy	Pokład	a[m]	$\frac{a}{d_{sr}}$	UN[%]
Miąższość	I	440	12	54
	II	1 100	31	38
Zawartość popiołu	I	550	15	77
	II	600	17	76
Zawartość siarki	I	400	11	51
	II	400	11	53
Wartość opałowa	I	600	17	71
	II	550	15	92

a – zasięg autokorelacji, d_{sr} – średni rozstaw otworów, UN – udział składnika nielosowego

Uśrednione semiwariogramy parametrów złożowych złoża siarki Osiek, podobnie jak w przypadku parametrów złoża Gubin aproksymowano modelami sferycznymi w sposób wysoce zadowalający (rys. 6). Na tle nieregularnych i trudniejszych do modelowania semiwariogramów parametrów złoża węgla brunatnego, semiwariogramy parametrów złoża siarki wyróżniają się dużą płynnością zmian dla kolejnych odległości między punktami opróbowania.

Zasięgi autokorelacji parametrów złoża siarki Osiek są niezbyt zróżnicowane i wynoszą od 580 do 770 m (tab. 4). Odniesienie ich do średnich rozstawów otworów (z ilorazami z zakresu 15–19) potwierdza ponadto, że są one znaczące. Silne zróżnicowanie wykazują natomiast maksymalne udziały składnika niełosowego od bardzo wysokiej wartości dla miąższości złoża (75%), wysokiej dla zasobności jednostkowej siarki, do małej wartości dla zawartości siarki (28%).



Rys. 6. Uśrednione semiwariogramy miąższości (M), zawartości siarki (Z) oraz zasobności (q) wraz z modelami sferycznymi dla złoża siarki rodzimej Osiek

Fig. 6. Omnidirectional semivariograms of the thickness (M), sulphur content (Z) and accumulation index (q) with spherical models of the Osiek sulphur deposit

TABELA 4. Zestawienie zasięgów autokorelacji i udziałów składnika nielosowego zmienności badanych parametrów złoża siarki rodzimej Osiek

TABLE 4. Ranges of autocorrelation and contributions of non-random component of parameters variability of the Osiek sulphur deposit

Parametr	a [m]	$\frac{a}{d_{sr}}$	U _N [%]
Miąższość	770	19	75
Zawartość siarki	580	15	28
Zasobność	660	17	60

a – zasięg autokorelacji, d_{sr} – średni rozstaw otworów, U_N – udział składnika nielosowego

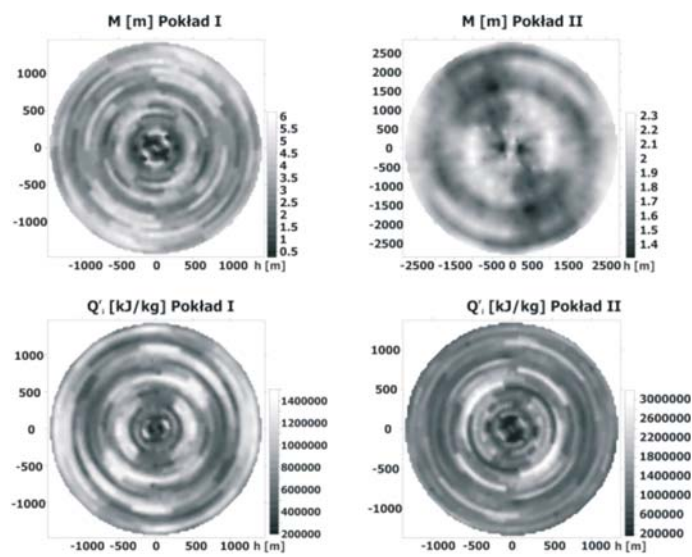
Przedstawione cechy izotropowej struktury zmienności parametrów obu rozpatrywanych złóż, świadczące o wyraźnych prawidłowościach rozmieszczenia wartości parametrów, uzasadniają celowość stosowania geostatystycznych procedur krigingu do szacowania ich zasobów i jakości kopaliny.

Ważnym elementem badania struktury zmienności jest analiza zmienności kierunkowej parametrów, prowadząca do opisu anizotropii zmienności, o ile taka występuje. W celu ujawnienia potencjalnej anizotropii zmienności parametrów złożowych, wykorzystując program Surfer (GoldenSoftware), obliczono semiwariogramy kierunkowe w kierunkach od 0° do 179° co 1°, przyjmując kąt tolerancji 30°. Efektem tej procedury są mapy semiwariogramów kierunkowych mające postać indykatrysy zmienności. Siłę zmienności kierunkowej ocenia się na podstawie barwnej legendy dla odległości między punktami złoża odmierzanej od centrum wykresu dla założonego kierunku badania (rys. 7). W przypadku idealnej izotropii zmienności izolinie semiwariogramów kierunkowych tworzą koncentryczne okręgi. Odstępstwo od takiego przebiegu izolinii dowodzi anizotropowej zmienności badanego parametru.

W przypadku złoża węgla brunatnego Gubin badanie anizotropii zmienności analizowanych parametrów złożowych w rozpatrywanych dwóch pokładach I (dolnym) oraz II (górnym) wykazało, że nieco silniejszą anizotropią badanych parametrów cechuje się pokład II (rys. 8 i 9). Taki charakter zmienności może wynikać z jego większej nieciągłości, spowodowanej obecnością rynien erozyjnych rozdzielającej obszar złoża na izolowane od siebie pola. Większy wpływ tych procesów widoczny jest dla pokładu II, który jest położony wyżej niż pokład I.

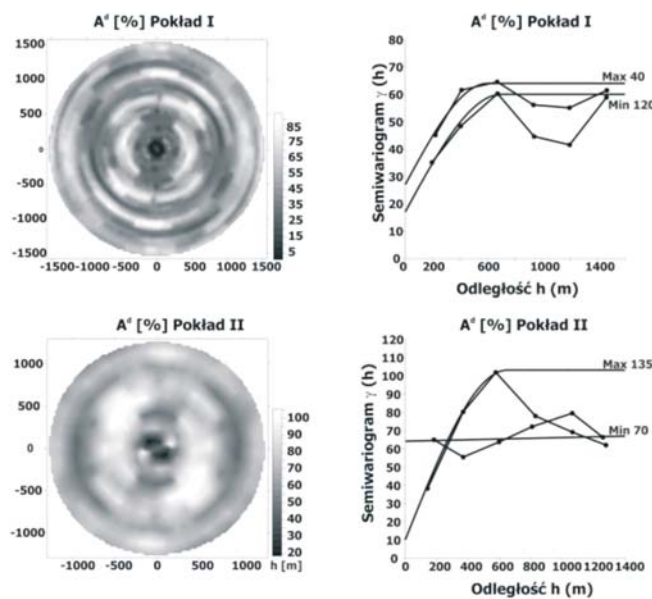
Generalnie w przypadku miąższości pokładu i wartości opałowej anizotropia zmienności jest słaba, co w praktyce pozwala przyjąć izotropowy charakter zmienności tych parametrów (rys. 7). Anizotropia zmienności zawartości popiołu i siarki jest natomiast nieco wyraźniej zaznaczona (rys. 8 i 9), ale również nie powinna zauważalnie wpływać na wyniki ich szacowania i interpolacji.

Należy zwrócić uwagę, że modelowanie semiwariogramów anizotropowych dla dwóch ostatnich parametrów złożowych jest trudne z uwagi na nieregularne i skomplikowane przebiegi semiwariogramów spowodowane niestabilną strukturą zmienności i niezbyt licznym zbiorem danych.



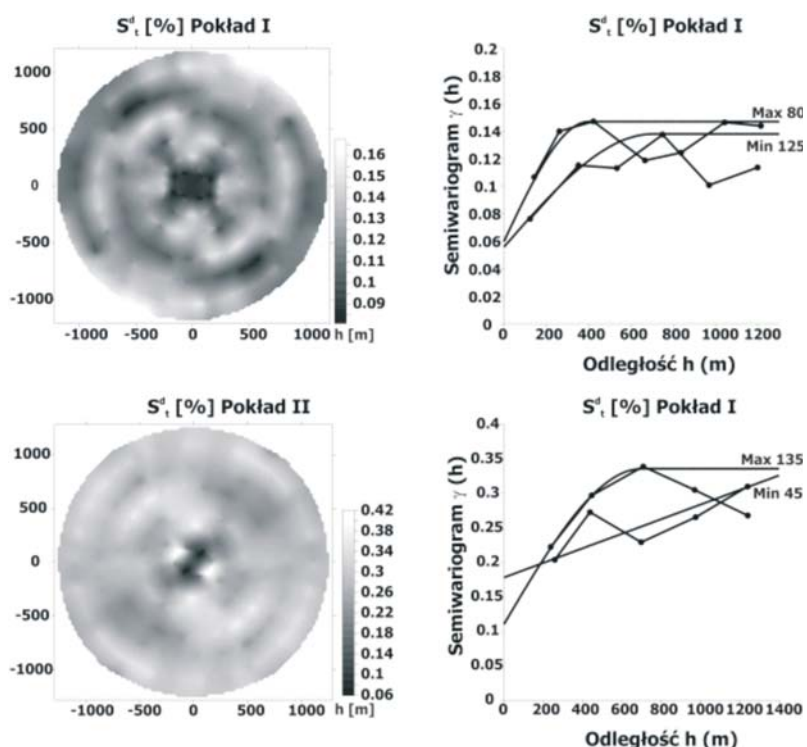
Rys. 7. Mapy zmienności kierunkowej miąższości (M) oraz wartości opałowej (Q_i^r) dla pokładu I (dolnego) oraz II (górnego) obrazujące izotropowy lub słabo anizotropowy charakter zmienności (złoże węgla brunatnego Gubin)

Fig. 7. Maps of directional semivariograms of the thickness and calorific value for seam I and seam II – showing the isotropic variability or the weak anisotropic variability (Gubin lignite deposit)



Rys. 8. Mapy zmienności kierunkowej oraz semiwariogramy kierunkowe zawartości popiołu (A^d) dla pokładu I oraz II o wyraźnie anizotropowym charakterze zmienności (złoże węgla brunatnego Gubin)

Fig. 8. Maps of directional semivariograms and directional semivariograms of the ash content for seam I and seam II – showing the anisotropic variability (Gubin lignite deposit)



Rys. 9. Mapy zmienności kierunkowej oraz semiwariogramy kierunkowe zawartości siarki (S_d^d) dla pokładu I oraz II o słabo anizotropowym charakterze zmienności (złoże węgla brunatnego Gubin)

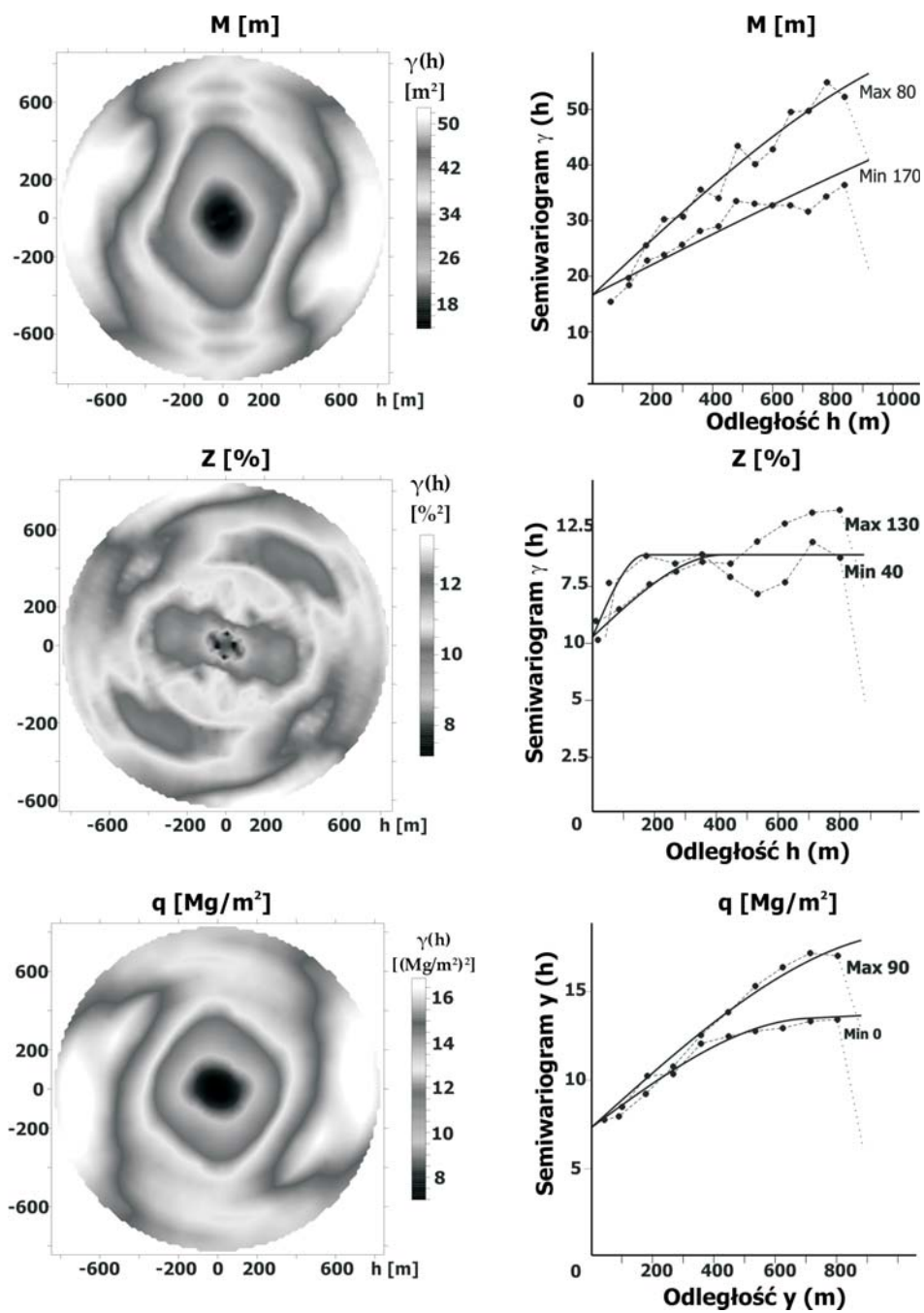
Fig. 9. Maps of directional semivariograms and directional semivariograms of the sulphur content in seam I and seam II – showing the weak anisotropic variability (Gubin lignite deposit)

Dodatkowym utrudnieniem przy tworzeniu modeli anizotropowych zmienności zawartości siarki i popiołu są z reguły nieortogonalne kierunki minimalnej i maksymalnej zmienności oraz często odmienny charakter przebiegu semiwariogramów kierunkowych.

Parametry złoża siarki Osiek wykazują wyraźniej zaznaczoną anizotropię zmienności, ale ujawniającą się dobitniej dopiero w większej skali obserwacji, odpowiadającej odległości między punktami złoża rzędu 600 m (rys. 10). Kierunki minimalnej i maksymalnej zmienności parametrów złożowych są prostopadłe, a modelowanie semiwariogramów kierunkowych nie nastęrcza większych kłopotów, co wynika z większej stabilności struktury zmienności parametrów tego złoża i bardzo licznego zbioru danych.

5. Geostatystyczna interpolacja wartości parametrów złożowych

Podstawowym zastosowaniem interpolacji wartości parametrów złożowych, dokonywanej w odpowiednio gęstej i regularnej sieci punktów, jest skonstruowanie na bazie jej wyników map izoliniowych. Wykorzystuje się w tym celu geostatystyczną procedurę kringingu punktowego (Mucha 1994; Kokesz 2006). W jej ramach wartości parametru szacowane są



Rys. 10. Mapy zmienności kierunkowej oraz semiwariogramy kierunkowe miąższości (M), zawartości składnika użytecznego (Z) oraz zasobności (q) (złoże siarki Osiek)

Fig. 10. Maps of directional semivariograms of thickness (M), sulphur content (Z) and accumulation index (q) (Osiek sulphur deposit)

za pomocą algorytmu średniej ważonej. Dokładność oszacowań uzależniona jest od modelu zmienności parametru oraz liczby i położenia punktów opróbowań względem punktów interpolacji. Wyniki interpolacji zilustrowano na przykładzie map izolinowych miąższości złoża siarki Osiek opartej na kwadratowej sieci interpolacyjnej o rozstawie 25 m (rys. 11). Mapy te zostały wykonane w kilku wersjach:

- dla dwóch rodzajów modeli zmienności: izotropowego (opartego na semiwariogramach uśrednionych) i anizotropowego (opartego na semiwariogramach kierunkowych),
- dla 3 wariantów liczby punktów opróbowań uwzględnionych w algorytmie interpolacyjnym: 4, 8 i 16 punktów opróbowań najbliższych danemu punktowi interpolacyjnemu.

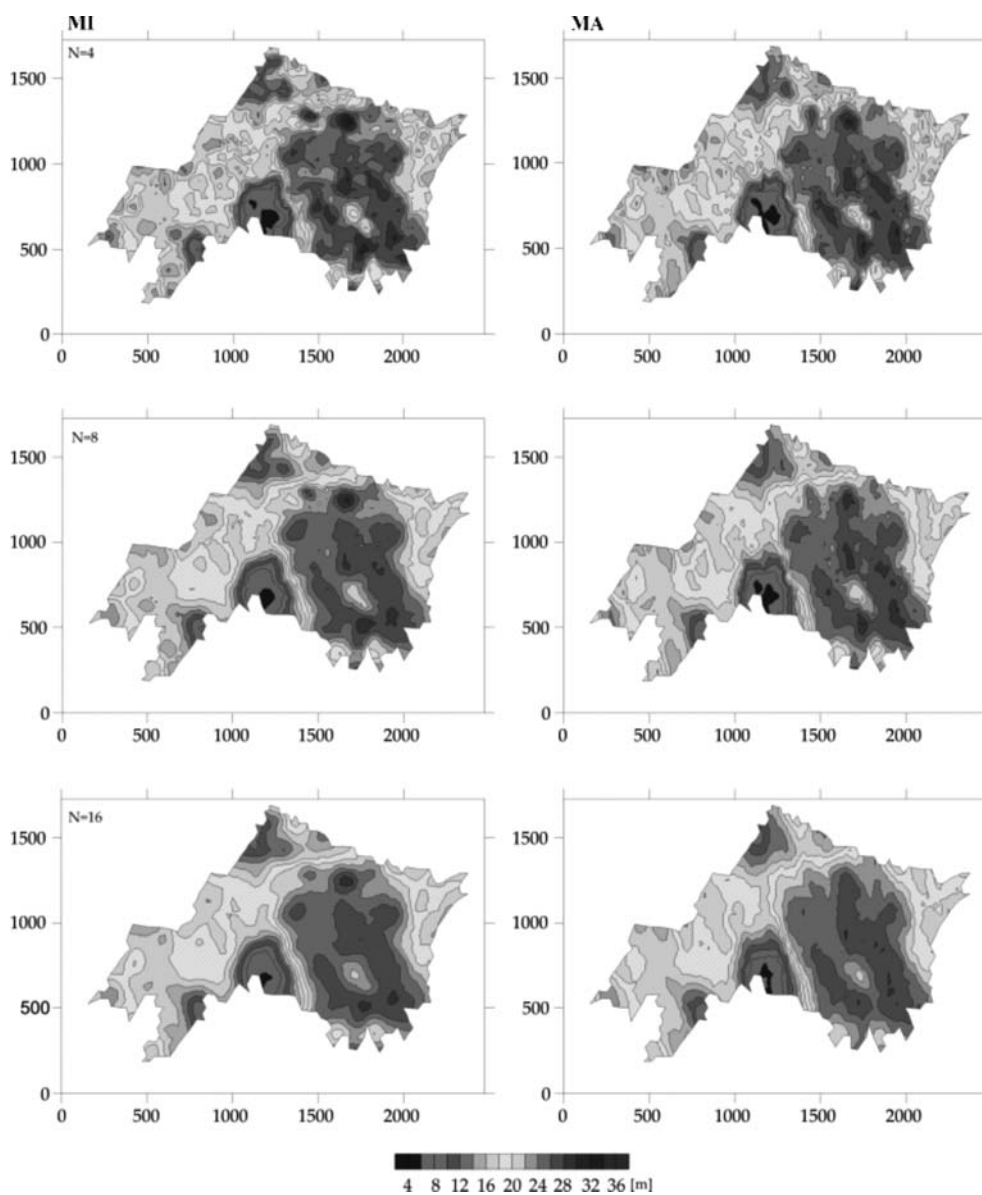
Wizualne porównanie map pozwala na wstępne stwierdzenie braku istotnych różnic w gęstości i przebiegu izolinii oraz zauważalnego zróżnicowania map w zależności od tego, czy zastosowano model zmienności izotropowy czy anizotropowy. Wyraźniej uwidacznia się natomiast zależność rozmieszczenia i gęstości izolinii w zależności od doboru liczby najbliższych obserwacji uwzględnionych w algorytmie interpolacyjnym. W miarę wzrostu liczby obserwacji odnotowuje się widoczne zatarcie obrazu zróżnicowania tego parametru. Można więc przypuszczać, że dla małej liczby obserwacji (4) lepiej ujawnia się zmienność lokalna parametru ważna dla krótkoterminowego planowania eksploatacji, natomiast dla dużej liczby obserwacji (16) lepiej ukazany jest generalny trend zmian parametru.

Jakość interpolacji wszystkich analizowanych parametrów złoża siarki dla dwóch typów modeli zmienności oraz trzech wariantów liczby danych oceniono ilościowo:

- wyznaczając wartości współczynnika korelacji liniowej między wartościami parametrów stwierdzonymi i wyinterpolowanymi na podstawie danych z otoczenia w punktach opróbowań oraz
- przez porównanie skrajnych wartości parametrów w punktach opróbowań i wartości oszacowanych w węzłach sieci interpolacyjnej (tab. 5).

Relatywnie wysokie wartości współczynników korelacji wskazują na poprawność zaproponowanych geostatystycznych modeli zmienności. Najlepsze rezultaty zgodności oszacowań z wartościami rzeczywistymi parametrów odnotowuje się dla miąższości złoża i zasobności siarki, w zmienności których silnie jest zaznaczony składnik nielosowy zmienności. Najistotniejszą informacją wynikającą z analizy współczynników korelacji jest stwierdzenie braku wyraźnych różnic między oszacowaniami, w których zastosowano model izotropowy i anizotropowy zmienności. Można to wiązać z faktem, że odległości między punktami, w których dokonano oszacowania (punktami opróbowań) a wykorzystanymi do tego celu obserwacjami z otoczenia są stosunkowo niewielkie (do 100 m), a dla odległości tego rzędu maksymalne zróżnicowanie semiwariogramów kierunkowych jest znikome.

Wyraźnie mniejszy zakres zmienności wyinterpolowanych wartości parametrów niż ma to miejsce w przypadku wartości parametrów dla danych opróbowań, odzwierciedla niekorzystne zjawisko wygładzania danych związane z większością procedur interpolacyjnych. Należy jednak zwrócić uwagę na fakt, że dla małej liczby obserwacji uwzględnianych w interpolacji (w opisywanym przykładzie 4) uzyskane zakresy są najszersze, a w miarę powiększania liczby dobieranych obserwacji ulegają zawężeniu. Można na tej podstawie wnioskować, że stosowanie czterech najbliższych punktom interpolacji obserwacji prowadzi do powstania map izolinowych najlepiej odzwierciedlających rozkład



Rys. 11. Mapy izoliniowe miąższości złoża siarki rodzimej Osiek (kriging zwyczajny z wykorzystaniem $N = 4, 8, 16$ punktów zliczenia danych, MI – geostatystyczny model izotropowy, MA – geostatystyczny model anizotropowy)

Fig. 11. Contour maps of the Osiek sulphur deposit (ordinary point kriging method based on $N = 4, 8, 16$ nearest observations, MI – geostatistical isotropic model, MA – geostatistical anisotropic model)

przestrzenne wartości parametru. Potwierdzenie tego wniosku mogą stanowić wyższe niż dla większej liczby obserwacji (8, 16) wartości współczynników korelacji liniowej wartości szacowanych i rzeczywistych.

TABELA 5. Minimalne i maksymalne wartości parametrów złożowych w punktach opróbowań i punktach interpolacji oraz współczynniki korelacji liniowej wartości wyinterpolowanych i stwierdzonych w punktach opróbowań

TABLE 5. Minimum and maximum values of the parameters in the sampling points, interpolation points and coefficients of linear correlation between interpolated and measured values of parameters

Parametr złożowy	Typ modelu	Liczba danych	z_{\min}	z_{\max}	z^*_{\min}	z^*_{\max}	Współczynnik korelacji liniowej z i z^*
M [m]	MI	4	2,4	35,2	5,31	31,95	0,90
		8			5,53	30,27	0,88
		16			5,93	28,88	0,87
	MA	4	2,4	35,2	4,76	31,47	0,88
		8			5,26	29,04	0,86
		16			5,65	28,21	0,84
Z [%]	MI	4	6,8	33,0	14,58	27,90	0,74
		8			16,95	27,88	0,64
		16			18,54	26,50	0,60
	MA	4	6,8	33,0	14,44	27,76	0,74
		8			14,90	27,28	0,70
		16			17,31	26,85	0,67
q [Mg/m ²]	MI	4	1,16	33,97	2,20	17,04	0,84
		8			2,61	15,77	0,79
		16			2,88	14,86	0,78
	MA	4	1,16	33,97	1,64	23,80	0,84
		8			2,46	15,36	0,79
		16			2,75	14,45	0,76

Objaśnienia: M – miąższość, Z – zawartość siarki, q – zasobność jednostkowa, MI – model izotropowy (dla semiwariogramu uśrednionego), MA – model anizotropowy (oparty na semiwariogramach kierunkowych), z – wartości stwierdzone (rzeczywiste), z^* – wartości oszacowane (interpolowane w punktach opróbowań)

Wnioski

Procedura geostatystycznego modelowania parametrów rozpatrywanych złóż jest znacznie łatwiejsza w przypadku eksploatowanego złoża siarki rodzimej Osiek niż niezagospodarowanego złoża węgla brunatnego Gubin. Wynika to z większej stabilności struktury zmienności parametrów złoża siarki. Skomplikowaną strukturę zmienności parametrów złoża węgla brunatnego można wiązać ze złożoną jego genezą, a w szczególności destrukcyjnym oddziaływaniem lodowca na powstałe pierwotnie złożo i jego wpływem na ostateczne jego uformowanie. Może to potwierdzać wysuniętą wcześniej hipotezę o związku postaci modeli semiwariogramów z genezą złoża (Nieć i in. 1988). Pełna weryfikacja

tej hipotezy wymagałaby jednak wykonania niezwykle szczegółowych i kosztownych badań.

Cechy geostatystyczne parametrów obu badanych złóż wskazują generalnie na występowanie wyraźnie zaznaczonych prawidłowości zmian ich wartości w przestrzeni złożowej. Uzasadnia to celowość wykorzystania wysoce efektywnych w takich przypadkach metod geostatystycznych do szacowania zasobów i jakości kopaliny oraz konstruowania map izolinowych.

Anizotropię zmienności badanych parametrów można ocenić jako słabą lub co najwyżej umiarkowaną. Potwierdzają to wyniki badania dokładności interpolacji punktowej wartości parametrów złoża siarki, które nie wykazały przewagi modeli geostatystycznych uwzględniających zmienność kierunkową parametrów nad modelami geostatystycznymi zakładającymi izotropowy charakter ich zmienności. Z uwagi na zbliżoną siłę anizotropii zmienności parametrów obu złóż można przyjąć, że również w przypadku szacowania parametrów złoża węgla brunatnego Gubin uzyskanie w pełni satysfakcjonujących wyników zapewnia stosowanie prostszych modeli izotropowych.

W procedurze interpolacyjnej wartości parametrów złożowych można rekomendować wykorzystywanie danych jedynie z czterech punktów rozpoznania, najbliższych kolejnym punktem interpolacji. Zapewnia to lepsze odwzorowanie rozmieszczenia wartości parametrów złożowych od tego, jakie uzyskuje się przy doborze większej liczby obserwacji, a ponadto przynajmniej częściowo eliminuje wpływ niekorzystnego efektu wygładzania danych zacierających zmienność lokalną.

Praca wykonana w ramach badań statutowych Katedry Geologii Złożowej i Górniczej AGH nr 11.11.140.562

Literatura

- Bartuś T., 2012 – Anizotropia zmienności głównych parametrów jakości węgla brunatnego w polu Bełchatów. *Gospodarka Surowcami Mineralnymi* t. 28, z. 2, s. 5–29.
- Dytkowski K., Gorczyca J., Socha R., Zborowski J., 2008 – Geologiczno-górnice uwarunkowania eksploatacji złoża siarki „Osiek” w aspekcie ochrony środowiska i zagrożeń naturalnych. *Miesięcznik WUG*, Nr 6(166), Katowice.
- Engel W., Jędrzejczak B., Patrzyk J., 1969 – Kompleksowa dokumentacja geologiczna złoża węgla brunatnego „Gubin” w kat. C2, C1 i B. Część ogólna.
- Kasiński J.R., 2008 – Potencjał zasobowy węgla brunatnego w Polsce ze szczególnym uwzględnieniem kompleksów złóż gubińskich i legnickich. *Prace Państw. Inst. Geol.*, Warszawa.
- Kokesz Z., 1991 – Geostatistical reserves estimation for native sulphur deposits mined by underground melting. *Science de la Terre*, ser. Inf., Nancy, nr 31, p. 223–238.
- Kokesz Z., 2006 – Application of linear geostatistics to evaluation of Polish mineral deposits. *Gospodarka Surowcami Mineralnymi* t. 22, z. 2, s. 53–65.
- Kowalik J., Piskorz S., Śmiech S., Piskorz A., 1979 – Dokumentacja Geologiczna w kat. C₁ złoża siarki rodzimej „Osiek”. Kielce.
- Mucha J., 1994 – Metody geostatystyczne w dokumentowaniu złóż. Wydawnictwo AGH, Kraków.
- Mucha J., Słomka T., Mastej W., Bartuś T., Jończyk M., Frankowski R., 2004 – Modelowanie zmienności i dokładność oszacowania jakości węgla brunatnego w złożu Bełchatów (pole Bełchatów). *Mat. Symp. Warsztaty 2004 z cyklu „Zagrożenia naturalne w górnictwie”*. Wyd. IGSMiE PAN, Kraków, ss. 221–232.
- Naworyta W., 2008 – Analiza zmienności parametrów złożowych węgla brunatnego pod kątem sterowania jakością strumienia urobku. *Gospodarka Surowcami Mineralnymi* t. 24, z. 2/4, IGSMiE PAN, Kraków, s. 97–110.

- Nieckula M., 2010 – Geostatystyczne badanie anizotropii zmienności parametrów złoża węgla brunatnego „Gubin”. Pr. dypl., Arch. KGZiG AGH, Kraków.
- Nieć M., 1977 – Metodyka rozpoznawania złóż siarki na potrzeby eksploatacji otworowej. *Geologia – kwartalnik* – t. 3, z. 2, Wydawnictwa Geologiczne, Warszawa.
- Nieć M., 1996 – Surowce mineralne Polski. Surowce energetyczne. Węgiel brunatny. (red. R. Ney), Wyd. CPPGSMiE PAN, Kraków, s. 291–333.
- Nieć M., Mucha J., Kokesz Z., 1988 – Geological background for geostatistical models. *Science de la Terre*, ser. Inf., Nancy nr 27, s. 263–278.
- Różycki Z., 1992 – Sprawozdanie z prac geologiczno – badawczych w kat. C1 na złożu węgla brunatnego „Gubin”.
- Wójcikowska M., 2010 – Analiza zmienności wybranych parametrów złoża siarki rodzimej „Osiek”. Pr. dypl., Arch. KGZiG AGH, Kraków.