

## Struktura zmienności parametrów polskich złóż węgla kamiennego – spojrzenie na cztery dekady badań geostatystycznych

Justyna Auguścik-Górajek<sup>1</sup>, Jacek Mucha<sup>2</sup>, Monika Wasilewska-Błaszczyk<sup>2</sup>



J. Auguścik-Górajek



J. Mucha



M. Wasilewska-Błaszczyk

**The structure of variability of parameters of Polish hard coal deposits: a look at four decades of geostatistical research.** *Prz. Geol.*, 74: 388–396; doi: 10.7306/2026.34

**Redaktor prowadzący: Paweł Urbański**

*Abstract.* A comprehensive review of the literature, combined with an analysis of authors' research on the geostatistical characterization of variability structures in Polish bituminous coal deposits, has revealed substantial heterogeneity in the semivariogram models and their parameters. This diversity impedes the development of a generalized variability model that could be applied for the rapid estimation of deposit parameters at both the block scale and the point scale. Geostatistical investigations

conducted over more than four decades in the Upper Silesian and Lublin coal basins, which encompass numerous seams and deposits, are not easily comparable, constraining the establishment of unambiguous relationships between geostatistical models and the geological processes governing coal seam formation. The main factors limiting both the generalization and the geological interpretation of the variability structure include: frequently insufficient data sets (particularly in categories  $C_1$  and  $C_2$ ), the unknown magnitude of sampling errors and their impact on semivariogram shape, evolving criteria for deposit classification, uncertainty in seam correlation, and the use of different semivariogram estimators. Despite these limitations, the analysis of available materials allowed the identification of examples of relationships between specific semivariogram forms and geological attributes of coal seams. This finding confirms the potential of geostatistics as a valuable tool to interpret the spatial variability of the deposit parameters within a geological framework.

**Keywords:** bituminous (hard) coal, coal seam parameters, geostatistics, semivariogram, spatial variability

W badaniach polskich złóż węgla kamiennego historia zastosowań geostatystyki, której podstawy sformułował Georg Matheron (1962, 1963), obejmuje ponad cztery dekady. Pierwszą polską publikacją z tej dziedziny jest artykuł Peronia (1984) dotyczący zmienności zawartości popiołu, wartości opałowej oraz zawartości części lotnych w węglu kamiennym jednego z pokładów Górnośląskiego Zagłębia Węglowego (GZW). W pracy tej zamieszczono także semiwariogramy powierzchni warstw (rzędna stropu karbonu, rzędna spągu pokładu), traktowane jako zmienne strukturalne wspierające interpretację nieciągłości tektoniczno-sedymentacyjnych. Najwięcej geostatystycznych badań polskich pokładów węgla realizowano w Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie, nieco mniej w Centralnym Ośrodku Informatyki Górnictwa w Katowicach, Instytucie Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią Polskiej Akademii Nauk w Krakowie oraz na Politechnice Śląskiej w Gliwicach. Osiągnięcia krajowych ośrodków badawczych w dziedzinie geostatystycznego modelowania parametrów złóż węgla kamiennego należy uznać za znaczące. Świadczy o tym bogaty dorobek publikacyjny (patrz tab. 1 i 2).

Zasadniczym celem artykułu jest odpowiedź na pytanie: czy dotychczasowy stan badań nad strukturą zmienno-

ści parametrów złożowych pokładów węgla kamiennego w Polsce umożliwia powiązanie geostatystycznych modeli zmienności (semiwariogramów teoretycznych) i ich parametrów z budową geologiczną pokładów oraz procesami formującymi złoża. W tym kontekście przeprowadzono przegląd literatury naukowej oraz materiałów konferencyjnych, w których zmienność parametrów złożowych w pokładach węgla kamiennego była opisywana za pomocą semiwariogramów. Analiza dostępnych publikacji pozwoliła na usystematyzowanie i przedstawienie najistotniejszych wyników badań oraz ocenę zakresu możliwych interpretacji geologicznych modeli geostatystycznych.

### PODSTAWY TEORETYCZNE I METODYKA BADAŃ

Podstawowym narzędziem do opisu zmiennych zregionalizowanych i modelowania geostatystycznego jest semiwariogram (Armstrong, 1998). W geologii górniczej jest on wykorzystywany do ilościowej oceny zależności między średnim zróżnicowaniem wartości parametrów złożowych a odległością między punktami pomiarowymi (Mucha, 1994). Analiza semiwariogramów pozwala określić główne cechy struktury zmienności, takie jak: ciągłość zmian (płynność

<sup>1</sup> Instytut Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią Polska Akademia Nauk, ul. J. Wybickiego 7A, 31-261 Kraków; [auguscik@min-pan.krakow.pl](mailto:auguscik@min-pan.krakow.pl); ORCID ID: 0000-0003-1162-1980

<sup>2</sup> AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska, al. A. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków; [jacekm@agh.edu.pl](mailto:jacekm@agh.edu.pl); [wasilews@agh.edu.pl](mailto:wasilews@agh.edu.pl); ORCID ID: J. Mucha – 0000-0001-6366-083X; M. Wasilewska-Błaszczyk – 0000-0003-0042-9782

**Tab. 1.** Publikacje dotyczące zastosowania metod geostatystycznych do analizy zmienności miąższości i parametrów jakościowych pokładów węgla kamiennego w Górnośląskim (GZW) i Lubelskim Zagłębiu Węglowym (LZW) z wykorzystaniem klasycznego semiwariogramu Matherona

**Table 1.** Publications on the application of geostatistical methods for analysing thickness and quality parameter variability in bituminous coal seams of the Upper Silesian (GZW) and Lublin (LZW) coal basins using the classic Matheron semivariogram

Zagłębie węglowe Coal basin	Kopalnia/złoże (pokład) Mine/deposit (seams)	Literatura Reference	M	S	A	Q	V	$\rho$	q
GZW	brak inf. / no data	Peroń, 1984	+		+		+		
	Staszic (364,401, 404/5, 405, 407/1, <b>501</b> , 510)	Kokesz, Mucha, 1987b; Nieć i in., 1988; Mucha, 1994; Kokesz, 2006a, 2006b, 2007, 2009, 2010a, 2013, 2014a, 2014b	+	+	+				
	Oświęcim-Polanka (209, 214, 216, 301, 342)	Kokesz, 1988, 2006a, 2007, 2014a	+						
	Wesoła (349, 401)	Nieć i in., 1988; Kokesz, 2006a	+						
	Kazimierz-Juliusz (349, <b>409/1-2</b> , 409/1, 409/2, 418, 510)	Kokesz, 1990, 2006b, 2007, 2013, 2014a	+			+		+	
	Polska-Wirek (416, 502)	Kokesz, 2006a, 2007, 2013, 2014a	+						
	Brzeszcze ( <b>352</b> , <b>405/1</b> )	Kokesz, 2006a, 2007, 2014a; Mucha i in., 2007	+	+	+	+			
	Murcki ( <b>330,334/2</b> , <b>349</b> )	Mucha, Wasilewska, 2005a; Wasilewska, Mucha, 2005; Wasilewska, 2007; Mucha, Wasilewska-Błaszczuk, 2014	+	+	+				
	Zofiówka (403, <b>403/1</b> , 407/2-3, 407/2, <b>407/3</b> )	Kokesz, Mucha, 1987b; Dzedziej, Kotulski, 1990; Mucha, 1994; Kokesz, 2006a, 2010a, 2014b	+	+	+				
	Sośnica ( <b>358/1</b> )	Mucha, Kokesz, 1986; Kokesz, 2006a	+		+				
	Wieczorek (400/4, <b>402</b> , <b>404</b> , <b>404/1</b> )	Mikrut, Polak, 1987; Kokesz, 2006a, 2007, 2010a, 2014a	+	+	+				+
	Piast ( <b>205/4</b> , <b>206/1-2</b> , <b>207</b> )	Mucha, Kokesz, 1986; Mucha i in., 2007; Wasilewska, 2007; Mucha, Wasilewska-Błaszczuk, 2014; Kokesz 2010a, 2014b	+	+	+	+			
	Janina ( <b>116/2</b> , <b>118</b> )	Mucha i in., 2007	+	+	+	+			
	Bielszowice (358/1, <b>418</b> )	Kokesz, 2010a, 2013, 2014b	+	+	+				
	Dąb (207)	Mucha i in. 2010b, Mucha, Wasilewska-Błaszczuk, 2011	+						
Ziemowit (308)	Paszek i in., 2016		+	+					
LZW	LW Bogdanka ( <b>382</b> , <b>385/2</b> , 394)	Mucha, Kokesz 1986; Kokesz, Mucha, 1987a, b; Mucha, 1994; Mucha i in., 2007; Mucha, Wasilewska-Błaszczuk, 2014	+	+	+	+			

**Objaśnienia:** M – miąższość [m], S – zawartość siarki [%], A – zawartość popiołu [%], Q – wartość opałowa [kJ/kg], V – zawartość części lotnych [%],  $\rho$  – gęstość przestrzenna [ $t/m^3$ ], q – zasobność węgla [ $t/m^2$ ]; \* pogrubiony numer pokładu (np. **382**) oznacza, że badano co najmniej dwa parametry tego pokładu

**Explanations:** M – thickness [m], S – sulphur content [%], A – ash content [%], Q – calorific value [kJ/kg], V – volatile matter [%],  $\rho$  – volumetric density [ $t/m^3$ ], q – coal accumulation [ $t/m^2$ ]; \* seam number in bold (e.g. **382**) indicates that studies for this seam were conducted for two or more parameters

**Tab. 2.** Zestawienie publikacji dotyczących zmienności parametrów złożowych w pokładach węgla kamiennego w GZW z wykorzystaniem alternatywnych estymatorów semiwariogramu (innych niż klasyczny semiwariogram Matherona)

**Table 2.** Summary of published studies on the variability of deposit parameters in bituminous coal seams of the Upper Silesian Coal Basin using alternative semivariogram estimators (other than the classic Matheron's semivariogram)

Parametr Parameter	Typ semiwariogramu Semivariogram type	Kopalnia: złoże (pokład) Mine: deposit (seam)	Literatura Reference
M, S, A	relatywny relative	Murcki: Wisła Północ, Wisła I-II (330, 333-1, 349, 209)	Mucha, Wasilewska-Błaszczuk, 2005b
S, A		Murcki: Wisła Północ, Wisła I-II (334-2, 349, 330, 209)	
M, S, Q, $\rho$		Dąb (118 i 207)	Mucha i in., 2010a, b
M		Staszic 407/1	Kokesz, 2014a
S		Piast-Ziemowit (209)	Paszek i in., 2018
P	o odwróconej kowariancji inverted covariance	Pniówek (357/1, 360/1, 361, 363, 401/1, 403/1, 404/2)	Morga, 2007

**Objaśnienia:** P – zawartość fosforu [%], pozostałe objaśnienia są pod tab. 1

**Explanations:** P – phosphorus content [%], for the other explanations see Table 1

przestrzenną), zasięg autokorelacji i udział składników losowych i nielosowych w całkowitej zmienności (ryc. 1). Parametry złożowe o silnej ciągłości zmian charakteryzują się dużym udziałem składnika nielosowego, co skutkuje niską wartością zmienności lokalnej ( $C_0$ ) w zmienności całkowitej. Znaczny zasięg autokorelacji oraz dominacja składnika nielosowego sprzyjają dokładniejszym oszacowaniom zasobów i jakości kopaliny w geostatystycznej procedurze krigingu. Na podstawie semiwariogramów kierunkowych można określić zmienność przestrzenną (izotropię lub też anizotropię). Podstawą krigingu, którego algorytm minimalizuje błąd estymacji wartości parametrów w punktach lub blokach, są funkcje analityczne ciągłe, dopasowane do semiwariogramów empirycznych, traktowane jako geostatystyczne modele zmienności. Klasyfikacje modeli teoretycznych szczegółowo opisali Mucha (1994), Armstrong (1998), Webster i Oliver (2001), Namysłowska-Wilczyńska (2006) oraz Zawadzki (2011).

W niniejszym artykule uwzględniono wyłącznie źródła opublikowane i materiały konferencyjne. Dostępne źródła dokumentują ponad 120 modeli zmienności (semiwarioramów empirycznych i teoretycznych) opisujących różne parametry pokładów węgla lub jego jakości. Dotychczasowy dorobek w zakresie geostatystycznego opisu pokładów polskich złóż węgla kamiennego zestawiono syntetycznie w tabelach 1 i 2.

### TRUDNOŚCI W GEOLOGICZNEJ INTERPRETACJI WYNIKÓW BADAŃ GEOSTATYSTYCZNYCH

W ciągu ponad 40 lat geostatystycznych badań polskich pokładów węgla kamiennego nastąpił intensywny rozwój metod badawczych, techniki obliczeniowej semiwariogramów, a także zwiększenie zaawansowania rozpoznania złóż i mocy obliczeniowej komputerów. Te liczne zmiany sprawiły, że porównywanie nowych i archiwalnych semiwariogramów parametrów jakościowych pokładów węgla i ich miąższości jest trudne. Możliwość syntetyzowania i generalizowania informacji o strukturze zmienności parametrów złożowych ograniczają m.in.:

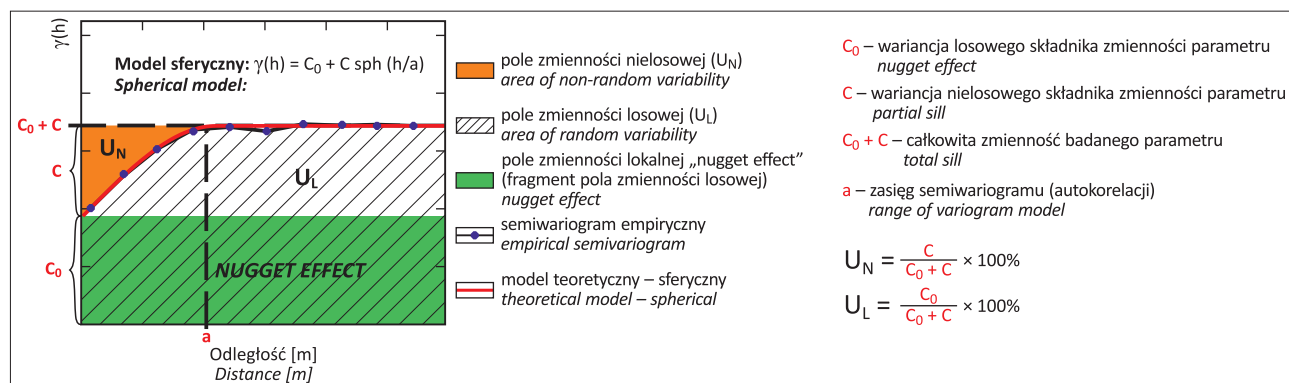
- mała liczba danych i różna metodyka opróbowania złóż;
- trudności metodologiczne i obliczeniowe;
- ograniczenia geologiczne i formalne.

### Ograniczenia związane z małą liczbą danych i różną metodyką opróbowania złóż

W ubiegłych latach do konstrukcji empirycznych semiwariogramów parametrów złożowych węgla kamiennego (szczególnie części złóż udokumentowanych w niższych kategoriach –  $C_1$ , a przede wszystkim  $C_2$ ) wykorzystywano zbiory danych o małej liczbie obserwacji. Ograniczało to wiarygodne modelowanie semiwariogramów izotropowych i w większym stopniu semiwariogramów kierunkowych, co skutkowało brakiem możliwości badania ważnej cechy zmienności parametrów złożowych, jaką jest ich anizotropia.

Kształt semiwariogramu empirycznego jest istotnie uzależniony od geometrii oraz wielkości próbek pobieranych z rdzeni wiertniczych i wyrobisk górniczych. Jednak w dokumentacjach geologicznych parametry pobieranych próbek zazwyczaj nie są wystarczająco dokładnie opisywane. Próbkę litych rdzeni wiertniczych pobiera się jako ich połówkę lub ćwiartki wycinane równoległe do osi walca. Z rdzeni okruchowych pobiera się próbki w objętości połowy lub  $1/4$  masy materiału skalnego rdzenia po uprzednim jego rozdrobnieniu w celu ujednoczenia. Z ociosów wyrobisk górniczych pobiera się natomiast próbki bruzdowe o dużej szerokości. W konsekwencji próbki z rdzeni wiertniczych i wyrobisk różnią się zarówno formą geometryczną (kształtem), jak i masą, co prowadzi do odmiennego stopnia uśrednienia parametrów charakteryzujących jakość węgla, a w konsekwencji przekłada się na zróżnicowaną postać semiwariogramów.

W dokumentacjach geologicznych złóż węgla kamiennego zazwyczaj nie jest opisywany błąd oszacowania parametrów jakościowych, jaki powstaje na etapie poboru próbek, przygotowania ich do badań i w toku analiz chemicznych. Błędy te mogą znacząco wpływać na postać obliczanych semiwariogramów. Pojawienie się wartości anomalnych, wynikających z tego rodzaju błędów, często maskuje nielosowy składnik zmienności parametru (Augustyk, Mucha, 2017). Błędy losowe opróbowania zwyżają wielkość modelowego parametru  $C_0$  (zmienności lokalnej), a w konsekwencji maksymalny poziom semiwariogramu teoretycznego i w następstwie przeszacowują prognozowane wielkości błędów krigingu oszacowania jakości i zasobów kopaliny. W wąskim ujęciu błąd opróbowania oznacza niewłaściwe pobranie próbki z calizny, niezgodne z założonym projektem opróbowania złoża, na przykład



Ryc. 1. Semiwariogram empiryczny aproksymowany modelem (semiwariogramem teoretycznym) sferycznym  
Fig. 1. An empirical semivariogram with a fitted spherical model

polega na pobraniu próbek o innej masie lub o innym kształcie, niż określono w projekcie. W szerszym ujęciu błąd opróbowania oznacza nieprawidłowości związane także z przygotowaniem próbek do analizy chemicznej, np. z suszeniem, kruszeniem, mieleniem, przesiewaniem i redukowaniem masy do wielkości próbki analitycznej, a także błąd samego oznaczenia. Wielkość tak rozumianego, łącznego błędu opróbowania najczęściej ocenia się liczbowo na podstawie bardzo starannie przeprowadzonego opróbowania kontrolnego w części punktów, w których pobrano próbki podstawowe. Porównanie zawartości składników w parach próbek (podstawowych i kontrolnych) z wykorzystaniem metod statystycznych (np. testu t-Studenta prób zależnych, nieparametrycznego testu Wilcoxon lub analizy regresji i korelacji liniowej) umożliwia zbadanie i ocenę wielkości błędu systematycznego i losowego związanego z opróbowaniem podstawowym (Mucha, Wasilewska, 2009).

### Trudności metodologiczne i obliczeniowe

Zmieniające się z biegiem czasu metody i techniki obliczeniowe semiwariogramów utrudniają porównywanie struktur zmienności różnych parametrów złożowych lub tych samych parametrów w różnych częściach złoża. Problemy sprawiają głównie:

- stosowanie różnych typów (estymatorów) semiwariogramów empirycznych;
- różne zasięgi przestrzenne obliczanych semiwariogramów, uzależnione od stopnia rozpoznania pokładów węgla (w kategoriach B i A).

- odmienne metody zliczania danych do konstruowania semiwariogramów, uzależnione od stosowania różnych programów komputerowych.

### Ograniczenia geologiczne i formalne

Trudności w interpretacji wyników badań geostatystycznych są potęgowane przez uwarunkowania:

- geologiczne, m.in. przez niepewność poprawności korelacji pokładów węgla kamiennego, wynikającą głównie z dużej liczby pokładów i bardzo skomplikowanej tektoniki, a także ze zmian technik rozpoznawania złóż;
- formalne, do których należy np. zmiana zasad wyznaczania granic złoża – polegająca na odejściu od kryteriów bilansowości określonych w Rozporządzeniu Ministra Środowiska z 2001 r. i wprowadzeniu w 2015 r. granicznych wartości parametrów definiujących złoża i jego granice (Rozporządzenie, 2015). Nowelizacja ta spowodowała odmienną kwalifikację miąższości i parametrów jakościowych w punktach opróbowania, co ogranicza porównywalność modeli semiwariogramów opracowanych w różnych okresach dokumentowania złóż.

### WYNIKI BADAŃ

Studium literatury dotyczącej zastosowań geostatystyki do oceny zasobów i jakości pokładów polskich złóż węgla kamiennego umożliwiło podsumowanie zakresu przeprowadzonych badań i ważniejszych wyników badań struktury zmienności parametrów złożowych.

**Tab. 3.** Estymatory semiwariogramów empirycznych wykorzystywane w badaniach struktury zmienności polskich złóż węgla kamiennego  
**Table 3.** Empirical semivariograms used in studies of the variability structure of Polish hard coal deposits

Nazwa estymatora <i>Estimator name</i>	Źródło <i>Reference</i>	Wzór matematyczny <i>Mathematical formula</i>	Optymalne zastosowanie i właściwości <i>Optimal application and characteristics</i>
Semiwariogram klasyczny <i>Classic semivariogram</i>	Matheron (1962, 1963)	$\gamma(h) = \frac{1}{2n_h} \sum_{i=1}^{n_h} (Z_{i+h} - z_i)^2$	Sprawdza się najlepiej, gdy rozkład prawdopodobieństwa jest symetryczny lub zbliżony do symetrycznego, a punkty opróbowania są rozmieszczone regularnie lub równomiernie <i>Best suited when the probability distribution is symmetric or nearly symmetric, and sampling points are regularly or evenly spaced</i>
Semiwariogram relatywny <i>Relative semivariogram</i>	Cressie (1985)	$\gamma_R(h) = \frac{1}{2n_h} \sum_{i=1}^{n_h} \frac{(z_{i+h} - z_i)}{(\bar{z}_h)^2}$	W znacznym stopniu eliminuje efekt proporcjonalności, czyli wzrost zróżnicowania wartości parametrów wraz ze wzrostem ich średnich w różnych częściach złoża. Umożliwia bezpośrednie porównanie siły i struktury zmienności parametrów wyrażanych w różnych jednostkach <i>Effectively reduces the proportional effect, i.e., the increase in parameter variability with rising mean values across different parts of the deposit. Enables direct comparison of variability strength and structure for parameters expressed in different units</i>
Semiwariogram o odwróconej kowariancji <i>Inverted Covariance semivariogram</i>	Srivastava, Parker (1988)	$\gamma_{IC}(h) = s^2 - \frac{1}{2n_h} \sum_{i=1}^{n_h} (z_i - \bar{z}_{i+h})^2$	Zalecany jest w przypadku skomplikowanej zmienności analizowanych parametrów, np. silnej asymetrii rozkładów lub bardzo nieregularnego rozmieszczenia punktów opróbowania złoża <i>Recommended for complex variability patterns, e.g., strong distribution asymmetry or highly irregular spatial arrangement of sampling points</i>

**Objaśnienia:**  $\gamma(h)$  – wartość semiwariogramu;  $n_h$  – liczba par próbek oddległych o wektor  $\vec{h}$ ;  $z_i, z_{(i+h)}$  – wartości badanego parametru w punktach oddalonych o wektor  $\vec{h}$ ;  $\bar{z}_h, \bar{z}_{i+h}$  – średnie wartości parametru w parach punktów pomiarowych oddalonych o wektor  $\vec{h}$ ;  $s^2$  – wariancja próbkowa  
**Explanations:**  $\gamma(h)$  – value of the semivariogram;  $n_h$  – number of sample pairs separated by vector  $\vec{h}$ ;  $z_i, z_{(i+h)}$  – values of the analysed parameter at points separated by vector  $\vec{h}$ ;  $\bar{z}_h, \bar{z}_{i+h}$  – mean values of the parameter in pairs of points separated by vector  $\vec{h}$ ;  $s^2$  – sample variance

## Zakres geostatystycznych badań polskich złóż węgla kamiennego i wykorzystana metodyka

Głównym przedmiotem geostatystycznych analiz złóż GZW i LZW była struktura zmienności: miąższości pokładów węgla kamiennego, zawartości w nim siarki i popiołu oraz jego wartości opałowej. Sporadycznie analizowano także inne parametry złożowe, m.in. zawartość części lotnych, zawartość fosforu, gęstość przestrzenną kopaliny i zasobność węgla. Niektórzy autorzy, chcąc wesprzeć interpretację zmienności parametrów pokładowych, wyznaczali także semiwariogramy zmiennych strukturalnych, np. rzędnych stropu karbonu i stropu lub spągu pokładów węgla, w celu rozpoznania nieciągłości tektoniczno-sedymentacyjnych.

Do analizy przestrzennej zmienności parametrów złóż węgla kamiennego stosowano trzy rodzaje estymatorów semiwariogramów (tab. 3) – najczęściej klasyczny semiwariogram Matherona (88%), rzadziej semiwariogram relatywny (7%) i semiwariogram o odwróconej kowariancji – ang. *Inverted Covariance semivariogram* (5%). Niewielki udział procentowy w stosowaniu semiwariogramów relatywnych (7%) uniemożliwia efektywne porównanie modeli geostatystycznych zmienności parametrów złożowych różnego rodzaju, jak również parametrów tego samego rodzaju w różnych partiach niejednorodnego złoża.

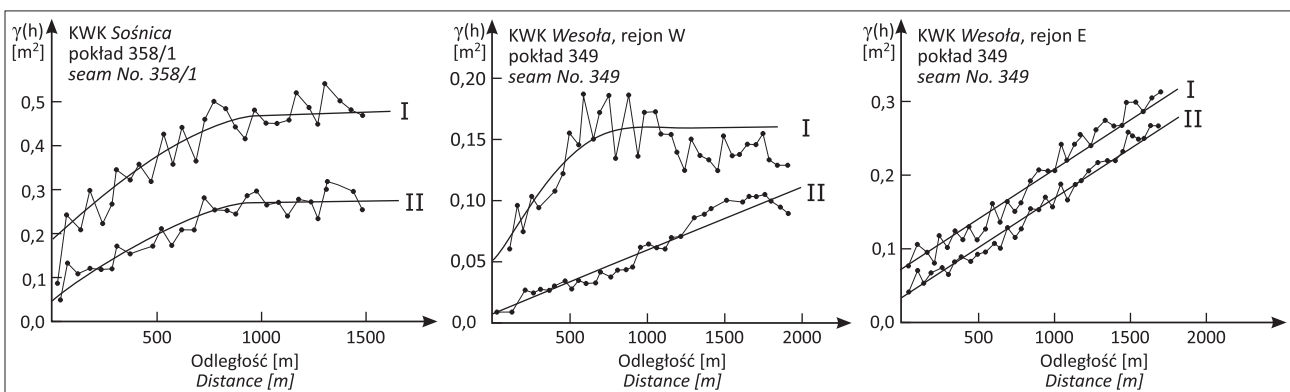
Ponadto od pierwszych badań tego typu upłynęło wiele lat i obecnie nie zawsze jest możliwe skorzystanie z archiwalnych zbiorów danych potrzebnych do wyznaczenia relatywnych semiwariogramów.

## Geologiczne uwarunkowania zmienności parametrów złożowych

Modele semiwariogramów wskazują na ogromne zróżnicowanie struktury zmienności miąższości pokładów węgla kamiennego i ich jakościowych parametrów złożowych – dotyczy to różnych polskich złóż węgla, a także różnych części pojedynczych pokładów. O zróżnicowaniu tym świadczą różne wartości zmienności lokalnej ( $C_0$ ), zmienności całkowitej ( $C_0 + C$ ) i zasięgu autokorelacji ( $a$ ).

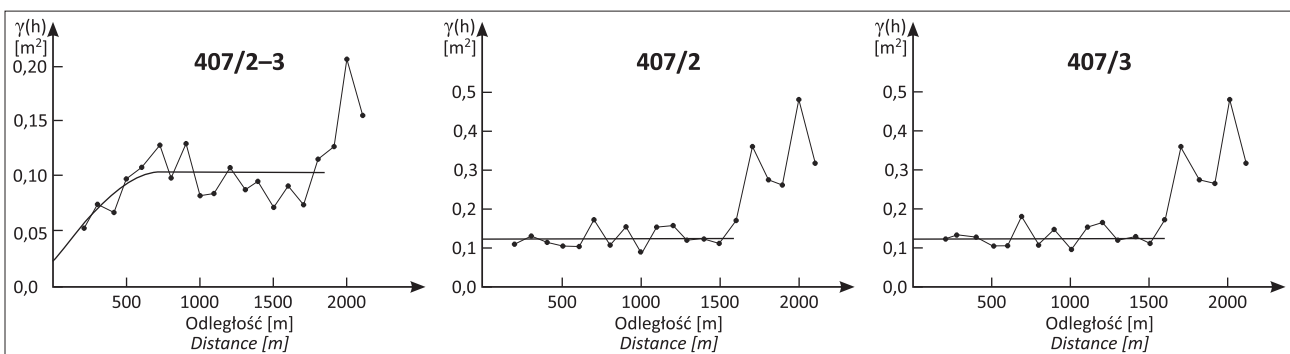
### Miąższość pokładów węgla kamiennego w Polsce.

Rozmaitość postaci semiwariogramów świadczy o złożonej i niejednorodnej strukturze zmienności miąższości pokładów węgla i warstw skał płonnych zalegających między nimi. W analizowanych publikacjach prezentowano różne modele teoretyczne semiwariogramów: liniowy, sferyczny, Gaussa, losowy i wykładniczy. Kształt semiwariogramów jest uzależniony także od występowania przerostów oraz miejsc rozszczepiania się pokładów węgla, które powodują zazwyczaj wzrost zmienności lokalnej ( $C_0$  i  $C + C_0$ ; ryc. 2 i 3; Kokesz, 2006a, 2014a). Często zjawiskiem jest także



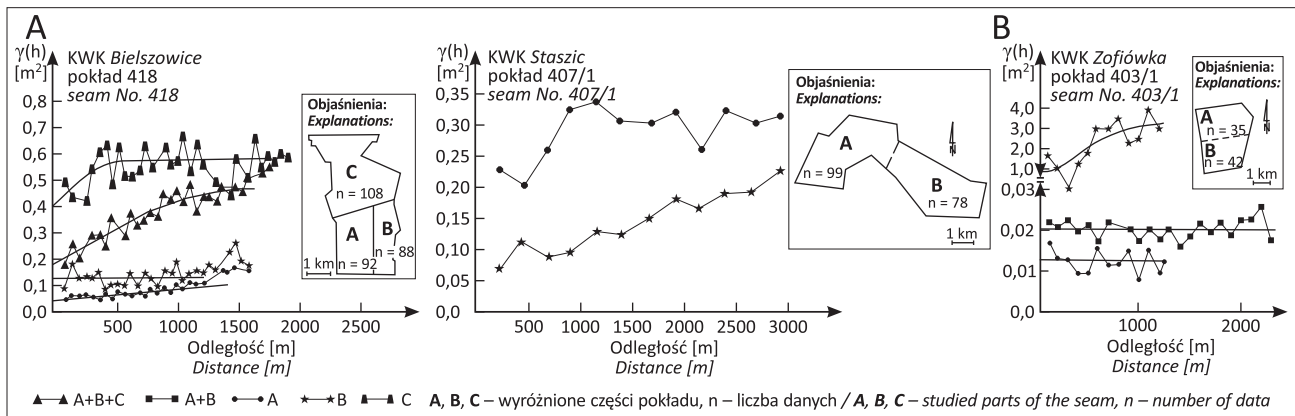
**Ryc. 2.** Klasyczne semiwariogramy Matherona wraz z dopasowanymi modelami geostatystycznymi miąższości pokładów węgla w kopalniach Górnośląskiego Zagłębia Węglowego: I – pokład węgla kamiennego z przerostami; II – pokład węgla kamiennego bez przerostów (Kokesz, 2006a)

**Fig. 2.** Classic Matheron's semivariograms with fitted geostatistical models of coal seam thickness in mines of the Upper Silesian Coal Basin: I – bituminous coal seam with partings; II – clean bituminous coal seam (Kokesz, 2006a)



**Ryc. 3.** Wpływ rozszczepienia pokładu 407/2-3, KWK Zofiówka na strukturę jego zmienności; dane z otworów wiertniczych i wyrobisk górniczych (Kokesz, 2006a)

**Fig. 3.** Impact of splitting of coal 407/2-3, Zofiówka mine splitting on the variability structure; data from boreholes and mine workings (Kokesz, 2006a)



**Ryc. 4.** Semiwariogramy ilustrujące obszarowe różnicowanie: **A** – miąższości pokładów węgla kamiennego (Kokesz, 2014a); **B** – zawartości siarki (Kokesz, 2010a)

**Fig. 4.** Semivariograms illustrating variability across different areas of the deposit: **A** – coal seam thickness (Kokesz, 2014a); **B** – sulphur content (Kokesz, 2010a)

obszarowe różnicowanie struktury zmienności miąższości tego samego pokładu, zobrazowane różnymi wartościami średnimi lub różną intensywnością zmienności (ryc. 4A; Nieć i in., 1988; Kokesz, 1990, 2006a, b, 2014a). Różnicowanie zasięgów semiwariogramów miąższości może wynikać z wyklinowania pokładu, jego rozszczepienia lub rozmyć wielkoobszarowych. Wskazuje się również na związek z synsedymencyjnymi ruchami tektonicznymi, np. największe różnicowanie miąższości pokładu 510 obserwuje się na skłonach niecki kazimierzowskiej i w strefach antyklinalnych, a najmniejsze w osiowej strefie niecki (Kokesz, 2007).

**Parametry jakościowe.** Zmienność zawartości siarki lub popiołu w węglu kamiennym i różnicowanie jego wartości opałowej przeważnie nie są losowe i najczęściej były opisywane modelem sferycznym lub Gaussa. Model Gaussa wskazuje, że na małych obszarach zmienność wymienionych parametrów jest zbliżona do losowej, a prawidłowości różnicowania pojawiają się dopiero na dużych obszarach. Zjawisko obszarowego różnicowania zawartości siarki w węglu, wyrażone odmiennym kształtem semiwariogramów, przedstawiono na ryc. 4B (Kokesz, 2010a). Odmienną strukturę zmienności zawartości siarki w różnych częściach pokładów można wiązać z różnymi procesami akumulacji siarczków żelaza, a także z występowaniem w węglu rozproszonej substancji mineralnej i cienkich przerostów skał płonnych (Kokesz, 2010a, b).

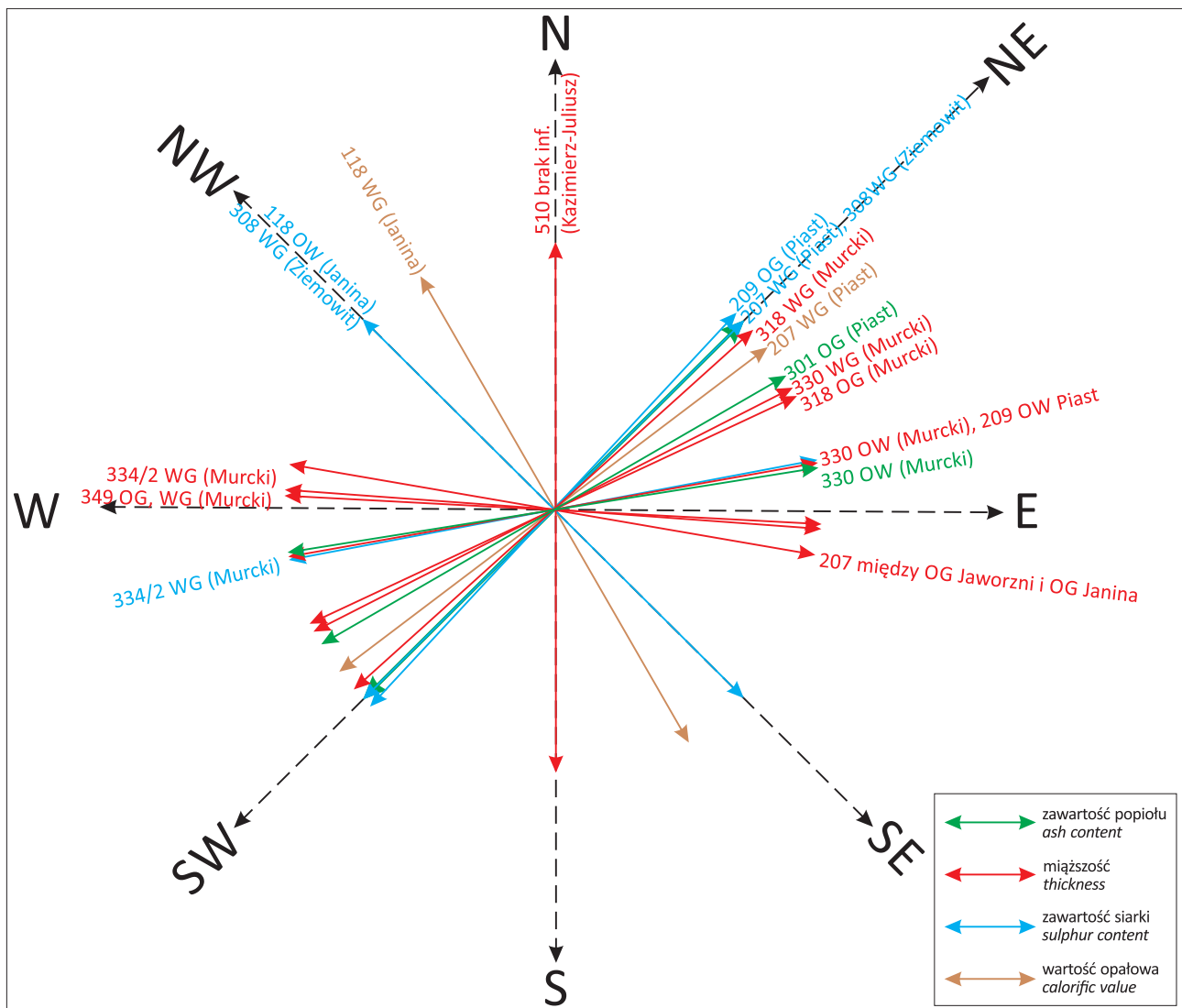
#### Zmienność kierunkowa parametrów złożowych

Ważnym elementem opisu struktury zmienności parametrów złożowych jest ich anizotropia (Kokesz, 2006b, 2013; Wasilewska, 2007; Mucha, Wasilewska-Błaszczuk, 2011, 2012; Paszek i in., 2016). Stwierdzenie wyraźnej anizotropii może być niezwykle przydatne do efektywnej oceny jakości i zasobów węgla kamiennego oraz szczegółowego rozpoznawania jego pokładów. Wyniki dotychczasowych badań wskazują, że anizotropię miąższości pokładów powodują m.in.: strefy rozmyć pokładów, ich rozszczepienia się lub wyklinowania (Kokesz, 2013). Maksymalne kierunki zmienności miąższości pokładów węgla kamiennego w Polsce i ich parametrów jakościowych (ryc. 5), wyznaczone na podstawie dostępnej

literatury, wskazują na dominację maksymalnej zmienności w sektorach kątowych 45–90° i 225–270°. Wyniki badania anizotropii zmienności zawartości popiołu i wartości opałowej w pokładzie 207 KWK *Piast* (ryc. 6.) pokazują, że struktura zmienności zawartości popiołu jest bliska izotropowej, a struktura zmienności wartości opałowej jest anizotropowa.

#### Stopień rozpoznania złoża

Porównywanie modeli semiwariogramów parametrów złóż o różnych kategoriach rozpoznania jest dużym wyzwaniem metodologicznym (Mucha i in., 2007). Zbiory danych o złożach rozpoznanych w niższych kategoriach ( $C_1$  i  $C_2$ ) często są nieliczne. Prowadzi to do niestabilności kształtu semiwariogramów empirycznych i trudności w modelowaniu oraz skutkuje uzyskiwaniem wysokich wartości amplitudy semiwariogramu, w porównaniu z kategoriami o lepszym rozpoznaniu (ryc. 7). Włączenie do analizy liczniejszych danych pochodzących z rozpoznania złoża w wyższych kategoriach (A i B) rzadko daje spójny obraz zmienności z wynikami uzyskanymi na podstawie danych z rozpoznania w niższych kategoriach. Semiwariogramy utworzone na podstawie danych z rozpoznania złoża w kategorii A i B charakteryzują się wyraźnie niższymi wartościami  $C_0$  i  $C + C_0$  niż na wykresach obrazujących rozpoznanie złoża w kategorii  $C_1$  i  $C_2$ . Różnice w obrazie struktury zmienności parametrów złóż węgla kamiennego uzyskane na podstawie danych z rozpoznania złoża w kategoriach  $C_1$  i  $C_2$  lub A i B, wynikają z różnic w reprezentatywności przestrzennej opróbowania (2D). Dane z rozpoznania złóż w kategoriach  $C_1$  i  $C_2$  pochodzą głównie z rozproszonej sieci otworów wiertniczych, o dużym zasięgu przestrzennym w granicach danego złoża (lub obszaru górniczego) i niewielkiej gęstości punktów. Informacje o złożach rozpoznanych w kategoriach A i B pochodzą przede wszystkim z wyrobisk górniczych, które umożliwiają utworzenie gęstej sieci poboru próbek, lecz o ograniczonym zasięgu, skoncentrowanym w udostępnionych partiach pokładu w granicach tego złoża (lub obszaru górniczego). W warunkach istotnego różnicowania obszarowego tak zdefiniowany zbiór danych z wyrobisk może być niereprezentatywny dla całego obszaru występowania pokładu węgla w złożu, co dodatkowo utrudnia porównywanie modeli semiwariogramów z różnych kategorii rozpoznania złoża.



**Ryc. 5.** Generalne kierunki maksymalnej zmienności miąższości i parametrów jakościowych wybranych pokładów węgla kamiennego (Kokesz, 2006b, 2013; Wasilewska, 2007; Mucha, Wasilewska-Błaszczak, 2012)

**Fig. 5.** General directions of maximum variability in seam thickness and quality parameters in selected bituminous coal seams (Kokesz, 2006b, 2013; Wasilewska, 2007; Mucha, Wasilewska-Błaszczak, 2012)

Niewystarczająca liczba obserwacji złoża w kategoriach rozpoznania  $C_1$  i  $C_2$  często skutkuje niewłaściwym odzwierciedleniem struktury zmienności parametrów złożowych. Mała próbka może maskować udział składnika nielosowego zmienności, sugerując tym samym zmienność czysto losową. Według Webstera i Oliver (2001) do konstrukcji wiarygodnych modeli semiwariogramów uśrednionych (izotropowych) jest wymaganych co najmniej 100 obserwacji, a do konstrukcji semiwariogramów kierunkowych – minimum 250 danych. W świetle tych kryteriów większość historycznych zbiorów danych o polskich złożach węgla kamiennego rozpoznanych w niższych kategoriach ( $C_1$  i  $C_2$ ) jest niewystarczająca do utworzenia semiwariogramu. Na przykład, badając niektóre parametry jakościowe, analizowano zbiory danych liczące zaledwie 17–29 obserwacji (np. Peroń, 1984; Kokesz, 1990; Morga, 2007).

#### PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Na podstawie wyników studium literatury przedmiotu stwierdzono, że geostatystyczne badania polskich złóż węgla kamiennego koncentrowały się na optymalizacji

prognozy wielkości zasobów, estymacji średnich wartości parametrów złożowych oraz ich prezentacji w formie map izoliniowych. Wyniki tych badań odgrywają kluczową rolę w praktyce geologiczno-górnictwej, zwłaszcza w kontekście projektowania scenariuszy eksploatacyjnych i prognozowania ekonomicznej rentowności działalności wydobywczej.

Fundamentalnym elementem geostatystycznych oszacowań zasobów i jakości kopaliny jest charakterystyka struktury zmienności parametrów złożowych, realizowana poprzez analizę semiwariogramów empirycznych oraz ich aproksymację modelami geostatystycznymi. Szczegółowe badania, mające na celu powiązanie struktury zmienności parametrów złożowych z cechami geologicznymi pokładów węgla kamiennego, podejmowano jednak sporadycznie, ponieważ wyniki takich analiz mają przede wszystkim znaczenie poznawcze, a nie aplikacyjne, co ogranicza zainteresowanie nimi podmiotów przemysłu wydobywczego, skupionego na projektowaniu eksploatacji z uwzględnieniem uwarunkowań geologicznych istotnych dla bezpieczeństwa i efektywności wydobycia. Szczególnie istotną rolę odgrywa w tych analizach trafna prognoza tektoniki uskokowej.

Formułowanie wniosków o geologicznych uwarunkowaniach obserwowanej struktury zmienności jest obarczone dużym ryzykiem, co wynika z ograniczeń wiarygodnej interpretacji semiwariogramów oraz możliwości porównywania semiwariogramów parametrów różnych pokładów i złóż. Źródła tych trudności są różne i obejmują m.in.: niedostateczną liczbę danych o złożach węgla kamiennego (zwłaszcza rozpoznanych w kategoriach C<sub>1</sub> i C<sub>2</sub>), zróżnicowaną geometrię i wielkość próbek pobieranych z rdzeni wiertniczych i wyrobisk górniczych, nieznaną skalę błędów opróbowania oraz ich wpływu na kształt semiwariogramów, zmiany kryteriów bilansowości złóż, stosowanie różnych estymatorów semiwariogramów empirycznych oraz niepewność wynikającą z konieczności weryfikacji korelacji pokładów na kolejnych etapach rozpoznania.

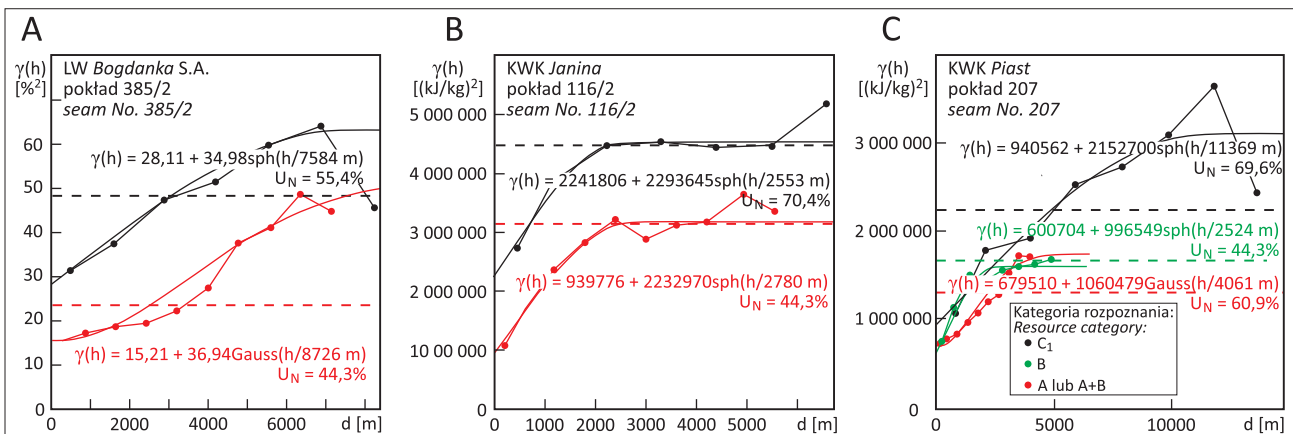
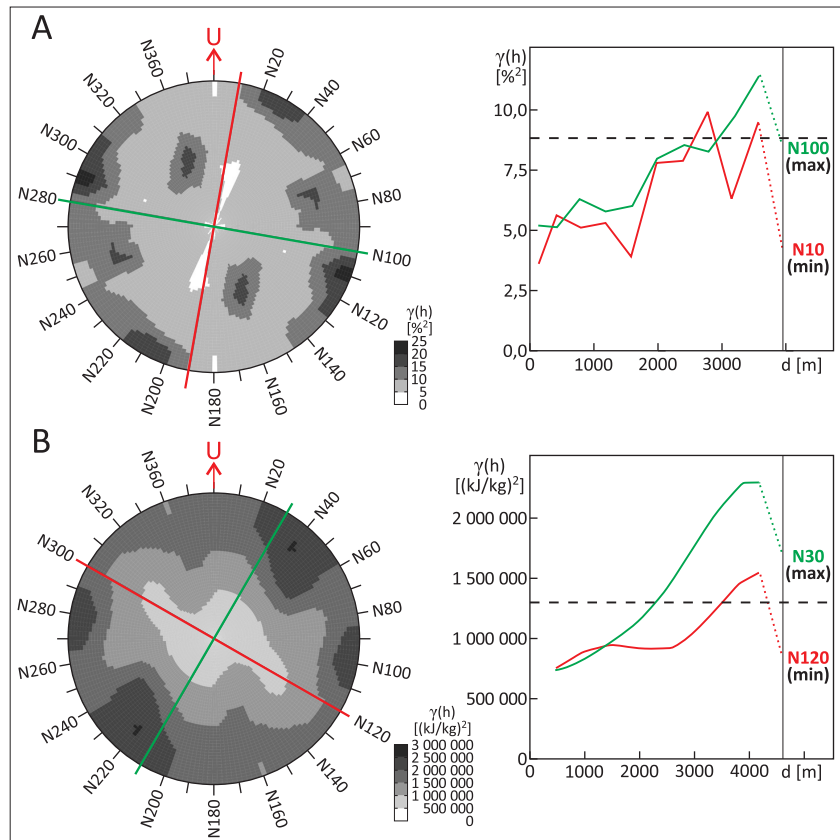
W trakcie wieloletnich badań struktury zmienności parametrów polskich złóż węgla kamiennego następował intensywny rozwój geostatystyki. Wprowadzono nowe narzędzia badawcze, takie jak: procedury deklasteryzacji nieregularnie rozmieszczonych obserwacji oraz metody wykrywania i eliminacji wartości anomalnych. Porównywanie modeli zmienności skonstruowanych w ciągu czterech dekad badań geostatystycznych jest bardzo trudne, ponieważ wcześniejsze badania prowadzono innymi metodami, bez stosowania nowoczesnych instrumentów. Ta zmiana metodologiczna ogranicza również możliwości precyzyjnego wiązania modeli geostatystycznych z procesami geologicznymi formującymi złoża.

Obecny stan badań nad strukturą zmienności parametrów złóżowych polskich złóż węgla kamiennego nie

→

**Ryc. 6.** Mapy semiwariogramów kierunkowych (z lewej) i semiwariogramy w kierunku maksymalnej i minimalnej zmienności (z prawej) zawartości popiołu (A) i wartości opałowej (B) na podstawie danych z rozpoznania w kategorii A pokładu 207 KWK Piast (Mucha i in., 2007); **OW** – dane z otworów wiertniczych; **WG** – dane z wyrobisk górniczych

**Fig. 6.** Maps of directional semivariograms (left) and semivariograms in the directions of maximum and minimum variability (right) for ash content (A) and calorific value (B), based on category A data in seam 207, Piast mine (Mucha et al., 2007); **OW** – data from boreholes; **WG** – data from mine workings



**Ryc. 7.** Semiwariogramy i modele teoretyczne: **A** – zawartości popiołu w pokładach węgla kamiennego o różnych kategoriach rozpoznania złoża; **B** i **C** – wartości opałowej (Mucha i in., 2007)

**Fig. 7.** Semivariograms and theoretical models: **A** – for ash content in bituminous coal seams for different categories of deposit exploration; **B** and **C** – calorific value (Mucha et al., 2007)

pozwała na jednoznaczne opisanie zależności modeli geostatystycznych od budowy, formy i genezy tych złóż. Możliwe jest jedynie zasygnalizowanie pewnych powiązań między typami semiwariogramów a procesami formującymi złoża, bez ich pełnego wyjaśnienia. Teoretycznie ustalenie takich zależności wymagałoby równoległego prowadzenia szczegółowych obserwacji geologicznych w wyrobiskach i modelowania geostatystycznego na podstawie zweryfikowanych wyników opróbowań. W praktyce realizacja takiego zadania jest niewykonalna ze względów organizacyjnych, czasowych i ekonomicznych.

Autorzy serdecznie dziękują Recenzentom za konstruktywne uwagi i sugestie, które przyczyniły się do ulepszenia niniejszego manuskryptu. Badania zostały częściowo sfinansowane ze środków subwencji przyznanej Akademii Górniczo-Hutniczej im. Stanisława Staszica w Krakowie przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego.

## LITERATURA

- ARMSTRONG M. 1998 – Basic Linear Geostatistics. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, New York: 155.
- AUGUŚCIK J., MUCHA J. 2017 – Wpływ wartości anomalnych i zmienności lokalnej na opis struktury zmienności i szacowanie parametrów złożowych. Zeszyty Naukowe Instytutu Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN, 100: 7–20.
- CRESSIE N. 1985 – When are relative variogram useful in Geostatistics. Mathematical Geology, 17 (7): 693–702.
- DZEDZEJ C., KOTULSKI L. 1990 – Geostatystyczna analiza zmienności parametrów węgla i grubości pokładu 405 w kopalni Staszic. Mat. Konfer. Postęp naukowy i techniczny w geologii górniczej węgla kamiennego. Prace Głównego Instytutu Górniczego: 37–53.
- KOKESZ Z. 1988 – Geostatystyczna procedura obliczania zasobów nieśfaldowanych złóż węgla kamiennego. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, 172: 59–76.
- KOKESZ Z. 1990 – Struktura zmienności parametrów wybranych pokładów węgla z KWK *Kazimierz-Juliusz*. Gospodarka Surowcami Mineralnymi, 6 (1): 97–105.
- KOKESZ Z. 2006a – Geostatystyczna charakterystyka pokładów węgla w Górnośląskim Zagłębiu Węglowym. Przegląd Górniczy, 1–2: 66–75.
- KOKESZ Z. 2006b – Application of linear geostatistics to evaluation of Polish mineral deposits. Gospodarka Surowcami Mineralnymi, 22 (2): 53–65.
- KOKESZ Z. 2007 – Geostatystyczna charakterystyka zmienności miąższości pokładów węgla w GZW na potrzeby szacowania zasobów. Przegląd Górniczy, 4: 27–36.
- KOKESZ Z. 2009 – Reprezentatywność semiwariogramów – element wiarygodności szacowania parametrów złożowych. Górnictwo Odkrywkowe, 50 (2–3): 91–98.
- KOKESZ Z. 2010a – Geostatystyczna analiza zmienności zawartości siarki w wybranych pokładach GZW. Gospodarka Surowcami Mineralnymi, 26 (3): 95–110.
- KOKESZ Z. 2010b – Geostatystyczna charakterystyka zmienności zawartości popiołu i wartości opałowej węgla w wybranych pokładach GZW. Przegląd Górniczy, 11: 103–110.
- KOKESZ Z. 2013 – Anizotropia i niejednorodność złóż w świetle badań geostatystycznych. Zeszyty Naukowe Instytutu Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN, 85: 181–197.
- KOKESZ Z. 2014a – Niejednorodność złóż w świetle badań geostatystycznych. Przegląd Górniczy, 1: 62–71.
- KOKESZ Z. 2014b – Geostatystyczne badania struktury zmienności parametrów jakościowych węgla w GZW. Przegląd Górniczy, 70 (2): 68–75.
- KOKESZ Z., MUCHA J. 1987a – Prognozowanie wartości parametrów złóż węgla metodą krigingu w warunkach LZW. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, Górnictwo, 155: 91–106.
- KOKESZ Z., MUCHA J. 1987b – Dotychczasowe doświadczenia w zastosowaniu metod geostatystycznych w geologii górniczej w Polsce. Mat. Konfer. Metody matematyczne i technika komputerowa w górnictwie, Szklarska Poręba. Wyd. Głównego Instytutu Górniczego, 3: 45–55.
- MATHERON G. 1962 – Traité de géostatistique appliquée, t. 1, Éditions Technip, Paris: 1–334.
- MATHERON G. 1963 – Traité de géostatistique appliquée, t. 2. Éditions Technip, Paris.
- MIKRUT J., POLAK P. 1987 – Próba zastosowania metod geostatystycznych do oceny parametrów pokładu 404 KWK *Wieczorek*. Mat. Konfer. Metody matematyczne i technika komputerowa w górnictwie, Szklarska Poręba. Wyd. Głównego Instytutu Górniczego, 3: 57–69.
- MORGA R. 2007 – Struktura zmienności zawartości fosforu w eksploataowanych pokładach węgla kamiennego KWK *Pniówek*. Gospodarka Surowcami Mineralnymi, 23 (1): 29–48.
- MUCHA J. 1994 – Metody geostatystyczne w dokumentowaniu złóż. Wydawnictwo AGH, Kraków.
- MUCHA J., KOKESZ Z. 1986 – Zastosowanie geostatystyki i krigingu w ustalaniu zasobów węgla kamiennego i prognozowaniu parametrów złoża. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, Górnictwo, 149: 107–121.
- MUCHA J., WASILEWSKA M. 2005a – Dokładność interpolacji zawartości siarki i popiołu w wybranych pokładach węgla kamiennego GZW. Gospodarka Surowcami Mineralnymi, 21 (1): 7–21.
- MUCHA J., WASILEWSKA M. 2005b – Prognozowanie wielkości błędów interpolacji parametrów złożowych pokładów węgla kamiennego GZW. Miesięcznik WUG, 6: 23–24.
- MUCHA J., WASILEWSKA M. 2009 – Ocena błędów opróbowania złóż – statystyczny niezbędnik geologa górniczego. Górnictwo Odkrywkowe, 50 (2–3): 84–90.
- MUCHA J., WASILEWSKA-BŁASZCZYK M. 2011 – Praktyczne doświadczenia geostatystycznego modelowania i dokumentowania polskich złóż – przegląd wybranych zastosowań. [W:] Dyczko A., Krawczyk A. (red.), Geomatyka górnicza, Praktyczne zastosowania. Wyd. Fundacji dla AGH, Kraków: 129–151.
- MUCHA J., WASILEWSKA-BŁASZCZYK M. 2012 – Variability anisotropy of mineral deposits parameters and its impact on resources estimation – a geostatistical approach. Gospodarka Surowcami Mineralnymi, 28 (4): 113–135.
- MUCHA J., WASILEWSKA-BŁASZCZYK M. 2014 – Kategoryzacja zasobów złóż węgla kamiennego w świetle wytycznych do JORC Code i geostatystyki. Górnictwo Odkrywkowe, 55 (2–3): 67–73.
- MUCHA J. (red), NIEĆ M., WASILEWSKA M., SOBCZYK E.J., SAŁUGA P. 2007 – Dokładność szacowania zasobów węgla kamiennego jako element oceny ryzyka inwestycyjnego. Wyd. AWK GEO, Kraków.
- MUCHA J., WASILEWSKA-BŁASZCZYK M., SEKUŁA T. 2010a – Wiarygodność prognozy wielkości zasobów i jakości pokładów węgla kamiennego w obszarze Dąb (GZW). Górnictwo i Geoinżynieria, 34 (3): 187–197.
- MUCHA J., WASILEWSKA-BŁASZCZYK M., SEKUŁA T. 2010b – Dokładność geostatystycznej prognozy wielkości zasobów węgla w wstępnych etapach rozpoznania złoża. Mat. XXXIII Sympozjum „Geologia Formacji Węglonośnych Polski”, Kraków, AGH, 21–22.04.2010: 59–64.
- NAMYSŁOWSKA-WILCZYŃSKA B. 2006 – Geostatystyka: teoria i zastosowania. Oficyna Wydawnicza Polit. Wrocław.
- NIEĆ M., MUCHA J., KOKESZ Z. 1988 – Geological background for geostatistical models. [W:] Armstrong M. (red.), Geomathematics and Geostatistics Applied to Space and Time Dependent Data. Sciences de la Terre, Serie Informatique, Nancy, 27: 263–278.
- PASZEK M., AUGUŚCIK J., MUCHA J. 2016 – Badanie zmienności i niejednorodności zawartości popiołu i siarki w pokładzie 308 KWK *Ziemowit*. Zeszyty Naukowe Instytutu Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN, 96: 229–239.
- PASZEK M., AUGUŚCIK J., MUSIAŁ A. 2018 – The variability of selected qualitative parameters of bituminous coal – east part of the Upper Silesian Coal Basin (USCB) case study. SGEM 2018. Intern. Multidisciplinary Scientific GeoConference, Bulgaria, Conf. Proc., 18: 611–618.
- PEROŃ J. 1984 – Opis parametrów złóż węgla z wykorzystaniem e.m.c. cz. 1, Badanie zmienności przestrzennej. Technika Poszukiwań Geologicznych, 5–6: 36–43.
- ROZPORZĄDZENIE Ministra Środowiska z dnia 18 grudnia 2001 r. w sprawie kryteriów bilansowości złóż kopalni. Dz.U. 2001 nr 153 poz. 1774.
- ROZPORZĄDZENIE Ministra Środowiska z dnia 1 lipca 2015 r. w sprawie dokumentacji geologicznej złoża kopaliny. Dz.U. 2015 poz. 987.
- SRIVASTAVA R.M., PARKER H.M. 1988 – Robust measures of spatial continuity. [W:] Armstrong M. (red.), Third International Geostatistics Congress. D. Reidel, Dordrecht, Holland: 295–308.
- WASILEWSKA M. 2007 – Struktura zmienności parametrów złóż węgla kamiennego w wybranych kopalniach GZW. Rozprawa doktorska, AGH, Kraków; <https://winntbg.bg.agh.edu.pl/rozprawy/9996/full9996.pdf>.
- WASILEWSKA M., MUCHA J. 2005 – Kriging jako metoda interpolacji parametrów opisujących jakość węgla kamiennego w pokładach GZW. Warsztaty 2005 z cyklu: Zagrożenia naturalne w górnictwie, Wydawnictwo IGSMiE PAN, Sympozja i Konferencje, 65: 341–354.
- WEBSTER R., OLIVER M. 2001 – Geostatistics for Environmental Scientists. John Wiley & Sons, LTD.
- ZAWADZKI J. 2011 – Metody geostatystyczne dla kierunków przyrodniczych i technicznych. Oficyna Wydawnicza Polit. Warsz.

Praca wpłynęła do redakcji 28.11.2025 r.  
Akceptowano do druku 3.02.2026 r.