

# WPLYW DOBORU INTERPOLATORA ORAZ POPRAWEK DO ALGORYTMÓW OBLICZENIOWYCH (POST-PROCESSING) NA DOKŁADNOŚĆ SZACOWANIA PARAMETRU ZŁOŻOWEGO

## THE INFLUENCE OF INTERPOLATION ALGORITHMS CHOICE AND POST-PROCESSING CORRECTIONS ON THE ACCURACY OF THE DEPOSIT PARAMETER ESTIMATION

Justyna Auguścik, Jerzy Wójtowicz, Monika Wasilewska-Błaszczuk - Katedra Geologii Złóżowej i Górniczej, WGGiOŚ, AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Kraków

Głównym celem artykułu była ocena wpływu rodzaju interpolatora na dokładność szacowania miąższości pokładu jednego ze złóż węgla brunatnego. Do tego celu wykorzystano następujące interpolatory: odwrotnej odległości (ID), minimalnej krzywizny (MC), zmodyfikowaną metodę Shepard'a, krigingu z modelem liniowym (LK), krigingu z modelem sklejanym (SK) i krigingu zwyczajnego (K) dostępne w oprogramowaniu komputerowym (Surfer12, Isatis, RockWorks16). Stwierdzono, że metody geostatystyczne są dokładniejszymi interpolatorami wartości parametru złożowego niż metody deterministyczne, gdy w strukturze zmienności badanego parametru jest wyraźnie zaznaczony składnik nielosowy ( $U_N > 80\%$ ) oraz duży zasięg autokorelacji (podobieństwa) wartości parametru. Zastosowanie poprawek Yamamoto oraz High-Fidelity filter pozwoliło na znaczne obniżenie wartości średniego absolutnego błędu względnego oszacowania wartości w punktach opróbowania, na podstawie których odbyło się szacowanie. Weryfikację dokładności wyinterpolowanych wartości w obrębie mapy izoliniowej stworzonej na podstawie zbioru podstawowego umożliwił wcześniej wyłączony z szacowania zbiór testowy. Przeprowadzona analiza potwierdziła, że metody geostatystyczne charakteryzują się niższym błędem interpolacji niż metody niestochastyczne. Dodatkowo dokonano wstępnej oceny przydatności i możliwości wybranych aplikacji, wykorzystanych w trakcie realizacji prac. Analiza ta wykazała, że najbardziej rozbudowanym narzędziem do predykcji wartości parametru jest oprogramowanie Isatis firmy Geovariances.

**Słowa kluczowe:** węgiel brunatny, interpolacja, miąższość pokładu, geostatystyka, statystyka, poprawka Yamamoto

The main purpose of this article was assessment of selected kind of interpolation algorithm on accuracy of the lignite deposit thickness estimation. The following interpolators had been used: minimum curvature (MC), inverse distance to a power (ID), modified Shepard's method (Sh) and stochastic method ordinary kriging (K), linear kriging (LK), spline kriging (SK) available in a computer software (Surfer12, Isatis, RockWorks16). It was found that geostatistical methods are more accurate parameter interpolators to predict resources, if in the structure of the tested parameter variation is clearly marked a non-random component ( $U_N > 80\%$ ). The results of application the Yamamoto correction and High-Fidelity filter allowed on the significant reduction of the average absolute relative error in the estimation on sampling points, which resulted in an increase of the reliability of created contour maps. Verification of accuracy interpolated values within a contour map created from the basic data set was enabled through previously excluded test set. The analysis confirmed that geostatistical methods have lower interpolation errors than non-stochastic methods. Furthermore, the use of the arithmetic mean to assess the mean absolute relative error and average relative error caused the artificial increase of interpolation errors. That was the result of presence the anomalous values in these errors. The use of median made a strongly marked reduction in the value of the interpolation mean error. In addition was an initial assessment of the relevance and feasibility of selected applications used during of the work.

**Keywords:** lignite, interpolation, seam thickness, geostatistics, statistics, Yamamoto correction

### Cel i zakres pracy

Dotychczas przeprowadzone badania dokładności interpolacji w Polsce dotyczyły m. in. złóż węgla kamiennego [4, 5]. Analizy te wykazały zasadniczo bardzo niską jakość interpolacji, wyrażoną dużym błędem absolutnym i słabą korelacją między wartościami prognozowanymi i stwierdzonymi. Przedstawione wyniki badań były inspiracją do podjęcia próby zbadania wpły-

wu doboru algorytmu na dokładność szacowania miąższości pokładu węgla brunatnego. Do tego celu wytypowano następujące interpolatory: odwrotnej odległości (ID), minimalnej krzywizny (MC), zmodyfikowanej metody Shepard'a, krigingu z modelem liniowym (LK), krigingu z modelem sklejanym (SK) i krigingu zwyczajnego (K). Ponadto zastosowano do oszacowanych wartości parametru metodą krigingu zwyczajnego

korekty wygładzenia *Yamamoto* oraz *High-Fidelity filter*, które silniej honorują wartości pomierzone w punktach opróbowania [7, 6]. Ocena dokładności interpolacji została przeprowadzona poprzez porównanie wartości oszacowanych i stwierdzonych w punktach opróbowania, na bazie podstawowych miar dokładności oszacowania: średniego absolutnego błędu względnego ( $\bar{\epsilon}_{AR}$ ), średniego błędu względnego ( $\bar{\epsilon}_R$ ) oraz współczynnika korelacji Pearsona ( $r(z^*-z)$ ). Porównano dokładność zastosowanych interpolatorów i na tej podstawie wskazano metody zapewniające najwyższą precyzję punktowych oszacowań. Dodatkowo dokonano oceny przydatności wykorzystanych aplikacji dostępnych w programach komputerowych Surfer12 (*Golden Software*), Isatis (*Geostatistics*), RockWorks16 (*RockWare*).

## Material podstawowy badań

Do analizy wybrano fragment pokładu jednego ze złóż węgla brunatnego o powierzchni około 3 km<sup>2</sup>. Materiał podstawowy badań stanowiły informacje o miąższości pokładu uzyskane z rozpoznania eksploatacyjnego, pochodzące z 324 otworów wiertniczych. Średnia odległość między sąsiednimi punktami pomiarowymi wynosiła około 100 m (rys. 1). Ze zbioru podstawowego wygenerowano losowo zbiór testowy liczący 126 prób, który posłużył do późniejszej weryfikacji dokładności oszacowań.

## Metodyka badań

Interpolację miąższości pokładu węgla brunatnego poprzedzono opisem struktury zmienności wjęciu probabilistycznym oraz geostatystycznym. W ramach opisu statystycznego skonstruowano histogramy empiryczne, obliczono podstawowe miary statystyczne w programach StatgraphicsXVII i Statistica10 oddzielnie dla zbioru podstawowego oraz testowego. W zakresie opisu geostatystycznego obliczono semiwariogramy i aproksymowano je modelami teoretycznymi. Modelowanie struktury zmienności miąższości wykonano w oparciu o klasyczne semiwariogramy Matherona [3]. Parametry modeli dobierano metodą prób i błędów, a ich poprawność wizualnego doboru potwierdzono testem krzyżowym wykonanym w programie Isatis. Wyniki modelowania semiwariogramów

wykorzystano w geostatystycznej procedurze krigingu zwyczajnego [3]. Badanie wpływu doboru rodzaju interpolacji na dokładność oszacowań zrealizowano za pomocą algorytmów obliczeniowych dostępnych w programach komputerowych Surfer12, Isatis, RockWorks16. Analizie porównawczej poddano kilka metod interpolacji: odwrotnej odległości (ID), minimalnej krzywizny (MC), krigingu z modelem sklejanym (SK), krigingu z modelem liniowym (LK) oraz krigingu zwyczajnego (K), bazujących na odmiennych algorytmach, opisanych bliżej w instrukcji do programu Surfer12 oraz dziale *Technical References* do programu Isatis [1, 2]. Do oszacowanych miąższości metodą krigingu zwyczajnego zastosowano korekty wygładzenia wartości parametrów za pomocą poprawki *Yamamoto* oraz *High-Fidelity filter* [7, 6]. Kolejnym krokiem była ocena wartości oszacowanych w punktach wyłączonych wcześniej z interpolacji, do tego celu wykorzystano zbiór testowy. Badanie to było możliwe dzięki procedurze *Residuals*, dostępnej zarówno w programie Surfer12 jak i RockWorks16. Procedura ta umożliwiła obliczenie podstawowych błędów interpolacji podając różnice między wartościami oszacowanymi w węzłach sieci interpolacyjnej a wartościami rzeczywistymi (stwierdzonymi w otworach wiertniczych).

Wyznaczono następujące miary dokładności interpolacji:

- średni błąd względny ( $\bar{\epsilon}_R$ )

$$\bar{\epsilon}_R = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{z_i^* - z_i}{z_i} * 100\% \quad (1)$$

- średni absolutny błąd względny ( $\bar{\epsilon}_{AR}$ )

$$\bar{\epsilon}_{AR} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{|z_i^* - z_i|}{z_i} * 100\% \quad (2)$$

gdzie:

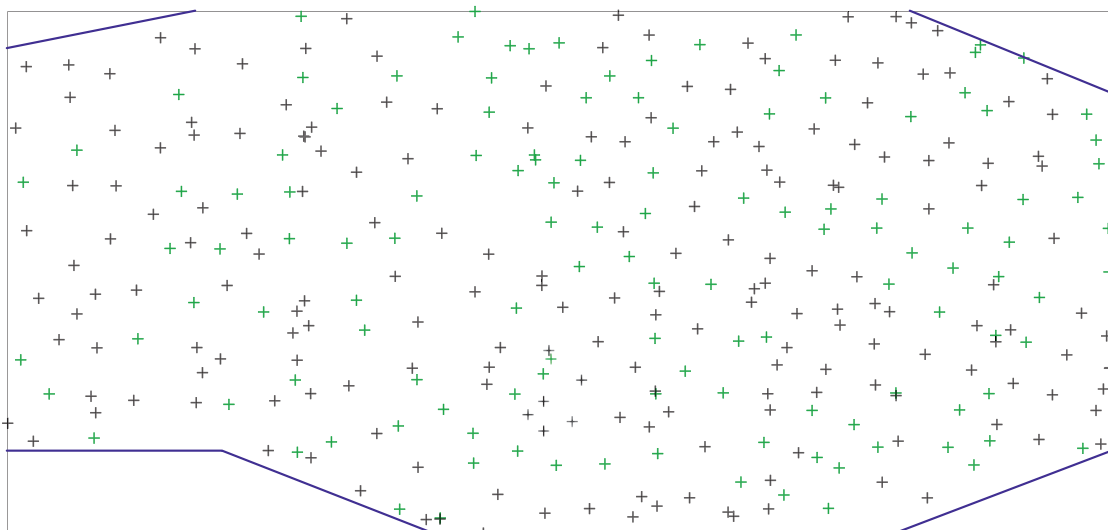
N - liczba danych,

$z_i$  - wyinterpolowana wartość parametru w punkcie „i”,

$z_i^*$  - rzeczywista wartość parametru w punkcie opróbowania „i”,

$\bar{\epsilon}_R$  - średni błąd względny,

$\bar{\epsilon}_{AR}$  - średni absolutny błąd względny.



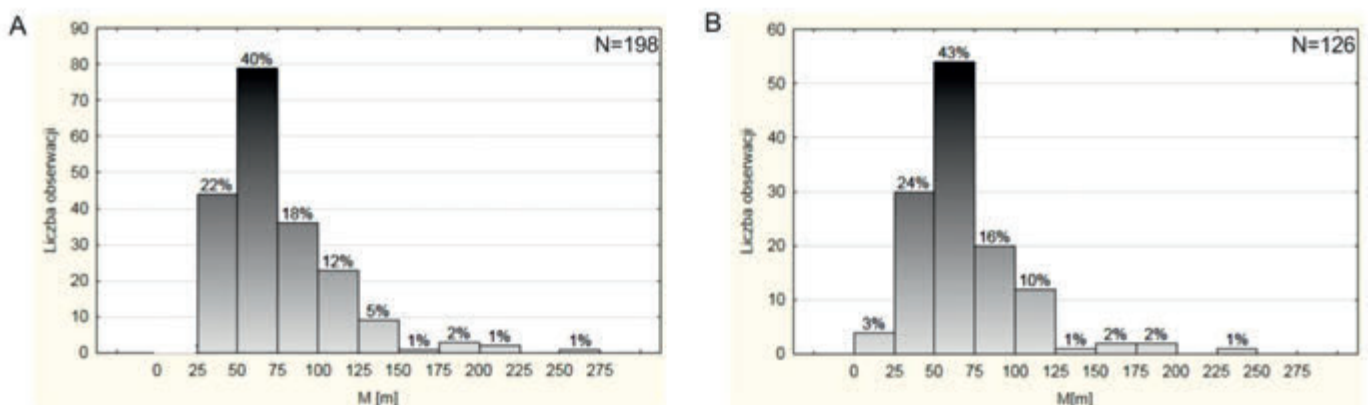
Rys. 1. Lokalizacja otworów wiertniczych (+ zbiór podstawowy; + zbiór testowy) w analizowanym fragmencie złoża węgla brunatnego

Fig. 1. Location of boreholes (+ basic data set; + test set) in the selected part of lignite deposit

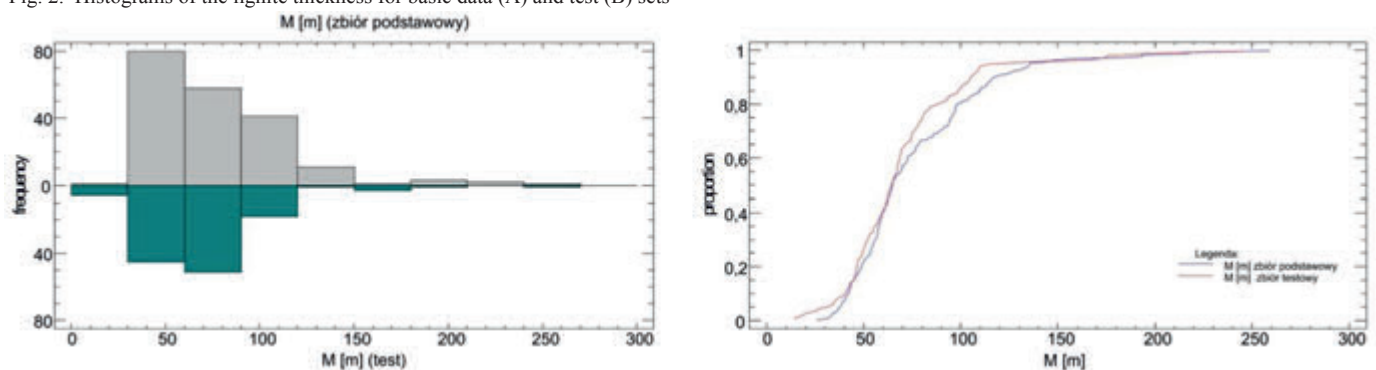
Tab. 1. Zestawienie podstawowych parametrów statystycznych miąższości pokładu węgla brunatnego  
 Tab. 1. Basic statistics for the thickness of the lignite deposit

Zmienna	Średnia arytmetyczna	Mediana	Wariancja	Min. Max	Współ. zmienności	Współczynnik asymetrii	Współczynnik asymetrii standaryzowany	Współczynnik ekscesu	Współczynnik ekscesu standaryzowany	Test normalności
N= 198 Miąższość (zbiór podstawowy) [m]	76,37	64,85	1332,43	25,8 259,2	47,8	1,86	10,69	4,99	14,33	(-)*
N=126 Miąższość (zbiór testowy) [m]	70,06	64,40	1160,43	14,5 246,3	48,6	2,12	9,71	7,26	16,64	(-)*

N – liczba prób. \* odrzucenie hipotezy o normalności rozkładu, w przypadku gdy bezwzględny standaryzowany współczynnik asymetrii lub ekscesu jest większy od dwóch



Rys. 2. Rozkład miąższości w pokładzie węgla brunatnego dla zbioru podstawowego (A) i testowego (B)  
 Fig. 2. Histograms of the lignite thickness for basic data (A) and test (B) sets



Rys. 3. Rozkład miąższości w pokładzie węgla brunatnego oraz dystrybuanty empiryczne dla zbioru podstawowego i testowego  
 Fig. 3. Histograms and empirical distribution function of the lignite thickness for basic and test data sets

### Cechy struktury zmienności miąższości pokładu w ujęciu probabilistycznym i geostatystycznym

Wyniki wykonanej analizy statystycznej miąższości pokładu węgla brunatnego przedstawiono w tabeli 1 i na rysunkach 2, 3.

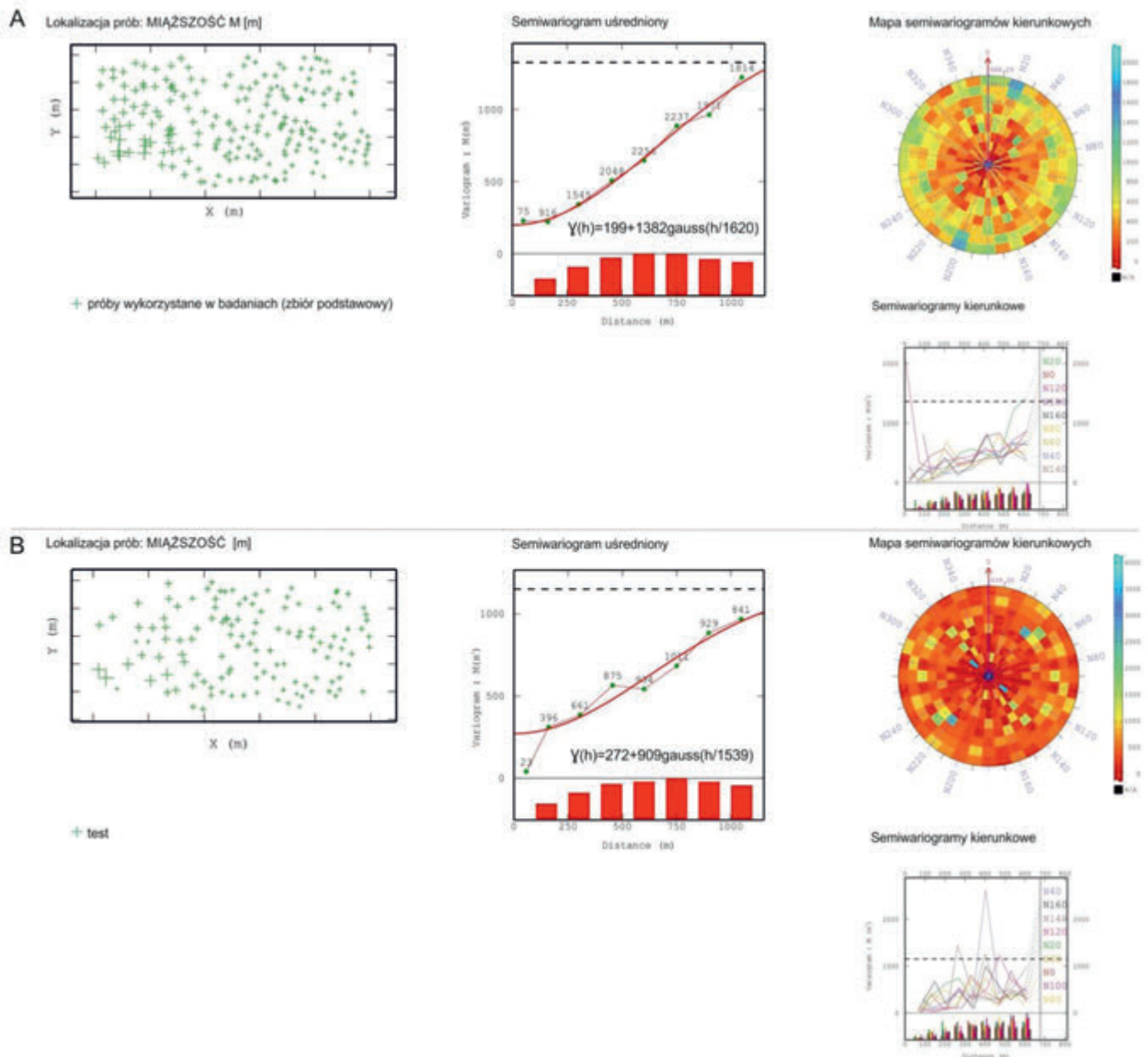
Analizując rozkład miąższości pokładu węgla brunatnego zarówno dla zbioru podstawowego jak i testowego stwierdzono, że:

- najbardziej liczną klasą zarówno w zbiorze podstawowym jak i testowym jest przedział 50-75 m, który skupia 40% (test), 43% (zbiór podstawowy) obserwacji,
- miąższość pokładu węgla, w myśl klasyfikacji Baryszewa wykazuje dużą zmienność (współczynnik zmienności dla

analizowanych zbiorów wynosi powyżej 47%),

- rozkłady empiryczne analizowanych zbiorów są do siebie bardzo zbliżone,
- rozkład empiryczny dla zbioru podstawowego charakteryzuje się umiarkowaną dodatnią (prawostronną) asymetrią, nieco słabszą asymetrią niż zbiór testowy (asymetria silna),
- obliczone zestandaryzowane współczynniki asymetrii i ekscesu potwierdzają brak możliwości stosowania rozkładu normalnego jako teoretycznego modelu rozkładu prawdopodobieństwa tego parametru.

W ramach geostatystycznego modelowania struktury



Rys 4. Mapy lokalizacji punktów opróbowań, semiwariogramy uśrednione i kierunkowe oraz mapy semiwariogramów kierunkowych miąższości pokładu węgla brunatnego dla zbioru podstawowego (A) i testowego (B)

Fig. 4. Location of boreholes, omnidirectional and directional semivariograms and directional semivariograms maps of lignite thickness for basic data (A) and test (B) sets

zmienności miąższości pokładu węgla brunatnego wyznaczono klasyczne semiwariogramy Matherona oddzielnie dla danych podstawowych i testowych oraz aproksymowano je modelami teoretycznymi. Poprawność ich wizualnego doboru potwierdzono testem krzyżowym. Otrzymano pozytywne wyniki testowania, średnie błędy oceny wartości parametru w punktach opróbowań są bliskie zeru ( $\pm 0,05$ ), a wartość odchyłeń standardowych nie wychodzą poza przedział  $[0,9; 1,1]$  (rys. 5). Analiza semiwariogramów wykazała duży zasięg autokorelacji (podobieństwa) wartości parametru dla badanych zbiorów (zbiór podstawowy - 1620 m, zbiór testowy - 1539 m) oraz dominujący udział składnika nielosowego w obserwowanej zmienności miąższości rzędu 88% (dla zbioru podstawowego) i 77% (dla zbioru testowego). Przy tak wyraźnie zaznaczonym składniku nielosowym oraz dużym zasięgu autokorelacji za celowe uznano skonstruowanie mapy izoliniowej wykorzystując interpolatory oparte na modelach semiwariogramów. Analiza semiwariogramów kierunkowych wykazała, że zmienność badanego parametru

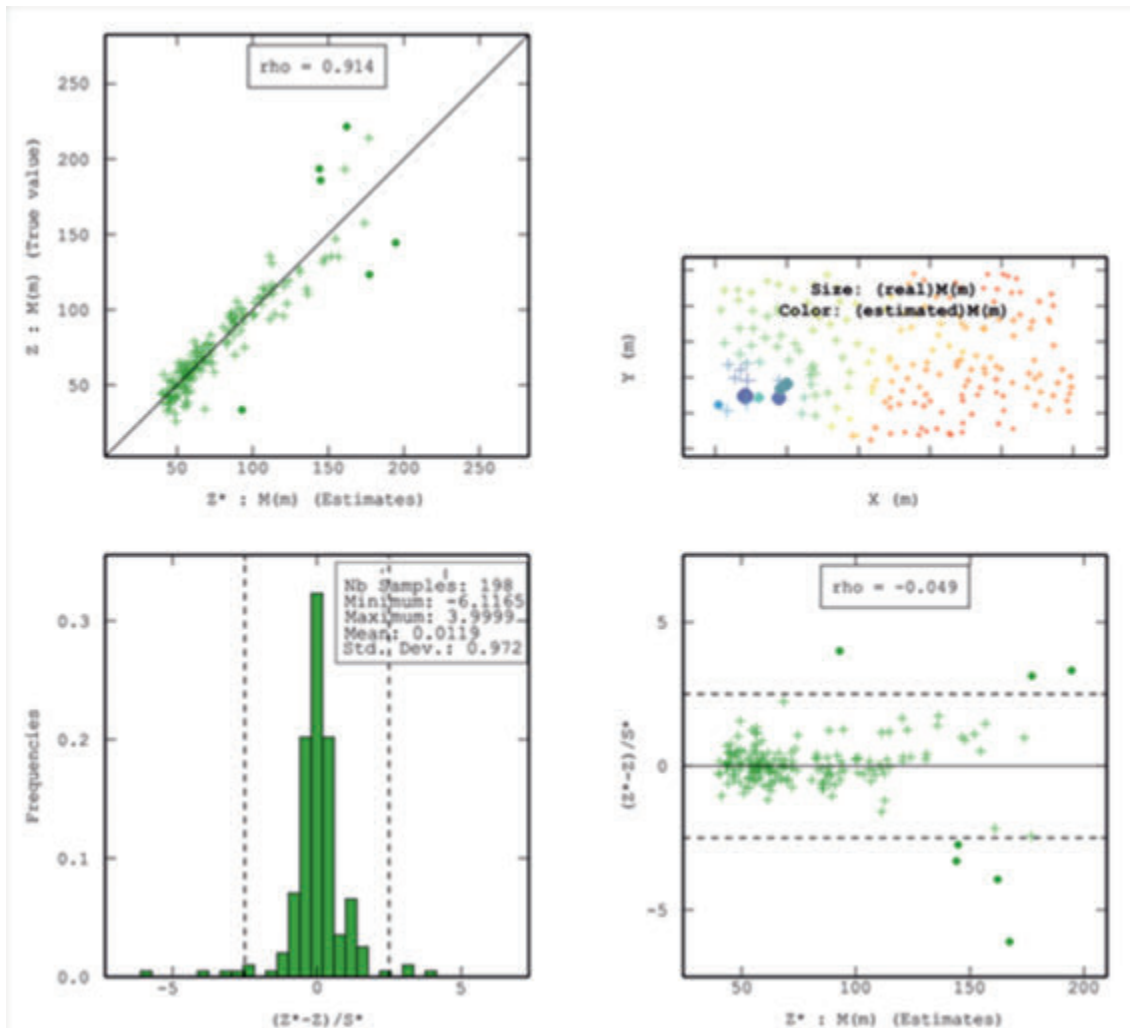
ma charakter izotropowy. Wyniki badania struktury zmienności w ujęciu geostatystycznym zilustrowano na rysunku 4, na którym przedstawiono mapę lokalizacji punktów opróbowań, semiwariogramy uśrednione, indykator zmienności kierunkowej parametrów oraz semiwariogramy kierunkowe.

### Wyniki badań dokładności interpolacji

Badania dokładności interpolacji w postaci błędów interpolacji przy zastosowaniu wybranych metod dla zbioru podstawowego i zbioru testowego, który posłużył do weryfikacji przeprowadzonych oszacowań, przedstawiono w tabeli 2.

Badania dla zbioru podstawowego, który pozwolił na sprawdzenie zgodności wartości parametrów stwierdzonych w otworach wiertniczych i oszacowanych wykazały, że zastosowane interpolatory geostatystyczne cechują się wyższą dokładnością prognozy miąższości pokładu węgla brunatnego ( $\epsilon_{AR} = 1,3-3,5\%$ ) niż interpolatory niestochastycznych ( $\epsilon_{AR} = 3,2-3,5\%$ ). Już wyka-





Rys. 5. Wyniki testu krzyżowego dla modelu geostatystycznego (uśrednionego) miąższości pokładu (zbiór podstawowy)  
 Fig. 5. Cross-validation results for the geostatistical model (omnidirectional) of lignite thickness (basic data set)

zany wcześniej wysoki udział składnika nielosowego zmienności oraz duży zasięg autokorelacji sugerował, że oszacowania miąższości pokładu przy zastosowaniu metod geostatystycznych będą się cechować najwyższą efektywnością na tle innych metod deterministycznych. Ponadto zastosowane poprawki *Yamamoto* oraz *High-Fidelity filter* dla krigingu zwyczajnego spowodowały znaczne obniżenie wartości błędów interpolacji. Mapy izoliniowe miąższości węgla brunatnego w obszarze badań skonstruowane na podstawie interpolacji parametru metodą krigingu punktowego zwyczajnego i krigingu punktowego zwyczajnego z poprawką *Yamamoto* oraz *High-Fidelity filter* przedstawiono na rysunku 7.

Analiza dokładności oszacowania wartości w obrębie mapy izoliniowej stworzonej na podstawie zbioru podstawowego była możliwa dzięki wcześniejszemu wyłączeniu z szacowania losowo wybranych otworów wiertniczych i utworzeniu z nich zbioru testowego. Ten wariant pozwolił na sprawdzenie możliwości prognozowania wartości parametru pomiędzy punktami opróbowania uwzględnionymi w interpoacji. Wyinterpolowane wartości w oparciu o podstawowy zbiór danych porównano z wartościami ze zbioru testowego. Stwierdzono, że predykcja wartości w punktach rozpoznania wyłączonych ze zbioru podstawowego jest znacznie mniej precyzyjna. Średni absolutny błąd względny dla przeprowadzonych metod interpolacji mieści się w przedziale od 21,7% do 34,2% a współczynnik korelacji między wartością oszacowaną a rzeczywistą wynosi od 0,8 do 0,96. Niewątpliwie jest to związane z dużą zmiennością badanego parametru ( $v > 40\%$ ) oraz nieregularną siecią opróbowania.

Zastosowanie średniej arytmetycznej do obliczenia średniego absolutnego błędu względnego oraz średniego błędu względnego skutkowało sztucznym zawyżeniem błędów interpolacji. Było to spowodowane wartościami anomalnymi błędu względnego oraz absolutnego błędu względnego stwierdzonymi w kilku punktach rozpoznania (rys. 6). Uznano za celowe użycie w tych przypadkach mediany, która jest bardziej odporna na wartości anomalne niż najczęściej stosowana w zagadnieniach geologiczno-górnictwowych średnia arytmetyczna. Spowodowało to bardzo wyraźne obniżenie ocen błędów interpolacji: mediana błędu względnego ( $Me\epsilon_R$ ) mieści się w przedziale od 0,4 do 5,3% a mediana absolutnego błędu względnego ( $Me\epsilon_{AR}$ ) zawiera się w przedziale 6,6-14,3%.

Niektóre zastosowane metody m.in. zmodyfikowana metoda Shepard'a, kriging z modelem sklejanym nie sprawdziły się w obszarach cechujących się skrajnie nierównomierną gęstością sieci opróbowania, w szczególności gdy w odległych otworach stwierdzono duże różnice miąższości. Metody te pokazały nie-realistyczne oszacowania wartości w tym obszarze (np. zmodyfikowana metoda Shepard'a).

### Ocena przydatności i możliwości wybranych aplikacji wykorzystanych w trakcie realizacji prac

Badania statystyczne zbiorów danych przeprowadzone w programie StatgraphicsXVII charakteryzowały się przystępną prezentacją wyników oraz dużą liczbą dostępnych procedur

Tab. 2. Ocena dokładności interpolacji przy zastosowaniu wytypowanych metod dla zbioru podstawowego i testowego  
 Tab. 2. Assessment of interpolation accuracy for various interpolator for basic data set and test set

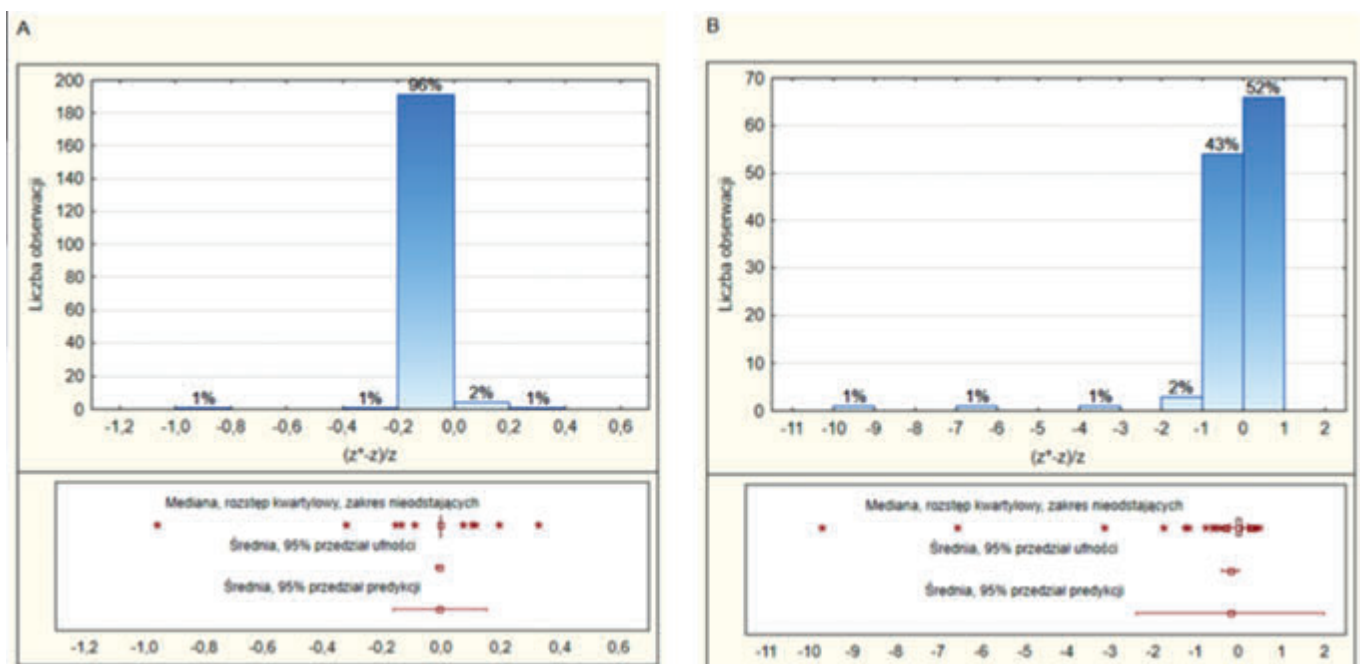
Parametr	Metoda interpolacji	Zbiór podstawowy			Zbiór testowy		
		$\overline{\epsilon}_{AR}$ (Me $\epsilon_{AR}$ ) [%]	$\overline{\epsilon}_R$ (Me $\epsilon_R$ ) [%]	$r(z^*-z)$	$\overline{\epsilon}_{AR}$ (Me $\epsilon_{AR}$ ) [%]	$\overline{\epsilon}_R$ (Me $\epsilon_R$ ) [%]	$r(z^*-z)$
Miaższość [m]	K (kriging zwyczajny)	3,5 (1,5)	-0,9 (-0,1)	0,993	21,7 (6,6)	-12,1 (1,1)	0,958
	K (kriging zwyczajny z poprawką Yamamoto)	2,0 (0,6)	-0,5 (0,1)	0,996	22,6 (7,3)	-11,5 (0,6)	0,954
	K (kriging zwyczajny z poprawką High-Fidelity filter)	1,3 (0,0)	-0,4 (0,0)	0,995	28,5 (6,3)	-19,3 (0,4)	0,921
	LK (kriging z modelem liniowym)	3,5 (1,5)	-0,9 (-0,1)	0,993	21,9 (6,6)	-12,1 (1,1)	0,951
	SK (kriging z modelem sklejanym)	2,47 (1,0)	-0,59 (-0,03)	0,996	24,7 (9,5)	-11,4 (2,4)	0,936
	MC (minimalnej krzywizny)	3,2 (1,5)	-0,7 (-0,1)	0,993	22,9 (7,7)	-11,1 (2,1)	0,951
	ID2 (odwrotnej odległości do potęgi 2)	3,4 (1,2)	-0,9 (-0,04)	0,992	21,8 (7,8)	-12,8 (0,72)	0,959
	Sh (zmodyfikowana metoda Shepard'a)	3,5 (0,7)	-0,1 (0,1)	0,983	34,2 (14,3)	-0,6 (5,3)	0,806

$\overline{\epsilon}_{AR}$  - średni absolutny błąd względny,  
 $\overline{\epsilon}_R$  - średni błąd względny,  $r(z^*-z)$  - współczynnik korelacji liniowej między oszacowaną a rzeczywistą wartością parametru w punkcie obserwacji  
 $\overline{\epsilon}_{AR}$  - mean absolute relative error of interpolation,  
 $\overline{\epsilon}_R$  - mean relative error of interpolation,  $r(z^*-z)$  - coefficient of linear correlation between predicted and real values of parameters

oraz metod analiz. Ponadto program posiada wsparcie „asystenta analizy” (*StatAdvisor*) w postaci komentarza słownego do otrzymanych wyników. Korzystanie z funkcji programu Statistica10 w porównaniu ze wspomnianym wcześniej oprogramowaniem jest mniej intuicyjne, jednak posiada on polski pakiet językowy.

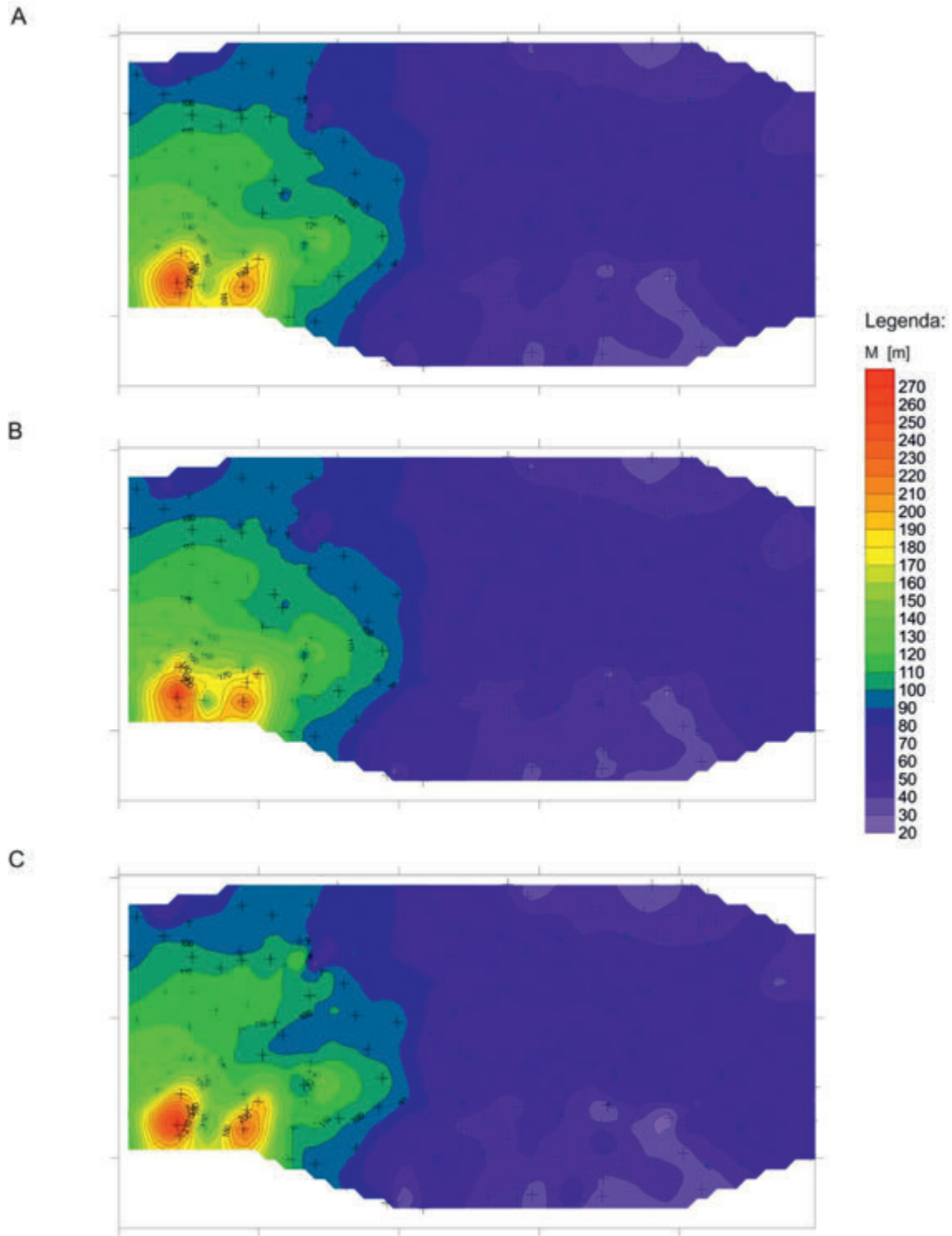
Przydatność programów Isatis, RockWorks16 czy Surfer12

zależna była od stopnia zaawansowania analizy geostatystycznej oraz wybranego do oszacowania interpolatora. Największe możliwości w tej materii daje oprogramowanie Isatis firmy Geostatistics. Pozwala ono na przeprowadzenie analizy zmienności przestrzennej w ujęciu zregionalizowanym ze wsparciem przejrzystej prezentacji graficznej wykorzystując narzędzie



Rys. 6. Histogram średnich błędów względnych interpolacji dla zbioru podstawowego (A) i testowego (B) na przykładzie metody krigingu punktowego z poprawką High-Fidelity filter

Fig. 6. Histograms of mean relative errors of interpolation for basic data (A) and test (B) sets illustrated with an example kriging method with High-Fidelity filter



Rys. 7. Mapy izoliniowe miąższości pokładu sporządzone metodami kriginu zwyczajnego (A), kriginu zwyczajnego z poprawką *High-Fidelity filter* (B), kriginu zwyczajnego z poprawką *Yamamoto* (C)

Fig. 7. Contour maps of seam thickness calculated with ordinary kriging (A), ordinary kriging with *High-Fidelity filter* (B), *Yamamoto* correction methods (C)

*Exploratory Data Analysis (EDA)*. Wspomniany pakiet analiz umożliwia kompleksową ocenę badanego zbioru za pomocą map lokalizacji, rozkładów wartości parametru, wykresów rozrzutu, indykatrys zmienności oraz kilku rodzajów wariogramów empirycznych. Znacznie ułatwia to wykrycie wartości anomalnych i odstających w analizowanym obszarze oraz ocenę struktury zmienności. Oprócz kilku metod deterministycznych program *Isatis* pozwala m. in. na oszacowane wartości parametru za pomocą różnych odmian procedury kriginu. Wśród mankamentów tego oprogramowania należy m. in. wymienić: niezbyt zaawansowany interfejs graficzny (problem ten został częściowo rozwiązany możliwością wyświetlenia wyników w załączonym

programie *3D Viewer*), a także wysoką cenę oprogramowania. Program *RockWorks16* wyróżnia się spośród analizowanych rozwiązań dużymi możliwościami graficznej prezentacji danych geologicznych oraz znaczną automatyzacją analiz i oszacowań. Jako jedyny umożliwiał zastosowanie algorytmów wpływających na poprawę dokładności oszacowania (m.in. *High Fidelity*) już na etapie doboru interpolatora i parametrów szacowania w węzłach regularnej sieci interpolacyjnej. Najsłabszą stroną tego rozwiązania jest stosunkowo słabo rozbudowany aparat geostatystyczny oraz niewielka ilość modeli teoretycznych dostępnych do opisu struktury zmienności (wykładniczy, Gaussa, sferyczny, liniowy). W przeprowadzonych badaniach program *Surfer12* okazał się

rozwiązaniem najbardziej zbalansowanym. Umożliwił on oszacowanie wartości w dwuwymiarowej sieci interpolacyjnej przy wykorzystaniu zarówno metod deterministycznych jak i procedury krigingu z rozbudowanymi możliwościami modelowania zmienności badanego parametru. Prezentacja graficzna map izolinowych w programie Surfer12 jest na zadowalającym poziomie, a wykorzystanie załączonego pakietu Scripeter pozwala również zbadać zmienność parametru w ujęciu geostatystycznym. Jest to program stosunkowo tani w odróżnieniu od pozostałych programów komputerowych, ale nie posiada tak rozbudowanych narzędzi geostatystycznego szacowania wartości parametru w 2D i 3D jak np. Isatis.

## Wnioski

Dokładniejszymi interpolatorami prognozy miąższości pokładu węgla brunatnego w analizowanym obszarze okazały się interpolatory geostatystyczne, ze względu na dominujący udział składnika nielosowego ( $U_N=88\%$ ) w strukturze zmienności miąższości pokładu oraz duży zasięg autokorelacji (ok. 1600 m).

Zastosowanie poprawek *Yamamoto* oraz *High-Fidelity filter* zaowocowało znacznym obniżeniem wartości średniego absolutnego błędu względnego interpolacji, czego efektem był wzrost zgodności wartości wyinterpolowanych i stwierdzonych w punktach opróbowania.

Średnia arytmetyczna absolutnego błędu względnego oraz błędu względnego w punktach rozpoznania zbioru testowego, zawiąza znacząco średnie błędy interpolacji. Powodem są nieliczne, ale wysokie wartości anomalne tych błędów. W takich przypadkach należy rekomendować zastosowanie mediany do oceny średniego błędu interpolacji.

Oprogramowanie wykorzystane podczas realizacji prac pokazało ich zróżnicowanie pod względem funkcjonalności. Najlepszym narzędziem do wszelkich oszacowań jest niewątpliwie oprogramowanie Isatis firmy Geovariances. Jest ono jednak stosunkowo drogie w porównaniu z oprogramowaniem RockWorks16 czy Surfer12.

*Praca zrealizowana została w ramach badań statutowych Katedry Geologii Żyłowej i Górniczej (nr 11.11.140.320) w 2015 roku.*

## Literatura

- [1] Bleinčs C., Bourges M., Deraisme J., Geffroy F., Jeannée N., Lemarchand O., Perseval S., Rambert F., Renard D., Touffait Y., Wagner L., *Isatis Technical Refences*, Geovariances, 2014
- [2] Galon Z., *Surfer. Podręcznik użytkownika*, Gambit Centrum Oprogramowania i Szkoleń Sp. z o.o. Wydanie III, Kraków 2014
- [3] Matheron G., *Traité de géostatistique appliquée*, Tome I, Tome II: Le krigeage. I: Mémoires du Bureau de Recherches Géologiques et Minières No. 14 (1962), Editions Technip, Paris; II: Mémoires du Bureau de Recherches Géologiques et Minières No. 24 (1963), Editions B.R.G.M., Paris, 1962-1963
- [4] Mucha J., Wasilewska-Błaszczuk M., *Dokładność interpolacji zawartości siarki i zawartości popiołu w wybranych pokładach węgla kamiennego GZW*, Gospodarka Surowcami Mineralnymi, T. 21, z.1, 2005
- [5] Mucha J., Wasilewska-Błaszczuk M., *Kriging jako metoda interpolacji parametrów opisujących jakość węgla kamiennego w pokładach GZW*, Warsztaty Górnicze 2005 z cyklu: „Zagrożenia naturalne w górnictwie”, Wydawnictwo IGSMiE PAN (Sympozja i Konferencje, nr 65), 2005
- [6] RockWorks16 built-in Help, RockWare, 2015 (dokument pdf)
- [7] Yamamoto J. K., *Correcting the smoothing effect of ordinary kriging estimates*, Mathematical Geology, Vol. 37, No. 1, 2005