

**ZASTOSOWANIE KRIGINGU ZWYCZAJNEGO DO REKONSTRUKCJI
I WIZUALIZACJI RELIEFU W MIEJSCACH ODKRYWKOWEJ
EKSPLOATACJI PIASKU**

**APPLICATION OF ORDINARY KRIGING TO RECONSTRUCT AND
VISUALISE THE RELIEF IN THE LOCATION OF AN OPEN PIT SAND MINE**

Roksana Zarychta¹, Adrian Zarychta²

¹ Wydział Nauk o Ziemi Uniwersytetu Śląskiego, Katedra Geomorfologii

² Wydział Nauk o Ziemi Uniwersytetu Śląskiego, Katedra Geologii Stosowanej

SŁOWA KLUCZOWE: geostatystyka, kriging zwyczajny, *relief*, Wyżyna Śląska, piaskownia „Siemonia”.

STRESZCZENIE: W niniejszym artykule zaprezentowano jeden ze sposobów odtwarzania rzeźby (sprzed rozpoczęcia eksploatacji piasku na cele podszkawkowe) czterech pól piaskowych dawnego wyrobiska „Siemonia”. Morfologia analizowanego terenu została zwizualizowana w oparciu o archiwalną mapę geologiczną (arkusz Wojkowice) z zastosowaniem metod geostatystycznych, w tym m.in. krigingu zwyczajnego. Jest to jedna ze znanych technik estymacji (szacowania), nazywana B.L.U.E. (*best linear unbiased estimator*). Zgodność dopasowania matematycznych modeli sferycznych do wariogramu empirycznego potwierdzono w procedurze *kross-walidacji*. Uzyskane wartości błędów (błąd średni, błąd średni kwadratowy oraz błąd średni kwadratowy standaryzowany) są w znacznym stopniu zgodne z notowanymi w literaturze naukowej. Wygenerowana rzeźba badanego terenu pod postacią modelu trójwymiarowego w wyniku przeprowadzonej pełnej analizy geostatystycznej jest dość mocno uwydatniona w porównaniu do modelu otrzymanego bez zastosowania analizy strukturalnej i *kross-walidacji*.

1. WPROWADZENIE

Górnictwo odkrywkowe, w tym m.in. eksploatacja piasków wykorzystywanych do celów przemysłowych (jako podszadzka w kopalniach węgla kamiennego czy też do produkcji wyrobów ze szkła itp.) mocno ingeruje w środowisko przyrodnicze. Stopniowe wydobycie ww. surowca powoduje zazwyczaj duże zmiany fizjocenotyczne – przeważnie degradację szaty roślinnej, pokrywy glebowej, a także przeobrażenia rzeźby i stosunków wodnych. Na szczególną uwagę zasługuje morfologia terenu, ponieważ w największym stopniu podlega metamorfozie wraz ze wzrostem wydobycia w poszczególnych latach. Jednakże opierając się na mapach konturowych nie zawsze jesteśmy w stanie wyobrazić sobie skali zmian zaszyłych w krajobrazie na skutek eksploatacji. Z pomocą przychodzą trójwymiarowe modele cyfrowe (tzw. NMT – Numeryczny Model Terenu, DTM – *Digital Terrain Model* lub DEM – *Digital Elevation Model*), które stanowią najlepsze zobrazowanie morfologii danego obszaru.

Do tej pory powstało wiele opracowań, które dotyczą zastosowania cyfrowych modeli terenu w badaniach współczesnej rzeźby (np. Bąkowski, 2000; Ganas *et al.*, 2005; Kühni, Pfiffner, 2001; Nita *et al.*, 2007; Żyszkowska, 1980, 1982 itd.). Niemniej jednak notuje się nieco mniej prac, w których autorzy prezentują zrekonstruowaną morfologię danego terenu, a w związku z tym omawiają zmiany zaszele w krajobrazie w poszczególnych latach (por. Flis, 1998; James *et al.*, 2012; Schiefer, Gilbert, 2007; Zarychta R., Zarychta A., 2011, 2012a, b, Zarychta A., Zarychta R., 2012).

Stąd głównym celem pracy było odtworzenie *reliefu* wybranych pól górniczych piaskowni „Siemonia” (z okresu przed rozpoczęciem eksploatacji na cele podszadkowe), zlokalizowanej na Wyżynie Śląskiej. Z uwagi na to, iż problematyka tworzenia cyfrowych modeli terenu jest ściśle związana z zastosowaniem zaawansowanych metod geostatystycznych – dla realizacji postawionego celu posłużono się krigingiem zwyczajnym – punktowym – najlepszą, a jednocześnie najczęściej stosowaną metodą estymacji przestrzennej (Zawadzki, 2011). Jego nazwa wywodzi się od nazwiska geologa południowoafrykańskiego – D.G. Kriega (1951), którego badania przyczyniły się do rozwoju geostatystyki. Przy czym za twórcę formalizmu teoretycznego i wprowadzenie głównych pojęć z zakresu tej dziedziny uważa się G. Matherona (1962).

Do tej pory metody geostatystyczne stosowano przeważnie przy rozwiązywaniu problemów badawczych m.in. w geologii złóż (np. Badura *et al.*, 2012; Gawryś, 2008; Kokesz, 2006, 2010; Marmol, 2002; Matias *et al.*, 2004; Mucha, Wasilewska, 2006; Mucha *et al.*, 2011 itd.), rzadziej w innych naukach o Ziemi – m.in. w wybranych działach geografii (np. Bostan *et al.*, 2012; Kumar *et al.*, 2012; Lin *et al.*, 2002; Szubert, 2003, 2007; Usowicz, Usowicz, 2004; Zawadzki, 2002 itp.). W związku z powyższym zastosowanie tego dość młodego działu statystyki stosowanej przy tworzeniu NMT podczas prac kameralnych do niniejszej publikacji jest z góry uzasadnione. Prezentowany artykuł stanowi jeden z nielicznych, gdzie uwzględniono zastosowanie geostatystyki przy generowaniu modeli trójwymiarowych.

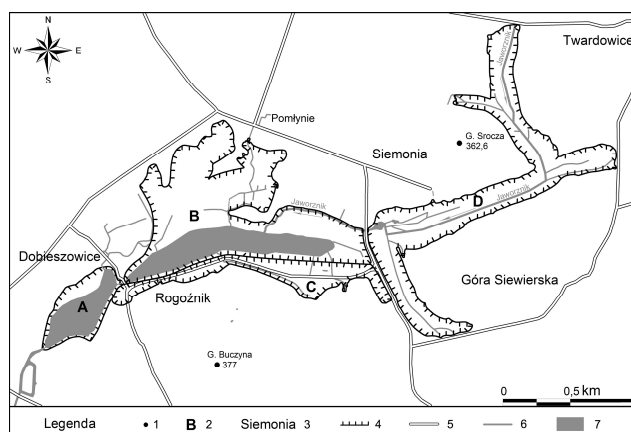
2. OBSZAR BADAŃ, WYKORZYSTANE MATERIAŁY I METODY

Analizą objęto wybrane pola górnicze: Niebyła, Rogoźnik, Buczyzna, Jaworznik, które stanowią cztery z siedmiu powierzchni piaszczystych (obok pola Kalinowa, Sączów oraz Chechło), wchodzących w skład piaskowni „Siemonia” (rys. 1). Eksploatacja została tutaj rozpoczęta w połowie lat 20. XX w., a wydobyty piasek stosowano m.in. do wypełniania pustek po eksploatacji węgla kamiennego w KWK „Jowisz” w Wojkowicach Komornych (Ciepiela, 2008).

Według regionalizacji fizycznogeograficznej Polski J. Kondrackiego (2000) teren dawnej piaskowni „Siemonia” zlokalizowany jest w granicach Garbu Tarnogórskiego (341.12), który leży w makroregionie Wyżyna Śląska (341.1), a tym samym w podprowincji Wyżyna Śląsko-Krakowska (341.). Pod względem administracyjnym obszar wspomnianych czterech wyrobisk górniczych należy do wsi Rogoźnik, Góry Siewierskiej oraz Siemoni i Twardowic (rys. 1).

Do rekonstrukcji rzeźby terenu z polami: Niebyła, Rogoźnik, Buczyzna oraz Jaworznik, a tym samym ich graficznej prezentacji pod postacią cyfrową niezbędne okazało się przeprowadzenie gruntownej kwerendy dostępnych materiałów archiwalnych. Celem było znalezienie m.in. map topograficznych oraz geologicznych, obejmujących swym zasięgiem teren omawianych odkrywek. W efekcie skorzystano z analogowych map topograficznych Polski, arkusze: Psary, Rogoźnik, 1995a, b oraz Mapy Geologicznej Polski w skali 1:50 000, arkusz Wojkowice (Biernat, 1955 r.). Konieczne okazały się również kompleksowe studia nad literaturą naukową, która dotyczyła środowiska przyrodniczego analizowanego obszaru (Czylok, Rahmonov, 1996; Dulias, 2010; Szymczyk, 1999; Szymczyk, Rahmonov, 2010; Zarychta R., Zarychta A., 2012) oraz zastosowania metod geostatystycznych w badaniach naukowych (m.in.: Hengl *et al.*, 2009; Isaaks, Srivastava, 1989; Namysłowska-Wilczyńska, 2006; Wackernagel, 2003; Zawadzki, 2011).

Morfologię analizowanego terenu z okresu przed rozpoczęciem wydobywania, czyli przed 1925 r. zrekonstruowano oraz zobrazowano w oparciu o wybrane narzędzia geostatystyczne. Skorzystano z krigingu zwyczajnego – punktowego, który stanowi często stosowaną technikę estymacji (szacowania) punktów w miejscach, gdzie nie został wykonany pomiar (Zawadzki, 2011).



Rys. 1. Rozmieszczenie pól eksploatacyjnych dawnej piaskowni „Siemonia” (1 – punkt wysokościowy; 2 – pole eksploatacyjne: A – pole „Niebyła”, B – pole „Rogoźnik”, C – pole „Buczyzna”, D – pole „Jaworznik”; 3 – miejscowość; 4 – granica wyrobiska; 5 – droga; 6 – ciek; 7 – zbiornik wodny) (Mapa topograficzna..., 1995a, b)

3. NUMERYCZNY MODEL RZEŻBY BADANEGO TERENU

W celu odtworzenia rzeźby analizowanego obszaru przeprowadzono procedurę geostatystyczną w programie Surfer 8 oraz ArcGIS 10.1. Model cyfrowy wygenerowano w oparciu o bezwzględną wysokość terenu w punktach rozmieszczonych w sposób losowy na wcześniej wspomnianej mapie. Wartości wysokości to tzw. zmienne zregionalizowane (*regionalized variable*), odznaczające się losowością i strukturą (Namysłowska-Wilczyńska, 2006).

Podstawą wykonania NMT było przygotowanie pliku rastrowego mapy oraz digitalizacja poziomicy (w efekcie zdigitalizowano 3628 punktów). W dalszej kolejności przeprowadzono analizę strukturalną, walidację krzyżową oraz gridding.

Analiza strukturalna opiera się m.in. na funkcji semiwariancji, która jest jednym z trzech głównych momentów drugiego rzędu. Zawadzki (2011) definiuje ją jako: „*połowa wariancji różnicy zmiennych zregionalizowanych w dwóch różnych położeniach* x_1 i x_2 (1)

$$\gamma(x_1, x_2) = \frac{1}{2} \text{Var}[Z(x_1) - Z(x_2)] \quad (1)$$

Wykres semiwariancji nazywany jest często semiwariogramem lub tradycyjnie wariogramem. Przedrostek semi podkreśla jedynie występowanie czynnika „1/2” we wzorze”.

Dla badanego terenu wykreślono wariogram empiryczny (doświadczalny, eksperymentalny), który przedstawia zależności między wariancją a odległością pomiędzy punktami próbkowania (rys. 2, tabela 1) (Marmol, 2002).

Tabela 1. Parametry wariogramu empirycznego, odnoszącego się do badanego terenu

<i>Direction</i>	<i>Tolerance</i>	<i>Step Amount</i>	<i>Max Lag Dist</i>	<i>Number of Lags</i>	<i>Lag Width</i>	<i>Vertical Scale</i>
0	90	30	1700	25	68	491.122

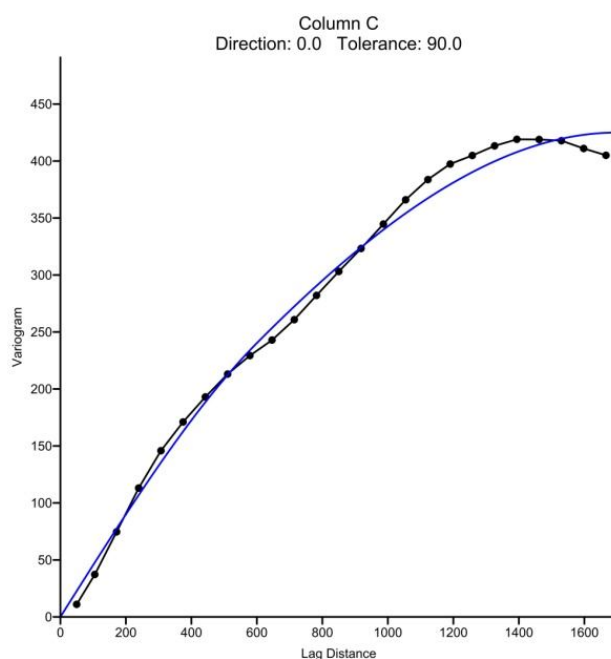
Uzyskany wariogram eksperymentalny odznacza się dość regularnym kształtem, co wynika zapewne z liczby badanych punktów pomiarowych (rys. 2). Na jego podstawie wyznaczono wariogram teoretyczny. Jednakże przed wyborem tegoż wariogramu przeanalizowano, który z modeli nadaje się do opisu semiwariancji empirycznej, pamiętając przy tym, iż wśród nich na uwagę zasługują m.in.: model samorodków, liniowy, sferyczny, wykładniczy, gaussowski, potęgowy, „efektu dziury” itp. [Davis, 2002; Zawadzki, 2011].

W analizowanym przykładzie obserwuje się liniowe zachowanie wariogramu w pobliżu początku układu, co sugeruje zastosowanie modelu sferycznego lub wykładniczego. To, który model został wybrany zależało od tego, w którym momencie poprowadzona styczna (w początku układu współrzędnych) do wykresu osiągnęła wartość progową. Z uwagi na to, iż przecięcie nastąpiło w odległości równej 2/3 zakresu oddziaływania wybrano model sferyczny (w przypadku modelu wykładniczego przecięcie ma miejsce w odległości równej 1/3 zakresu). Po osiągnięciu progu wariogram nasycy się (rys. 2) (Zawadzki, 2011).

Kolejnym krokiem było przeprowadzenie modelowania wariogramu, które polegało na dopasowaniu matematycznego wariogramu teoretycznego do utworzonego wcześniej wariogramu eksperymentalnego. Jeden model sferyczny okazał się niewystarczający (z uwagi na odnotowane „załamanie” na wykresie), aby dopasować go do utworzonego wcześniej modelu empirycznego. Z tego względu autorzy niniejszej publikacji wykorzystali dwa modele sferyczne. Wariogramy zostały dopasowane „ręcznie” (tabela 2, rys. 2).

Tabela 2. Parametry modeli sferycznych ustawione „ręcznie” dla badanego terenu

Numer modelu	Parametr			
	Scale	Lenght (A)	Anisotropy	
			Ratio	Angle (degrees)
1	50	600	1	0
2	375	1700	1	0



Rys. 2. Wariogram empiryczny wraz z dopasowanym do niego „ręcznie” wariogramem teoretycznym badanego terenu

W celu sprawdzenia adekwatności wybranych wcześniej modeli teoretycznych wariogramów (mając na względzie niezależną próbę punktów opróbowania) wykonano walidację krzyżową, sprawdzian krzyżowy tzw. *kross-walidację* dla wybranej metody szacowania [Magnuszewski, 1999; Namysłowska-Wilczyńska, 2006; Wackernalgell, 2003]. Wśród znanych tego typu metod na uwagę zasługują m.in.: triangulacja, metoda wielokątów *Thiessena*, minimalnej krzywizny, odwrotnych odległości, interpolacja wielomianowa lub *Lagrange'a* itd. [Davis, 2002; Zawadzki, 2011]. W konsekwencji zastosowano metodę kriginu zwyczajnego – punktowego, który związany jest z estymowaniem wartości danego parametru (w analizowanym przypadku – wysokości) dla konkretnego punktu, mając na względzie wartości w punktach sąsiadujących (Namysłowska-Wilczyńska, 2006). Kriging nazywany jest często B.L.U.E. (*best linear unbiased estimator*), co świadczy o tym, iż jest on najlepszym liniowym nieobciążonym estymatorem, ponieważ minimalizuje wariancję błędów w porównaniu do pozostałych metod szacowania, które tego nie robią (Zawadzki, 2011).

Kross-walidację przeprowadzono w oparciu o wszystkie punkty opróbowania na całym badanym obszarze (tabela 3). Sprawdzenie krzyżowe pozwala uzyskać z punktów pomiarowych wartości estymowane oraz rezyduum. Estymacja polega na szacowaniu wartości rzeczywistych każdego punktu opróbowania na podstawie wartości punktów sąsiadujących (biorąc pod uwagę współczynniki wagowe krigingu; suma wag w analizowanym przypadku wyniosła 1, co wynika z warunku braku obciążenia pomiaru). Wartości estymowane wyliczono bazując na poniższym wzorze (2)

$$Z^*(x_0) = \sum_{i=1}^n w_i Z(x_i) \quad (2)$$

gdzie:

$Z(x_i)$ – wartość rzeczywista w punkcie opróbowania

w_i – waga krigingu

Obliczono również rezyduum (błąd estymacji) $R(x_0)$, czyli różnicę pomiędzy wartością estymowaną a wartością zmiennej losowej, która modeluje wartość rzeczywistą (Zawadzki, 2011). Prezentuje ją niżej podany wzór (3)

$$R(x_0) = Z^*(x_0) - Z(x_0) \quad (3)$$

Tabela 3. Parametry wybranych sześciu punktów próbkowania pozyskane w wyniku zastosowania *kross-walidacji*

X	Y	Z	Z^*	R	Liczba sąsiadów
0,886	860,610	286	286,257	0,257	32
80,581	890,015	286	285,940	-0,060	47
170,720	930,825	286	285,888	-0,112	50
230,491	990,596	286	285,849	-0,151	54
260,858	1070,292	286	285,877	-0,123	56
300,225	1150,949	286	285,816	-0,184	57

Przy sprawdzaniu krzyżowym na uwagę zasługują także wartości następujących błędów, mianowicie:

- błąd średni ME (*mean error*) – wskazuje na średnią różnicę między wartością przewidywaną i zmierzoną (jego wartość powinna być bliska 0) (4)

$$\frac{\sum_{i=1}^n R(x_i)}{n} \quad (4)$$

gdzie:

$R(x_i)$ – wartość rezyduum w punktach opróbowania

n – liczba zmiennych

- błąd średni kwadratowy MSE (*mean squared error*) – informuje, w jakim stopniu wartości szacowane są zbliżone do rzeczywistych (powinien być równy wariancji) (5)

$$\frac{\sum_{i=1}^n [R(x_i)]^2}{n} \quad (5)$$

- błąd średni kwadratowy standaryzowany MSDR (*mean squared standardized error*) – sygnalizuje przeszacowanie lub niedoszacowanie wartości estymowanych w stosunku do rzeczywistych (powinien być zbliżony do 1; jeśli jest mniejszy niż 1 wówczas mamy do czynienia z przeszacowaniem w przewidywaniu, natomiast jeśli jest większy niż 1 – zmienna jest niedoszacowana) (6)

$$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{[R(x_i)]^2}{\sigma_i^2} \quad (6)$$

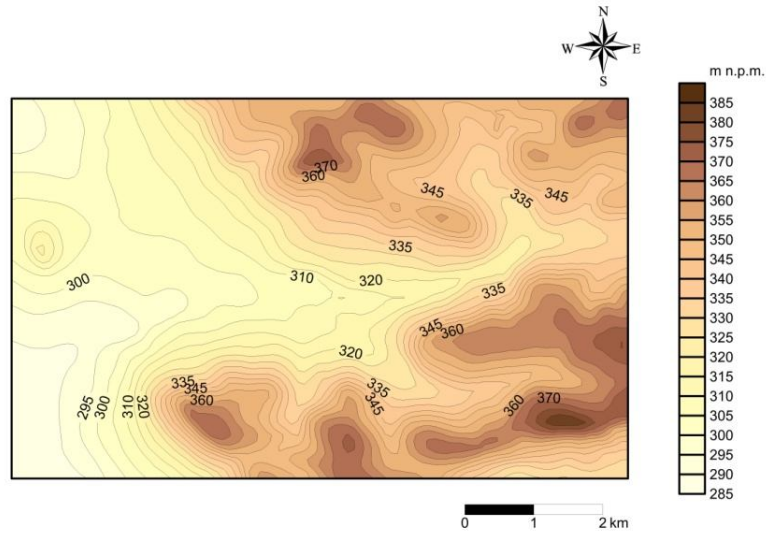
gdzie:

σ_i^2 – wariancja kriginu

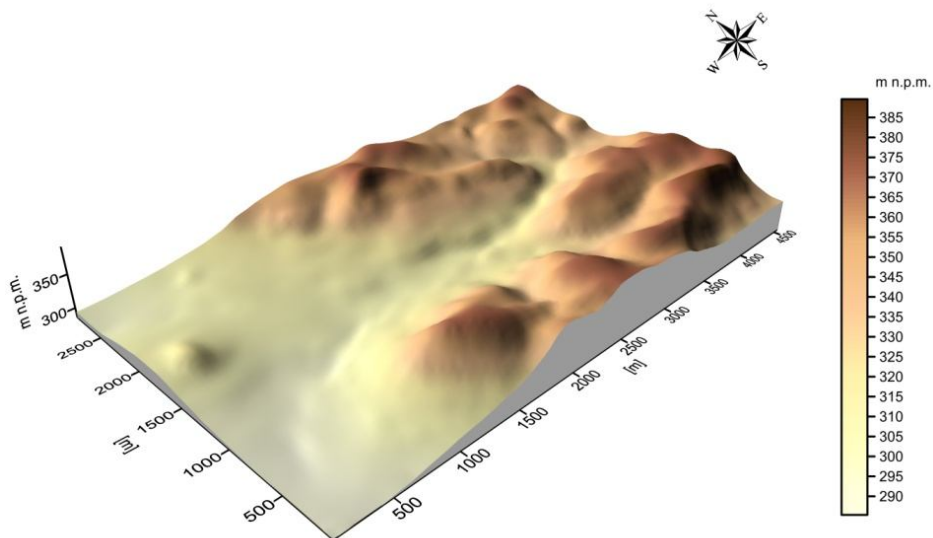
Zastosowana procedura *kross-walidacji* potwierdziła użycie modeli sferycznych w rozpatrywanym przykładzie, ponieważ błąd średni wyniósł 0,008, błąd średni kwadratowy był równy wariancji (jej wartość wyniosła również 0,624), a wartość błędu średniego kwadratowego standaryzowanego stanowiła 0,891.

Kolejnym etapem było przystąpienie do *gridingu*, czyli procesu, który polega na przetwarzaniu punktów XYZ w regularną prostokątną siatkę wartości (www.surfer.net.pl). Wykonano estymację wartości punktów w węzłach siatki interpolacyjnej na podstawie wszystkich punktów próbkowania – kriginem zwyczajnym – punktowym.

Po przeprowadzeniu ww. procedur wygenerowano mapę izoliniową piaskowni „Siemonia” oraz cyfrowy model terenu, mając na względzie wcześniej dopasowane „ręcznie” wariogramy (rys. 3, 4).



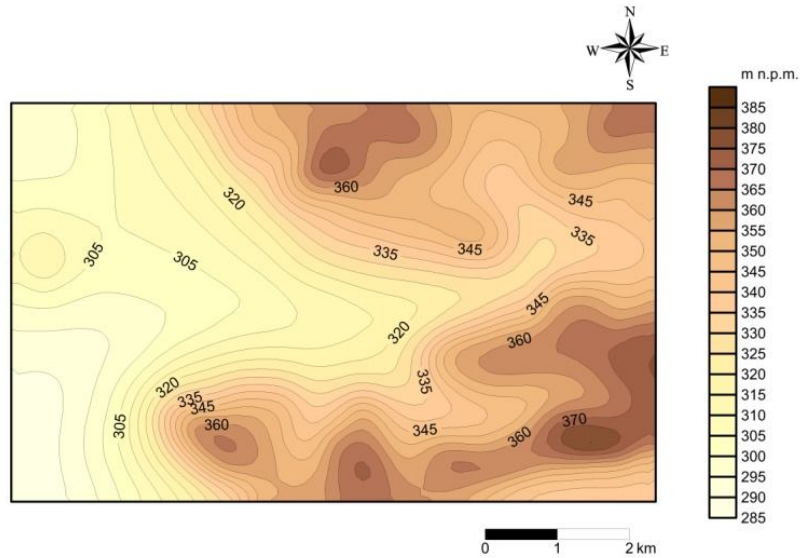
Rys. 3. Mapa hipsometryczna badanego terenu uzyskana w wyniku zastosowania krigingu zwyczajnego – punktowego po przeprowadzeniu analizy strukturalnej i *kross-walidacji* z dopasowaniem „ręcznym” wariogramów



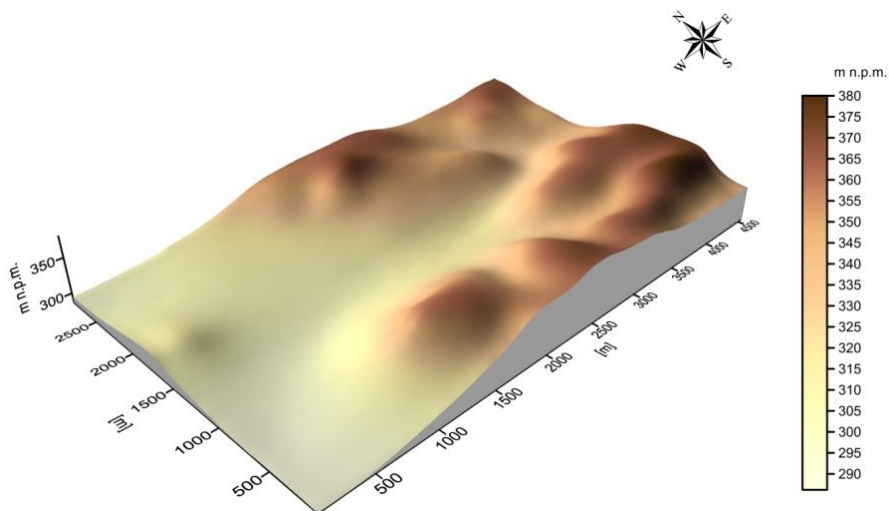
Rys. 4. Cyfrowy model terenu uzyskany w wyniku zastosowania krigingu zwyczajnego – punktowego po przeprowadzeniu analizy strukturalnej i *kross-walidacji* z dopasowaniem „ręcznym” wariogramów

Zastosowanie kriginu zwyczajnego do rekonstrukcji i wizualizacji *reliefu* w miejscach odkrywkowej eksploatacji piasku

Dodatkowo wykonano mapę izoliniową wraz z NMT bez przeprowadzonej wcześniej analizy strukturalnej i *kross-walidacji* w celu prezentacji dawnej rzeźby badanych czterech pól piaskowych wraz z obszarami otaczającymi (rys. 5, 6).



Rys.5. Mapa hipsometryczna badanego terenu otrzymana bez przeprowadzonej analizy strukturalnej i *kross-walidacji*



Rys. 6. Cyfrowy model badanego terenu otrzymany bez przeprowadzonej analizy strukturalnej i *kross-walidacji*

Po dokładnym przeanalizowaniu powyższych rycin można uznać, iż zastosowanie metod geostatystycznych (w tym krigingu zwyczajnego – punktowego) wraz z analizą strukturalną i *kross-walidacją* w procedurze odtwarzania rzeźby, a w dalszej kolejności jej wizualizacji z okresu sprzed prowadzonej eksploatacji daje dokładniejsze rezultaty niż wygenerowanie modelu cyfrowego bez ich zastosowania (rys. 3, 4, 5, 6). Zaprezentowana rzeźba na rysunku 4 jest zdecydowanie wyraźniej uwydatniona niż na rysunku 6. W związku z powyższym na podstawie rysunku 4 można stwierdzić, iż przed rozpoczęciem eksploatacji piasku, wykorzystywanego do podsadzania pustek po eksploatacji węgla kamiennego obszar Rogoźnika i okolic nie wyróżniał się niczym szczególnym na tle obszarów sąsiadujących. Koryto potoku Jaworznik znajdowało się ok. 200 m na północ od północnego brzegu jednego z aktualnie istniejących rogoźnickich zbiorników (tzw. zbiornika górnego – pole „Rogoźnik”). Po zakończonej eksploatacji przeprowadzono tutaj działania hydrotechniczne, które polegały na zmianie biegu Jaworznika w celu skierowania jego wód do dwóch największych odkrywek popiaskowych (pole „Rogoźnik” i pole „Niebyła”). W efekcie powstały dwa połączone ze sobą zbiorniki wodne. Przed rozpoczęciem eksploatacji u podnóża wzniesienia Buczyna nie wpływało jedno ze źródeł wody pitnej o charakterze artezyjskim (genezę jego powstania można tłumaczyć działalnością eksploatacyjną). W podłożu analizowanego obszaru nie odnotowano szczególnie odznaczających się geomorfologicznych form antropogenicznych. Dopiero eksploatacja materii piaszczystej na cele podsadzkowe miała decydujący wpływ na zmiany morfologiczne badanego obszaru (Zarychta R., Zarychta A., 2013).

4. UWAGI KOŃCOWE

Metody geostatystyczne, w tym m.in. technika krigingu wraz z zastosowaną analizą strukturalną i *kross-walidacją* rzutuje na uzyskanie dokładnego modelu cyfrowego terenu. Bez znajomości geostatystyki nie jesteśmy w stanie utworzyć trójwymiarowego modelu terenu, który będzie szczegółowo ilustrował rzeźbę, a w związku z tym umożliwił przeprowadzenie wnikliwych interpretacji morfometrycznych (w tym również przy analizie współczesnej rzeźby przekształconej przez człowieka np. w wyniku prac górniczych), co znajduje potwierdzenie w niniejszym artykule. Jednakże z uwagi na niewielką ilość miejsca autorzy publikacji zaprezentowali jedynie możliwość tworzenia NMT w oparciu o metody geostatystyczne.

Mimo, iż krigingowi zwyczajnemu towarzyszy efekt wygładzenia – doskonale radzi on sobie przy tworzeniu obrazu trójwymiarowego dla dużej liczby punktów opróbowania. W analizowanym przypadku przeprowadzenie korekty wspomnianego efektu nie przyniosłoby widocznych rezultatów, ponieważ analizą objęto znaczną liczbę punktów (aż 3628). W związku z powyższym można uznać, iż w tym przypadku redukcja efektu wygładzenia nie jest wymagana.

Reasumując, prowadzenie geomorfologicznych analiz kameralnych bez znajomości metod geostatystycznych prowadzi zazwyczaj do tworzenia mocno hipotetycznego, a w związku z tym w niewielkim stopniu zbliżonego do rzeczywistości numerycznego modelu terenu. Jego interpretacja może mieć jedynie powierzchowny charakter, nie zawsze

zgodny ze stanem faktycznym, co ostatecznie może przyczynić się do błędnego wniosku merytorycznego z przeprowadzonych analiz.

LITERATURA

- Badura H., Zawadzki J., Fabijańczyk P., 2012. Kriging blokowy oraz metody GIS w eostatystycznym szacowaniu metaloności w kopalniach węgla kamiennego. *Roczniki Geomatyki*, Polskie Towarzystwo Informatyki Przestrzennej, X, 3(53), s. 17-26.
- Bąkowski Z., 2000. Zastosowanie numerycznych charakterystyk urzeźbienia terenu. *Geodezja w systemach geoinformacyjnych, XVII Jesienna Szkoła Geodezji, Polanica-Zdrój, 11-14 października 2000*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, s. 43-50.
- Biernat S., 1955. Mapa Geologiczna Polski w skali 1:50 000, arkusz Wojkowice. Wyd. Geologiczne, Warszawa.
- Bostan P.A., Heuvelink G.B.M., Akyurek S.Z., 2012. Comparison of regression and kriging techniques for mapping the average annual precipitation of Turkey. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, Vol. 19, s. 115–126.
- Ciepiela B., 2008. *Zagłębiowskie kopalnie węgla w czasopiśmie naukowo-technicznych*. Stowarzyszenie Artystów Polskich. Oddział: Stowarzyszenie Inżynierów i Techników Górnictwa Koło "Zagłębie", Będzin, s. 19-23.
- Czyłok A., Rahmonov O., 1996. Unikatowe układy fitocenotyczne w wyrobiskach wschodniej części województwa katowickiego. *Kształowanie środowiska geograficznego i ochrona przyrody na obszarach uprzemysłowionych i zurbanizowanych.*, 23, s. 27-31.
- Davis J., 2002. *Statistics and data analysis in geology*. John Wiley & Sons, New York, Chichester, Brisbane, Toronto, Singapore, s. 638.
- Dulias R., 2010. Landscape planning in areas of sand extraction in the Silesian Upland, Poland. *Landscape and Urban Planning*, 95(3), s. 91–104.
- Flis A., 1998. Trójwymiarowa wizualizacja zmian użytkowania ziemi na terenie letniskowej wsi Łupawsko i w jej najbliższym otoczeniu (park krajobrazowy „Dolina Słupi”). *Problemy Ekologii Krajobrazu*, 4, s. 109-113.
- Ganas A., Pavlides S., Karastathis V., 2005. DEM-based morphometry of range-front escarpments in Attica, central Greece, and its relation to fault slip rates. *Geomorphology*, 65, s. 301–319.
- Gawryś J., 2008. Ocena wytrzymałości pakietów skał stropowych pokładów węgla metodą geostatystyczną. *Prace Naukowe GIG. Górnictwo i Środowisko*, 4, s. 5-16.
- Hengl T., Minasny B., Gould M., 2009. Variogram interpretation and modeling. *Mathematical Geology*, 33 (91), s. 507-534.
- Isaaks E.H., Srivastava R.M., 1989. *Applied geostatistics. An Introduction*. Oxford University Press, New York, s. 1-551.
- James A., Hodgson M.E., Ghoshal S., Latiolais M.M., 2012. Geomorphic change detection using historic maps and DEM differencing: The temporal dimension of geospatial analysis. *Geomorphology*, 137, s. 181–198.

- Kokesz Z., 2006. Trudności i ograniczenia w geostatystycznym modelowaniu zmienności złóż i szacowaniu zasobów metodą krigingu. *Gospodarka surowcami mineralnymi*, 22(3), s. 5-20.
- Kokesz Z., 2010. Uwarunkowania stosowania krigingu zwyczajnego do sporządzania map zioliniowych. *Biuletyn Państwowego Instytutu Geologicznego*, 439, s. 403-408.
- Kondracki J., 2000. *Geografia regionalna Polski*. PWN, Warszawa, s. 243-248.
- Kriege D.G., 1951. *A statistical approach to some mine valuation and allied problems at the Witwatersrand. Master's thesis*. University of Witwatersrand, Witwatersrand, South Africa.
- Kühni, A., Pfiffner, O.A., 2001. The relief of the Swiss Alps and adjacent areas and its relation to lithology and structure: topographic analysis from a 250-m DEM, *Geomorphology*, Vol. 41, 4, s. 285-307.
- Kumar S., Lal R., Liu D., 2012. A geographically weighted regression kriging approach for mapping soil organic carbon stock. *Geoderma*, Vol. 189-190, s. 627-634.
- Lin Y-P., Chang T-K., Shih Ch-W., Tseng Ch-H., 2002. Factorial and indicator kriging methods using a geographic information system to delineate spatial variation and pollution sources of soil heavy metals. *Environmental Geology*, 42(8), s. 900-909.
- Magnuszewski A., 1999. *GIS w geografii fizycznej*. PWN, Warszawa, s. 187..
- Mapa Topograficzna Polski w skali 1:10 000, ark. Psary*. 1995a. OPGiK, Kraków, Białystok.
- Mapa Topograficzna Polski w skali 1:10 000, ark. Rogoźnik*. 1995b. OPGiK, Kraków, Białystok.
- Marmol U., 2002. Modelowanie reprezentacji powierzchni topograficznej z wykorzystaniem metody geostatystycznej. *Geodezja*, 8(2), s. 259-270.
- Matheron G., 1962. *Traité de Géostatistique Appliquée*. Editions Technip. Paris.
- Matias J. M., Vaamonde A., Taboada J., González-Manteiga W., 2004. Comparison of Kriging and Neural Networks With Application to the Exploitation of a Slate Mine. *Mathematical Geology*. 36(4), s. 463-486.
- Mucha J., Kotliński R., Wasilewska-Błaszczuk M., 2011. Metodyka szacowania parametrów zasobowych złóż koncentracji polimetalicznych w obszarze Interoceanmetal na Pacyfiku. *Zeszyty Naukowe Instytutu Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią Polskiej Akademii Nauk*, 81, s. 137-145.
- Mucha J., Wasilewska M., 2006. Nieparametryczne geostatystyczne metody interpolacji parametrów wybranych złóż. *Przegląd Górniczy*, 62(1), s. 24-31.
- Namysłowska-Wilczyńska B., 2006. *Geostatystyka*. Teoria i zastosowania. OWPW, Wrocław, s. 356.
- Nita J., Małolepszy Z., Chybiorz R., 2007. Zastosowanie numerycznego modelu terenu do wizualizacji rzeźby terenu i interpretacji budowy geologicznej. *Przegląd geologiczny*, 55(6), s. 511-520.
- Schiefer E., Gilbert R., 2007. Reconstructing morphometric change in a proglacial landscape using historical aerial photography and automated DEM generation. *Geomorphology*, Vol. 88, 1-2, s. 167-178.
- Szubert M., 2003. Cyfrowy model wysokości powierzchni podczwartorzędowej na Wyżynie Woźnicko-Wieluńskiej. *Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji, Materiały Ogólnopolskiego Sympozjum Geoinformacji „Geoinformacja zintegrowanym narzędziem badań przestrzennych” Wrocław – Polanica Zdrój, 15-17 września 2003 r.*, Vol. 13 A, s. 233-242.

Szubert M., 2007. Geoinformatyka w geomorfologii na przykładzie badań geomorfologicznych na Wyżynie Wieluńskiej i Częstochowskiej. *Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji*, Vol. 17b, s. 759-768.

Szymczyk A., 1999. Significance of karst water outflows to spontaneous regeneration of biocenosis on the basis in Siemonia sandpit. Poland. *Acta Universitatis Szegethensis, Acta Geographica*, 36, s. 78-84.

Szymczyk A., Rahmonov O., 2010. Szata roślinna antropogenicznych cieków i stref wypływów wód w piaskowni „Siemonia”. *Kształtowanie środowiska geograficznego i ochrona przyrody na obszarach przemysłowych i zurbanizowanych*, 42, s. 80–87.

Usowicz B., Usowicz Ł., 2004. Punktowe pomiary wilgotności gleby a jej przestrzenny rozkład na polach uprawnych. *Acta Agrorhysica*. 4 (2), s. 573-588.

Wackernagel H., 2003. *Multivariate geostatistics. An introduction with applications*. Third, completely revised edition. Springer-Verlag, Heidelberg, s. 1-387.

Zarychta A., Zarychta R., 2012. Paleogleby jako źródło rekonstrukcji *reliefu* „polskiej Sahary”. *Rocznik Świętokrzyski Ser. B – Nauki Przyrodnicze*, 33, s. 139-154.

Zarychta R., Zarychta A., 2011. Przemiany w krajobrazie wyrobiska plejstocénkich piasków wodnolodowcowych w granicach gminy Kobbiele Wielkie. *Z badań nad wpływem antropopresji na środowisko*, 12, s. 117-129.

Zarychta R., Zarychta A., 2012a. Numeryczny model terenu jako forma prezentacji zrekonstruowanej rzeźby terenów odkształconych antropogenicznie. „*Stare i nowe*” *problemy badawcze w geografii społeczno-ekonomicznej*. PTG Oddział Katowicki, Uniwersytet Śląski WNoZ, Sosnowiec, 3, s. 111-122.

Zarychta R., Zarychta A., 2012b. Górnictwo „towarzyszące” eksploatacji węgla kamiennego na przykładzie Kopalni Piasków Podsadzkwych „Siemonia”. *Creative Science – Monografia 2012*. Nowe trendy w naukach przyrodniczych, 1, s. 142-151.

Zawadzki J., 2002. Badania korelacji przestrzennych zawartości wybranych pierwiastków śladowych w glebach Warszawy i okolic. *Ochrona Środowiska*, 24 (4), s. 17-26.

Zawadzki J., 2011. *Metody geostatystyczne dla kierunków przyrodniczych i technicznych*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa, s. 132.

Żyszkowska W., 1980. The application of numerical model for quantitative analysis of relief. *10th International Conference of the International Cartographic Association, August 25 – September 1*, Tokyo, Japan, s. 32-34.

Żyszkowska W., 1982. Analiza charakterystycznych cech rzeźby na podstawie numerycznych modeli terenu. *Dokumentacja Geograficzna*, 6, s. 34-36.

GoldenSoftware. 2013: www.surfer.net.pl

APPLICATION OF ORDINARY KRIGING TO RECONSTRUCT AND VISUALISE THE RELIEF IN THE LOCATION OF AN OPEN PIT SAND MINE

KEY WORDS: geostatistics, ordinary kriging, relief, Silesian Upland, "Siemonia" sand mine

Summary

Extraction of mineral resources, including rocks, usually causes some significant changes of the landscape. Transformation of the relief which character and scale can be analysed by means of cartographic materials seems to be the most interesting. Reconstruction of the relief of the period prior to the exploitation is a starting point for such investigation. It can be done basing on archival cartographic materials which are difficult to obtain. However, too varied morphological material of the area can lead to erroneous conclusions which suggests interpretation of three-dimensional models of the relief.

Hence, the paper deals with reconstruction and visualisation of the relief (in the period before the exploitation) of four sand fields of the old sand mine excavation "Siemonia". A geological map of Poland (Wojkowice sheet) has been used for the purpose. A geostatistical analysis by means of the programmes Surfer 8. and ArcGIS 10.1. has been performed on the map. An estimation method called ordinary kriging, which is related to B.L.U.E. (*best linear unbiased estimator*), where the condition of the lack of weight of the measurement (the sum of weight is equal to 1) is fulfilled, has been applied. The calculated values of errors (mean error, mean squared error and mean squared standardised error) obtained as a result of application of the *cross-validation* procedure are, to a large extent, in agreement with predetermined values of errors given by numerous authors in the scientific literature. It confirms proper "manual" adjustment of two mathematical models of spherical variograms and empirical variograms.

The generated contour map of the investigated area (based on estimated points of sampling in nodes of the interpolation grid) together with its three-dimensional digital model are more adequate (due to significant marking of the relief) to the previous state of the investigated area than the two other presented types of cartographic visualisations made without application of the geostatistical methods. Hence, the graphic presentation of results, mentioned as the last one, can be only applied to visualise the relief without any detailed geomorphological interpretations due to its inaccuracy. It seems to be obvious that detailed analyses can be performed basing on a digital model of the terrain accompanied by its contour map obtained when reconstruction of the relief is made by means of geostatistical methods (especially ordinary kriging).

Dane autorów:

mgr Roksana Zarychta
e-mail: roxana_z@vp.pl
telefon: 0-793-933-255

mgr Adrian Zarychta
e-mail: adrian.zarychta@o2.pl
telefon: 0-603-152-211