

**GEOINFORMATYKA W GEOMORFOLOGII
NA PRZYKŁADZIE BADAŃ GEOMORFOLOGICZNYCH
NA WYŻYNIE WIELUŃSKIEJ I CZĘSTOCHOWSKIEJ**

**GEOINFORMATICS IN GEOMORPHOLOGY
A CASE OF GEOMORFOLOGICAL STUDIES
IN THE WIELUŃ AND CZĘSTOCHOWA UPLANDS**

Mariusz Szubert

Institut Geografii Akademii Pedagogicznej im. Komisji Edukacji Narodowej w Krakowie

SŁOWA KLUCZOWE: geomorfologia, geoinformatyka, geostatystyka, kriging, wariogram, rzeźba kopalna, geomorfologia cyfrowa, cyfrowy model geomorfologiczny.

STRESZCZENIE: W publikacji zaprezentowano zastosowanie geoinformatyki w badaniach geomorfologicznych na Wyżynie Wieluńskiej i Wyżynie Częstochowskiej w oparciu o koncepcję geomorfologii cyfrowej, funkcjonującej na styku geomorfologii i geoinformatyki. Przedmiotem badań jest rzeźba podczwartorzędowa ukształtowana na wapieniach górnourajskich oraz marglach, piaskowcach i łach środkowourajskich. Dane o głębokości podłoża utworów czwartorzędowych uzyskano z kart 4399 odwiertów oraz z 2088 punktów zdigitalizowanych na szczegółowej mapie geologicznej Polski w obrębie wychodni skał jurajskich (Rys. 2). Rekonstrukcję rzeźby podczwartorzędowej przeprowadzono zgodnie ze schematem budowy cyfrowego modelu geomorfologicznego (Rys. 1). Poszczególne jego elementy ukazują realizację głównych funkcji GIS. Funkcje analityczne GIS wzbogacono analizą geostatystyczną, którą wykorzystano do opracowania cyfrowego modelu geomorfologicznego (DGM) metodą krigingu zwyczajnego. Kluczowe znaczenie ma analiza przestrzennej korelacji danych oparta na funkcji wariogramu. Do wariogramu empirycznego najlepiej pasował teoretyczny model złożony: z modelu efektu bryłki i modelu potęgowego (Rys. 3). Podstawą budowy cyfrowego modelu geomorfologicznego była analiza podobieństwa danych w punktach pomiarowych. Model ten obrazuje nie tylko hipsometrię, ale również szczegóły rzeźby terenu. Tym samym odzwierciedla intensywność procesów rzeźbotwórczych przebiegających w nawiązaniu do budowy geologicznej. Na jego podstawie można klasyfikować formy rzeźby terenu. Jest to podstawowa mapa cyfrowa, która odzwierciedla złożoność procesów kształtujących rzeźbę terenu, dzięki czemu jest podstawą wnioskowania o morfogenezie badanego obszaru. Dlatego określony został jako cyfrowy model geomorfologiczny (DGM).

1. GEOINFORMATYKA A GEOMORFOLOGIA

Geoinformatyka, która wyrosła na styku informatyki i nauk o Ziemi (Michalak, 2000) stworzyła nowe możliwości w zakresie pozyskiwania i przetwarzania danych przestrzennych (geodanych). W przypadku badań elementów środowiska geograficznego oraz związków pomiędzy nimi, geoinformatyka (geomatyka) poszerza możliwości analizy oraz wnioskowania o przedmiocie badań, co w efekcie daje nowe spojrzenie na zagadnienia

wcześniej opracowane tradycyjnymi metodami. Jest to możliwe, ponieważ geoinformatyka integruje różne dziedziny wiedzy, które zajmują się przetwarzaniem danych przestrzennych przy pomocy oprogramowania GIS (Longley *et. al.*, 2006).

W porównaniu z innymi naukami o Ziemi np. geologią, klimatologią, kartografią i geodezją geoinformatyka nie w pełni wykorzystywana jest w geomorfologii. Przykładem może być stosowanie systemów informacji geograficznej ograniczone do prostych analiz (np. nakładanie warstw) i wizualizacji rzeźby terenu jako cyfrowych modeli wysokości (DEM). Poparciem tej tezy jest również fakt, że sformułowania „geomorfologia cyfrowa” oraz „cyfrowy model geomorfologiczny” oraz angielskie ich odpowiedniki nie zostały odnalezione w Internecie na polskich stronach. W zasobach Internetu na stronach obcojęzycznych nazwa „digital geomorphology” pojawiła się 50 razy, a „digital geomorphology model” 6 razy (przeszukiwanie wyszukiwarką Google w listopadzie 2007 r.).

Aby w pełni wykorzystać nowoczesne technologie niezbędna jest współpraca geomorfologów z geodetami. W zakresie pozyskiwania i przetwarzania danych o terenie inicjatywę przejęli geodeci, którzy rejestrują formy terenu z zastosowaniem najnowszych technologii. Geomorfolodzy wraz z geodetami, geofizykami i informatykami mogą tworzyć cyfrowe modele geomorfologiczne obrazujące związki pomiędzy ukształtowaniem terenu a budową geologiczną, przebieg procesów rzeźbotwórczych oraz prognozy rozwoju konkretnych form np. osuwisk, stoków, wąwozów itp.

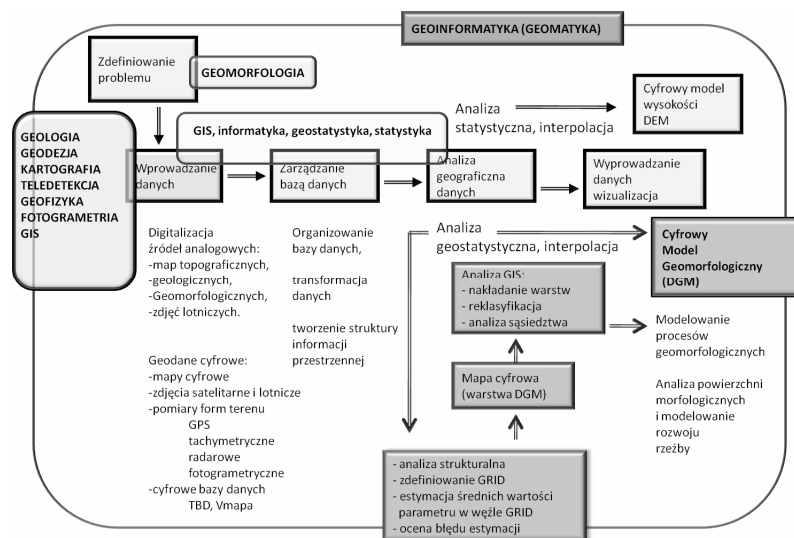
Na styku geoinformatyki i geomorfologii funkcjonuje geomorfologia cyfrowa realizowana technikami GIS przez interdyscyplinarne zespoły skupiające geomorfologów, geologów, geodetów, kartografów, informatyków, matematyków. Istotą geomorfologii cyfrowej jest numeryczny zapis wyników badań terenowych prowadzonych metodami geodezyjnymi i teledetekcyjnymi, wykorzystanie zasobów cyfrowych baz danych zastosowanie geostatystyki i analizy GIS w ich przetwarzaniu oraz wizualizacja rzeźby terenu za pomocą cyfrowego modelu geomorfologicznego (DGM).

2. CYFROWY MODEL GEOMORFOLOGICZNY

Realizacja badań w geomorfologii cyfrowej opiera się na wykorzystaniu technologii GIS przy gromadzeniu, przetwarzaniu jak również udostępnianiu informacji przestrzennej. Wyniki badań prezentowane są w postaci cyfrowego modelu geomorfologicznego (DGM). Powstaje on w rezultacie zastosowania różnych technik pozyskiwania geodanych niezbędnych do rozwiązania postawionego problemu, wykorzystania wybranych narzędzi GIS w połączeniu z wiedzą z zakresu geomorfologii.

Budowę DGM obrazuje schemat oparty na realizacji podstawowych funkcji GIS (Kistowski *et. al.*, 1997) (Rys. 1). Przebieg poszczególnych etapów badawczych podporządkowany jest zdefiniowanemu przez geomorfologów problemowi. W aspekcie przestrzennym zadanie badawcze może mieć zasięg globalny, regionalny, lokalny, może dotyczyć wybranych form rzeźby terenu, przebiegu procesów rzeźbotwórczych, morfogenezy rzeźby.

Na etapie wprowadzania danych wykorzystywana jest wiedza i umiejętności kartografów i geodetów. Chodzi o efektywne wykorzystanie materiału kartograficznego oraz zasobów cyfrowych baz danych np. Vmap, bazy danych topograficznych (TBD).



Rys. 1. Schemat budowy cyfrowego modelu geomorfologicznego

Część danych pochodzi z bezpośrednich pomiarów terenowych w systemie DGPS, metodami teledetekcyjnymi, radarowymi oraz fotogrametrycznymi. Ważnym walorem uzyskiwanych w ten sposób geodanych jest możliwość wektorowego ich kodowania w bazie danych.

Drugi etap to tworzenie i organizacja bazy danych oraz związana z tym transformacja danych przestrzennych. Obejmuje ona zadania wymagające współdziałania geomorfologa, informatyka i geodety. Są to przykładowo: projektowanie bazy danych przestrzennych (relacyjna, hierarchiczna lub sieciowa); transformacja danych (konwersja układów współrzędnych, przeskalowanie, rastryzacja lub wektoryzacja, rektyfikacja materiałów teledetekcyjnych, aktualizacja danych); tworzenie struktury informacji przestrzennej (budowa topologii, indeksowanie).

W trzecim etapie typowe procedury analityczne GIS zostały poszerzone analizą geostatystyczną. Sens zastosowania metod geostatystycznych zawiera się w zmniejszeniu znaczenia lokalizacji punktu pomiarowego na rzecz podobieństwa pomiędzy punktami pomiarowymi. W konsekwencji relacje hipsometryczne obrazowane przez DGM odzwierciedlają zarówno wielkoskalowy przebieg procesów geomorfologicznych, jak również ich lokalne zróżnicowanie.

Cyfrowy model geomorfologiczny ma cechy wynikające z istoty geostatystyki. Podstawą jego konstrukcji jest wysokość terenu pomierzona w określonych punktach, które są losowo rozmieszczone w terenie. Pomierzone wartości są zmiennymi zregionalizowanymi, ponieważ zależą one od położenia w przestrzeni. Jako zmienne zregionalizowane wykazują one losowość i strukturę. Losowość uwzględnia lokalne nieprawidłowości, a struktura ukazuje wielkoskalowe tendencje badanego zjawiska

(Namysłowska-Wilczyńska, 2006). W tym ujęciu prezentowana powierzchnia jest jedną z wielu, które można wygenerować na podstawie zgromadzonych danych. Dlatego bardzo ważnym jest ocena poprawności opracowanego modelu.

Cyfrowy model geomorfologiczny obrazuje wielkoskalowe tendencje rozwoju geomorfologicznego badanego obszaru postępującego w ścisłym związku z odpornością skał podłoża na denudację. Na ich tle uwidacznia formy terenu będące wynikiem lokalnego zróżnicowania procesów geomorfologicznych, co wynika z losowego aspektu zmiennych zregionalizowanych.

Czym zatem jest cyfrowy model geomorfologiczny (DGM)? Jest to mapa cyfrowa, której głównymi cechami są: duża szczegółowość prezentacji ukształtowania terenu oraz wysoki stopień przybliżenia do rzeczywistości. Jego konstrukcja w możliwie szerokim zakresie powinna być oparta o dane cyfrowe i analizę geostatystyczną. W odróżnieniu od cyfrowego modelu wysokości DGM obrazuje nie tylko zróżnicowanie hipsometryczne, ale również formy rzeźby terenu. Prezentując DGM trzeba określić na podstawie wyników kross-walidacji (lub innej techniki oceny) jego stopień przybliżenia do rzeczywistości, tak aby nie było wątpliwości, co do szczegółów morfologicznych obrazowanych form rzeźby i możliwa była ich klasyfikacja np. rynną subglacjalną, doliną wciosową, doliną polodowcową, kocioł eworsyjny. Możliwości analityczne rzeźby zwiększą się po połączeniu DGM z mapą geologiczną, przekrojami geologicznymi, profilami wierceń.

Tworzenie cyfrowego modelu geomorfologicznego (DGM) przebiega dwuetapowo. W pierwszym następuje badanie przestrzennej struktury danych z wykorzystaniem funkcji wariogramu. Polega to na obliczeniu wariogramu empirycznego obrazującego przestrzenną korelację danych i dopasowaniu do niego wariogramu teoretycznego. W konsekwencji następuje wybór jednego z wielu teoretycznych modeli wariogramu, który najlepiej pokazuje średnią zmienność przestrzenną (Namysłowska-Wilczyńska 2006; Wackernagel, 2003). W drugim etapie wykorzystuje się system krigingowy do estymacji wartości wysokości w węzłach siatki interpolacyjnej.

3. RZEŻBA PODCZWARTORZĘDOWA W UJĘCIU GEOMORFOLOGII CYFROWEJ

Koncepcję geomorfologii cyfrowej zastosowano w badaniach rzeźby podczwartorzędowej na Wyżynie Woźnicko-Wieluńskiej i Wyżynie Częstochowskiej. Poznanie ukształtowania kopalnych powierzchni morfologicznych ma kluczowe znaczenie w odtwarzaniu rozwoju rzeźby terenu. Kopalne formy zawierają zapis czynników rzeźbotwórczych, które w przeszłości geologicznej danego obszaru miały istotny wpływ na jego rozwój, a w obecnej rzeźbie terenu nie są czytelne.

3.1. Zdefiniowanie problemu

Celem pierwszego etapu badań była rekonstrukcja rzeźby podczwartorzędowej na pograniczu Wyżyny Częstochowskiej i Wyżyny Wieluńskiej oraz przedstawienie jej w postaci cyfrowego modelu geomorfologicznego. Celem drugiego etapu badań będzie opracowanie koncepcji rozwoju paleogeograficznego północnej części Wyżyny Śląsko-Krakowskiej we wczesnym neogenie. Ten etap zostanie zrealizowany w oparciu o analizę GIS, w której oprócz cyfrowego modelu geomorfologicznego (warstwa podstawowa)

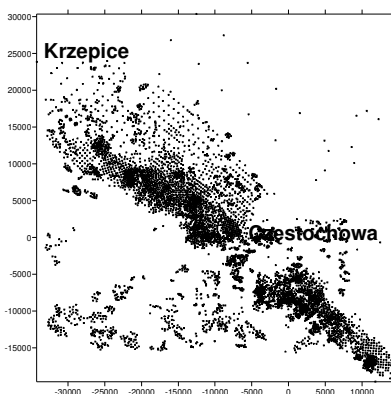
wykorzystane będą warstwy: hipsometria, budowa geologiczna, miąższość osadów plejstoceńskich, odporność skał jurajskich na denudację. Końcowe opracowanie uzupełnią profile wybranych odwiertów i przekroje geologiczne.

3.2. Wprowadzanie danych

Opracowanie postawionego problemu wymagało pozyskania danych z różnych źródeł: archiwalnych kart otworów wiertniczych, map geologicznych, map topograficznych, pomiarów terenowych (GPS). Ważnym, chociaż nie wykorzystanym na tym etapie badań źródłem danych będzie sondowanie georadarowe.

Dane o wysokości podłoża osadów czwartorzędowych uzyskałem z 4399 odwiertów wykonanych przez Częstochowskie Przedsiębiorstwo Geologiczne w latach 1949-1970 i z 2088 punktów zdigitalizowanych na szczegółowej mapie geologicznej. W sumie wykorzystano 6487 punktów rozmieszczonych na obszarze ok. 800 km².

Odwierty (punkty próbkowania) rozmieszczone są nierównomiernie (Rys. 2). Był to problemem, który trzeba było uwzględnić w analizie geostatystycznej i doborze parametrów interpolacji komputerowej. Odległości pomiędzy odwiertami rozmieszczonymi w prostokątnej siatce wahały się od kilku km do kilkudziesięciu m. Punkty z danymi zagęszczone były w środkowej części obszaru na kierunku NW-SE, podczas gdy w części SW i NE było ich niewiele.



Rys. 2. Dziedzina - obszar badań z nierównomiernie rozmieszczonymi punktami próbkowymi

Dane o budowie geologicznej uzyskano z Mapy Geologicznej Polski 1:200 000 (arkusze Częstochowa i Kluczbork) i ze Szczegółowej Mapy Geologicznej Polski 1:50 000 (arkusze: Częstochowa, Kłobuck, Krzepice).

Geodane zapisano w realcyjnej bazie danych. Dane dla każdej warstwy tematycznej zgromadzono w oddzielnej tabeli, które połączono kluczami.

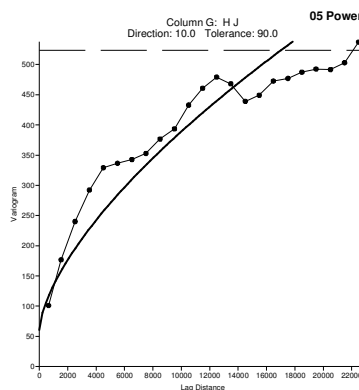
3.3. Analiza geograficzna danych, analiza geostatystyczna

Rekonstrukcja rzeźby kopalnej wymaga starannego doboru metody interpolacji. Przy ocenie i wyborze najlepszej metody kierowano się następującymi kryteriami: wielkością i rozkładem średniego błędu interpolacji, właściwościami metod oraz poprawnością kartograficzną DEM. Ostatecznie wybrano metodę krigingu zwyczajnego punktowego, w której najpierw przeprowadza się przestrzenną analizę strukturalną, a następnie estymację wartości w węzłach siatki interpolacyjnej (*gridding*).

Analiza strukturalna polegała na zbadaniu przestrzennej korelacji wartości w punktach próbkowania $Z(x)$ oddalonych o pewną odległość (h) z wykorzystaniem funkcji wariogramu $\gamma(h)$.

$$(1) \gamma(h) = 0.5 \text{Var}[Z(x+h) - Z(x)]$$

Ponieważ punktów próbkowania było bardzo dużo zostały one uporządkowane w klasach wariogramu (*Lag Distance*) o rozpiętości 1000 m. Wartość funkcji obliczono dla każdej pary punktów w poszczególnych klasach wariogramu, dla których wyliczono wartości średnie. Na ich podstawie wykreślono wariogram empiryczny (Rys. 3).



Rys. 3. Wariogram empiryczny i teoretyczny model wykładniczy (grubsza linia)

Przy odtwarzaniu powierzchni kopalnej z uwagi na niedostępność przedmiotu badań do bezpośredniej obserwacji, szczególnego znaczenia nabiera problem oceny stopnia przybliżenia DGM do rzeczywistości. W przypadku krigingu przybliżenie DGM do rzeczywistości zależy przede wszystkim od prawidłowości określenia wag krigingowych, co pozostaje w związku z właściwym wyborem teoretycznego modelu wariogramu i poprawności dopasowania modelu teoretycznego do modelu empirycznego.

W celu optymalnego wyboru modelu teoretycznego wariogramu przeprowadzono kross-walidację (Namysłowska-Wilczyńska, 2006; Wackernaeggell, 2003). Podstawą wyboru była ocena błędu interpolacji, czyli różnicy między wartością próbkową ($Z_{(x_i)}$)

i średnią wartością estymowaną ($Z^*_{(x_\alpha)}$) w punkcie pomiarowym (x_α), przeprowadzona na podstawie średniego błędu kross-walidacji:

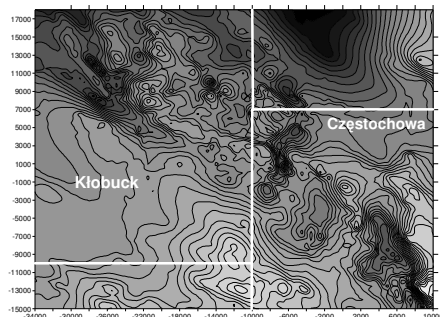
$$(2) \frac{1}{n} \sum_{\alpha} (Z(x_\alpha) - Z^*_{x[\alpha]})$$

oraz średniego kwadratu błędu standardowego kross-walidacji:

$$(3) \frac{1}{n} \sum_{\alpha} \frac{(Z(x_\alpha) - Z^*(x_\alpha))^2}{\sigma^2_{[\alpha]}}$$

gdzie $\sigma^2_{[\alpha]}$ jest odchyleniem standardowym krigingu.

Z punktu widzenia wyników kross-walidacji: średniego błędu 0.27 i średniego kwadratu błędu standardowego 0.00004 najlepszym okazał się teoretyczny model wariogramu złożony z dwóch komponentów: modelu potęgowego (*power model*) i modelu efektu samorodków (*nugget effect model*) (Rys. 3). Model potęgowy charakteryzują: kąt anizotropii 148.2; skala 0.694 oraz wykładnik potęgowy (α) 0.645. Cechami modelu efektu samorodków są: błąd wariancji 41.1 i mikrowariancja 0.



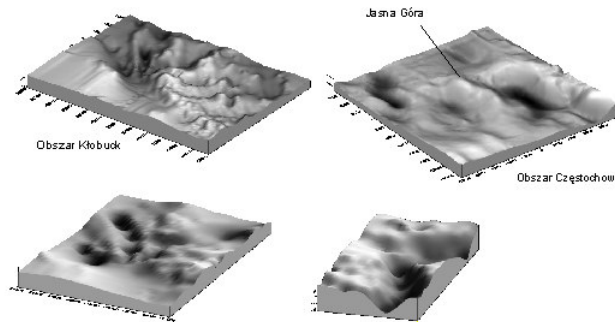
Rys. 4. Cyfrowy model geomorfologiczny podłoża czwartorzędu z wydzielonymi podobszarami badawczymi Kłobuck i Częstochowa

Następnie przeprowadzono estymację wysokości bezwzględnej podłoża osadów czwartorzędowych krigingiem zwyczajnym w węzłach siatki kwadratowej o boku 250 m. Obszary wyszukiwania danych były okręgami podzielonymi na 4 sektory. W każdym sektorze uwzględnionych zostało minimalnie 2 próbki, a maksymalnie 16.

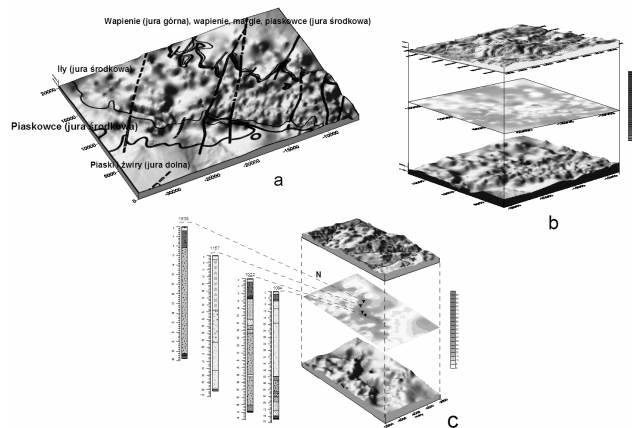
Uwzględniając rozkład błędu interpolacji badany teren podzielono na dwa podobszary: Kłobuck i Częstochowa, na których był on najmniejszy, a tym samym stopień

stopień przybliżenia DGM do rzeczywistości jest wysoki (Rys. 4, Rys. 5). To zakończyło pierwszy etap rekonstrukcji powierzchni kopalnej, który ukazał główne rysy paleohipsometrii całego badanego obszaru położonego pomiędzy Częstochową i Krzepicami (Rys. 4).

W drugim etapie odtwarzano morfologię podobszarów badawczych i wybranych form kopalnych (Rys. 5). Szczegóły morfologiczne form kopalnych rozszerzyły możliwości wnioskowania o procesach morfologicznych, które je kształtowały w zależności od odporności skał.



Rys. 5. Cyfrowe modele geomorfologiczne rzeźby podzwartorzędowej obszarów Kłobuck i Częstochowa oraz wybranych form kopalnych.



Rys. 6. Cyfrowe modele geomorfologiczne ukazujące relacje pomiędzy kopalną rzeźbą, a budową geologiczną (a i c) oraz miąższością osadów plejstoceńskich i rzeźbą współczesną (b i c).

Z dotychczasowych badań opartych na analizie DGM rzeźby podplejstoczeńskiej na pograniczu Wyżyny Wieluńskiej i Częstochowskiej wynika, że:

- rzeźba kopalna nie jest kontynuacją rzeźby krawędziowej, typowej dla środkowej części Wyżyny Częstochowskiej i Śląskiej (Szubert 2004, 2005),
- jest to rzeźba tektoniczno-denudacyjna. Garby mają założenia tektoniczne, a ostateczna ich forma jest efektem długotrwałej denudacji przebiegającej w zależności od odporności skał,
- w miejscu opisywanej w literaturze preglacjalnej doliny górnej Warty (Mossoczy 1955) znajdują się izolowane, głębokie rynny (Rys. 5),
- osady, które wypełniają kopalne rynny wskazują, że mogą to być rynny subglacjalne (Rys. 6),
- jest to rzeźba poligenetyczna, odzwierciedlająca wieloetapowy rozwój północnej części Wyżyny Śląsko-Krakowskiej. Ostatecznie ukształtowana została w Czesie zlodowacenia Odry.

3.4. Podsumowanie

Uzyskane wyniki badań dowodzą, że wykorzystanie geoinformatyki w paleogeomorfologii stwarza nowe możliwości badania kopalnej rzeźby, zarówno w zakresie pozyskiwania danych jak również ich interpretacji w oparciu o cyfrowy model geomorfologiczny. Analiza geostatystyczna danych eksponuje na tle pierwszoplanowych cech rzeźby kopalnej szczegóły morfologiczne kopalnych form. Ich analiza rozszerzyła dotychczasowy stan wiedzy w zakresie paleogeomorfologii północnej części Wyżyny Śląsko-Krakowskiej. Stworzyło to podstawy do poszukiwania nowych koncepcji morfogenezy tego obszaru. W przypadku badanej rzeźby podplejstoczeńskiej uwzględniono rolę neotektoniki i wód subglacjalnych w kształtowaniu tej rzeźby – czynników wcześniej nie dostrzeganych.

Interpolacja komputerowa umożliwiła racjonalne wykorzystanie bogatego materiału dokumentacyjnego i opracowanie spójnego obrazu kopalnej rzeźby na dużym obszarze. Nie było to możliwe z zastosowaniem wcześniej stosowanej interpolacji manualnej. Wówczas rekonstrukcje ograniczano do niewielkich fragmentów terenu. Ponadto gęsta siatka wierceń wymuszała konieczność ich selekcji, tak aby można było przeprowadzić interpolację paleoizohips.

Podobnie jak w innych dziedzinach nauk o Ziemi, również w geomorfologii geostatystyka jest narzędziem znacząco poszerzającym możliwości badawcze.

4. LITERATURA

- Kistowski M., Iwańska M., 1997. *Systemy informacji geograficznej*. Wydawnictwo Naukowe Bogucki, Poznań.
- Longey P.A., Goodchild M.F., Maguire D.J., Rhind D.W., 2006. *GIS teoria i praktyka*. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa.
- Michalak J., 2000., Geomatyka (geoinformatyka) – czy nowa dyscyplina? *Przegląd Geologiczny*, 48(8), s. 673-679.
- Mossoczy Z., 1955., Preglacjalna dolina Górnej Warty. *Przegląd Geologiczny*, 4, s. 201-202.

Namysłowska-Wilczyńska B., 2006. *Geostatystyka teoria i zastosowania*. Wydawnictwo Politechniki Wrocławskiej, Wrocław.

Szubert M., 2004. Rozwój rzeźby podczwartorzędowej w okolicach Częstochowy. *Badania geograficzne w poznaniu środowiska*, Lublin, s. 114-177.

Szubert M., 2005. Geostatystyczne metody rekonstrukcji rzeźby podczwartorzędowej na przykładzie Wyżyny Woźnicko-Wieluńskiej. *Współczesna ewolucja rzeźby Polski*, Kraków, s. 439-442.

Wackernagel H., 2003. *Multivariate Geostatistics*. Springer, Berlin Heidelberg.

GEOINFORMATICS IN GEOMORPHOLOGY A CASE OF GEOMORFOLOGICAL STUDIES IN THE WIELUŃ AND CZĘSTOCHOWA UPLANDS

KEYWORDS: geomorphology, geoinformatics, geostatistics, kriging, variogram, buried relief, digital geomorphology, digital geomorphology model.

SUMMARY: The paper describes the application of geoinformatics in geomorphological studies on the Wieluń Upland and the Częstochowa Upland, based on the concept of digital geomorphology. The subject of the study is the sub-Quaternary relief developed on the Upper Jurassic limestone and Middle Jurassic marls, sandstones and clays. Data on the depth to the bottom of Quaternary were taken from archived data on 4399 boreholes and from 2088 digitalised points on the Detailed Geological Map of Poland within the outcrop of Jurassic rocks. The sub-Quaternary relief was interpreted using the scheme of constructing a digital geomorphology model (Fig. 1). Its individual elements are realisations of the main GIS functions. The GIS analytical functions have been supplemented by geostatistical analysis, which was used to create a digital elevation model by normal kriging. The analysis of spatial correlation of data based on the variogram function is of key importance here. Exponential theoretical model best fitted the empirical variogram (Fig. 3). The digital elevation model was constructed based on the analysis of data similarity in data points. The model thus shows elevations and reflects the intensity of relief-forming processes which are influenced by the geological structure. This is a basic digital map that may be used in GIS analysis to the construction of a digital geomorphology model (Fig. 4, Fig. 5, Fig. 6), which shows e.g. the relation between the geological structure and relief, slope angles. A properly constructed geomorphology model (Fig. 6) sheds a new light on the origin of relief in the studied area and it often allows to abandon geomorphological concepts prevailing in literature.

Dr Mariusz Szubert
e-mail: m.szubert@ap.krakow.pl
telefon: 0-12 662-62-64; 603 23-54-90
fax: 0-12 662-62-43