

Klasyfikacja rzeźby w oparciu o pochodne Numerycznego Modelu Wysokości i jej potencjalne zastosowania w badaniach krajobrazowych

Landform classification based on derivatives of Digital Elevation Model and its prospective application in landscape research

Tomasz Giętkowski¹, Maria Zachwatowicz²

1) Uniwersytet Kazimierza Wielkiego, Instytut Geografii, Zakład Geografii Zrównoważonego Rozwoju, ul. Mińska 15, 85 428 Bydgoszcz, e-mail: tomgie@ukw.edu.pl

2) Uniwersytet Warszawski, Wydział Geografii i Studiów Regionalnych, Instytut Geografii Fizycznej, Zakład Geoekologii, ul. Krakowskie Przedmieście 30, 00 927 Warszawa, e-mail: m.zachwatowicz@uw.edu.pl

Abstract Relief is a geocomponent that provides a framework for landscape structure descriptions, as well as for the ecological processes modelling. In a computer based investigations, the landform data is usually being derived from the Digital Elevation Models (DEM), by the means of chosen derivatives (i.e.: slope gradient, exposition, elevation, etc.). This study aims to verify the applicability of an algorithm basing on the digital elevation data, for creating the landform maps. The classification procedure was conducted for two test sites, representing different types of natural landscape of Poland (mesoregion of Nida Basin and mesoregion of Krajna Lakeland). The comparative analysis of the results allowed to assess the reproducibility, adaptability and limitations of presented method, as well as some of its possible applications in landscape research.

Key words: unsupervised classification, morphometric landform types, Digital Elevation Model (DEM), landscape pattern, Nida Basin, Krajna Lakeland.

Słowa kluczowe: klasyfikacja nienadzorowana, typy morfometryczne rzeźby, Numeryczny Model Wysokości, struktura krajobrazu.

Wprowadzenie

W kompleksowych badaniach krajobrazu, powszechnie przyjmuje się założenie o dominującej, przewodniej roli ukształtowania terenu w hierarchii komponentów (Armand 1980, Richling 1992, Krysiak 1999). Implikuje to konieczność wykorzystania informacji o rzeźbie w procedurach delimitacji jednostek przyrodniczych. Z względów praktycznych, w badaniach prowadzonych w skalach szczegółowych możliwe jest uwzględnienie zarówno genetycznych jak i morfometrycznych cech rzeźby. Jednak w analizach regionalnych, prowadzonych zazwyczaj z wykorzystaniem serii map tematycznych w skali 1:50 000 lub mniejszej, często brakuje jednolitego zbioru map geomorfologicznych, a wytworzenie choćby ich szkiców jest zadaniem czasochłonnym. W takich sytuacjach, pomocne może być zastosowanie map

typów morfometrycznych rzeźby, przygotowanych na podstawie analizy pochodnych Numerycznego Modelu Wysokości.

Geomorfometria, choć swe korzenie ma w klasycznej geomorfologii, rozwija się dziś przede wszystkim w obrębie geomatyki, a badania geometrii powierzchni terenu opierają się o dane pochodzące z Numerycznych Modeli Wysokości (NMW).

W klasyfikacji rzeźby wykorzystuje się głównie model rastrowy. Jego zaletą jest, z pewnością, możliwość łatwego i szybkiego przetwarzania. Z kolei cechą niepożądaną stanowi zależność pomiędzy parametrami modelu (rozdzielczość, metoda interpolacji), a wartościami jego pochodnych. Uwagę na ten fakt zwracali między innymi Burdziej i Kunz (2006), pracując na wszystkich dostępnych danych w Polsce. Szczególną trudność sprawiają szacunki propagacji błędów dla wskaźników, których algorytmy obliczeń są bardzo skomplikowane (Oksanen i Sarjakoski 2005). Należy jednak stwierdzić, że większość przeszkód jest sukcesywnie pokonywana, jak choćby newralgiczna kwestia obszarów płaskich, rozwiązana za pomocą aplikacji TauDEM.

Rozważając z kolei problem jakości danych wysokościowych, należy pamiętać, że „wartość wskaźników terenu jest mniej funkcją absolutnej dokładności danych wysokościowych, a bardziej tego jak dobrze i jak gładko cechy powierzchni są modelowane” (MacMillan 2000, s. 44).

Podstawą automatycznej klasyfikacji rzeźby jest implementacja algorytmów, które mogą przetworzyć surowe dane wysokościowe z NMW w ilościowe atrybuty ukształtowania powierzchni terenu, nazywane pochodnymi NMW lub wskaźnikami topograficznymi (MacMillan i in. 2000). Warto podkreślić, że u podstaw konstrukcji wielu z nich, leżą rozważania o prawidłowościach procesów zachodzących na powierzchni terenu. Podejście to często odpowiada kompleksowemu do tego stopnia, że można znaleźć bardzo podobne do „klasycznej” definicje typów rzeźby. Na przykład Etzelmüller i Sulebak (2000) piszą w tym kontekście, że kombinacja wybranych parametrów topografii, pozwala wydzielić jednostki rzeźby, odpowiadające konkretnym procesom morfologicznym. Z kolei Shary i in. (2002) podkreślają funkcjonalny rodowód niektórych pochodnych NMW, dopatrując się ich genezy w szerokim spektrum teorii (od geometrii powierzchni Gaussa do zmiennych regionalnych Matherona), mogących służyć do wyjaśniania i modelowania procesów przyrodniczych (np. splywu powierzchniowego czy reżimu termalnego stoków).

Zestaw wskaźników topograficznych, Wilson i Gallant (2000b) dzielą na: pierwotne i wtórne (podając jednocześnie wyczerpujący opis większości z nich). Pochodne pierwotne (m.in.: spadek, ekspozycja, krzywizna planarna i wertykalna) oblicza się bezpośrednio z danych NMW. Wskaźniki wtórne generowane są w oparciu o dwie lub więcej pochodnych pierwotnych, a ich rolą jest opis procesów ekologicznych poprzez cechy ukształtowania terenu. Najbardziej popularnym wskaźnikiem wtórnym jest topograficzny wskaźnik uwilgotnienia (ang. topographic wetness index), opisujący wpływ topografii na procesy hydrologiczne (Sørensen i in. 2005).

Zasadnicze pytanie dotyczy adekwatnej liczby wskaźników, niezbędnej do przeprowadzenia wydzielenia. Należy podkreślić, że nie ma tutaj jednoznacznej odpowiedzi, gdyż każdemu obszarowi czy typowi rzeźby odpowiada inny zestaw. W praktyce sporządza się duży zbiór pochodnych, a następnie podejmuje działania w celu ograniczenia redundancji - na przykład z wykorzystaniem analizy głównych składowych (Fraisse i in. 1999).

Pochodne NMW, tworzą zbiory danych, które w kolejnym etapie prac zostają uporządkowane. Procedury podziału zbioru danych wieloczynnikowych wykorzystywane w analizach morfometrycznych, opierają się o algorytmy analizy skupień i ze względu na stopień zautomatyzowania można je podzielić na: nienadzorowane i nadzorowane.

W klasyfikacji nienadzorowanej algorytm dąży do odnalezienia skupisk obiektów - w tym przypadku pikseli, które charakteryzują się najbardziej zbliżonymi wartościami wszystkich analizowanych pochodnych NMW. Adamczyk i Będkowski (2005) przedstawili schemat procedury klasyfikacji obrazów

satelitarnych, który przeniesiony na grunt analiz morfometrycznych, można opisać w następujących etapach: wybór pochodnych NMW, wybór metody klasyfikacji, określenie parametrów sterujących algorytmem, wykonanie klasyfikacji, rewizja wyników, ewentualna ponowna klasyfikacja i ostateczna identyfikacja obiektów. W poniższej pracy zastosowano algorytm ISODATA, który obok metody k-środków jest najczęściej wykorzystywaną procedurą klasyfikacji.

ISODATA prowadzi do podziału zbioru danych na zadaną z góry liczbę skupień (klastrow) różniących się od siebie w możliwie największym stopniu (StatSoft 2006). Dokonuje się tego poprzez przenoszenie obiektów między skupieniami w czasie kolejnych iteracji, co doprowadza do minimalizacji zmienności wartości analizowanych danych (w tym przypadku pochodnych NMW) wewnątrz skupień przy jednoczesnej maksymalizacji ich zmienności pomiędzy skupieniami. W czasie działania algorytmu, klastrow może być podzielony gdy wariancja danych przekracza pewną zadaną wartość. Skupienie może być również połączone z sąsiednim, gdy odległość pomiędzy ich środkami jest mniejsza niż zadana parametrem (Rządca 2004).

Analizy NMW, nakierowane na wyodrębnienie jednostek charakteryzujących typy morfometryczne rzeźby obejmowały różnej wielkości obszary – do terytoriów państw włącznie (Etzelmüller, i in. 2007) i przeprowadzane były między innymi w zakresie geomorfologii (Etzelmüller i Sulebak 2000, Dupéret i Deffontaines 2004) czy geologii (Jordan i in. 2005). Jednak szczególnym zainteresowaniem cieszą się wśród gleboznawców (Irvin i in. 1997, Hengl i Rossiter 2003). Zastosowania gleboznawcze dostarczają szczególnie cennych doświadczeń dla analiz z zakresu geografii kompleksowej, gdyż badania złożoności warunków glebowych (ujawniającej się w relacjach między topografią terenu, warunkami hydrologicznymi i pokrywą roślinną), prowadzone są tu w obrębie homogenicznych jednostek przyrodniczych. Taki sposób postrzegania krajobrazu jest bardzo bliski podejściu kompleksowemu. Przypuszczać należy, że może to skutkować może korzystaniem ze zbliżonych zestawów pochodnych, czy przyjęciem podobnej koncepcji identyfikacji i nazewnictwa jednostek.

Przeprowadzone badania, poprzez wykorzystanie procedury klasyfikacji morfometrycznych typów rzeźby w oparciu o pochodne NMW dla różnego rodzaju krajobrazów, miały na celu określenie stopnia uniwersalności metody oraz przedstawienie potencjalnych kierunków aplikacji wytworzonych map rzeźby w badaniach krajobrazowych.

Obszar badań

Badaniami objęto dwa obszary o różnych typach krajobrazu: obszar Chojnice i obszar Pińczów (ryc. 1.).

Obszar Chojnice o powierzchni 996 km², w przeważającej części położony jest na północno-wschodnim skraju Pojezierza Krajeńskiego (Kondracki 2001) w obrębie wysoczyzny morenowej, użytkowanej rolniczo, o dość silnie urozmaiconej rzeźbie. Wschodni fragment, porośnięty głównie borem sosnowym, wyraźnie rozcięty jest przez terasy sandru i doliny Brdy.



Ryc. 1. Położenie obszarów badań.
(1 – obszar Chojnice; 2 – obszar Pińczów)

Fig. 1. Location of research sites.
(1 – Chojnice site; 2 - Pińczów site)

Obszar Pińczów o powierzchni 400 km², położony jest w synklinorium Nidy i stanowi fragment Ponięcia Pińczowskiego. Według podziału fizycznogeograficznego Kondrackiego (2001) teren ten leży u zbiegu mezoregionów: Garbu Wodzisławskiego, Doliny Nidy, Niecki Soleckiej, Garbu Pińczowskiego i Niecki Połanieckiej. Obszar cechuje wybitnie poligenetyczny charakter rzeźby, urozmaiconej morfologicznie, o znacznych deniwelacjach lokalnych i dużej zgodności z litologią i tektoniką (Tsermegas i. in. 2000). Zróżnicowanie warunków abiotycznych (sąsiadujące ze sobą krajobrazy lessowe, węglanowo-gipsowe, aluwialne, poligenetyczne) wpłynęło na wykształcenie bogactwa siedlisk przyrodniczych i przetrwanie tradycyjnie rolniczego, mozaikowego krajobrazu kulturowego.

Metody

Podstawę analiz stanowiły dane wysokościowe (przygotowane metodą fotogrametryczną ze zdjęć lotniczych w ramach kampanii LPIS) pozyskane z CODGiK w formacie ASCII i cięciu arkuszowym odpowiadającym skorowidzowi map 1:10 000 w układzie PUWG 1992. Dane dla każdego arkusza zostały interpolowane metodą Najbliższego Sąsiedztwa (z pikselem wielkości 20m), a arkusze zmozaikowane. W kolejnym kroku, za pomocą filtrów w przesuwającym się oknie, usunięto artefakty efektu krawędziowego,

wynikające z łączenia arkuszy oraz lineamenty, pochodzące z błędów w danych. Następnie, rozdzielono model na dwa podzbiory: obszary płaskie (gdzie spadek był mniejszy niż 1,850 dla obszaru Chojnice, oraz 1,830 dla obszaru Pińczów – podane wartości stanowią granicę jednego z przedziałów ustalonych metodą naturalnych przerw Jenks'a) i faliste (ze spadkiem większym lub równym wyżej wymienionym wartościom). Obszary płaskie wygładzono filtrem uśredniającym o wielkości 5x5 pikseli, a faliste 3x3 piksele. Po ponownym połączeniu zbiorów, cały obszar po raz kolejny przefiltrowano uśredniając wartości w oknie o wielkości 3x3 piksele. Statystyki dla modelu surowego i po przygotowaniu przedstawia Tabela 1.

W oparciu o tak przygotowany NMW obliczono zestaw wskaźników (w większości przy wykorzystaniu rozszerzenia Spatial Analyst dla ArcGIS), w którego skład którego poza wysokością (NMW), wchodziły: spadek (SP), deniwelacja lokalna (DL), krzywizna planarna (KP) i wertykalna (KW) oraz topograficzny wskaźnik uwilgotnienia (TWU). Mapy pochodnych przedstawiają Ryciny 2 i 3.

Tab. 1. Statystyki NMW: surowego oraz przygotowanego do analiz

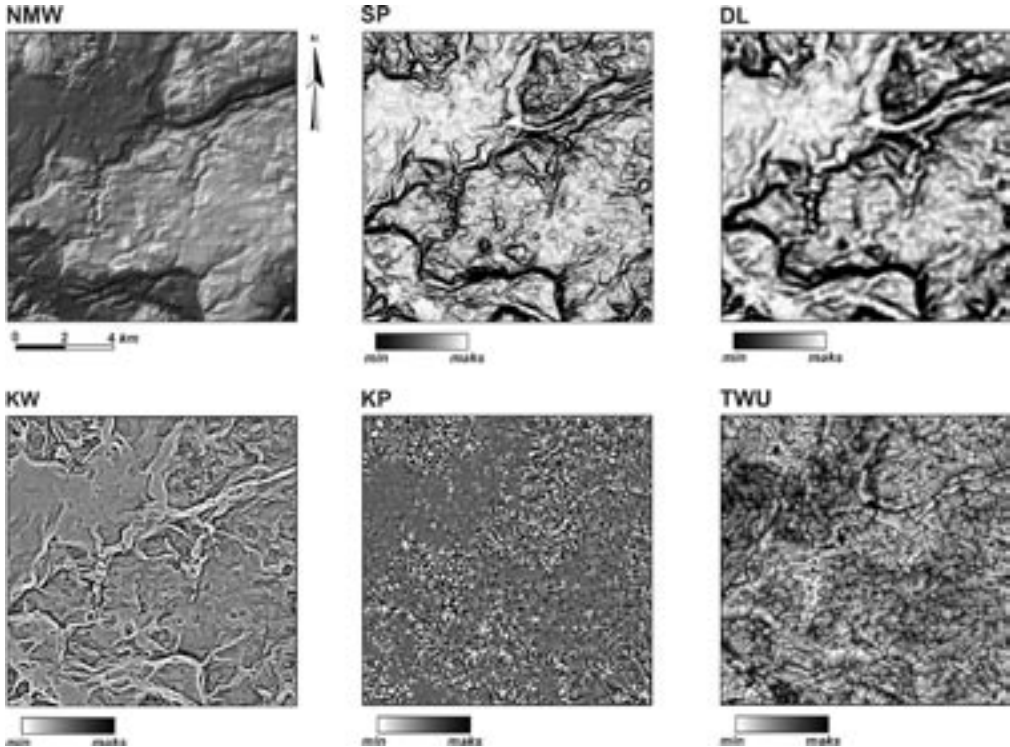
Tabl. 1. Statistics of data from DEM: raw and after preparation

	obszar Chojnice <i>Chojnice site</i>		obszar Pińczów <i>Pińczów site</i>	
	<i>surowy</i> <i>raw</i>	<i>przygot.</i> <i>after prepar.</i>	<i>surowy</i> <i>raw</i>	<i>przygot.</i> <i>after prepar.</i>
<i>minimum</i>	80.36	80.37	175.6	176.2
<i>maksimum</i>	206.24	202.31	339.5	337.2
<i>średnia</i> mean	138.29	136.72	229.1	229.1
<i>odch. stand.</i> stand. dev.	19.64	20.84	38.8	38.7

Deniwelacja ukazuje relatywne zróżnicowanie wysokości na danym obszarze. Deniwelację lokalną (DL) obliczono jako różnicę pomiędzy wartością wysokości danego piksela, a minimalną wartością wysokości obliczonej w kole o promieniu 240 m (12 pikseli).

Krzywizna powierzchni umożliwia rozpoznanie wklęsłości i wypukłości terenu oraz wskazuje na dynamikę spływu powierzchniowego (Wilson i Gallant 2000b). W pracy wykorzystano krzywiznę planarną, rozumianą jako stopień zmienności ekspozycji wzdłuż kierunku przebiegu izohipsy oraz wertykalną - wskazującą na stopień zmienności spadku wzdłuż linii spływu grawitacyjnego.

Topograficzny wskaźnik uwilgotnienia (TWU), poprzez wskazanie zależności pomiędzy wielkością powierzchni, z której następuje do niego spływ, a wartością jego spadku ukazuje tendencję do akumulacji wody na danym obszarze (Hengl i Rossiter 2003). Dla potrzeb poniższych analiz TWU obliczono z wykorzystaniem rozszerzenia TauDEM dla ArcGIS (Tarboton 1997). Zaletą algorytmu zaaplikowanego w programie jest możliwość obliczenia TWU dla terenu, na którym znajdują się obszary płaskie oraz bezodpływowe.



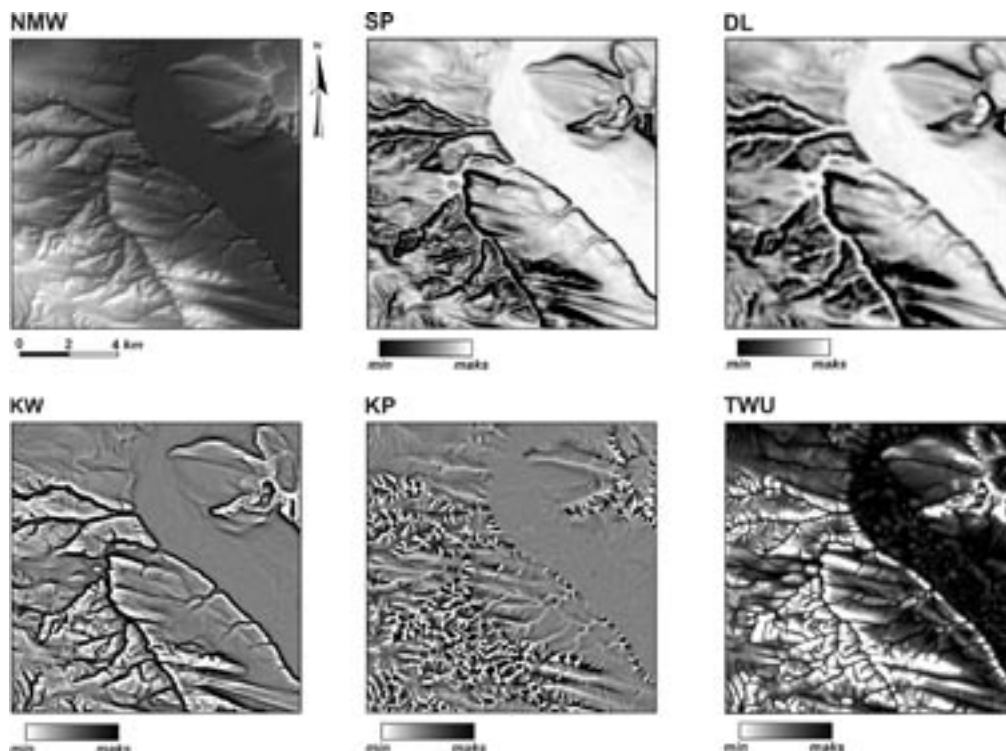
Ryc. 2. Rozkład przestrzenny wartości pochodnych NMW dla fragmentu obszaru Chojnice (objaśnienia: NMW – model terenu; SP – spadki; DL – deniwelacje lokalne; KW – krzywizna wertykalna; KP – krzywizna planarna; TWU – topograficzny wskaźnik uwilgotnienia)

Fig. 2. Spatial distribution of DEM derivates for part of Chojnice site.

(explanations: NMW – Digital Elevation Model; SP – slope; DL – local denivelation; KW – vertical curvature; KP – planar curvature; TWU – topographic wetness index)

W celu poprawnej transformacji danych podczas działania algorytmu ISODATA, wszystkie wskaźniki zostały reklasifikowane do przedziałów o wartości od 1-256. Ponieważ algorytmy klasyfikacji wymagają danych o rozkładzie normalnym, w przypadku wybranych wskaźników o rozkładzie skośnym (SP, TWU) konieczna była transformacja logarytmiczna zbioru (nie udało się w zadowalającym stopniu znormalizować wskaźnika TWU dla obszaru Pińczów).

W kolejnym kroku, wszystkie przygotowane wskaźniki poddane zostały analizie za pomocą algorytmu ISODATA, z parametrem zakładającym wyodrębnienie 12 klastrów. Plik wyjściowy procedury zawierający statystyki opisujące zgrupowania, został następnie wykorzystany do przeprowadzenia klasyfikacji metodą największego prawdopodobieństwa (MLCLASSIFY w ArcGIS), która polega na porównaniu wartości funkcji prawdopodobieństwa, opisujących histogramy rozkładu wartości pochodnych w poszczególnych klastrach (Adamczyk, Będkowski 2005).



Ryc. 3. Rozkład przestrzenny wartości pochodnych NMW dla fragmentu obszaru Pińczów (objaśnienia: NMW – model terenu; SP – spadki; DL – deniwelacje lokalne; KW – krzywizna wertykalna; KP – krzywizna planarna; TWU – topograficzny wskaźnik uwilgotnienia)

Fig. 3. Spatial distribution of DEM derivatives for part of Pińczów site.

(explanations: NMW – Digital Elevation Model; SP – slope; DL – local denivelation; KW – vertical curvature; KP – planar curvature; TWU – topographic wetness index)

Wyniki klasyfikacji dla obszaru Chojnice

We wcześniejszych próbach klasyfikacji rzeźby dla obszarów nizinnych (MacMillan i Pettapiece 2000; Giętkowski 2006) uzyskiwano około 4-5 dobrze rozróżnialnych klas, przy czym były one rezultatem łączenia większej liczby automatycznie wydzielanych jednostek, którego dokonywano manualnie lub za pomocą dendrogramu.

W przypadku obszaru Chojnice, przygotowane 12 typów jednostek, poddano łączeniu w oparciu o statystyki wskaźników oraz wzrokową analizę relacji przestrzennych pomiędzy jednostkami. W ten sposób uzyskano ostatecznie 7 rozróżnialnych klas. Statystyki dla wskaźników przedstawia tabela 2., z kolei mapę rycina 4.

Najłatwiej rozróżnialnym typem rzeźby są równinne dna obniżeń. Pomimo że zajmują tylko nieco ponad 4% powierzchni, ich pozycja topograficzna jest łatwa do identyfikacji. Ta klasa rzeźby występuje zarówno w dnach szerszych dolin, jak i większych obniżeń na wysoczyźnie i sandrze. Większym formom obniżeń z wyraźnym dnem towarzyszy typ wklęsłej, dolnej części zbocza.

Tab. 2. Wartości pochodnych dla typów morfometrycznych rzeźby obszaru Chojnice.**Tab. 2.** Value of derivatives for morphometric units in Chojnice site

typ morfometryczny rzeźby morphometric relief unit	udział percent. [%]	DENIWELACJE denivelation				WYSOKOŚCI elevation				SPADEK slope			
		(1)	(2)	(3)	(4)	(1)	(2)	(3)	(4)	(1)	(2)	(3)	(4)
równinne dno obniżenia (RDO)	4.4	0.0	10.1	10.1	0.3	81.5	188.0	106.5	127.6	0.0	3.8	3.8	0.2
wklęsła dolna część zbocza (WCZ)	4.7	0.0	12.0	12.0	1.1	81.8	168.7	86.9	113.0	0.0	4.5	4.5	1.0
środkowe części zboczy stromych oraz długie i pologie zbocza (ŚDZ)	26.1	0.0	22.3	22.3	3.9	82.1	182.4	100.3	131.9	0.0	15.3	15.2	1.9
wierzchołki wzniesień oraz wypukłe górne części zboczy (WSW)	24.7	0.3	38.3	37.9	8.3	84.5	201.1	116.6	145.9	0.0	16.6	16.6	2.0
równiny płaskie na poziomie sandru (RPS)	18.9	0.4	27.6	27.2	3.9	83.3	159.7	76.3	122.7	0.0	5.8	5.8	0.6
równiny płaskie na poziomie wysoczyzny (RPW)	10.4	0.1	11.0	10.9	1.3	136.3	180.2	43.8	157.3	0.0	1.9	1.9	0.4
tereny faliste (TF)	10.8	0.6	10.3	9.7	2.9	146.6	190.5	43.9	162.2	0.1	4.2	4.1	0.8

Objaśnienia: (1) – minimum, (2) maksimum, (3) rozstęp, (4) średnia;

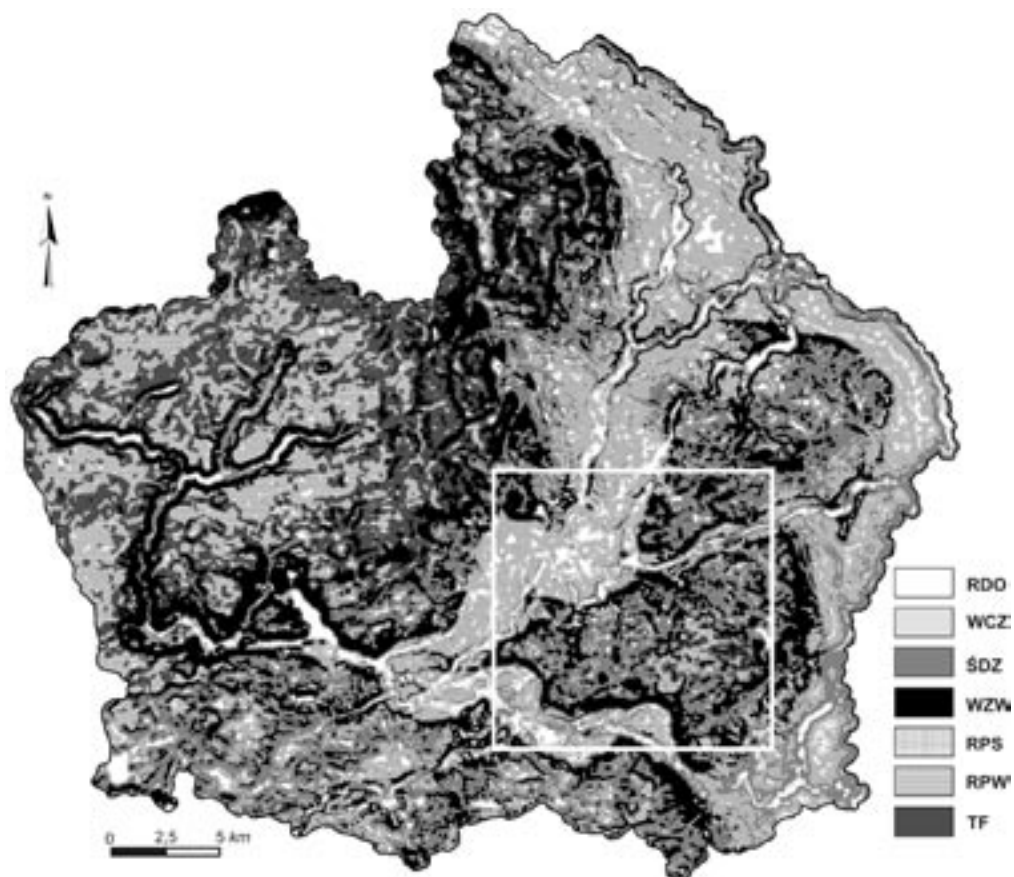
Explanations: (1) – minimum, (2) maximum, (3) range, (4) mean; morphometric relief unit: RDO – flat bottoms of depressions, WCZ – concave, lower parts of hillsides, SDZ – middle parts of steep hillsides and long, gently-sloping hillsides, WSW – tops of hills and convex, upper parts of hillsides, RPS – flat sandur level, RPW – flat moraine plateau level, TF – undulate areas.

W wyniku procedury klasyfikacji wyraźnie zaznaczają się także wierzchołki wzniesień oraz wypukłe, górne części zboczy. Są to obszary znajdujące się w strefach największych deniwelacji, wyraźnych spadków i dość znacznej wysokości.

Specyficzny dwupoziomowy, sandrowo - wysoczyznowy charakter rzeźby umożliwił wyróżnienie dwójakiego rodzaju obszarów płaskich, które wysokościami wyraźnie odpowiadają wspomnianym formom. Są to obszary o niewielkich spadkach, a niespełna 4 metrowe deniwelacje na obszarach sandrowych, wynikają z konieczności włączenia w ich obręb stref przy krawędziach rozcinających je dolin.

Ostatnim z jednoznacznie sklasyfikowanych typów rzeźby są środkowe części zboczy stromych oraz długie i połogie zbocza. Występują one we wszystkich strefach wysokości, zarówno w obrębie sandru jak i wysoczyzny. Charakteryzują się sporymi deniwelacjami (do 22 m) i wyraźnym spadkiem.

Tereny faliste są obszarami, których identyfikacja nie jest do końca jednoznaczna. Nie są co prawda dobrze wyróżniającym się typem rzeźby w terenie (tzn. nie mają swoistej pozycji w topografii), jednak z drugiej strony są klasą wyraźnie wyodrębniającą się w statystykach wskaźników. Stąd termin określający ten typ ma charakter najbardziej ogólny.



Ryc. 4. Mapa typów morfometrycznych rzeźby obszaru Chojnice.

(dla zaznaczonego obszaru przedstawione są pochodne na ryc. 2., opis typów rzeźby w tabeli 2.)

Fig. 4. Morphometric relief unit map of Chojnice site.

(for area in rectangle, spatial distribution of DEM derivates is shown in fig. 2., explanation of units abbreviations in table 2.)

Wyniki klasyfikacji dla obszaru Pińczów

Podobnie jak w przypadku obszaru Chojnice, w klasyfikacji automatycznej wyróżniono tu 12 typów jednostek, które następnie poddano dalszemu łączeniu w oparciu o wizualną analizę relacji przestrzennych oraz statystyki wskaźników.

Już na etapie klasyfikacji automatycznej wyraźnie zaznaczyła się oś obszaru, w postaci doliny Nidy oraz dominujące formy wypukłe: kuesta gipsowa Niecki Soleckiej, Garb Wodzisławski i Garb Pińczowski. Uwidoczniły się też równoleżnikowe osie suchych dolin młodzawskich oraz przebiegająca południkowo dolina Odrzywół – Kozubów.

Ręczne łączenie klas pozwoliło na wydzielenie 5 rozróżnialnych typów morfometrycznych rzeźby (tab. 3, ryc. 5).

Tab. 3. Wartości pochodnych dla typów morfometrycznych rzeźby obszaru Chojnice.

Tab. 3. Value of derivates for morphometric units in Pińczów site.

typ morfometryczny rzeźby morphometric relief unit	udział percent. [%]	DENIWELACJE denivelation				WYSOKOŚCI elevation				SPADEK slope			
		(1)	(2)	(3)	(4)	(1)	(2)	(3)	(4)	(1)	(2)	(3)	(4)
równiny w obniżeniach i na tarasach (ROT)	31.1	0.0	20.4	20.4	1.2	176.2	313.8	137.6	196.2	0.0	2.8	2.8	0.4
stoki łagodne i umiarkowanie strome (SŁU)	42.9	0.0	59.2	59.2	9.0	177.7	329.6	151.9	231.4	0.0	19.8	19.8	2.5
bardzo strome stoki, podcięcia i krawędzie (SBS)	7.6	0.0	40.5	40.5	12.7	179.7	283.8	104.1	225.4	0.1	19.2	19.1	5.0
formy nieckowate, wąwozy (FNW)	3.3	0.0	39.5	39.5	7.1	183.4	321.4	138.0	258.4	0.2	8.3	8.1	2.0
wierzchowiny i górne partie zboczowe wzniesień (WGP)	15.2	0.0	54.5	54.5	12.0	212.7	337.2	124.5	286.2	0.0	11.9	11.9	2.2

Objaśnienia: (1) – minimum, (2) maksimum, (3) rozstęp, (4) średnia;

Explanations: : (1) – minimum, (2) maximum, (3) range, (4) mean; morphometric relief unit ROT – flat areas in bottoms of depressions and terraces, SŁU - gently and moderate sloping hillside, SBS –very steep hillside, undercuts and ridges, FNW – basin forms and ravines, WGP – flat top parts of hills and upper part of hillside

Formy równinne w obniżeniach i na tarasach, związane są głównie z obecnością doliny rzeki Nidy i oraz jej dopływu - Mierzawy.

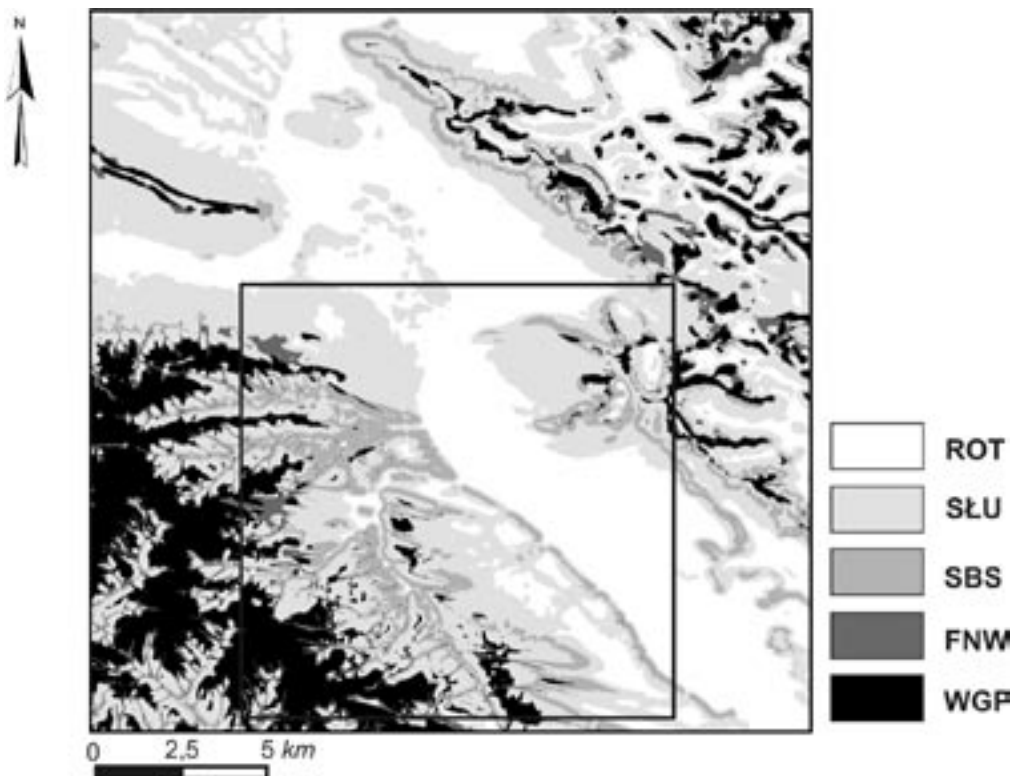
Dobrze rozróżnialna jest sieć wąwozów i form nieckowatych, w krajobrazie lessowym południowo-zachodniej części obszaru, rozcinających stoki Garbu Wodzisławskiego.

Wyraźnie wyodrębniły się najbardziej strome stoki, obecne wzdłuż kuest gipsowych Niecki Soleckiej, na zboczach Garbu Pińczowskiego, oraz związane ze ścianami wąwozów.

Wydzielenie „stoki łagodne oraz umiarkowanie strome”, mieści w sobie dość szerokie spektrum wartości spadków. Zastosowanie tego skumulowanego typu jednostki ma na celu uwypuklenie na mapie, omówionych wcześniej, terenów o największych nachyleniach.

Wierzchowiny wzniesień są rozróżnialne wizualnie, jednak zastosowana klasyfikacja nie pozwoliła na ich odseparowanie od górnych, wypukłych partii zboczy. Z tego powodu typ ten charakteryzują większe deniwelacje niż należałoby spodziewać się dla samych tylko partii wierzchowinowych.

Omawiany teren cechuje rzeźba niezwykle kontrastowa, co sprzyja dużej wyrazistości form morfometrycznych. Jednocześnie jednak, poligenetyczność rzeźby utrudnia czasem jednoznaczne wydzielenie tożsamyh jednostek, zwłaszcza na obszarach różniących się litologicznie. Stąd też wizualna analiza relacji przestrzennych, opierająca się na znajomości terenu badań, nie zawsze znajduje pełną zgodność w wartościach wskaźników.



Ryc. 5. Mapa typów morfometrycznych rzeźby obszaru Pińczów.

(dla zaznaczonego obszaru przedstawione są pochodne na ryc. 3., opis typów rzeźby w tabeli 3.)

Fig. 5. Morphometric relief unit map of Pińczów site.

(for area in rectangle, spatial distribution of DEM derivates is shown in fig. 3., explanation of units abbreviations in table 3.)

Kierunki wykorzystania w badaniach krajobrazowych

Jak wspomniano na wstępie, w większości studiów z zakresu geografii fizycznej kompleksowej, rzeźba terenu wraz z budową geologiczną uznawane są za czynniki przewodnie (kierujące) w relacji do innych komponentów. Przyjmuje się, że czynnik kierujący dostarcza informacji o kierowanym, a znając charakterystyki komponentów przewodnich można z pewnym prawdopodobieństwem wnioskować o strukturze krajobrazu (m.in. Armand 1980, Richling 1992). Podejście to, otwiera szerokie spektrum zastosowań dla map morfometrycznych typów rzeźby, tworzonych na bazie pochodnych NMW.

Najbardziej powszechnym wykorzystaniem map morfometrycznych może być użycie ich jako materiału bazowego w kartowaniu geoekologicznym, teledetekcyjnej interpretacji obrazów, czy w badaniach o charakterze inwentaryzacyjnym.

Kolejnym kierunkiem zastosowania są analizy związków między cechami metrycznymi ukształtowania terenu, a innymi komponentami środowiska (np. morfometryczne uwarunkowania wykształcenia gleb, wpływ morfometrii form na zróżnicowanie przestrzenne roślinności, zależności między morfometrią a sposobem użytkowania terenu).

Dodając do wydzieleni morfometrycznych, informacje o kolejnych komponentach środowiska, można budować kompleksowe jednostki przyrodnicze różnej rangi, będące punktem wyjścia dla analiz struktury i funkcjonowania krajobrazu. Badania przestrzennych relacji między tak wyróżnionymi geokompleksami stają się podstawą typologii i regionalizacji fizycznogeograficznych.

Mapy morfometryczne, budowane w oparciu o wskaźniki NMW, mają szczególny potencjał w modelowaniu i prognozowaniu procesów ekologicznych, w których kluczowe znaczenie ma informacja o topografii terenu (np. modelowanie erozji, spływu powierzchniowego, rozprzestrzeniania się zanieczyszczeń, etc.). Warty podkreślenia jest tu fakt powiązania większości wskaźników NMW z systemem zlewniowym.

W ujęciu użytkowym, dane morfometryczne znajdują zastosowanie w konstruowaniu wskaźników jakości środowiska i ocenach jego zagrożeń, w opracowaniach fizjograficznych tworzonych na potrzeby planowania i zagospodarowania terenu, a także w systemie monitoringu środowiska.

Wnioski

Przedstawiona w pracy procedura tworzenia map typów morfometrycznych rzeźby w oparciu o pochodne Numerycznego Modelu Wysokości, dzięki zautomatyzowaniu procedury umożliwia jej powtarzalność. W osiągnięciu tej cechy pomaga możliwość pozyskania danych wysokościowych, niemal identycznych pod względem metody i dokładności przygotowania dla obszaru całego kraju. Przy braku perspektywy szybkiego powrotu do szczegółowego kartowania geomorfologicznego, dostępne dane NMT dają szansę skonstruowania spójnej bazy map morfometrycznych, umożliwiających ujednoczenie metod wydzielenia jednostek krajobrazowych w skali kraju.

Zanim jednak będzie można przejść do etapu tworzenia bazy danych morfometrycznych, należy pokonać szereg ograniczeń, które ujawniły się podczas prac związanych z delimitacją typów rzeźby w okolicach Chojnic i Pińczowa.

Pierwszy problem związany jest z przygotowaniem danych wysokościowych. O ile, jak zaznaczono powyżej, NMW są obecnie łatwo dostępne, to ich jakość nie pozwala na bezpośrednie wykorzystanie. Przed zastosowaniem algorytmu wymagają uporządkowania, oczyszczenia i transformacji. Należy podjąć wysiłki w celu weryfikacji zaproponowanych metod filtracji i usuwania artefaktów. Ważne jest także ustalenie roli obszarów płaskich i depresyjnych, ze względu na ich szczególny wpływ na obliczanie niektórych statystyk (np. TWU).

Autorzy mają pełną świadomość, że dyskusyjna jest także kwestia ostatniego etapu klasyfikacji, wykonywanego manualnie przez interpretatora. Wydzielenie jednostek wiąże się z podejmowaniem subiektywnych decyzji interpretacyjnych, co może skutkować brakiem pełnej powtarzalności wydzielenia.

W kolejnych etapach rozwoju metody, prawdopodobnie uda się całkowicie zautomatyzować jej przebieg. Obecnie jednak, istnieją przynajmniej trzy przesłanki uniemożliwiające ten sposób działania. Po pierwsze, małe doświadczenie w klasyfikacji automatycznej oraz pewnego rodzaju „nawyki” związane z klasycznym spojrzeniem na wydzielenia typów rzeźby mogą działać hamująco na swobodę interpretacji wyników. W tym kontekście, kwestią wymagającą rozstrzygnięcia jest sposób walidacji uzyskiwanych map morfometrycznych. Trudno jest dziś przesądzić, czy należy korzystać z reguł wypracowanych przez tradycyjną geomorfometrię, czy też powinno się od podstaw zbudować nową klasyfikację. Otwartym pozostaje też pytanie o istnienie takich zestawów pochodnych NMW i odpowiednich dla nich metod klasyfikacji, które pozwoliłyby uzyskać wydzielenia tożsame z tradycyjnie definiowanymi jednostkami morfometrycznymi. Być może nie powinniśmy takich zestawów poszukiwać?

Po drugie, nie wiemy w jakim stopniu o trafności interpretacji obrazu i jednoznaczności ręcznie wydzielanych klas, decyduje ogólny stopień zróżnicowania rzeźby w obrębie terenu badań. Zauważono, że na obszarach wyżynnych, o rzeźbie kontrastowej, już na etapie klasyfikacji automatycznej wyraźnie zarysowują się główne formy morfometryczne, co potencjalnie usprawnia zadanie interpretatora. Na terenach nizinnych, o zdecydowanie mniejszych deniwelacjach i większej liczbie form o małych rozmiarach, klasyfikacja automatyczna musi być zdecydowanie bardziej czuła na takie zróżnicowanie.

Kolejnym problemem jest opracowanie metody, która umożliwi zbadanie nie tylko cech morfometrycznych, ale także relacji przestrzennych między wydzieleniami, które zazwyczaj decydują o zasadach grupowania w drugim etapie klasyfikacji. Dzięki temu możliwe będzie na przykład automatyczne określenie pozycji topograficznej fragmentu zbocza, pozwalające zakwalifikować je bądź to jako część doliny, bądź jako element większego wzgórza. W przedstawionej procedurze, takie decyzje podejmuje interpretator.

Jednym z poważniejszych wyzwań jest stworzenie nomenklatury dla powstających jednostek. Autorzy pragną podkreślić, że zastosowane „nazwy” mają charakter roboczy. Być może terminologia powinna nawiązywać do już istniejącej w ujęciu tradycyjnym, jednak z pewnością musi wyraźnie podkreślać ściśle morfometryczny charakter jednostek.

Pomimo omówionych wyżej trudności automatycznej klasyfikacji typów morfometrycznych rzeźby w oparciu o pochodne Numerycznego Modelu Wysokości, autorzy wyrażają przekonanie, że z uwagi na ogromny potencjał zastosowań metody, warto podjąć wysiłek jej doskonalenia i popularyzacji.

Podziękowania

Zakup części danych wysokościowych był finansowany z grantu UKW *„Analiza pochodnych Numerycznego Modelu Wysokości jako podstawa budowy bazy danych geomorfometrycznych dla zlewni Brdy i Wdy”* prowadzonego pod kierunkiem R. Dysarza.

Literatura

- Adamczyk J., Będkowski K., 2005, *Metody cyfrowe w teledetekcji*, Wyd. SGGW, s. 227.
Armand D. L., 1980, *Nauka o krajobrazie – podstawy teorii i metody logiczno – matematyczne*, PWN.

- Burdziej J., Mieczysław K., 2006, Ocena wpływu rozdzielczości i metody pozyskiwania danych wysokościowych na dokładność numerycznych modeli terenu oraz modeli spadku i ekspozycji, *Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji*, Vol. 16, 111-123.
- Dupéret A., Defontaine B., 2004, Digital Analysis and Basic Shape Relief Extraction from DTM, *Proceedings of XXth ISPRS Congress „Geo-Imagery Bridging Continents”*, from 12 to 23 July 2004 in Istanbul, Turkey, Commission 2, 810-815.
<http://www.isprs.org/istanbul2004/comm2/> (27.03.2008)
- Etzelmüller B., Sulebak J. R., 2000, Developments in the use of digital elevation models in periglacial geomorphology and glaciology, *Physische Geographie*, vol. 41, 35-57.
- Etzelmüller, B., Romstad, B. Fjellanger, J., 2007, Automatic regional classification of topography in Norway. *Norwegian Journal of Geology*, vol. 87, 167-180.
- Fraisse C.W., Sudduth K. A., Kitchen N. R., Fridgen J. J., 1999, Use of unsupervised clustering algorithms for delineating within-field management zones, presented as a paper no. 993043 at the ASAE International Meeting in Toronto, Ontario Canada, 18-21 July 1999. http://mpac.missouri.edu/pubs/mngmt_zones.pdf (23.03.2008).
- Giętkowski T., 2006, Zastosowanie wybranych metod ekologii krajobrazu do analizy struktury geokompleksów na przykładzie okolic Tucholi, (w:) *Idee i praktyczny uniwersalizm geografii*, Geografia fizyczna, (red.) Gierszewski P., Karasiewicz M. T., *Dokumentacja Geograficzna* 32, s.70-74.
- Hengl T., Rossiter D. G., 2003, Supervised Landform Classification to Enhance and Replace Photo-Interpretation in Semi-Detailed Soil Survey, *Soil. Sci. Soc. Am. J.* 67, 1810-1822.
- Irvin B. J., Ventura S. J., Slater B. K., 1997, Fuzzy and isodata classification of landform elements from digital terrain data in Pleasant Valley, Wisconsin, *Geoderma* 77, 137-154.
- Jordan G., Meijninger B.M.L., van Hinsbergen D.J.J., Meulenkamp J.E., van Dijk P.M., 2005, Extraction of morphotectonic features from DEMs: Development and applications for study areas in Hungary and NW Greece, *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 7, 163-182
- Kondracki J., 2001, *Geografia regionalna Polski*. PWN Warszawa
- Krysiak St., 1999, Typy geokompleksów i kierunki ich użytkowania w środkowej części dorzecza Pilicy, *Acta Geographica Lodziensia*, Nr 75, ŁTW, Łódź.
- MacMillan, R. A. 2000. A protocol for preparing digital elevation (DEM) data for input and analysis using the landform segmentation model (LSM) programs, przygotowany dla: Soil Variability Analysis to Enhance Crop Production (SVAECP) Project, przez: LandMapper Environmental Solutions, Edmonton, AB.
<http://www.infoharvest.ca/SVAECP/> (27.03.2008)
- MacMillan, R. A., Pettapiece W. W., 2000, Alberta Landforms: Quantitative morphometric descriptions and classification of typical Alberta landforms. Technical Bulletin No. 2000-2E. Research Branch, Agriculture and Agri-Food Canada, Semiarid Prairie Agricultural Research Centre, Swift Current, SK. s. 118.
- MacMillan R. A., Pettapiece W. W., Nolan S. C., Goddard T. W., 2000, A generic procedure for automatically segmenting landforms into landform elements using DEMs, heuristic rules and fuzzy logic, *Fuzzy Sets and Systems* 113, 81-109.
- Oksanen J., Sarjakoski, T., 2005, Error propagation of DEM-based surface derivatives, *Computers & Geosciences* 31, 1015-1027.
- Richling A., 1992, *Kompleksowa geografia fizyczna*, PWN.
- Rządca K., 2004, Algorytmy grupowania danych, praca magisterska wykonana na Wydziale Elektroniki i Technik Informatycznych Uniwersytetu Warszawskiego, pod kier. Dr. Hab. Franciszka Seredyńskiego.
- Shary P. A., Sharaya L. S., Mitusov A. V., 2002, Fundamental quantitative methods of land surface analysis, *Geoderma* 107, 1-32.

- Sørensen R., Zinko U., Seibert J., 2005, On the calculation of the topographic wetness index: evaluation of different methods based on field observations, *Hydrol. Earth Sys. Sci. Discuss.*, 2, 1807–1834. <http://www.hydrol-earth-syst-sci-discuss.net/2/1807/2005/hessd-2-1807-2005.html> (27.03.2008)
- StatSoft, 2006, *Elektroniczny Podręcznik Statystyki PL*, Kraków, <http://www.statsoft.pl/textbook/stathome.html> (23.03.2008)
- Tarboton, D. G., 1997, A New Method for the Determination of Flow Directions and Contributing Areas in Grid Digital Elevation Models, *Water Resources Research*, 33(2): 309-319. <http://hydrology.neng.usu.edu/taudem/> (26.03.2008)
- Tsermegas I., Szwarczewski P., Woronko B., Recielski K., Rojan E., 2000, Ewolucja i dynamika rzeźby okolic Pińczowa. *Prace i Studia Geograficzne* t. 27, s. 11-41.
- Wilson J. P., Gallant J. C., 2000, *Digital Terrain Analysis*, (w:) *Terrain Analysis*, Wilson J. P., Gallant J. C. (red.), John Wiley & Sons, 1-26.
- Wilson J. P., Gallant J. C., 2000b, *Primary Topographic Attributes*, (w:) *Terrain Analysis*, Wilson J. P., Gallant J. C. (red.), John Wiley & Sons, 51-85.