

PRZEMYSŁAW ŚLESZYŃSKI
Instytut Geografii i Przestrzennego Zagospodarowania PAN
e-mail: psleszyn@twarda.pan.pl

Wykorzystanie danych georadarowych SRTM-3 w analizie zróżnicowania ukształtowania terenu Polski

Zarys treści. W artykule przedstawiono analizy morfometryczne obszaru Polski. Wykonano mapy hipsometryczną, deniwelacji, spadków, kierunków nachyleń i odchyłeń standardowych. W badaniach wykorzystano wysokościowe dane satelitarne SRTM-3 o rozdzielczości 3×3" (60–65×90 m), które do celów badań zgeneralizowano do siatki 125×125 m, a następnie do heksagonów o powierzchni 0,14 i 3 km². Dane te, ze względu na szczegółowość, powinny być bardzo przydatne w analizach morfometrycznych, w tym na potrzeby praktyki.

Słowa kluczowe: morfometria, geomorfometria, ukształtowanie terenu, SRTM, Polska

1. Wprowadzenie

W badaniach nad ukształtowaniem powierzchni Ziemi wiodącym zagadnieniem jest wydzielenie jednostek morfologicznych na podstawie cech trójwymiarowych, tj. długości, szerokości i wysokości (głębokości) oraz analiza morfometryczna wydzielonych form lub powierzchni Ziemi traktowanej w sposób ciągły. Jeszcze nie tak dawno podstawowym, a często jedynym materiałem źródłowym była mapa poziomicowa, względnie własne pomiary geodezyjne lub analiza zdjęć lotniczych. Wraz z rozwojem technik teledetekcyjnych, fotogrametrycznych i informatycznych metody te zostały niemal całkowicie wyparte. Co więcej, wzrost poziomu szczegółowości i rosnąca baza danych o ukształtowaniu powierzchni Ziemi oraz rozwój narzędzi GIS pozwalają na przeprowadzenie badań, dotychczas technicznie niemożliwych lub bardzo trudnych do wykonania. J. Siwek (2008) zauważa, że jest to swoisty paradoks, gdyż klasyczna kartometria okres świetności ma już za sobą, ale to właśnie współcześnie istnieją doskonałe warunki do jej rozwoju wynikające z postępu technik komputerowych.

Analiza morfometryczna form trójwymiarowych w najprostszej postaci bazuje na zróżnicowaniu wysokości względnych i bezwzględnych odnoszonych do powierzchni, zakładając milcząco „płaskość” kuli ziemskiej. Dlatego też badania ukształtowania powierzchni terenu bazują przede wszystkim na geometrii. Nie jest przypadkiem, że w literaturze geograficznej można już od dawna spotkać metodyczne prace matematyków na ten temat (S. Steinhaus 1947a,b). Wyczerpujący przegląd metod i wskaźników, określających zróżnicowanie morfometryczne powierzchni terenu przedstawił P.A. Shary i inni (2002), podając m.in., że najstarszy tego typu wskaźnik został opracowany przez słynnego matematyka K.F. Gaussa (1827).

Analizy morfometryczne powierzchni terenu są powszechnie wykorzystywane w geomorfologii i geologii oraz pokrewnych dziedzinach nauk o Ziemi, gdyż pozwalają nie tylko na wizualizację, ale również na wstępne wyjaśnienie procesów kształtujących środowisko abiotyczne. Stąd umiejętności analizy morfometrycznej stanowią obowiązkowy kanon wiedzy geografów fizycznych (A. Richling 2007).

Równocześnie, zaskakująco mało wiedzy na temat kartometrii rzeźby terenu znajduje się w podręcznikach z zakresu topografii; podobnie niewiele uwagi poświęca się jej w literaturze kartograficznej. Nasuwa się tu pytanie, na ile analiza morfometryczna powierzchni terenu jest zadaniem kartograficznym lub geodezyjnym, a na ile typowo geomorfologicznym lub geologicznym (R. Ławniczak 2003). Wydaje się logiczne, że istnieje tu szerokie wspólne pole zainteresowań, ale już nawet pobieżna analiza literatury wskazuje, że jest to temat rzadziej przyciągający uwagę kartografów. Co ciekawe, więcej uwagi temu zagadnieniu poświęca się w starszych

podręcznikach z zakresu kartografii. Przykładowo w *Zarysie kartografii* J. Szaflarskiego (1965), podrozdział na temat morfometrii wymienia takie przykłady zastosowań, jak analizy typowo geometryczne (nachylenia stoku, wysokości względnych – „energii reliefu”), gęstości form terenu (np. dolin, powierzchni szczytowych) i elementów hydrograficznych. J. Siwek (2008) formułuje pogląd, że morfometria nie jest obecnie przedmiotem zainteresowania kartografii, gdyż jej rozwój metodyczny przypadł na koniec XIX i pierwsze dekady XX wieku, kiedy obliczenia przeprowadzano w żmudny, „ręczny” sposób i z tego powodu wiele nierozwiązanych, wówczas ważnych problemów dotyczących ukształtowania Ziemi, zostało zarzuconych, a ich rozwiązanie (np. regionalizacja fizycznogeograficzna) nastąpiło z użyciem innych metod.

W polskiej literaturze po II wojnie światowej zagadnienia typowo metodyczne oraz przeglądowe z zakresu morfometrii są poruszane sporadycznie (A. Szumowski 1967, W. Żyszkowska 1978, J. Lach i inni 1980, Z. Kozieł 1990, R. Ławniczak 2003, J. Siwek 2008). Dotychczasowe prace, ze względu na dużą czasochłonność, obejmowały zwykle stosunkowo niewielkie obszary. Pierwsze z nich powstały jeszcze przed I wojną światową (E. Romer), a szczególnie duży wzrost zainteresowania nastąpił w okresie międzywojennym (J. Czyżewski, S. Pawłowski, J. Smoleński, B. Zaborski i inni; por. przegląd literatury w pracy R. Ławniczaka, 2008). Najdokładniejszą opracowaną dotychczas mapę wysokości względnych dla całego obszaru Polski w skali 1:2 000 000 zamieszczono w *Narodowym Atlasie Polski* (S. Dębowska 1973). Wiele prac morfometrycznych dotyczy geomorfologii i geologii (w ostatniej dekadzie m.in. W. Zuchiewicz 1999; R. Ławniczak 2001, 2008; M. Szubert 2005; A. Dmowska 2008; A. Placek 2008; A. Sobczyk 2008).

Wraz z rozwojem technik komputerowych coraz więcej miejsca poświęca się analizie morfometrycznej w szeroko rozumianej literaturze „gisowej”. W polskiej literaturze na ten temat szczególnie warto polecić wyczerpujący przegląd zagadnień metodycznych, technologicznych i aplikacyjnych Z. Kurczyńskiego i współautorów (2007). Nie jest to przypadek, gdyż jednym z bardziej wydajnych, a więc interesujących metodycznie zastosowań, były trójwymiarowe modele terenu. Stąd też wiele komputerowych programów użytkowych zawiera moduły pozwalające nie tylko na analizę podstawowych

wskaźników morfometrycznych, takich jak deniwelacje, nachylenia i kierunek, ale także bardziej skomplikowanych zagadnień, jak np. analiza widoczności (A. Ołdak 1992, P. Śleszyński 1998). Nadal jednak w polskiej literaturze odczuwa się niedostatek tego typu analiz. Ostatnio ciekawym wydarzeniem poznawczym i metodycznym stało się wydanie *Hipsometrycznego atlasu Krakowa* pod redakcją I. Jędrzychowskiego (2008), opracowanego na podstawie szczegółowego skanowania laserowego¹.

Równocześnie na świecie w ostatniej dekadzie obserwowany jest intensywny wzrost zainteresowania tematyką morfometrii powierzchni terenu. Przykładowo kolekcja baz bibliograficznych Elsevier/Springer (zawierająca m.in. takie bazy jak SCI-Expanded, Web of Knowledge oraz SCOPUS) po wpisaniu słowa kluczowego „geomorphometry” zwraca 95 rekordów za okres 2000–2008². Wiele z nich, dotyczących zastosowania numerycznych modeli powierzchni terenu ukazuje się w czołowym periodyku geomorfologicznym „Geomorphology” (np. A. Kühni, O.A. Pfiffner 2001; A. Ganas i inni 2005).

Generalnie, przytoczone fakty skłaniają do wyróżnienia geomorfometrii jako bardzo ważnej subdyscypliny geomorfologii (I.S. Evans 1972, R.J. Pike 2000), co zaowocowało tylko w ostatnich latach kilkoma podręcznikami (Z. Li i inni 2004; N. El-Sheimy i inni 2005; Q. Zhou, B. Less 2007; T. Hengl, H.I. Reuter 2008). O rozwoju dziedziny świadczy najlepiej przegląd literatury, dokonany przez J.R. Pike’a (2002), który obejmuje ponad 6 tysięcy pozycji dotyczących analizy morfometrycznej powierzchni terenu. Udośpienie w ostatnich latach szczegółowych danych satelitarnych o zróżnicowaniu ukształtowania powierzchni Ziemi wraz z rozwojem technik komputerowych powoduje, że geomorfometria stała się niezwykle dynamicznie rozwijającą się subdyscypliną.

Biorąc pod uwagę opisane uwarunkowania, w artykule przedstawiono możliwości wykorzystania szczegółowych satelitarnych danych wysokościowych do analizy morfometrycznej obszaru Polski. Podjęto próbę rozwiązania kilku klasycznych zadań z zakresu takiej analizy (mapa hipsometryczna, mapa spadków i inne),

¹ Por. recenzję B. Horodyskiego, „Polski Przegl. Kartogr.” T. 40, 2009, nr 1, s. 44–45.

² Wyszukiwanie poprzez słowo kluczowe „morphometry” w dziedzinie „Earth and Planetary Sciences” zwraca podobną liczbę rekordów (92), ale co ciekawe, najwięcej jest prac nie z zakresu geomorfologii, ale hydrologii i geologii.

ale również zaproponowano nowe metody pomiaru zróżnicowania ukształtowania terenu. W badaniach posiłkowano się obecnie najbardziej szczegółowymi dla całego obszaru Polski i równocześnie powszechnie dostępnymi źródłami cyfrowymi, jakimi są dane satelitarne SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*). Znane są wprawdzie inne dokładniejsze źródła cyfrowe z tego zakresu (LPIS, SMOK, TBD, VMAP), ale nie pokrywają one obecnie całego kraju.

Dane SRTM, szeroko wykorzystywane na świecie, w Polsce są przedmiotem zainteresowania z pewnym opóźnieniem. W naukach przyrodniczych zastosowania dotyczą głównie geologii (np. J. Nita i inni 2007; J. Wojewoda 2007)³, leśnictwa (P. Wężyk i A. Świader 2004; K. Stachura 2006) i geomorfologii (A. Dmowska 2008; T. Giętkowski, M. Zachwatowicz 2008). Trzeba podkreślić, że ze względu na opisaną niżej szczegółowość, dane SRTM nadają się szczególnie do analiz średnioskalowych, tj. poniżej 1:100 000, a więc powinny być szczególnie przydatne dla geografów.

2. Dane satelitarne SRTM i ich przetworzenie

W 2000 roku miała miejsce kilkunastodniowa misja promu kosmicznego Endeavour, podczas której przeprowadzono radarowe skanowanie powierzchni Ziemi. W jej wyniku otrzymano zbiór danych o objętości ponad 12 terabajtów zawierający informację o wysokościach bezwzględnych w dużej rozdzielczości poziomej i pionowej ($x = 1''$, $y = 1''$, $z = 1$ m). Skanowanie objęło około 80% powierzchni Ziemi, między równoleżnikami 54°S i 60°N, bez obszarów okołobiegunowych. Szczegółowy opis techniczny zawarty jest w opracowaniu wydanym przez amerykańską służbę geologiczną, dostępnym na stronie internetowej (E. Rodriguez i inni 2005; zob. też A. Karwel, I. Ewiak, 2006a,b oraz Z. Kurczyński 2000, ten ostatni pod znamienym tytułem *Nowa era geoinformatyki*). W tym miejscu nie ma zatem potrzeby dogłębnego omawiania szczegółów technicznych, jednak z punktu widzenia przedstawianych analiz obszaru Polski na podkreślenie zasługują trzy dosyć istotne sprawy:

1) rozdzielczość pozioma w szerokości geograficznej, na której jest położona Polska, ozna-

cza większą szczegółowość równoleżnikową, a mniejszą południkową;

2) dokładność pionowa 1 m nie zapewnia dobrej interpretacji obszarów równinnych, zwłaszcza w strefie przybrzeżnej Bałtyku, jak również jest powodem, że model w postaci oryginalnej w części przedstawia pokrycie terenu, a nie jego rzeźbę, co ma największe znaczenie na obszarach nizinnych i zurbanizowanych (w niniejszym opracowaniu dysponowano wersją znacznie korygującą ten mankament, szczególnie w przypadku obszarów zurbanizowanych). W rzeczywistości błąd pomiaru na obszarze Polski jest nieco większy niż zakładany 1 m, szczególnie w przypadku obszarów o większym nachyleniu (na terenach falistych i pagórkowatych – 2,7 m; zob. A. Karwel, I. Ewiak 2006a);

3) brakuje części danych dla 0,05% obszaru, głównie ze względu na warunki pogodowe i hydrologiczne (np. odbicia fal radiowych od wody).

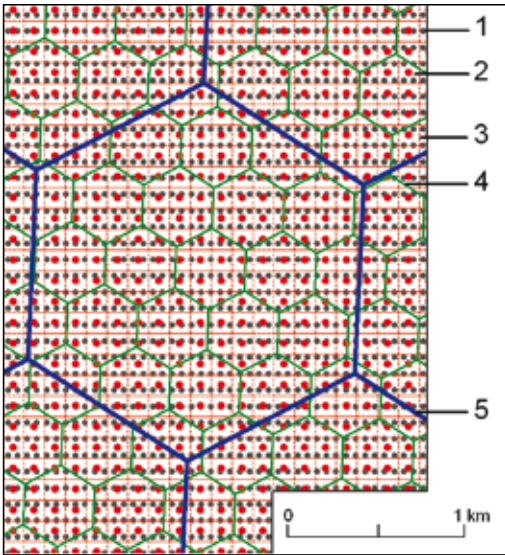
Publicznie udostępniane są pliki zawierające rozdzielczość poziomą 3'', czyli dla obszaru Polski wynoszącą 60–65×90 m⁴. Taka szczegółowość umożliwi nie tylko budowę dokładnych trójwymiarowych modeli terenu (DEM/DTM), ale również dosyć zaawansowane analizy morfometryczne. Ponieważ od publicznego udostępnienia danych w 2003 roku mija już 6 lat, można znaleźć bardzo wiele przykładów ich wykorzystania w różnych źródłach, zwłaszcza internetowych. Niemal wszystkie zastosowania dotyczą jednak tylko najprostszycych zastosowań, czyli właśnie DEM i map hipsometrycznych. Przykładowo rozpowszechnianych jest bardzo wiele, często niekomercyjnych (darmowych) programów, służących obróbce danych SRTM–3 w celach budowy modeli terenu i interpolacji poziomic (m.in. MicroDEM, 3DEM, Landserf).

Pierwotna, trzysekundowa szczegółowość danych na potrzeby analizy ukształtowania terenu obszaru Polski okazała się dla części analiz zbyt szczegółowa i niepotrzebna. Dane SRTM–3 dla obszaru Polski zostały zatem poddane transformacji na dwa sposoby (ryc. 1). Pierwszy polegał na zachowaniu dosyć dużej szczegółowości południkowej i równoleżnikowej 125 m. Dokonano tego poprzez interpolację. Ponieważ, jak

³ W ponad 400 abstraktach Pierwszego Kongresu Geologicznego w Krakowie (26–28 czerwca 2008 r.) słowo „SRTM” pojawia się zaledwie raz, i to w odniesieniu do badań z obszaru Wietnamu.

⁴ Na przykład na stronie internetowej International Centre for Tropical Agriculture (CIAT; <http://srtm.csi.cgiar.org>) lub NetGIS, projektu przygotowanego przez pracowników Wydziału Geologii UW w ramach Open Geospatial Consortium (<http://netgis.geo.uw.edu.pl/>). Dane CIAT są częściowo skorygowane ze względu na pokrycie terenu.

wspomniano, oryginalne dane były udostępnione przez NASA w postaci plików binarnych dla siatki geograficznej 3×3", konieczna była ich interpolacja do nowych wartości, czyli z 60–65 m (szczegółowość równoleżnikowa) oraz 90 m (szczegółowość południkowa) do 125×125 m. Zatem generalizacja równoleżnikowa była dwukrotna, a południkowa – około półtorakrotna.



Ryc. 1. Sposoby transformacji, relacje pomiędzy punktami siatek i heksagonami oraz pola prezentacji wyników obliczeń na mapach. Na rycinie przedstawiono obszar w okolicach przecięcia południka 22°12' oraz równoleżnika 54°46': 1 – wyjściowy zbiór punktów (3×3" czyli 60–65×90 m, szare punkty); 2 – siatka punktów 125×125 m powstała w wyniku interpolacji danych z wyjściowego zbioru punktów (czerwone punkty); 3 – pola odniesienia (kwadraty) wysokości bezwzględnych przedstawionych na ryc. 3; 4 – heksagony o powierzchni 13,81 ha z uśrednionymi wysokościami bezwzględnymi i spadkami obliczonymi w siatce punktów 125×125 m (ryc. 2 i 5); 5 – heksagony o powierzchni 3 km², w których obliczono i przedstawiono deniwelacje oraz odchylenia standardowe wysokości punktów siatki 125×125 m (ryc. 4 i 7)

Fig. 1. Methods of transformation, relations points of grids to hexagons and fields of presentation of calculation results on maps. The picture presents the area around the intersection of 22°12' meridian and 54°46' parallel: 1 – initial set of points (3×3", i.e. 60–65×90 m; grey colour); 2 – network of points 125×125 m, resulting from the interpolation of the data from the initial set of points (red points); 3 – squares – reference areas of absolute altitude presented on fig. 3; 4 – hexagons of 12.81 ha, absolute altitudes and slopes calculated in the grid of 125×125 m (fig. 2 and 5); 5 – hexagons of 3 km² with calculated and presented denivelation and standard altitude variation of points in a 125×125 m grid (fig. 4 and 7)

W efekcie tych przeliczeń powstała podstawowa baza dla obszaru Polski licząca około 20 mln punktów wysokościowych.

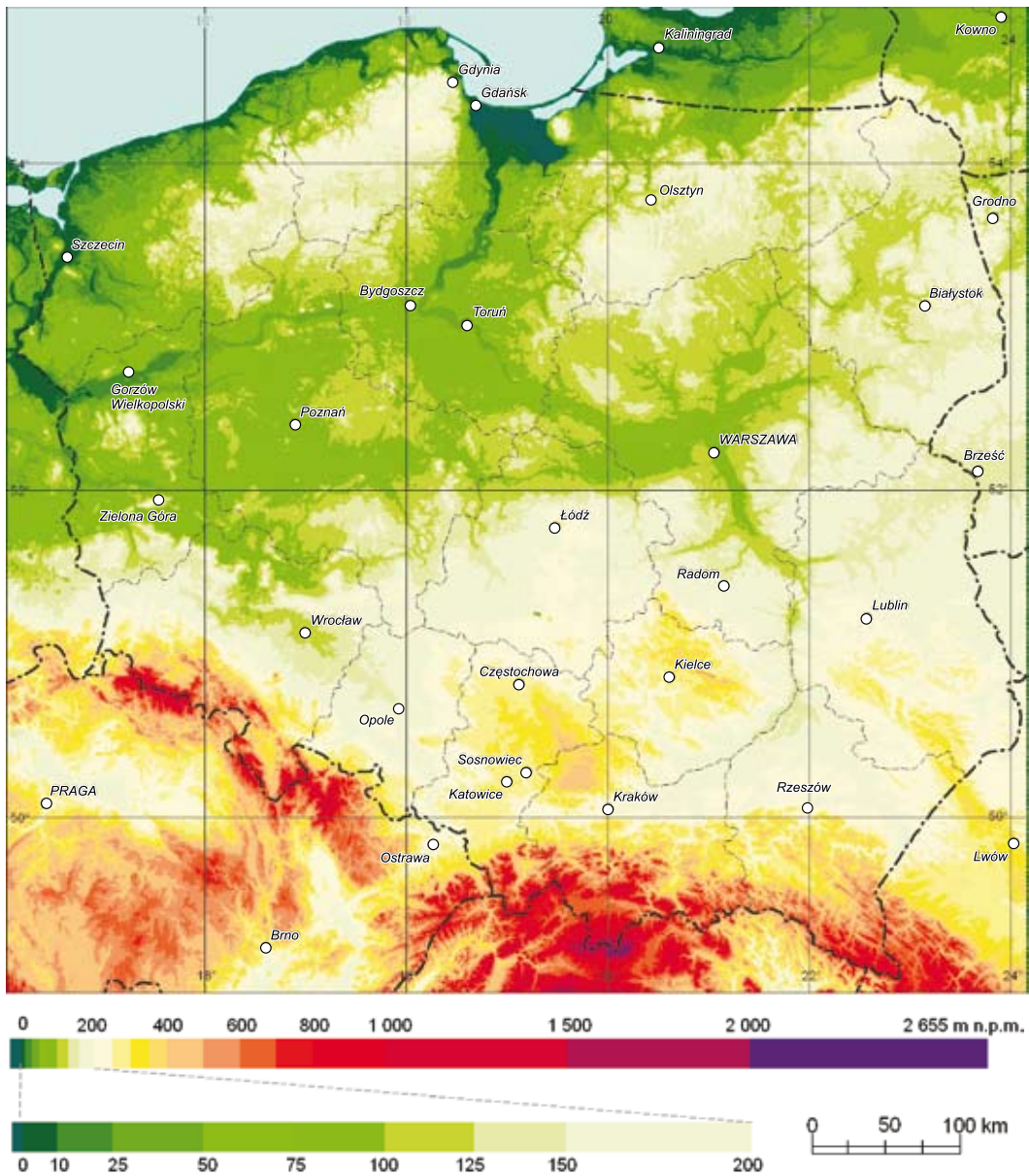
Drugi sposób przeprowadzenia analiz zakładał wykonanie obliczeń na podstawie opisanej wyżej bazy wyjściowej w celu opracowania mapy w skali 1:5 000 000. Po pierwsze, przyjęto podział na heksagony o boku 400 m (13,81 ha), w których mieściło się przeciętnie 10 punktów wysokościowych. W bardziej zgeneralizowanym podziale przyjęto heksagony o powierzchni 3 km² każdy, czyli ponad 100 tys. pól dla obszaru Polski. Dotyczyło to analizy odchyień standardowych, w której ze względu na specyfikę metodyczną potrzebowano większej liczby punktów (inaczej próby statystycznej). Zastosowanie heksagonów było powodowane faktem, że wypełniają one całkowicie powierzchnię i są zarazem najbardziej zbliżone do kół, a zatem przedstawianie za ich pomocą analiz środowiska przyrodniczego wydaje się być najbardziej uzasadnione.

Analizy przeprowadzono za pomocą różnych programów komputerowych, głównie Global Mapper 9.0 (firmy Global Mapper Software LLC) oraz Vertical Mapper (MapInfo Corporation / Pitney Bowes, Inc.). Mapy ostatecznie zredagowano w programie MapInfo Professional 7.8.

3. Mapy zróżnicowania rzeźby terenu

3.1. Mapa hipsometryczna

Dane wysokościowe najczęściej są wykorzystywane do opracowania numerycznych modeli rzeźby (DEM) i map wysokościowych. Mapę hipsometryczną przedstawiono na rycinie 2. Nie może ona pomieścić wszystkich elementów wynikających ze szczegółowości bazy wyjściowej (w 1 mm w skali 1:5 000 000 w rozdzielczości 300 dpi mieści się bowiem prawie 12 pikseli, z których każdy reprezentuje ponad 400 m, a zatem w stosunku do wyjściowej bazy punktów w siatce 125×125 m jest to około 10-krotnie mniejsza szczegółowość). Dlatego dodatkowo na rycinie 3A pokazano fragment obszaru Polski (Kotlina Warszawska), przygotowany na podstawie wyjściowej bazy punktów w siatce 125×125 m, zgodnie z metodą przedstawioną na rycinie 1. Widać tu wyraźnie, że pomimo filtracji pokrycia terenu, na wartości wysokości bezwzględnych ma niekiedy wpływ pokrycie terenu, przy czym w zasadzie całkowicie wyeliminowana została zabudowa, a nie zawsze lasy. Na mapie prezen-



Ryc. 2. Mapa hipsometryczna Polski opracowana na podstawie siatki punktów 125×125 m (ze względów publikacyjnych dane uśredniono w heksagonach o powierzchni 13,81 ha). Widoczne są duże formy antropogeniczne (kopalnia węgla brunatnego w Kleszczowie koło Bełchatowa) oraz niezgodności wysokości na obszarach o najniższych wysokościach bezwzględnych (Żuławy)

Fig. 2. Hypsometric map of Poland prepared on a grid of 125×125 m (for publication purposes data was averaged in hexagons of 13.81 ha). Large anthropogenic forms (brown coal mine in Kleszczów near Bełchatów) are visible and discrepancies in altitude in areas of lowest absolute altitude (Żuławy)

Tab. 1. Charakterystyka hipsometryczna województw Polski

Województwo	Odsetek powierzchni w strefach wysokościowych n.p.m.						Razem
	do 100	100–200	200–300	300–600	600–1000	powyżej 1000	
Dolnośląskie	8,0	50,1	17,1	18,8	5,5	0,5	100,0
Kujawsko-Pomorskie	64,7	35,3	–	–	–	–	100,0
Lubelskie	–	59,8	38,3	1,9	–	–	100,0
Lubuskie	72,6	27,3	0,2	–	–	–	100,0
Łódzkie	6,5	68,1	25,3	<0,1	–	–	100,0
Małopolskie	–	9,8	28,7	41,1	18,2	2,2	100,0
Mazowieckie	19,1	78,7	2,0	0,3	–	–	100,0
Opolskie	–	54,5	41,7	3,7	<0,1	–	100,0
Podkarpackie	<0,1	28,6	35,4	28,7	6,9	0,4	100,0
Podlaskie	1,1	95,8	3,1	–	–	–	100,0
Pomorskie	45,5	49,7	4,8	<0,1	–	–	100,0
Śląskie	–	2,1	66,7	24,2	6,4	0,6	100,0
Świętokrzyskie	–	20,2	68,8	10,9	<0,1	–	100,0
Warmińsko-Mazurskie	21,1	76,1	2,8	<0,1	–	–	100,0
Wielkopolskie	53,4	45,9	0,7	–	–	–	100,0
Zachodniopomorskie	70,9	28,8	0,3	–	–	–	100,0
Polska ogółem	25,5	50,9	15,7	6,0	1,7	0,2 (0,18)	100,0
Polska ogółem według J. Staszewskiego i F. Uhorczaka (1963, na podstawie obliczeń Z. Rachwalskiej)	26,0	49,3	16,5	7,9		0,3 (0,27)	100,0

tującej Kotlinę Warszawską najwyżej położony punkt w Warszawie według danych SRTM ma tylko o 4 m więcej, niż wynika to z map topograficznych. Z kolei na tej samej mapie widać granice kompleksów leśnych Puszczy Kampińskiej, co tylko częściowo wynika z położenia na wzniesieniach wydmych.

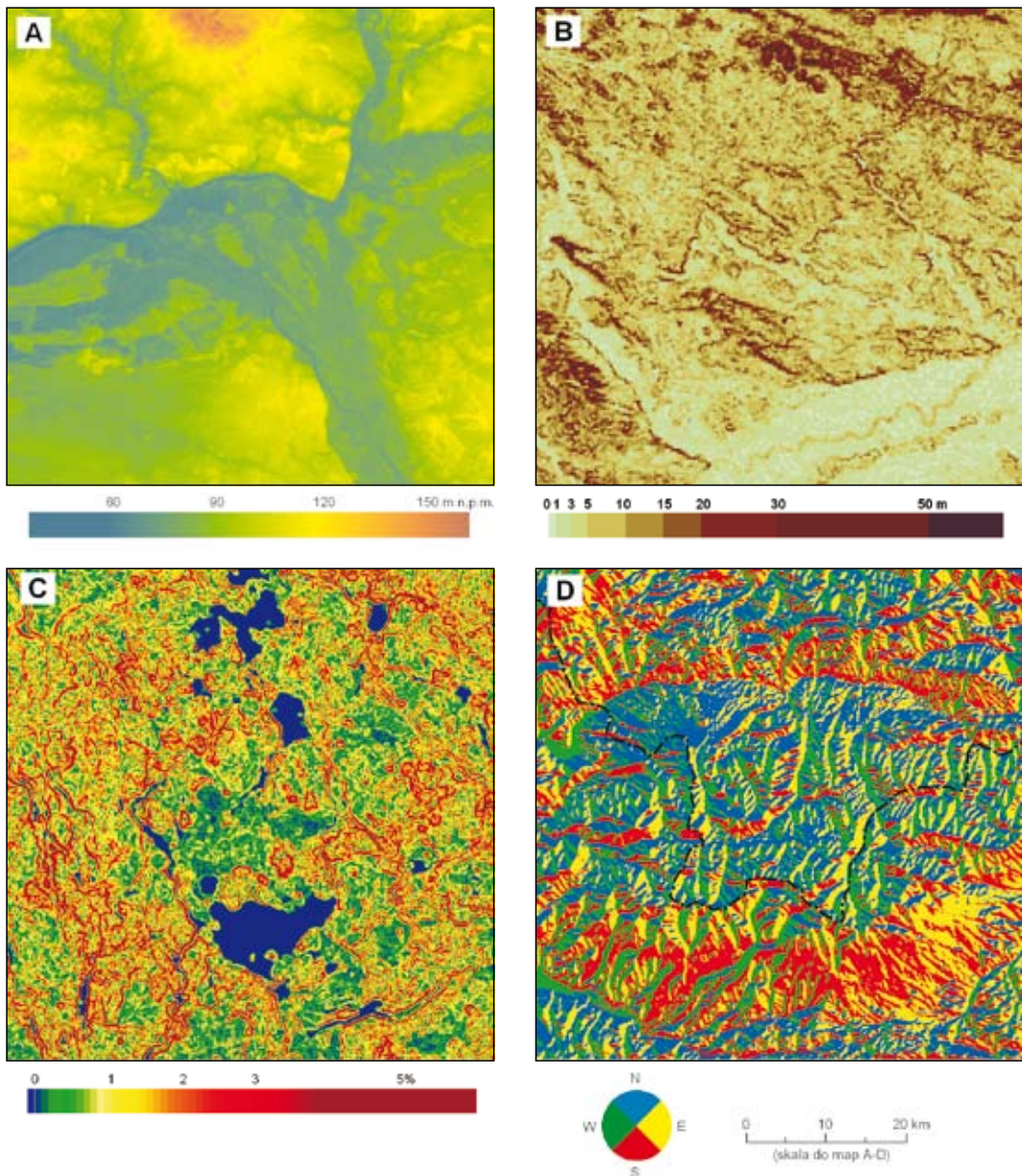
Jak wspomniano, mapa hipsometryczna jest najprostszym przykładem zastosowania danych SRTM. Warto tu jedynie podkreślić oczywisty fakt, że dzięki posiadaniu trójwymiarowego modelu terenu możliwe jest radykalne skrócenie tradycyjnych sposobów opracowania takich map dowolnych obszarów. W tym kontekście zachęcająco przedstawiają się możliwości podstawowych analiz morfometrycznych, takich jak np. krzywa hipsograficzna lub statystyki hipsometryczne, przedstawione dla dowolnych

obszarów, np. województw (tab. 1). Obliczenia przeprowadzono w ten sposób, że jeden punkt wysokościowy oparty na siatce punktów 125×125 m reprezentuje obszar o powierzchni 0,015625 km² (1,5625 ha).

3.2. Mapa deniwelacji

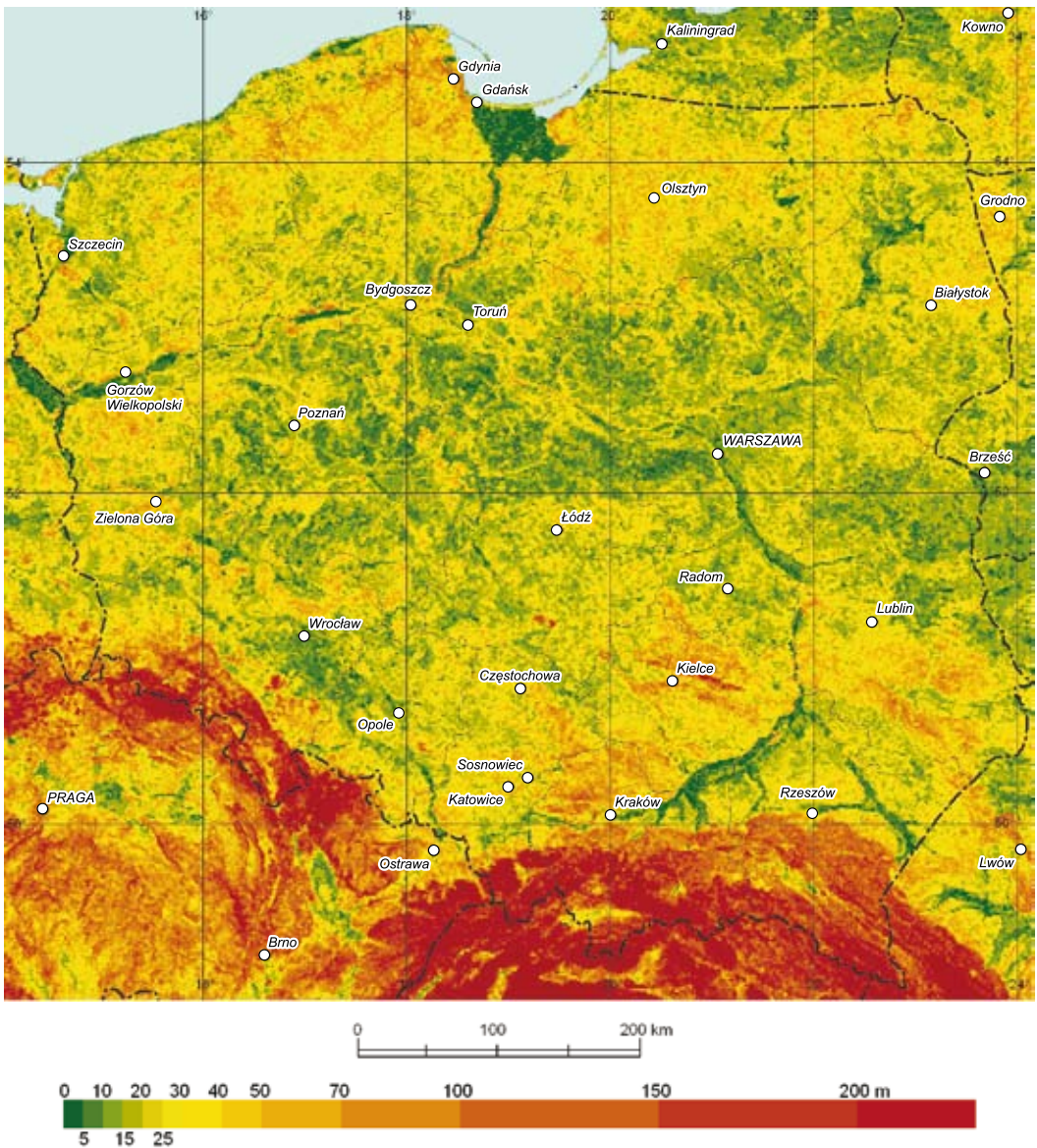
W morfometrii powierzchni Ziemi jedną z najczęściej stosowanych metod badawczych jest analiza wysokościowej względnych. Daje ona odpowiedź na pytania związane przede wszystkim z jej wiekiem oraz dynamiką rozwoju, wobec czego mapy deniwelacji nazywane są mapami energii reliefu. Również w tym przypadku, dzięki danym SRTM–3, możliwe jest względnie łatwe obliczanie wskaźników zróżnicowania wysokości.

Najprostszym wskaźnikiem jest różnica wyso-



Ryc. 3. Mapy zróżnicowania rzeźby terenu wybranych obszarów Polski opracowane na podstawie siatki punktów 125×125 m lub heksagonów o powierzchni 13,81 ha: A – mapa hipsometryczna (Kotlina Warszawska, siatka punktów); B – mapa deniwelacji (Góry Świętokrzyskie i Niecka Nidziańska; na podstawie heksagonów); C – spadki terenu (Kraina Wielkich Jezior Mazurskich, siatka punktów); D – kierunki nachylenia terenu (Tatry i okolice, siatka punktów)

Fig. 3. Maps of relief variation for selected areas of Poland, prepared on a grid of 125×125 m or in hexagons of 13.81 ha: A – hypsometric map (Warsaw Basin, grid); B – denivelation map (Świętokrzyskie Mountains and Niecka Nidziańska Basin; hexagons); C – slopes (The Land of Great Masurian Lakes; grid); D – slope directions (the Tatras and the surrounding area; grid)



Ryc. 4. Mapa denielacji Polski w heksagonach o powierzchni 3 km^2 opracowana na podstawie siatki punktów $125 \times 125 \text{ m}$

Fig. 4. Denivelation map in hexagons of 3 km^2 prepared on a grid of $125 \times 125 \text{ m}$

kości bezwzględnych na danym obszarze, służąca do opracowania mapy denielacji. Możliwe jest tu przeprowadzenie obliczeń w następujący sposób. Należy podzielić dany obszar na takie same równoboczne jednostki przestrzenne (trójkąty lub inne wieloboki) i obliczyć w nich różnicę między minimalną i maksymalną wy-

sokością, czyli największą wysokość względną na danym obszarze (ryc. 4). W tym przypadku jednak położenie wspomnianych figur geometrycznych jest przypadkowe i jest prawie pewne, że ze względu na skalę, przecinają one granice jakiegokolwiek jednostki morfometrycznej, np. doliny lub stoku. W skali całego kraju nie ma to większego

znaczenia, jednak dla mniejszych powierzchni konieczne jest nawiązywanie granic jednostek do typów rzeźby. Ostatecznie obliczenia deniwelacji przeprowadzono w heksagonach o powierzchni 3 km² każdy (148 tys. pól, w tym 104 tys. dla obszaru Polski).

Analiza deniwelacji wskazuje na bardzo duże rozpiętości tego parametru rzeźby terenu. Większą część obszaru Polski charakteryzują jednak wartości mieszczące się w granicach 10–40 m. Mapa dobrze oddaje zróżnicowanie kraju na podstawowe makroskalowe kategorie jednostek fizycznogeograficznych: pojezierza, niziny, wyżyny, pogórza i góry. Warto zwrócić uwagę na plastyczny obraz form terenu, pozwalający uchwycić podstawowe kierunki oddziaływania

3.3. Mapa spadków powierzchni terenu

Analiza nachylenia sprowadza się do wyznaczenia kierunków oraz maksymalnych wartości spadków między punktami wysokościowymi, opartych albo na sieci regularnej, albo na takim samym pomiarze pomiędzy punktami charakterystycznymi (np. szczytami i dnami dolin). Ograniczeniem siatki regularnej jest fakt, że formy powierzchni terenu zawierają się w niej w sposób przypadkowy. Jednak duża szczegółowość regularnej siatki, tak jak ma to miejsce w analizowanych danych wysokościowych, sprawia, że formy rzeźby zdecydowanie częściej zawierają się w jej wielu „oczkach”, niż że pomiędzy dwoma jej punktami leży więcej niż jedna forma rzeź-

Tab. 2. Nachylenia powierzchni terenu województw Polski

Województwo	Odsetek powierzchni o nachyleniach							Razem
	do 1%	1–2%	2–3%	3–5%	5–7%	7–10%	pow.10%	
Dolnośląskie	42,8	22,6	11,3	9,3	4,2	4,0	5,8	100,0
Kujawsko-Pomorskie	65,9	22,0	7,5	3,7	0,7	0,2	<0,1	100,0
Lubelskie	54,9	27,9	10,6	5,4	1,0	0,3	0,1	100,0
Lubuskie	50,1	29,7	12,6	6,4	1,0	0,2	<0,1	100,0
Łódzkie	66,2	25,0	6,7	2,0	0,1	0,1	<0,1	100,0
Małopolskie	19,3	12,9	10,9	15,7	11,0	11,5	18,7	100,0
Mazowieckie	70,7	22,1	5,4	1,6	0,1	<0,1	<0,1	100,0
Opolskie	54,8	27,9	11,4	4,9	0,6	0,2	0,1	100,0
Podkarpackie	32,5	18,6	10,1	11,7	9,0	9,0	9,1	100,0
Podlaskie	57,3	29,7	9,0	3,6	0,3	0,1	<0,1	100,0
Pomorskie	46,2	28,6	13,4	8,8	2,2	0,7	0,1	100,0
Śląskie	36,5	30,1	13,5	7,9	2,4	2,1	7,4	100,0
Świętokrzyskie	35,3	32,6	16,7	11,2	2,6	1,1	0,3	100,0
Warmińsko-Mazurskie	46,4	31,8	13,2	7,2	1,2	0,2	<0,1	100,0
Wielkopolskie	67,9	21,3	7,4	2,9	0,4	0,1	<0,1	100,0
Zachodniopomorskie	50,4	29,7	12,1	6,4	1,1	0,2	<0,1	100,0
Polska ogółem	52,8	25,6	10,2	6,1	2,0	1,5	2,0	100,0

procesów morfogenetycznych, związanych zarówno z wypiętrzaniem (Karpaty), uskokami tektonicznymi (Sudety), plejstoceńską działalnością lądolodu (Pojezierze Kaszubskie, Mazurskie i inne), procesów peryglacialnych (Niziny Środkowopolskie), jak również holocenijskim pogłębieniem dolin rzecznych i akumulacją osadów (dolina Wisły).

by. A zatem, szczegółowość danych 125×125 m pozwala na śledzenie nachyleń głównych form rzeźby terenu, pomijając lokalne kilkumetrowe załomy, zagłębienia itp.

Mapy spadków umożliwiają różnego rodzaju analizy związane z badaniami dynamiki stoków, a zwłaszcza procesów spływu powierzchniowego i erozji wodnej. Stąd ich szczególne



Ryc. 5. Mapa spadków powierzchni terenu Polski opracowana według siatki punktów 125×125 m (ze względów publikacyjnych dane uśredniono w heksagonach o powierzchni 13,81 ha)
 Fig. 5. Map of slopes prepared on a grid of 125×125 m (for publication purposes data was averaged in hexagons of 13.81 ha)

zastosowanie w badaniach gleboznawczych i krajobrazowych. Warto zaznaczyć, że są to równocześnie jedne z wcześniejszych zastosowań GIS w geomorfologii, znane tak długo, jak rozwiązania wykorzystujące trójwymiarowy model terenu. Wiązało się to między innymi z

tym, że wykonanie map nachylenia terenu na podstawie tradycyjnych map poziomicowych było niezwykle żmudne i stąd pojawienie się technik numerycznych umożliwiło radykalne przyśpieszenie analiz. Z tego względu przedstawiana mapa spadków nie ma waloru *novum*

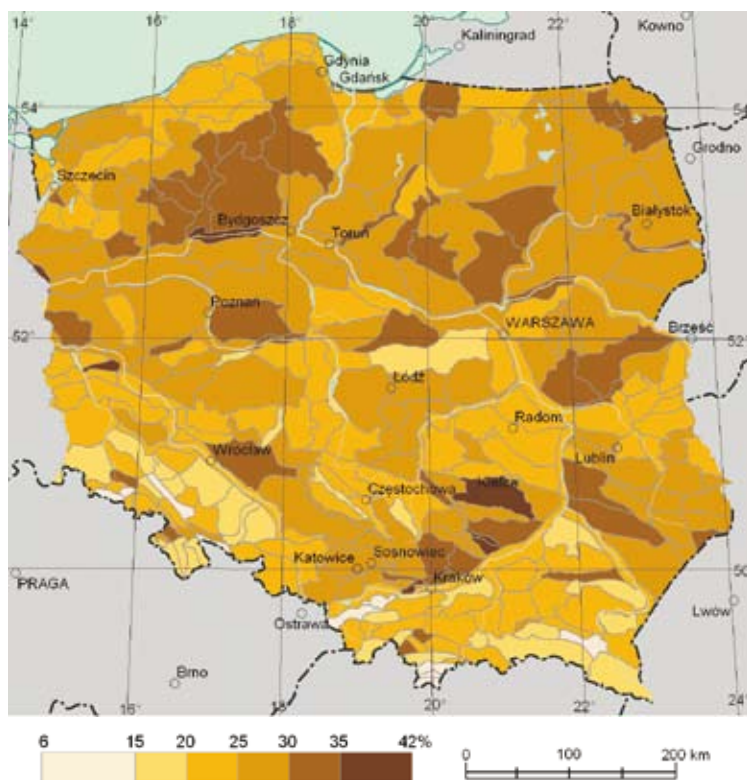
metodycznego, ale pokazuje, w jaki sposób można dokonać przekształceń danych wysokościowych w celu uzyskania satysfakcjonujących rozwiązań.

Mapę spadków przedstawiono na rycinie 5, a dane dla województw w tabeli 2. Podobnie, jak na poprzednich mapach, bazowano na siatce punktów wysokościowych 125×125 m, ale ostateczny obraz obszaru Polski zaprezentowano, wykorzystując sieć heksagonów o powierzchni 13,81 ha. Szczegółowe analizy przedstawiono również dla wybranych wycinków (ryc. 3C i 3D). W obliczeniach wykorzystano program komputerowy Vertical Mapper. Efektem analiz w wymienionym programie jest nie tylko średni spadek stoku, ale także i jego kierunek, mogący przybierać wartość od 0 do 360°.

Mapa spadków wykazuje wiele cech podobieństwa do mapy deniwelacji, jednak w tym przypadku otrzymany obraz charakteryzuje się znacznie większą szczegółowością. Widoczne są nie tylko większe wzgórza, ale również pojedyncze duże wydmy na Nizinach Środkowopolskich. Analizę kierunków spadków można także przedstawić w odniesieniu do mezoregionów według podziału J. Kondrackiego (ryc. 6). W Polsce, jak wiadomo, przeważa ekspozycja północna, przy czym dane SRTM pozwalają na szczegółowe obliczenia udziałów poszczególnych ekspozycji (N, E, S, W) według dowolnych powierzchni.

3.4. Mapa odchyłań standardowych wysokości

Dane o wysokości terenu w regularnej siatce pozwalają na obliczenie wskaźników, niemożliwych lub bardzo trudnych do wyprowadzenia na podstawie klasycznych map poziomicowych. Jednym z najprostszych i zarazem bardzo efek-



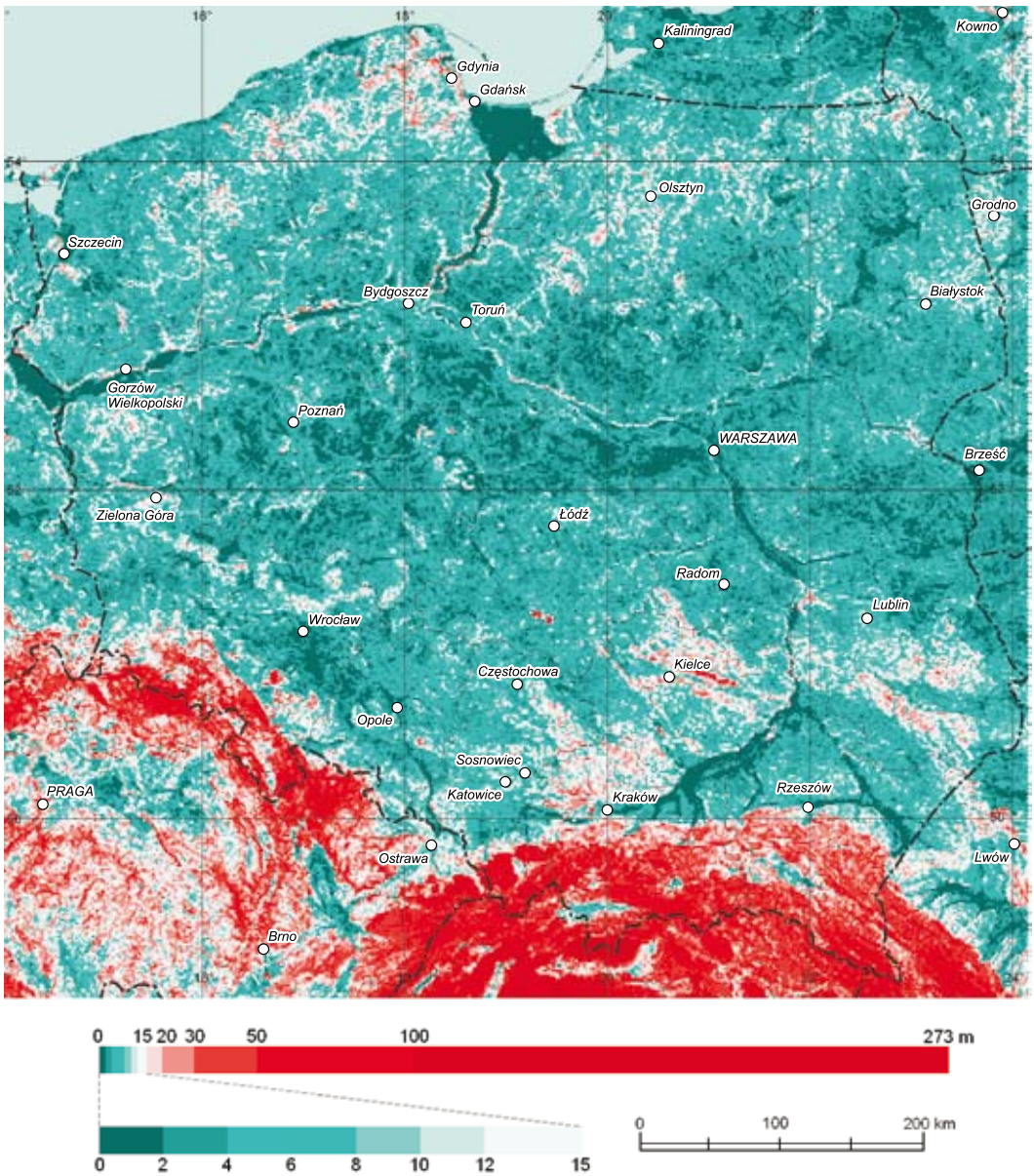
Ryc. 6. Udział ekspozycji południowej (135–225°) w powierzchni mezoregionów (na podstawie siatki punktów 125×125 m, obliczenia w granicach Polski)

Fig. 6. Share of southern exposition (135–225°) in the area of mesoregions (on a grid of 125×125 m, calculations within the borders of Poland)

tywnych sposobów analizy zróżnicowania zbioru danych morfometrycznych jest analiza odchyłań standardowych wysokości. Jej szczególne zastosowanie wynika z faktu, że miara ta pokazuje odchylenie od średniej arytmetycznej, czyli o ile różnią się wszystkie pomiary (w tym przypadku wysokości). Inaczej, analiza odchyłań standardowych daje odpowiedź na pytanie, jaki jest rozrzut wartości wokół średniej i dzięki tej właściwości dobrze opisuje zmienność danego zbioru.

Obliczenia odchylenia standardowego przeprowadzono w heksagonach o powierzchni 3 km² (ponad 100 tys. pól dla obszaru kraju; ryc. 7). W każdym z nich znalazło się około 100 punktów siatki 125×125 m. Jest to pierwsza tak szczegółowa analiza wykonana dla obszaru Polski.

Mapa pozwala ustalić prawidłowości regionalnego zróżnicowania odchylenia standardowego wysokości względnych lub bezwzględnych powierzchni terenu. Generalnie, wskaźnik odchy-



Ryc. 7. Mapa odchyłeń standardowych wysokości w Polsce opracowana według siatki punktów 125×125 m w heksagonach o powierzchni 3 km^2

Fig. 7. Map of standard variation of altitude in Poland prepared on a grid of 125×125 m in hexagons of 3 km^2

lenia standardowego w przyjętych polach waha się w granicach 1–273 m. Okazuje się również, że wysokie wartości nie cechują wyłącznie obszarów górskich i wyżynnych. Do regionów o stosunkowo dużym zróżnicowaniu rzeźby zali-

czyć można również pojezierza, zwłaszcza Kaszubskie. Dane wysokościowe w wykorzystanej szczegółowości pozwalają również wyróżnić obszary krawędziowe większych dolin, na przykład Wisły w jej dolnym biegu.

4. Wykorzystanie danych SRTM w geografii społeczno-ekonomicznej i zastosowaniach praktycznych

Wydawałoby się, że dane dotyczące ukształtowania terenu ze względu na swą specyfikę nie są przedmiotem zainteresowania geografów społeczno-ekonomicznych. Jeśli jednak rozszerzyć tematykę badawczą tej subdyscypliny geografii na badanie relacji między człowiekiem a środowiskiem (zgodnie z paradygmatem ekologicznym lub środowiskowym), możliwości wykorzystania danych SRTM-3 wydają się być już znacznie większe. Szczególnie duże możliwości wykorzystania rysują się zwłaszcza w zakresie zastosowań praktycznych, takich jak ocena warunków fizjograficznych lub agrotechnicznych.

Po pierwsze, wiele zastosowań narzuca się w badaniach z zakresu geografii ludności i osadnictwa. Przykładowo można dokonać analizy rozmieszczenia ludności na obszarach charakteryzujących się określonymi cechami ukształtowania terenu, np. spadkami oraz względnymi lub bezwzględnymi różnicami wysokości. Jak się wydaje, informacje takie nie mają wyjątknie waloru czysto poznawczego (czy też „ciekawostkowego”), ale mogą służyć różnorodnym analizom ludnościowym w nawiązaniu do ich relacji ze środowiskiem przyrodniczym, typologii osadnictwa (głównie wiejskiego) lub w badaniach dynamiki przemian rozmieszczenia ludności.

Innym zastosowaniem danych wysokościowych jest ich wykorzystanie w analizach transportowych. W sposób oczywisty trójwymiarowe modele terenu są od dawna wykorzystywane w planowaniu sieci komunikacyjnej (drogowej i kolejowej) w inżynierii drogowej. W tym miejscu można przedstawić zastosowanie danych SRTM-3 w budowie modeli prędkości ruchu (P. Śleszyński 2009). Jedną ze zmiennych wpływających na prędkość przejazdu zdefiniowano poprzez wskaźnik ukształtowania terenu. Poszczególne odcinki dróg przyporządkowano do określonych kategorii ukształtowania (zróżnicowania) terenu, obliczonych na podstawie odchyleń standardowych i wysokości względnych. Można bowiem przypuszczać, że na obszarach bardziej zróżnicowanych pod względem ukształtowania terenu przebieg drogi jest mniej zbliżony do prostoliniowego (zarówno w pionie, jak i poziomie). Zatem faktyczna średnia prędkość przejazdu jest ograniczana, zarówno formalnie (znaki drogowe), jak i z powodu warunków jazdy, przy czym w większym stopniu dotyczy to

dróg lokalnych, a w mniejszym – szlaków transportowych o wysokich parametrach ruchu (autostrady i drogi ekspresowe). Ponadto model wykorzystywał zmienną rozmieszczenia ludności, czyli gęstość zaludnienia i liczbę mieszkańców w zadanym promieniu, które wpływają na zagęszczenie ruchu i tym samym prędkość jazdy.

5. Podsumowanie

Przedstawione przykłady zastosowań wskazują na duże możliwości wykorzystania danych SRTM. Pola zainteresowania to przede wszystkim narzucająca się w oczywisty sposób analiza morfometryczna w geografii fizycznej, ale również pewne potencjalne spektrum zagadnień związanych z badaniami osadnictwa, transportu, czy szerzej gospodarki przestrzennej. W przypadku klasycznych analiz morfometrycznych duże nadzieje należy wiązać z technikami eksploracji danych (*data mining*) i ogólnie analizy skupień (*cluster analysis*), które pozwalają na odkrywanie często trudno zauważalnych, acz bardzo istotnych prawidłowości zróżnicowania morfometrycznego powierzchni ziemi. Może to służyć wyjaśnianiu procesów morfogenetycznych i krajobrazotwórczych. Przykładem takich analiz dla obszaru Polski są ostatnio interesujące studia A. Dmowskiej (2008) oraz T. Giętkowskiego i M. Zachwatowicz (2008), dotyczące klasyfikacji morfometrycznej mezoregionów oraz jednostek geomorfologicznych niższego rzędu na podstawie numerycznych modeli terenu (innych niż SRTM).

Na zakończenie można wskazać zalety i wady oraz inne zagadnienia metodyczne, związane z wykorzystaniem danych SRTM z geograficznego punktu widzenia. Po pierwsze, trzeba podkreślić dużą wartość tych danych w porównaniu z dotychczasowymi bazami dotyczącymi morfometrii terenu. Dane satelitarne są ogólnie dostępne, a ich przetworzenie do konkretnych potrzeb analitycznych jest dość łatwe, efektywne i w podstawowych zastosowaniach nie wymaga żadnych dodatkowych kosztów. Istnieje pokaźna liczba darmowych programów komputerowych (*freeware*), służących do przetwarzania danych wysokościowych z modelu SRTM. Mogą być one następnie importowane do innych systemów GIS-owych, a także do pozostałych aplikacji (struktura pliku z DEM jest prosta, gdyż w podstawowym rozwiązaniu zawiera trzy kolumny z wartościami współrzędnych geograficznych x i y oraz wysokość z).

Podstawowym ograniczeniem wykorzystania danych satelitarnych jest ich szczegółowość, zarówno pozioma, jak i pionowa. Ze względu na ten pierwszy aspekt, dane te nadają się obecnie w zasadzie do skal 1:100 000 – 1:200 000 i mniejszych. Jest to jednak szczegółowość w zupełności wystarczająca do większości analiz regionalnych. Znacznie poważniejszym ograniczeniem jest ich szczegółowość pionowa. Wyklucza ona bardziej wymagające pod tym względem analizy, takie jak np. analiza zagrożeń powodziowych lub wyznaczanie działów wodnych.

Problemem metodycznym w analizie danych SRTM jest wybór pól podstawowych, szczególnie w przypadku obliczeń wskaźników syntetycznych, przedstawionych na przykładach w

prezentowanym artykule. Jest to jednak problem występujący w podobny sposób w innych zagadnieniach, w których następuje konieczność analiz przestrzennych wykorzystujących ciągłość lub nieciągłość danych geograficznych, ich reprezentatywność itd.

Podsumowując, dane SRTM zdecydowanie wygrywają konkurencję w większości typowych zastosowań „geograficznych” w porównaniu z tradycyjnymi, niezwykle żmudnymi sposobami pozyskiwania danych o ukształtowaniu terenu. Z czasem należy też spodziewać się nieodpłatnego udostępniania jeszcze bardziej szczegółowych baz danych dotyczących zróżnicowania powierzchni Ziemi.

Literatura

- Dehn M., Gärtner H., Dikau R., 2001, *Principles of semantic modeling of landform structures*. „Computers and Geosciences” Vol. 27, no. 8, s. 1005–1010.
- Dębowska S., 1973, *Wysokości względne*. Skala 1:2 000 000. W: *Narodowy Atlas Polski*. Warszawa: Instytut Geografii PAN, arkusz 17.
- Dmowska A., 2008, *Klasyfikacja Pojezierzy Południowo-bałtyckich i Pojezierzy Wschodniobałtyckich w oparciu o kryterium morfometryczne*. „Landform Analysis” Vol. 9, s. 345–347.
- El-Sheimy N., Valeo C., Habib A. (Eds.), 2005, *Digital terrain modeling: acquisition, manipulation and applications*. „Artech House Remote Sensing Library” Boston: Artech House Publishers.
- Evans I.S., 1972, *General geomorphometry, derivatives of altitude, and descriptive statistics*. W: R.J. Chorley (Ed.), *Spatial Analysis in Geomorphology*. London: Methuen & Co., s. 17–90.
- 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” Vol. 65, nos. 3–4, s. 301–319.
- Gauss K.F., 1827, *Disquisitiones generales circa area superficies curvas*. „Göttingische Gelehrte Anzeigen” Vol. 177, s. 1761–1768.
- Giętkowski T., Zachwatowicz M., 2008, *Klasyfikacja rzeźby w oparciu o pochodne Numerycznego Modelu Wysokości i jej potencjalne zastosowania w badaniach krajobrazowych*. „Problemy Ekologii Krajobrazu” T. 21, s. 111–124.
- Hengl T., Reuter H.I. (Eds.), 2008, *Geomorphometry. Concepts, software, applications*. „Developments in Soil Science” 33, Amsterdam: Elsevier.
- Jarvis A., Reuter H.I., Nelson A., Guevara E., 2006, *Hole-filled seamless SRTM data V3, International Centre for Tropical Agriculture (CIAT)*. Dostępne na stronie internetowej <http://srtm.csi.cgiar.org/>.
- Jędrzychowski I. (red.), 2008, *Hipsometryczny atlas Krakowa*. Kraków: Urząd Miasta Krakowa.
- Karwel A., Ewiak I., 2006a, *Ocena dokładności modelu SRTM na obszarze Polski*. „Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji” Vol. 16, s. 289–296.
- Karwel A., Ewiak I., 2006b, *Ocena przydatności danych wysokościowych z misji SRTM do generowania NMT na obszarze Polski*. „Prace Instytutu Geodezji i Kartografii” T. 52, z. 110, s. 75–87.
- Komornicki T., Śleszyński P., Siłka P., Stępnia M., 2008, *Wariantowa analiza dostępności w transporcie lądowym*. W: K. Saganowski, M. Zagrzejska-Fiedorowicz, P. Żuber (Red.), *Ekspertyzy do Koncepcji Przestrzennego Zagospodarowania Kraju 2008–2033. Tom II*, Warszawa: Ministerstwo Rozwoju Regionalnego, s. 133–334.
- Kozieł Z., 1990, *Zmiany struktury kartograficznego obrazu energii rzeźby wywołane różnymi układami i nałożeniami sieci pól odniesienia*. „Polski Przegl. Kartogr.” T. 22, nr 3, s. 57–66.
- Kurczyński Z., 2000, *Nowa era geoinformatyki. Rada-rowa misja topograficzna promu kosmicznego Endeavour*. „Geodeta” T. 63, nr 8. Dostępne również na stronie internetowej: <http://www.atomnet.pl/~geodeta/2000/63text1.htm>
- Kurczyński Z., Gotlib D., Olszewski R., Kaczyński R.M., Butowt J., 2007, *Numeryczny model terenu – podstawy, budowa i wykorzystanie*. W: M. Kunz (Red.), *Systemy Informacji Geograficznej w praktyce (studium zastosowań)*. Toruń: Wydawn. UMK, s. 59–109.
- Kurczyński Z., Preuss Z., 2004, *Podstawy fotogrametrii*. Warszawa: Oficyna Wydawnicza PW. Wyd. IV.
- 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, no. 4, s. 285–307.
- Lach J., Tabor J., Żychowski J., 1980, *Współczynnik rozwinięcia powierzchni jako wskaźnik syntetycznego przedstawienia rzeźby*. „Prace Geograficz-

- ne" T. 8, Kraków: Wyższa Szkoła Pedagogiczna, s. 159–166.
- Li Z., Zhu Q., Gold Ch. (Eds.), 2004, *Digital terrain modelling. Principles and methodology*. Boca Raton (Florida, US): CRC Press.
- Ławniczak R., 2001, *Próba zastosowania GIS przy określaniu morfometrycznych cech rzeźby terenu*. W: L. Kaczmarek, I. Wyczałek (Red.), *Geodezyjne i kartograficzne aspekty systemów informacji przestrzennej*. Poznań-Jeziory: SGP Oddział Wielkopolski w Poznaniu, Politechnika Poznańska. Zakład Geodezji, Uniwersytet im. A. Mickiewicza w Poznaniu. Stacja Ekologiczna w Jeziorach, s. 73–83.
- Ławniczak R., 2003, *Próba zastosowania kartograficznej metody badań do określania morfometrycznych cech rzeźby terenu*. „Polski Przegl. Kartogr.” T. 35, nr 3, s. 191–198.
- Ławniczak R., 2008, *Morfometryczne cechy rzeźby a geneza wybranych zespołów form Polski północno-zachodniej*. „Seria Geografia” Nr 40, Poznań: Uniwersytet im. A. Mickiewicza.
- Nita J., Małolepszy Z., Chybiarz R., 2007, *Zastosowanie numerycznego modelu terenu do wizualizacji rzeźby terenu i interpretacji budowy geologicznej*. „Przegl. Geolog.” T. 55, nr 6, s. 511–520.
- Oldak A., 1992, *Możliwości oceny widzialności krajobrazu przy zastosowaniu Geograficznych Systemów Informacyjnych*. W: *Metody oceny środowiska przyrodniczego*. „Gea” Nr 2, Warszawa: Wydawn. WGISR UW, s. 37–39.
- Pike R.J., 2000, *Geomorphometry: diversity in quantitative surface analysis*. „Progress of Physical Geography” Vol. 24, no. 1, s. 1–20.
- Pike R.J., 2002, *A bibliography of terrain modeling (geomorphometry). The quantitative representation of topography-supplement 4.0*. Open-File Report 02–465, U.S. Geological Survey. Dostępne również na stronie internetowej: <http://geopubs.wr.usgs.gov/open-file/of02-465/>
- Placek A., 2008, *Zastosowanie numerycznego modelu terenu w geomorfologii strukturalnej na przykładach z obszaru Sudetów*. „Landform Analysis” Vol. 9, s. 364–368.
- Richling A. (Red.), 2007, *Geograficzne badania środowiska przyrodniczego*. Warszawa: Wydawn. Naukowe PWN.
- Rodriguez E., Morris C.S., Belz J.E., Chapin E.C., Martin J.M., Daffer W., Hensley S., 2005, *An assessment of the SRTM topographic products. Technical Report JPL D–31639*. Pasadena: Jet Propulsion Laboratory. Dostępne również na stronie internetowej http://www2.jpl.nasa.gov/srtm/SRTM_D31639.pdf
- Shary P.A., Sharaya L.S., Mitusov A.V., 2002, *Fundamental quantitative methods of land surface analysis*. „Geoderma” Vol. 107, nr 1–2, s. 1–32.
- Siwiek J., 2008, *Wpływ generalizacji na obraz rzeźby terenu*. W: W. Żyszkowska, W. Spallek (red.), *Analiza przestrzenne w kartografii*. „Główne problemy współczesnej kartografii” 2008, Wrocław: Uniwersytet Wrocławski, Instytut Geografii i Rozwoju Regionalnego, Zakład Kartografii, s. 63–77.
- Sobczyk A., 2008, *Rzeźba Rudaw Janowickich i Kotliny Kamiennogórskiej w świetle danych z cyfrowego modelu terenu i badań terenowych*. „Landform Analysis” Vol. 9, s. 377–380.
- Stachura K., 2006, *Wykorzystanie teledetekcji satelitarnej w ocenie bioróżnorodności lasu na poziomie regionalnym: wstępne rezultaty studium pilotażowego projektu ocena wartości biologicznej lasów w Polsce*. „Studia i Materiały Centrum Edukacji Przyrodniczo Leśnej” R. 8, z. 4 (14), s. 231–241.
- Staszewski J., Uhorczak F., 1966, *Geografia fizyczna w liczbach*. Wyd. II rozszerzone. Warszawa: PWN.
- Steinhaus S., 1947a, *O wskaźniku stromości przeciętnej*. „Przegl. Geogr.” T. 21, z. 1–2, s. 107–108.
- Steinhaus S., 1947b, *O wskaźniku ukształcenia pionowego*. „Przegl. Geogr.” T. 21, z. 1–2, s. 113–115.
- Szaflarski J., 1965, *Zarys kartografii*. Wyd. II uzup. Warszawa: PPWK.
- Szuber M., 2005, *Geostatystyczne metody rekonstrukcji rzeźby podzwartorzędowej na przykładzie Wyżyny Woźnicko-Wieluńskiej*. W: A. Kotarba, K. Krzemień, J. Świąchowiec (red.), *Współczesna ewolucja rzeźby Polski. VII Zjazd Geomorfologów Polskich*. Kraków: Instytut Geografii i Gospodarki Przestrzennej UJ, s. 439–442.
- Szumowski A., 1967 *Rozwój głównych kierunków morfometrii*. „Czasopismo Geograficzne” T. 38, z. 1, s. 37–55.
- Śleszyński P., 1998, *Mapa zasięgu widoku okolic Pińczowa*. „Polski Przegl. Kartogr.” T. 30, nr 3, s. 173–184.
- Śleszyński P., 2009, *Zaludnienie i zróżnicowanie rzeźby terenu w modelowaniu prędkości ruchu w transporcie drogowym*. „Przegl. Komunik.” T. 64, z. 5, s. 26–32.
- Wężyk P., Świąder A., 2004, *Wykorzystanie numerycznych modeli terenu w aplikacjach z zakresu leśnictwa i ochrony przyrody*. „Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji” T. 14, s. 515–526.
- Wojewoda J., 2007, *Neotectonic aspect of the intrasudetic shear zone*. „Acta Geodynamica et Geomaterialia” Vol. 4, no. 4 (148), s. 31–41.
- Zhou Q., Less B. (eds.), 2007, *Advances in digital terrain analysis*. „Lecture Notes in Geoinformation and Cartography” Berlin: Springer.
- Zuchiewicz W., 1999, *Przegląd metod morfometrycznych w ocenie tendencji neotektonicznych Karpat polskich*. „Przegl. Geolog.” T. 47, z. 9, s. 851–854.
- Żyszkowska W., 1978, *Zastosowanie numerycznych modeli terenu do kartometrycznej analizy rzeźby*. „Acta Universitatis Wratislaviensis. Prace Instytutu Geografii” Seria. A, T. 340.

Recenzował dr Andrzej Macioch

Use of SRTM-3 georadar data in the analysis of differentiation of the Poland's surface relief

Summary

Keywords: morphometry, geomorphometry, land relief, SRTM, Poland

The article discusses the results of research on the differentiation of land relief in Poland based on altitude data from SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*), which is released in the resolution of $3 \times 3''$ (for Poland's latitude it is $60\text{--}65 \times 90$ m). Calculations were based on the data in lower resolution done on the grid of 125×125 m.

The article presents classic morphometric analyses, a hypsometric map (fig. 2) and maps of differences of relative altitudes (fig. 4), slope angles (fig. 5) and slope directions. Percentage of area in high a.s.l. altitudes and slopes by region were also calculated (tabl. 1 and 2) The author suggests a new method of presentation of differentiation of surface relief through the analysis of variation of standard relative altitude in regular geometrical figures (fig. 7). Maps of Poland in 1:5,000,000 prepared for the article were generalized using a network of hexagons of 0,14 and 3 km² each (respectively 2,300,000 and 104,200 cells for the area of Poland), within which particular variables were averaged.

The research showed high usefulness of SRTM-3 data, particularly in scales below 1:100,000. This data is very detailed and can be applied for various morphometric analyses, which are currently revived because of this, particularly in geomorphology, hydrology and pedology. Application of computer techniques radically reduces the time needed for tedious calculations. In the case of classic morphometric analyses high hopes are raised by data mining techniques and cluster analysis in general, which facilitate discovery of often difficult to perceive, nevertheless crucial regularities in the morphometric differentiation of the Earth's surface. This can help to explain morphogenetic and landscape-forming processes.

The last section of the article discusses the possibilities of application of detailed altitude data beyond the traditional range of Earth sciences (geology, physical geography), i.e. in socio-economic study and spatial economy. For more advanced application it is however necessary to eliminate the influence of some land cover forms, forests in particular. It is particularly important in lowland and flatland areas.

Translated by M. Horodyski

