

Geomorfometria granitowej części Karkonoszy

Geomorphometry of granitic part of Karkonosze Mts.

Marek Kasprzak¹, Andrzej Traczyk²

¹Uniwersytet Wrocławski, Instytut Geografii i Rozwoju Regionalnego, plac Uniwersytecki 1, 50-137 Wrocław; marek.kasprzak@uni.wroc.pl

²Uniwersytet Wrocławski, Instytut Geografii i Rozwoju Regionalnego, plac Uniwersytecki 1, 50-137 Wrocław; andrzej.traczyk@uni.wroc.pl

Zarys treści: W pracy dokonano analizy morfometrycznej rzeźby granitowej części Karkonoszy. W obszarze zainteresowania znalazły się główne jednostki geomorfologiczne masywu: Grzbiet Główny, Karkonoski Padół Śródgórski i Pogórze Karkonoszy. Analizę prowadzoną przy użyciu programów GIS (GRASS GIS, MicroDEM, SAGA GIS, ILWIS) oparto na cyfrowym modelu wysokościowym (DEM). Wybrano najpopularniejsze wtórne parametry morfometryczne powstałe w efekcie przekształcenia DEM oraz algorytmy klasyfikujące formy terenu: topographic grain (lineamenty rzeźby), curvature (krzywizna), openness (otwarcie), topographic wetness Index TWI (topograficzny wskaźnik wilgotności), topographic position index TPI (topograficzny indeks pozycji), generic landforms.

Wyniki przeprowadzonych analiz pozwalają na wydzielenie na badanym obszarze terenów o odmiennych właściwościach, co do tej pory nie było w literaturze przedmiotu odnotowane. Można stwierdzić, że w literaturze geomorfologicznej regionu nie podkreślano dominacji prostego kształtu stoków i przeceniano w udziale ogólnej powierzchni masywu zrównania stokowe. Obraz Padołu i Pogórza na wynikowych mapach morfologicznych ukazał zmieniający się z zachodu w kierunku wschodnim układ obniżień i kulminacji. W strefie Pogórza doskonale zaznaczył się kratowy układ obniżień ograniczających różnoskalowe elewacje morfologiczne.

Spośród zastosowanych w opracowaniu parametrów najpełniejszy obraz geomorfologii Karkonoszy dała procedura TPI. Wynik analizy z zastosowaniem TWI potwierdza wcześniejsze tezy wskazujące na koncentrację wilgoci w strefie dolnych załomów stoku. Tym samym jest to pośredni dowód na słuszność poglądów odnoszących się do zróżnicowania stref głębokiego wietrzenia chemicznego masywu.

Słowa kluczowe: geomorfometria, GIS, masyw granitowy, Karkonosze, Sudety

Abstract: The paper presents results of morphometric analysis of granitic part of the Karkonosze Mts. Main geomorphological units of Karkonosze Mts. – Main Ridge, Karkonosze Intramontane Trough and Karkonosze Foothills – were in the study area. Analysis was carried out using GIS software (GRASS GIS, MicroDEM, Saga GIS, ILWIS) and digital elevation model (DEM). The most popular secondary geomorphometrical parameters were chosen and algorithms classifying terrain forms: topographic grain, curvature, openness, topographic wetness Index TWI, topographic position index TPI, generic landforms.

Results of analysis allow for identification of unit/zones in studied area with different properties, as for this time it was not recorded in a literature of a subject. It is possible to state that until now in geomorphological literature of the region a dominance of straight shape of slopes was not underlined and in the participation of the general area of the massif planar surfaces were overrated. An image of Karkonosze Intramontane Trough and Karkonosze Foothills on final morphological maps showed an arrangement changing from the west to the east of linear depressions and elevations/peaks. In the zone of Karkonosze Foothills rectangular shape of valleys was indicated.

Selected from among of parameters applied in the study TPI procedure gave the fullest information of the Karkonosze Mts. morphology. Result of the analysis with TWI application was confirming earlier theses pointing at a concentration of wetness in a zone of bottom edge of slopes. It is indirect evidence for diversifying zones of deep chemical weathering in granitic massif.

Key words: Geomorphometry, GIS, granite massif, Karkonosze Mts., Sudetes

Wprowadzenie

W ostatnich latach rozwijany jest w dziedzinie geomorfologii nowy kierunek badań określany jako geomorfometria (ang. *geomorphometry*), której podstawy metodyczne sformułowali Pike, Evans i Hengl (2008). Według wymienionych autorów geomorfometria to ilościowa analiza powierzchni terenu wykorzystująca cyfrowe modele wysokościowe, prowadzona za pomocą aplikacji komputerowych, a więc korzystająca z narzędzi matematycznych i informatycznych. W rzeczywistości nie jest to zupełnie nowe podejście badawcze. Już u zarania epoki komputerowej ukazał się podręcznik Doornkamp i Kinga (1971) omawiający w różnych aspektach możliwości zastosowania technik matematycznych i statycznych dla określania cech morfometrycznych wybranych elementów rzeźby oraz większych jednostek krajobrazowych (zlewni, dorzeczy).

W Polsce ten kierunek badań do niedawna nie był w istotny sposób rozwijany, głównie ze względu na ograniczenia w dostępie do wiarygodnych źródeł informacji o terenie. Pozyskanie danych numerycznych wiązało się zazwyczaj z wykonywaniem żmudnych i pracochłonnych pomiarów kartometrycznych na mapach topograficznych. Obecnie, gdy w światowych zasobach internetowych dostępne są cyfrowe modele wysokościowe, często o rozdzielczościach rzędu dziesiątek metrów (np. SRTM-3, ASTER GDEM) oraz wielospektralne obrazy satelitarne (np. LANDSAT 7), problem dostępności danych przestaje być istotny.

Zastosowanie cyfrowych modeli wysokościowych (dalej w skrócie DEM) w systemach GIS stwarza nowe możliwości analityczno-badawcze, które na zasadzie interdyscyplinarnej łączą w sobie wiedzę z zakresu matematyki, nauk o Ziemi oraz informatyki (Pike 2002). Wykorzystanie tych możliwości nie ogranicza się jedynie do geomorfologii i geografii. Często są one stosowane w gleboznawstwie (zróznicowanie siedlisk, modelowanie zjawisk erozji), hydrologii (modelowanie zjawisk hydrologicznych) czy w celach militarnych. Dzięki szerokiemu zakresowi zastosowań geomorfometria, zdaniem Pike'a i in. (2008), przestaje być już jedynie zbiorem technik numerycznych, a staje się oddzielną dyscypliną naukową.

Podstawowymi pojęciami w geomorfometrii są parametr (parametr pierwotny, np. nachylenie, ekspozycja; parametr wtórny, np. topograficzny wskaźnik uwilgotnienia) oraz obiekt (cyrk lodowcowy, stożek napływowy itp.). Istota tej dziedziny nauki polega zatem na określaniu w oparciu o cyfrowe modele wysokościowe parametrów charakteryzujących obiekty geomorfologiczne oraz wydzielaniu tych obiektów z otoczenia za pomocą różnych technik matematyczno-statystycznych.

W stosunku do tradycyjnego podejścia analitycznego stosowanego w geomorfologii, a ograniczającego się często do arbitralnego wyznaczenia granic obiektów, np. w trakcie konstrukcji map geomorfologicznych i/oraz wykonywania pomiarów metodami kartometrycznymi, użyte algorytmy pozwalają na ograniczenie pierwiastka subiektywizmu w ocenie ukształtowania powierzchni Ziemi.

Algorytmy i procedury w geomorfometrii znajdują zastosowanie głównie na obszarach o urozmaiconym reliefie, a szczególnie w górach średnich generujących mniej problemów analitycznych od terenów nizinnych (niepewne działy wodne, obszary bezodpływowe itd.) i wysokogórskich (pionowe ściany skalne, przepuszczalne pokrywy rumowiskowe itd.). Dlatego też do modelowych badań geomorfometrycznych dobrze nadają się Karkonosze. Masyw ten jest obiektem zainteresowania geomorfologów od ponad 100 lat. Tylko w okresie ostatnich 50 lat ukazało się około 60 oryginalnych polskich opracowań dotyczących morfologii tego obszaru (katalog na stronach internetowych: www.kgg.geom.uni.wroc.pl). Spośród nich na szczególną uwagę zasługują artykuły i rozdziały publikacji monograficznych stanowiące syntezę geomorfologii Karkonoszy: Czerwińskiego (1985) i Migonia (2005).

Zamiarem autorów tego artykułu jest konfrontacja kompletnego obrazu rzeźby granitowej części Karkonoszy wyłaniającego się z przeglądu wspomnianych wyżej prac z wynikami analizy DEM przy użyciu wybranych technik geomorfometrycznych. Głównym celem tego zabiegu ma być wskazanie, na ile techniki te wzbogacają tradycyjne obserwacje geomorfologiczne i jakie elementy rzeźby Karkonoszy były do tej pory traktowane drugorzędnie, mimo ich znaczącego udziału w powierzchni terenu. W końcowym efekcie pozwoliło to na podanie pierwszej kompleksowej charakterystyki morfometrycznej granitowej części tych gór. Odniesiono ją również do parametrów uzyskanych dla całego obszaru Karkonoszy, a więc części granitowej i metamorficznej.

Metody badań

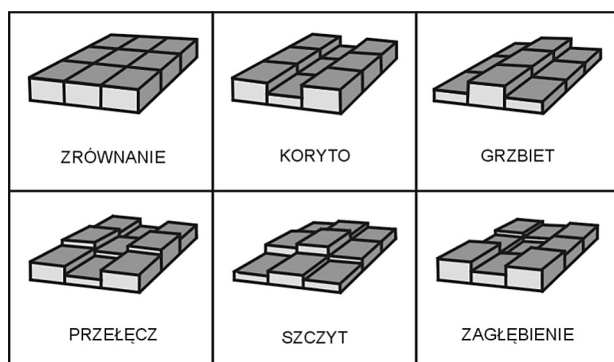
Morfometryczną analizę rzeźby Karkonoszy oparto na DEM, jaki wykonany został w Instytucie Geografii i Rozwoju Regionalnego na podstawie digitalizacji poziomic z map topograficznych w skali 1:25 000 (Migoń i in. 2009). Digitalizację prowadzono metodą ręczną (*on screen*), uzupełniając dane źródłowe o wysokości punktów charakterystycznych oraz linie szkieletowe. Materiałem wyjściowym do obliczeń był model o regularnym kształcie komórek 30×30 m. Został on zweryfikowany pod kątem występowania błędów interpolacyjnych w obrębie den dolinnych. Błędy zostały wyeliminowane w programie MicroDem z wykorzystaniem funkcji *fill DEM*

holes (Guth 2009). Ten darmowy program został wykorzystany do dalszych analiz wraz z oprogramowaniem GRASS GIS, SAGA GIS oraz ILWIS. Parametryzację rzeźby z wykorzystaniem wyżej wymienionych programów przeprowadzono odrębnie dla granitowej części Karkonoszy (obszar testowy) oraz dla całego masywu.

Wybrano najpopularniejsze parametry wtórne, tj. powstałe w efekcie przekształcenia DEM, służące analizie form geomorfologicznych, oraz algorytmy do automatycznej klasyfikacji form. Niektóre z wybranych parametrów lub algorytmów dotyczą tych samych logicznych procedur i zastosowano je w celu porównania otrzymanych wyników, szczególnie gdy użyty program nie pozwalał na manipulację algorytmem obliczeniowym i rezultat nie był zależny od operatora.

Zastosowane algorytmy umożliwiają m.in. rozpoznanie zagłębień (*pits*), szczytów (*peaks*), koryt (*channels*) grzbietów (*ridges*), przełęczy (*passes*) i zrównań (*plains*) (Wood 1996). Schemat identyfikacji tego typu form w modelu rastrowym przedstawiono na rycinie 1. Automatyczna klasyfikacja form możliwa jest w oparciu o pomiary krzywizny powierzchni planarnej i wertykalnej oraz rozpoznanie lokalnego kształtu powierzchni terenu według przedstawionego przez Dikaua (1989) podziału na 9 kombinacji lub opublikowanych przez Shary'ego i in. (2002) 12 kombinacji kształtów stoku. Krótkie omówienie zastosowanych algorytmów oraz parametrów znajduje się poniżej. Stosowane będą ich oryginalne nazwy, gdyż nie wszystkie mają swój powszechnie znany odpowiednik w języku polskim.

Topographic grain (lineamenty rzeźby). Algorytm służący wykreślaniu w programie MICRODEM mapy konturowej przedstawiającej główne lineamenty rzeźby (Guth 2003). W odróżnieniu od linii szkieletowych uzyskany obraz linii prostych oddaje dominujący w reliefie kierunek grzbietów lub dolin. Długość uzyskanych wektorów (linii) wskazuje, w jakim stopniu ich orientacja potwierdza kieru-



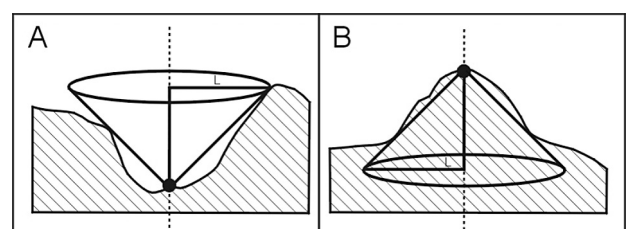
Ryc. 1. Schemat wydzielenia form terenu na podstawie różnic atrybutu wysokościowego sąsiadujących komórek DEM

Fig. 1. Outline of terrain forms allocating on the basis of differences of DEM cells attribute

nek dominującego w badanym regionie lineamentu. Na obszarach płaskich, gdzie brakuje wyróżnialnych lineamentów rzeźby, wektory nie są wykreślane. Ostateczny efekt zależy od ustalenia dystansu między punktami, jakie mają być przeliczane, powierzchni, współczynnika skali dla długości wektorów i wskazania udziału powierzchni płaskich, które mają zostać uwzględnione w wyniku końcowym (Guth 2009).

Curvature (krzywizna). Krzywizna to parametr definiowany jako druga pochodna powierzchni, czyli linia styczna do krzywej reprezentującej nachylenie terenu. Parametr ten umożliwia analizę zmiany tempa nachylenia w określonych płaszczyznach: krzywizna profilowa (*vertical curvature*) opisuje zmianę nachylenia w płaszczyźnie pionowej, krzywizna planarna (*horizontal curvature*) opisuje zmianę nachylenia w płaszczyźnie poziomej. W analizach hydrologicznych pierwszy z parametrów odpowiada zmianom szybkości spływu, drugi determinuje konwergencję lub dywergencję linii spływu (Shary i in. 2002).

Openness (otwarcie). Parametr ten wyraża 8-krotny, skierowany w podstawowe kierunki świata, kątowy pomiar relacji między ukształtowaniem powierzchni a określonym poziomym dystansem (Yokoyama i in. 2002). Można go także definiować jako maksymalny lub minimalny kąt widoczności ograniczanej topografią terenu nad zadanym obszarem (Guth 2003). Ten stosunkowo nowy sposób analizy rzeźby jest silnie powiązany z parametrami *minimal curvature* i *maximal curvature* (minimalną i maksymalną krzywizną). Ma dwie perspektywy uzależnione od pomiaru azymutu kąta względem zenitu i nadiru (ryc. 2). Wartości openness positive odnoszą się do pomiarów powyżej zadanej powierzchni i mają dodatnie wartości dla form wypukłych, podczas gdy openness negative opisują ten atrybut poniżej powierzchni i są wysokie dla form wklęsłych. Wartości współczynnika zazwyczaj przedstawiane są na mapach w odcieniach szarości. W takim ujęciu powstałe mapy *upward openness (positive)* prezentują linie grzbietowe na białą, a linie dolinne na czarno. Odwzorowanie kolorystyczne tych elementów na mapach *downward openness (negative)* jest odwrotne.



Ryc. 2. Schemat obliczania parametru openness positive (A) i openness negative (B) dla każdego punktu DEM (czarna kropka) przy zadanym parametrze długości L

Fig. 2. Outline of calculating a parameter openness positive (A) and openness negative (B) for every cell of DEM (black dot) at a set parameter of the length L

Topographic Wetness Index TWI (topograficzny wskaźnik wilgotności). Koncepcję topograficznego wskaźnika wilgotności podali Beven i Kirkby (1979). Parametr ten wskazuje zależność między wielkością powierzchni biorącej udział w spływie powierzchniowym (fragmencie zlewni) a wartością jej nachylenia według podstawowego równania:

$$TWI = \ln(\alpha / \tan \beta), \text{ gdzie}$$

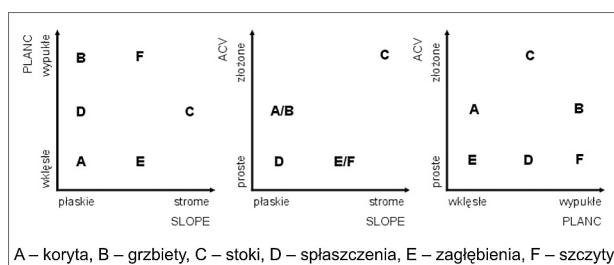
α – właściwa lokalna powierzchnia zlewni (w odniesieniu do długości warstwy), β – lokalny spadek danego punktu.

TWI ukazuje w założeniu przestrzenny rozkład wilgotności gleby i stopień nasycenia wilgocią powierzchni ziemi i jest jednym z podstawowych elementów modelowania hydrologicznego w ujęciu stoku i całej zlewni (Sørensen i in. 2005). Jedną z modyfikacji TWI jest parametr *SAGA Wetness Index* zastosowany w programie SAGA GIS. Różnica między nimi polega na odmiennym sposobie obliczania powierzchni zlewni. W rezultacie rastrom DEM reprezentującym dna dolin w małym odstępnie od koryt przypisuje się większą wartość uwilgotnienia niż w tradycyjnym ujęciu TWI (Boehner i in. 2002).

Topographic Position Index TPI (topograficzny indeks pozycji). W ogólnym ujęciu procedura obliczania topograficznego wskaźnika pozycji polega na porównaniu dwóch modeli rastrowych: oryginalnego DEM i modelu uśrednionych wysokości (Weiss 2001). Wartości w tym drugim modelu wyliczane są jako średnia wartość wysokości w konkretnym otoczeniu – sąsiedztwie o z góry zadany promieniu (np. 500 m, 2000 m itp.). Tak wykonana nowa warstwa – model rastrowy – informuje o tym, o ile w danym punkcie wysokość powierzchni obrazującej realny relief terenu odbiega od powierzchni uśrednionej. Innymi słowy, jest to wskaźnik określający względne położenie morfologiczne. Wartości dodatnie wskazują, że mamy do czynienia z elementem elewacyjnym (kulminacja, grzbiety), wartości ujemne wskaźniki TPI oznaczają natomiast miejsca depresji (obniżenia dolinne, zagłębienia). Wartości pośrednie (oscylujące wokół zera) TPI odpowiadają po-

wierzchniom stokowym, a zbliżone do zera spłaszczeniom. Należy przy tym wyraźnie podkreślić, że uzyskany obraz rzeźby zależy w dużym stopniu od przyjętej na etapie obliczeń wielkości otoczenia (sąsiedztwa). Zagadnienie to szczegółowo objaśnione zostało w publikacjach Weissa (2001) oraz Jennessa (2006). Wskaźnik TPI stanowi podstawę automatycznej klasyfikacji form rzeźby i generowania map krajobrazowych ukazujących podstawowe elementy rzeźby terenu (grzbiety, spłaszczenia, stoki, dna dolin itp.). Podstawy tej klasyfikacji zaproponował Weiss (2001). Autor ten wyróżnił sześć klas form rzeźby poprzez reklasyfikację standaryzowanych wartości TPI. Nieco inne podejście do problemu analizy modelu TPI prezentują Dickson i Beier (2007), którzy wyróżniają tylko cztery klasy obiektów morfologicznych: dna dolin, grzbiety, stoki słabo i silnie nachylone. W przyjętej procedurze reklasyfikacji autorzy ci stosują jako dodatkowe kryterium nachylenie stoków (dwie klasy: stoki łagodne o nachyleniu poniżej 6° oraz stoki strome powyżej 6°).

Generic landforms. *Generic landforms* jest to algorytm służący automatycznemu wydzieleniu podstawowych form rzeźby, zaimplementowany jako dodatkowy skrypt w programie ILWIS. Klasyfikacja ta opiera się na kompilacji trzech parametrów: SLOPE (nachylenie), PLANC (*plan curvature* – krzywizna planarna) i SCI (*shape complexity index* – współczynnik kształtu) lub ACV (*anisotropic coefficient of variation*), wyliczonych bezpośrednio z DEM. Jej założenia przedstawiono na rycinie 3 (Hengl i in. 2003). Klasyfikacja ta pozwala na wyróżnienie 5 lub 6 (zależnie od zastosowanego skryptu) podstawowych form geomorfologicznych reprezentujących główne cechy rzeźby terenu. Zawierają się one w arbitralnie wydziałonych klasach, które dla obszarów o odmiennej morfologii mogą być modyfikowane: koryta rzeczne lub dna dolin wykreślane są przy minimalnych wartościach spadków, minimalnej krzywiznie planarnej i średnich wartościach współczynnika kształtu; grzbiety i kulminacje przy minimalnych wartościach spadku, maksymalnej krzywiznie i minimalnej wartości współczynnika kształtu; stoki przy maksymalnej wartości spadku, średniej wartości krzywizny i maksymalnej wartości współczynnika kształtu; zrównania i terasy przy minimalnym spadku, średnich wartościach krzywizny i minimalnych wartościach współczynnika kształtu; zagłębienia przy średnim nachyleniu i minimalnych wartościach krzywizny i współczynnika kształtu.

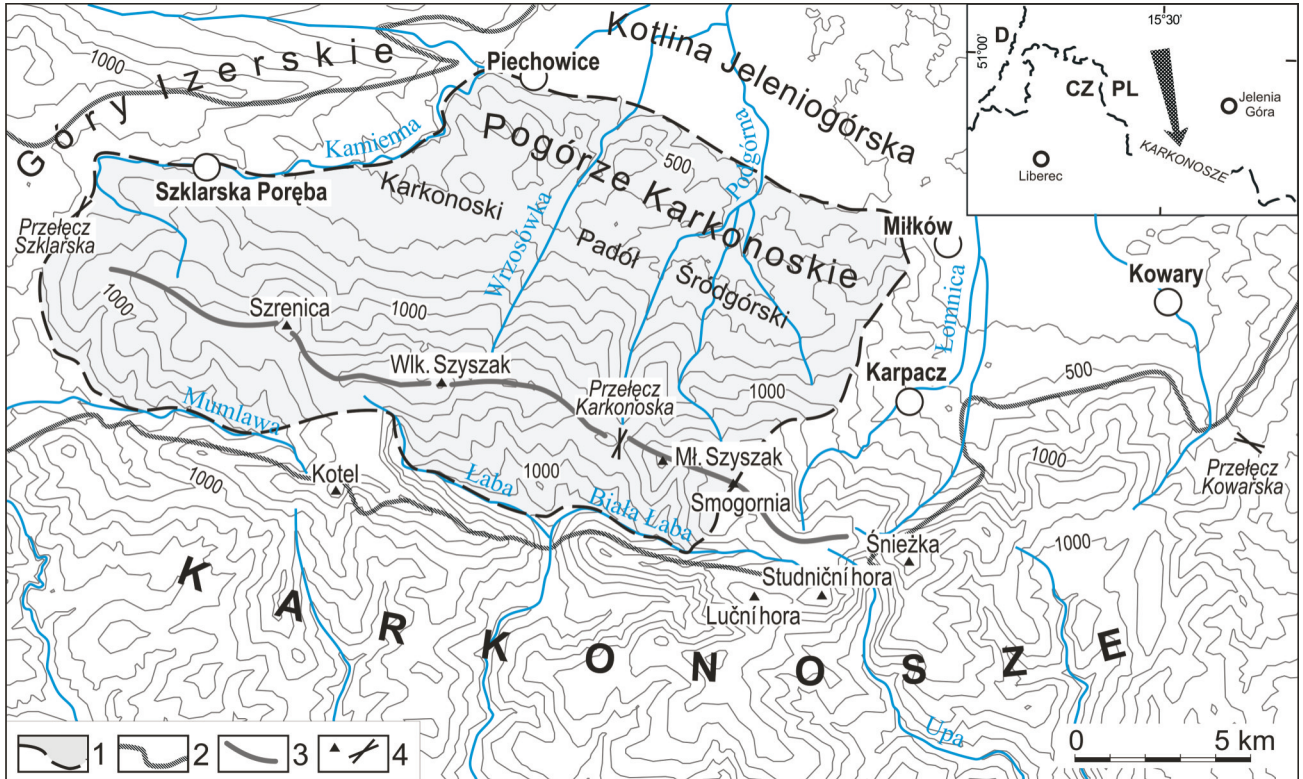


Ryc. 3. Schemat klasyfikacji form rzeźby w module *generic landform class* programu ILWIS. Na podstawie: Hengl i in. (2003)

Fig. 3. Outline of terrain forms ranking in the module *generic landform class* of ILWIS program. On the base: Hengl et al. (2003)

Obszar badań

Obszar objęty analizą obejmuje granitową część Karkonoszy o powierzchni 174 km² (ryc. 4). Granicę południową tego terenu wyznaczają równoleżnikowo rozciągnięte doliny Mumlawy, Łaby i Białej Łaby.



Ryc. 4. Obszar opracowania (1). Objaśnienia: 1 – granica obszaru testowego (granitowa część Karkonoszy), 2 – granice granitu karkonoskiego, 3 – Grzbiet Główny Karkonoszy, 4 – wybrane kulminacje, przełęcze

Fig. 4. Study area (1). Explanations: 1 – border of test area (granite Karkonosze Mts. part), 2 – borders of Karkonosze Mts. granite, 3 – Main Karkonosze Mts. Ridge, 4 – chosen peaks, passes

Granica północna przebiega wzdłuż doliny Kamiennej i progu morfologicznego Pogórza Karkonoskiego, który oddziela masyw Karkonoszy od Kotliny Jeleniogórskiej. Zachodnią i wschodnią granicę poprowadzono arbitralnie obniżeniami mniejszych dolin oraz wzdłuż skłonu oddzielającego wschodnią część Pogórza Karkonoskiego od górnej części obniżenia Mysłakowic i doliny Łomnicy. Tak zarysowany obszar nie obejmuje marginalnych części masywu granitowego Karkonoszy, głównie po jego stronie południowej, gdzie granica batolitu karkonoskiego biegnie skośnie do stoków i grzbietów. Rezygnacja z tych fragmentów pozwoliła uniknąć przecinania głównych form rzeźby terenu.

Obszar zainteresowania obejmuje trzy główne jednostki geomorfologiczne Karkonoszy (Jahn 1953), od południa ku północy są to: Grzbiet Główny, Karkonoski Padół Śródgórski i Pogórze Karkonoszy. Grzbiet Główny zwany również Śląskim, ciągnie się od Przełęczy Szklarskiej (886 m n.p.m.) na zachodzie po przełęcz Pod Śnieżką (1394 m n.p.m.) na wschodzie. Wierzchowina tego grzbietu ma charakter falistej powierzchni zrównania o wysokości od 1200 m na zachodzie do ponad 1400 m na wschodzie. Ponad tę powierzchnię wznoszą się izolowane kopulaste ostańce denudacyjne o wysokościach względnych od 20 do ponad 70 m. Grzbiet Główny cechuje się wyraźną asymetrią. Stoki opadające w

kierunku północnym są długie, strome w górnej części (powyżej 20°) i łagodne w dolnej. Natomiast stoki południowe są krótsze, w górnej części stosunkowo łagodne, u podstawy natomiast strome (25–30°).

Karkonoski Padół Śródgórski to przylegający od północy do podnóża Grzbietu Głównego równoleżnikowy pas kotlinowatych obniżen i spłaszczeń (Jahn 1953). Padół jest pośrednim stopniem morfologicznym między Grzbietem Głównym a Pogorzem Karkonoskim, które opada w kierunku dna Kotliny Jeleniogórskiej stromym, 100–150 m wysokości progiem morfologicznym, założonym na uskoku tektonicznym Miłkowa–Piechowic (Mierzejewski 1986, Sroka 2001).

Rzeźba Karkonoszy w świetle literatury

Wyróżnione w poprzednim rozdziale jednostki geomorfologiczne posiadają swoje specyficzne cechy krajobrazowe i morfometryczne. Ich charakterystyka przedstawiana jest jednak najczęściej w sposób opisowy na tle ogólnych rozważań dotyczących rozwoju rzeźby Karkonoszy w okresie kenozoicznym oraz wpływu struktury podłoża granitowego na wykształcenie mezo- i mikroform rzeźby. Należy przy tym podkreślić, że informacje literaturowe opisujące rzeźbę granitową Karkonoszy odnoszą się głównie

do ich północnej części. Dla obszaru położonego w Republice Czeskiej nie ma syntetycznego opracowania. Jedyne szczegółowe opracowanie na ten temat napisała Bartošikova (1973).

W monografii Karkonoszy pod redakcją Jahna (1985) zestawione zostały różne poglądy na temat genezy i ewolucji rzeźby Karkonoszy (Czerwiński 1985). Niestety tak jak i w innych tego typu opracowaniach brak w niej informacji na temat cech morfometrycznych rzeźby Karkonoszy. Ograniczają się one jedynie do podania długości głównych grzbietów czy też przedziałów wysokościowych, w jakich najczęściej występują zrównania.

W części omawiającej związek pomiędzy rzeźbą a strukturą podłoża Czerwiński (1985) wykorzystał prace Cloosa (1925), Berga (1927) i Dumanowskiego (1963). Przychylił się do poglądu Cloosa (1925), który stwierdził, że cios pokładowy (spękania typu L) „wyznacza optymalną powierzchnię morfologiczną, do której dopasowuje się stok w procesie jego denudacyjnego modelowania”. Z drugiej jednak strony podkreślił znaczenie rozważań Dumanowskiego (1963), który zajmował się wpływem struktury podłoża na rzeźbę Karkonoszy. Ten ostatni autor wskazał na wyraźny związek układu głównych elementów rzeźby Karkonoszy z przebiegiem i różną odpornością budujących je formacji skalnych. Zwrócił również uwagę, że na północnych stokach Karkonoszy istnieje pewna zbieżność pomiędzy położeniem progów dolinnych, skałek i załomów stokowych a przebiegiem granicy między różnymi odmianami granitu.

W najnowszej monografii przyrodniczej Karkonoszy (Mierzejewski 2005) znalazł się rozdział pt. „Karkonosze – rozwój rzeźby terenu” autorstwa Migonia (2005). W jego pierwszej części autor w odróżnieniu od wcześniejszych, powojennych opracowań polskich, położył nacisk na znaczenie tektoniki dysjunktywnej w rozwoju rzeźby Karkonoszy. Według Migonia (2005) pierwszorzędym czynnikiem warunkującym rzeźbę były blokowe ruchy tektoniczne zachodzące w neogenie. Spowodowały one nierównomierne podnoszenie się lub obniżanie poszczególnych części Sudetów Zachodnich (Migoń 1993, 1996).

W opinii Migonia (2005) Karkonosze stanowią w całości duży, asymetryczny, tj. pochylony w kierunku południowym, zrąb tektoniczny obcięty od północy krawędzią tektoniczną Pogórza Karkonoskiego o wysokości względnej 150–200 m. Krawędź ta na całym odcinku rozcięta jest przez krótkie i głębokie wciosowe doliny rzeczne. Część tych dolin ma ujścia zawieszane na krawędzi Pogórza – ich dna lub powierzchnie starszych poziomów terasowych „wychodzą w powietrze”, co zdaje się potwierdzać znaczenie młodej (kenozoicznej) tektoniki w powstaniu rzeźby Karkonoszy (Migoń 1988, 1992, Sroka 1991).

W kolejnej części omawianego rozdziału („Rzeczywistość granitowych form denudacyjnych”) Migoń (2005) wskazał na ogólne różnice krajobrazowe związane z litologią i spękaniami granitu. W bardziej homogenicznym i podobnie spękanym granicie równoziarnistym budującym wyższe partie Karkonoszy procesy denudacyjne działały równomiernie. Stąd też dla tych części masywu typowe są rozległe spłaszczenia, długie i jednorodne (monotonne) stoki, stosunkowo nieliczne formy skalne oraz rumowiska skalne. Lokalnie występują tu również, w strefach zbudowanych z wybitnie drobnoziarnistego granitu, skaliste, stożkowate wzniesienia sterzące ponad powierzchnie zrównań wierzchołkowych.

Odmienne przedstawia się sytuacja w strefach zbudowanych z granitów porfirowatych. Wykazuje on silne lokalne zróżnicowanie zarówno pod względem struktury, jak i gęstości oraz orientacji spękań. W rezultacie w obrębie Pogórza Karkonoskiego, stanowiącego niższy poziom morfologiczny gór, widoczne są kopułowe wzniesienia i kotlinki, a liczne skałki mają nieregularny bądź też owalny kształt (Migoń 2005).

Śród innych opracowań na szczególną uwagę zasługuje artykuł Migonia (1992) traktujący o tektonicznych formach rzeźby północnego skłonu Karkonoszy. Autor ten uznał północną krawędź Pogórza za stok uskokowy. Stwierdza również, że w obrębie Pogórza wyróżnić można szereg krawędzi dzielących tę jednostkę morfologiczną na liczne, mniejsze bloki o krawędziach nie dłuższych niż 8 km. Krawędzie te mają zróżnicowaną wysokość (30–120 m), kierunek i wyrazistość w rzeźbie, zmienne jest również ich zagęszczenie.

Cechami charakterystycznymi powierzchni oddzielanych przez krawędzie morfologiczne są: (1) izolowane kopulaste wzniesienia o wysokościach względnych dochodzących do 100 m, (2) niskie nabrzmienia podłoża, (3) nieckowate dolinki denudacyjne oraz (4) duże obniżenia o płaskim dnie i szerokości do 2 km pełniące często funkcje węzłów hydrograficznych.

Tektonika Pogórza wpływa na morfologię dolin rzecznych, których profile są niewyrównane z licznymi załamaniami. W strefie przecinania wzniesień Pogórza następuje wyraźny wzrost spadków den dolinnych (do 120–180‰), podczas gdy w obrębie dawnych powierzchni zrównań Pogórza i Karkonoskiego Padołu Śródgórskiego osiągają 40–80‰.

Z powyższego przeglądu wynika, że najwięcej informacji o dużej szczegółowości dotyczy niższej, pogórskiej partii Karkonoszy. Znacznie skromniejszy jest zasób wiedzy na temat północnego skłonu Grzbietu Głównego oraz rozcinających go dolin rzecznych.

Wyniki badań

Efektom przeprowadzonej analizy TPI jest mapa morfologiczna ukazująca rozmieszczenie głównych elementów rzeźby w obrębie granitowej części Karkonoszy (ryc. 5). Na mapie tej wyraźnie zaznaczają się wypukłe formy rzeźby – grzbiety i kulminacje oraz obniżenia dolinne i kotliny. Wbrew obiegowym opiniom, prezentowanym w większości opracowań monograficznych, spłaszczenia występują prawie wyłącznie w obrębie dwóch stref: wierzchowy górn oraz Karkonoskiego Padołu Śródgórskiego. Można ponadto zauważyć, że w obrębie wierzchowy widoczne są pojedyncze duże powierzchnie spłaszczeń, natomiast w strefie padołu występują spłaszczenia liczne i małe powierzchniowo. Wyniki pomiarów ich powierzchni zaprezentowano w tabeli 1.

W uzyskanym obrazie widoczny jest mały udział spłaszczeń w obrębie stoków. Być może jest to efekt przyjętej skali opracowania i zastosowania algorytmu przekształcającego DEM w odniesieniu do otoczenia o średnicy 500 m. Wynikałoby z tego, że spłaszczenia występujące na stokach tworzą zazwyczaj listwy o szerokościach mniejszych niż 500 m, dlatego też podczas przetwarzania DEM teoretycznie mogły ulec „zatarciu”.

W obrębie stoków Grzbietu Głównego największą powierzchnię o nachyleniu poniżej 6° wystąpiło w górnych, źródłiskowych częściach dolin. Większość dolin, zwłaszcza na południowym sklonie Grzbietu,

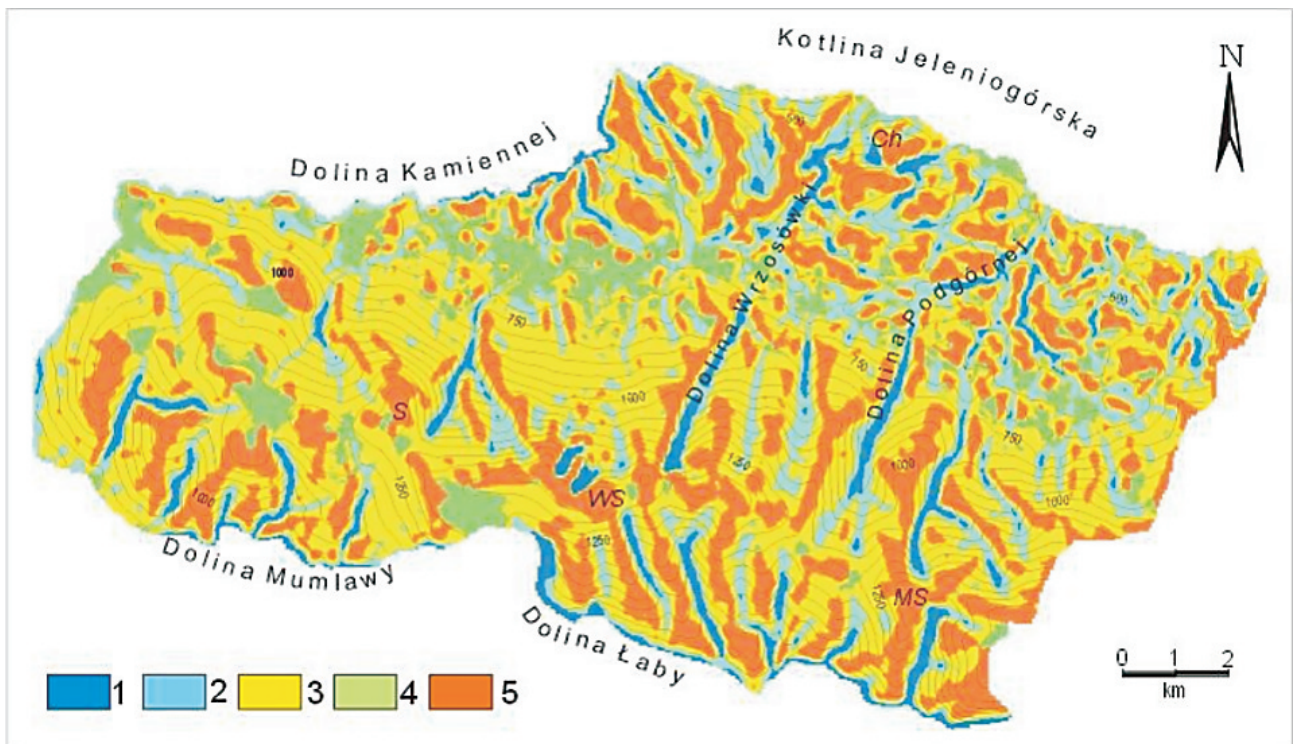
Tabela 1. Spłaszczenia morfologiczne na podstawie analizy TPI (wartości odniesione są do powierzchni testowej – granitowej części Karkonoszy – ryc. 4)

Table 1. Planation surfaces from TPI analysis (values are related to test area of granitic part of Karkonosze Mts. - Fig. 4)

Jednostka morfologiczna	Powierzchnia [km ²]	% powierzchni
Grzbiet Główny (wierzchowina)	3,048	1,75
Padół Śródgórski	5,907	3,39
Razem	8,955	5,14

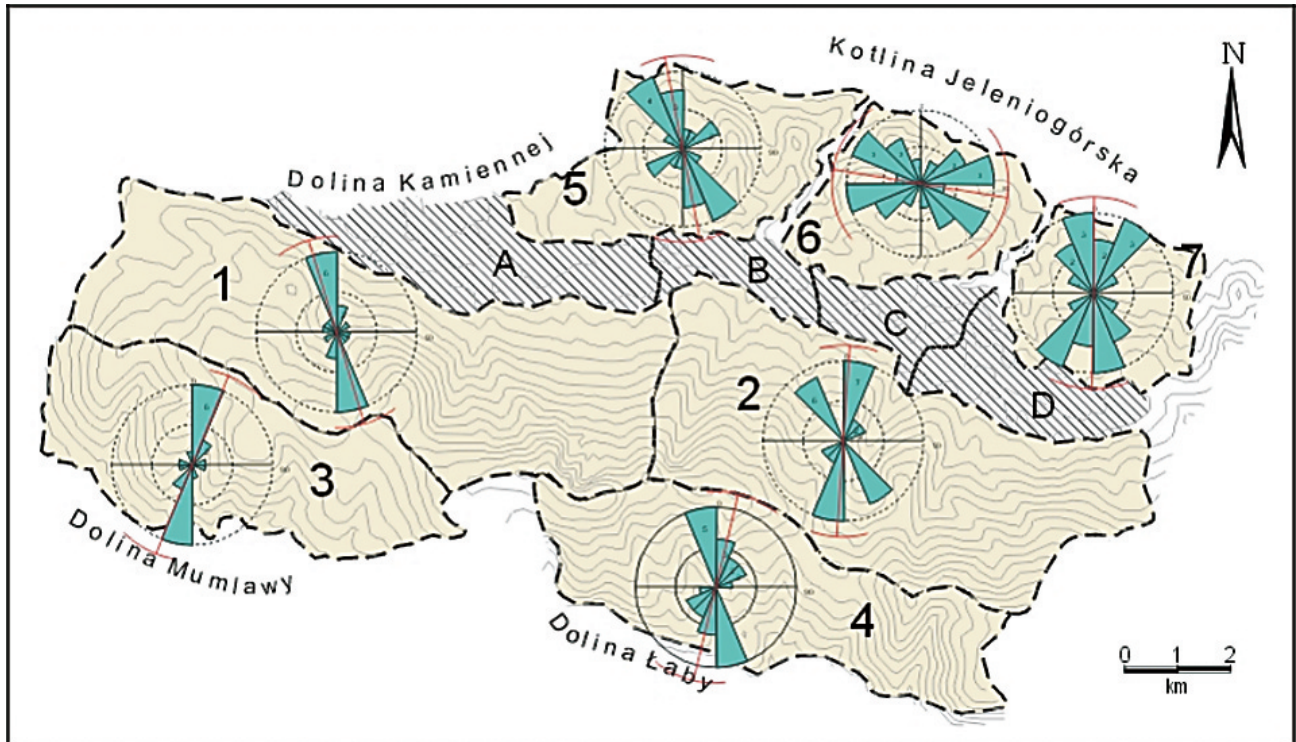
jest wyraźnie zarysowana morfologicznie (ryc. 5). W obrębie analizowanego wycinka Karkonoszy występuje także kilka stosunkowo płytkich dolin, słabo wciętych w powierzchnie stokowe. Najwięcej jest ich w strefie położonej na wschód od Śnieżnych Kotłów. W strefie tej doliny rozcinające Grzbiet Główny i boczne grzbiety ułożone są równoległe do siebie, przy czym na sklonie północnym zorientowane są one głównie w kierunku NE (ryc. 6). Na sklonie południowym doliny i grzbiety mają natomiast przebieg z NW na SE jedynie w strefie położonej na zachód od Śnieżnych Kotłów doliny i grzbiety mają orientację taką jak po północnej stronie Grzbietu Głównego.

Obszar Karkonoskiego Padołu Śródgórskiego na mapie klasyfikacyjnej TPI przedstawia się jako nie-



Ryc. 5. Klasyfikacja form rzeźby na podstawie analizy TPI (Topographic Position Index). Objasnienia: 1 – dna dolin, 2 – stoki o nachyleniu poniżej 6°, 3 – stoki o nachyleniu powyżej 6°, 4 – spłaszczenia, 5 – grzbiety, kulminacje

Fig. 5. Terrain forms classification on the basis of TPI (Topographic Position Index) analysis. Explanations: 1 – valleys floors, 2 – slopes below 6°, 3 – slopes about above 6°, 4 – flattening, 5 – ridges, peaks



Ryc. 6. Orientacja grzbietów (diagramy rozetowe) oraz podział obszaru badań na jednostki morfologiczne (1–4 – Grzbiet Główny, 5–7 – Pogórze Karkonoskie, A–D – Karkonoski Padół Śródgórski)

Fig. 6. Ridges direction (rosette diagrams) and distribution of the study area into morphological regions (1–4 Main Ridge of Karkonosze Mts., 5–7 – Foothills of Karkonosze Mts., A–D – Karkonosze Intramontane Trough)

jednolita strefa składająca się z części (jednostki A–C na ryc. 6), w których obrębie dominują rozległe powierzchnie spłaszczeń, oraz z części, gdzie dominującym elementem rzeźby są niewielkie powierzchniowo, owalne, izolowane kulminacje. Cechą charakterystyczną Pogórza jest wzrost z zachodu na wschód liczby tych kulminacji kosztem powierzchni spłaszczeń, a ponadto pojawiają się liczne powierzchnie zaklasyfikowane jako stoki o nachyleniu poniżej 6°.

Region Pogórza Karkonoskiego jest zróżnicowany podobnie jak Karkonoski Padół Śródgórski (5–7 na ryc. 6). W zachodniej części Pogórza między doliną Kamiennej a Wrzosówki (5 na ryc. 6) w morfologii dominują stosunkowo długie, szerokie grzbiety, którym towarzyszą obszerne, stosunkowo słabo zarysowane (płytkie) doliny. Większość dolin i grzbietów ma orientację NW–SE.

W pozostałej, leżącej na wschód od doliny Wrzosówki, części Pogórza wzrasta liczba elementów rzeźby określonych w trakcie analizy jako grzbiety – kulminacje (ryc. 7). Na mapie klasyfikacyjnej (ryc. 5) widać wyraźnie, że wielkość (powierzchnia) tych elementów zmniejsza się w kierunku wschodnim. W odróżnieniu od zachodniego fragmentu Pogórza jest tu dużo izolowanych kulminacji o kształtach mniej lub bardziej owalnych czy też rozgałęziających się. Charakterystyczne jest również to, że w regionie położonym na wschód od doliny Wrzosówki nie ma wyraźnie zarysowanej sieci dolinnej. Występują tu liczne

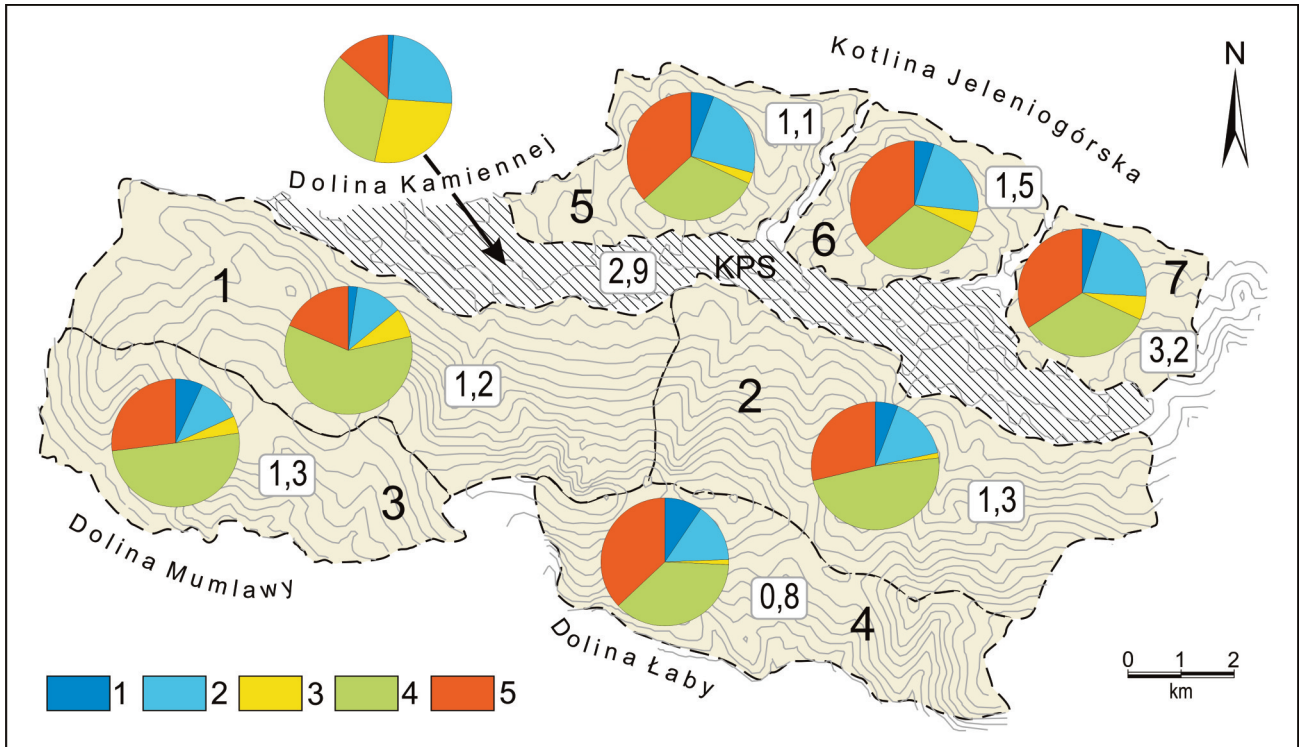
nieregularne obniżenia morfologiczne w formie niewielkich kotlin czy też wydłużonych obniżień rozdzielających pojedyncze grzbiety – masywy. Można również zauważyć, że w regionie położonym między doliną Wrzosówki a Podgórną (6 na ryc. 6) układ głównych elementów rzeźby ma charakter kratowy. W obszarze leżącym na wschód od doliny Podgórną takiej regularności w układzie form rzeźby nie ma (7 na ryc. 6).

Z zestawienia udziału poszczególnych klas form rzeźby uzyskanych w analizie TPI (tab. 2) wynika, że

Tabela 2. Klasyfikacja form rzeźby terenu badań (granitowa część Karkonoszy) na tle rzeźby całego masywu Karkonoszy

Table 2. The classification of terrain forms (granitic part of Karkonosze Mts.) against a background of relief of Karkonosze Mts. massif as a whole

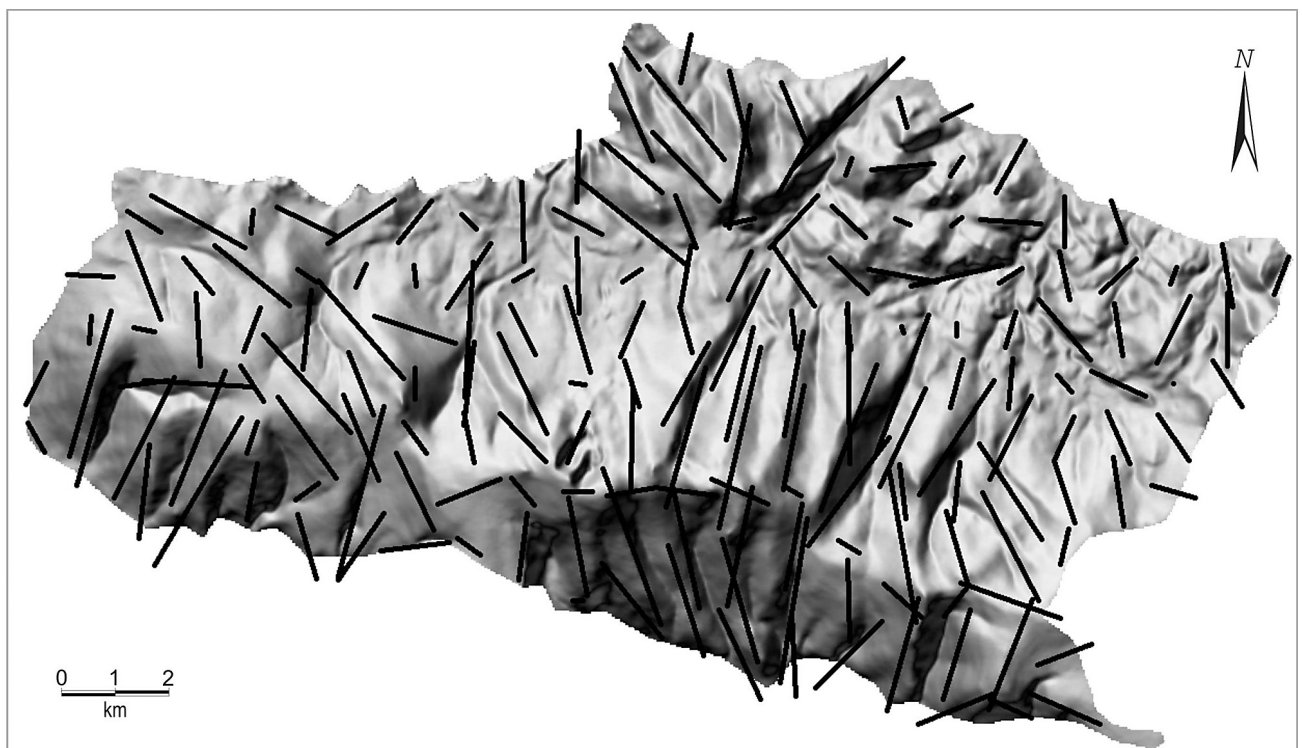
Formy rzeźby	Obszar testowy	Karkonosze
	% pow.	% pow.
Dna dolin	5,4	9,1
Stoki o nachyleniu poniżej 6°	17,5	16,6
Stoki o nachyleniu powyżej 6°	43,4	38,0
Spłaszczenia	7,5	4,8
Grzbiety	26,2	31,5



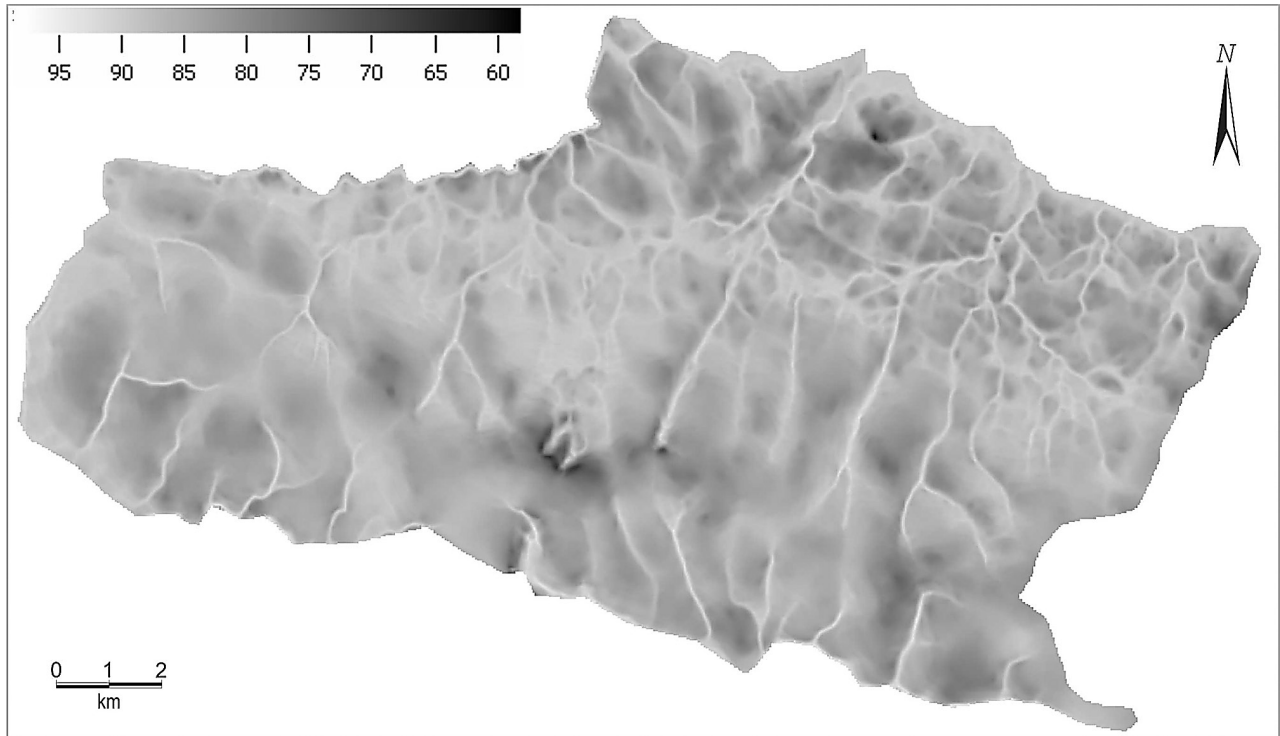
Ryc. 7. Udział wyróżnionych na podstawie analizy TPI elementów rzeźby na obszarze Karkonoszy. Objasnienia i oznaczenia jednostek morfologicznych jak na ryc. 5. W ramkach podano gęstość kulminacji na km², KPS – karkonoski padół śródgórski

udział grzbietów, stoków słabo nachylonych (<6°) jest podobny do wartości uzyskanych dla całego obszaru Karkonoszy. Istotne różnice istnieją natomiast

w przypadku częstości występowania spłaszczeń czy też stoków o nachyleniu powyżej 6°. W granitowej części Karkonoszy spłaszczenia spotykane są prawie



Ryc. 8. Główne lineamenty rzeźby granitowej Karkonoszy wygenerowane w programie MicroDem (funkcja *topographic grain*)
Fig. 8. Main topographic grain of Karkonosze Mts. granite part generated in MicroDem program



Ryc. 9. Mapa wynikowa parametru openness downward (negative). Na białą odwzorowane szkieletowe linie dolinne
Fig. 9. Map of the parameter openness downward (negative). To skeletal lowland lines in white copied

dwa razy częściej niż w obrębie całego masywu. Znaczny odsetek stoków silnie nachylonych i mały udział den dolinnych wskazuje, że północny skłon Karkonoszy jest silniej pochylony niż południowy, ale przy tym jest słabo rozcięty erozyjnie.

Analiza obrazu wygenerowanego w procedurze *topographic grain* przynosi kilka istotnych obserwacji (ryc. 8). Wbrew złudzeniu, jakiego doświadcza obserwator patrzący na Karkonosze z dna Kotliny Jeleniogórskiej, Grzbiet Główny nie tworzy prostego lineamentu – wału. W rzeczywistości składa się on ze skośnie ustawionych do siebie, słabo zarysowanych grzbietów (form wypukłych) i powierzchni spłaszczeń tworzących wierzchołki Grzbietu Głównego. Dominujące na badanym obszarze lineamenty wyznaczone są przez opadające z Grzbietu Głównego w kierunku południowym i północnym grzbiety i wcięte erozyjnie dna dolin rzecznych. Ubogi w lineamenty rzeźby jest teren Karkonoskiego Padołu Śródgórskiego, natomiast na Pogórzu Karkonoszy widać zróżnicowanie w ich przebiegu zgodnie z wydzieleniami prezentowanymi w omówieniu wskaźnika TPI.

Zastosowanie parametru krzywizny profilowej (wertykalnej) eksponuje głównie kary Śnieżnych Kotłów oraz długie doliny rzeczne na stokach Grzbietu Głównego. Wklęsłość profili dolin rzecznych jest największa w przywierzchołkowej partii stoku. Elementy wypukłe dominują na Pogórzu Karkonoszy, gdzie szczególnie wyróżnia się kulminacja Chojnika. Zestawienie krzywizny profilowej i planarnej służące klasyfikacji kształtów stoków wykonane w programie MicroDem przedstawiono w tabeli 3.

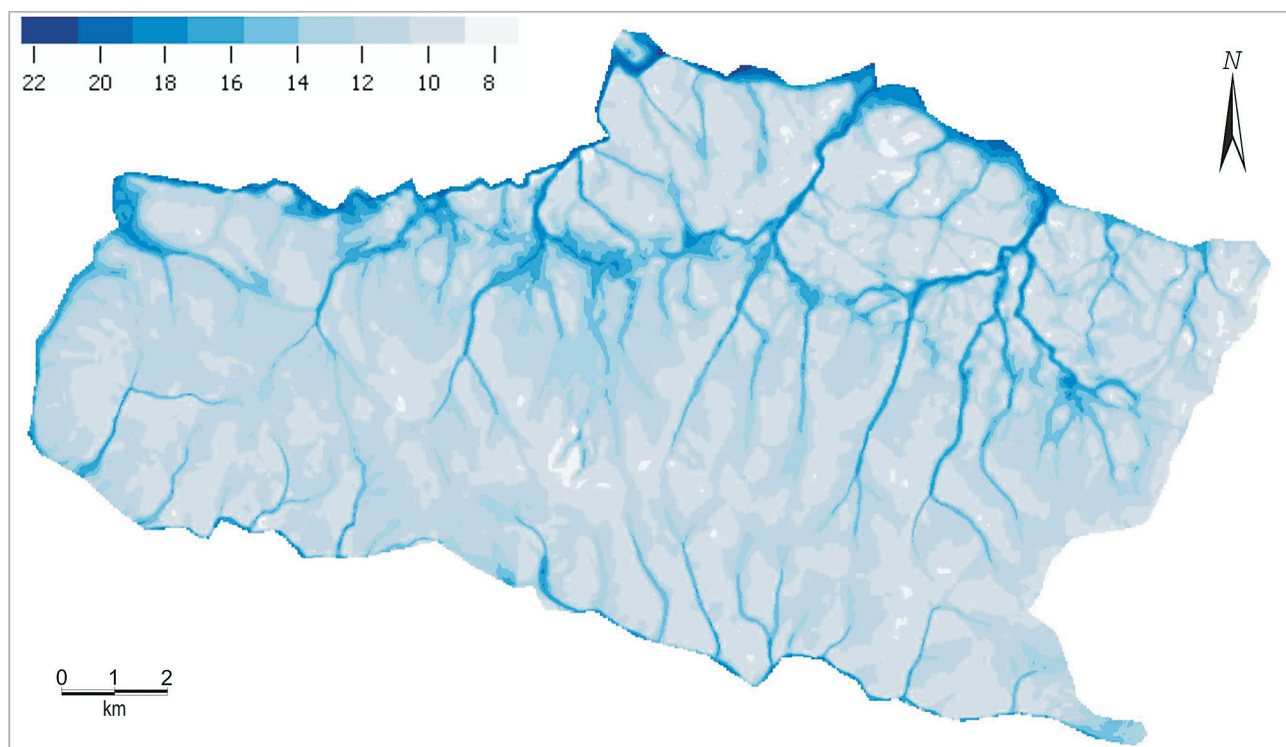
Na tej podstawie można stwierdzić, że na obszarze badań dominują stoki proste (ponad 54%) i proste rozbieżne (ok. 10%).

Mapy wynikowe wskaźników *upward openness* oraz *downward openness* ilustrują przebieg linii szkieletowych obszaru badań (ryc. 9). Na ich podstawie można stwierdzić, że doliny w obrębie Grzbietu Głównego tworzą układ równoległy (rusztowy), w strefie Padołu mają one układ dendrytyczny, w centralnej partii Pogórza natomiast układ kratowy.

Tabela 3. Kształt stoków i ich udział w powierzchni granitowej części Karkonoszy klasyfikowany pod względem parametru krzywizny (*curvature*)

Table 3. Slope curvature classification (granitic part of Karkonosze Mts.)

Kategorie stoków		% powierzchni
Krzywizna profilowa (<i>horizontal curvature</i>)	Krzywizna planarna (<i>vertical curvature</i>)	
Wypukłe	Wypukłe	1,01
Wypukłe	Proste	8,83
Wypukłe	Wklęsłe	4,79
Proste	Wypukłe	9,82
Proste	Proste	54,26
Proste	Wklęsłe	7,24
Wklęsłe	Wypukłe	5,60
Wklęsłe	Proste	7,75
Wklęsłe	Wklęsłe	0,70



Ryc. 10. Mapa wynikowa parametru wtórnego Topographic Wetness Index (TWI). Duże wartości przypisane są dla miejsc potencjalnej koncentracji wód stokowych

Fig. 10. Map of the secondary parameter Topographic Wetness Index (TWI). Great values are assigned for places of water flow potential concentration

Topograficzny wskaźnik uwilgotnienia (TWI) przyjmuje na obszarze badań najwyższe wartości przy dolnym załamie stoków Grzbietu Głównego, w tym w dnach dolin rzecznych tej strefy i w ich dalszych odcinkach przecinających Pogórze Karkonoskie do wylotu w kierunku Kotliny Jeleniogórskiej (ryc. 10). Na stokach Grzbietu Głównego poza liniami dolinnymi wyższe wartości cechują wklęsłe zbocza nisz źródłiskowych i niwalnych. Niskie wartości TWI świadczące o mniejszym stopniu nasycenia wilgocią są na badanym obszarze charakterystyczne dla Pogórza Karkonoszy.

Wynik automatycznej klasyfikacji form rzeźby Karkonoszy w programie ILWIS (*generic landforms*

class) dał syntetyczny pogląd na główne jednostki rzeźby. Według zastosowanych przedziałów klasyfikacyjnych ponad 80% badanej powierzchni zajmują stoki (o różnym nachyleniu), kolejna ze znaczących powierzchniowo grupa form to koryta – 8,8%. Udział poszczególnych wydzieleni w ogólnej powierzchni obszaru badań przedstawiono w tabeli 4.

Klasyfikacja ta znacznie różni się od wyników uzyskanych w procedurze TPI. Większy udział w powierzchni zaklasyfikowany został jako stoki i dna dolin (koryta) kosztem takich wydzieleni, jak grzbiety i spłaszczenia. Uzyskany obraz z uwagi na brak zróżnicowania klas spadków na stokach jest mocno zgeneralizowany.

Tabela 4. Udział poszczególnych elementów rzeźby Karkonoszy (obszar testowy) na podstawie modelowania w programie ILWIS

Table 4. Generic landforms classes as result of modelling in ILWIS software

Formy rzeźby	% powierzchni
Stoki	80,1
Koryta	8,8
Spłaszczenia	4,7
Grzbiety	2,9
Szczyty	1,9
Zagłębienia	1,6

Dyskusja

Wyniki przeprowadzonych analiz rzucają nowe światło na istniejące poglądy odnośnie do rzeźby Karkonoszy. Wskazują one na jakościowe i ilościowe zróżnicowanie cech morfometrycznych między Grzbietem Głównym Karkonoszy a Karkonoskim Padołem Śródgórskim i Pogórzem Karkonoszy. Pozwalają także na wydzielenie wśród tych trzech jednostek obszarów o odmiennych właściwościach, co do tej pory nie było w literaturze przedmiotu odnotowane.

Nawiązując do tradycyjnych opracowań z zakresu geomorfologii Karkonoszy, można stwierdzić, że

jak dotąd nie podkreślano dominacji prostego kształtu stoków i przeceniano udział zrównań stokowych w ogólnej powierzchni masywu. Uzyskane mapy wynikowe konfrontowane ze szkicem geomorfologicznym Karkonoszy Czerwińskiego (1985) lub mapą geomorfologiczną Karkonoszy wykonaną pod nadzorem merytorycznym Migonia (Migoń, Korzeń 1995–1996) nie zawierają szczegółów dotyczących mezo- i mikroform rzeźby (skałek granitowych, progów wodospadów, podcięć erozyjnych), jednak dają nieporównywalnie lepszy obraz makroform, w tym układu dolin, rozmieszczenia powierzchni zrównań, charakteru powierzchni stokowych czy też predyspozycji stoków względem natężenia procesów fluwialnych.

Spośród zastosowanych w opracowaniu parametrów najpełniejszy obraz geomorfologii Karkonoszy dała procedura TPI. Zastosowana automatyczna klasyfikacja form rzeźby w programie ILWIS dała jedynie schematyczny ogląd sytuacji morfologicznej. Brak możliwości wykorzystania w tym algorytmie elementów klasyfikacji stoków ze względu na ich nachylenie sprawia, że uzyskany obraz morfologiczny jest mało zróżnicowany i pozbawiony większej ilości interesujących szczegółów.

Ciekawy efekt uzyskano w wyniku analizy głównych lineamentów rzeźby. Fakt, że linia grzbietowa masywu nie tworzy dominującego lineamentu rzeźby, nie był jak dotąd zauważany. Dominującą rolę w tej kategorii parametrów geomorfologicznych przejmują długie, proste doliny rzeczne oraz grzbieity prostopadłe do Grzbietu Głównego. Zmienność układu karkonoskich dolin także nie była jak dotąd przedmiotem szerszego zainteresowania, wyłączając prace Migonia (1992) i Sroki (1991). Autorzy ci skupiali jednak swoją uwagę na krawędzi Pogórza Karkonoszy. Przeprowadzone badania potwierdziły ponadto dominujący w ukształtowaniu powierzchni prosty kształt stoków, dając konkretną wartość liczbową tego wydzielenia na tle innych kształtów powierzchni stokowych.

Wynik analizy z zastosowaniem parametru TWI potwierdza wcześniejsze tezy (Jahn 1980) wskazujące na koncentrację wilgoci w strefie dolnych załomów stoku. Tym samym jest to pośredni dowód na słuszność poglądów autora odnoszących się do zróżnicowania stref głębokiego wietrzenia chemicznego masywu. Niskie wartości TWI w obrębie Pogórza Karkonoszy wynikają z występowania licznych izolowanych grzbietów i kopulastych wzniesień.

Należy podkreślić, że otrzymane wyniki, zgodnie ze specyfiką stosowanych algorytmów obliczeniowych, są w dużej mierze uzależnione od skali opracowania oraz rozdzielczości DEM. Wskaźniki opisujące rzeźbę powierzchni Ziemi są z reguły wyliczane dla lokalnego otoczenia każdego z poe-dynczych rastrów i otoczenie to może być w różny

sposób definiowane. Ma to wpływ na rezultat analizy. Przykładem może być wynik otrzymany w procedurze *topographic grain*. Jeśli zwiększyć zasięg opracowania, postawiony wyżej wniosek, że linia grzbietowa Karkonoszy nie tworzy wyraźnego lineamentu, przestaje być aktualny. Karkonosze na tle regionu dolnośląskiego czy nawet Sudetów tworzyć będą lineament wyraźny.

Wnioski

Uzyskane na drodze modelowania GIS charakterystyki morfologiczne obszaru testowego Karkonoszy pozwalają na podanie kilku istotnych wniosków odnoszących się do rzeźby granitowej części tych gór. Grzbiet Główny Karkonoszy nie tworzy jednolitego, zrównanego wału górskiego. Jego wierzchowina jest dosyć znacznie zróżnicowana morfologicznie, a obszary spłaszczeń (powierzchnie o nachyleniach poniżej 2–4°), wyjąwszy strefy połączenia Grzbietu Głównego z Grzbietem Czeskim w rejonie źródeł Łaby oraz Upy, zajmują bardzo niewielki odsetek analizowanego terenu. W obrębie stoków spłaszczenia takie zajmują jedynie wąskie strefy w bocznych grzbietach. W tej części Karkonoszy dominują długie, jednostajnie nachylone powierzchnie stokowe, z rzadka rozcięte dolinami rzecznoymi wyznaczającymi najwyraźniejsze lineamenty. Południkowy układ tych dolin zdaje się wskazywać, że w obrębie brzeżnej partii batolitu karkonoskiego występuje szereg ustawionych prostopadłe lub skośnie do granicy granitowego masywu rozłamów tektonicznych, których obecność przyczyniła się do osłabienia odporności podłoża na wietrzenie i erozję.

Przeprowadzone analizy pozwoliły ponadto po raz pierwszy na podanie pewnych charakterystycznych cech dwóch złożonych pod względem morfologicznym jednostek Karkonoszy: Padołu i Pogórza. Obraz tych jednostek na wynikowych mapach morfologicznych ukazał zmieniający się z zachodu w kierunku wschodnim układ obniżeń i kulminacji. W obrębie Padołu wyróżnia się znacznie strefa elewacyjna położona między dolinami Wrzosówki i Podgórznej. W strefie Pogórza doskonale zaznaczył się natomiast kratowy układ obniżeń ograniczających różnoskalowe elewacje morfologiczne.

Przytoczone powyżej ogólne uwagi dotyczące granitowej części Karkonoszy nie wyczerpują w zupełności możliwości interpretacyjnych morfologii tego masywu górskiego. Wskazują one jednak, jak pomocne mogą być narzędzia GIS w takiej analizie. Końcowy wniosek dotyczy przydatności wykorzystanych w niniejszym opracowaniu algorytmów. Najlepsze z punktu widzenia geomorfologicznego rezultaty uzyskano wówczas, gdy możliwa była pełna kontrola użytkownika nad właściwościami i przebiegiem budowanych algorytmów. Oznacza to, że funkcje mo-

delowania morfologicznego implementowane w pakietach GIS powinny: (1) zawierać możliwie jak najbardziej precyzyjne informacje źródłowe oraz (2) być elastyczne i pozwalać na sterowanie wieloma parametrami wejściowymi. Modelowanie GIS musi być uszczegółowione obrazem małych form geomorfologicznych uzyskanym ze szczegółowego kartowania terenowego.

Literatura

- Bartošíkova H., 1973. Morfologický výrazné výchozy Krkonošského žulového masívu. *Opera Corcontica* 10: 71–91.
- Berg G., 1927. Zur Morphologie des Riesengebirges. *Zeitschrift für Geomorphologie* 2: 1–20.
- Beven K., Kirkby N., 1979. A physically based variable contributing area model of basin hydrology. *Hydro. Sci. Bull.* 24 (1): 43–69.
- Boehner J., Koethe R., Conrad O., Gross J., Ringeler A., Selige T., 2002. Soil Regionalisation by Means of Terrain Analysis and Process Parameterisation. [W:] E. Micheli, F. Nachtergaele, L. Montanarella (red.), *Soil Classification 2001*. European Soil Bureau, Research Report No. 7, EUR 20398 EN, Luxembourg: 213–222.
- Cloos H., 1925. *Einführung in die tektonische Behandlung magmatischer Erscheinungen (Granittektonik)*. Teil I. *Das Riesengebirge in Schlesien*. Berlin.
- Czerwiński J., 1985. Główne rysy rzeźby i rozwój geomorfologiczny. [W:] A. Jahn (red.), *Karkonosze polskie*. Ossolineum, Wrocław: 53–76.
- Dikau R., 1989. The application of a digital relief model to landform analysis in geomorphology. [W:] J. Raper (red.), *Three Dimensional Applications in Geographic Information Systems*. Tylor & Francis, London: 51–77.
- Dickson B.G., Beier P., 2007. Quantifying the influence of topographic position on cougar (*Puma concolor*) movement in southern California, USA. *Journal of Zoology* 271: 270–277.
- Doornkamp J.C., King C.M.A., 1971. *Numerical analysis in geomorphology. An introduction*. Edward Arnold Publ. Ltd, London.
- Dumanowski B., 1961. Cover deposits of the Karkonosze Mountains. *Zeszyty Naukowe Uniwersytetu Wrocławskiego*, Ser. B., 8: 31–55.
- Dumanowski B., 1963. Stosunek rzeźby do struktury w granicy Karkonoszy. *Acta Universitatis Wratislaviensis 9, Studia Geograficzne* 1: 27–35.
- Guth P.L., 2003. Terrain Organization Calculated From Digital Elevation Models. [W:] I.S. Evans, R. Dikau, E. Tokunaga, H. Ohmori, M. Hirano (red.), *Concepts and Modelling in Geomorphology: International Perspectives*, Terrapub Publishers, Tokyo: 199–220.
- Guth P.L., 2009. *Microdem help*. U.S. Naval Academy.
- Hengl T., Gruber S., Shrestha D.P., 2003. *Digital terrain analysis in ILWIS. Lecture notes and user guide*. ITC, Enschede, Netherlands.
- Jahn A., 1953. Karkonosze – rys morfologiczny. *Czasopismo Geograficzne* 23/24: 107–121.
- Jahn A., 1980. Główne cechy i wiek rzeźby Sudetów. *Czasopismo Geograficzne* 51 (2): 129–154.
- Jahn A. (red.), 1985. *Karkonosze polskie*. Ossolineum, Wrocław.
- Jennees J., 2006. *Topographic Position Index (TPI) v. 1.2* (URL: http://www.jennessent.com/downloads/TPI_Documentation_online.pdf, 2009-07-17).
- Mierzejewski M.P., 1986. Nasunięcie i uskok przesuwczy na granicy między Kotliną Jeleniogórską a Pogórzem Karkonoskim. *Przeł. Geol.* 34: 577–581.
- Mierzejewski M.P., 1985. Denudacja Prakarkonoszy w permokarbonie i mezozoiku. *Geologia Sudetica* 20 (1): 197–225.
- Migoń P., 1988. Morfologiczne znaczenie młodotrzeciorzędowego wulkanizmu w Karkonoszach. *Czasopismo Geograficzne* 59 (3): 313–319.
- Migoń P., 1991. The Origin of Stepped Topography in the Northern Part of the Karkonosze Granite Massif. *Bulletin of the Polish Academy of Sciences* 39 (3): 267–276.
- Migoń P., 1992. Tektoniczne formy rzeźby na północnym stoku Karkonoszy. *Opera Corcontica* 29: 5–24.
- Migoń P., 1993. Geneza Kotliny Jeleniogórskiej. *Opera Corcontica* 30: 85–115.
- Migoń P., 1996. Struktura morfotektoniczna centralnej części Sudetów Zachodnich w świetle mapy zagęszczonych poziomic. *Czasopismo Geograficzne* 67: 233–244.
- Migoń P., 2005. Karkonosze – rozwój rzeźby. [W:] M. P. Mierzejewski (red.), *Karkonosze. Przyroda nieożywiona i człowiek*. Wyd. Uniwersytetu Wrocławskiego, Wrocław: 323–349.
- Migoń P., Korzeń J., 1995–1996. *Rzeźba terenu i zasady jej ochrony. Mapa 1:25 000*. Plan Ochrony Karkonoskiego Parku Narodowego.
- Migoń P., Placek A., Żyszkowska W., 2009. Steep slopes in the Sudetes and their morphotectonic interpretation. *Geological Quarterly* 53 (2): 219–232.
- Pike R.J., 2002. A Bibliography of terrain modelling (geomorphometry), the quantitative representation of Topography – Supplement 4.0. *Open-file report 02-465*. USGS.
- Pike R.J., Evans I.S., Hengl T., 2008. Geomorphometry: A Brief Guide. [W:] T. Hengl, H.I. Reuter (red.), *Geomorphometry: Concepts, Software, Applications*. Developments in Soil Science, 33: 3–30.
- Shary P., Sharaya L., Mitusov A. 2002. Fundamental quantitative methods of land surface analysis. *Geoderma* 107 (1–2): 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.
- Sroka W., 1991. Tektoniczny charakter krawędzi Pogórza Karkonoskiego. *Acta Universitatis Wratislaviensis* No 1375, Prace Geol.-Mineral. 29: 239–249.
- Weiss A., 2001. *Topographic Position and Landforms Analysis*. Poster presentation. ESRI User Conference, San Diego, CA.
- Wood J.D., 1996. *The geomorphological characterisation of digital elevation models*. PhD Thesis. University of Leicester, UK (URL: <http://www.soic.city.ac.uk/~jwo/phd>).
- Yokoyama R., Shirasawa M., Pike R.J., 2002. Visualizing Topography by Openness: A New Application of Image Processing to Digital Elevation Models. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* 68 (3): 257–265.