

UKSZTAŁTOWANIE POWIERZCHNI TERENU A WARTOŚCI METRYK KRAJOBRAZOWYCH W GÓRACH WYSOKICH NA PRZYKŁADZIE TATR

Jan Niedźwiecki, Natalia Kolecka

Relief and values of landscape metrics – a case study from the Tatra Mts

Abstract: The aim of the authors was to compare values of 2D and 3D landscape metrics in high mountains. The first part of the work takes into consideration the spatial structure of vegetation (the rank of landscape facias/ecotopes) of Kocioł Goryczkowy Świński, which was investigated in 1999 by Anna Kozłowska and Anna Jakomulska. The calculation of landscape metrics is resumed using the true surface geometries and compared with the result of traditional measurements on a reference plane. In the second part of the paper, a set of commonly used landscape metrics is calculated for the geocomplexes (rank of uroczysko unit) in the Morskie Oko catchment using both true surface and plain geometries. Finally average surface roughness is computed for the both study areas and some remarks for landscape metrics computed for geometric fields are given. The comparison shows that appropriate 2D and 3D metrics may differ significantly. Moreover, there is a strong correlation between the size of the discrepancy and the surface slope. For that reason, it is very important to distinguish between 2D and 3D metrics and to use them consciously, according to the particular problem.

Keywords: landscape metrics, high mountain landscape, Tatra Mountains, 3D approach

Zarys treści: W niniejszej pracy zaprezentowano wyniki porównania wartości wybranych metryk krajobrazowych otrzymanych na podstawie obliczeń wykonanych dwiema metodami: metodą tradycyjną, w której pomiarów dokonuje się po zrzutowaniu mozaiki jednostek przestrzennych na powierzchnię planimetryczną, oraz metodą uwzględniającą trzeci wymiar krajobrazu – opartą na analizie numerycznego modelu terenu. Badania wykazały, że zastosowane metody mogą mieć wpływ na uzyskany obraz struktury krajobrazu wysokogórskiego. Ponadto w pracy zawarto uwagi dotyczące obliczania średniej szorstkości powierzchni oraz analiz wykonywanych przy wykorzystaniu pól geometrycznych w danym typie krajobrazu.

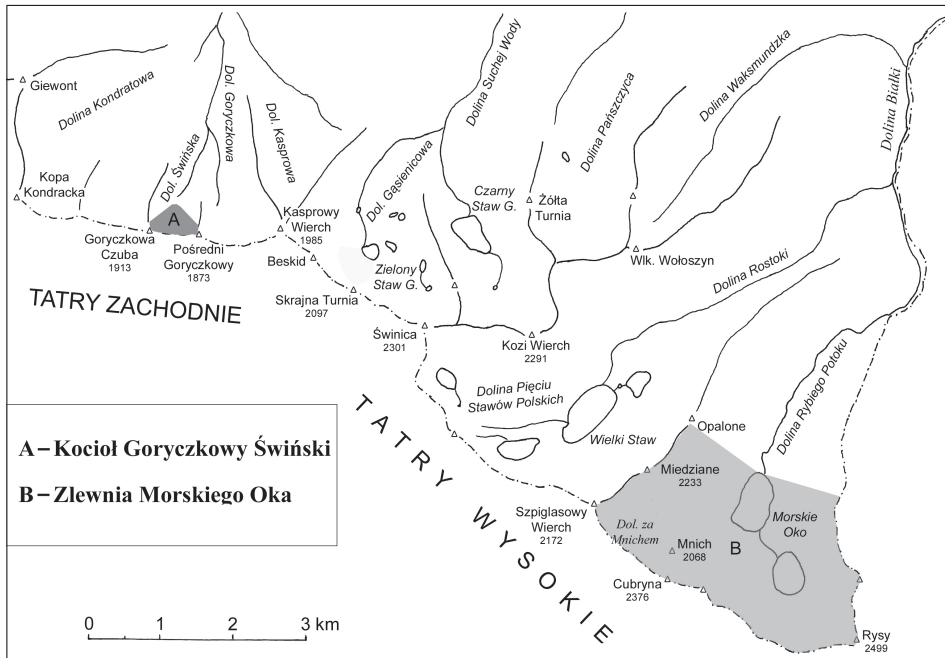
Słowa kluczowe: metryki krajobrazowe, krajobraz wysokogórski, Tatry, podejście 3D

Wprowadzenie

Istotną cechą krajobrazu jest to, że zajmuje on wycinek przestrzeni (Zonneveld 1989; Richling, Solon 2002). Posiada granice zarówno poziome, jak i pionowe (Armand 1980), a więc jest fragmentem przestrzeni trójwymiarowej (pomijając czas). Fakt ten jest rzadko podkreślany w definicjach krajobrazu, który przez różnych autorów jest rozumiany w nieco odmienny sposób. Trójwymiarowość krajobrazu potwierdzają m.in. badania z dziedziny ekologii krajobrazu prowadzone od kilkudziesięciu lat. Można mówić o dwóch aspektach trzeciego wymiaru krajobrazu w tych badaniach: o jego pionowej strukturze (np. miąższość krajobrazu, koncepcje ekotopu, geosfer itd.) oraz jego strukturze poziomej i funkcjonowaniu na obszarach o zróżnicowanej rzeźbie terenu (np. katena geoeekologiczna, sekwencja morfologiczna czy piętrowość krajobrazu). Mimo to dotychczasowe metody prezentacji struktury krajobrazu oraz pomiaru kompozycji i konfiguracji jednostek przestrzennych opierały się na założeniu, że krajobraz jest rzutem powierzchni terenu na powierzchnię planimetryczną, co jest uproszczeniem. Na obszarach nizinnych rozciągłość pozioma krajobrazu i poszczególnych jednostek przestrzennych jest na tyle duża w stosunku do ich miąższości i deniwelacji, że stosowanie tego uproszczenia nie ma zasadniczego wpływu na wyniki badań. Płaska mozaika płatów nie zawsze jest jednak reprezentatywnym modelem krajobrazu górskiego, a szczególnie wysokogórskiego, w którym nachylenie stoków dochodzi do 90°. W tym wypadku powodem uproszczenia był brak technicznych możliwości badania krajobrazu jako trójwymiarowego przy jednoczesnej potrzebie jego kartograficznej prezentacji (często też bezpośrednio przeniesienie metod stosowanych na obszarach nizinnych).

Współczesny rozwój technik GIS umożliwił konstruowanie numerycznych modeli terenu i ożywił dyskusję na temat trójwymiarowości krajobrazu i potrzeby wypracowania nowych metod jego badania. Zaczęto zwracać uwagę m.in. na fakt, że jednostki przestrzenne są bryłami (Pietrzak 2008), rozwinięto badania struktury pionowej roślinności (Blaschke i in. 2004; Drągut i in. 2010) i zaczęto poszukiwać możliwości precyzyjniejszego określenia cech kompozycji i konfiguracji składających się na krajobraz elementów – jednostek przestrzennych – na obszarach o zróżnicowanej rzeźbie terenu (Dorner i in. 2002; Hoehstetter i in. 2006, 2008; Hoehstetter 2009).

Niniejsza praca dotyczy ostatniego z wymienionych tematów. Autorzy pragną zwrócić uwagę na fakt, że cechy struktury krajobrazu wysokogórskiego, który charakteryzuje się bardzo urozmaiconą rzeźbą terenu, mogą nie być precyzyjnie odzwierciedlone przy zastosowaniu tradycyjnych metod. Nowe możliwości techniczne i dostosowana do nich metodyka pozwalają uwzględnić rzeczywistą powierzchnię terenu przy obliczaniu metryk krajobrazowych. Badania trójwymiarowych metryk krajobrazowych opierano dotychczas na analizie: modeli neutralnych (Hoehstetter i in. 2008), płatów odzwierciedlających użytkowanie ziemi (Hoehstetter i in. 2006) lub modelu płatów i korytarzy (Hoehstetter, 2009). Metoda badań jest dopiero w fazie testowania i postuluje się (Hoehstetter i in. 2008) podejmowanie analiz w typach krajobrazu o różnej specyfice topograficznej. Potrzebę uwzględniania rzeczywistej rzeźby terenu przy



Ryc. 1. Lokalizacja obszarów badań

Fig. 1. Location of research areas

określaniu różnorodności krajobrazu wysokogórskiego sygnalizowali także autorzy tego artykułu (Niedźwiecki 2005, 2009). Niniejsza praca ma na celu wykazanie znacznych różnic w wartościach metryk krajobrazowych 2D i 3D w krajobrazie wysokogórskim na przykładzie polskich Tatr, z zastosowaniem modelu geokompleksów. Badania prowadzono na dwóch obszarach: w Kotle Goryczkowym Świńskim, gdzie analizowano wydzielienia w randze facji krajobrazowych, a także w zlewni Morskiego Oka, w której badano uroczyska (ryc. 1). Opis wyników przeprowadzonych analiz podzielono na cztery części – pierwsze dwie dotyczą badań porównawczych tych samych metryk krajobrazowych w 2D i 3D na poszczególnych obszarach badawczych, trzecia część dotyczy obliczania średniej szorstkości powierzchni (przykład metryki krajobrazowej obliczanej tylko w 3D), w czwartej zawarto uwagi do analiz wykonywanych przy wykorzystaniu pól geometrycznych.

Metoda badań

Podstawą wykonywanych analiz jest numeryczny model terenu (NMT) w postaci siatki trójkątów (TIN), których wierzchołki mogą być nieregularnie rozmieszczone na powierzchni terenu. Dzięki temu TIN może mieć wyższą rozdzielczość na obszarach

o bardziej zróżnicowanej rzeźbie terenu lub w przypadku, gdy potrzebna jest bardziej szczegółowa informacja, a mniejszą na obszarach o mniej urozmaiconej powierzchni. Dane służące do budowy TIN mają najczęściej postać punktów i linii. Nie są one modyfikowane podczas tworzenia modelu, co pozwala na zachowanie precyzji danych wejściowych (Li i in. 2005). Modele TIN są zazwyczaj używane do analizy niewielkich obszarów, gdy wymagana jest wysoka precyzja. Proponowane przez innych autorów (Jenness 2004; Hochstetter i in. 2008) użycie modeli grid w postaci siatki kwadratów (ryc. 2) zostało uznane za mniej dokładne. Zaprezentowano też (ryc. 3) model terenu w postaci nieregularnej siatki trójkątów i siatki kwadratów.

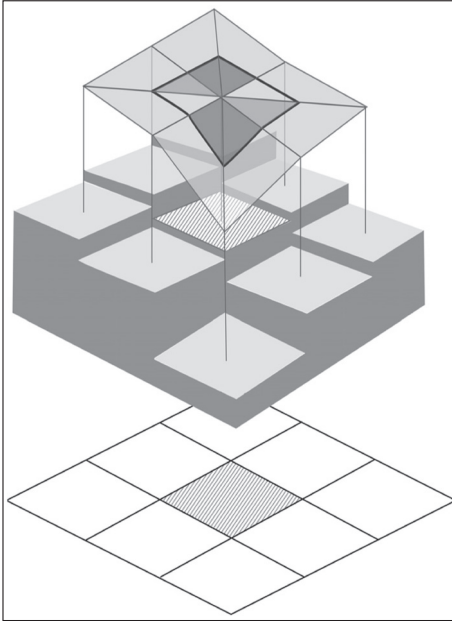
Podstawowymi parametrami wykorzystywanymi do obliczania metryk krajobrazowych są powierzchnie i obwody poszczególnych jednostek przestrzennych w 2D i 3D. Każdy analizowany płat ma postać przestrzennego poligonu wektorowego, którego wierzchołki posiadają interpolowaną z NMT wysokość n.p.m. (ryc. 4). Granice każdego poligonu są rzutowane na model powierzchni, co pozwala zidentyfikować obszar wspólny dla obu obiektów. Wszystkie trójkąty i ich części, które mieszczą się w granicach poligonu, służą do obliczenia jego powierzchni w przestrzeni trójwymiarowej. Z wykorzystaniem oprogramowania GIS są obliczane następujące parametry: obwód 2D, obwód 3D, powierzchnia 2D i powierzchnia 3D, które są dodawane do tabeli atrybutów. Informacje te są danymi wejściowymi do obliczenia wielu metryk krajobrazowych w arkuszu kalkulacyjnym.

Część metryk krajobrazowych wymaga jednak wykorzystania modelu grid, ponieważ wzory bazują na regularnym polu podstawowym (piksela). W tym celu model TIN był konwertowany do postaci rastrowej o rozdzielczości ustalonej na podstawie analizy badanego obszaru i nominalnej dokładności NMT. Konwersję przeprowadzono za pomocą algorytmu liniowej interpolacji wysokości. Tą metodą obliczono średnią szorstkość powierzchni.

Obliczane w pracy metryki krajobrazowe bazują na metrykach 2D zmodyfikowanych i podanych przez Hochstettera (2009), a także na metrykach 2D podanych przez A. Kozłowską i A. Jakomulską (1999), zmodyfikowanych przez autorów.

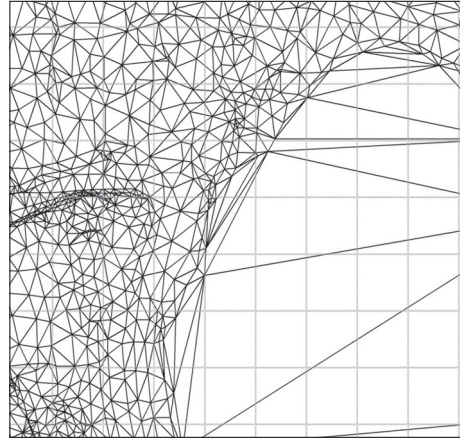
Badania w Kotle Goryczkowym Świńskim

Badania w Kotle Goryczkowym Świńskim dotyczyły jednostek przestrzennych w randze facji krajobrazowych. Wykorzystano przy tym mapę roślinności opracowaną przez A. Kozłowską (1999) oraz założenie, że wyznaczenie granic fitocenoz jest wystarczające do wyznaczenia granic ekosystemów, ekosystemy zaś mogą być traktowane jako jednostki odniesienia w badaniach krajobrazu i jego zróżnicowania przestrzennego (Solon 2002). Kocioł Goryczkowy Świński jest górnym piętnem Doliny Goryczkowej o dnie położonym na wysokości 1650–1660 m n.p.m. Jego zbocza są dojrzałe, w większości pokryte zwietrzeliną i w miarę jednolicie nachylone – 20–30°. Jest to obszar o relatywnie słabo rozczłonkowanej rzeźbie terenu. Kulminacjami grzbietu głównego Tatr są: Goryczkowa Czuba (1913 m n.p.m.) i Pośredni Goryczkowy Wierch (1873 m n.p.m.). Największe powierzchnie zajmuje zespół muraw alpejskich *Oreochloa distichae* – *Juncetum trifidi*, obok którego duże znaczenie mają borówczyska (*Vaccinietum myrtilli*). Charakte-

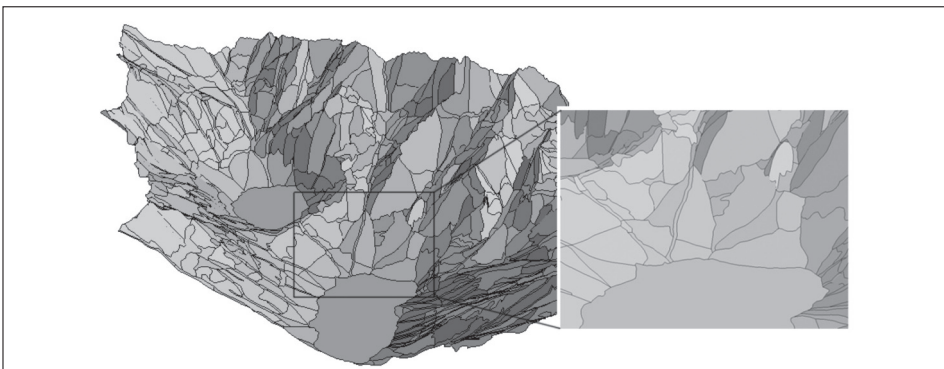


Ryc. 2. Metoda określania powierzchni kwadratów i obwodu płyta wg Jennessa (2004)

Fig. 2. A method to determine area and perimeter of patch according to Jenness (2004)



Ryc. 3. Siatka trójkątów modelu TIN i siatka o rozdzielczości 50 m w rzucie ortogonalnym
Fig. 3. The network of triangles in the TIN model and the network of squares in 50 m resolution



Ryc. 4. Trójwymiarowe poligony w zlewni Morskiego Oka – widok perspektywiczny

Fig. 4. Three-dimensional polygons in the Morskie Oko catchment – perspective view

rystyczne dla strefy przejściowej między piętrami roślinnymi są powypasowe postacie muraw alpejskich (ryc. 5 na wklejce).

Badania na tym obszarze przeprowadziły ponad 10 lat temu A. Kozłowska i A. Jakomulska (1999). Autorki obliczyły kilka metryk krajobrazowych charakteryzujących strukturę przestrzenną roślinności kotła. W niniejszym opracowaniu powtórzono niektóre z tych obliczeń, wykorzystując trójwymiarową geometrię, która nie była dostępna autorkom wspomnianego opracowania. Policzono następujące parametry: całkowitą powierzchnię kotła, średnią powierzchnię wydzielenia, średnią powierzchnię wydzielenia danego typu, współczynnik zmienności powierzchni i średni wskaźnik rozczłonkowania konturu.

Wskaźnik rozczłonkowania (F) jest wyrażony wzorem (Pietrzak 1989):

$$F = \frac{P}{\sqrt{A}}$$

gdzie: A – powierzchnia wydzielenia,

P – obwód wydzielenia.

Współczynnik zmienności powierzchni (V) policzono według wzoru (Bočarov, 1976):

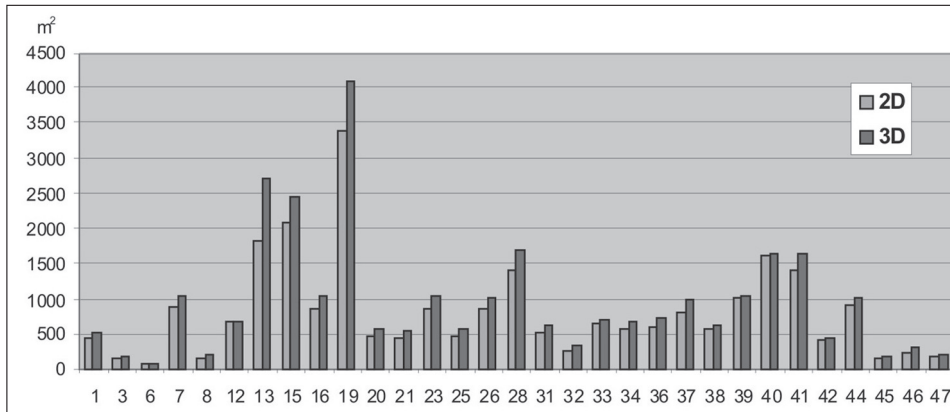
$$V = \frac{s}{x} \cdot 100\%$$

gdzie: s – odchylenie standardowe danego parametru lub wskaźnika,

x – średnia wartość danego parametru lub wskaźnika.

Obliczenia powierzchni całkowitej badanego obszaru przy uwzględnieniu rzeczywistej rzeźby terenu dały wynik o ponad 30 000 m² (117,5%) większy, czyli 216 839 m² zamiast 184 493 m². W podobnym stosunku różnicuje się wartość średniej powierzchni płata – odpowiednio 679 i 797 m². Różnice te wydają się znaczące. Nie są one stałe dla poszczególnych typów roślinności (ryc. 6). Największa rozbieżność cechuje wartości 2D i 3D powierzchni stoku skalnego pod szczytem Goryczkowej Czuby (13 – *Oreochloa distichae-Juncetum trifidi* w kompleksie z *Rhizocarpetalia*; odpowiednio 1851 i 2713 m² – 147%) i stromych muraw pod szczytem Pośredniego Goryczkowego Wierchu (19 – *Oreochloa distichae-Juncetum trifidi typicum*; odpowiednio 3393 i 4095 m² – 121%).

Różnice w wartościach współczynnika zmienności powierzchni nie są znaczne (tab. 1). Trochę bardziej różnicują się natomiast wartości średniego wskaźnika rozczłonkowania konturu (ryc. 7). Wynika to z faktu, że dość jednostajnie nachylone stoki badanego kotła są średnio strome. Można za to zaobserwować, że płyty o kształcie wydłużonym zgodnie z linią spadku stoku mają w 3D wyższą wartość wskaźnika (np. 7 – *Luzuletum spadiceae* zwarte), natomiast płyty wydłużone w kierunku przeciwnym do spadku stoku – niższą (np. 15 – *Oreochloa distichae-Juncetum trifidi sphagnetosum*). Wartość wskaźnika nie zmienia się w przypadku zbiorowisk występujących na płaskim dnie kotła (np. 40 – *Calamagrostietum villosae tatricum*) oraz tych, których płyty są kształtem zbliżone do koła (np. 47 – *Pinetum mughi carpaticum*).

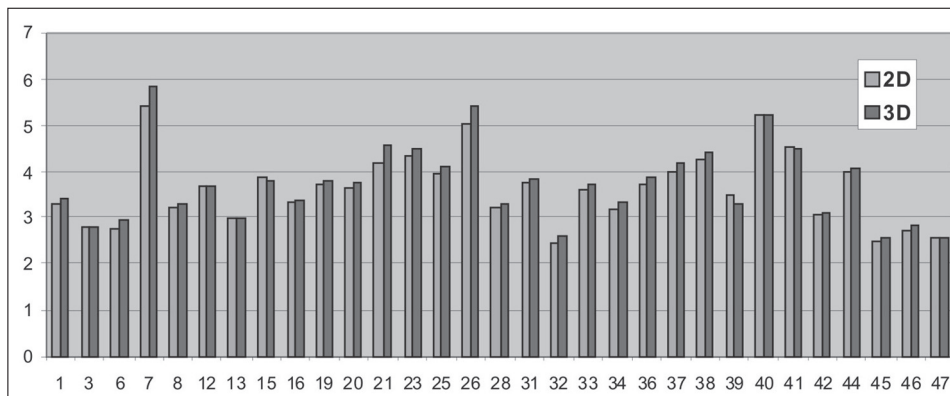


Ryc. 6. Średnia powierzchnia płatów poszczególnych typów roślinności

Objaśnienia – zobacz ryc. 5

Fig. 6. Average area of patches of particular vegetation types

Explanations – see fig. 5



Ryc. 7. Średni wskaźnik rozczłonkowania konturu wg typów roślinności

Objaśnienia – zobacz ryc. 5

Fig. 7. Mean index of fragmentation of unit according to vegetation types

Explanations – see fig. 5

Tab. 1. Metryki krajobrazowe liczone dla poszczególnych typów roślinności
 Table 1. Landscape metrics computed for vegetation types

Symbol typu symbol	Liczba platów Number of patches	Powierzchnia 2D 2D area	Powierzchnia 3D 3D area	Średnia powierzchnia 2D Mean 2D area	Średnia powierzchnia 3D Mean 3D area	Wsp. zmienności powierzchni 2D 2D area variation	Wsp. zmienności powierzchni 3D 3D area variation	Sr. wsk. rozczłonkowania konturu 2D Mean 2D edge partition index	Sr. wsk. rozczłonkowania konturu 3D Mean 3D edge partition index
1	47	20631,5	24382,7	439,0	518,8	228,3	228,4	3,284	3,396
3	2	294,1	313,0	147,1	156,5	43,5	44,5	2,790	2,812
6	2	133,3	160,4	66,7	80,2	53,1	52,6	2,766	2,939
7	3	2593,7	3134,2	864,6	1044,7	47,2	46,6	5,399	5,817
8	6	883,2	1100,1	147,2	183,4	28,6	31,1	3,213	3,303
12	3	2006,1	2031,1	668,7	677,0	61,5	61,5	3,660	3,675
13	2	3629,7	5425,9	1814,8	2712,9	95,2	95,8	2,965	2,996
15	8	16520,5	19537,3	2065,1	2442,2	113,9	112,0	3,885	3,796
16	4	3423,8	4101,0	856,0	1025,3	67,5	68,9	3,317	3,358
19	2	6785,5	8190,9	3392,8	4095,4	19,4	21,8	3,718	3,812
20	5	2376,2	2832,2	475,2	566,4	74,2	75,9	3,626	3,734
21	3	1324,8	1633,3	441,6	544,4	58,1	57,8	4,205	4,574
23	4	3403,0	4116,9	850,7	1029,2	55,2	55,6	4,342	4,467
25	21	10101,1	11850,8	481,0	564,3	121,7	120,0	3,949	4,076
26	3	2534,1	3056,4	844,7	1018,8	59,9	59,5	5,015	5,391
28	13	18479,3	21983,4	1421,5	1691,0	157,2	157,5	3,224	3,291
31	7	3589,5	4286,0	512,8	612,3	78,4	79,5	3,735	3,858
32	2	540,2	659,6	270,1	329,8	17,2	14,7	2,477	2,589
33	6	3865,9	4265,6	644,3	710,9	98,9	97,4	3,598	3,706
34	11	6151,1	7226,7	559,2	657,0	124,6	125,6	3,205	3,326
36	5	2941,0	3646,1	588,2	729,2	93,5	95,8	3,713	3,886
37	12	9516,7	11755,5	793,1	979,6	141,6	142,2	3,985	4,180

38	3	1691,4	1809,7	563,8	603,2	52,1	55,1	4,245	4,403
39	5	5069,1	5222,1	1013,8	1044,4	52,9	52,2	3,506	3,299
40	2	3228,0	3275,0	1614,0	1637,5	76,1	76,3	5,238	5,249
41	21	29842,2	34460,2	1421,1	1641,0	187,7	188,6	4,522	4,459
42	3	1227,6	1323,9	409,2	441,3	20,7	19,2	3,035	3,109
44	14	12760,1	14128,2	911,4	1009,2	93,1	90,7	3,977	4,047
45	2	278,7	316,8	139,4	158,4	14,7	13,6	2,491	2,558
46	10	2332,6	2982,4	233,3	298,2	79,0	77,3	2,722	2,849
47	41	6580,9	7632,5	160,5	186,2	148,4	145,7	2,552	2,550

Badania w zlewni Morskiego Oka

W drugiej części pracy policzono zestaw popularnych metryk krajobrazowych dla poligonu badawczego w zlewni Morskiego Oka, o bardziej urozmaiconej rzeźbie terenu niż Kocioł Goryczkowy Świński. Leży w obrębie granitoidowego trzonu krystalicznego Tatr Wysokich. Najniższym punktem jest Morskie Oko (1393 m n.p.m.), a najwyższym – Rysy (2499 m n.p.m.). Występują tu cztery piętra krajobrazowe – od górnoreglowe go po turniowe. Na tym obszarze badano uroczyska. W przeciwieństwie do obszaru w Kotle Goryczkowym Świńskim typy geokompleksów wydzielono tu przede wszystkim na podstawie kryterium geomorfologicznego (ryc. 8).

Mapę uroczysk przygotowano na podstawie opracowania J. Balona (1992). Dokonano digitalizacji oryginalnej mapy, która nie była wykonana cyfrowo, zweryfikowano jej aktualność podczas badań terenowych i na podstawie ortofotomapy (w rezultacie dodano kilka geokompleksów typu świeżych form grawitacyjnych, nieliczne geokompleksy zaliczono do innych typów, zmieniono ich zasięg, np. w związku ze zmianą granicy roślinności, podzielono itp.) oraz na podstawie wspomnianej ortofotomapy skorygowano granice wszystkich uroczysk (oryginalna mapa była wykonana na podkładzie mapy topograficznej w skali 1:10 000). W celu zwiększenia czytelności wyników zgrupowano wydzielenia w 18 typach (ryc. 3). W wersji dwuwymiarowej i trójwymiarowej policzono następujące metryki: całkowitą powierzchnię obszaru; powierzchnię (AREA): średnią płata, średnią płata danego typu, całkowitą płatów danego typu; obwód (PERIM): średni płata i średni płatów danego typu; ogólną długość granic (TE); gęstość granic (ED); gęstość płatów (PD); wskaźnik największego płata (LPI); wskaźnik kształtu (SHAPE); wymiar fraktalny (FRAC); stosunek obwodu do powierzchni (PARA).

Obliczenia wykazały dużą różnicę powierzchni całkowitej badanego obszaru. W rzucie na powierzchnię planimetryczną ma on 6 156 617 m², natomiast przy obliczaniu z uwzględnieniem rzeczywistej rzeźby terenu – 9 278 248 m² (151%). Ma to znaczny wpływ na inne metryki krajobrazowe dotyczące całego obszaru. Gęstość płatów, gęstość granic i wskaźnik największego płata obliczone jako metryki 3D przybierają wartości odpowiednio mniejsze, całkowita długość granic jest zaś większa (tab. 2). Średnia powierzchnia uroczyska przy uwzględnieniu ukształtowania terenu jest większa w tym samym stosunku co powierzchnia całkowita (151%). W mniejszym stopniu różnicuje się średni obwód (125%), co sprawia, że średni stosunek obwodu do powierzchni również się zmienia – z 0,097 w 2D na 0,081 w 3D (tab. 3). Podobne są wartości metryk charakteryzujących kształt geokompleksów – średni wskaźnik kształtu w 3D osiąga wartość o 0,025 wyższą, średni wymiar fraktalny ma zaś w obu przypadkach identyczną wartość.

Z obliczeń metryk krajobrazowych wykonanych obiema metodami można wysnuć sprzeczne wnioski na temat niektórych cech struktury krajobrazu badanego obszaru. Jak widać na wykresie (ryc. 9) w strukturze krajobrazu odzwierciedlonego jako rzut na powierzchnię planimetryczną dominują stoki strome zwietrzelinowe, następnie stoki skalne oraz stożki i hałdy usypiskowe. Obliczenia wykonane z uwzględnieniem rzeczywistej rzeźby terenu wykazują, że największe powierzchnie zajmują ściany skalne, następnie stoki skalne i stoki strome zwietrzelinowe. Warto przy tym odnotować, że powierzchnia

Tab. 2. Metryki krajobrazowe dotyczące całego obszaru badań

Table 2. Landscape metrics concerning the whole study area

Nazwa Name	Formuła Formula	2D	3D
Powierzchnia całkowita (AREA) Total Area	–	6 156 617 m ²	9 278 248 m ²
Gęstość płatów (PD) Patch Density	$PD = n_j / AREA$ n_j – liczba płatów number of patches in the landscape of patch type	0,00015	0,0001
Całkowita długość granic (TE) Total Edge	–	183 074 m	228 625 m
Gęstość granic (ED) Edge Density	$ED = TE / AREA$	0,03	0,025
Wskaźnik największego płata (LPI) Largest Patch Index	$LPI = a_{ij} / AREA$ a_{ij} – maks. powierzchnia płata max. patch area	0,0531	0,0353

Tab. 3. Średnie wartości metryk krajobrazowych liczonych dla poszczególnych uroczysk

Table 3. Average values of landscape metrics for particular landscape units

Nazwa Name	Formuła Formula	2D	3D
Powierzchnia płatu (AREA) Patch Area	–	6743 m ²	10 162 m ²
Obwód płatu (PERIM) Patch Perimeter	–	384 m	479 m
Wskaźnik kształtu (SHAPE) Shape Index	$SHAPE = 0.25 \cdot PERIM / (AREA)^{1/2}$	1,368	1,393
Wymiar fraktalny (FRAC) Fractal Dimension Index	$FRAC = 2 \ln(0.25 \cdot PERIM) / \ln(AREA)$	1,071	1,071
Stosunek obwodu do powierzchni (PARA) Perimeter – Area Ratio	$PARA = PERIM / AREA$	0,097	0,081

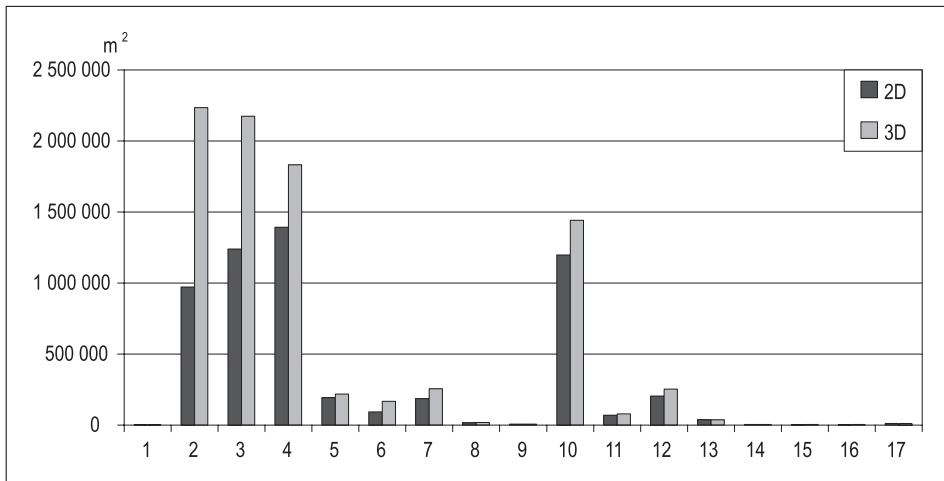
ścian skalnych obliczona metodą 3D jest większa prawie dwa i pół raza (230%). Sytuacja wygląda podobnie, jeśli chodzi o średnie powierzchnie uroczysk danego typu (ryc. 10). Na mapie dominują stożki i hałdy usypiskowe oraz łagodne stoki zwietrzelinowe (pomijając jeziora, których dla lepszej czytelności nie umieszczono na wykresie – ich powierzchnia nie różnicuje się). Porównywalne średnie powierzchnie mają następnio: stoki strome zwietrzelinowe, ściany skalne oraz dna kotłów glacialnych z wałami morenowymi. Jeżeli weźmiemy pod uwagę rzeczywistą powierzchnię terenu, sytuacja zmienia się diametralnie: ściany skalne są płatami wyraźnie dominującymi powierzchniowo, duże są także geokompleksy stoków skalnych zwietrzelinowych, a dopiero w następnej kolejności plasują się stożki i hałdy usypiskowe oraz pozostałe dwa typy stoków.

Rys. 5. Roślinność Kotła Goryczkowego Świńskiego wg A. Kozłowskiej (1999)

Objaśnienia: 1 – *Rhizocarpetalia*, 3 – inicjalne stadia wkraczania roślin zarodnikowych na nieustabilizowanym podłożu, 6 – pionierskie zbiorowiska mszaków ze związku *Salicion herbaceae*, 7 – *Luzuletum spadiceae* – słabo zwarte, 8 – *Luzuletum spadiceae*, 12 – *Luzuletum spadiceae* w kompleksie ze zbior. z *Deschampsia flexuosa*, 13 – *Oreochloa distichae-Juncetum trifidi* w kompleksie z *Rhizocarpetalia*, 15 – *Oreochloa distichae-Juncetum trifidi sphagnetosum*, 16 – *Oreochloa distichae-Juncetum trifidi typicum* postać mszysta, 19 – *Oreochloa distichae-Juncetum trifidi typicum*, 20 – *Oreochloa distichae-Juncetum trifidi cetrarietosum*, 21 – *Oreochloa distichae-Juncetum trifidi* postać z *Juncus trifidus*, 23 – *Oreochloa distichae-Juncetum trifidi* wilgotna postać pionierska z *Juncus trifidus*, 25 – *Oreochloa distichae-Juncetum trifidi caricetosum sempervirentis*, 26 – *Oreochloa distichae-Juncetum trifidi caricetosum sempervirentis* postać wilgotna, 28 – *Oreochloa distichae-Juncetum trifidi caricetosum sempervirentis* w kompleksie z *Calamagrostietum villosae tatricum*, 31 – *Oreochloa distichae-Juncetum trifidi caricetosum sempervirentis* słabo zwarte, 32. *Oreochloa distichae-Juncetum trifidi* powypasowa postać subalpejska, 33 – *Oreochloa distichae-Juncetum trifidi* subalpejska postać powypasowa, wilgotna, 34 – *Oreochloa distichae-Juncetum trifidi* powypasowa postać subalpejska słabo zwarta, z borówkami, 36 – *Oreochloa distichae-Juncetum trifidi* powypasowa postać subalpejska, z borówkami, w kompleksie z *Calamagrostietum villosae tatricum*, 37 – Zbiorowisko z *Festuca picta*, 38 – Zbiorowisko z *Deschampsia flexuosa*, 39 – Zbiorowisko z *Deschampsia flexuosa* w kompleksie z *Luzuletum spadiceae*, 40 – *Calamagrostietum villosae tatricum*, 41 – „*Vaccinietum myrtilli*”, 42 – „*Vaccinietum myrtilli*” słabo zwarte, 44 – „*Vaccinietum myrtilli*” w kompleksie ze zbiorowiskiem z *Deschampsia flexuosa*, 45 – „*Vaccinietum myrtilli*” zatorfione, 46 – *Empetro-Vaccinietum*, 47 – *Pinetum mughi carpaticum*

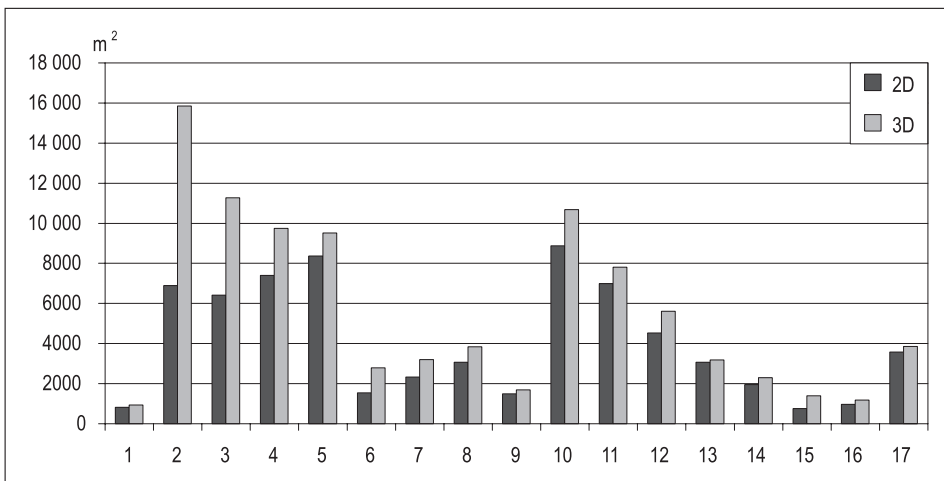
Fig. 5. Vegetation of Kocioł Goryczkowy Świński according to A. Kozłowska (1999)

Explanations: 1 – *Rhizocarpetalia*, 3 – cryptogamic plant communities on serce, initial phase, 6 – pioneer moss-communities of the alliance *Salicion herbaceae*, 7 – *Luzuletum spadiceae* sparse, 8 – *Luzuletum spadiceae*, 12 – *Luzuletum spadiceae* in a complex with the community of *Deschampsia flexuosa*, 13 – *Oreochloa distichae-Juncetum trifidi* in a complex with *Rhizocarpetalia*, 15 – *Oreochloa distichae-Juncetum trifidi sphagnetosum*, 16 – *Oreochloa distichae-Juncetum trifidi typicum* mossy form, 19 – *Oreochloa distichae-Juncetum trifidi typicum*, 20 – *Oreochloa distichae-Juncetum trifidi cetrarietosum*, 21 – *Oreochloa distichae-Juncetum trifidi* form with *Juncus trifidus*, 23 – *Oreochloa distichae-Juncetum trifidi* wet pioneer form with *Juncus trifidus*, 25 – *Oreochloa distichae-Juncetum trifidi caricetosum sempervirentis*, 26 – *Oreochloa distichae-Juncetum trifidi caricetosum sempervirentis* wet form, 28 – *Oreochloa distichae-Juncetum trifidi caricetosum sempervirentis* in a complex with *Calamagrostietum villosae tatricum*, 31 – *Oreochloa distichae-Juncetum trifidi caricetosum sempervirentis* sparse, 32 – *Oreochloa distichae-Juncetum trifidi* post-grazing subalpine form, 33 – *Oreochloa distichae-Juncetum trifidi* post-grazing subalpine wet form, 34 – *Oreochloa distichae-Juncetum trifidi* post-grazing subalpine sparse form with *Vaccinium myrtillus*, 36 – *Oreochloa distichae-Juncetum trifidi* post-grazing subalpine form with *Vaccinium myrtillus* in a complex with *Calamagrostietum villosae tatricum*, 37 – *Festuca picta* community, 38 – *Deschampsia flexuosa* community, 39 – *Deschampsia flexuosa* community in a complex with *Luzuletum spadiceae*, 40 – *Calamagrostietum villosae tatricum*, 41 – „*Vaccinietum myrtilli*”, 42 – „*Vaccinietum myrtilli*” sparse, 44 – „*Vaccinietum myrtilli*” in a complex with the community of *Deschampsia flexuosa*, 45 – „*Vaccinietum myrtilli*” Sphagnum-form, 46 – *Empetro-Vaccinietum*, 47 – *Pinetum mughi carpaticum*



Ryc. 9. Powierzchnia całkowita typów uroczysk
 objaśnienia – zobacz ryc. 8

Fig. 9. Area of stow types
 Explanations – see fig. 8



Ryc. 10. Średnia powierzchnia uroczyska wg typów
 objaśnienia – zobacz ryc. 8

Fig. 10. Average stow area
 Explanations – see fig. 8

Średnia szorstkość powierzchni

Wykorzystanie NMT umożliwiło obliczanie tradycyjnych metryk krajobrazowych z uwzględnieniem rzeczywistej rzeźby terenu. Jego zastosowanie było również podstawą opracowania kilku nowych metryk charakteryzujących ukształtowanie powierzchni (Hoechstetter i in. 2006, 2008). Najbardziej podstawową z nich jest średnia szorstkość powierzchni (*average surface roughness* – Ra):

$$Ra = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N |h_n|$$

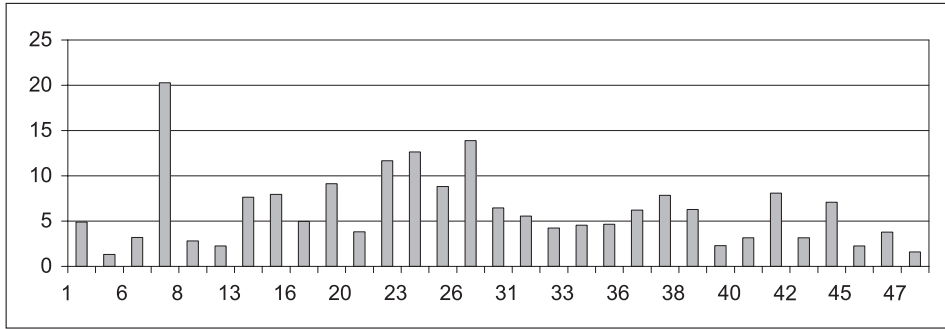
gdzie: N – liczba pikseli w obrębie danego obszaru, h_n – odchyłka między wysokością n-tego piksela a średnią wysokością obszaru.

Średnią szorstkość powierzchni obliczono według typów jednostek przestrzennych na obu obszarach badawczych (ryc. 11 i 12).

Wskaźnik ten ukazuje średnią z odchyżeń wysokości poszczególnych pikseli w poligonie od średniej wysokości tego poligonu. Otrzymane wartości są skorelowane ze średnią deniwelacją płatów poszczególnych typów. Zatem testowana metryka nie odzwierciedla oczekiwanej cechy krajobrazu – jego szorstkości – w analizowanym typie krajobrazu. Miarę tę zaproponowano (Hoechstetter i in. 2006) na podstawie badania wielkopowierzchniowych jednostek przestrzennych odzwierciedlających klasy użytkowania terenu w dolinie Łaby. Założeniem było występowanie w obrębie jednej jednostki przestrzennej niewielkich powierzchniowo wzniesień i obniżień terenu. Na obszarach wysokogórskich taka sytuacja występuje niezwykle rzadko. Masywy górskie zajmują relatywnie duże powierzchnie, jednostki przestrzenne (niezależnie od przyjętego modelu) są zaś w większości częściami stoku – żeby oddać szorstkość ich powierzchni, płaszczyzna odniesienia nie powinna być pozioma, a nachylona.

Pola geometryczne

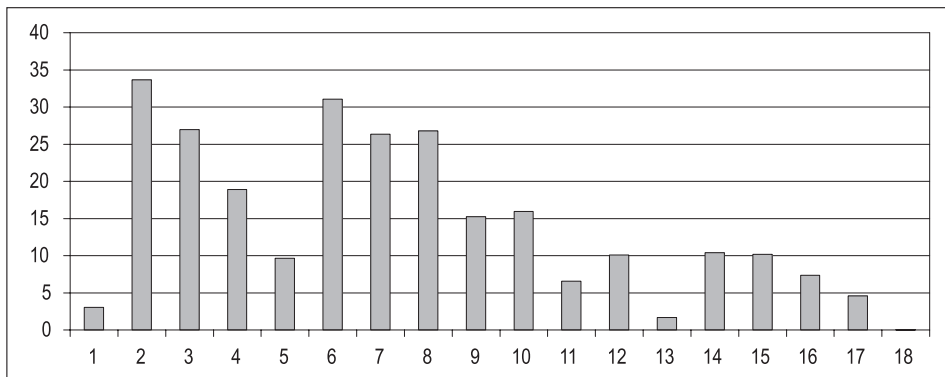
W badaniach krajobrazu zamiast przyrodniczych jednostek przestrzennych stosuje się czasem pola geometryczne (np. Krzymowska-Kostrowicka 1988; Balon 2007). Do zalet tej metody zalicza się względny obiektywizm wynikający z przypadkowości (ich wyznaczanie jest bowiem mechaniczne) oraz równość powierzchni wydzieleni. Jeżeli jednak badania dotyczą obszaru o skomplikowanej rzeźbie terenu i uwzględniona zostanie rzeczywista jego powierzchnia, drugie z tych założeń jest błędne. Na rycinie 13 zaprezentowano 34 kwadraty (najczęściej stosowane pola geometryczne) o wymiarach 100 × 100 m, ułożone na linii przecinającej poligon badawczy w zlewni Morskiego Oka. Powierzchnie wszystkich kwadratów są równe po zrzutowaniu na powierzchnię planimetryczną. Ich powierzchnia obliczona w 3D jest jednak bardzo zróżnicowana i może osiągać wartości ponad dwukrotnie wyższe od oczekiwanych (w obrębie ścian skalnych). Obliczenia wykonane dla całego obszaru wykazały, że powierzchnia poszczególnych kwadratów może przekraczać nawet 30 000 m². Ma to wpływ na obliczenia statystyczne, w których natężenie zjawiska odnosi się do powierzchni pól geometrycznych.



Ryc. 11. Średnia szorstkość powierzchni wg typów roślinności w Kotle Goryczkowym Świńskim
Objaśnienia – zobacz ryc. 5

Fig. 11. Average surface roughness according to vegetation types in Kocioł Goryczkowy Świński

Explanations – see fig. 5

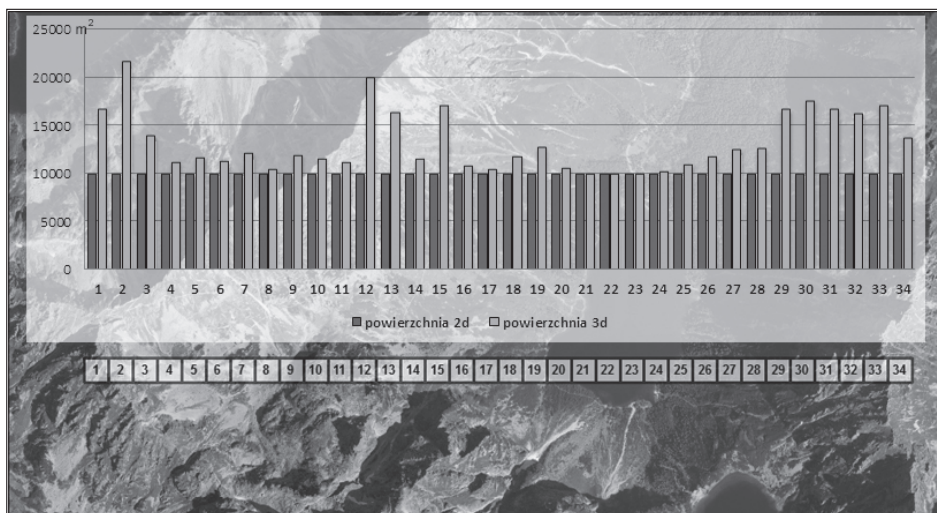


Ryc. 12. Średnia szorstkość powierzchni wg typów uroczysk w zlewni Morskiego Oka
Objaśnienia – zobacz ryc. 8

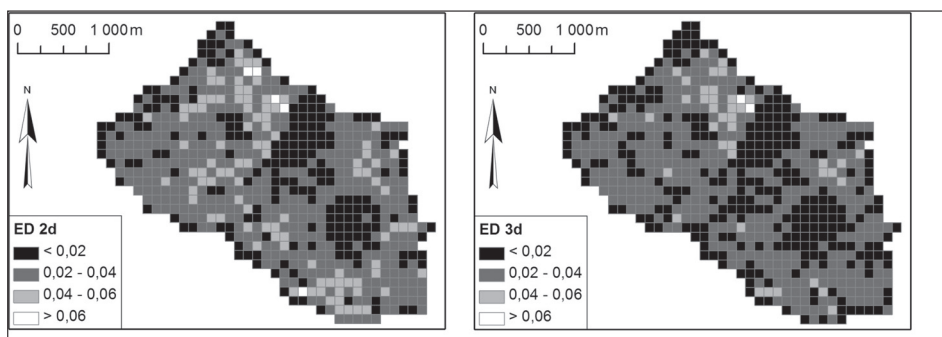
Fig. 12. Average surface roughness according to stow types in the Morskie Oko catchment

Explanations – see fig. 8

Przykładem metryki krajobrazowej, która może być obliczana przy wykorzystaniu pól geometrycznych, jest gęstość granic (ED). Na rycinie 14 zaprezentowano wyniki obliczeń wykonanych dla zlewni Morskiego Oka. Aby ukazać zróżnicowanie wyników, zignorowano fakt, że obliczenia 3D są metodycznie niepoprawne, ponieważ zmienną (długość granic) odnosi się do zmiennej (powierzchnia), zamiast odnosić ją do stałej. Obliczenia, w których uwzględniono rzeczywistą rzeźbę terenu, są podstawą oczywistego wniosku, że gęstość granic na wielu obszarach poligonu badawczego jest mniejsza, niż by to wynikało z obliczeń 2D.



Ryc. 13. Powierzchnia pól geometrycznych 100 × 100 m w przekroju zlewni Morskiego Oka
 Fig. 13. Area of geometric fields 100 × 100 m in the transect of the Morskie Oko catchment



Ryc. 14. Porównanie gęstości granic 2D i 3D w zlewni Morskiego Oka
 Fig. 14. Comparison of 2D and 3D edge density in the Morskie Oko catchment

Podsumowanie i wnioski

Obliczanie metryk krajobrazowych to istotny aspekt badań we współczesnej ekologii krajobrazu. Pozwalają one określić cechy struktury i funkcjonowania krajobrazu, co jest jednym z podstawowych celów, jakie stawia przed sobą ta dziedzina wiedzy. Są one wykorzystywane bardzo powszechnie, a więc zaprezentowany w niniejszej pracy problem sposobu ich pomiaru (w tym wypadku na obszarach wysokogórskich) jest bardzo ważny. Nie jest to problem łatwy i autorzy zdają sobie sprawę z tego, że zasadność stosowania metryk krajobrazowych 3D może zależeć od przynajmniej trzech czynników. Po pierwsze od celu – dla danego obszaru różnice między wartościami metryk krajobrazowych 2D i 3D mogą być ocenione jako nieistotne w kontekście konkretnego wykorzystania danych badań. Konstruowanie numerycznego modelu terenu jest natomiast pracochłonne. Po drugie, metodyka jest dopiero w fazie opracowań i nie wszystkie metryki 2D (dużą ich liczbę podają K. McGarigal i B.J. Marks, 1995) są opracowane dla trójwymiarowej geometrii; wiele wymaga testowania w różnych typach krajobrazu. Ostatnim z czynników jest skala. W małej skali powierzchni górotworu na mapie kontynentu będziemy skłonni określać na podstawie pomiaru na powierzchni planimetrycznej, niezależnie od wysokości szczytów – w tym wypadku bardziej istotne jest, jaki wycinek Ziemi – geoidy – on zajmuje. W dużych skalach, które zaprezentowano w niniejszej pracy, powinno się – zdaniem autorów – stosować geometrię trójwymiarową. Oczywiście również stosowany w takich badaniach NMT jest tylko modelem przybliżającym rzeźbę terenu, a nie rzeczywistym terenem, a w zależności od zastosowanego rodzaju tego modelu można otrzymać różniące się wartości metryk krajobrazowych. Jak wykazują badania (Stupariu i in., 2010), są to jednak rozbieżności nieistotne, wykazane zaś w niniejszej pracy różnice między wartościami metryk 2D i 3D są znaczne.

Do głównych wniosków płynących z przeprowadzonych badań, a odnoszących się do metryk krajobrazowych w krajobrazie wysokogórskim, należy zaliczyć poniższe.

1. Krajobraz stanowi wycinek przestrzeni trójwymiarowej (pomijając czas) i należy dążyć do wypracowania takiej metodyki jego opisu, prezentacji i badania, która pozwalałaby tę cechę w pełni uwzględnić.
2. Większość wartości przeanalizowanych metryk krajobrazowych różni się w zależności od zastosowanej metody – 2D lub 3D.
3. Gęstość płatów, gęstość granic i wskaźnik największego płata obliczone jako metryki 3D przybierają w stosunku do obliczeń tradycyjną metodą 2D wartości odpowiednio mniejsze, powierzchnia i całkowita długość granic są zaś większe.
4. Z obliczeń metryk krajobrazowych wykonanych dla poszczególnych typów geokompleksów w 2D i 3D można wysnuć sprzeczne wnioski na temat niektórych cech struktury krajobrazu. Dotyczy to w szczególności powierzchni zajmowanej przez poszczególne typy jednostek przestrzennych, a w mniejszym stopniu ich kształtu.
5. W strukturze krajobrazu zlewni Morskiego Oka odzwierciedlonego jako rzut na powierzchnię planimetryczną dominują stoki strome zwietrzelinowe, natomiast obliczenia wykonane z uwzględnieniem rzeczywistej rzeźby terenu wykazują, że największe powierzchnie zajmują ściany skalne. Analogicznie największymi

- powierzchniowo płatami w tym obszarze są w 2D stożki i hałdy usypiskowe, w 3D zaś – ściany skalne.
6. Płaty o kształcie wydłużonym zgodnie z linią spadku stoku mają w 3D wyższą wartość wskaźnika rozczłonkowania konturu, a płaty wydłużone w kierunku przeciwnym do spadku stoku – niższą. Wartość wskaźnika nie zmienia się dla płatów o kształcie zbliżym do koła.
 7. Istnieją metryki krajobrazowe, których wartości 2D i 3D na badanych obszarach są porównywalne – współczynnik zmienności powierzchni w Kotle Goryczkowym Świńskim, wskaźnik kształtu i wymiar fraktalny w zlewni Morskiego Oka.
 8. Średnia szorstkość krajobrazu jest metryką, która, według autorów, nie znajdzie zastosowania w krajobrazie wysokogórskim, gdyż nie jest dostosowana do jego specyfiki.
 9. Obliczenia wykonywane z wykorzystaniem pól geometrycznych i odnoszące się do ich powierzchni lub obwodów są w badanym typie krajobrazu (przy uwzględnieniu rzeczywistej rzeźby terenu) obarczone błędem.

Literatura

- Armand D.L., 1980, *Nauka o krajobrazie*, PWN, Warszawa.
- Balon J. 1992. *Struktura i funkcjonowanie polskiej części zlewni Białki w Tatrach*, rozprawa doktorska, IG UJ, Kraków.
- Balon J. 2007, *Stabilność środowiska przyrodniczego Karpat Zachodnich powyżej górnej granicy lasu*, IGiGP UJ, Kraków.
- Blaschke T., Tiede D., Heurich M., 2004, *3D landscape metrics to modeling forest structure and diversity based on laser scanning data*, International Archives of Photogrametry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 36, 8/W2, 129–132.
- Bočarov M.K., 1976, *Metody statystyki matematycznej w geografii*, PWN, Warszawa.
- Dorner B., Lertzman K., Fall J., 2002. *Landscape pattern in topographically complex landscapes: issues and techniques for analysis*, Landscape Ecology 17, 729–743.
- Drăguț L., Walz U., Blaschke Th., 2010, *The Third and Fourth Dimensions of Landscape: towards Conceptual Models of Topographically Complex Landscapes*, Landscape Online, 22, 1–10.
- Hoechstetter S., 2009, *Enhanced methods for analysing landscape structure. Landscape metrics for characterising three-dimensional patterns and ecological gradients*, Rhombos-Verlag, Berlin.
- Hoechstetter S., Thinh N.X., Walz U., 2006, *3D-indices for the analysis of spatial patterns of landscape structure* [w:] H. Kremers, V. Tikunov (red.), *Proceedings InterCarto-InterGIS 12*, International Conference on Geoinformation for Sustainable Development, Berlin, 108–118.
- Hoechstetter S., Walz U., Dang L.H., Thinh N.X., 2008, *Effects of topography and surface roughness in analyses of landscape structure – A proposal to modify the existing set of landscape metrics*, Landscape Online, 3, 1–14.
- Jenness J.S., 2004. *Calculating landscape surface area from digital elevation models*, Wildlife Society Bulletin 32, 829–839.
- McGarigal K., Marks B.J., 1995, *FRAGSTATS: spatial pattern analysis program for quantifying landscape structure*, Portland.

- Kozłowska A., 1999, *Problemy kartowania roślinności wysokogórskiej w skali szczegółowej (na przykładzie map roślinności Kotła Gąsienicowego i Goryczkowego Świńskiego* [w:] A. Kotarba, A. Kozłowska (red.), *Badania geologiczne w otoczeniu Kasprowego Wierchu*, Prace Geograficzne, IGiPZ PAN, 174, 37–44.
- Kozłowska A., Jakomulska A., 1999, *Struktura przestrzenna roślinności kotłów Gąsienicowego i Goryczkowego Świńskiego* [w:] A. Kotarba, A. Kozłowska (red.), *Badania geologiczne w otoczeniu Kasprowego Wierchu*, Prace Geograficzne, IGiPZ PAN, 174, 37–44.
- Krzymowska-Kostrowicka A., 1988, *Zagospodarowanie i ruch turystyczny*, Prace Geograficzne IGiPZ PAN, 147.
- Li Z., Zhu Q., Gold Ch., 2005, *Digital Terrain Modeling: Principles and Methodology*, USA, Boca Raton, CRC Press.
- Niedźwiecki J., 2005, *Mozaikowość krajobrazu wysokogórskiego na wybranych przykładach w Tatrach*, praca magisterska, WGiSR UW, Warszawa.
- Niedźwiecki J., 2009, *Badanie mozaikowości krajobrazu wysokogórskiego Tatr z wykorzystaniem transektów geologicznych*, *Problemy Ekologii Krajobrazu*, XXIII, 137–147.
- Pietrzak M., 1989, *Problemy i metody badania struktury geokompleksu (na przykładzie powierzchni modelowej Biskupice)*, UAM, Poznań.
- Pietrzak M., 2008, *Jednostki krajobrazowe – figury czy bryły?*, *Problemy Ekologii Krajobrazu*, XX, Warszawa, 153–162.
- Richling A., Solon J., 2002, *Ekologia Krajobrazu*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa.
- Solon J., 2002, *Ocena różnorodności krajobrazu na podstawie analizy struktury przestrzennej roślinności*, Prace Geograficzne IGiPZ PAN, 185.
- Stupariu M.-S., Pătru-Stupariu I., Cuculici R., 2010, *Geometric approaches to computing 3D-landscape metrics*, *Landscape Online*, 24, 1–12.
- Zonneveld I.S., 1989, *The land unit – A fundamental concept in landscape ecology, and its applications*, *Landscape Ecology*, 3, 2, 67–86.

Jan Niedźwiecki
Uniwersytet Jagielloński
Instytut Geografii i Gospodarki Przestrzennej
ul. Gronostajowa 7, 30-387 Kraków
e-mail: jniedzwiecki@geo.uj.edu.pl

Natalia Kolecka
Uniwersytet Jagielloński
Instytut Geografii i Gospodarki Przestrzennej
ul. Gronostajowa 7, 30-387 Kraków
e-mail: nkolecka@gis.geo.uj.edu.pl

