

Streszczenie

Wojciech Drzewiecki, Stanisław Mularz, Tomasz Pirowski: Generowanie map spadków i ekspozycji pod nadzorem różnych systemów GIS

W artykule przedstawiono wyniki testowania wybranych pakietów GIS w zakresie sposobu generowania map spadków i ekspozycji z Numerycznego Modelu Rzeźby Terenu (NMRT). Do badań wykorzystano cztery sztucznie symulowane modele powierzchni terenu zapisane w formacie rastrowym. Stwierdzono różnice w sposobie działania poszczególnych algorytmów prowadzące niekiedy do istotnych, z punktu widzenia interpretacji, zniekształceń w odtwarzaniu geometrii, zwłaszcza małych form o rozmiarach 1 do 3 pikseli.

Summary

Wojciech Drzewiecki, Stanisław Mularz, Tomasz Pirowski: Generating slope and aspect maps using different GIS packages

The results of testing of slope and aspect map generating methods based on the Digital Terrain Model (DTM), using the selected GIS packages, are presented. The four artificially simulated terrain surface models in raster format have been used for this test. The essential differences of slope and aspect values, calculated using different algorithms, have been found. This is very important from the interpretation point of view, because may caused an incorretly of reconstruction some elements of the surface geometry (slope/aspect), especially within the small landforms of the 1 - 3 pixels wide.

Wojciech Drzewiecki*, Stanisław Mularz*, Tomasz Pirowski*

Generowanie map spadków i ekspozycji pod nadzorem różnych systemów GIS**

1. Wprowadzenie

Systemy Informacji Geograficznej (GIS) są coraz powszechniej wykorzystywane w badaniach środowiska przyrodniczego i modelowaniu zachodzących w nim procesów. Procedurą bardzo często stosowaną w tego rodzaju studiach jest obliczanie nachylenia i ekspozycji na podstawie Numerycznego Modelu Rzeźby Terenu (NMRT). Te charakteryzujące ukształtowanie powierzchni terenu parametry nabierają szczególnego znaczenia w badaniach z zakresu geomorfologii i hydrologii, jak również w tych zastosowaniach technik teledetekcyjnych, w których konieczne jest usunięcie tzw. efektu topografii.

Możliwość obliczenia nachyleń i ekspozycji na podstawie NMRT oferowana jest przez wiele znajdujących się na rynku pakietów oprogramowania. Analizy takie dostępne są przede wszystkim w systemach informacji geograficznej (GIS), z których znaczna część pracuje w oparciu o rastrową (macierzową) strukturę danych. Wyniki obliczeń wykonywanych przy pomocy poszczególnych programów różnią się jednak między sobą. Spowodowane jest to stosowaniem w nich odmiennych algorytmów obliczeniowych. Dużego znaczenia nabiera zatem fakt posiadania przez interpretatora świadomości sposobu działania tego rodzaju algorytmów i wiedzy o ograniczeniach poszczególnych systemów.

Stosowane powszechnie algorytmy obliczeniowe bazują na wartościach pikseli w oknie 3x3, a wynik obliczeń przypisywany jest centralnej komórce okna. Procedury obliczeniowe korzystają zwykle z informacji pochodzącej z czterech lub ośmiu sąsiadów, rzadko biorąc pod uwagę wartość piksela centralnego.

Badania dotyczące testowania algorytmów obliczania nachyleń i ekspozycji prowadzone były przez różnych autorów: Skidmore A. K. [7], Hodgson M. E. [2], Jones K. H. [4]. M. E. Hodgson [2] i K. H. Jones [4] badali działanie algorytmów obliczania nachyleń i ekspozycji na powierzchni testowej znanej jako powierzchnia Morrisona III. Jest to

* Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Geodezji Górniczej i Inżynierii Środowiska

sztuczna powierzchnia topograficzna, zdefiniowana za pomocą układu 49 równań trygonometrycznych.

Wyniki uzyskane niezależnie przez obu autorów są zbieżne. Za najlepszy uznają oni oparty na czterech pikselach algorytm Rittera [5]. Głównym jednak celem jaki stawiał sobie Hodgson [2] była odpowiedź na pytanie: dla jakiego obszaru reprezentatywne są wielkości nachylenia i ekspozycji uzyskane przy zastosowaniu poszczególnych algorytmów obliczeniowych? Wyniki jego badań wskazują, iż otrzymane wartości w najlepszy sposób charakteryzują powierzchnię od 1,6 do 2,0 razy większą od rozmiarów centralnego piksela w używanym oknie 3x3. Stąd wyprowadza wniosek, że nachylenie i ekspozycję powinno się określać z cyfrowego modelu rzeźby terenu o rozdzielczości większej niż pozostałe dane, które mają być łącznie z nimi analizowane.

Do wniosków odmiennych od przedstawionych powyżej doszedł w efekcie prowadzonych przez siebie testów algorytmów liczących nachylenia i ekspozycję Skidmore [7]. Uważa on mianowicie, że lepsze efekty dają algorytmy oparte na ośmiu punktach niż te oparte na czterech. Skidmore przeprowadzał swój test na numerycznym modelu rzeźby terenu powstałym w oparciu o digitalizację klasycznej mapy warstwicznej, a otrzymane wielkości nachyleń i ekspozycji porównywał z wielkościami obliczonymi z tejże mapy.

Przytoczone powyżej przykłady dowodzą, iż problem wyboru właściwego algorytmu obliczania nachyleń i ekspozycji jest od dłuższego czasu obecny w problematyce badawczej i wydaje się nie tracić na znaczeniu. Badania, których wyniki przedstawione są w niniejszym artykule miały jednak specyficzny charakter, odmienny od charakteru badań przedstawianych w dostępnej nam literaturze. Postanowiono bowiem przetestować nie algorytmy obliczeniowe podawane przez poszczególnych autorów, ale powszechnie dostępne systemy GIS, włączając dodatkowo do testu pakiet SURFER (Tab. 1, 2).

Głównym celem eksperymentu było sprawdzenie ich działania w specyficznych warunkach symulowanych przez odpowiednio zaprojektowane sztuczne pola testowe oraz określenie ewentualnych ograniczeń stosowania tych algorytmów. Dodatkowo - dla systemów o niepełnej dokumentacji - podjęto próbę określenia postaci algorytmów stosowanych do obliczania nachyleń.

** Praca wykonana w ramach badań statutowych AGH nr 11.150.47

2. Algorytmy stosowane w testowanych programach

Algorytmy, używane do obliczania nachyleń w testowanych programach podzielić można na działające w oparciu o informację pochodzącą z czterech, ośmiu lub dziewięciu pikseli. W każdym przypadku analiza prowadzona jest w oknie 3x3 piksele, a jej wynik przypisywany pikselowi centralnemu (Rys. 1.).

Cztery piksele stanowią podstawę obliczeń spadków i ekspozycji w programie IDRISI. Zastosowano tu metodę Fleminga i Hoffera [1] w formie algorytmu zaproponowanego przez Rittera [5], a znanego pod nazwą „rook’s case”. Sposób obliczeń przedstawia się następująco:

$$\text{Spadek}_x = (Z1 - Z3) / (2 * L_x)$$

$$\text{Spadek}_y = (Z4 - Z2) / (2 * L_y)$$

$$\text{Spadek} = (\text{Spadek}_x^2 + \text{Spadek}_y^2)^{1/2}$$

Na ośmiu pikselach oparto obliczenia nachyleń w programach ERDAS IMAGINE i ARCINFO GRID. W pierwszym z nich zastosowano algorytm zaproponowany przez Sharpnacka i Akina [6]:

$$\text{Spadek}_x = [(Z8 + Z1 + Z5) - (Z7 + Z3 + Z6)] / (6 * L_x)$$

$$\text{Spadek}_y = [(Z7 + Z4 + Z8) - (Z6 + Z2 + Z5)] / (6 * L_y)$$

$$\text{Spadek} = (\text{Spadek}_x^2 + \text{Spadek}_y^2)^{1/2}$$

W programie ARCINFO GRID obliczenia wykonywane są w oparciu o algorytm Horna [3]. W tym przypadku poszczególnym pikselom przypisywane są wagi proporcjonalne do odwrotności kwadratu odległości od piksela centralnego:

$$\text{Spadek}_x = [(Z8 + 2*Z1 + Z5) - (Z7 + 2*Z3 + Z6)] / (8 * L_x)$$

$$\text{Spadek}_y = [(Z7 + 2*Z4 + Z8) - (Z6 + 2*Z2 + Z5)] / (8 * L_y)$$

$$\text{Spadek} = (\text{Spadek}_x^2 + \text{Spadek}_y^2)^{1/2}$$

W systemie ARCINFO GRID dostępna jest również inna metoda obliczania nachyleń i ekspozycji (polecenie CURVATURE). Jest to realizacja metody Fleminga i Hoffera za pomocą innego niż w przypadku IDRISI algorytmu (Zevenbergen i Thorne [9]). Wartości wszystkich dziewięciu pikseli w oknie 3x3 wykorzystywane są do obliczenia współczynników częściowej kwadratowej powierzchni trendu (*a partial quadratic trend surface*) przechodzącej dokładnie przez środek każdego piksela w analizowanym oknie.

W efekcie otrzymujemy wielomian postaci:

$$Z = Ax^2y^2 + Bx^2y + Cxy^2 + Dx^2 + Ey^2 + Fxy + Gx + Hy + I, \text{ gdzie}$$

$$A = [(Z5 + Z6 + Z7 + Z8) / 4 - (Z2 + Z1 + Z3 + Z4) / 2 + Z9] / L^4$$

$$B = [(Z5+Z6-Z7-Z8)/4 - (Z2-Z4)/2] / L^3$$

$$C = [(-Z5+Z6-Z8+Z7)/4 + (Z1-Z3)/2] / L^3$$

$$D = [(Z1+Z3)/2 - Z9] / L^2$$

$$E = [(Z2+Z4)/2 - Z9] / L^2$$

$$F = (-Z5+Z6+Z8-Z7) / (4 * L^2)$$

$$G = (-Z1+Z3) / (2*L)$$

$$H = (Z2-Z4)/(2*L)$$

$$I = Z9$$

Na tej podstawie wyliczana jest wartość nachylenia i ekspozycji w środku piksela centralnego. Otrzymywane wyniki są identyczne jak w systemie IDRISI (z wyjątkiem krawędzi obszarów testowych), ale algorytm ten umożliwia również analizę wklęsłości i wypukłości poprzez obliczanie drugiej pochodnej.

W przypadku programu MGE GRID ANALYST autorzy nie mają całkowitej pewności co do postaci używanego algorytmu. Biorąc jednak pod uwagę, że obliczanie nachyleń i ekspozycji realizowane jest poprzez zaimplementowany w tym programie język MAP ALGEBRA, można przypuszczać, iż sposób obliczeń odpowiada opisowi podanemu przez twórczynię tego języka w książce "Geographic Information Systems and Cartographic Modeling" (Tomlin [8]). Propozycja ta polega na wpasowaniu płaszczyzny aproksymowanej metodą najmniejszych kwadratów w oknie 3x3 piksele, a następnie wyliczeniu jej ekspozycji i nachylenia. Byłby to więc algorytm oparty na wartościach dziewięciu pikseli.

W tym miejscu należy zaznaczyć, iż udowodniono, że algorytm Sharpnacka i Akina daje takie same rezultaty jak wpasowanie powierzchni metodą najmniejszych kwadratów w osiem pikseli otaczających piksel centralny (Hodgson 1995). Istnieją również przykłady otrzymania identycznych rezultatów w przypadku algorytmu Sharpnacka i Akina oraz wpasowania powierzchni metodą najmniejszych kwadratów w dziewięć pikseli (Jones 1998). Również podczas całego przeprowadzonego przez nas testu wyniki otrzymywane w programach MGE GRID ANALYST i ERDAS IMAGINE (algorytm Sharpnacka i Akina) były identyczne (z wyjątkiem pikseli położonych na krawędziach obszarów testowych).

Program SURFER dawał identyczne rezultaty jak programy IDRISI i ARC/INFO GRID (polecenie CURVATURE) oparte o metodę Fleminga i Hoffera (1979). Nie można

jednak stwierdzić, który z algorytmów jest w nim stosowany, aczkolwiek możliwość dokonania analiz wklęsłości/wypukłości wskazywać może na algorytm zaproponowany przez Zeuberbergena i Thorna [9].

W programie PCRAster użytkownik wybrać może jeden z trzech sposobów obliczania wartości nachyleń (spadek maksymalny, średni, minimalny). W celu określenia spadku maksymalnego program wylicza nachylenia pomiędzy pikselem centralnym a każdym z jego ośmiu sąsiadów. Następnie spośród wyników wybierany jest maksymalny. Podobny przebieg mają obliczenia spadku minimalnego, z tą tylko różnicą, że wybierany jest najmniejszy z ośmiu policzonych spadków. Wymienione algorytmy używają więc informacji pochodzącej ze wszystkich dziewięciu pikseli, w oknie 3x3, ale ostatecznie wynik otrzymywany jest na podstawie wartości piksela centralnego i jednego z jego sąsiadów. W przypadku wyboru opcji obliczania nachylenia średniego następuje uśrednienie wartości spadków wyliczanych pomiędzy pikselem centralnym a każdym z jego ośmiu sąsiadów.

Największe problemy teoretyczne sprawiła autorom metoda obliczeń zastosowana w programie MGE TERRAIN ANALYST. Niestety nie jesteśmy w stanie określić sposobu w jaki dokonywane są obliczenia. Wydaje się jednak, iż wczytywany do programu numeryczny model rzeźby terenu w formie regularnej siatki stanowi dla programu dane w postaci punktów, na podstawie których tworzy on swój własny model zagęszczając niejako oryginalną siatkę (interpolując pomiędzy węzłami wprowadzonej siatki). Dopiero tak przetworzony model poddawany jest dalszym analizom.

3. Charakterystyka pól testowych

Cztery sztucznie spreparowane pola testowe stanowiły kanwę dla oceny poprawności generowania map spadków i ekspozycji w wybranych pakietach GIS. Oparcie badań na sztucznie generowanych polach testowych można uzasadnić następująco:

1. Budowa małych obszarów "piksel po pikselu" pozwoliła uzyskać pełną kontrolę nad wartością każdej komórki pola testowego. Dzięki temu można było trafnie odczytać ukształtowanie powierzchni i obliczyć spadek i/lub ekspozycję w danym punkcie bez uciekania się do skomplikowanego aparatu matematycznego. Odwracając ten proces można było w prosty sposób dowolną, zgeometryzowaną powierzchnię przedstawić w postaci zbioru dyskretnych wartości przyporządkowanych przestrzennie kolejnym

pikselom;

2. Prosta forma obiektów na sztucznych polach testowych ułatwiły względne porównanie map spadków, generowanych różnymi algorytmami, także pod kątem zdolności zachowywania przez nie krawędzi pomiędzy płaszczyznami o różnym nachyleniu i ekspozycji oraz pozwalał na określenie zdolności do prawidłowego odwzorowania lokalnych zaburzeń spadków w obrębie małych form;

3. Zgeometryzowane obiekty nie były tworamii oderwanymi zupełnie od rzeczywistości. Ich fragmenty bądź modyfikacje, a także podobne układy przestrzenne obiektów odnaleźć można również w odwzorowaniach terenu rzeczywistego, szczególnie tam, gdzie został on przekształcony wskutek działalności człowieka.

Oznacza to więc, że badania prowadzone na sztucznych polach testowych i zawartych na nich obiektach można odnieść wprost do rzeczywistych warunków i również pod tym kątem oceniać skuteczność działania algorytmów.

Tym sposobem można było również jednoznacznie wykazać pewne rozbieżności interpretacji ukształtowania powierzchni terenu przez poszczególne algorytmy, co w odniesieniu do modelu danych rzeczywistych nie byłoby możliwe z uwagi na ich ogromne zróżnicowanie i ilość.

3.1. Pole testowe Nr 1

Pole testowe stanowiły trzy niezależne okna o wymiarach 3x3 piksele. Wielkość pojedynczego piksela 20x20j (jednostek) (Rys. 2.). Tak zaprojektowane pole testowe posłużyło do określenia sposobu działania algorytmów proponowanych przez różne systemy. Wartości otaczające piksele środkowe w kolejnych oknach (3x3) zostały dobrane w ten sposób, aby przez porównanie wartości spadków na trzech kluczowych komórkach można było zdefiniować rodzaj algorytmu.

3.2. Pole testowe Nr 2

Pole testowe o wymiarach 50 x 50 pikseli symulowało skarpcę (hałdę, teren rekultywowany itp.) o ekspozycji zachodniej i zmiennym nachyleniu 10% w części górnej, 20% w części środkowej i 10% na dole, u podnóża. Wielkość piksela 20x20j (Rys. 3.). Głównym zadaniem była tutaj analiza zachowania algorytmów na granicach zmiany nachylenia poszczególnych odcinków skarpy.

Na płaszczyznach o nachyleniu 10% zaprojektowano elementy o charakterze depresji

terenowych równoległe i prostopadłe do linii spadków. Każdy z nich dzieli się na dwa fragmenty: jeden o stałej wysokości oraz drugi o wysokości liniowo zmniejszającej się. Elementy te mają symulować pewne obiekty, które mogą znaleźć się na skarpie bądź zboczu rzeczywistym jak drogi, kanały, ciekły wodne, wkopy, rowy. Ocenie poddawano zdolność algorytmów do prawidłowego określania spadków na odcinkach obniżonych. Dla oceny zdolności przestrzennej algorytmów do prawidłowego określania spadków wokół obniżenia terenu każdy z dwóch obiektów (równoległy i prostopadły do skarpy) został powielony ze zmienioną szerokością. Dodatkowo wokół obiektów równoległych do skarpy wprowadzono obniżenia terenu symulujące brzegi ukształtowane w postaci skarpy. Dla obiektów o przebiegu zgodnym z linią największego spadku skarpy wprowadzono ostrą zmianę wysokości, mogącą symulować np. wąwóz, głęboki wykop o stromych ścianach. Analiza elementów o różnych szerokościach (1, 2 lub 3 piksele) miała na celu określenie minimalnych rozmiarów obiektu, przy których dany algorytm poprawnie oblicza wielkość nachylenia w obniżeniu terenu oraz w jego otoczeniu.

3.3 Pole testowe Nr 3

Pole testowe o wymiarach 50 x 50 pikseli (rozdzielczość 20x20j.), płaskie, zawierające obniżenia terenu biegnące skośnie. Każde z trzech odrębnych obniżień posiada inną szerokość, charakter zmian wysokości wewnątrz obniżień jest podobny: część jest płaska, pozostały fragment jednostajnie opada. Każde z obniżień ma charakter gwałtownego uskoku o prostopadłych ścianach. Formy te mogą symulować np. wąskie, strome rowy, rzeki lub drogi w wąwozach. Głównym zadaniem tego testu jest określenie zdolności algorytmów do wychwytywania obiektów idących po przekątnej w zależności od ich szerokości oraz zdolności do określania wewnątrz nich nachyleń. To pole testowe koresponduje z poprzednim polem testowym i stanowi niejako jego uzupełnienie.

3.4. Pole testowe Nr 4

Pole testowe o wymiarach 24 x 24 piksele (rozdzielczość 20x20j.), płaskie, zawierające duży obiekt geometrycznie przypominający czworościan o podstawie trójkąta prostokątnego o równoramiennych bokach (Rys. 8). Obiekt ten posiada trzy ekspozycje: południową (S), zachodnią (W) i - od strony przeciwprostokątnej podstawy - północno-wschodnią (NE) oraz nachylenia odpowiednio: 20%, 20% i 14,14%. Na styku trzech płaszczyzn budujących „piramidę” znajduje się trójpikselowy wierzchołek. Od

wierzchołka rozchodzą się trzy krawędzie będące granicą ścian budujących obiekt, przy czym żadna z nich nie przebiega wzdłuż kolumn lub wierszy obrazu. Podstawę „piramidy” tworzą trzy krawędzie styku obiektu z terenem płaskim o przebiegu 0, 45 i 90 stopni w stosunku do kierunku wierszy i kolumn obrazu.

Głównym celem testu była ocena możliwości algorytmów do generowania ostrych krawędzi nie przebiegających pod charakterystycznym kątem względem siatki rastra. Chodziło w tym przypadku o sposób odwzorowania powierzchni jaką algorytmy przypisały do poszczególnych ścian "piramidy" jak również określenie wartości ekspozycji i nachylenia dla pikseli "granicznych".

4. Konwersja danych pomiędzy systemami

Poszczególne pola testowe zostały utworzone w programie IDRISI. Przetestowanie działania poszczególnych programów wymagało dokonania konwersji danych do formatów akceptowanych przez poszczególne systemy, a następnie, w celu porównania otrzymanych wyników, konwersji do programu IDRISI. Dobór sposobów konwersji danych prowadzony był w taki sposób, aby - o ile było to możliwe - w nowym formacie zapisywane były nie tylko wartości poszczególnych pikseli, ale również parametry przestrzenne obrazów. Zastosowane metody zebrano w tabeli. Z pewnością nie wyczerpują one wszystkich istniejących możliwości. Należy również zaznaczyć, że konwersji poddawano pliki o niewielkich rozmiarach.

5. Badania

5.1. Zdolność odwzorowywania płaszczyzn i ich krawędzi

Ocena polegała na określeniu stopnia zdolności programów do zachowywania charakterystycznych linii załamania płaszczyzn na mapach spadków. Jako test posłużyły obiekty zawarte na polu testowym drugim i czwartym.

Wszystkie algorytmy prawidłowo odczytały ekspozycję zachodnią drugiego pola testowego (Rys. 9). Większość systemów (ARCC, ARCS, ERD, MGA, IDR, SURF)* identycznie zinterpretowała spadki. Płaszczyznom przyporządkowane zostały wartości nachyleń zgodnie z oczekiwaniami: 10% i 20%, a na kolumnach przylegających do krawędzi nastąpiło uśrednienie wartości spadków do 12,5% i 17,5%. Zamiast krawędzi

* Skróty stosowane na oznaczenie testowanych programów zawarto w tabeli 2.

dzielącej płaszczyzny o różnych nachyleniach pojawiły się więc dwupikselowe formy pośrednie „zmiękczające” rzeczywiste ukształtowanie terenu (Rys. 9 a, b).

Nieco inaczej zachowały się algorytmy MTA i PCRM, które wprowadziły jedynie jedną kolumnę pośrednią o wartości 15%. To zawężenie się strefy pośredniej nie znajduje jednak uzasadnienia w modelu skarpy, gdyż jest niesymetryczne względem krawędzi.

Zupełnie inaczej zadziałały algorytmy PCRA i PCRI. Żaden z nich nie potrafił prawidłowo obliczyć nawet nachylenia głównych płaszczyzn. Pierwszy z nich podawał wartości spadków ok. 6,2% oraz 12,4% zamiast oczekiwanych 10 i 20 %. Drugi – PCRI – na całym obszarze dał w wyniku wartości 0%. Te dziwne rezultaty udało się wyjaśnić poprzez empiryczne uzyskanie algorytmów jakimi posługuje się program obliczając spadki. Metody te należy odrzucić jako nie przystające do klasycznego wyobrażenia nachyleń, natomiast mogą one być interesującymi procedurami dla innych, specyficznych zastosowań. Dla przejrzystości pominięto je w dalszych analizach porównawczych, natomiast szersze o nich uwagi oraz propozycje ich wykorzystania znajdują się w dalszej części artykułu.

Reasumując: zachowanie się algorytmów na krawędziach płaszczyzn leżących wzdłuż kolumn lub wierszy nie daje w pełni satysfakcjonujących rezultatów. Żaden z algorytmów nie potrafił zachować na mapie spadków ostrego przejścia pomiędzy płaszczyznami. Dodatkowo wyniki MTA i PCRM nie pozwalają na jednoznaczne określenie krawędzi, gdyż pomiędzy powstałą średnią kolumną wartości a nachyleniami płaszczyzn powstają dwa przejścia o jednakowym skoku wartości nachyleń (tylko jedno z nich jest rzeczywiście krawędzią). Wydaje się, że za najlepsze wyniki należy uznać wprowadzenie dwóch pośrednich poziomów spadków na krawędziach. Powoduje to wprawdzie pewne rozmycie krawędzi, jednak jej umiejscowienie nadal pozostaje czytelne: jest to krawędź leżąca pomiędzy pikselami o największej różnicy spadków. Podobne zjawisko potwierdza analiza czwartego pola testowego (Rys. 10). Rozmycie krawędzi biegnących skośnie od wierzchołka w kierunkach SEE i NNW jest zbliżona w systemach ARCC, ARCS, ERD, MGA, IDR, SURF przy czym nieco wyraźniejsze krawędzie obserwuje się dla algorytmu IDR, SURF i ARCC. Program MTA odbiega od wymienionych zdecydowanie wyraźniej rysując krawędzie, a ostatni z algorytmów – PCRM – w ogóle nie pokazuje wartości pośrednich spadków jednoznacznie przypisując

pikselom wartości nachyleń ścian piramidy. Wprawdzie wydaje się to być korzystne, jednak dokładna analiza przebiegu zmiany nachyleń proponowanych przez PCRM wykazuje przesunięcia, przy czym dodatkowo ekspozycje generowane przez ten program nie przystają do mapy nachyleń.

Ostatnią interesującą krawędzią „piramidy” jest granica biegnąca od wierzchołka w kierunku SW. Optymalnie zinterpretowały ten obszar moduły systemów IDR, ARCC i SURF, prawidłowo odczytując ekspozycję i wprowadzając niewielkie, jednopikselowe rozmoczenie krawędzi. Większość pozostałych programów (ARCS, MGA, ERD) również nie popełniła błędów, natomiast w znacznie większym stopniu rozmyła przejście pomiędzy obiema płaszczyznami „piramidy”.

Program PCRM utrzymał na całym obszarze jednakowe nachylenie – również na samej krawędzi. Okazuje się jednak, że mapa ekspozycji na tym obszarze zupełnie fałszuje ukształtowanie terenu, co praktycznie dyskwalifikuje ten system jako narzędzie klasycznych analiz ekspozycji i spadków.

Ostatni z systemów – MTA – podobnie jak PCRA przypisuje na tym obszarze jednakowe wartości spadków. Dla tak podanych spadków przypisana im ekspozycja jest w pełni uzasadniona. Kwestią dyskusyjną pozostaje jednak fakt, czy na obszarze tak symetrycznym – gdzie osią jest właśnie badana krawędź SE – właściwe jest proponowane podejście MTA czy pozostałych systemów, a w szczególności metoda IDR/SURF/ARCC.

5.2. Zdolność rejestracji niewielkich, liniowych form terenu

5.2.1. Formy o szerokości jednego piksela

Prawidłowe odczytywanie przez programy spadków w zagłębieniach jednopikselowych było uzależnione w dużym stopniu od kierunku przebiegu obniżenia. Dla przebiegu prostopadłego bezbłędne wyniki uzyskano metodą IDR/SURF/ARCC na linii obniżenia. Pozostałe systemy w mniejszym lub większym stopniu podały wartości odbiegające od rzeczywistości. Największe błędy zanotowały MTA i PCRM, które – w skrajnym przypadku - podały spadki rzędu 50-80% na terenie płaskim. Ekspozycje zostały odczytane prawidłowo z wyjątkiem MTA, gdzie ekspozycje na odcinku opadającym 270 zostały podane w przedziale 333-346.

Z kolei dla układu skośnego (po przekątnej) sytuacja jest odwrotna (Rys. 11.). Nie

sprawdza się tu algorytm IDR/SURF/ARCC, który na całym obszarze zagłębienia podaje nachylenie równe zero i nie określa tam ekspozycji. Pozostałe programy prawidłowo odczytują ekspozycję 135° , z wyjątkiem MTA, który „myli” ją aż o 180° (!).

Spadek terenu liczony przez algorytmy MGA, ERD, ARCS prawidłowo dzieli zagłębienie na dwie strefy: płaską i nachyloną, przy czym wartość nachylenia równą $7,1\%$ najlepiej odczytuje ERD/MGA ($4,6\%$). Zupełnie nie radzi sobie z tak małym elementem MTA, który podaje nawet na terenie płaskim nachylenia sięgające 35% . Zagłębienia poszerzone o skarpy nie zostały prawidłowo zinterpretowane (Rys. 9 c, d, e). Położenie na zboczu, pośród wałów spowodowały tak różny układ danych wokół samego obniżenia, że żaden z systemów nie mógł wyekstrahować informacji istotnej na tym obszarze.

5.2.2. Formy o szerokości dwóch pikseli

Zachowanie się algorytmów na obszarach o dwupikselowej szerokości było dużo mniej zróżnicowane. Wszystkie programy – poza MTA - wygenerowały formę wklęsłą w kształcie litery „V”. Algorytm MTA zadziałał asymetrycznie w stosunku do danych wejściowych, co w efekcie dało jeden pas pikseli idealnie odtwarzający wielkości spadków i ekspozycji, podczas gdy drugi identyczny otrzymał wartości takie, jak pas pikseli leżący po przeciwnej stronie stanowiący fragment terenu ponad obniżeniem. Tak więc w efekcie nastąpiło niejako zmniejszenie szerokości zagłębienia o jeden piksel (Rys. 9 d).

W przypadku skośnego przebiegu zagłębień sytuacja jest analogiczna. Zachowany jest wciąż kształt litery V, przy występujących pomiędzy systemami niewielkich różnicach wielkości nachyleń i ekspozycji. Najlepsze rezultaty otrzymano w przypadku MGA, przy czym żaden z algorytmów nie odtworzył terenu płaskiego. W przypadku MTA dla poszczególnych pasów zagłębienia i przylegającego do niego bezpośrednio terenu wygenerowane zostały ekspozycje o kierunkach różniących się o 90 stopni, co w efekcie tworzy dziwną, „schodkowo-blokową” strukturę.

5.2.3. Formy o szerokości trzech pikseli

Badane oprogramowanie w najlepszy sposób odzwierciedla wzorcową rzeźbę terenu w przypadku rowów o szerokości trzech pikseli (Rys. 9 e). Dla testowanego obiektu w formie obniżenia o szerokości trzech pikseli i brzegach o charakterze skarpy otrzymano w

analizowanych programach przekrój w kształcie litery U, przy czym algorytm MTA popełnił błąd polegający na przesunięciu obniżenia oraz zmienił ekspozycję terenu na jednym z brzegów.

Dla rowów przebiegających zgodnie z kierunkiem zbrocza każdy z programów podaje właściwe wartości nachyleń i ekspozycji środkowego pasa pikseli leżących w obniżeniu. Skrajne pasy zostały zniekształcone i otrzymały takie wartości, jak gdyby były to skarpy nachylone w kierunku spadku zbrocza. Program MTA zachował się podobnie jak w przypadku rowów dwupikselowych: podał poprawne wartości dla dwóch pasów pikseli, zawężając obniżenie o jeden piksel.

Dla skośnego przebiegu zagłębień uzyskano wartości nachyleń i ekspozycji odpowiadające przekrojowi w kształcie litery U, przy czym wartości w centralny pasie pikseli odpowiadają rzeczywistemu nachyleniu, natomiast pozostałe fragmenty obniżenia zostały zinterpretowane jak w przypadku rowów o przebiegu zgodnym z kierunkiem zbrocza.

6. Dyskusja

Pośród analizowanych systemów można wydzielić dwie charakterystyczne grupy: programy dające zbliżone wyniki możliwe intuicyjnie do przewidzenia (ARCC, ARCS, IDR, SURF, ERD) oraz programy odbiegające od pozostałych, często w sposób znacząco różny interpretujące przestrzenny model (PCRA, PCRM, PCRI, MTA).

W pierwszej grupie znalazły się wszystkie programy o algorytmach korzystających w klasyczny sposób z okna obliczeń 3x3 piksele. Dobre rezultaty uzyskano również stosując moduł ARCINFO GRID Slope, który jest rozwiązaniem pośrednim pomiędzy algorytmami opartymi o 4 a algorytmami opartymi o 8(9) pikseli. Przypisuje on mianowicie dwukrotnie większą wagę do pikseli przylegających do piksela centralnego niż do pikseli narożnych - zgodnie z kwadratem odległości między środkami pikseli. Wyniki działania tego algorytmu są bardzo zbliżone do metody ERD/MGA: krawędzie są w tym przypadku nadal rozmyte, nie występują błędy na obiektach skośnych, pojawiają się natomiast niedokładności na obiektach przebiegających wzdłuż wierszy (kolumn). Programy ERDAS i MGE GRID ANALYST we wszystkich testowanych przypadkach dawały identyczne rezultaty dla nachyleń i ekspozycji (różnice występowały jedynie na krawędziach obszaru testowego).

ERDAS wykorzystuje 8-pikselowy algorytm zaproponowany przez Sharpnacka i Akina [6]. Odwzorowuje on krawędzie najslabiej, a w geometryzacji stref o niewielkiej szerokości często dominuje informacja z sąsiednich pikseli. Tym niemniej budowa algorytmu uwzględniającego piksele narożne okna 3x3 pozwala systemowi prawidłowo wykrywać obiekty o przebiegu niezgodnym z kierunkiem rastra. Właśnie w takich przypadkach uzyskiwano wartości najbardziej zbliżone do rzeczywistych, najlepsze spośród testowanych programów. Identyczne wyniki uzyskiwane w programie MGE GRID ANALYST nie wykluczają stosowania w nim algorytmu opartego na wpasowaniu powierzchni aproksymowanej metodą najmniejszych kwadratów w dziewięć pikseli w oknie 3x3 [4].

Dostarczona wraz z oprogramowaniem dokumentacja oraz wyniki badań jednoznacznie wskazują, że w systemach IDRISI, SURFER oraz ARC/INFO GRID Curvature użyto metody Fleminga i Hoffera [1]. W porównaniu z poprzednio opisanymi wynikami, w sposób zbliżony do nich określana jest ekspozycja, ale "ostrzej" rysowane krawędzie płaszczyzn. Pewne błędy popełniane są na obiektach biegnących skośnie. Skrajnym tego przykładem jest w ogóle pominięcie obiektu jednopikselowego, który jest niedostrzegalny przez algorytm, i bez względu na wartości jakie są mu przypisane, określany jest jako teren płaski pozbawiony ekspozycji (nachylenie i ekspozycję otrzymują jedynie piksele przylegające do obiektu). Także obliczone nachylenia na obiektach biegnących skośnie o szerokości dwóch pikseli są gorsze od uzyskanych metodą MGA/ERD. W pozostałych przypadkach metoda ta daje dobre rezultaty, a w przypadku obiektów jednopikselowych biegnących wzdłuż kolumn lub wierszy jest jedyną, która nie popełnia błędów.

Drugą grupę algorytmów tworzą MTA, PCRM, PCRI, PRCa. Osobnego omówienia wymagają rezultaty uzyskane programem MGE TERRAIN ANALYST. Wyniki jego działania są odmienne od wszystkich pozostałych. Szczególnie widoczne różnice zaobserwować można w przypadku ekspozycji. W skrajnych przypadkach polegają one na odwróceniu o 180° kierunku nachylenia lub tworzeniu dziwnej schodkowo-blokowej struktury (patrz pkt 5.2.2.). Zaznaczyć jednak należy również, że algorytm ten lepiej od pozostałych radził sobie z terenami płaskimi wewnątrz rowów, jednak i w tym przypadku można mieć zastrzeżenia dotyczące odtworzenia kształtu przekroju. W tym miejscu

trzeba zwrócić uwagę na sposób działania tego programu. Algorytm, którym się on posługuje nie jest autorom znany. Zaobserwowano jednak przesłanki wskazujące na to, że wczytywane przez program dane w postaci rastrowej interpretowane są jak położone w regularnej siatce punkty wysokościowe, pomiędzy którymi dokonywana jest interpolacja, co skutkuje niejako zagęszczeniem siatki. Wydaje się, że nachylenia i ekspozycje liczone są na podstawie takich właśnie zagęszczonych danych. Twórcy programu lojalnie ostrzegają w dokumentacji, że posiada on ograniczone możliwości w przypadku obszarów o raptownych zmianach ukształtowania powierzchni. Ponieważ program ten w głównej mierze przeznaczony jest do tworzenia numerycznego modelu rzeźby terenu, być może znacznie lepsze wyniki od osiągniętych w przeprowadzonym przez nas teście można byłoby uzyskać łącząc informację dostarczaną w postaci rastrowej z informacją wektorową opisującą punkty i linie charakterystyczne, np. linie największego spadku, wierzchołki, linie grzbietowe itp..

Zupełnie inną filozofię działania prezentują algorytmy PCRA ("średniego spadku") i PCRI ("minimalnego spadku"). Pierwszy z nich (PCRA) przypisuje pikselowi centralnemu średnią wartość z obliczonych nachyleń pomiędzy tym pikselem a każdym z jego otoczenia. Drugi algorytm (PCRI) wybiera z tych wartości najniższą.

Analizując działanie tych algorytmów autorzy doszli do wniosku, że sformułowanie "algorytmy spadków" nie są adekwatne do tych procedur. Należałoby mówić tu raczej o dwóch interesujących procedurach, które w pewien sposób charakteryzują powierzchnię terenu.

Algorytm PCRA można odczytywać jako swego rodzaju współczynnik urozmaicenia terenu, który przyjmuje wartość zero dla piksela leżącego wewnątrz obszaru płaskiego i wzrasta wraz ze zróżnicowaniem wysokości otaczających go sąsiednich pikseli. Można wyobrazić sobie zastosowanie tego algorytmu do np. badań porowatości(tarcia) terenu w procedurach modelowania ruchu mas powietrza (w połączeniu z analizą rzeczywistych nachyleń i ekspozycji) lub przy ocenie koniecznej do poniesienia pracy przy niwelacji terenu np. w fazie projektowania robót drogowych.

Wyniki działania algorytmu PCRI są jeszcze prostsze do zinterpretowania: przypisuje on pikselowi wartość najniższego spadku jaki istnieje w jego otoczeniu. Wartości 0 oznaczają więc w praktyce to, że w sąsiedztwie danego piksela znajduje się piksel o tej

samej wysokości (a więc pomiędzy nimi występuje zerowe nachylenie). Odwracając ten tok rozumowania można wykryć dzięki tej funkcji piksele, wokół których występują wyłącznie różniące się od niego wartości wysokości. Wtedy takie piksele przyjmują wartości różne od zera. Jako przykład zastosowania tej procedury można podać poszukiwanie lokalnych, jednopikselowych depresji (zagłębień, cieków wodnych o szerokości nie przekraczającej jednego piksela) lub też wypukłości (szczytów, wąskich, jednopikselowych grani). Należy jednak zauważyć, że metoda taka jest niepewna, gdyż np. nie jest możliwe wykrycie cieku wodnego lub grzbietu, które przebiegają na pewnym odcinku na jednakowej wysokości. Podobnie lokalne depresje lub wzniesienia przekraczające rozmiar jednego piksela pozostaną niewykryte.

7. Podsumowanie

Za najkorzystniejsze spośród dostępnych metod autorzy uznali procedury oparte o cztery piksele wykorzystane w systemach IDRISI, SURFER, ARCINFO GRID Curvature. Pomimo odmiennych algorytmów dają one identyczne rezultaty. Za użyciem tych procedur przemawiały: w miarę jednoznaczne odwzorowywanie krawędzi oraz prawidłowo określana ekspozycja. Krawędzie, niezależnie od ich przebiegu względem siatki rastra są odwzorowywane podobnie. Natomiast nie jest możliwe wykrycie elementów liniowych, jednopikselowych, biegnących skośnie, które zawsze traktowane są jako formy poziome (nachylenie równe zero). Prowadzi to do konkluzji, że gdy na danym terenie spodziewać się można wielu takich form należy użyć algorytmów opartych na 8 lub 9 pikselach.

Wykorzystanie tego typu algorytmów (ERDAS, MGE GRID ANALYST, ARCINFO GRID Slope) pozwala bowiem uniknąć dużych błędów w odwzorowaniu drobnych form terenu dając przy tym zbliżone rezultaty, z wyjątkiem algorytmu ARCINFO GRID Slope, który najgorzej odwzorowuje obiekty jednopikselowe. Z kolei oparcie się na wartościach z 8-9 pikseli powoduje mniej ostre oddanie krawędzi, szczególnie tych o przebiegu skośnym. Powoduje to nie tylko pewne ogólne "zmiękczenie" obrazu spadków i ekspozycji, ale również zniekształcenia polegające na odmiennym przedstawianiu krawędzi identycznych, położonych w pierwszym przypadku równoległe do kolumn lub wierszy, w drugim ukośnie. Natomiast wszystkie trzy systemy nie popełniają błędów określania ekspozycji.

Wyniki testowania pozostałych systemów wskazują, iż algorytm MTA nie jest programem przystosowanym do pracy na regularnej siatce danych, gdyż błędnie generuje mapę ekspozycji, a na mapie spadków wprowadza efekt asymetryczności. Być może wprowadzenie dodatkowych parametrów takich jak przebiegi grzbietów i obniżeń pozwoliłyby uzyskać zadawalające efekty. Również działanie PCRM daje zbyt uproszczone rezultaty, co w połączeniu z błędnym obliczaniem ekspozycji dyskwalifikuje ten program jako przydatny do analiz ukształtowania terenu. Pozostałe algorytmy (PCRI, PCRA) trudno - jak to już zaznaczono wcześniej - zakwalifikować jako procedury obliczające nachylenia. Mogą być jednak interesującymi funkcjami dla innych zastosowań analiz terenu.

W jakim stopniu stwierdzone różnice w sposobie działania algorytmów w testowanych systemach mogą wpłynąć na analizy rzeczywistych form powierzchni terenu? Czy wybór odpowiedniej metody jest uzależniony tylko od form terenu, czy też może zależy również od celu analizy? Czy wybór algorytmów odgrywa znaczącą rolę w analizach posiadających aspekt przyrodniczy, czy też może istotnego znaczenia nabiera on dopiero przy projektowaniu robót inżynierskich lub planowaniu przestrzennym? Na te i inne pytania spróbują autorzy odpowiedzieć w drugiej części artykułu, badając działanie algorytmów na rzeczywistych formach geomorfologicznych wykorzystując Cyfrowy Model Rzeźby Terenu okolic Krakowa.

Literatura:

- [1] Fleming M. D., Hoffer R. M.: Machine processing of Landsat MSS data and DMA topographic data for forest cover type mapping. LARS Technical Report 062879. Laboratory for Applications of Remote Sensing, Purdue University, West Lafayette, Indiana, 1979.
- [2] Hodgson M. E.: What Cell Size Does the Computed Slope/Aspect Angle Represent? Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 1995, 61(5), 513-517.
- [3] Horn B. K. P.: Hill shading and the reflectance map. Proceedings of the IEEE, 1981, 69(1), 14-47.
- [4] Jones K. H.: A Comparison of Algorithm Used to Compute Hill Slope as a Property of the DEM. Computers and Geosciences, 1998, 24(4), 315-323.
- [5] Ritter P.: A vector-based slope and aspect generation algorithm. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 1987, 53(8), 1109-1111.
- [6] Sharpnack D. A., Akin G.: An algorithm for computing slope and aspect from elevations.

Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 1969, 35(3), 247-248.

[7] Skidmore A. K.: A comparison of techniques for calculating gradient and aspect from a gridded digital elevation model. International Journal of Geographical Information Systems, 1989, 3(4), 323-334

[8] Tomlin C. D.: Geographic Information Systems and Cartographic Modeling. Prentice Hall, Englewood Cliffs, 1990.

[9] Zevenbergen L. W., Thorne C. R.: Quantitative analysis of land surface topography. Earth Surface Processes and Landforms, 1987, 12, 47-56.

Recenzent: prof.dr hab. inż. Józef Jachimski

TABELA 1. Dostępność funkcji w programach

Nazwa systemu \ Parametr	Nachylenia	Ekspozycje	Wypukłości Wklesłości	Hill- shading	Strefy zaciemnione	Zlewnie	Sieć drenażowa
ARCINFO GRID	2 algorytmy	*	*	*	*	*	*
ERDAS	*	*	-	*	-	-	-
IDRISI	*	*	-	*	-	*	-
MGE GRID ANALYST	*	*	-	-	-	-	*
MGE TERRAIN ANALYST	*	*	*	*	-	-	-
PC RASTER	3 algorytmy	*	*	*	-	*	*
SCOP	*	*	*	*	-	-	-
SURFER	*	*	*	*	-	-	-
TNT	*	*	-	*	-	*	*

Badane parametry 