

MAŁGORZATA KOCHMAN, ROBERT OLSZEWSKI
Zakład Kartografii Politechniki Warszawskiej

Wieloskalowe modelowanie rzeźby terenu

Część I

Zarys treści. W artykule omówiono wybrane koncepcje generalizacji numerycznego modelu rzeźby terenu (NMT), ze szczególnym uwzględnieniem metody heurystycznej opartej na uogólnieniu linii strukturalnych terenu. Przedstawiono także zróżnicowane sposoby wyznaczania linii strukturalnych i ich znaczenie dla wieloskalowego modelowania rzeźby terenu oraz generalizacji NMT.

Słowa kluczowe: wieloskalowa generalizacja NMT, linie strukturalne

1. Wprowadzenie

W Polsce w ciągu ostatnich lat powstało kilka opracowań gromadzących cyfrowe dane przestrzenne o charakterze referencyjnym: Baza Danych Ogólnogeograficznych (BDO), baza VMap poziomu drugiego oraz Baza Danych Topograficznych (TBD) o zasięgu odpowiadającym kilkuset arkuszom map 1:10 000. Są to jednak trzy niezależne bazy opracowane dla trzech poziomów skalowych i niepowiązane ze sobą, opracowane na podstawie innych źródeł i przeznaczone do innych zastosowań.

Fakt istnienia niepowiązanych ze sobą danych referencyjnych, a także konieczność budowy infrastruktury danych przestrzennych w Polsce sprawia, iż istotne wydaje się rozważenie możliwości ich integracji w postaci wieloskalowej bazy danych georeferencyjnych (D. Gotlib, A. Iwaniak, R. Olszewski 2005). Celowe wydaje się przy tym zastosowanie koncepcji MRDB (Multiresolution/Multirepresentation Data Base – wieloskalowej/wieloreprezentacyjnej bazy danych). MRDB można interpretować jako bazę danych przestrzennych pozwalającą na modelowanie obiektów terenowych na różnym poziomie dokładności geometrycznej lub różnym poziomie uogólnienia pojęciowego (D. Sheeren 2003). W bazie

tego typu różne reprezentacje geometryczne tego samego rzeczywistego obiektu są integralnie połączone i mogą być wywoływane w zależności od potrzeb użytkownika.

Dotychczasowa koncepcja opracowania modelu rzeźby terenu w Bazie Danych Topograficznych (TBD) zakłada przechowywanie numerycznego modelu terenu (NMT) w formacie TIN i GRID o rozdzielczości 25 m w podziale sekcyjnym. Nowelizowane wytyczne techniczne dotyczące tzw. komponentu NMT bazy TBD zakładają opracowanie modelu rzeźby terenu jako ciągłej, wektorowej reprezentacji form terenu (linie strukturalne, punkty charakterystyczne, obszary wyłączeń, pikiety itp.). Ten sposób gromadzenia danych źródłowych pozwala na opracowanie procedur automatycznego wyboru reprezentatywnych dla danego poziomu uogólnienia strukturalnych form rzeźby terenu. Umożliwi to także opracowanie koncepcji wieloskalowej (hierarchicznej) reprezentacji rzeźby terenu. Koncepcja wieloreprezentacyjnego modelu rzeźby terenu stanowi logiczne uzupełnienie idei wieloreprezentacyjnej bazy danych topograficznych, umożliwiając łączne analizowanie wszystkich komponentów środowiska (A. Makowski 2004).

Podjęcie to pozwala na opracowanie spójnej struktury bazy danych topograficznych. Otwiera także szersze możliwości w zakresie utrzymania więzów integralności przestrzennej między modelem rzeźby terenu a obiektami występującymi w terenie (przede wszystkim siecią wodną). Będzie to możliwe m.in. dzięki zdefiniowaniu relacji przestrzennych między obiektami. Umożliwia to również inne spojrzenie na proces generalizacji rzeźby terenu, rozumianej jako uogólnianie modelu rzeźby zachowujące relacje topologiczne, nie zaś uproszczenie rysunku poziomicowego. Koncepcja budowy hierarchicz-

nej struktury NMT zostanie szerzej omówiona w drugiej części artykułu.

Do budowy wieloskalowego NMT istotny wydaje się nie tylko hierarchiczny sposób podejścia do modelowania rzeźby terenu, lecz także sposób uogólnienia danych źródłowych. Technicznie możliwa jest bowiem zarówno generalizacja pierwotna realizowana na etapie gromadzenia danych topograficznych, jak i generalizacja wtórna istniejącego zbioru. Celowe wydaje się zwłaszcza rozważenie drugiej z wymienionych koncepcji. Jej zasadniczą cechą jest wyróżnienie w procesie uogólniania danych georelacyjnych dwóch modeli danych przestrzennych i związanych z nimi typów generalizacji: generalizacji graficznej (*display-oriented*) i generalizacji modelu (*analysis-oriented*) (R. Weibel 1992). Zróżnicowanie to wynika ze specyfiki etapowego (i zróżnicowanego ze względu na cel opracowania) modelowania danych przestrzennych (D. Grünreich 1995). W podejściu tym można wyróżnić dwa etapy opracowania: pierwszy obejmujący numeryczny model krajobrazu – DLM (*Digital Landscape Model*), i drugi obejmujący numeryczny model kartograficzny – DCM (*Digital Cartographic Model*). Podstawowa baza danych DLM zawiera rzeczywiste położenie obiektów, zaś model kartograficzny DCM dane poddane procesowi redakcji-kartograficznej (U. Meyer 1987).

2. Numeryczny model rzeźby terenu

Numeryczny model terenu (NMT) jest dyskretną (punktową) reprezentacją wysokości topograficznej powierzchni terenu, wraz z algorytmem interpolacyjnym umożliwiającym odtworzenie jej kształtu w określonym obszarze (Z. Kurczyński, R. Preuss 2000). Tak zdefiniowany model zawiera informacje o relacjach topologicznych łączących poszczególne punkty. Zdefiniowanie topologii następuje w wyniku zastosowania algorytmów interpolacyjnych, odtwarzających ukształtowanie modelowanej powierzchni.

Przy opracowaniu NMT należy uwzględnić:

- przebieg i strukturę linii szkieletowych,
- linie nieciągłości (skarpy, urwiska),
- granice wyłączeń obszarów poziomych (zbiorniki wodne),
- granice wyłączeń obszarów o jednolitym spadku,
- lokalne ekstrema.

Numeryczny model terenu można opracować na podstawie dowolnego zestawu danych mających charakter pola skalarnego, to znaczy zawierających informacje o położeniu (współ-

rzędne x i y wyrażone w danym układzie współrzędnych) oraz wielkości skalara (współrzędna z) (D. Kładoczný, W. Żyszkowska 1995).

Współcześnie dane do opracowania NMT pochodzą z czterech źródeł:

- 1) pomiarów terenowych,
- 2) zdjęć lotniczych i ich opracowań fotogrametrycznych,
- 3) map topograficznych,
- 4) skaningu laserowego.

Wykorzystywane współcześnie narzędzia GIS umożliwiają zapis NMT w dwóch strukturach: regularnej w postaci prostokątnej siatki punktów – GRID i nieregularnej w postaci siatki trójkątów – TIN. Model zapisany w formacie GRID może być zarazem interpretowany jako swoista macierz wysokości, co znacząco ułatwia prowadzenie analiz przestrzennych. Model TIN powstaje w wyniku triangulacji spełniającej warunek Delaunaya (okrąg wyznaczony przez trzy wierzchołki trójkąta nie może zawierać innych punktów interpolacyjnych).

3. Generalizacja numerycznego modelu rzeźby terenu

Generalizacja jest sposobem modelowego uogólnienia danych, służącym osiągnięciu zamierzonego celu. Najistotniejszą cechą procesu generalizacji kartograficznej jest zachowanie podstawowej struktury i charakteru danych geograficznych. A. Makowski (2001) uważa, że generalizację należy utożsamiać z kartograficzną metodą modelowania rzeczywistości, zaś W. Ostrowski (2001) uznaje, że proces generalizacji można utożsamiać z tworzeniem modelu kartograficznego, służącego poznaniu wybranego fragmentu przestrzeni geograficznej.

Pomimo coraz powszechniejszego stosowania narzędzi informatycznych, procesu generalizacji nie można traktować jako mechanicznej procedury zapisanej w formie algorytmu, lecz jako „proces oparty na zrozumieniu” (R. Weibel 1991). Poznanie struktury generalizowanych obiektów wymaga przeprowadzenia analiz kartometrycznej ich kształtu, wzajemnych zależności i zróżnicowania przestrzennego.

Poprawna generalizacja numerycznego modelu rzeźby terenu ma szczególnie istotne znaczenie przy korzystaniu z systemów informacji geograficznej (GIS). Dla prowadzenia wiarygodnych analiz przestrzennych szczególnie istotne jest bowiem zachowanie rzeczywistego położenia charakterystycznych punktów kluczowych form terenu. Proces uogólniania powinien mieć zatem charakter generalizacji modelu DLM, nie

zaś graficznego uproszczenia rysunku poziomicowego. Koncepcja ta jest rozwinięciem idei K. E. Brassela i R. Weibla (1988), określającej pięć zasadniczych etapów generalizacji danych przestrzennych:

- 1) rozpoznanie struktury danych,
- 2) określenie typu procesu generalizacji,
- 3) modelowanie procesu (dobór parametrów modelu generalizacji),
- 4) przeprowadzenie procesu generalizacji,
- 5) weryfikację rezultatów.

Generalizacja modelu rzeźby terenu (rozumiana jako generalizacja NMT, nie zaś uogólnienie rysunku poziomicowego) wiąże się z zastosowaniem jednej z trzech metod (R. Weibel 1992):

- 1) filtracji globalnej,
 - 2) filtracji lokalnej (z reguły wieloetapowej),
 - 3) zastosowania podejścia heurystycznego.
- Filtracja globalna polega na wyznaczeniu w każdym oczku siatki źródłowego NMT wartości średniej ważonej, obliczanej w polu ruchomym o określonej wielkości. Liczba punktów modelu pozostaje stała, zmieniają się jedynie wartości poszczególnych punktów. Metoda jest stosowana głównie do generalizacji numerycznego modelu terenu w postaci GRID.

- Filtracja lokalna – generalizacja modelu polega na wyborze punktów źródłowych. Metoda może być stosowana zarówno do numerycznego modelu terenu w postaci TIN jak i GRID. W podejściu tym liczba punktów wyznaczających model ulega zmniejszeniu. Z modelu źródłowego usuwane są (z reguły iteracyjnie) punkty o małej istotności (M. Heller 1990).

- Podejście heurystyczne oparte jest na koncepcji generalizacji linii strukturalnych terenu. Metoda może być stosowana zarówno do uogólniania numerycznego modelu terenu w postaci TIN jak i GRID. W odróżnieniu od omówionych powyżej metod filtracji podejście heurystyczne zbliżone jest do klasycznych technik kartograficznych. Polega na stosowaniu operatorów numerycznych w trybie interaktywnej współpracy operatora z systemem informatycznym. Generalizacja jest oparta na uogólnianiu źródłowego modelu linii strukturalnych – SLM (*Structure Line Model*) poprzez zastosowanie klasycznych operatorów generalizacji: przewiększania, usuwania, łączenia, uproszczenia itp. poszczególnych linii strukturalnych, a następnie utworzeniu wtórnego NMT.

Zaproponowany przez K.E. Brassela i R. Weibla (1988) model uogólniania danych przestrzennych wymaga rozpoznania struktury danych źródłowych i określenia typu (oraz para-

metrów numerycznych) procesu generalizacji. W kontekście uogólniania NMT oznacza to konieczność przeprowadzenia zróżnicowanych analiz morfometrycznych oraz:

- wyznaczenia podstawowych form strukturalnych,
- wydzielenia obszarów homogenicznych.

Celem takiego podejścia jest wyznaczenie podstawowych form strukturalnych terenu – linii szkieletowych i form powierzchniowych (wzgórz, dolin, zagłębień itp.). Najbardziej istotne przy generalizacji modelu rzeźby terenu jest bowiem zachowanie struktury morfologicznej podstawowych form. Przy generalizacji rzeźby terenu należy właściwie oddać charakter morfologiczny przedstawianych form mając na względzie ich genezę, np. wynikowa mapa poziomicowa terenu o rzeźbie erozyjnej powinna zachować współkształtność poziomic na podstawie linii szkieletowych. Gdy ze względu na skalę mapy umieszczenie wszystkich form nie jest możliwe, należy zastosować generalizację ilościową, zachowując charakter morfologii terenu (A. Marcinkiewicz 1960).

Generalizacja numerycznego modelu rzeźby terenu może być także realizowana poprzez konwersję modelu nieregularnego (TIN) do struktury regularnej (GRID). Jest to standardowa procedura w większości pakietów GIS. Stopień uogólnienia zależy przy tym od rozdzielczości wynikowego modelu regularnego oraz przyjętego algorytmu interpolacyjnego. Celem tego procesu jest z reguły automatyczne generowanie poziomic, zasilaających systemy produkcji map topograficznych.

Przekształcanie źródłowego modelu TIN w strukturę regularnej siatki ułatwia także prowadzenie analiz przestrzennych w systemach informacji przestrzennej. Należy jednak pamiętać, że model GRID zawiera dane interpolowane (zniekształcone), nie zaś oryginalne dane pomiarowe. Wraz ze zwiększaniem oczka siatki modelu regularnego wzrasta stopień zniekształcenia danych źródłowych i błąd wyznaczenia wysokości poszczególnych punktów.

Generalizacja NMT może być realizowana zarówno poprzez reprezentatywną selekcję danych źródłowych z modelu bazowego, jak i poprzez odpowiedni dobór algorytmu interpolacyjnego. Klasyczne metody opracowania powierzchni statystycznych oparte są z reguły na interpolacji liniowej, jednak do sporządzania uogólnionych modeli rzeźby terenu można stosować także algorytmy nieliniowe (R. Olszewski 2003; R. Olszewski, A. Żyła 2004).

4. Wyznaczanie linii szkieletowych

Przy kartowaniu form rzeźby terenu mierzona jest pewna liczba charakterystycznych punktów wysokościowych. Można wśród nich wyróżnić punkty konieczne: wierzchołki, najniższe punkty grzbietów (siodła, przełęcze), dna dolin, ujścia cieków (punkty przecięcia dwóch linii ciekowych lub linii drenażu i linii brzegowej zbiornika wodnego), punkty depresji oraz punkty pożądane, np. wygięcia, przygięcia, wypukłości i wklęsłości stoków oraz punkty kontrolne w terenach płaskich, pełniące funkcję kontrolną przy rysowaniu poziomic pomocniczych. Dla różnych typów form terenu wymagana jest oczywiście różna liczba pikiet (F. Piątkowski i in. 1961). Te charakterystyczne punkty wysokościowe są podstawą do wyznaczenia linii szkieletowych rzeźby terenu.

Do linii szkieletowych rzeźby terenu należą linie grzbietowe i linie drenażu. Są to charakterystyczne linie rzeźby orientujące w przebiegu osi grzbietów i dolin. Tworzą one w terenie pewnego rodzaju szkielet konstrukcyjny form rzeźby. Szczegółowość ich przedstawiania na mapie zależy m.in. od skali mapy i jej przeznaczenia. Linie grzbietowe wznoszą się i opadają łącząc w terenie najwyższe położone punkty (J. Kotarbiński, U. Urbaniak-Biernacka 1991), zaś linie drenażu łączą najniższe położone punkty den dolnych.

Linie grzbietowe biegną często działami wodnymi, będącymi zbiorami punktów tworzących linie rozdzielające kierunki odpływu do sąsiednich zlewni. Dział wodny przebiega najczęściej po grzbietach wzniesień, formach wypukłych, prostopadłe do poziomic. Powierzchniowy dział wodny wyznacza granicę zlewni topograficznej, czyli obszaru, z którego wody spływają do jednego wspólnego odbiornika (rzeki, jeziora, bagna). Zlewnia jest określana jako podstawowa jednostka hydrologiczna stanowiąca punkt wyjścia do obliczeń i analiz procesów hydrologicznych, bilansu wodnego itp. (E. Bajkiewicz-Grabowska, A. Magnuszewski 2002).

Linie grzbietowe można wyznaczyć w terenie pagórkowatym i górzystym. Pokrywają się one wtedy z liniami wododziałowymi. W terenach równinnych (np. zabagnionych) i falistych lub terenach o bardzo zróżnicowanej rzeźbie (krawowej, eolicznej, młodoglacjalnej, litoralnej), albo silnie przekształconej antropogenicznie, wyznaczenie linii wododziałowych jest znacznie trudniejsze (M. Gutry-Korycka i H. Werner-Więcowska 1996) i niekiedy ich przebieg określany jest jako niepewny.

Linie drenażu pokrywają się w terenie z prze-

biegiem cieków i suchych dolin. Linia drenażu na mapie łączy najniższe punkty profili poprzecznych w dolinie cieku, wyznaczając tym samym jego koryto. Profil podłużny linii drenażu nachylony jest zawsze w jednym kierunku. Do głównej linii drenażu w dolinie dołączają boczne linie drenażu, biegnące zgodnie z przebiegiem dopływów cieku głównego.

Linie grzbietowe i drenażu przecinają na mapie kolejne poziomicę pod kątem prostym. Linie te przebiegają w miejscach największego wygięcia poziomic. Niektóre definicje linii szkieletowych rzeźby odnoszą się tylko do ich obrazu na mapie. Według A. Senetry i I. Cieślak (2004) linie szkieletowe powstają na mapie izoliniowej z połączenia wyraźnych załamań sąsiednich izolini. Jeżeli punkty tych załamań leżą na izoliniach wypukłych, to ich połączenia tworzą linie grzbietowe. Jeżeli wspomniane punkty należą do izolini wklęsłych, to ich połączenia tworzą linie drenażu. Stosowne wydaje się podkreślenie faktu, że linie grzbietowe i drenażu są liniami widocznymi w terenie, które możemy zobrazować na mapie, w odróżnieniu od innej charakterystycznej linii terenowej, jaką jest linia największego spadku (T. Eckes 2001), trudniejsza do zaobserwowania w terenie.

W geomorfologii wyznaczenie przebiegu linii szkieletowych jest podstawą każdego rozpoznania morfologicznego terenu. Linie szkieletowe form rzeźby terenu informują o ich długości, szerokości, krętości, rozwinięciu oraz rozczłonkowaniu rzeźby danego terenu, a to z kolei pociąga za sobą określenie charakteru rzeźby, stadium jej rozwoju, genezy, przeważających procesów rzeźbotwórczych itd.

W hydrologii na podstawie analizy linii szkieletowych opracowuje się mapy działów wodnych. Klasyfikacje hydrograficzne sieci rzecznej (np. Hortona, Strahlera, Shreve'a), ułatwiające ilościowy opis sieci rzecznej, bazują na analizie linii drenażu, których podzbiorem są cieki.

W geografii fizycznej i ekologii krajobrazu zagadnienie linii szkieletowych pojawia się m.in. przy wyznaczaniu granic krajobrazowych, np. przy regionalizacji fizycznogeograficznej i typologii krajobrazów naturalnych czy waloryzacji terenu na potrzeby budownictwa, rolnictwa lub turystyki. W gleboznawstwie przebieg linii grzbietowych w terenach górskich wskazuje obszary występowania gleb inicjalnych, ściśle uzależnionych od podłoża skalnego, zaś przebieg linii drenażu – obszary występowania gleb rzecznych typu mad.

W kartografii tworząc numeryczny model rzeźby terenu obok linii szkieletowych należy

również uwzględnić linie nieciągłości, do których należą m.in. urwiska skalne, nasypy i wykopy przy drogach, osypiska piaszczyste, ziemne, kamieniste (piargi) i żwirowe, zbocza wąwozów, tarasów i wydm, zsuwy (osuwiska), wąwozy, wypłuczyska i skarpy.

Na podstawie numerycznego modelu terenu w środowisku GIS można dokonywać analizy cech powierzchni terenu tworząc mapy morfometryczne w postaci np. mapy spadków lub ekspozycji stoków, a w badaniach hydrologicznych wyznaczać zlewnie cząstkowe i rzędy cieków. Prowadzone są badania nad automatycznym wyznaczaniem wskaźników praw Hortona-Strahlera (wskaźnik bifurkacji, wskaźnik długości cieków, wskaźnik powierzchni zlewni) (R. Szczepanek 1999).

5. Wyznaczanie linii szkieletowych na podstawie numerycznego modelu rzeźby terenu

W przeprowadzonych badaniach przyjęto, że przy budowie hierarchicznego (wieloskalowego) NMT szczególne znaczenie ma poprawne wyznaczenie linii strukturalnych tworzących „szkielet” topograficzny terenu. Linie te wyznaczono na podstawie istniejących map topograficznych, a także analizy modelu TIN i GRID. Celem prowadzonych badań było stwierdzenie czy możliwe jest w pełni automatyczne wyznaczenie linii strukturalnych rzeźby na podstawie danych źródłowych nie zawierających żadnych dodatkowych informacji o ukształtowaniu terenu. W badaniach analizowano zarówno regularny jak i nieregularny format zapisu danych źródłowych¹.

5.1. Regularna struktura GRID

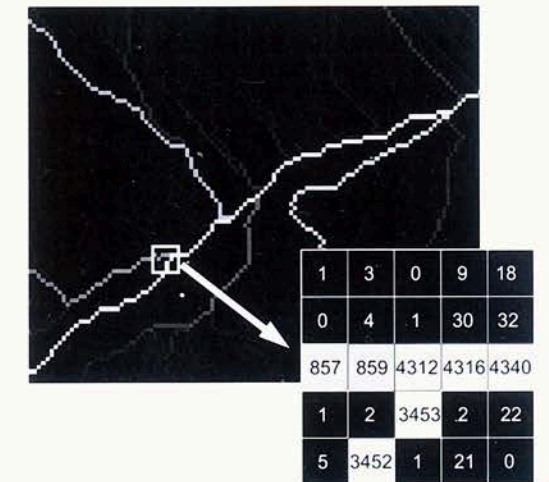
Istnieje wiele algorytmów wyznaczania linii strukturalnych rzeźby terenu na podstawie modelu regularnego (J.P. Wilson, J.C. Gallant 2000). Do najbardziej znanych należą: D8 (*deterministic eight node*), Rho8 (*random eight node*) oraz DEMON (*Digital Elevation MOdel Networks*) (M. C. Costa-Cabral, S. J. Burges 1994). Większość z nich polega na zaawansowanej analizie akumulacji potencjalnej sieci erozyjnej wyznaczonej przez kierunek spływu powierzchniowego. Procedura ta może różnić się nieznacznie w zależności od wykorzystywanego narzędzia GIS, jednak uzyskiwane wyniki

¹ W przeprowadzonych badaniach analizowano dwa obszary testowe: „Tatry” i „Beskidy”. Autorzy dziękują firmie PPWK S.A. oraz Zarządowi Geografii Wojskowej WP za udostępnienie danych źródłowych.

są z reguły porównywalne. W przeprowadzonych badaniach wykorzystano zmodyfikowany algorytm D8 zaimplementowany w module GM Grid 5.2, będącym rozszerzeniem funkcjonalnym pakietu GeoMedia Professional firmy Intergraph.

Procedura wyznaczenia linii strukturalnych rzeźby terenu ma charakter sekwencyjny. Pierwszym krokiem jest usunięcie lokalnych depresji (procedura *Fill Depressions*). Występowanie depresji (zagłębień bezodpływowych) w NMT nie jest z reguły uzasadnione rzeczywistą rzeźbą terenu, lecz niedokładnością jej modelowania, związaną z interpolacją poszczególnych komórek struktury GRID. Zniekształcenia takie mogą występować zwłaszcza przy sporządzaniu modelu regularnego o zbyt małej rozdzielczości (np. konwersji nieregularnego modelu źródłowego TIN na model GRID o rozdzielczości 50 m na obszarach o dużym zróżnicowaniu morfometrycznym). Komórkom „depresyjnym” przypisywana jest najniższa wartość spośród bezpośrednio przylegających pikseli.

W kolejnym kroku wyznaczane są kierunki spływu dla poszczególnych komórek (*Downhill Path*). Wynikiem działania tej procedury jest przy-



Ryc. 1. Wyznaczanie linii cieków na podstawie akumulacji spływu (analiza struktury GRID)
Fig. 1. Determining the stream line basing on the flow accumulation (GRID structure analysis)

pisanie każdemu pikselowi jednej z dziewięciu możliwych wartości (kierunki kardynalne: E, SE, S, SW, W, NW, N, NE oraz 0 – obszary płaskie).

Na podstawie wyznaczonych kierunków modelowana jest następnie akumulacja spływu

powierzchniowego (*Downhill Accumulation*). W każdej komórce sumowana jest liczba pikseli, które zasilają sieć erozyjną leżącą powyżej danej komórki (ryc. 1). Liczba ta jest bezpośrednio związana nie tylko z ukształtowaniem terenu, lecz także z rozdzielczością modelu GRID. Im większa rozdzielczość (mniejsze oczko siatki interpolacyjnej), tym większa jest wartość zaku-

Tab. 1. Analiza sieci rzecznej obszaru testowego „Tatry” przy rozdzielczości przestrzennej NMT 5 m

Metoda	Liczba cieków	Długość cieków [m]
mapa topograficzna	185	70 300
TIN (dekompozycja Morse'a-Smale'a)	138	68 200
GRID (wartość progowa 10 000)	164	30 400
GRID (wartość progowa 1000)	1198	116 900

Tab. 2. Analiza sieci rzecznej obszaru testowego „Beskidy” przy rozdzielczości przestrzennej NMT 20 m

Metoda	Liczba cieków	Długość cieków [m]
mapa topograficzna	13	8860
TIN (dekompozycja Morse'a-Smale'a)	17	15 850
GRID (wartość progowa 1000)	10	6490
GRID (wartość progowa 200)	80	15 500

mulowanego spływu dla danej komórki. Na podstawie uzyskanych wyników wyznaczana jest sieć erozyjna (linie cieków – procedury *Recode* i *Segmentation*), następnie zaś linie grzbietowe (procedura *Sub-Basin Delineation*).

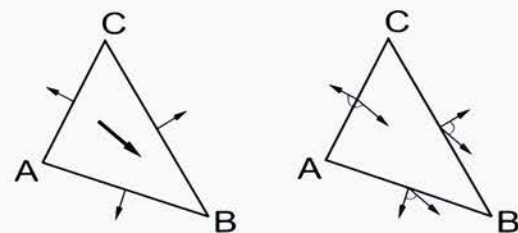
Przy wyznaczeniu sieci erozyjnej (linii cieków) kluczowe znaczenie ma określenie wartości progowej zakumulowanego przepływu, powyżej której sieć erozyjna przechodzi w ciek (GM Grid Tutorial 2004). Pomimo że procedura wyznaczania linii strukturalnych jest w pełni automatyczna, a poprzez to pozornie zobiektywizowana, subiektywne określenie wartości progowej sprawia, iż uzyskiwane rezultaty różnią się istotnie (tab. 1 i 2). Na ryc. 4 i 5 pokazano, jaki wpływ na gęstość wyznaczonej sieci rzecznej ma progowa

wartość liczby komórek sieci erozyjnej. Obliczenia wykonano na wybranych fragmentach NMT obrazujących rzeźbę powierzchni Tatr i Beskidu Niskiego.

5.2. Nieregularna struktura TIN

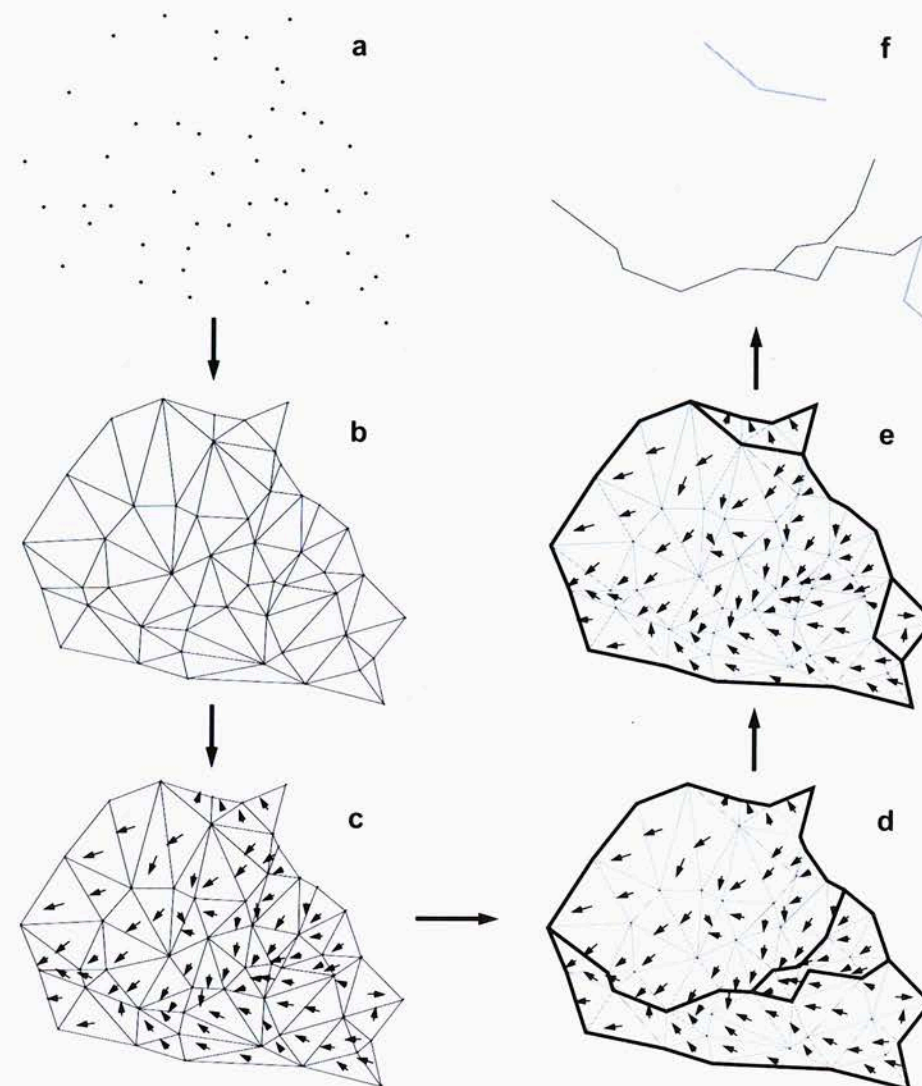
Istnieje wiele metod wyznaczania linii strukturalnych rzeźby terenu na podstawie analizy modelu TIN (nieregularna siatka trójkątów). Jednym z najciekawszych rozwiązań jest zaproponowana przez L. De Floriani, P. Magillo (2002) i E. Danovaro, P. Magillo, M. Mesmoudi (2003) metoda hierarchicznego budowania numerycznego modelu rzeźby terenu. Podejście to pozwala, przynajmniej teoretycznie, na uwzględnienie struktury morfologicznej modelowanej powierzchni. Najistotniejszą cechą metody jest w pełni zautomatyzowane wyznaczenie linii strukturalnych rzeźby terenu na podstawie zbioru punktów rozproszonych. Algorytm oparty jest na tzw. teorii Morse'a-Smale'a (S. Smale 1960), rozszerzonej przez autorów z oryginalnej postaci właściwej do opisu powierzchni ciągłych i różniczkowalnych, do modelowania struktur złożonych z elementów skończonych. Zaproponowana dekompozycja powierzchni statystycznej (tzw. rozszerzona dekompozycja Morse'a-Smale'a) pozwala na wyznaczenie obszarów stabilnych (ang. *stable*) i niestabilnych (ang. *unstable*). Do wyznaczenia tych obszarów wykorzystuje się wieloetapową metodę tzw. wzrostu obszarów. Nałożenie regionów stabilnych i niestabilnych pozwala na wyznaczenie linii strukturalnych analizowanej powierzchni statystycznej (w szczególności przypadku numerycznego modelu rzeźby terenu) (E. Danovaro i inni 2003).

Rozważmy dekompozycję struktury TIN na obszary niestabilne (algorytm wyznaczania stref stabilnych jest analogiczny). Dla podstawowego elementu modelu TIN, jakim jest pojedynczy trójkąt, definiowany jest gradient nachylenia na



Ryc. 2. Wyznaczanie „wejść” i „wyjść” trójkąta (analiza struktury TIN)

Fig. 2. Determining the „IN” and „OUT” points of a triangle (TIN structure analysis)

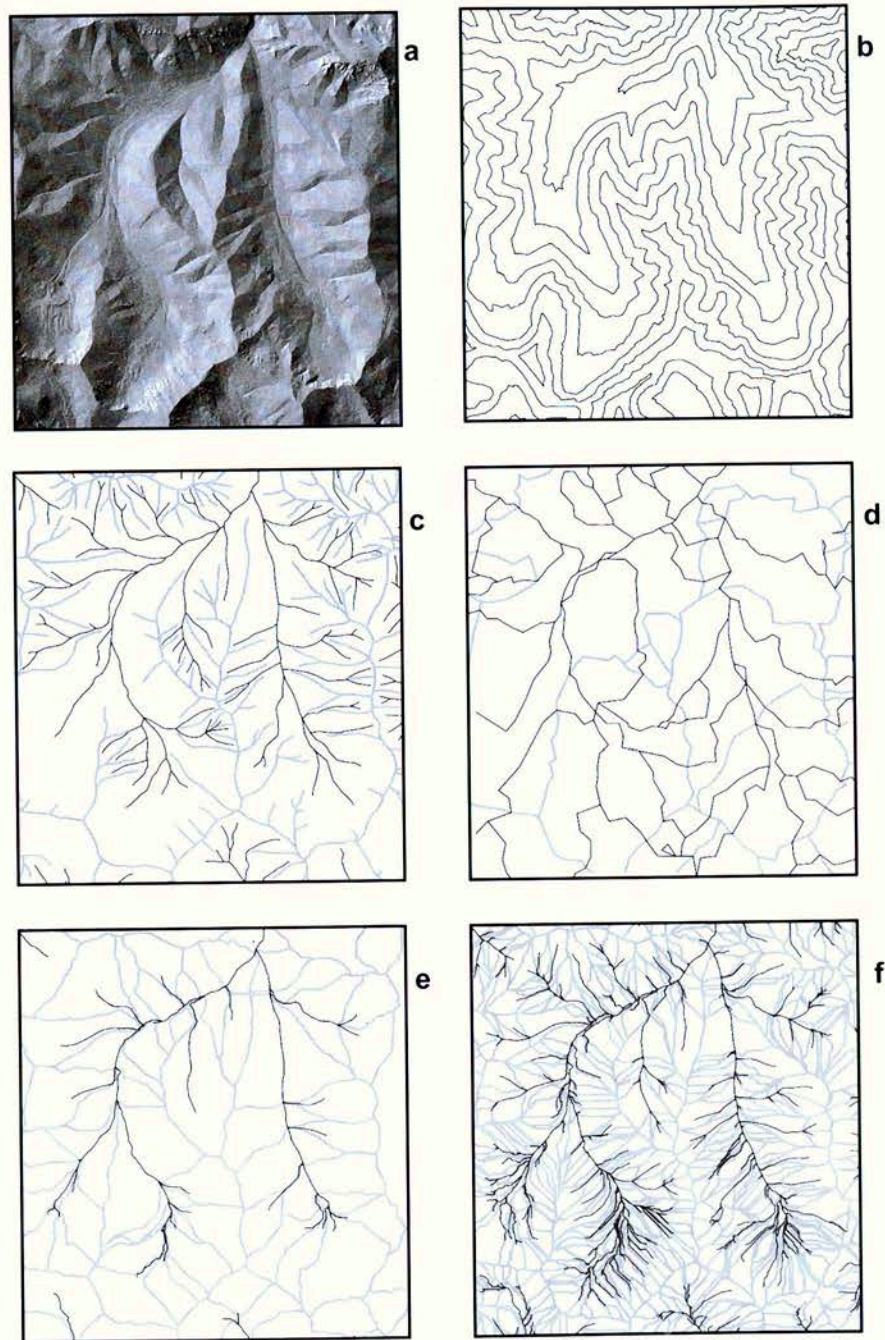


Ryc. 3. Wyznaczanie stref stabilnych i niestabilnych (dekompozycja Morse'a-Smale'a)
Fig. 3. Determining stable and unstable zones (Morse-Smale's decomposition)

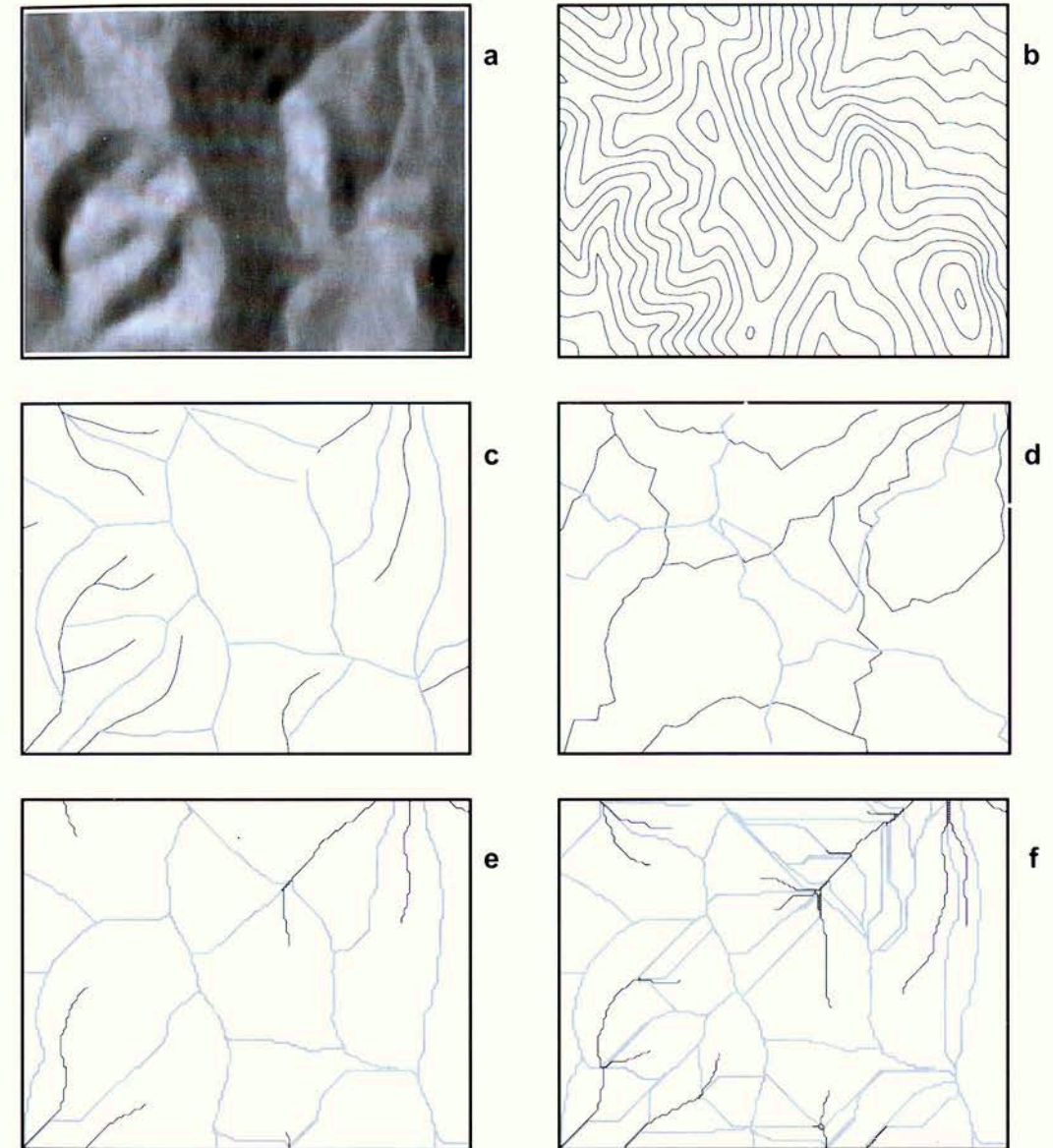
podstawie analizy wysokości trzech jego wierzchołków (ryc. 2 – gruba czarna strzałka). Dla każdego z boków trójkąta wyznaczamy kąt między kierunkiem gradientu nachylenia trójkąta a normalną (prostopadłą) do tego boku. Jeśli wyznaczona wartość kątowa jest mniejsza niż 90° , dany bok nazywamy „wyjściem” (*exit*) trójkąta. Jeśli kąt ten ma wartość większą niż 90° , bok nazywamy „wejściem” (*entrance*). Bok AC (ryc. 2) określamy zatem jako „wejście”, zaś boki AB i BC jako „wyjścia”. Dla jednoznaczności

dalszych rozważań, dla trójkątów z więcej niż jednym wyjściem, konieczne jest także określenie tzw. najlepszego wyjścia (*best exit*) danego trójkąta, rozumianego jako „wyjście” trójkąta, dla którego wartość kąta między normalną boku i gradientem nachylenia jest najmniejsza. W analizowanym przypadku jest to bok AB (kąt $64,87^\circ$, dla boku BC kąt ten wynosi $68,93^\circ$).

Proces wyznaczania strefy niestabilnej ma charakter iteracyjny (wieloetapowy). Pierwszym krokiem jest znalezienie tzw. globalnego maxi-



Ryc. 4. Wyznaczenie linii strukturalnych obszaru testowego „Tatry”: a – NMT o rozdzielczości przestrzennej 5 m, b – rysunek poziomicowy, c – linie strukturalne na podstawie mapy, d – dekompozycja Morse’a-Smale’a, e – analiza struktury GRID (wartość progowa 10 000 pikseli), f – analiza struktury GRID (wartość progowa 1000 pikseli)
 Fig. 4. Determining structure lines of „Tatry” test area: a – DTM with spatial resolution of 5 m, b – Contour lines, c – Structure lines based on a map, d – Morse-Smale’s decomposition, e – GRID structure analysis (threshold at 10 000 pixels), f – GRID structure analysis (threshold at 1000 pixels)



Ryc. 5. Wyznaczenie linii strukturalnych obszaru testowego „Beskidy”: a – NMT o rozdzielczości przestrzennej 20 m, b – rysunek poziomicowy, c – linie strukturalne na podstawie mapy, d – dekompozycja Morse’a-Smale’a, e – analiza struktury GRID (wartość progowa 1000 pikseli), f – analiza struktury GRID (wartość progowa 200 pikseli)
 Fig. 5. Determining structure lines of „Beskidy” test area: a – DTM with spatial resolution of 20 m, b – Contour lines, c – Structure lines based on a map, d – Morse-Smale’s decomposition, e – GRID structure analysis (threshold at 1000 pixels), f – GRID structure analysis (threshold at 200 pixels)

num powierzchni statystycznej – punktu o największej wysokości. Wszystkie trójkąty mające wierzchołek w tym punkcie tworzą inicjalną strefę niestabilną. Następnie analizowane są wszystkie trójkąty mające wspólną krawędź z tak określoną strefą. Jeśli któryś z punktów wierzchołkowych analizowanego trójkąta jest lokalnym maksimum, staje się punktem inicjalnym wyznaczania nowej strefy niestabilnej. W przeciwnym wypadku strefa inicjalna rozbudowywana jest o nowe trójkąty. Rozbudowa prowadzona jest wyłącznie według schematu: do trójkątów należących do istniejącej strefy i mających swoje „najlepsze wyjście” na jej granicy do budowywane są trójkąty mające „wejście” na tej samej krawędzi. Należy podkreślić, że rozbudowa strefy odbywa się wyłącznie poprzez wykorzystanie krawędzi *best exit* poszczególnych trójkątów. Jest to kryterium heurystyczne, przyjęte przez E. Danovaro i współautorów (2003) w celu uniknięcia niejednoznaczności w modelowaniu wpływu powierzchniowego. Przyjęcie tego kryterium ma jednak daleko idące konsekwencje praktyczne dla wyznaczenia linii strukturalnych rzeźby terenu.

Wynikiem tak rozumianej dekompozycji niestabilnej Morse'a-Smale'a jest podział powierzchni statystycznej na poszczególne strefy niestabilne rozbudowane wokół lokalnych maksimum. Analogiczny charakter ma proces dekompozycji stabilnej Morse'a-Smale'a, pozwalającej na wydzielenie stref stabilnych wokół lokalnych minimum. Wzajemne nałożenie obu rodzajów dekompozycji pozwala na wyznaczenie linii strukturalnych powierzchni statystycznej modelującej rzeźbę terenu (ryc. 3).

6. Analiza uzyskanych wyników

W przeprowadzonych badaniach do wyznaczenia linii strukturalnych obszarów testowych wykorzystano mapy topograficzne, udostępnione numeryczne modele rzeźby terenu, program GeoMedia Grid oraz własną aplikację opartą na algorytmie E. Danovaro, P. Magillo, M. Mesmoudi (2003). Należy zwrócić uwagę, że linie cieków wyznaczone na podstawie powierzchni statystycznej metodą rozszerzonej dekompozycji Morse'a-Smale'a są wyznaczone aż do linii grzbietowej. Jest to zgodne z definicją J. Kotarbińskiego i U. Urbaniak-Biernackiej (1991), lecz odmienne od obowiązującej konwencji wyznaczania linii cieków, a nawet tzw. suchych dolin na mapach.

Bezpośrednie przyjęcie struktur Morse'a-Smale'a ma daleko idące konsekwencje w zakresie

automatyzacji procesu generalizacji numerycznego modelu terenu bazującego na uogólnieniu linii szkieletowych. Zagadnienie to będzie przedmiotem rozważań w odrębnym opracowaniu.

Porównując układ linii szkieletowych dla fragmentu Tatr (ryc. 4) i Beskidu Niskiego (ryc. 5) uzyskany czterema różnymi sposobami: wykreślony ręcznie na podstawie mapy topograficznej (ryc. 4c i ryc. 5c), przy użyciu dekompozycji Morse'a-Smale'a (ryc. 4d i ryc. 5d) oraz przy wykorzystaniu analizy struktury GRID przy dwóch różnych parametrach wyjściowych (ryc. 4e,f i ryc. 5e,f) można wysunąć kilka wniosków:

- układ linii szkieletowych uzyskany na drodze dekompozycji Morse'a-Smale'a bardziej odbiega od obrazu linii szkieletowych wykreślonego ręcznie, niż ich obraz otrzymany w programie Geomedia Grid;

- dobór parametrów (liczba progowa pikseli brana pod uwagę przy analizie) w programie GeoMedia Grid w wielkim stopniu wpływa na szczegółowość uzyskanego obrazu linii szkieletowych;

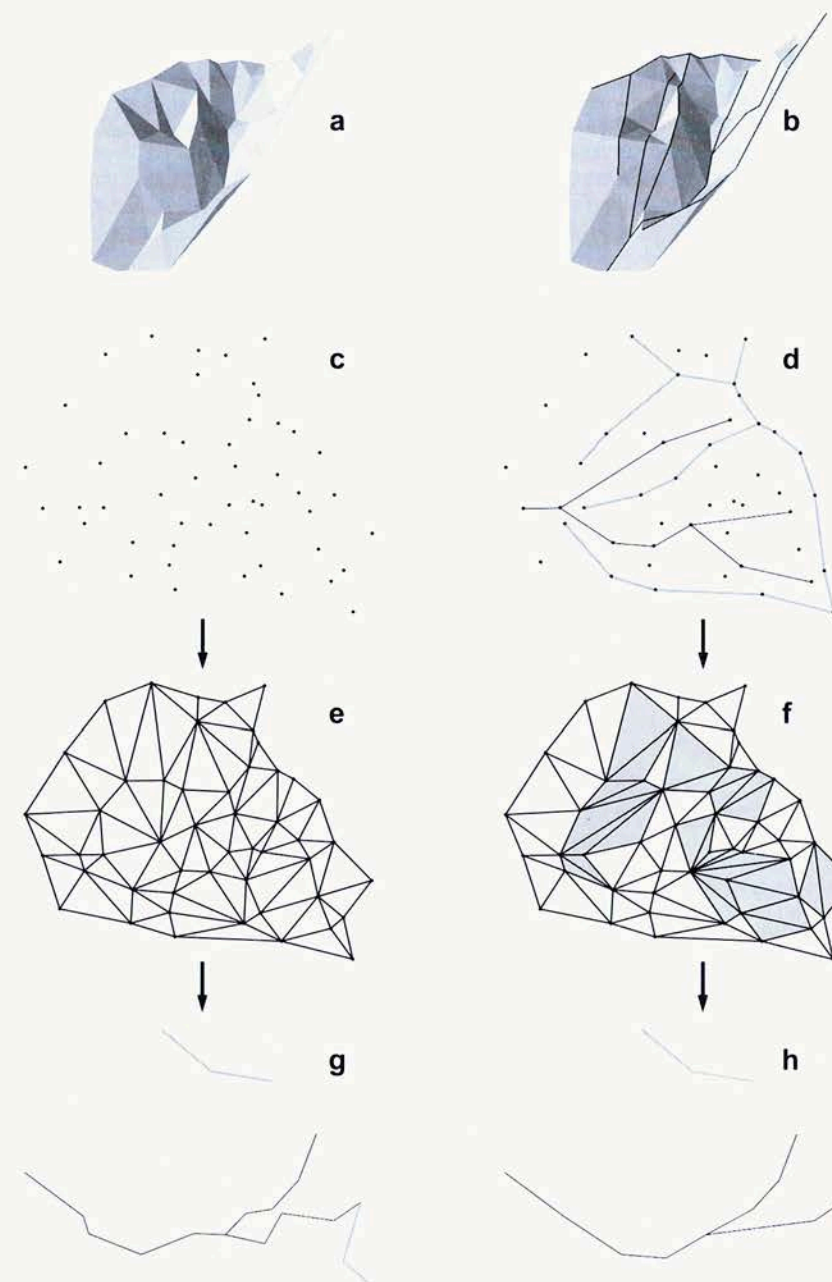
- heurystyczne kryterium wyznaczenia tzw. *best exit* danego trójkąta w znacznym stopniu wpływa na wyniki dekompozycji Morse'a-Smale'a. Wieloetapowa rozbudowa strefy stabilnej/niestabilnej zależy bowiem od określenia kierunków tej rozbudowy;

- dla wyznaczenia linii strukturalnych modelu TIN jeszcze większe znaczenie ma przyjęcie jako danych źródłowych zbioru punktów (ryc. 6c). Nieuwzględnienie rzeczywistych linii strukturalnych (ryc. 6d) sprawia, że w procesie standardowej triangulacji Delaneuya budowane są trójkąty, których krawędzie przecinają linie strukturalne (ryc. 6e). Wyznaczanie linii szkieletowych na podstawie tak określonej struktury TIN prowadzi do niewłaściwych wyników (ryc. 6g). Jednak nawet dekompozycja Morse'a-Smale'a uwzględniająca przy triangulacji linie strukturalne, nie daje w pełni poprawnych wyników (ryc. 6h);

- należy zwrócić uwagę, iż linie cieków wyznaczone na podstawie mapy topograficznej także nie odpowiadają w pełni liniom strukturalnym widocznym na rysunku poziomicowym opracowanym na podstawie NMT (ryc. 4c, 5c).

7. Wnioski

Według obowiązujących *Wytycznych technicznych Baza Danych Topograficznych* (2003) dla Polski, tzw. model użytkowy NMT ma strukturę regularnej siatki GRID o standardowym oczku



Ryc. 6. Dekompozycja Morse'a-Smale'a (dane modelowe)
Fig. 6. Morse-Smale's decomposition (model data)

siatki 25 m. W odróżnieniu od tzw. archiwalnego NMT, opartego na strukturze TIN, model użytkowy nie zawiera linii strukturalnych. Jedną z propozycji zmian tego stanu zakłada opracowanie komponentu NMT bazy TBD, rozumianego jako ciągła, wektorowa baza danych modelująca wszystkie charakterystyczne elementy rzeźby terenu: charakterystyczne punkty wysokościowe, punkty terenowe (tzw. pikiety), linie szkieletowe, linie nieciągłości, linie położone wzdłuż konturów tzw. obszarów wyłączonych i wokół tzw. obszarów planarnych, niezbędne do prawidłowego odwzorowania ukształtowania powierzchni terenu (A. Makowski 2004). Na podstawie tak zdefiniowanych danych źródłowych możliwe byłoby nie tylko opracowanie pierwotnego NMT w strukturze TIN (i ewentualnie jego konwersja na model regularny o określonej rozdzielczości), lecz także hierarchiczne uogólnienie tego modelu realizowane poprzez generalizację elementów strukturalnych rzeźby terenu. Poprawność procesu uogólnienia modelu pierwotnego NMT warunkowana jest jednak poprawnością wyznaczenia linii i form strukturalnych. Wynik przetwarzania źródłowego modelu rzeźby terenu zależy bowiem nie tylko od przyjętego algorytmu gene-

ralizacji i jego parametrów, lecz przede wszystkim od doboru i rozmieszczenia danych źródłowych tworzących NMT.

Autorzy koncepcji tzw. rozszerzonej dekompozycji Morse'a-Smale'a (E. Danovaro i inni 2003) twierdzą, że uogólnienie wyznaczonych automatycznie linii strukturalnych pozwala na hierarchiczną generalizację NMT, zachowującą istotne relacje topologiczne. Przeprowadzone badania nie potwierdziły tej hipotezy. Wydaje się, że o ile za celowe należy uznać generalizację NMT (lub jego budowę hierarchiczną) realizowaną poprzez uogólnienie linii strukturalnych, to automatyzacja procesu wyznaczania tych linii nie daje pożądanego rezultatu. Za uzasadnione należy zatem uznać konieczność pozyskiwania linii strukturalnych rzeźby terenu w procesie pomiaru bezpośredniego, np. wykorzystując techniki fotogrametryczne na etapie pozyskiwania danych źródłowych bazy TBD. Na podstawie tak wyznaczonego „szkieletu terenu” możliwa jest poprawna generalizacja modelu rzeźby zachowująca razem istotne relacje topologiczne. Szczegółowe omówienie tej koncepcji będzie przedmiotem odrębnego opracowania.

Literatura

- Bajkiewicz-Grabowska E., Magnuszewski A., 2002, *Przewodnik do ćwiczeń z hydrologii ogólnej*. Warszawa: Wydawnictwo Naukowe PWN.
- Brassel K., Weibel R., 1988, *A review and conceptual framework of automated map generalization*. „Intern. J. of Geogr. Inform. Systems” Vol. 2, no. 3, s. 229–244.
- Costa-Cabral M. C., Burges S. J., 1994, *Digital elevation model networks (DEMON): a model of flow over hillslopes for computation of contributing and dispersal areas*. „Water Resources Research” Vol. 30, s. 1681–1692.
- Danovaro E., De Florian L., Magillo P., Mesmoudi M.M., Puppo E., 2003, *Morphology-driven simplification and multiresolution modeling of terrains*. W: *Proceedings ACM-GIS 2003. The 11th International Symposium on Advances in Geographic Information Systems*. Editors E. Hoel and P. Rigaux, ACM Press, s. 63–70; www.disi.unige.it/person/DeflorianiL/publications.html
- De Florian L., Magillo P., 2002, *Multiresolution mesh representation*. W: *Models and data structures in multiresolution in geometric modeling*. Editors M. Floater, A. Iske and E. Quak. Berlin: Springer-Verlag, s. 363–418; www.disi.unige.it/person/DeflorianiL/publications.html
- Eckes T., 2001, *Ćwiczenia z geomorfologii dla geodetów*. Kraków: Uczelniane Wydawnictwo Naukowo-Dydaktyczne.
- GM Grid Tutorial, 2004, Huntsville, Intergraph Corporation.
- Godlib D., Iwaniak A., Olszewski R., 2005, *Jedna referencyjna baza danych topograficznych. Czy to możliwe?* „Geodeta” Nr 1(116), s. 8–11.
- Grünreich D., 1995, *Development of computer-assisted generalization on the basis of cartographic model theory*. W: *GIS and generalization – methodology and practice*. London: Taylor & Francis.
- Gutry-Korycka M. i Werner-Więckowska H. (red.), 1996, *Przewodnik do hydrograficznych badań terenowych*. Warszawa: PWN.
- Heller M., 1990, *Triangulation algorithms for adaptive terrain modeling*. W: *Symposium on Spatial Data Handling*. Zurich, vol. 1, s. 163–174.
- Klimaszewski M., 1978, *Geomorfologia*. Warszawa: PWN.
- Kładoczný D., Żyszkowska W., 1995, *Struktura numerycznych modeli terenu a ich obraz poziomicowy*. „Polski Przegl. Kartogr.” T. 27, nr 4, s. 177–191.
- Kotarbiński J., Urbaniak-Biernacka U., 1991, *Podstawy nauk o Ziemi. Przewodnik do ćwiczeń*. Warszawa: Wydawnictwa Politechniki Warszawskiej.
- Kurczyński Z., Preuss R., 2000, *Podstawy fotogrametrii*. Warszawa: Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej.
- Makowski A., 2001, *Na obrzeżach cybernetyki*. W: *Mapa w systemach komputerowych*. „Materiały Ogólnopolskich Konferencji Kartograficznych” T. 23, Szczecin, s. 6–11.
- Makowski A. (red.), 2004, *System informacji topograficznej kraju – teoretyczne i metodyczne opracowanie koncepcyjne*. Warszawa: Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej (w druku).
- Marcinkiewicz A., 1960, *Atlas form i typów rzeźby terenu Polski*. Warszawa: Zarząd Topograficzny SG.
- Meyer U., 1987, *Computer assisted generalization of buildings for digital landscape models by classification methods*. W: *Proceedings ICA Conference, Morelia, Mexico*.
- Olszewski R., 2003, *Cartographic modelling of statistic surface with the use of non-linear neural networks*. W: *21st International Cartographic Conference, Durban*, s. 325–330.
- Olszewski R., Żyła A., 2004, *Nieliniowa generalizacja numerycznego modelu terenu z wykorzystaniem sztucznych sieci neuronowych*. „Polski Przegl. Kartogr.” T. 36, nr 2, s. 82–91.
- Ostrowski W., 2001, *Typy generalizacji kartograficznej z punktu widzenia semiotyki*. W: *Metody kartograficzne a możliwości systemów komputerowych*. Warszawa: Uniwersytet Warszawski, s. 56–64.
- Piątkowski F., Rokicki J., Dmochowski S., Słupcański B., 1961, *Atlas kartowania form terenu Polski*. Warszawa: PPWK.
- Senetra A., Cieślak I., 2001, *Kartograficzne aspekty oceny i waloryzacji przestrzeni*. Olsztyn: Wydawn. Uniwersytetu Warmińsko-Mazurskiego.
- Sheeren D., 2003, *Spatial databases integration: Interpretation of multiple representations by using machine learning techniques*. W: *21st International Cartographic Conference, Durban*.
- Smale S., 1960, *Morse inequalities for dynamical system*. „Bulletin of American Mathematical Society” Vol. 66, s. 43–49.
- Szczepanek R., 1999, *Automatyczne wyznaczanie wskaźników praw Hortonów-Strahlera na podstawie numerycznego modelu terenu*. W: *Interdyscyplinarność w badaniach dorzecza*. Red. W. Chelmiecki, J. Pociąg-Karteczka. Instytut Geografii UJ, Kraków.
- Weibel R., 1991, *Amplified intelligence and rule-based systems*. W: *Map generalization: making rules for knowledge representation*. Editors B. Buttenfield, R. McMaster. London: Longman, s. 172–186.
- Weibel R., 1992, *Models and experiments for adaptive computer-assisted terrain generalization*. „Cartography and Geogr. Inform. Systems” Vol. 19, no. 3, s. 133–153.
- Wilson J. P., Gallant J. C., 2000, *Terrain analysis*. New York: John Wiley & Sons.
- Wytyczne techniczne. Baza Danych Topograficznych, 2003, Warszawa: Główny Urząd Geodezji i Kartografii.

Recenzował dr hab. Artur Magnuszewski

Multiscale modeling of relief

Part I

Summary

Key words: multiscale generalization of DTM, structure lines

In order to automatize the process of generalization of DTM (Digital Terrain Model) in TDB (Topographic Data Base), information about relief should be recorded in such a way, as to preserve real location of characteristic key forms and structure lines.

Automatic generalization of DTM should involve generalization of database rather than graphic simplification of contour lines.

Among the existing methods of DTM generalization one can distinguish various types of filtering (global, local) and heuristic approach based on a concept of generalization of structure lines. It uses digital operators in interactive cooperation between operator and the digital system. Here, generalization bases on the approximation of source SLM (structure line model) through the use of classic generalization methods such as, among others: magnification, deletion, combination, and simplification of single structure lines, followed by recomposition of secondary DTM basing on the resulting SLM.

In the conducted research it was assumed, that for the composition of a hierarchical (multiscale) DTM basing on a generalization of significant morphological forms it is especially important to properly establish structure lines which constitute the topographic „skeleton” of

terrain. These lines were established basing on the existing topographic maps as well as on the analysis of TIN and GRID model. The aim was to see if it was possible to fully automatically determine structure lines basing on irregular (or regular) source data including no additional information on structural forms.

Most algorithms which determine structure lines of relief basing on the regular model involve advanced analysis of potential surface flow accumulation. The research applied a modified D8 algorithm implemented in GM Grid 5.2 module, which is a functional extension of GeoMedia Professional package by Intergraph.

To establish erosion network (drainage lines) it is vital to determine a threshold of accumulated flow, over which drainage network becomes a stream. Although the process is fully automatic, subjective setting of such threshold significantly varies the results.

Authors of the concept of so-called extended Morse-Smale's decomposition (E. Danovaro L. DeFloriani, P. Magillo, M. Mesmoudi, E. Puppo 2003) claim that generalization of automatically determined structure lines allows for hierarchical DTM generalization, preserving significant topological relations. The research results do not support that hypothesis. Because the actual structure lines were not taken into consideration, in the process of standard Delauney's triangulation there appear triangles with edges crossing structure lines.

It appears that although DTM generalization (or its hierarchical composition) can be successfully executed through the generalization of structure lines, the automatization of the process of determining these lines does not yield expected results. The need to determine structure lines through direct surveying, e.g.

with photogrammetric techniques is therefore justified. Basing on thus determined „skeleton” it is possible to properly generalize the model of relief, while preserving significant topological relations.

Translated by M. Horodyski

Многомасштабное моделирование рельефа местности

Часть I

Резюме

Размышляя об автоматизации процесса генерализации Цифровой Модели Местности (ЦММ) в Базе Топографических Данных (БТД), следует стремиться к такой записи информации о рельефе местности, которая учитывала бы сохранение действительного положения характерных ключевых форм рельефа и структурных линий.

Автоматическая генерализация ЦММ должна заключаться в обобщении модели базы данных, а не в графическом упрощении рисунка горизонталей.

Среди существующих методов генерализации ЦММ выделяются разного вида фильтрации (глобальная, локальная), а также эвристический подход, основанный на концепции генерализации структурных линий рельефа местности. Заключается он в применении цифровых операторов в режиме интерактивного сотрудничества оператора с информационной системой. Генерализация здесь основана на обобщении исходной модели структурных линий (МСЛ) – SLM (structure line model) с помощью применения классических операторов генерализации: преувеличения, исключения, соединения, упрощения и т. п. отдельных структурных линий, а затем, на основе результативной МСЛ, рекомпозиции вторичной ЦММ.

В проведённых исследованиях принято, что для построения иерархической (многомасштабной) ЦММ на основе обобщения существенных морфологических форм, особое значение имеет правильное выделение структурных линий, создающих топографический „скелет” местности. Эти линии определяются на основе существующих топографических карт, а также на основе анализа модели TIN и GRID. Целью проводимых исследований было установление, возможно ли полное автоматическое выделение структурных линий местности на основе нерегулярных (или регулярных) исходных данных, не содержащих никакой дополнительной информации о структурных формах.

Большинство алгоритмов определения структурных линий рельефа местности на основе регулярной

модели заключается в продвинутом далеко вперёд анализе аккумуляции потенциального поверхностного стока. В проведённых исследованиях был использован модифицированный алгоритм D8, сымплементированный в модуле GM Grid 5.2, являющимся функциональным расширением пакета GeoMedia Professional фирмы Intergraph.

Для определения эрозионной сети (линий дренажа) ключевое значение имеет выделение пороговой величины аккумулярованного потока, выше которого эрозионная сеть переходит в ручей. Несмотря на то, что процедура выделения структурных линий вполне автоматизирована, субъективное определение пороговой величины ведёт к тому, что полученные результаты существенно отличаются.

Авторы концепции, так называемой расширенной декомпозиции Morse-Smale (E. Danovaro, L. De Florigiani, P. Magillo, M. Mesmoudi, E. Puppo 2003) утверждают, что обобщение выделенных автоматически структурных линий даёт возможность проведения иерархической генерализации ЦММ, сохраняющей существенные топологические реляции. Проведённые исследования не подтвердили этой гипотезы. Не принятое во внимание действительных структурных линий приводит к тому, что в процессе стандартной триангуляции Деляноя строятся треугольники, края которых пересекают структурные линии.

Кажется, что насколько целесообразным следует признать генерализацию ЦММ (или её иерархическое построение), осуществляемую путём обобщения структурных линий, то автоматизация процесса определения этих линий не даёт желаемых результатов. Следует затем признать обоснованной необходимость получения структурных линий местности с помощью непосредственного измерения, например, используя фотограмметрическую технику. На основе так определённого „скелета местности” возможна правильная генерализация модели рельефа, сохраняющая одновременно существенные топологические реляции.

Перевод Р. Толстикова