

GENERALIZACJA NMT W OPRACOWANIU METODOLOGII REPREZENTACJI RZEŻBY TERENU

DTM GENERALIZATION IN A DEVELOPMENT OF THE METHODOLOGY FOR THE REPRESENTATION OF TERRAIN SHAPE

Krzysztof Bakula¹, Robert Olszewski², Łukasz Bujak², Miłosz Gnat²,
Ewa Kietlińska², Michał Stankiewicz²

¹ Zakład Fotogrametrii, Teledetekcji i Systemów Informacji Przestrzennej,
Wydział Geodezji i Kartografii, Politechnika Warszawska

² Zakład Kartografii, Wydział Geodezji i Kartografii, Politechnika Warszawska

SŁOWA KLUCZOWE: numeryczny model terenu, generalizacja, mapa topograficzna

STRESZCZENIE: Artykuł prezentuje metodę generalizacji numerycznego modelu terenu dla potrzeb prezentacji rzeźby terenu na mapach topograficznych „nowej generacji”. Poprawna generalizacja numerycznego modelu terenu ma szczególnie istotne znaczenie dla zasilania systemów informacji geograficznej (GIS). Dla prowadzenia wiarygodnych analiz przestrzennych szczególnie istotne jest bowiem zachowanie rzeczywistego położenia punktów charakterystycznych kluczowych form terenu.

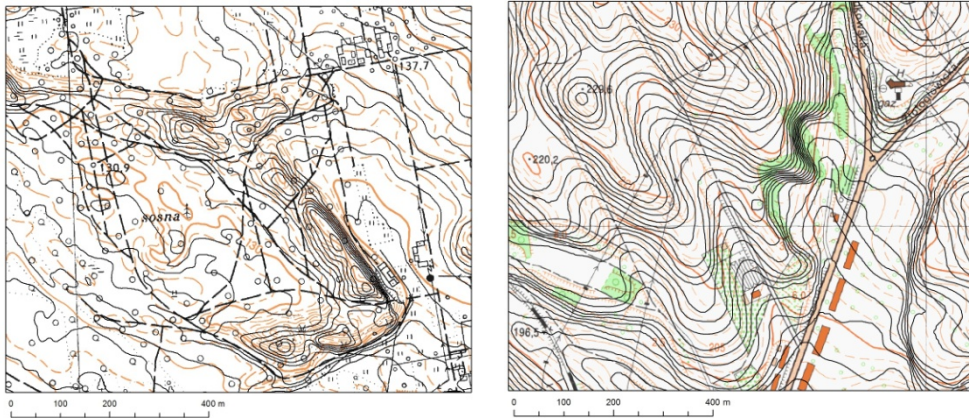
Zdecydowano, że proces generalizacji numerycznych modeli terenu polegać będzie na generowaniu modelu o strukturze hybrydowej z najdokładniejszych danych wysokościowych dostępnych w zasobie geodezyjnym i kartograficznym, które do tego celu musiały zostać odpowiednio przygotowane. Danymi wykorzystywanymi w całym procesie były numeryczne modele terenu pozyskane technologią lotniczego skaningu laserowego w ramach systemu ISOK, a także dane fotogrametryczne z projektu LPIS. W ramach badań stworzono aplikację wykorzystującą w procesie generalizacji: ekstrakcję punktów charakterystycznych wybranymi metodami oraz punktów uzupełniających rozmieszczonych w regularnej siatce, a także ekstrakcję linii strukturalnych do utworzenia wtórnego NMT. Utworzony dla danego poziomu generalizacji model posłużył następnie do generowania warstw w odpowiedniej skali, prezentujących rzeźbę terenu na mapach topograficznych.

1. WPROWADZENIE

1.1. „Nowe” mapy topograficzne

Na dotychczas powstających mapach topograficznych źródłem informacji wysokościowej są prace dane uzyskane metodami: autogrametryczną, dla zastosowania której rzeźbę reprezentowały obserwacje na autografie na podstawie zdjęć lotniczych oraz kombinowaną, przy użyciu której dane opracowywano sposobem zdjęcia stolikowego, gdzie materiałem podstawowym była fotomapa. W przypadku skal mniejszych często źródłem danych była mapa poziomicowa w skali większej. Dokładność takich opracowań

nie jest zadowalająca, co potwierdza rysunek 1 ukazujący różnice w przebiegu warstwicy wygenerowanych z danych ze skaningu laserowego na tle fragmentu mapy topograficznej zawierającej dotychczasowe warstwice. Stworzenie wspomnianej prezentacji rzeźby terenu miało miejsce dziesiątki lat temu, a obecnie metodyka taka jest przestarzała. Również miniony czas od wspomnianych prac zmusza do wyboru nowego, bardziej aktualnego źródła danych, które posłużą do prezentowania rzeźby terenu na „nowych” mapach topograficznych.



a)

b)

Rys. 1. Poziomice wygenerowane z NMT (kolor czarny) z danych ze skaningu laserowego na tle fragmentu mapy topograficznej dla obszarów: staroglacialnego - mapa w układzie 1965 w skali 1:10 000, arkusz 248.311 (a) oraz obszar zurbanizowany miasta Nysa - mapa w układzie 1992 w skali 1:10 000, arkusz M-39-59-D-a-2 (b)

Ze względu na fakt, iż w państwowym zasobie geodezyjnym i kartograficznym dostępne są dane wysokościowe o zasięgu krajowym zgromadzone w ramach realizacji programów ISOK i LPIS, w omawianych badaniach podjęto próbę oceny możliwości wykorzystania obu tych źródeł danych do tworzenia kartograficznej reprezentacji rzeźby terenu na mapach topograficznych nowej generacji. Cel ten w przypadku opracowania reprezentacji dla całego ciągu skalowego map topograficznych jest związany z procesem generalizacji danych wysokościowych niezbędnym dla tworzenia wiarygodnych opracowań kartograficznych szczególnie małoskalowych.

1.2. Generalizacja NMT

Poprawna generalizacja numerycznego modelu terenu ma szczególnie istotne znaczenie dla zasilania systemów informacji geograficznej (GIS). Dla prowadzenia wiarygodnych analiz przestrzennych szczególnie istotne jest bowiem zachowanie rzeczywistego położenia punktów charakterystycznych kluczowych form terenu. Proces uogólniania powinien mieć zatem charakter generalizacji modelu krajobrazowego DLM (ang. *Digital Landscape Model*), nie zaś generalizacji kartograficznej modelu DCM (ang. *Digital Cartographic Model*).

Według Weibla (1995) generalizacja informacji geograficznej, w tym modelowanie rzeźby terenu, jest procesem określonym dwoma zależnościami: struktury danych (ang. *structure-dependent*) oraz celu opracowania (ang. *purpose-dependent*). Tak więc rozpoznanie lokalnych struktur (form geomorfologicznych) jest istotnym elementem procesu generalizacji numerycznego modelu terenu. Proces ten bywa określany jako „*topography preservation*” (Gerstner, Hannappel, 2000).

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

- filtracji globalnej,
- filtracji lokalnej (z reguły wieloetapowej),
- zastosowania podejścia heurystycznego.

Filtracja globalna polega na wyznaczeniu w każdym punkcie NMT wartości średniej ważonej, obliczanej w polu ruchomym o określonej wielkości. Liczba punktów modelu (rozdzielczość) pozostaje stała, zmieniają się jedynie wartości poszczególnych punktów. Metoda może być stosowana głównie dla numerycznego modelu terenu typu GRID. W podejściu tym używane są wariantowo trzy typy filtrów numerycznych: filtr dolnoprzepustowy służący do wygładzenia NMT, filtr górnoprzepustowy służący do wzmocnienia krawędzi, filtr złożony (kombinacyjny) wzmocniający zarówno wysokie jak i niskie częstotliwości. Dla każdej z wymienionych grup filtrów globalnych opracowano szereg specyficznych rozwiązań szczegółowych, mających zastosowanie dla zróżnicowanych rodzajów rzeźby terenu. Istnieje wiele typów filtrów globalnych (Gonzalez i Wintz, 1987), dotychczas nie opracowano jednak jednoznacznego odpowiednika: rodzaj modelowanego terenu – właściwy rodzaj filtra (Olszewski, 2005, 2009).

W procesie **filtracji lokalnej** generalizacja modelu realizowana jest przez selekcję punktów źródłowych. Metoda może być stosowana zarówno dla numerycznego modelu terenu w postaci TIN, jak i GRID. W podejściu tym liczba punktów wyznaczających model ulega zmniejszeniu (możliwa jest oczywiście późniejsza liniowa rekompozycja modelu do początkowej rozdzielczości przestrzennej). Z modelu źródłowego usuwane są (z reguły iteracyjnie) punkty o małej istotności. Istotność poszczególnych punktów modelu jest przy tym z reguły rozumiana jako wertykalna różnica pomiędzy wartością oryginalną i interpolowaną z modelu pozbawionego wybranego punktu. Dobór parametrów metody powinien umożliwiać odtworzenie kształtu terenu z zadowalającą dokładnością. Oznacza to, iż wszystkie punkty charakterystyczne terenu (szczyty, obniżenia, przełęcze muszą pozostać w modelu docelowym NMT. Istnieje wiele odmian tej metody. Firkowski (2003) zastosował metodę filtracji iteracyjnej wykorzystującą minimalizację funkcji entropii, zaś De Florian (2002) i Danovaro (2003) metodę hierarchicznej generalizacji numerycznego modelu terenu w postaci TIN.

Podejście heurystyczne oparte jest na koncepcji generalizacji linii strukturalnych terenu, uzupełnionej poprzez dobór punktów charakterystycznych. 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 polega na emulacji klasycznych technik manualnych poprzez zastosowanie operatorów

numerycznych w trybie interaktywnej współpracy operatora z systemem informatycznym. W podejściu tym nie da się zastosować prostych, w pełni zautomatyzowanych procedur matematycznych. Generalizacja jest oparta na uogólnianiu źródłowego modelu linii strukturalnych – SLM (ang. *structure line model*) poprzez zastosowanie klasycznych operatorów generalizacji: przewiększania, usuwania, łączenia, uproszczenia itp. poszczególnych linii strukturalnych. Następnie, na podstawie wynikowego SLM, dokonywana jest rekompozycja wtórnego modelu NMT. Metoda ta stosowana jest wyłącznie do generalizacji numerycznego modelu kartograficznego (DCM).

Do generalizacji modelu rzeźby terenu w postaci siatki regularnej (danych rastrowych) można także stosować filtry nieliniowe o bardziej złożonej charakterystyce, np. uwzględniające więcej niż jedną zmienną wejściową. Przykładem takiego podejścia jest uwzględnianie w procesie generalizacji numerycznego modelu terenu nie tylko wartości wysokości w otaczających komórkach, lecz także wartości nachylenia i/lub ekspozycji. Przykładem nieliniowej filtracji danych rastrowych jest także zastosowanie automatów komórkowych (Wolfram, 2002, Olszewski, 2003).

Bez względu na metodę wspomnianego procesu, jak również skategoryzowanie go według użytego algorytmu, celem generalizacji jest przystosowanie danych wysokościowych o wyższej rozdzielczości do opracowań w mniejszej skali, bez znaczącej utraty dokładności.

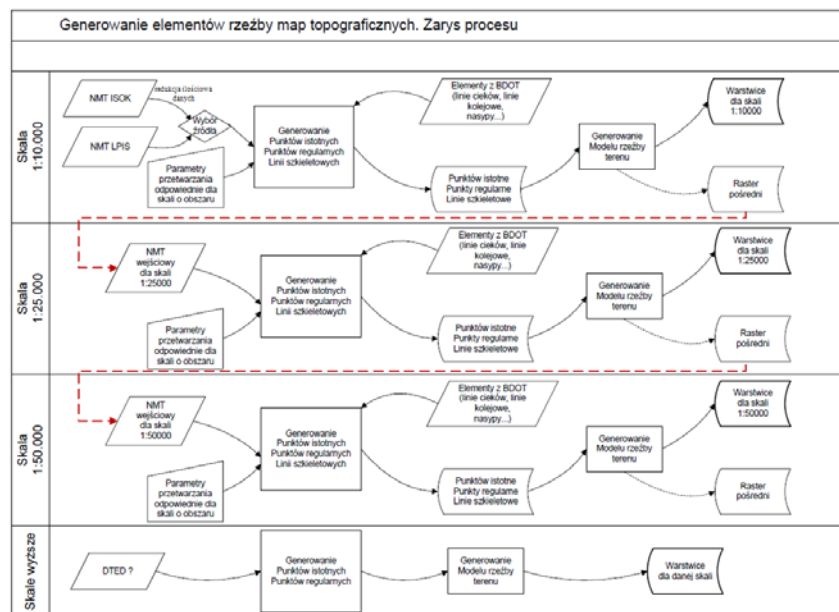
2. METODOLOGIA

2.1. Wybrana metoda

Najprostszą metodą generalizacji numerycznego modelu terenu w postaci regularnej siatki GRID (rastra) jest przepróbkowanie danych wejściowych (metodą najbliższego sąsiada, bilinearną czy splotu sześciennego) do niższej rozdzielczości, co nie zawsze jest rozwiązaniem najlepszym (Zakšek i Podobnikar, 2005). Istnieje zatem konieczność wykorzystania dodatkowych danych wysokościowych zawartych w źródłowych modelach terenu, które umożliwiłyby zachowanie jak największej dokładności generalizowanego NMT w celu uzyskania jak najwierniejszej reprezentacji rzeźby terenu w postaci warstw. Koncepcja taka prowadzi do tworzenia numerycznego modelu terenu o strukturze hybrydowej, w której regularnie rozmieszczone punkty o określonym interwale są uzupełnione o wybrane punkty istotne, linie nieciągłości, linie ciekowe i grzbietowe. W literaturze można znaleźć wiele metod generalizacji przedstawiające zbliżone ideowo podejścia (Ai i Li, 2010; Zakšek i Podobnikar, 2005; Zhou i Chen, 2011). Zaproponowana przez autorów metoda jest kompilacją kilku podejść, w których regularna siatka punktów wzmocniona jest punktami istotnymi opisującymi charakter terenu (linie grzbietowe, stoki etc.), jak również liniami ciekowymi pozyskanymi w środowisku narzędziowym GIS. Podejście to jest przykładem procesu tzw. „wzmocnienia danych” (ang. *data enrichment*), polegającego na „wydobyciu” z bazy danych struktur i wzorców przestrzennych. Autorzy stosując dobrze znany algorytm cyfrowej emulacji spływu powierzchniowego D8 Marka (1975), uzyskują w ten sposób linie cieków na podstawie źródłowego NMT.

Przyjęte założenia merytoryczne umożliwiły określenie ogólnych ram procesu generalizacji:

- uogólnienie informacji wysokościowej wymaga selekcji form strukturalnych spełniających określone kryteria wielkościowe (procent pozostawianych punktów czy parametr określający istotność punktu zakwalifikowaniu go do linii ciekowej etc.) właściwe dla danej skali i dobrane indywidualnie do danego obszaru. Oznacza to wybór ze źródłowego modelu rzeźby terenu: linii strukturalnych (linii cieków) oraz punktów istotnych o określonej liczebności (Piątkowski, 1961)
- w oparciu o wybrane dane tworzony jest pochodny numeryczny model rzeźby terenu, który stanie się źródłem generowania izol linii.



Rys. 2. Zarys procesu generalizacji numerycznego modelu terenu w celu generowania warstw dla map topograficznych

Przyjęto zatem, iż ramowy algorytm procesu generalizacji NMT dla późniejszego generowania warstw przyjmie postać:

- I. Ekstrakcja punktów istotnych
 - ekstrakcję punktów istotnych z użyciem algorytmów VIP (Chen i Guevara, 1987), TPI (Jenness, 2006) i Z-tolerance
 - uzupełnienie punktów istotnych punktami „masowymi” rozmieszczonymi regularnie w określonym przez użytkownika interwale,
 - usunięcie z modelu punktów położonych zbyt blisko linii strukturalnych (w zdefiniowanej strefie buforowej) w celu uwypuklenia układu morfologicznego rzeźby terenu (Olszewski, 2009)
- II. Ekstrakcję linii ciekowych przy wykorzystaniu algorytmu D8 (Mark, 1975)
 - opracowanie pochodnych względem NMT modeli spływu powierzchniowego i akumulacji,

- reklasyfikacja uzyskanych modeli pozwalająca na wybranie istotnych linii spływu powierzchniowego,
 - konwersja formatu (zamiana postaci rastrowej na wektorową),
 - uproszczenie i wygładzenie linii strukturalnych,
 - ewentualne uzupełnienie linii szkieletowych przez zastosowanie wektorowych klas obiektów z bazy BDOT (sieci cieków i budowle ziemne),
- III. Budowa modelu wtórnego TIN i jego konwersja do postaci siatki regularnej GRID,
IV. Generowanie warstw i ich redakcja kartograficzna.

Generalizacja numerycznych modeli terenu dla skal mniejszych od 1:10 000 przebiegała dla danych z obydwu źródeł w ten sam sposób, co ilustruje rysunek 2, ukazujący, że każdy kolejny krok generalizacji NMT odbywał się z użyciem wynikowej siatki GRID otrzymanej w kroku poprzednim dla zachowania spójności całego procesu. Wybór metodyki polegającej na sekwencyjnej generalizacji danych podyktowany był faktem, iż podejście kartograficzne do tego zagadnienia nie rekomenduje bezpośredniego przejścia z wysokorozdzielczych danych do opracowań w skali znacząco mniejszej. Operacja taka powodować może problemy wynikające z możliwych interakcji przy łącznym przetwarzaniu danych sytuacyjnych (linie strukturalne) z danymi wysokościowymi (punkty masowe), co miałyby niekorzystny wpływ na wyniki późniejszego generowania warstw.

2.2. Obszary testowe i wykorzystane dane

W kontekście reprezentacji rzeźby terenu na tworzonych mapach topograficznych nowej generacji, tj. generowanych z referencyjnej bazy danych BDOT, biorąc pod uwagę krajowe zasoby geodezyjne i kartograficzne, za uzasadnione w rozważaniach należy uznać wykorzystanie danych pochodzących z projektów LPIS i ISOK. Obydwa źródła danych, przy analizie ich potencjału i przydatności dla reprezentacji rzeźby terenu na mapach topograficznych, posiadają swoje wady i zalety. Wykonane próby przedstawienia rzeźby terenu oraz analiza metodyki pozyskania i uzyskane dokładności obydwu źródeł wskazują na konieczność wykorzystania danych z projektu ISOK. Dane LPIS, z racji ograniczonej dostępności danych ze skaningu laserowego w zasobie geodezyjnym i kartograficznym, są zalecanym źródłem dla pozostałych arkuszy map topograficznych, gdzie nie ma danych z ISOK. Dokładność NMT z LPIS, przede wszystkim dla terenów odkrytych, jest wystarczająca dla prezentacji rzeźby terenu w omawianych skalach mapy topograficznej.

Opracowane algorytmy badane były na 5 obszarach testowych, których każdy stanowił arkusz mapy topograficznej w skali 1:10 000 i reprezentował różnorodny charakter ukształtowania terenu:

- obszar starogłacjalny (południowa część Niziny Mazowieckiej - Równina Garwolińska, stanowiąca obszar silnie denudowany jedynymi formami wyróżniającymi się w terenie w postaci wydm parabolicznych oraz dolin rzecznych (Kondracki, 2000), arkusz M-34-8-C-d-1,
- obszar młodogłacjalny – Wysoczyzna Żarnowiecka – mezoregion Pobrzeża Koszalińskiego, którego powierzchnia jest silnie rozczłonkowana - obniżenia dzielą ją na wiele kęp wysoczyznowych, na których powierzchni występują pagórki morenowe i zalesione sandry (Kondracki, 2000), arkusz N-33-48-D-c-4,

- góry niskie - Sudety Wschodnie - Góry Wałbrzyskie i Kamienne, stanowiące obszar podzielony na kilkanaście mniejszych pasm oddzielonych od siebie dolinami, często przełomowymi dolinami rzek (Kondracki, 2000), arkusz M-33-45-D-c-1,
- góry wysokie – Tatry Wysokie – obszar o rzeźbie wysokogórskiej, jedyny w Polsce obszar o typowej rzeźbie alpejskiej (Kondracki 2000), arkusz M-34-101-A-c-1,
- teren zurbanizowany – miasto Nysa położone na granicy Przedgórze Sudeckiego i Niziny Śląskiej, przez który przepływa Nysa Kłodzka, arkusz M-33-59-D-a-2.

2.3. Narzędzia

Implementację procesu generowania warstw z numerycznych modeli terenu wykonano w oprogramowaniu ArcGIS 10. Środowiskiem projektowym był *Model Builder*. Jest on platformą służącą do realizowania wielowarstwowych procesów przetwarzania danych w oparciu o diagramy. Wypracowana funkcjonalność została zapisana w formie skryptów języka programowania *Python*. Użytkownikowi są one udostępniane w programie ArcMap jako narzędzia modułu ArcToolbox.

W ramach niniejszego projektu stworzono dwa narzędzia, z których pierwsze odpowiadało za ekstrakcję danych do stworzenia modelu zgeneralizowanego, a drugie generowało warstwice oraz wtórny, uogólniony NMT potrzebny jako dane wejściowe do generowania warstw i zgeneralizowanego modelu dla mniejszej skali.

3. REZULTATY

Opisana w rozdziale 2.1 metodyka postępowania polegała na początkowym „odchudzeniu” danych z lotniczego skaningu laserowego, mających zbyt dużą rozdzielczość, dla zastosowania, jakim jest prezentacja rzeźby terenu na mapach topograficznych. Zagadnienie redukcji ilościowej danych zawartych w numerycznych modelach terenu (Bakula, 2011) stało się kluczowe dla rozpoczęcia pracy z danymi z systemu ISOK z racji faktu, że dla wielu obszarów krajów zaproponowana metodyka musiała być adekwatna również dla danych fotogrametrycznych z projektu LPIS, które charakteryzują się niższą rozdzielczością modeli. Wielkość plików NMT ze skaningu laserowego została znacząco zmniejszona przy jednoczesnym zachowaniu dokładności wynikowego modelu, co zagwarantować miało pozyskanie w zbiorach punktów istotnych i linii strukturalnych. Uzyskane rezultaty udowodniły efektywność redukcji ilościowej danych wysokościowych, co zaprezentowane zostało w tabeli 1.

Przedstawione wyniki udowadniają, że przy zastosowaniu niewiele ponad 1% początkowego zbioru danych wysokościowych, otrzymać można bardzo zbliżone wyniki do tych, które gwarantują dane pełnej rozdzielczości. Uzyskane błędy średnie (RMSE) obliczone na podstawie różnic wysokości NMT poddanemu redukcji ilościowej danych i NMT oryginalnego zestawione zostały z wynikami próbkowania do niższej rozdzielczości. Wartości błędów dla wszystkich 5 obszarów są mniejsze przy zastosowaniu przedstawionej metody ‘odchudzenia’ danych poprzez ekstrakcję punktów istotnych i włączenie ich do regularnej siatki punktów, uzyskując model o strukturze hybrydowej.

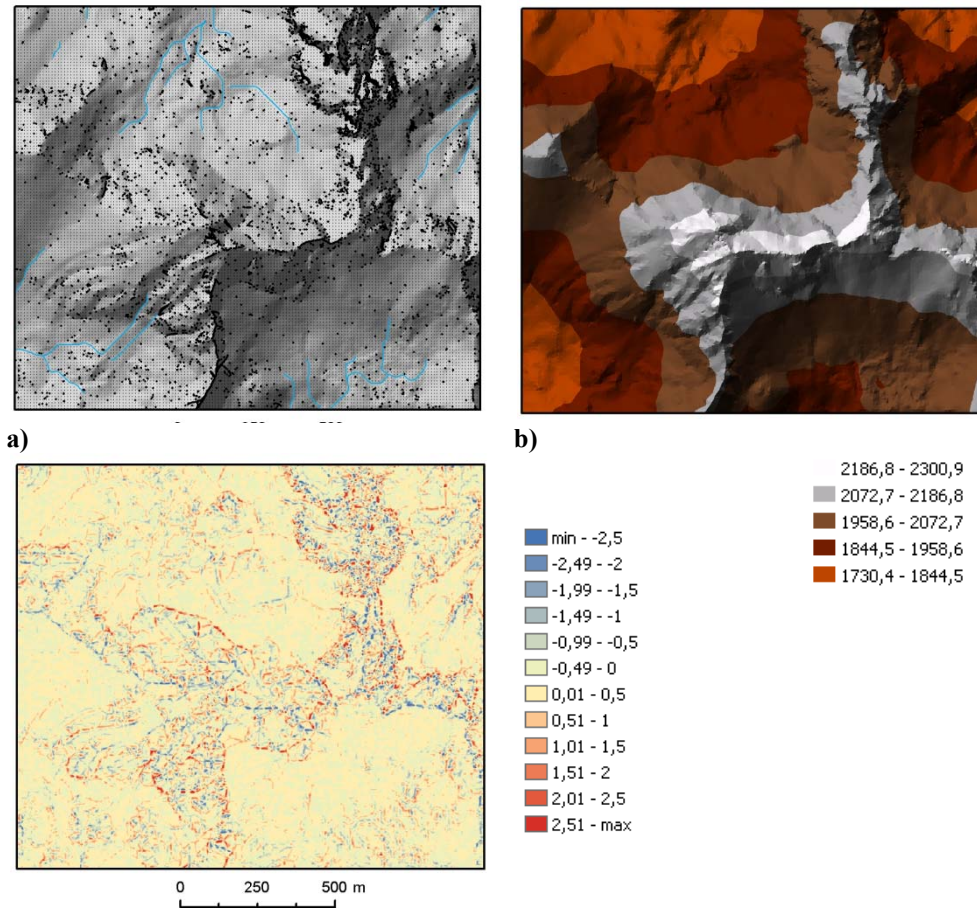
Tabela 1. Podsumowanie wyników redukcji ilościowej danych z ISOK dla otrzymania zgeneralizowanego NMT dla wygenerowania warstw w skali 1:10 000 w porównaniu z odpowiadającymi wynikami dla zwykłego przepróbkowania danych

nr arkusza mapy	rozmiar oczka wtórnej siatki GRID	wykorzystany procent punktów względem wejściowego NMT	redukcja ilościowa danych w NMT do modelu hybrydowego	przepróbkowanie siatki GRID	liczba obserwacji odstających $dh > 3 \cdot RMS $
			RMSE [m]	RMSE [m]	
M-33-59-D-a-2 zurbanizowany	10	1.01%	0.21	0.48	1.9%
M-34-8-C-d-1 starogłacjalny	10	1.02%	0.08	0.25	1.9%
N-33-48-D-c-4 młodogłacjalny	10	1.01%	0.14	0.30	1.7%
M-33-45-D-c-1 góry niskie	10	1.01%	0.31	0.84	1.5%
M-34-101-A-c-1* góry wysokie	10	1.01%	0.54	2.49	2.1%

* Z racji braku danych z ISOK wykorzystano za wejściowy w celach badawczych dla obszaru gór wysokich NMT z LPIS

O wyższej dokładności opisanego procesu w stosunku do zwiększania oczka regularnej siatki punktów NMT przemawia przede wszystkim rozmieszczenie punktów istotnych, które w przedstawionej metodyce 'wzmacniały model w miejscu linii grzbietowych (rys. 3a). Zagadnienie to jest szczególnie ważne na terenach górskich, gdzie nie uwzględnienie dodatkowych punktów w procesie generalizacji NMT obserwowane jest w postaci znaczących różnic wysokości. Rysunek 3c ukazuje różnice wysokości pomiędzy modelem zgeneralizowanym, a źródłowym modelem nieprzetworzonym, gdzie uwzględniono wykorzystanie punktów istotnych. Widoczne różnice były mniejsze w okolicy stoków górskich.

Generalizacja numerycznych modeli terenu dla skal mniejszych niż 1:10 000 przebiegała dla danych wysokościowych z projektu LPIS i ISOK w ten sam sposób, w którym wynikowa siatka GRID otrzymana w kroku poprzednim stanowi dane wejściowe dla dalszej generalizacji (rys. 2). W tabeli 2 zestawiono uzyskane wyniki rezultaty dla 4 kroków generalizacji, odpowiadającym czterem skalom map topograficznych. W tabeli ukazana jest odległość pomiędzy regularnie rozmieszczonymi punktami NMT (dobrana indywidualnie do charakteru terenu) oraz błędy średnie ($RMSE_0$) obliczone względem źródłowego NMT (oddzielnie LPIS i ISOK). Również tu wyniki zestawiono z rezultatami przepróbkowania NMT do niższej rozdzielczości, dla ukazania efektywności opracowanej metodyki.



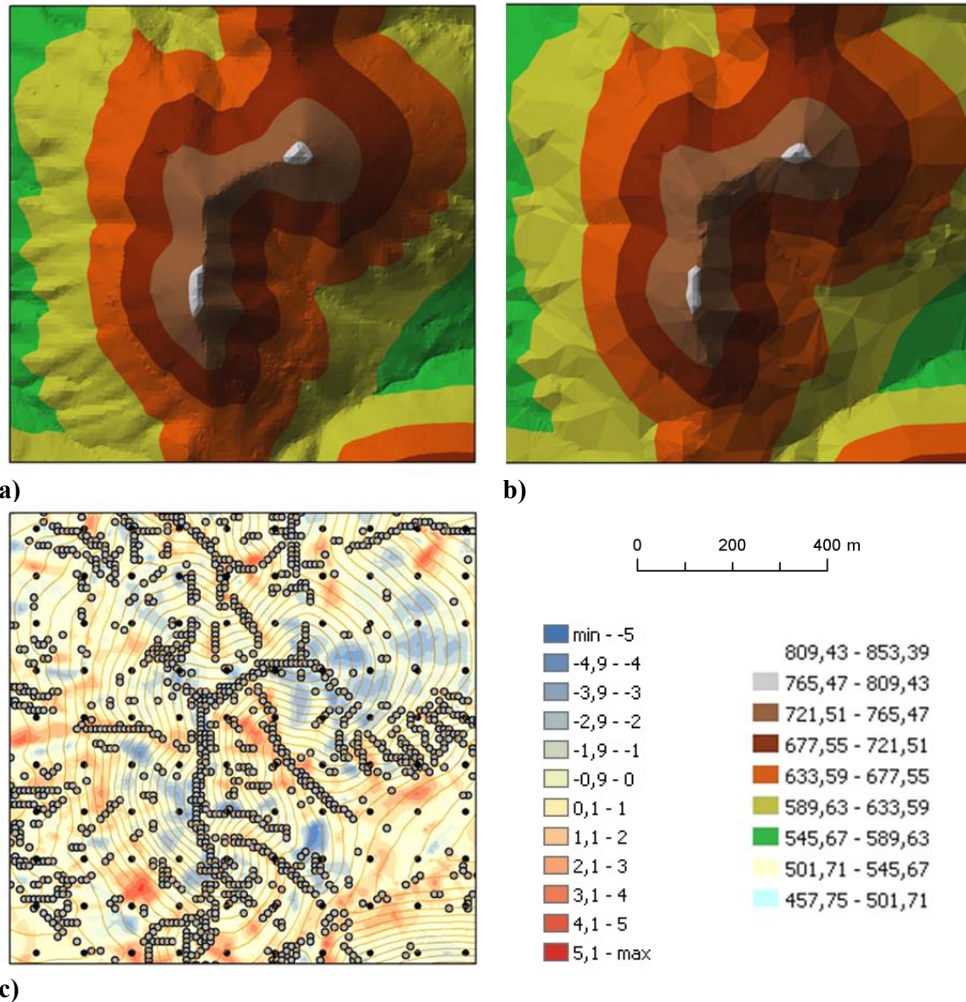
c)
 Rys. 3. Rozkład wyekstrahowanych punktów istotnych (czarne punkty), linii ciekowych (niebieskie linie) na tle regularnie rozmieszczonych punktów i modelu cieniowanego (a) numeryczny model terenu fragmentu obszaru gór wysokich (b) rozkład przestrzenny różnic wysokości pomiędzy modelem zgeneralizowanym a źródłowym modelem nieprzetworzonym (c)

Wyniki ukazują lepsze rezultaty niż te uzyskane w efekcie zmniejszenia rozdzielczości wejściowych danych wysokościowych. Warto również zaznaczyć, że ukazanie wyników dla NMT z ISOK i LPIS nie ma na celu porównania dokładności obydwu źródeł danych i wyników ich późniejszej generalizacji, gdyż zawarte w tabeli 2 błędy średnie obliczane były względem innych danych referencyjnych (oryginalnych danych źródłowych).

Tabela 2. Podsumowanie wyników generalizacji NMT dla generowania warstw szeregu skalowego map topograficznych

nr arkusza mapy	skala mapy	rozmiar oczka regularnych punktów	NMT ISOK	NMT LPIS	przepróbkowanie NMT z ISOK
			RMSE ₀ [m]	RMSE ₀ [m]	RMSE ₀ [m]
M-34-8-C-d-1 staroglacjalny	1:10 000	5	0.09	0.10	0.25
	1:25 000	10	0.18	0.16	0.34
	1:50 000	15	0.29	0.23	0.41
	1:100 000	25	0.40	0.34	0.54
N-33-48-D-c-4 młodoglacjalny	1:10 000	10	0.15	0.36	0.30
	1:25 000	25	0.67	0.68	0.68
	1:50 000	50	1.21	0.93	1.23
	1:100 000	50	1.35	1.06	1.23
M-33-45-D-c-1 góry niskie	1:10 000	10	0.30	0.93	0.84
	1:25 000	25	0.83	1.62	1.98
	1:50 000	50	1.77	3.29	3.78
	1:100 000	100	2.54	5.35	7.17
M-34-101-A-c-1 góry wysokie	1:10 000	10	bd.	0.68	2.49
	1:25 000	25	bd.	2.38	5.81
	1:50 000	50	bd.	3.99	10.78
	1:100 000	100	bd.	5.63	20.16
M-33-59-D-a-2 zurbanizowany	1:10 000	10	0.21	0.28	0.48
	1:25 000	25	0.90	0.45	0.83
	1:50 000	50	1.06	0.81	1.28
	1:100 000	50	1.20	0.90	1.28

Wizualny efekt przeprowadzonej generalizacji ukazano na rysunku 4, ilustrującym numeryczny model terenu w postaci siatki TIN odpowiadającej skalom 1:10 000 (rys. 4a) i 1:100 000 (rys. 4b). Modele te stworzone zostały w oparciu o regularnie rozmieszczone punkty (siatka odpowiednio 10 m i 100 m) oraz punkty istotne, pozyskane z przetworzenia NMT w strukturze GIRD omawianymi algorytmami (rys. 4c), w okolicy których zaobserwowano mniejsze różnice wysokości w porównaniu z modelem poddanym generalizacji.



Rys. 4. Efekt generalizacji NMT ze skali 1:10 000 (a) do skali 1:100 000 (b) dla fragmentu obszaru testowego gór niskich wraz z rozkładem przestrzennym różnic wysokości pomiędzy obydwooma modelami z ukazaniem rozmieszczenia regularnych punktów (czarne kropki) i dodatkowych punktów istotnych podnoszących dokładność modelu przetworzonego w czasie generalizacji (czarne kropki z białym wypełnieniem) (c)

4. PODSUMOWANIE

Zastosowane podejście do zagadnienia generalizacji numerycznego modelu terenu obejmowało przystosowanie i wykorzystanie danych z zasobu geodezyjno-kartograficznego do umożliwienia reprezentacji rzeźby terenu na mapach topograficznych nowej generacji. Rezultaty przedstawionego podejścia są satysfakcjonujące biorąc pod uwagę niewielkie

błędy średnie w porównaniu z danymi wejściowymi oraz niezmiernie mały procent danych wykorzystanych do tego celu.

Opracowując koncepcję reprezentacji rzeźby terenu na nowych mapach topograficznych autorzy kierowali się fundamentalnymi założeniami merytorycznymi i technologicznymi dotyczącymi przede wszystkim tego, iż generalizacja rzeźby terenu jest procesem uogólniania form morfologicznych, nie zaś upraszczaniem kształtu poszczególnych poziomów. Sam proces generalizacji, którego celem jest technologiczne wsparcie opracowania map topograficznych informacji wysokościowej, musi bazować wyłącznie na danych dostępnych w państwowym zasobie geodezyjnym i kartograficznym.

Przeprowadzone badania wykazały, iż ze względu na ogromne zróżnicowanie rzeźby terenu oraz źródłowych danych wysokościowych zgromadzonych w ramach realizacji programów ISOK i LPIS, nie jest możliwa pełna automatyzacja procesu generalizacji informacji wysokościowej oraz generowania poprawnych kartograficznie warstw z wynikowego numerycznego modelu rzeźby terenu. W zależności od dostępności danych źródłowych (bazy TBD, BDOT, LPIS, ISOK) należy odpowiednio dobrać obiekty charakterystyczne – linie strukturalne oraz punkty charakterystyczne, kierując się dokładnością geometryczną danych oraz ich aktualnością, co będzie przedmiotem przyszłych publikacji.

5. LITERATURA

- Ai T., Li J., 2010. A DEM generalization by minor valley branch detection and grid filling, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 65 pp. 198-207.
- Bakuła K., 2011. Reduction of DTM obtained from LiDAR data for flood modeling, *Archives of Photogrammetry, Cartography and Remote Sensing*, vol. 22, pp. 51-61.
- Chen Z. T., Guevara J. A., 1987. Systematic selection of very important point (VIP) from digital terrain model for constructing triangular irregular networks. *Proceedings of International Symposium on Computer-Assisted Cartography (AUTO-CARTO 8)*, Baltimore, U.S.A., pp. 50-56.
- Danovaro E., De Floriani L., Magillo P., Mesmoudi M.M., Puppo E., 2003. Morphology-Driven Simplification and Multiresolution Modeling of Terrains, *Proceedings ACM-GIS 2003 - The 11th International Symposium on Advances in Geographic Information Systems*, E. Hoel and P. Rigaux (Eds.), *ACM Press*, pp. 63-70, www.disi.unige.it/person/DeflorianiL/publications.html
- De Floriani L., Mirra D., Puppo E., 1993. *Computer Graphics Forum* nr 12(3).
- Firkowski, H., Carvalho, C.A.P. and Sluter, C.R., 2003. Regular grid DEM generalization based on information theory, materiały XXI Międzynarodowej Konferencji Kartograficznej, Durban.
- Gerstner T., Hannappel M., 2000. Error Measurement w: *Multiresolution Digital Elevation Models*, w: Heuvelink G., Lemmens M., editors, *Accuracy* (Proc. 4th International Symposium on Spatial Accuracy Assessment in Natural Resources and Environmental Sciences).
- Gonzalez R. C., Wintz P. A., 1987. *Digital Image Processing*, Massachusetts, Addison – Wesley.
- Höhle J., Potuckova M., 2011. Assessment of the Quality of Digital Terrain Models, *Official Publication No 60 of European Spatial Data Research*.

- Kondracki J. 2000. *Geografia regionalna Polski*, PWN, Warszawa.
- Jenness, J. 2006. Topographic Position Index (tpi_jen.avx) extension for ArcView 3.x, v. 1.2. Jenness Enterprises. <http://www.jennessent.com/arcview/tpi.html>
- Mark, D. M., 1975. Computer Analysis of Topography: A Comparison of Terrain Storage Methods, *Geografisker Annaler* 57A:179-188. A quantitative comparison of regular grids and triangulated networks.
- Olszewski R., 2003. Grid generalization based on cellular automata theory, *Geodezja i Kartografia*, t. LII, z. 2, Warszawa.
- Olszewski R., 2005. Generalizacja NMT, w: A. Makowski (red.), *System informacji topograficznej kraju. Teoretyczne i metodyczne opracowanie koncepcyjne*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa.
- Olszewski R., 2009. Kartograficzne modelowanie rzeźby terenu metodami inteligencji obliczeniowej, *Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej*, Warszawa.
- Piątkowski F., 1961. *Atlas kartowania form terenu Polski*, PPWK, Warszawa.
- Weibel R., 1992. Models and experiments for adaptive computer-assisted terrain generalization, *Cartography and Geographic Information Systems*, Vol. 19, No. 3.
- Weibel R., 1995. Map generalization in the context of digital systems, *Cartography and GIS*, vol. 22, no. 4.
- Wolfram S., 2002. *A New kind of science*. Winnipeg: Wolfram Media Inc.
- Zakšek K., Podobnikar T., 2005. An Effective DEM generalization with basic GIS operations. 8th ICA workshop on Generalisation and Multiple Representation, Coruna, Spain. http://ica.ign.fr/Acoruna/Papers/Zaksek_Podobnikar.pdf
- Zhou Q., Chen Y., 2011. Generalization of DEM for terrain analysis using a compound method. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 66, pp. 38-45.

DTM GENERALIZATION IN A DEVELOPMENT OF THE METHODOLOGY FOR THE REPRESENTATION OF TERRAIN SHAPE ON TOPOGRAPHIC MAPS

KEY WORDS: digital terrain model, generalization, topographic map

Summary

The paper presents the generalization methodology for data contained in digital terrain model (DTM) for the purpose of relief presentation on new topographic maps. An appropriate generalization process of digital terrain model is especially significant for geographic information systems (GIS). It is particularly important for reliable spatial analysis, therefore, to retain real position of characteristic points defining key landforms.

It was decided that the proposed generalization process of digital terrain models was based on the hybrid structure of DTM generation from the most accurate height data in geodetic and cartographic resource. For this reason special application was developed which uses: an extraction of characteristic points and regularly distributed complementary points, as well as an extraction of structural lines to create a secondary DTM during generalization. The implementation of the whole process was carried out in Model Builder in ArcGIS 10. DTM created for a selected level of generalization was used then to generate contours for an appropriate scale, presenting the terrain on topographic maps. Two data source was used in presented research i.e. DTM from aerial laser scanning obtained in ISOK project and DTM created from photogrammetric data acquired in LPIS

project. The proposed algorithm was tested on five areas representing different types of terrain: old glacial and young glacial landscape, low and high mountains and urban area. The results were compared for both data source. The statistical parameters were also calculated for the selected level of DTM generalization with regard to the raw data. For each test area DTM from LPIS and ISOK projects were positively generalized to hybrid structure which allowed for effective contours creation and acceptable relief representation on topographic maps in selected scale. Only few percent of initial data guaranteed appropriate cartographic accuracy in relief representation in result.

As a conclusion authors indicate that full automation procedure of DTM generalization is not possible for whole Poland because of large morphometric diversity of our country. Presented research proved that achieving optimal results and satisfied cartographic accuracy can be obtained with usage of high resolution height data, exposed to the generalization algorithms, and supplemented by the current data from topographic data bases (TBD, BDOT).

Dane autorów:

Mgr inż. Krzysztof Bakula
e-mail: k.bakula@gik.pw.edu.pl
telefon: +48 22 234 7694

Prof. nzw. dr hab. Robert Olszewski
e-mail: r.olszewski@gik.pw.edu.pl
telefon: +48 22 234 7690

Dr Łukasz Bujak
e-mail: lbujak@poczta.onet.pl
telefon: +48 22 2347690

Mgr inż. Miłosz Gnat
e-mail: milosz.gnat@gmail.com
telefon: +48 22 234 7690

Inż. Ewa Kietlińska
e-mail: evakietlinska@gmail.com
telefon: +48 22 234 7690

Dr inż. Michał Stankiewicz
e-mail: m_stankiewicz@interia.pl
telefon: +48 22 234 7690