

Jerzy WYSOCKI

Katedra Geodezji i Fotogrametrii SGGW

Analiza porównawcza wybranych komputerowych i analogowych metod wielkoskalowych opracowań warstwicznych

Wstęp

Rzeźba terenu jest jednym z głównych elementów map szczegółowych opracowywanych dla potrzeb inżynierii środowiska wiejskiego. Przy realizacji prac w zakresie budowy zbiorników retencyjnych, wodociągów wiejskich, sieci melioracyjnych, budowy dróg rolniczych, budownictwa wiejskiego itp. konieczne jest posłużenie się wielkoskalowymi mapami sytuacyjno-wysokościowymi. Podstawową metodą przedstawiania rzeźby terenu na tych mapach jest metoda warstwiczna.

Oprócz tradycyjnej metody opracowań warstwicznych, wykonywanych na podstawie pomiarów tachimetrycznych, coraz większe zastosowanie do tych opracowań znajdują analogowe i analityczne metody fotogrametryczne oraz metody komputerowe, oparte na numerycznym modelu terenu (NMT). Zwiększenie, w warunkach krajowych, zakresu zastosowania tych metod do potrzeb inżynierii środowiska wiejskiego zależy od stopnia ich "atrakcyjności" w stosunku do metody tradycyjnej. W dużym stopniu jest to uwarunkowane możliwymi do uzyskiwania dokładnościami opracowań warstwicznych (Wysocki 1987) za pomocą tych metod.

W niniejszej pracy przedstawiono wybrane uogólnione wyniki badań i analiz prowadzonych przez autora w tym zakresie.

Zakres badań i analiz

Badania i analizy przeprowadzono dla dziesięciu map warstwicznych opracowanych różnymi metodami. Mapy zostały opracowane w skali 1:2000, to jest typowej skali, jaka jest przewidywana dla różnych potrzeb w zakresie inżynierii środowiska wiejskiego.

Do opracowania powyższych map wykorzystano następujące metody analogowe i komputerowe:

Metoda A. Tachimetria elektroniczna z wykorzystaniem tachimetru EOT 2000. Wysokości (Z) charakterystycznych punktów terenu określono za pomocą niwelacji trygonometrycznej. Położenie punktów NMT określono za pomocą współrzędnych (X, Y). Mapy warstwiczne opracowano z wykorzystaniem interpolacji sposobem linii równoległych.

Metoda B. Bezpośrednie opracowanie warstwiczne wykonane fotogrametryczną metodą analogową.

Metoda C. Bezpośrednie opracowanie warstwiczne wykonane fotogrametryczną metodą analogową o podwyższonej dokładności (metodą strefową — Wysocki 1992).

Metoda D. Fotogrametryczne, punktowe (cyfrowe) opracowanie wysokościowe o podwyższonej dokładności (Wysocki 1987). Opracowanie warstwice manualnie lub techniką komputerową.

Metoda E. Opracowanie warstwicy metodą komputerową opracowaną w SGGW (Wysocki 1987). Metoda wykorzystuje do opracowania map warstwicznych dwie procedury:

E/1 — zadaną topologią, gdzie oprócz wartości X, Y, Z punktów NMT, jest podawany również schemat połączenia punktów modelu, tak aby powstała w ten sposób nieregularna siatka trójkątów (elementów), aproksymująca powierzchnię terenu, pokryła opracowany obszar. Przy tym rozwiązaniu wybór elementów jest dokonywany i kodowany przez człowieka;

E/2 — topologia jest generowana automatycznie przez komputer.

W obydwu powyższych procedurach do wygładzania linii warstwicznych wykorzystano standardowe oprogramowanie plotera w funkcje gięte (skłajane) typu spline. Funkcję tą opisuje się jako zbudowaną z wielomianów (najczęściej trzeciego stopnia) w ten sposób, że sama funkcja i jej dwie pierwsze pochodne są ciągłe. Do opracowania map warstwicznych tą metodą wykorzystano NMT uzyskany z tachimetrii elektronicznej (tachimetrem EOT) lub z opracowania fotogrametrycznego (metoda D).

Metoda F. Opracowanie warstwicy metodą komputerową opracowaną w SGGW (Zbucki 1982). W metodzie tej wykorzystano rozwiązanie z zadaną topologią. Do wygładzania linii warstwicznych wykorzystano funkcje gięte. Opracowano własną procedurę rozwiązania tego zagadnienia. Do opracowania map warstwicznych wykorzystano NMT uzyskany z tachimetrii elektronicznej lub z opracowań fotogrametrycznych.

Za pomocą wyżej wymienionych metod zostały opracowane mapy warstwiczne dla trzech typów terenu:

- teren płaski, lekko falisty,
- teren falisty,
- teren morenowy.

Ogólną charakterystykę map warstwicznych przedstawiono w tabeli 1.

Badania i analizy przeprowadzono na podstawie prac pomiarowo-kontrolnych. Dla każdego terenu (obiektu) założono i pomierzono osnowę geodezyjną, z której były wykonywane pomiary punktów kontrolnych, określając ich współrzędne płaskie oraz wysokości z odpowiednią dokładnością.

Dokładność map warstwicznych opracowanych wyżej wymienionymi metodami oszacowano za pomocą dwóch estymatorów (tab. 1).

Pierwszy estymator zastosowano za pomocą średniego błędu wysokości warstwicy (m_h), określanego z wykorzystaniem eksperymentalnego wzoru Koppego w postaci:

$$m_h = \pm (a + b \cdot \operatorname{tg} \alpha)$$

gdzie:

- α — kąt nachylenia terenu,
- a — stała charakteryzująca błąd wysokości,
- b — stała charakteryzująca błąd położenia.

Wartości błędu m_h obliczono dla przeciętnego kąta nachylenia terenu na danej mapie warstwicznej.

Należy zauważyć (tab. 1), że badanie dokładności tą metodą nie w każdym przypadku dało w pełni miarodajne rezultaty. Otrzymano np. duże różnice wartości stałej b dla różnych map warstwicznych terenu płaskiego. Wynika to stąd, że przy małych nachyleniach terenu (i małym cięciu warstwicy), na wartość błędu wysokości warstwicy ma duży wpływ chropowatość powierzchni terenu (Wysocki 1985), a nie tylko występujące tutaj nieduże nachylenia. Wpłynęło to nieraz na zakłócenie logicznej formy równania Koppego, gdzie jednym z głównych parametrów jest kąt nachylenia terenu. W związku z tym wydaje się niecelowe stosowanie równania Koppego do oceny dokładności map warstwicznych takich terenów. Wniosek ten pokrywa się zresztą z odpowiednimi zaleceniami obo-

TABELA 1. Ogólna charakterystyka map warstwicznych opracowanych różnymi metodami w skali 1:2000 (objaśnienia w tekście)

Mapa lp.	Metoda opracowania	Rodzaj terenu	Sposób pomiaru	Cięcie warstwiczne [m]	a	b	m_h [m]	m_Δ [m]
1	A	płaski	EOT	0,25	0,09	0,50	0,10	0,11
2	A	morenowy	EOT	0,25	0,34	1,72	0,39	0,40
3	A	falisty	EOT	1,0	—	—	—	0,24
4	E/1	płaski	EOT	0,25	0,07	0,71	0,08	0,09
5	E/2	płaski	EOT	0,25	0,09	1,86	0,13	0,13
6	F	płaski	EOT	0,25	0,09	0,50	0,10	0,11
7	F	morenowy	EOT	1,0 (2,0)	0,51	0,52	0,59	0,61
8	D+E/2	płaski	fotogr.	0,25	0,08	-1,60	0,07	0,10
9	C	falisty	fotogr.	1,0	—	—	—	0,23
10	B	morenowy	fotogr.	1,0 (2,0)	0,13	4,00	0,28	0,34

wiązujących instrukcji geodezyjnych, gdzie nie jest przewidziane stosowanie tego równania.

Drugim zastosowanym tutaj estymatorem oceny dokładności opracowanych map warstwicznych jest błąd średni (m_Δ — tab. 1), obliczany na podstawie różnic pomiędzy wysokościami wybranych punktów (np. na przekrojach), określonymi z mapy warstwicznej, a wysokościami tych samych punktów, określanymi w terenie za pomocą niwelacji.

Wyniki badań i podsumowanie

Jak wynika z danych w tabeli 1, za pomocą metod komputerowych można uzyskać dokładność warstwicz nie mniejszą niż ta, którą zapewnia metoda tachimetryczna.

Wykorzystanie do wygładzania linii warstwicznych funkcji giętych może jednak napotykać ograniczenia w terenie morenowym. Funkcje te mają tę cechę, że zachowują warunek ciągłości w danych punktach — pomiędzy nimi są często nienaturalnie "wybrzuszone". W konsekwencji te wybrzuszenia mogą powodować w pewnych miejscach przesunięcia warstwicz w stosunku do ich właściwego

położenia, a w terenie o większych spadkach mogą w związku z tym wystąpić dość duże błędy. Można to stwierdzić przez porównanie map 2 i 7 (tab. 1), gdzie w terenie morenowym dla tych samych punktów NMT otrzymano znacznie wyższą dokładność warstwicz opracowanych manualnie ($\pm 0,40$ m) w stosunku do warstwicz opracowanych komputerowo, których dokładność oszacowano na $\pm 0,61$ m. Można sądzić, że poprawa jakości opracowania jest możliwa poprzez rozwiązanie tego problemu innego typu funkcją potęgową. Wymaga to jednak bardziej szczegółowych badań w tym zakresie.

Istotny wpływ na dokładność warstwicz w terenie falistym i morenowym ma poprawność rozmieszczenia i odpowiednia gęstość punktów NMT. Gęstość ta powinna się zmieniać w zależności od lokalnego charakteru opracowywanego terenu. Przeprowadzone w Katedrze Geodezji i Fotogrametrii SGGW badania (z wykorzystaniem pakietu SURFER firmy Golden Software) wskazały, że analogicznie do gęstości punktów NMT powinna się zmieniać lokalnie gęstość punktów regularnej siatki interpolacyjnej generowanej przez komputer, opierając się na punktach numerycznego modelu terenu. Wydaje się celowe za-

opatrywanie programów komputerowych w odpowiednie opcje, które ten warunek mogłyby realizować automatycznie.

Wiele istotnych zalet przy opracowaniach warstwicznych ma fotogrametryczna metoda analogowa, pozwalająca na bezpośrednie opracowanie warstw bez potrzeby interpolacji. Jest to szczególnie ważne w terenach morenowych i falistych, gdzie — jak już wspomniano — wybór odpowiednich punktów NMT i odtworzenie rzeczywistego kształtu warstwy (Wysocki 1985b) może często nastęrczać trudności. Wynika to z porównania odpowiednich opracowań warstwicznych (tab. 1 — mapy: 7,2,10). W terenie morenowym uzyskano niższą dokładność warstw opracowanych komputerowo ($\pm 0,61$ m) i tachimetrycznie ($\pm 0,40$ m) w stosunku do opracowanych fotogrametrycznie, poprzez bezpośrednie poprowadzenie warstw na autografie, dla których $m_{\Delta} = \pm 0,34$ m.

Wysokie dokładności fotogrametrycznych opracowań warstwicznych można uzyskać w terenie falistym, a nawet płaskim (tab. 1 — mapy 9,8). Wymaga to jednak spełnienia odpowiednich warunków opracowania (Wysocki 1992, 1993).

Metody fotogrametryczne napotykają ograniczenia przy opracowywaniu małych obiektów, gdzie często nie są opłacalne z ekonomicznego punktu widzenia.

Należy jednocześnie zauważyć, że wykorzystanie metod fotogrametrycznych, oprócz zautomatyzowania procesu opracowania mapy i możliwości szybkiego włączenia zarejestrowanych danych do procesu przetwarzania informacji z zastosowaniem komputerów — umożliwia również szybkie dostarczenie projektantowi szczegółowych i aktualnych informacji o terenie w postaci odpowiedniego obrazu fotograficznego.

W związku z rozwojem tachimetrów elektronicznych oraz automatyzacją metod opracowań mapowych — nowych cech atrakcyjności nabiera metoda tachimetry-

czna. Odnosi się to w szczególności do małych obiektów, gdzie często stosowanie "całościowej" automatyzacji, którą wymuszają na ogół metody komputerowe i fotogrametryczne, może być nieraz nieekonomiczne. Przy rozwiązaniach tradycyjnych istnieje większa możliwość "selektywnej" automatyzacji wybranych etapów pomiarów i opracowań pozwalających na uzyskanie potrzebnej dokładności przy jednoczesnym zachowaniu założonej opłacalności opracowania.

Należy zauważyć, że istnieją naturalne ograniczenia możliwej do uzyskania dokładności opracowań warstwicznych. Teoretycznie można by podnosić tę dokładność w sposób prawie nieograniczony, np. dla powierzchni regularnych i gładkich. Nie można jednak do nich zaliczyć powierzchni terenu, gdzie chropowatość (Wysocki 1985a) stanowi naturalne ograniczenie. Czynniki ten determinuje możliwą do uzyskania dokładność opracowania warstw niezależnie od metody opracowania, np. użytych instrumentów oraz ich nawet bardzo wysokiej dokładności pomiaru. Z przeprowadzonych badań wynika (np. tab. 1), że przy starannym opracowaniu — w przeciętnych warunkach terenowych — można uzyskać średni błąd wysokości warstwy w granicach połowy cięcia warstwicowego, przy cięciu równym 0,25 m.

Przy większych cięciach warstwicznych stosowane często w instrukcjach kryterium dokładności, gdzie błąd średni wysokości warstwy przyjmuje się w granicach 1/3 cięcia warstwicowego — jest na ogół łatwiejsze do spełnienia.

Literatura

- WYSOCKI J. 1985a: *O dokładności map warstwicznych przy cięciu równym 0,25 m*. Prz. Geodez., nr 4-5.
- WYSOCKI J. 1985b: *On the internal accuracy of the photogrammetric contour lines*. Ann. Wars. Agric. Univ. SGGW-AR, Land Reclam., 21.
- WYSOCKI J. 1987: *Problemy dokładności nowoczesnych technik opracowania wielkoskalowych map*

warstwicznych pod kątem potrzeb wodnomelioracyjnych. Wydaw. SGGW, Warszawa.

WYSOCKI J. 1992: *On the "zone" method of working out of large-scale contour map.* Ann. Wars. Agric. Univ., SGGW, Land Reclam. (w druku).

WYSOCKI J. 1993: *Możliwości podnoszenia dokładności fotogrametrycznych opracowań warstwicznych.* W mat. konf. PAN, Kraków.

ZBUCKI A. 1982: *Analiza możliwości zastosowania numerycznego modelu terenu otrzymanego na drodze fotogrametrycznej oraz klasycznej w projektowaniu sieci wodno-melioracyjnych.* Pr. doktorska, SGGW.

Summary

Comparative analysis of chosen computers and analogous methods of working out of large-scale contour maps. Investigations and analysis of the accuracy of contour lines by the computers and analogous methods (tacheometry and photogrametry methods) there are presented in the article.

Author's address

J. Wysocki
Warsaw Agricultural University
ul. Nowoursynowska 166
02-766 Warszawa