ZAGADNIENIE JAKOŚCI NUMERYCZNYCH MODELI TERENU

QUALITY OF DIGITAL TERRAIN MODELS

Beata Hejmanowska, Wojciech Drzewiecki, Łukasz Kulesza

Katedra Geoinformacji, Fotogrametrii i Teledetekcji Środowiska,
Akademia Górniczo – Hutnicza w Krakowie

SŁOWA KLUCZOWE: błąd, niepewność, wiarygodność, numeryczny model terenu, NMT.

STRESZCZENIE: Numeryczne modele terenu (NMT) stanowią bardzo istotną warstwę informacyjną w systemach GIS. Wiele analiz przestrzennych wykonuje się z ich wykorzystaniem - poczynając od prostych zapytań, poprzez analizę map pochodnych NMT: map nachyleń i ekspozycji, aż do wykorzystania NMT w skomplikowanym modelowaniu zjawisk zachodzących w środowisku. Analizy te można przeprowadzać (i tak robi się najczęściej) tzw. metodą twardą, czyli nie biorąc pod uwagę wiarygodności danych źródłowych, lub metodą miękką - biorąc pod uwagę różne aspekty dokładnościowe danych źródłowych oraz przyjmując miękkie, rozmyte warunki analizy. Ostatnio coraz większą uwagę zaczyna się przywiązywać do wiarygodności wyników analiz GIS i w związku z tym częściej pojawia się problematyka jakości i dokładności danych źródłowych w systemach GIS. Problemem jest też fakt, iż producenci oprogramowania GIS rzadko rozwijają w nim wsparcie dla analiz dokładnościowych. Niniejsza publikacja ma charakter przeglądu literatury tyczącej się określania i modelowania dokładności numerycznych modeli terenu. Publikacja została przygotowana w ramach projektu AGH nr: 11.11.150.949.

1. WPROWADZENIE

W okresie rozwoju nauk i technologii informatycznych oraz wzrostu świadomości odnośnie otaczającego nas środowiska, rośnie zapotrzebowanie na dokładne dane o ukształtowaniu powierzchni terenu. Coraz większa dokładność urządzeń pomiarowych, jak również coraz wyższe wymagania dokładnościowe narzucane przez inwestorów, powodują konieczność zwrócenia uwagi nie tylko na sam produkt, ale również na jego jakość. Mamy na myśli tutaj numeryczny model terenu (NMT) oraz zagadnienie związane z określeniem jego jakości. Pominięcie tego aspektu może mieć znaczący wpływ na wynik analiz prowadzonych z uwzględnieniem NMT lub map pochodnych: map nachyleń, ekspozycji, widoczności. Ponadto coraz częściej pojawia się potrzeba świadomości ryzyka związanego z podejmowaniem określonych decyzji w oparciu o analizy GIS (przykładem może być nowa Dyrektywa Wodna UE, w której nałożony jest obowiązek szacowania ryzyka związanego z występowaniem stref zagrożenia powodziowego). W związku z powyższym wydaje się bardzo aktualne, również w Polsce, zadanie związane z określeniem jakości NMT. Szczególnie, że ostatnio, dzięki dużym projektom, cały kraj został pokryty NMT w ramach prac związanych z budową systemu LPIS (*Land Parcel*

Identification System - tworzonego dla potrzeb systemu informatycznego wspomagania dopłat bezpośrednich dla rolnictwa), a dorzecza rzek modelami OKI (Ośrodki Kordynacyjno-Informacyjne utworzone przy Regionalnych Zarządach Gospodarki Wodnej w ramach projektu Banku Światowego dotyczącego ochrony przeciwpowodziowej).

Powszechnie, jakość NMT jest kojarzona z jego błędem definiowanym w warunkach technicznych dla wykonawców, co później jest sprawdzane wyrywkowo przez firmy kontrolujące. W ramach kontroli wykonywany jest pomiar bezpośredni wysokości w punktach lub liniach profilowych (Z_{REF}). Pomierzoną wysokość porównuje się następnie z wysokością NMT (z_{NMT}), co pozwala na określenie błędu średniego kwadratowego (m_h):

$$m_h = \sqrt{\frac{\sum \left(z_{NMT} - z_{REF} \right)^2}{n}} \tag{1}$$

W ten sposób można otrzymać jedną wartość dla całego modelu. Pomiar kontrolny może zatem potwierdzić błąd nominalny, założony w warunkach technicznych. Zakładając, że wszystkie produkty znajdujące się w Centralnym Ośrodku Dokumentacji Geodezyjnej i Kartograficznej spełniają warunki techniczne, użytkownik, zakupując model, może przyjąć nominalną wartość jego średniego błędu kwadratowego. Jeżeli dla danego obszaru dostępne są różne modele terenu pojawią się pytania: który model jest dokładniejszy i jak to sprawdzić?, do jakich celów można użyć dany NMT? Nominalna wartość błędu średniego kwadratowego jest tylko w niewielkim stopniu odpowiedzią na te pytania. Niniejszy artykuł stanowić ma w zamyśle głos w dyskusji na temat metodyki tworzenia metadanych dla numerycznych modeli terenu, które charakteryzowałyby ich jakość.

2. DYSKUSJA O JAKOŚCI NMT

Numeryczny model terenu stanowi jedną z podstawowych i najczęściej używanych w analizach przestrzennych warstw informacyjnych w systemach GIS. Wyniki modelowania i analiz prowadzonych z jego wykorzystaniem stanowią niejednokrotnie podstawę dla podejmowania różnorakich decyzji. Użytkownicy zwykle nie wykorzystują informacji na temat błędu NMT podczas generowania stref zalewowych, modelowania hydrologicznego, szacowania zagrożenia erozyjnego gleb, czy innych analizach przestrzennych dla potrzeb planowania przestrzennego. Wyjaśnieniem tej sytuacji mogą być następujące fakty: użytkownicy nie mają pełnej świadomości różnej jakości NMT, albo uważają, że powinien on być bezbłędny, albo starają się fakt jego niedokładności bagatelizować, przyjmując do wiadomości informację o nominalnej wartości błędu średniego kwadratowego (m_h). Poza tym twórcy oprogramowania GIS, wykorzystywanego w modelowaniu, nie rozwijają narzędzi do analiz dokładności (Hejmanowska, 2005). Podobne uwagi można znaleźć w pracy doktorskiej (Oksansen, 2006), włącznie z przedstawieniem idealistycznej koncepcji tzw. „*error button*". Niestety pomimo tego, że ogólny problem związany z jakością NMT jest znany i od 20 lat badany, nie opracowano prostej metody (klawisza funkcyjnego) uwzględniania w analizach GIS błędu NMT. Być

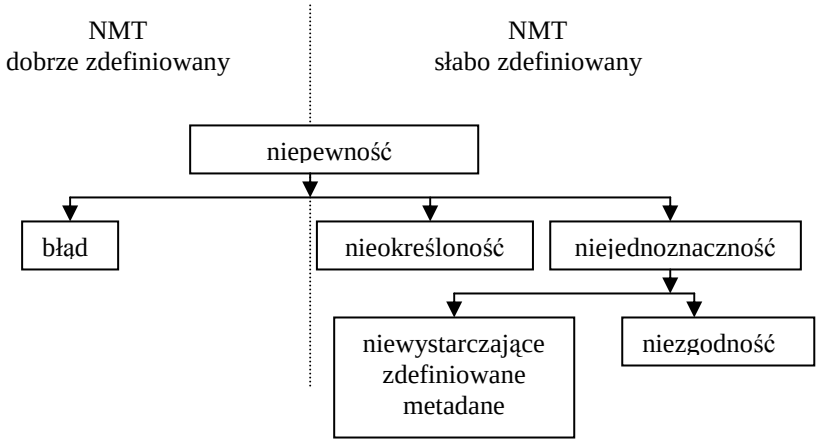
może koncepcja ta jest utopijna i należy raczej oczekiwać nieco bardziej złożonego algorytmu postępowania.

Niezależnie od tego z jakiego typu błędami mamy do czynienia, interesuje nas jakiś wypadkowy parametr, którym można by scharakteryzować jakość NMT. Pojawia się jednak pewien problem z definiowaniem różnych pojęć z tym związanych, szczególnie, że w wielu przypadkach sięga się do literatury anglojęzycznej. W najprostszym podejściu jakość NMT można określić za pomocą jego dokładności lub przeciwnie błędu (niedokładności). Powstaje pytane, do czego porównujemy model: do rzeczywistej powierzchni topograficznej czy do wartości wysokości w punktach kontrolnych?

Parametry dokładności (*accuracy*) można określać w różny sposób. W geodezji mówimy zwykle o błędzie (*error*), mając na myśli błąd przeciętny, błąd średni kwadratowy itd. Powszechnie też rozróżnia się dokładność pomiaru od precyzji pomiaru. W dziedzinach związanych z metrologią można znaleźć nieco inne podejście do oceny dokładności. W tym przypadku (np. w oparciu o normę ISO 2575) określa się tzw. powtarzalność i odtwarzalność, co odpowiada w pewnym sensie precyzji i dokładności. Ogólnie biorąc powtarzalność obserwujemy mierząc wielkość tym samym instrumentem, w tych samych warunkach, a odtwarzalność z wykorzystaniem różnych instrumentów, operatorów i w zmiennych warunkach pomiaru. Takie pojęcia jak dokładność (niedokładność), czy używane w geodezji:błąd są zwykle związane z pomiarem, czyli mówimy o błędzie (dokładności) pomiaru. Jeśli charakteryzujemy jakość NMT w oparciu o pomiar kontrolny, to błąd jest adekwatną wielkością. Pomiar kontrolny wykonuje się w wybranych punktach, a zatem błąd średni kwadratowy uzyskany na jego podstawie pozwala tylko na pewne oszacowanie jakości NMT. Pojawia się pytanie: na ile wiarygodne jest to oszacowanie? Inny przypadek występuje, jeśli porównujemy ze sobą dwa modele - trudno wtedy mówić o błędzie pomiarowym. Jeden model może być dokładniejszy, drugi mniej dokładny, ale w obu przypadkach są to modele, a nie dane pomiarowe. Można raczej powiedzieć o dopasowaniu modelu mniej dokładnego w stosunku do bardziej dokładnego lub o błędzie modelu .

Poszukując parametru charakteryzującego jakość NMT należy prześledzić procedurę jego tworzenia. Dane źródłowe do tworzenia numerycznych modeli terenu mogą być pozyskiwane różnymi metodami, które oczywiście warunkują ostateczną dokładność (błąd) NMT. Obecnie do budowy modelu wykorzystuje się technologię: pomiarów bezpośrednich, kartograficzną, fotogrametryczną, skaning laserowy, obrazy radarowe czy interferometrię radarową. W literaturze można znaleźć wiele informacji na temat dokładności pomiaru, która może wynosić od kilku centymetrów do kilkudziesięciu metrów. Błąd pomiaru elementów źródłowych do NMT (punktów, linii i powierzchni charakterystycznych) nie jest tożsamy z błędem NMT, np. wykorzystując dokładny pomiar bezpośredni można wygenerować model daleko odbiegający od rzeczywistości. Ważne są bowiem kryteria przyjęte podczas pomiaru: gęstość punktów, definicja obiektów mierzonych oraz wybór rodzaju i parametrów siatki (TIN, GRID). Użytkownik ostatecznie, dysponując gotowym, siatkowym modelem, chciałby wiedzieć, jaka jest jakość tego produktu i wydaje się, że dokładność (błąd) nie jest parametrem wystarczającym.

Na podstawie literatury można by zaproponować ogólniejsze pojęcie dotyczące jakości, mianowicie: niepewność (*uncertainty*). Wartościowy przegląd literatury na ten temat, w kontekście błędów NMT znajduje się w pracy doktorskiej (Oksanen, 2006). Ogólnie, można powiedzieć, że NMT może być dobrze lub słabo zdefiniowany (Rys. 1). Jeśli jest dobrze zdefiniowany, to niepewność można scharakteryzować za pomocą błędu. Jeśli natomiast jest słabo zdefiniowany, wtedy raczej mówimy o nieokreśloności (*vagueness*) lub niejednoznaczności (*ambiguty)* (za Fischer 1999, 2003 cytowanym przez Oksanen 2006). Wielkości te stają się istotne, jeśli porównujemy ze sobą różne NMT, a nie model i punktowy pomiar kontrolny. Przypadek niejednoznaczności wystąpi, jeśli np. podczas pomiaru przyjęto różne kryteria, różną definicję mierzonych obiektów oraz różne metody i parametry interpolacji. Przypadek nieokreśloności może natomiast występować, kiedy nieznane są przyjęte podczas pomiaru kryteria lub nie wiemy czy założone kryteria zostały podczas pomiaru spełnione. Przykładowo, dane do NMT mogą być pozyskiwane metodą pomiaru fotogrametrycznego, z uwzględnieniem, oprócz punktów siatki i punktów rozproszonych, także wszystkich elementów strukturalnych i charakterystycznych powierzchni terenu. Następnie może zostać wygenerowany model TIN i w dalszej kolejności GRID, o różnej wielkości oczka siatki. Innym przykładem może być pomiar lidarowy, w oparciu o który wygenerowano model TIN i GRID. Jeszcze inny przypadek, to model siatkowy uzyskany wprost na drodze interpolacji z danych pomiarowych. Kryteria przyjęte w tych przypadkach są niejednoznaczne, tzn. w każdym przypadku inne. W modelu TIN wszystkie punkty pomiarowe znajdują się w NMT, natomiast uzyskanie modelu GRID zwykle wymaga interpolacji, a zatem nie wszystkie punkty pomiarowe, a właściwie niewiele z nich, jest w NMT. Pojawia się w tym miejscu problem odchyłek pomiędzy NMT a danymi pomiarowymi i można mówić o dokładności (błędzie) *wewnętrznym* modelu. Analogicznie, błąd *zewnętrzny* można wyznaczyć w oparciu o niezależny pomiar kontrolny.



Rys. 1. Systematyka parametrów charakteryzujących jakość NMT (za Fisher 1999, 2003; zmodyfikowano)

Załóżmy, że mamy kilka modeli wykonanych w oparciu o niejednoznaczne lub nieokreślone kryteria. Przyjmijmy teoretycznie, że przeprowadzono kontrolę szczegółową, z wykorzystaniem pomiaru bezpośredniego (w gęstej siatce i z uwzględnieniem elementów charakterystycznych rzeźby) lub na modelu fotogrametrycznym, w skali o rząd wielkości większej niż ta, w oparciu o którą przygotowano badane NMT. W tym przypadku można by wygenerować mapy różnicowe pomiędzy badanymi NMT a powierzchnią referencyjną, które pozwoliłyby na opracowanie map rozkładu przestrzennego błędu NMT, zamiast jednej wartości błędu dla całego modelu. Oznacza to, że pomimo początkowego założenia, że modele są niejednoznaczne lub nieokreślone, to w wyniku szczegółowej kontroli zostały jednak dodefiniowane i ich jakość można by jednak określić za pomocą błędu. W praktyce jednak takie podejście jest nierealne, kontrole wykonuje się mniej lub bardziej wyrywkowo, w punktach lub liniach profilowych.

Podsumowując, mówiąc o jakości modelu należałoby mieć na uwadze swego rodzaju metadane: wykorzystywaną technikę pomiarową, kryteria przyjęte podczas pomiaru, technologię generowania NMT oraz dane dotyczące weryfikacji NMT. Biorąc to pod uwagę możemy mieć dobrze zdefiniowany NMT i wtedy jakość możemy określić z wykorzystaniem błędu czy rozkładu przestrzennego błędu. Model może być nieprecyzyjnie (słabo) zdefiniowany i w takim przypadku błąd NMT, nawet jeśli jest w metadanych, jest obciążony niepewnością, a oszacowanie dokładności NMT w ten sposób jest niewiarygodne. Nie oznacza to, że takie modele są bezużyteczne, a jedynie, że należy mieć do nich ograniczone zaufanie i że można je wykorzystywać do jednych celów, a do innych nie. Można stwierdzić, że NMT nie jest wystarczająco dobrze sprecyzowany lub nie jest on zgodny z oczekiwaniami. W tym miejscu nasuwa się pojęcie wiarygodności („rzetelności") NMT (*reliabilty*), i pojęcie: *„fitness-to-use"* - przydatności dla danego zastosowania.

Jakość modelu, w rozumieniu jak powyżej, byłaby opisana w metadanych, zarówno w sposób opisowy jak i ilościowy, poprzez podanie błędu NMT. Wydaje się, że pojedyncza wartość błędu (m_h), w przypadku danych o charakterze typowo przestrzennym, jest niewystarczająca. W związku z tym w następnym rozdziale zamieszczono przegląd literatury na temat różnych podejść do oceny dokładności NMT.

3. METODY OKREŚLANIA DOKŁADNOŚCI NMT

Najprostszym parametrem opisującym dokładność modelu jest błąd średni kwadratowy, który nie zawsze jest najodpowiedniejszy, gdyż charakter błędów modelu wysokościowego nie zawsze spełnia warunki przypadkowości i rozkładu normalnego (np. Li, 1988; Wechsler, 2001). Można w takim przypadku podać bardziej szczegółowe wartości: wartość średnią błędu (błąd przeciętny, średnia odchyłka), która pozwala na określenie składnika systematycznego i jego odchylenie standardowe (np. Li, 1988; Wechsler, 2001; Fisher i Tate, 2006). Parametry te mają charakter globalny, podczas gdy błąd określenia wysokości jest zwykle przestrzennie zróżnicowany (np. Wechsler, 2001; Fisher i Tate, 2006; Kraus *et al.*, 2006).

NMT jest obiektem dynamicznym, podlegającym szybkim zmianom w zakresie mikroreliefu i powolniejszym fluktuacjom reliefu powierzchni. Istnieje pewien problem z nazwaniem tego typu właściwości powierzchni terenu. Wprowadza się takie pojęcia, jak chropowatość, czy szorstkość powierzchni, które przez specjalistów z różnych dziedzin mogą być różnie rozumiane. Inaczej będą rozumiane przez specjalistę hydrologa modelującego strefy zagrożenia powodziowego w modelach hydrodynamicznych np. MIKE 11 (DHI, 2006), a inaczej przez badacza zajmującego się teledetekcyjnym monitoringiem gleb i wpływem funkcji dwukierunkowego odbicia (BRDF- Bidirectional Reflectance/Radiation Distribution Function) na wielkość pomierzonej radiacji (Cierniewski *et al.*, 2004). Wysocki (Wysocki, 1979) definiuje szorstkość jako mikrorelief, czyli bardzo drobne zmiany powierzchni terenu spowodowane warunkami atmosferycznymi, działalnością agrarną itp. Wielkości te są w granicach +/-0.05 m, co uznaje on za zaniedbywane w kontekście odległości pomiędzy punktami siatki pomiarowej tworzonej dla potrzeb budowy NMT. Jest to dyskusyjne w przypadku pomiaru lidarowego, którego dokładność może być porównywalna z szorstkością powierzchni. Problem ten wystąpi również w przypadku pomiarów bezpośrednich (tachimetrycznych, GPS). Drugim definiowanym przez Wysokiego parametrem jest „chropowatość", którą nazywa zaczątki morfologii terenu, rozumiejąc je jako małe formy terenu o niejednostajnym spadku, które już stają się zauważalnym źródłem błędów. Szorstkość jest uważana za „szum", a chropowatość za źródło błędów współzależnych, które można opisać z wykorzystaniem wariancji i kowariancji. Podobne podejście można znaleźć w pracy doktorskiej Oksanena (Oksanen, 2006). Wysokość punku na powierzchni terenu (h_{Teren}) można obliczyć dla punktu siatki NMT (h_{NMT}) w oparciu o poniższy wzór:

$$h_{Teren}(s) = h_{NMT} + m(s) + \varepsilon'(s) + \varepsilon'' \qquad (2)$$

gdzie:

$h_{Teren}(s)$ – rzeczywista wysokość w punkcie s,
$h_{NMT}(s)$ – wysokość NMT w punkcie s,
$m(s)$ – błąd systematyczny (przesunięcie),
$\varepsilon'(s)$ – błąd przypadkowy skorelowany przestrzennie,
ε'' – błąd przypadkowy nieskorelowany przestrzennie.

Interpretując wzór 0 na tle rysunku (Rys. 2) można zdefiniować błąd NMT jako różnicę pomiędzy wysokością rzeczywistej powierzchni terenu (linia ciągła), a NMT (dłuższe linie przerywane). Ponadto na rysunku zaznaczono odchyłki $d(s)$ pomiędzy NMT a rzutem ortogonalnym punktów siatki na teren. Wielkość $m(s) + e'(s)$ jest odpowiednikiem chropowatości, rozumianej jak powyżej. Natomiast składowa e'' reprezentuje w tym przypadku szorstkość powierzchni terenu, co jest odpowiednikiem: „efektu samorodków" („*nugget effect*") w metodzie geostatystycznej (kriging).

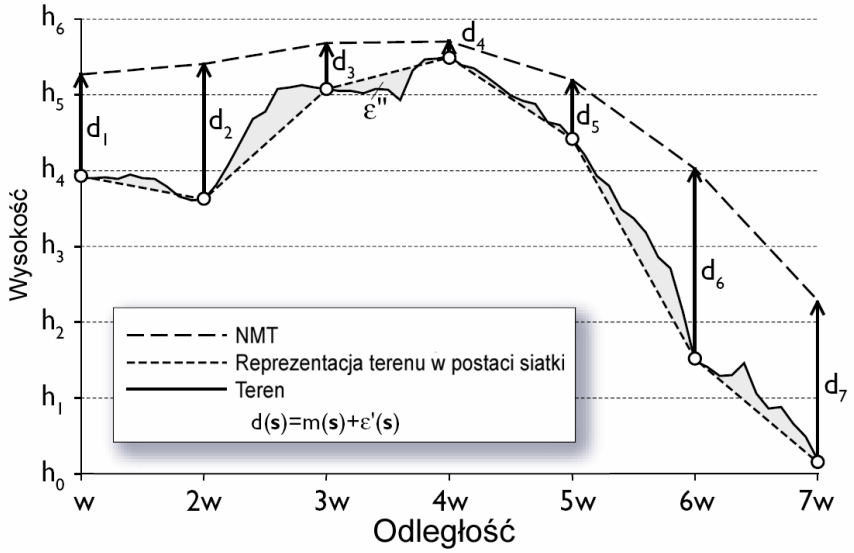
Przy tak zdefiniowanej dokładności NMT istnieją różne sposoby jej szacowania: metody analityczne i numeryczne. Można wyodrębnić dwie wersje metody analitycznej. Pierwsza, w pełni analityczna, bazuje na funkcjach matematycznych opisujących zarówno powierzchnię terenu, jak i błąd NMT, druga opisuje błąd NMT za pomocą funkcji, przy czym NMT jest w postaci dyskretnej.

Metody numeryczne bazują na dyskretnych, siatkowych NMT i mogą opisywać błąd za pomocą wzorów empirycznych, geostatystycznie (różne formy *krigingu*) i stochastycznie (np. metoda Monte Carlo).

We wszystkich metodach błąd NMT można modelować zakładając jego korelację przestrzenną lub jej brak. Korelację uwzględnia się niejako automatycznie w metodzie geostatystycznej (zastosowanie semiwariogramu lub wariogramu) (Fisher 1998; Kyriakidis *et al.*, 1999; Liu *et al.*, 1999; Holmes *et al.*, 2000), podczas gdy w innych metodach wymagane jest specjalne podejście, np. definiowanie korelacji poprzez jakiś parametr modelu NMT (np. nachylenie, krzywiznę).

We wszystkich przypadkach sprawa dodatkowo się komplikuje w momencie wystąpienia warunków niestacjonarnych, czyli w przypadku zmienności przestrzennej parametrów lub charakteru rozkładu błędu NMT, które mogą różne w różnych fragmentach modelu.

Ostatecznie rozważania można zakończyć uwagą, że nie zawsze jest obserwowany związek błędu ze wskaźnikami opisującymi zróżnicowanie powierzchni topograficznej (Fisher *et al.*, 2006), czyli nie zawsze występuje korelacja przestrzenna błędu.



Rys. 2.Składowe błędu NMT (za Oksansen 2006)

3.1. Przykład nie geostystycznego modelowania rozkładu przestrzennego dokładności NMT przy założeniu istnienia korelacji przestrzennej błędu

Ciekawą, nie geostatysyczną metodę oceny dokładności, z uwzględnieniem korelacji przestrzennej proponują Kraus i inni (2006). Ocena ta jest możliwa, jeśli posiadamy zarówno wyinterpolowaną siatkę, jak i zestaw danych wejściowych. Czynnikami branymi pod uwagę w metodzie Krausa i innych są:

- liczba i układ sąsiadujących punktów źródłowych,
- odległość między węzłem siatki a poszczególnymi punktami źródłowymi,
- krzywizna terenu w sąsiedztwie punktu siatki,
- dokładność wysokościowa punktów źródłowych.

Wynik oceny stanowi określenie dokładności dla każdego punktu siatki modelu wysokościowego.

Metoda jako dane wejściowe przyjmuje NMT oraz dane, które posłużyły do jego wygenerowania. Następnie oblicza gęstość punktów źródłowych dla oczka zdefiniowanego przez użytkownika. W przypadku NMT o rozdzielczości 1 m odległość pomiędzy punktami pomiarowymi mogła wynosić np. 10 m. Kolejnym krokiem jest obliczenie odległości każdego węzła siatki badanego NMT do najbliższego punktu źródłowego. Parametr ten może zostać efektywnie obliczony z wykorzystaniem funkcji Chamfera (Borgefors, 1986). W następnym etapie następuje obliczenie największej krzywizny dla każdego węzła siatki. Powstało wiele publikacji opisujących sposób obliczenia promienia krzywizny. Porównania wybranych podejść dokonali Schmidt i inni (2003). W kolejnej fazie metodyka Krausa zakłada wyznaczenie błędu średniokwadratowego dla otaczających punktów źródłowych, a następnie obliczenie odchylenia standardowego dla każdego węzła siatki. Metodologia ta posiada wiele zalet, mianowicie:

- można ją stosować do istniejących NMT (warunkiem jest posiadanie danych źródłowych użytych do jego interpolacji),
- jest niezależna od algorytmu interpolacji – można badać ich wpływ na błędy wynikowego NMT,
- generuje mapę błędów w takiej samej rozdzielczości jak badany NMT (można wykonywać operacje rastrowe),
- umożliwia tworzenie atrakcyjnych i czytelnych wizualizacji na poszczególnych etapach.

W ideowym założeniu podobne podejście zostało zaproponowanego przez Wysokiego (Wysocki, 2007):

$$m^2{}_h = p_1 A^2 + p_2 \left(D \cdot tg\alpha\right)^2 + C^2 \qquad (3)$$

gdzie:

m_h – średni błąd wysokości wyznaczanego (interpolowanego) punktu powierzchni terenu, określający również dokładność aproksymacji powierzchni terenu na podstawie punktów odniesienia,

p_1 – współczynnik zależny od zastosowanej metody interpolacji powierzchniowej,
A – parametr, charakteryzujący za pomocą błędu średniego dokładność określenia (pomiaru) wysokości punktów odniesienia,
p_2 – współczynnik wynikający z wpływu kąta α, występującego tutaj jako parametr związany z oddziaływaniem warunków terenowych (chropowatość terenu),
D – przeciętna odległość punktów pomiarowych,
α – przeciętny kąt nachylenia terenu na opracowywanym obszarze,
C – parametr charakteryzujący wpływ chropowatości terenu na dokładność aproksymacji jego powierzchni przy małych wartościach kąta nachylenia terenu i różnych wielkościach D.

Zapis powyższej formuły, przyjąwszy kryteria dokładności dla mapy zasadniczej wygląda następująco:

$$m^2{}_h = 0.55 \cdot A^2 + 0.000015 \cdot \left(D \cdot tg\alpha\right)^2 + \left(D \cdot 0.0020\right)^2 \quad (4)$$

Autor w publikacji przedstawia wyniki obliczeń dokładności NMT, z wykorzystaniem różnych metod, bazując na wytycznych technicznych mapy zasadniczej. Porównuje wyniki otrzymane w oparciu o proponowany przez siebie wzór, wzór Ackermana (1996) oraz wartość nominalną błędu NMT z cięcia warstwicowego. Do obliczeń przyjął on dokładność określenia wysokości A=+/-0.05 m i przeciętną odległość punktów pomiarowych D = 50 m. Uzyskał dokładność od ok. 0.10 m do ok. 0.30 m dla terenów prawie płaskich, o średnim kącie nachylenia terenu mniejszym niż 2 stopnie, a dla pozostałych terenów do 1m. Uzyskane przez niego różnice oszacowania dokładności NMT na podstawie wzoru 0 i wartości błędu NMT określonego w oparciu o cięcie warstwicowe, były na poziomie pojedynczych (maksymalnie trzech) centymetrów. Dla porównania zgodność ta dla wartości oszacowanych na podstawie wzoru Ackermana wyniosła 2 – 15 cm. Oznacza to, że w oparciu o wzór 0 można dokładniej niż ze wzoru Ackermana obliczyć błąd NMT, biorąc pod uwagę wymagania mapy zasadniczej. Ponadto wzór ten pozwala również na wygenerowanie rozkładu przestrzennego błędu modelu.

3.2. Metody interpolacji a dokładność NMT

W powyższym rozdziale przedstawiono założenia dotyczące modelowania dokładności NMT biorąc pod uwagę istniejący już model i rzeczywistą powierzchnię topograficzną. Wiadomo jednak, że na dokładność NMT wpływa rodzaj metody interpolacyjnej. Jak zauważa Wechsler (2001) „istnieje stosunkowo niewiele badań poświęconych wpływowi różnych metod interpolacji na uzyskiwany z ich wykorzystaniem NMT”. Za jedną z ciekawszych prac w tym zakresie uznać należy badania Desmeta (1997), który oceniał efekt badanych przez siebie metod interpolacji w aspektach dokładności określenia wysokości i wiarygodności zachowania kształtu powierzchni topograficznej (ocenianej w oparciu o porównanie nachylenia, ekspozycji, krzywizn oraz powierzchni obszaru zasilania). Za najlepszą uznał on metodę funkcji sklejanych, zastrzegając jednocześnie, iż wynik ten może pozostawać w silnym związku z charakterem modelowanej powierzchni. Fisher i Tate (2006) sugerują, iż nie można stwierdzić, aby

któraś z metod interpolacji przewyższała inne pod względem przydatności do interpolacji danych wysokościowych. Ich zdaniem poszczególne metody będą lepiej lub gorzej sprawdzać się w zależności od zróżnicowania powierzchni terenu oraz rozkładu danych źródłowych.

Różne metody interpolacji wraz z analizą dokładności były przedmiotem badań w kontekście gęstości siatki NMT i gęstości siatki punktów kontrolnych (Aguilar *et.al*, 2005). Znaleziono zależność pomiędzy błędem NMT, m_h, a gęstością siatki pomiarowej (N), gęstością siatki punktów kontrolnych (M) i błędem pomiaru kontrolnego (m^k_h):

$$\frac{m_h}{m_h^k} = 0.1906\left(\frac{N}{M}\right)^{-0.5684} \tag{5}$$

Powyższy związek ma charakter empiryczny i uzyskano go metodą regresji liniowej (R^2=0.8578). Wzór ten jest cenny z punktu widzenia planowania pomiaru. Przykładowo dla terenu o urozmaiconej rzeźbie, dla którego uzyskano błąd (m^k_h) w siatce kontrolnej przykładowo 415 cm, zmniejszenie liczby punktów siatki pomiarowej o 98 procent (z 10 000 punktów na 200 punktów) spowodowało wzrost błędu m_h o ok. 30 cm, podczas gdy zmniejszenie gęstości o 80 procent (do N=2000 punktów) spowodowała wzrost m_h tylko o ok. 6 cm.

4. WPŁYW JAKOŚCI NMT NA WYNIK ANALIZ PRZESTRZENNYCH

Jakość NMT można potraktować jako metadane, które w założeniu powinny być dostarczane użytkownikowi wraz z danymi. Można zatem wyobrazić sobie NMT nie jako powierzchnię, ale jako warstwę, o pewnej, zróżnicowanej przestrzennie grubości i oczekiwać, z pewnym prawdopodobieństwem rzeczywistego położenia punktu powierzchni topograficznej w tej warstwie. NMT wykorzystuje się albo wprost, analizując wysokości w danych punktach, liniach czy obszarach, lub pośrednio, generując z niego produkty pochodne, w najprostszym przypadku: nachylenia i ekspozycje. W tym przypadku pojawia się klasyczny problem przenoszenia się błędów z NMT na produkty pochodne. Zadanie to możemy rozwiązać wykorzystując metody analityczne i numeryczne.

Metody analityczne (Heuvelink, 1998; Hunter *et al.*, 1997; Florinsky, 1998; Hejmanowska, 2005), pomimo iż pozwalają na dokładne modelowanie propagacji błędu, są stosunkowo rzadko stosowane w praktyce, co spowodowane jest trudnościami w sformułowaniu funkcji opisujących błąd analizy. Z tego powodu większość ich zastosowań dotyczy stosunkowo prostych pochodnych modelu wysokościowego – spadków, ekspozycji czy krzywizn. Wśród prac dotyczących zastosowań metod analitycznych na uwagę zasługuje próba uwzględnienia przestrzennej autokorelacji błędu przedstawiona w publikacji Oksanen i Sarjakoski (2005).

Metody empiryczne wymagają znajomości wartości błędu dla wybranych punktów w obrębie badanego obszaru. Mogą one zostać pozyskane na drodze porównania NMT z

danymi referencyjnymi o wyższej dokładności. Mogą to być metody oparte o wzory empiryczne (Qihao Weng, 2002) lub podejście geostatystyczne (Fisher 1998; Kyriakidis *et al.*, 1999; Liu *et al.*, 1999; Holmes *et al.*, 2000).

Alternatywą dla metod analitycznych są metody oparte na symulacji stochastycznej. Coraz szersze zastosowanie w GIS znajduje metoda Monte Carlo, w której dane wejściowe zaburzane są błędem przypadkowym o zadanym rozkładzie. Na tak zaburzonych danych wykonywane są analizy. Wielokrotne powtórzenie analiz z generowanymi każdorazowo nowymi realizacjami błędu zaburzającymi dane wejściowe pozwala na uzyskanie przestrzennego rozkładu błędów analizy (Hejmanowska, 2005, 2006). Metoda ta znajdowała zastosowanie m.in. w symulacji wpływu błędów NMT na wyniki analiz widoczności (Fisher, 1991), ryzyka wystąpienia osuwisk (Murillo *et al.*, 1997), powierzchni obszarów zasilania i wartości indeksu topograficznego (Wechsler, 2001) czy granic zlewni (Oksanen *et al.*, 2005). Większość autorów symulowała błąd pozbawiony autokorelacji przestrzennej, zakładając iż jest to najgorszy wariant (skutkujący największym błędem wyników analiz). Symulować można jednak również błąd skorelowany przestrzennie. Osiągnięcie takiego efektu może nastąpić poprzez zastosowanie odpowiedniego filtra (Wechsler, 2001) lub zastosowanie symulacji gaussowskiej z wykorzystaniem wariogramu (Davis *et al.*, 1997). Oksanen i Sarjakoski (2005) pokazują, iż w pewnych warunkach przestrzennie skorelowany błąd określenia wysokości powodować może większe błędy określenia nachyleń i ekspozycji niż błąd pozbawiony autokorelacji.

5. PODSUMOWANIE

Niniejszy artykuł stanowi próbę podsumowania wiedzy na temat sposobu definiowania jakości NMT, metodyki określania jego błędu i rozkładu przestrzennego tego błędu oraz przenoszenia się błędu modelu na wynik analiz przestrzennych.

Zainteresowani metodologią zaproponowaną przez Krausa i innych (2006) oraz metodą zaproponowana przez Wysockiego (Wysocki, 1979; 2005; 2007) autorzy niniejszej pracy postanowili zbadać ich skuteczność. W tym celu rozpoczęta została implementacja algorytmu Krausa przy zastosowaniu języka Java. Prace przebiegają we framework'u Eclipse z wykorzystaniem m. in. biblioteki VisAD umożliwiającej dwu oraz trójwymiarowe wizualizacje. Jest to podejście innowacyjne zarówno ze względu na metodykę, której działanie nie zostało jeszcze potwierdzone, jak również z powodu języka obiektowego Java, który dotychczas nie został wykorzystany w podobnego typu aplikacjach.

Po zakończeniu implementacji przeprowadzone zostaną badania z wykorzystaniem NMT o różnych dokładnościach, pozyskanych przy wykorzystaniu różnych technik, które dadzą odpowiedź na pytanie czy zaproponowana metodologia generowania map błędów NMT jest wiarygodna. Wyniki zostaną opublikowane w późniejszym terminie.

6. LITERATURA

Ackerman F. 1996: *Technique and strategies for DEM generation. Digital photogrammetry*. American Society for Photogrammetry and Remote Sensing. 135-141

Aguilar F.J., Agüera F., Aguilar M.A., Carvajal F., 2005: Effects of Terrain Morphology, Sampling Density, and Interpolation Methods on Grid DEM Accuracy. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* Vol. 71, No. 7, July 2005, p. 805–816.

Borgefors, G., 1986: Distance Transformations in Digital Images. *Computer Vision, Graphics and Image Processing*, CVGIP 34 (3), p. 344-371.

Cierniewski J., Gdala T., Karnieli A. 2004: A hemispherical–directional reflectance model as a tool for understanding image distinctions between cultivated and uncultivated bare surfaces. *Remote Sensing of Environment* 90 (2004), p. 505–523.

Davis T.J., Keller C.P. 1997: Modeling and visualizing multiple spatial uncertainties. *Computers and Geoscinces* 23, p. 397-408.

DHI. 2001: http://www.dhigroup.com/Software.aspx

Desmet P., 1997: Effects of Interpolation Errors on the Analysis of DEMs. *Earth Surface Processes and Landforms* 22, p. 563-580.

Fisher P.F 1991: First experiments in viewshed uncertainty: The accuracy of the viewshed area. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 57: 10, 1321–1327.

Fisher P.F., 1998: Improved modeling of elevation error with geostatistics. GeoInformatica 2, p. 215-233.

Fisher P.F 1999: Models of uncertainty in spatial data. In Longley PA, MF Goodchild, DJ Maguire & DW Rhind (eds). *Geographical Information Systems: Principles, Techniques, Management, and Applications*, John Wiley and Sons: New York, NY, 191–205.

Fisher P.F 2003: Data quality and uncertainty: Ships passing in the night! In Shi W, MF Goodchild & PF Fisher (eds). *Proceedings of the 2nd International Symposium on Spatial Data Quality* '03 Advanced Research Centre for Spatial Info. Technology, Dept. of Land Surveying and Geo-Informatics, Hong Kong Polytechnic University: Hong Kong, China, 17–22.

Fisher P.F., Tate N.J. 2006: Causes and consequences of error in digital elevation models. *Progress in Physical Geography* 30, 4, p. 467-489.

Florinsky I.V., 1998: Accuracy of local topographic variables derived from digital elevation models. *International Journal of Geographical Information Science* 12, p. 47-62.

Hejmanowska B., 2005: *Wpływ jakości danych na ryzyko procesów decyzyjnych wspieranych analizami GIS*. Rozprawy, monografie 141. AGH Uczelniane

Hejmanowska B., 2006: Wspomaganie decyzji z wykorzystaniem narzędzi GIS – ryzyko związane z dokładnością danych źródłowych. *Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji*, vol. 16

Heuvelink G.B., 1998: *Error Propagation in Environmental Modelling with GIS*. Taylor & Francis.

Holmes K.W., Chadwick O.A., Kyriakidis P.C., 2000: Error in a USGS 30 m DEM and its impact on terrain modeling. *Journal of Hydrology* 233, p. 154-173.

Hunter G.J., Goodchild M.F., 1997: Modeling the uncertainty of slope and aspect estimates derived from spatial databases. Geographical Analysis 29, p. 35-49.

Kraus K., Karel W., Briese Ch., Mandlburger G., 2006: Local Accuracy Measures for Digital Terrain Model. *Photogrammetric Record* 21 (116), p. 342-354.

Kurczyński Z.: Numeryczny Model Terenu. http://www.geoforum.pl

Kyriakidis P.C., Shortridge A.M., Goodchild M.F., 1999: Geostatistics for conflation and accuracy assessment of digital elevation models. *International Journal of Gographical Information Science* 13, p. 677-707.

Li Z., 1988: On the measure of digital terrain model accuracy. *Photogrammerric Record*, 12(72), p. 873-877.

Liu H., Jezek K.C., 1999: Investigating DEM error patterns by directional variograms and Fourier analysis. *Geographical Analysis* 31, p. 249-266.

Murillo M.L., Hunter G.J., 1997: Assessing uncertainty due to elevation error in a landslide susceptibility model. *Transactions in GIS* 2, p. 289-298.

Oksanen J., Sarjakoski T., 2005: Error propagation of DEM-basd surface derivatives. *Computers and Geosciences* 31, p. 1015-1027.

Oksansen J. 2006: *Digitale eleveation model error in terrain analysis*. Praca doktorska. http://ethesis.helsinki.fi/julkaisut/mat/maant/vk/oksanen/digitale.pdf

Qihao Weng, 2002: Quantifying Uncertainty of Digital Elevation Models derived from topographic maps. In: *Advances in Spatial Data Handling*, edited by D. Richardson and P. van Oosterom, Springer-Verlag, New York, p.403-418.

Schmidt J., Evans I.S., Brinkmann J., 2003: Comparison of polynominal models for land surface curvature calculation. *Int. Journal of Geographical Information Science*, 2003, vol. 17, no. 8, p. 797–814.

Wechsler S.P., 2001: DEM Uncertainty: Evaluation and Effect on Topographic Parameters. *Dissertation State University of New York, College of Environmental Science and Forestry, Syracuse, New York* Praca doktorska.

Wysocki J., 1979: Analiza dokładności opracowań warstwicowych do projektowania drenowania użytków rolnych. *Zeszyty Naukowe SGGW-AR*, Melioracje Rolne 18.

Wysocki J. 2005: Dokładność aproksymacji powierzchni terenu w aspekcie badan eksperymentalnych. *Przegląd Naukowy Inżynieria i Kształtowanie Środowiska*, Zeszyt 1(31), p. 102-113.

Wysocki J. 2007: Europejska dyrektywa INSPIRE i problematyka jej implementacji w zakresie dokładności cyfrowych modeli powierzchni terenu. *Przegląd Naukowy Inżynieria i Kształtowanie Środowiska*, Zeszyt 4(38), p 39-46.

QUALITY OF DIGITAL TERRAIN MODELS

KEY WORDS: error, uncertainty, reliability, digital terrain model, DEM

SUMMARY: Digital Elevation Model is one of very important layers in GIS systems. Many spatial queries are made with the use of DEM starting from simple ones, through derivatives like slope, aspect and viewshed maps ending at complicated modeling of environmental phenomenon. The analyses can be made (and that is the usual case) by so called hard method, which does not take into account the reliability of source data or the fuzzy method, which takes into consideration multiple accuracy aspects. Recently more and more attention is paid to the GIS analyses credibility, which makes the accuracy issues more important then ever. Another problem is that GIS software only occasionally delivers tools for algorithm and function accuracy analysis. The paper is a review of literature concerning statement and modeling of inaccuracy in Digital Elevation Models. Paper support by AGH project nr: 11.11.150.949.

Dane autorów:

Dr hab. inż. Beata Hejmanowska, prof. n. AGH
e-mail: galia@agh.edu.pl
telefon: +48 (012) 617 22 72

Dr inż. Wojciech Drzewiecki
e-mail: drzewiec@agh.edu.pl
telefon: +48 (012) 617 38 26

Mgr inż. Łukasz Kulesza
e-mail: lukakule@gmail.com
telefon: +48 (012) 617 38 26