

Wizualizacja, metodyka i propozycje wykorzystania numerycznego modelu terenu w geologii na przykładzie modelu przestrzennego fragmentu doliny Warty

Jacek Kocyla*

Rzeźba terenu w komputerze

Pojawienie się zaawansowanych technologii komputerowych umożliwiło szerokie i sprawne wykorzystanie praw matematycznych w tworzeniu i wizualizacji danych przestrzennych. Teoria macierzy, metody triangulacji oparte o kryterium Delaunaya, zasady interpolacji, metody statystyczne i in., powstałe w XIX i XX w., są dziś praktycznie stosowane w obliczeniach wykonywanych przez komputery.

Podstawowymi modelami danych wykorzystywanymi do tworzenia, przechowywania, analiz i prezentacji informacji o powierzchni są dwa systemy: TIN i GRID.

TIN (ang. *Triangulated Irregular Network*) czyli Nieregularna Sieć Triangulacyjna jest zbiorem sąsiadujących, nie zachodzących na siebie trójkątów, utworzonym z nieregularnie rozmieszczonych w przestrzeni punktów o współrzędnych x, y i wysokości z . Tak rozumiany model przestrzenny przechowuje zależności topologiczne między trójkątami i ich sąsiadami, czyli decyduje, który punkt definiuje każdy trójkąt i które trójkąty są do siebie przyległe. Taka struktura danych pozwala na efektywne tworzenie modeli przestrzennych do analiz i prezentacji terenu lub innych form powierzchni.

TIN zawiera dwa modele danych reprezentujących powierzchnie: sieć trójkątów (ang. *tin*) i siatkę komórek reprezentowanych przez punkty centralne (ang. *lattice*). Sieć trójkątów bazuje na nieregularnie rozrzuconych danych punktowych, liniowych lub poligonowych, interpretowanych jako punkty masowe i linie załamania. Sieć komórek jest ciągiem regularnie rozmieszczonych pól, gdzie powierzchnia opisana jest przez wysokość punktów (składowa z) będących środkami geometrycznymi komórek. Model oparty na sieci trójkątów opisuje dane ciągłe (ang. *continuous*), np. hipsometria, opady atmosferyczne, skażenie wód, gleby i powietrza, rozkład temperatur, model komórkowy natomiast opisuje także dane dyskretne (ang. *categorical*) dotyczące obiektów mających zdefiniowane granice, np. wydzielenia geologiczne, parcele, budynki, drogi.

GRID (ang. *grid* — sieć krzyżujących się linii) jest systemem dzielącym powierzchnię na dyskretne, jednolite jednostki zwane komórkami (ang. *cells*). Komórka przedstawia określony fragment powierzchni ziemi w km^2 , hektarach lub m^2 . Każda komórka posiada wartość (ang. *value*) charakterystyczną dla cechy, którą reprezentuje. Może opisywać zarówno dane dyskretne jak i ciągłe. Regularne komórki tworzą macierz kartezjańską, składającą się z rzędów i z kolumn mających niepowtarzalne identyfikatory. O dokładności analiz komórkowych decyduje odpowiednie dobranie rozdzielczości (ang. *resolution*), tzn. rozmiaru poszczególnych komórek.

Oba opisane systemy TIN i GRID są niezwykle pomoc-

nymi narzędziami w opracowywaniu wszelkich analiz powierzchni, bazujących na numerycznym modelu terenu.

Tworzenie numerycznego modelu terenu

Modele przestrzenne wykorzystują numeryczny model terenu jako podstawowe źródło danych umożliwiających przygotowanie projektów i opracowań. Model terenu jest pozyskiwany za pomocą:

1. Pomiarów bezpośrednich, do których należą tachymetria elektroniczna, niwelacja rozproszona i DGPS (dynamiczny GPS).

2. Digitalizacji map, wykonywanej w sposób automatyczny i półautomatyczny.

3. Pomiarów fotogrametrycznych, do których należy bezpośredni pomiar warstwiczny, profilowanie dynamiczne, pomiar wysokości w regularnej siatce oraz automatyczna korelacja obrazów.

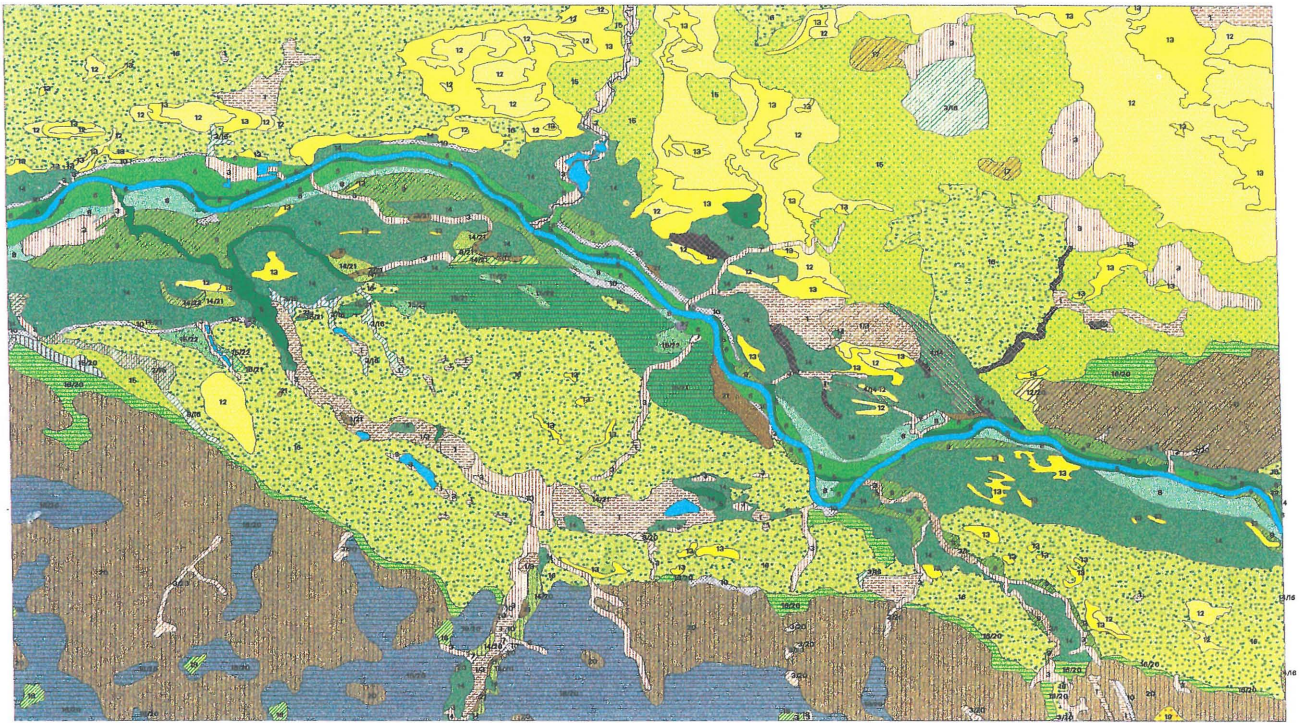
Metoda pomiarów bezpośrednich jest uznawana za najbardziej czasochłonną i kosztowną. Za bardziej wydajne i ekonomiczne są uważane obecnie metody fotogrametryczne, pozwalające uzyskać analogiczne dokładności w krótszym czasie, dzięki możliwościom szybkiego wykonywania i obróbki zdjęć lotniczych (przy dobrych warunkach meteorologicznych, poza obszarami leśnymi). Dokładność uzyskania punktów wysokościowych tworzących DTM zależy głównie od wysokości fotografowania, stosunku bazowego (rodzaju stożka kamery), metody pomiaru i charakteru terenu. Przy stosowaniu metod fotogrametrycznych uzyskujemy błąd wysokościowy o wielkości ok. 0,01% wysokości położenia kamery nad powierzchnią terenu. Metodę digitalizacji możemy uznać z kolei za mniej dokładną, ale oferującą najprostszy i najszybszy sposób pozyskania danych. Oprócz punktów wysokościowych, numeryczny model terenu musi zawierać dodatkowo zakodowane informacje o liniach ciekowych i grzbietowych, granicy obszaru opracowania, granicach wyłączeń i liniach nieciągłości opisujących skarpy czy brzegi większych cieków. Na podstawie tych informacji powstaje DTM wtórny, zawierający pełne dane o powierzchni, które możemy poddać dalszym procesom i obliczeniom, umożliwiającym przeprowadzenie wielu typów analiz oraz wizualizacji właściwego modelu przestrzennego terenu.

Analizy modelowe umożliwiają:

- interpolację wartości z ,
- generowanie izolinii,
- obliczanie spadków, klasyfikacji wysokości, określenia długości i arealu powierzchni,
- obliczanie objętości,
- generowanie profili przez jedną lub wiele powierzchni,
- określanie widoczności między dwoma punktami,
- cieniowanie i in.

Przy wykonaniu rzutu aksonometrycznego (prze-

*Państwowy Instytut Geologiczny, ul. Rakowiecka 4, 00-975 Warszawa



CZWARTORZĘD NIE ROZDZIELONY

- [8] Piaszki rzeczne tarasów nadzalewowych niższych 6-8 m n.p. rzeki (tIV)
- [9] Piaszki rzeczne tarasów nadzalewowych niższych 9-11 m n.p. rzeki (tIII):
- [9/21]- na glinach zwałowych zlodowacenia Warty
- [10] Piaszki i gliny deluwialne
- [11] Eluwia piaszczysto-pyłowate glin zwałowych na glinach zwałowych stadiu leszczyńskiego-pomorskiego
- [12] Piaszki eoliczne:
- [12/20]- na glinach zwałowych stadiu leszczyńskiego-pomorskiego
- [13] Piaszki eoliczne w wydmach

PLEJSTOCEN

ZŁODOWACENIE WISŁY

STADIAŁ LESZCZYŃSKO-POMORSKI

- [14] Piaszki rzeczne tarasów nadzalewowych wyższych 12-15 m n.p. rzeki (tII):
- [14/20]- na glinach zwałowych stadiu leszczyńskiego-pomorskiego
- [14/21]- na glinach zwałowych zlodowacenia Warty
- [14/22]- na łąkach, mulkach i piaskach plocenu
- [15] Piaszki i żwiry rzeczno-wodnolodowcowe wyższych tarasów nadzalewowych 15-20 m n.p. rzeki:
- [15/20]- na glinach zwałowych stadiu leszczyńskiego-pomorskiego
- [15/21]- na glinach zwałowych zlodowacenia Warty
- [15/22]- na łąkach, mulkach i piaskach plocenu
- [16] Piaszki i żwiry wodnolodowcowe sandru subfazy chodzieskiej:
- [16/20]- na glinach zwałowych stadiu leszczyńskiego-pomorskiego
- [16/21]- na glinach zwałowych zlodowacenia Warty
- [17] Piaszki i mulki wodnolodowcowe sandru subfazy chodzieskiej
- [18] Piaszki, żwiry i mulki zastolekowo-wodnolodowcowe:
- [18/20]- na glinach zwałowych stadiu leszczyńskiego-pomorskiego
- [19] Piaszki i żwiry wodnolodowcowe na glinie zwałowej stadiu leszczyńskiego-pomorskiego
- [20] Gliny zwałowe stadiu leszczyńskiego-pomorskiego

CZWARTORZĘD HOLOCEN

- [1] Torfy:
- [1/3]- na namulach piaszczystych den dolinnych, zagłębieniach bezodpływowych i okresowo przepływowych
- [2] Namuły torfiaste:
- [2/15]- na piaskach i żwirach rzeczno-wodnolodowcowych wyższych tarasów nadzalewowych 15-20 m n.p. rzeki
- [3] Namuły piaszczyste den dolinnych, zagłębieniach bezodpływowych i okresowo przepływowych:
- [3/1]- na torfach
- [3/15]- na piaskach i żwirach rzecznych tarasów nadzalewowych wyższych 12-15 m n.p. rzeki (tII)
- [3/18]- na piaskach i żwirach sandru subfazy chodzieskiej
- [3/20]- na glinach zwałowych stadiu leszczyńskiego-pomorskiego
- [3/21]- na glinach zwałowych zlodowacenia Warty
- [4] Piaszki humusowe:
- [4/14]- na piaskach rzecznych tarasów nadzalewowych wyższych 12-15 m n.p. rzeki (tII)
- [4/18]- na piaskach i żwirach sandru subfazy chodzieskiej
- [5] Piaszki, żwiry i mady rzeczne tarasów zalewowych 2-2,5 m n.p. rzeki (t2)
- [6] Piaszki, żwiry i mady rzeczne tarasów zalewowych 5 m n.p. rzeki (t1)
- [7] Piaszki stożków napływowych

ZŁODOWACENIE WARTY

- [21] Gliny zwałowe

TRZECIORZĘD

NEOGEN

PLIOCEN

- [22] Iły, muły i piaszki

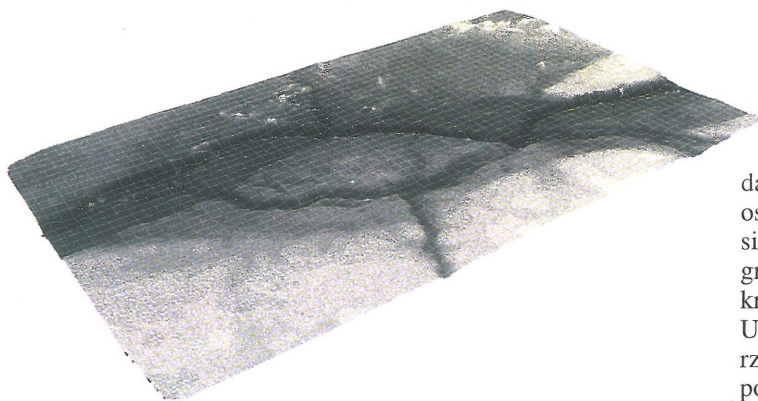
- Wysypiska, nasypy
- Wody



Ryc. 1. Mapa geologiczna — dolina Warty w rejonie Obrzycka (woj. poznańskie)

Opracowanie cyfrowe: Jacek Kocyla (listopad 1998)

Kartowanie geologiczne: Waldemar Gogolek



Ryc. 2. Rzut aksonometryczny

ny widok powierzchni) mamy całkowitą kontrolę nad środowiskiem wizualizacji m.in. przez:

- ustalenie wielkości powierzchni do wizualizacji,
- rysowanie dowolnej liczby powierzchni (jedna pod drugą),
- precyzyjną orientację widoku powierzchni przez ustawienie obserwatora i celu w odpowiednich współrzędnych oraz kąta obserwacji,
- określenia pola widzenia i odległości,
- wybór panoramicznego lub perspektywicznego widoku powierzchni,
- ustawienie odpowiedniej rozdzielczości.

Dodatkowo narzędzia wizualizacji są wspomagane przez możliwość nałożenia (ang. *draping*) na powierzchnię widzianą w rzucie aksonometrycznym następujących elementów:

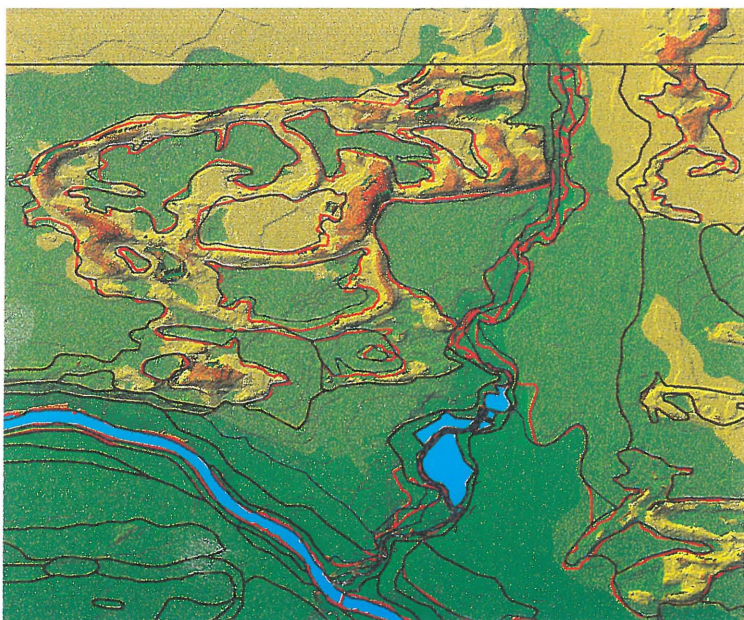
- siatki linii lub komórek o określonych odstępach,
- warstw punktowych, liniowych i poligonowych,
- pojedynczych punktów,
- plików graficznych,
- obrazów rastrowych,
- izolinii,

— obrazów cieniowanych.

Przykłady zastosowań numerycznych modeli terenu

Tworzenie i analiza modeli przestrzennych jest młodą dyscypliną naukową wykorzystującą najnowsze osiągnięcia w technice komputerowej lat dziewięćdziesiątych. Oczywiście, stopień wykorzystania tego oprogramowania i stan zaawansowania prac dotyczy jedynie krajów europejskich, które wciąż pozostają w tyle za USA, mającymi znaczne osiągnięcia zarówno w tworzeniu jak i analizie przestrzennych baz danych, których podstawę stanowi numeryczny model terenu — DTM (ang. *Digital Terrain Model*). Pierwsze szersze i praktyczne zastosowania takich rozwiązań były wykorzystane w celach wojskowych. Już w latach 70. stworzono automatyczny system naprowadzający dla pocisków samosterujących CRUISE, który wykorzystywał numeryczny model terenu do korekcy położenia pocisku w końcowej fazie nalotu nad cel, umożliwiając trafienie z dokładnością do kilkunastu metrów. Modele numeryczne opisywały także konfigurację dna oceanu, której znajomość była i jest podstawą nawigacji dla atomowych okrętów podwodnych. Cyfrowe mapy dna północnego Atlantyku, do dziś ściśle tajne, spoczywają w komputerowych archiwach Pentagonu. Oprócz zastosowań militarnych, numeryczne modele terenu są wykorzystywane w wielu innych dziedzinach. Przykładem może być analiza widzialności między punktami na powierzchni terenu, stosowana w telefonii cyfrowej GSM (projektowanie radiolinii), obliczenia inżyniersko-geologiczne (osuwiska), tworzenie projektu pionowego trasy i obliczanie mas ziemnych przy budowie autostrad i in. W kartografii, numeryczne modele terenu są stosowane do przetwarzania zdjęć lotniczych do postaci kartometrycznej (ortofotografie). W technice wojskowej w Polsce znajdują zastosowanie w symulatorach lotu oraz technikach naprowadzających.

Zainteresowanie wykorzystaniem numerycznych modeli terenu i możliwościami przetwarzania tego typu danych jest w Polsce coraz większe, mimo



Ryc. 3. Mapa cieniowana — obszar wdmowy w ok. miejscowości Stobnica (linie czerwone, ciągłe — granice wydziałów poprawione; linie niebieskie, przerywane — granice wydziałów pierwotne)

0 0.7km

braku literatury i ogólnie dostępnych opracowań. Dlatego też, m.in. zadaniem niniejszego artykułu jest przedstawienie nowej technologii jako efekownego i efektywnego narzędzia wspomagającego prace przedstawicieli różnych dziedzin i dyscyplin naukowych, w tym geologii.

Budowa modelu przestrzennego fragmentu doliny Warty

Bogaty zbiór informacji o numerycznym modelu terenu oraz o możliwościach wykonywania analiz przestrzennych był inspiracją pomysłu wykorzystania tak przygotowanych danych w tworzeniu i udoskonalaniu Bazy Danych Szczegółowej *Mapy geologicznej Polski w skali 1 : 50 000*. Spośród wielu systemów oprogramowania zdecydowałem się na wybór ARC/INFO, ze względu na jego dostępność oraz szerokie możliwości analiz i wizualizacji, których nie posiada np. stosowany przez geologów program SURFER, sprawdzający się doskonale w prostych modelach opartych o szczegółową i gęstą sieć danych, reprezentowanych przez punkty pomiarowe. Podstawowymi modułami systemu ARC/INFO używanymi w opracowaniu były programy TIN, ARCEDIT, ARC PLOT i GRID oraz wewnętrzny język programowania AML, w którym została napisana aplikacja prezentująca wyniki analiz modelowych. Wszystkie prace przeprowadzono na stacji roboczej INDY firmy Silicon-Graphics z pamięcią operacyjną 64 MB, procesorze MIPS R5000 (150 Mhz) i twardym dysku o pojemności 1GB.

Jako teren badań został wybrany fragment doliny Warty w rejonie Obrzycka (woj. poznańskie), ze względu na występowanie krawędzi i skarp w obrębie doliny rzecznej oraz obszarów wydymowych urozmaicających morfologię. Warunkiem realizacji tematu było wybranie stosunkowo prostego (morfologicznie) obszaru nizinnego o pow. ok. 150 km², jednak z wyraźnie zaznaczonymi elementami pozytywnymi i negatywnymi.

Przed wykonaniem obliczeń i analiz modelowych powstała mapa geologiczna fragmentu doliny Warty (ryc. 1), będąca syntezą dwóch arkuszy *Szczegółowej mapy geologicznej Polski*, Szamotuły (432) i Obrzycko (393). Mapa ta zawiera jedynie rodzaje i opisy wydzieleni geologicznych, elementy świadomie wybrane przez autora jako przydatne przy wizualizacji i weryfikacji za pomocą numerycznego modelu terenu.

Przy tworzeniu modelu przestrzennego doliny Warty w rejonie Obrzycka podstawowym źródłem danych były mapy topograficzne w skali 1 : 10 000 (układ 1965). Materiał ten (6 arkuszy) został zeskanowany, połączony w całość i dopasowany do układu 1942. Na bazie tego podkładu powstał numeryczny model terenu reprezentowany przez warstwę wektorową izolinii opisujących rzeźbę terenu. Rodzaj i technologia przetwarzania danych umożliwiła uzyskanie dokładności ok. 5 m w skali poziomej i 40–50 cm w skali pionowej.

Tak przygotowany DTM (warstwa liniowa ARC/INFO) został poddany trójkątowaniu (tzn. procesowi tworzenia sieci trójkątów opisujących zależności przestrzenne) przy zastosowaniu odpowiednich parametrów, na skutek czego powstała warstwa informacyjna posiadająca pełną strukturę topologiczną zdefiniowaną poprzez informację o wierzchołkach trójkątów, typach ich krawędzi i przyleganiu sąsiednich boków.

Uzyskane dane cyfrowe stanowiły podstawę dalszych obliczeń i analiz, których rezultatem końcowym był przestrzenny obraz powierzchni badanego terenu (ryc. 2) w

rzucie aksonometrycznym i mapa hipsometryczna cieniowana (patrz 1 str. okładki).

Przykłady zastosowań numerycznych modeli terenu w geologii

Tak przygotowane dane mogą być wykorzystane w praktyce jako narzędzie wspomagające prace geologa, zarówno kameralne jak i terenowe. Precyzyjne i plastyczne przedstawienie hipsometrii umożliwi szczegółową analizę form rzeźby i dokładniejsze wyznaczenie granic geologicznych (ryc. 3). Efekt ten jest uzyskiwany za pomocą procesu cieniowania zboczy (ang. *hillshading*), bazującego na określeniu wartości odbicia będącej wynikiem padania światła pod określonym kątem. Obszary oświetlone są przedstawiane kolorami jaśniejszymi, ocienione skarpy i zbocza ciemnymi, co sprawia wrażenie trójwymiarowości i plastyczności poszczególnych form terenu. Powierzchnia cieniowana może być stosowana w terenie zarówno w formie wydruku pomocniczego jak i warstwy informacyjnej wyświetlanej na monitorze przenośnego komputera. Przy lokalizacji wierceń i innych punktów charakterystycznych niezwykle pomocna może być możliwość automatycznego odczytania wysokości każdego punktu, znajdującego się w obrębie modelu. W pracach kameralnych, przy uzupełnianiu bazy *SMGP*, dużym usprawnieniem może być możliwość natychmiastowego tworzenia profilu terenu wzdłuż dowolnie wybranych linii, na dowolnym arkuszu posiadającym DTM. Szczegółowe informacje o wysokości punktów i występowaniu krawędzi morfologicznych umożliwią weryfikację położenia wierceń i zasięgu wybranych form geologicznych, np. tarasów rzecznych. Automatycznie wygenerowana mapa spadków może posłużyć do analiz procesów erozyjnych na wybranych obszarach. Możliwości zastosowania modeli przestrzennych są widoczne także w hydrografii i hydrogeologii, przy wyznaczaniu np. działów wód powierzchniowych i podziemnych, czy analizie położenia zwierciadła wody.

Mam nadzieję, że zasygnalizowane możliwości wykorzystania numerycznych modeli terenu spowodują większe zainteresowanie tym problem geologów i zaczną stopniowo powstawać nowe opracowania wykorzystujące taki właśnie model danych wejściowych. Istotnym utrudnieniem jest tu fakt braku istnienia kompleksowego DTM-u dla powierzchni całego kraju, który swą dokładnością (co najmniej 1–2 m) spełniałby wymagania rosnącej liczby potencjalnych użytkowników. Cyfrowe modele terenu dostępne obecnie posiadają dokładności (na nizinach 7–12 m, w górach do 30 m) wykluczające sens ich zastosowania w większości opracowań — nie tylko geologicznych.

L i t e r a t u r a

- MORAŃDA M. & MAJEWSKI M. 1996 — Wykonanie cyfrowej ortofotomapy fragmentu Słowińskiego Parku Narodowego na autografii cyfrowym ImageStation (praca dyplomowa).
Environmental Systems Research Institute, Inc. 1992 — Cell-based modeling with GRID, ARC/INFO Users Guide.
Environmental Systems Research Institute, Inc. 1992 — Surface modeling with TIN, ARC/INFO Users Guide.
Environmental Systems Research Institute, Inc. 1992 — AML users guide, ARC/INFO Users Guide.
GOGOŁEK W. 1988 — *Szczegółowa mapa geologiczna Polski w skali 1 : 50 000*, ark. Szamotuły (432).
GOGOŁEK W. (w opracowaniu) — *Szczegółowa mapa geologiczna Polski w skali 1 : 50 000*, ark. Obrzycko (393).