



W 10 DNI DOOKOŁA ŚWIATA

Tylko tyle czasu potrzebował wahadłowiec Endeavour (Odkrywca), by w lutym 2000 roku pozyskać dane do utworzenia numerycznego modelu prawie całej powierzchni lądów naszej planety.

Co więcej, ten trójwymiarowy model jest w zasięgu ręki każdego, kto ma dostęp do internetu. I to za darmo!

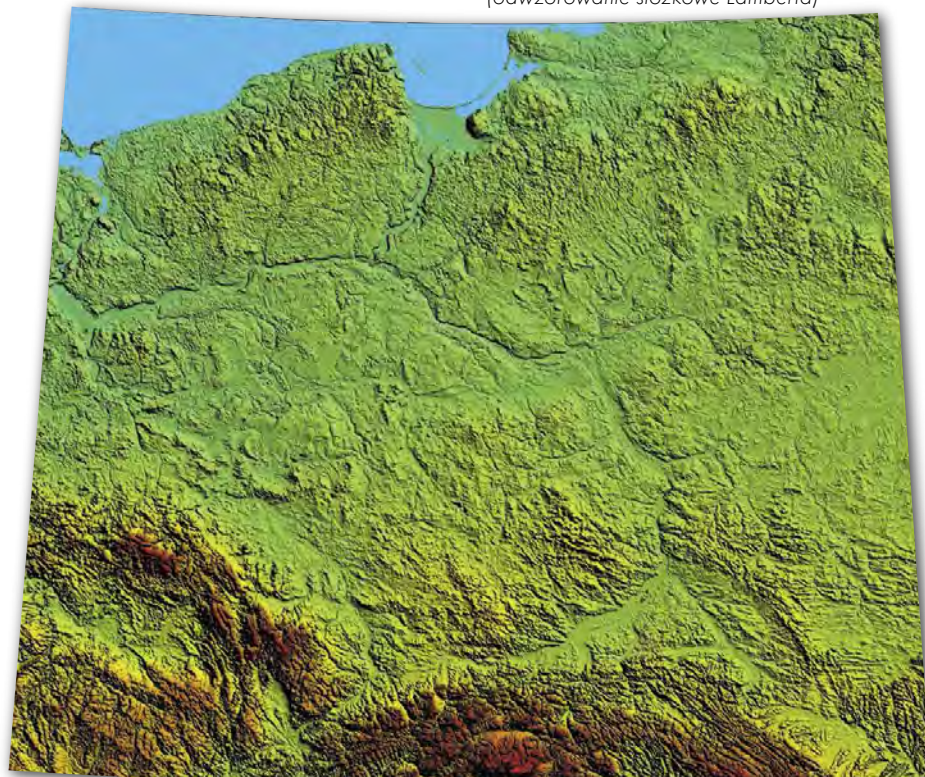
sprawa na poziomie map wielkoskalowych, przygotowanych dla turystów czy do prac projektowych. Dla takich potrzeb informacja o nieciągłości terenu jest bezwzględnie wymagana. Każdy geodeta wie, że oprócz warstwic na mapach zaznacza się także uskoki terenu i punkty wysokościowe (takie jak np. wzniesienia, depresje), a w pewnych sytuacjach również linie grzbietowe i linie cieków. Tak więc opinia naukowców amerykańskich o nadrzędności DTM nad tradycyjnymi warstwicami jest słuszna, ale pod wa-

KAZIMIERZ BĘCEK

Wśród pracowników National Aeronautics and Space Administration (NASA) i Jet Propulsion Laboratory (JPL) w Kalifornii (USA) panuje przekonanie¹, że warstwicę jako sposób przedstawiania topografii terenu to przeżytek. Z racji pozycji, jaką te dwie instytucje zajmują w świecie nauki, warto się nad tym zastanowić, by wyciągnąć wnioski dla przyszłości naszej profesji.

Zamiast warstwic proponuje się numeryczny model terenu (*Digital Terrain Model – DTM*²), ponieważ z siatki kwadratów utworzonej z punktów o znanych trzech współrzędnych, warstwicę zawsze można wyinterpolować. Ignoruje się przy tym fakt istnienia stromych skarp czy uskoków terenu. Uproszczenie takie jest dopuszczalne, jeżeli ogląda się Ziemię z kosmosu albo na mapach średnio- i małoskalowych. Inaczej ma się

Rys. 2. Cieniowana mapa Polski przygotowana na podstawie danych DTM-C (odzworowanie stożkowe Lamberta)



runkiem dodania do siatki kwadratów linii uskoków i punktów wysokościowych, które muszą być uwzględnione w czasie interpolacji warstwic.

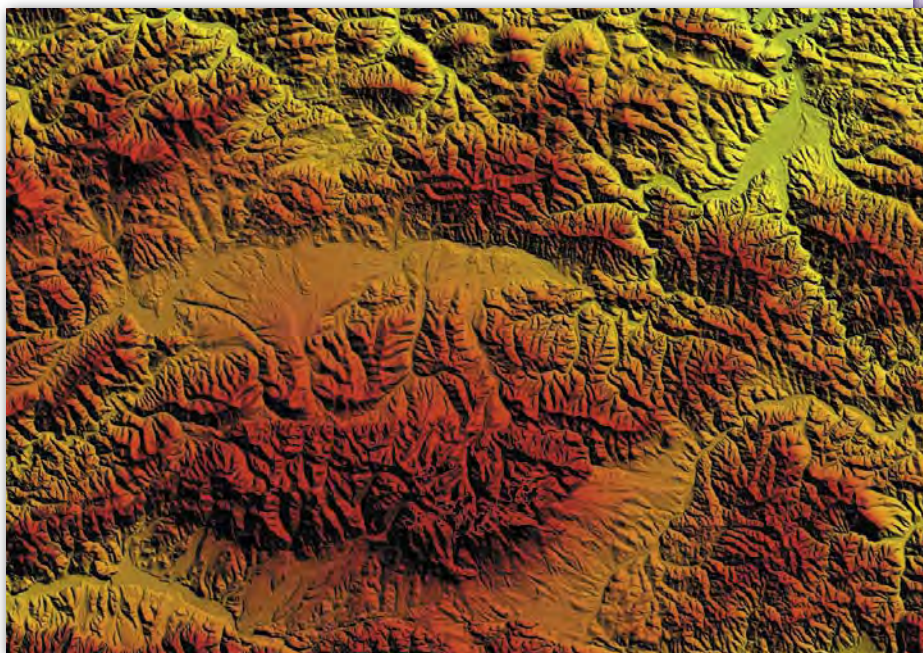
Stworzenie przez NASA i JPL prawie globalnego DTM niewątpliwie może być powodem satysfakcji. Dla przeciętnego „zjadacza chleba” ważny jest też fakt, że Amerykanie rozdają ten DTM za darmo. Przyjrzyjmy się więc produktowi, który już gotowy czeka na użytkowników.

• EKSPERYMENT

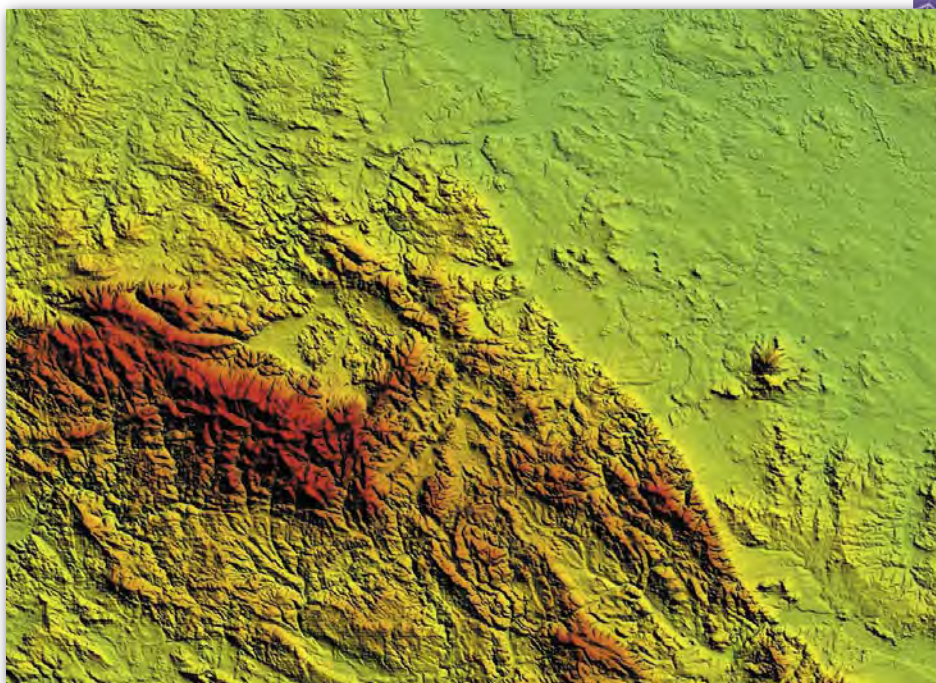
Lot wahadłowca Endeavour w lutym 2000 roku trwał 11 dni. Głównym celem tej misji była realizacja eksperymentu nazwanego SRTM (Shuttle Radar Topography Mission), zmierzającego do stworzenia numerycznego modelu naszej planety. Pomiarami objęto obszary lądowe położone pomiędzy 56. równoleżnikiem na półkuli południowej a 60. równoleżnikiem na półkuli północnej. W tym przedziale znajduje się ok. 80% lądów [6].

Zakładano, że błąd wysokości³ DTM nie powinien przekraczać ± 16 m na poziomie ufności 90%. Wysokości punktów terenu uzyskano z interferometrii radarowej [12] (**R**adio **D**etection **a**nd **R**anging), wykorzystując do tego tzw. SAR (**S**ynthetic **A**perture **R**adar). Zamontowana na 60-metrowym ramieniu antena wysyłała w kierunku Ziemi wiązki fal elektromagnetycznych o dwóch długościach: 5,6 cm (pasmo C) oraz około 3 cm (pasmo X). Z kolei inna antena na pokładzie wahadłowca zbierała odbite od powierzchni terenu fale elektromagnetyczne. Precyzyjny pomiar czasu, który upłynął od momentu wysłania fali do powrotu jej odbicia, umożliwił wyznaczenie odległości anteny od powierzchni terenu, a w konsekwencji określenie wysokości punktu na powierzchni terenu. Na tej samej zasadzie oparte jest działanie dalmierzy elektromagnetycznych powszechnie stosowanych w geodezji.

Wybór techniki SAR, a nie np. techniki laserowej, podyktowany był głównie koniecznością minimalizacji błędów wywołanych refrakcją atmosferyczną. Jak wiadomo, fale elektromagnetyczne w pasmach radiowych praktycznie nie podlegają zjawisku refrakcji atmosferycznej. Inną ogromną zaletą techniki radarowej jest fakt, że pomiar może przebiegać nawet wtedy, gdy powierzchnia Ziemi jest niewidoczna dla oka – np. w nocy lub przy zachmurzeniu. Jest to szczególnie ważne w tropikach, gdzie ze względu na zachmurzenie pomiary optyczne z kosmosu są bardzo trudne



Rys. 3. Tatry



Rys. 4. Sudety i przedgórze Sudetów

do zrealizowania. W konsekwencji wiele małych wysp (np. na Oceanie Spokojnym) nigdy wcześniej nie posiadało map topograficznych.

Różnica pomiędzy pomiarami wykonywanymi w paśmie C i X polega głównie na tym, że fale z pasma C odbijają się od przeszkód, nawet takich jak liście, podczas gdy fale z pasma X w większości przypadków docierały do powierzchni terenu. Oznacza to, że DTM zmierzony za pomocą pasma C (dalej DTM-C) obciążony jest szumem spowodowanym

pokrywą roślinną lub, mówiąc inaczej, DTM-C reprezentuje powierzchnię topograficzną jedynie w odsoniętych miejscach. Wady tej „prawie” nie posiada DTM zmierzony pasmem X (dalej DTM-X).

Zgromadzone w trakcie lotu wahadłowca dane były przetwarzane przez kilka ośrodków naukowych uczestniczących w eksperymencie. DTM-C opracowało Jet Propulsion Laboratory (JPL) w Kalifornii, a DTM-X – specjaliści z dwóch agencji badania przestrzeni

kosmicznej; niemieckiej (Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt) i włoskiej (Agenzia Spaziale Italiana).

• WYNIKI

Opracowanie danych zajęło kilka lat. Ich rezultatem są dwa numeryczne modele powierzchni terenu różniące się między sobą kilkoma parametrami. DTM-C posiada formę regularnej siatki o wymiarach $1'' \times 1''$ (około 30 m x 30 m na równiku) pokrywającą terytoria należące do USA. Dla pozostałych obszarów świata siatka ta ma wymiary $3'' \times 3''$ (około 90 m x 90 m na równiku). Zróżnicowanie rozmiarów siatki zostało wprowadzone na żądanie Departamentu Obrony USA ze względu na bezpieczeństwo narodowe.

W wyniku zakrojonych na globalną skalę prac zmierzających do ustalenia dokładności DTM-C/X uzyskano wskaźniki o przeszło połowę lepsze, niż zakładano (przypomnijmy, że błąd na poziomie ufności 90% miał nie przekraczać 16 m).

Analiza tabeli [11] zawierającej zestawienie wskaźników dokładności w zależności od miejsca na globie prowadzi do wniosku, że dokładność DTM-C jest zaskakująco wysoka. Przyjmując międzynarodowy standard, że średni błąd wysokości nie powinien przekraczać 30% cięcia warstwicowego mapy, dochodzi się do wniosku, że DTM-C nadaje się do produkcji map o cięciu warstwicowym około 15 m, czyli dla map w skalach nie większych od 1:30 000. Dokładność niewątpliwie poprawiłoby wyeliminowanie szumu spowodowanego pokrywą roślinną. W przypadku dużych obszarów terenu o jednorodnej powłoce roślinnej (np. połać lasu), wspomniany szum ma charakter systematyczny, dzięki czemu może być łatwo oceniony i wyeliminowany. Zdecydowanie trudniej estymować wielkość tego szumu na obszarach pokrytych niejednorodną powłoką roślinną, gdzie szum ten ma charakter przypadkowy. Pewne rozwiązania tego zagadnienia zasugerowano w [2] i [5]. Należy przy-



Rys. 5. Zatoka Gdańska

puszczać, że zagadnienie to już niebawem stanie się przedmiotem zainteresowania wielu badaczy.

Ze względu na uwarunkowania geometryczne pomiędzy wiązką radaru a powierzchnią terenu nie wszędzie udało się pozyskać rzędne powierzchni Ziemi, ale dotyczy to prawie wyłącznie stromych szczytów górskich. Na rysunku 3 efekt ten widoczny jest szczególnie w Tatrach (czarne piksele). Brakujące rzędne terenu można interpolować na podstawie sąsiadujących obszarów terenu lub wykorzystując mapy warstwicowe [4]. Ostatnia metoda jest z oczywistych względów bardziej dokładna, szczególnie wtedy, gdy brakuje rzędnych na większym obszarze. Jej wadą jest duża pracochłonność.

DTM-C uzupełnia warstwę wektorów (w formacie ESRI shp). Zawiera ona akweny wodne spełniające określone kryteria edytorskie [14], na przykład nie znalazły się na niej jeziora o długości mniejszej niż 600 m.

Na rysunkach 3, 4, 5 i 6 przedstawiono przykładowe mapy przygotowane na podstawie DTM-C. Wykorzystano do tego celu znany australijski program do obróbki danych rastrowych o nazwie ERMapper. Amatorzy zainteresowani eksperymento-

waniem z DTM-C mogą skorzystać z bezpłatnego japońskiego programu o nazwie Kashmir 3D [13]. Program ten polecany jest m.in. przez szwajcarską rządową organizację o nazwie Federalne Biuro Topograficzne (Das Bundesamt für Landestopografie, Swisstopo) [14].

Jak wspomniano, DTM-X posiada istotne zalety w porównaniu z DTM-C: jest dokładniejszy, prawie nie jest obciążony błędami wywołanymi pokrywą roślinną, a siatka ma wymiary $1'' \times 1''$. Nie jest on jednak bezpłatny, a jego pokrycie nie jest tak wyczerpujące jak DTM-C. Rysunek 10 przedstawia pokrycie terenu Europy DTM-X [3]. Długość i szerokość geograficzna punktów DTM-C/X wyrażone są w układzie elipsoidy WGS84, natomiast wysokość odniesiona jest do średniego poziomu morza.

• JAK POBRAĆ DTM-C?

DTM-C wraz z nakładką wektorową dostępny jest bezpłatnie. Może być pobrany ze strony NASA [8] i [9]. DTM-C został podzielony na sekcje o wymiarach $1^\circ \times 1^\circ$, o nazwach nawiązujących do współrzędnych geograficznych lewego dolnego narożnika sekcji, tak więc np. N49E014.HGT oznacza sekcję, której lewy dolny róg rozpoczyna się w punkcie o współrzędnych 49° szerokości geograficznej północnej i 14° długości wschodniej. Każda sekcja zawiera 1201 linii i tyleż kolumn. Rzędne wyrażone są za pomocą 2-bitowych liczb całkowitych. Poziom kwantyzacji rzędnych wynosi 1 m. Dane skompresowano (zip). Rozmiar przeciętnego pliku wynosi ok. 1 MB. Obszar Polski pokrywa 66 takich sekcji.

Nakładka tematyczna (akweny wodne) z racji formatu (wektor) jest znacznie

WSKAŹNIK DOKŁADNOŚCI DTM-C DLA RÓŻNYCH OBSZARÓW NA ŚWIECIE Wartości liczbowe wyrażają błędy w metrach na poziomie ufności 90% [11]

	Afryka	Australia	Eurazja	Wyspy	Ameryka Płn.	Ameryka Płd.
Błąd absolutny*) położenia	11,9	7,2	8,8	9,0	12,6	9,0
Błąd absolutny wysokości	5,6	6,0	6,2	8,0	9,0	6,2
Błąd względny*)	9,8	4,7	8,7	6,2	7,0	5,5

*) Błąd absolutny obliczono na podstawie współrzędnych punktów kontrolnych na powierzchni terenu; błąd względny obliczono na podstawie innych DTM, które były w posiadaniu NASA

mniejsza. Nazwa skompresowanego pliku jest nieco inna, np. plik E014N049e. ZIP pokrywa obszar 1°, którego lewy dolny narożnik rozpoczyna się w punkcie położonym 14° na wschód od Greenwich i 49° na północ od równika.

DTM-C dla obszaru Polski można pobrać ze strony [10]. Znajdują się tam również przykładowe mapy przygotowane przy wykorzystaniu DTM-C.

•WNIOSKI

Niewątpliwym sukcesem naukowców amerykańskich, włoskich, niemieckich, a także całej reszty innych uczestników programu SRTM, było stworzenie jednolitego numerycznego modelu prawie całego świata o tak wysokiej dokładności. Fakt bezpłatnego dostępu do danych czyni DTM-C jeszcze bardziej atrakcyjnym dla naukowców i praktyków zajmujących się problematyką GEO.

DTM-C i jego pochodne (mapy) bez wątpienia będą posiadały ogromne znaczenie dla edukacji na różnych poziomach nauczania. Przyczyni się do tego również fakt, że oprogramowanie też jest bezpłatne. Dzięki tym danym np. nauka geografii w szkołach może stać się bardziej atrakcyjna. Mapy przygotowane bowiem na podstawie DTM-C mogą zawierać znacznie więcej informacji o środowisku geograficznym niż mapy tradycyjne (kopalnia odkrywkowa w Bełchatowie przedstawiona na rys. 6 przemawia do wyobraźni bardziej niż niejedna tradycyjna mapa).

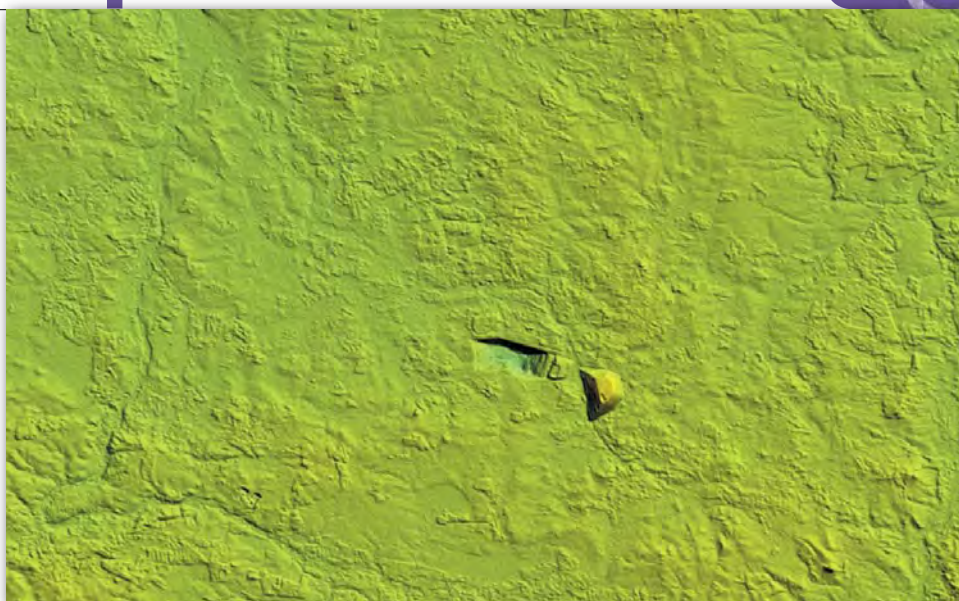
Dostępność DTM-C powinna otworzyć nową dziedzinę badań kartograficznych, mających na celu m.in. znalezienie optymalnego sposobu prezentacji numerycznego modelu terenu. Badacze z obszaru geodezji powinni zauważyć, że wdzięcznym tematem studiów może być np. zagadnienie estymacji szumów wywołanych pokrywą roślinną lub fuzji istniejących danych topograficznych z danymi DTM-C.

KAZIMIERZ BĘCEK

jest pracownikiem naukowo-dydaktycznym Uniwersytetu Brunei Darussalam, na Wydziale Geografii prowadzi wykłady z zakresu geodezji, kartografii, GIS i teledetekcji

Przypisy

- ¹ „Contours are so last-century!...” Fragment wypowiedzi Toma Farra, JPL, Moderator forum SRTM: 27/9/2005 - 16:40, <http://pub7.bravenet.com/forum/537683448/fetch/571823/>.
- ² DTM różni się od DEM (ang. **D**igital **E**levation **M**odel) tym, że DTM opisuje „nagi” teren, a DEM dotyczy terenu wraz z naturalnymi i sztucznymi obiektami znajdującymi się na jego powierzchni. W literaturze bardzo często skróty te traktuje się jak synonimy.



Rys. 6. Kopalnia odkrywkowa węgla brunatnego w Bełchatowie



Rys. 7. Pokrycie Europy DTM-X

- ³ Określenie błęd 90% oznacza, że statystycznie 90% wartości bezwzględnych odchylek od prawdziwej wysokości punktu jest mniejsza od podanej wartości. Znacznie częściej używane określenie błęd średni charakteryzuje się wskaźnikiem około 67%.

Literatura

- [1] Borkowski A.: O doborze optymalnej wielkości regularnej siatki dla numerycznych modeli terenu interpolowanych na podstawie mapy warstwicowej, „Geodesia et Descriptio Terrarum”, 1(1-2) 2002;
- [2] Carabajal C. C., Harding D. J.: SRTM C-band and ICESat Laser Altimetry Elevation Comparisons as a Function of Tree Cover and Relief, „Photogrammetric Engineering & Remote Sensing”, volume 72, number 3, marzec 2006;
- [3] DLR, Status of SRTM/ X-SAR DEM processing, http://www.dlr.de/srtm/neu/processing_en.htm, marzec 2006;
- [4] Gamache M.: Free and Low Cost Datasets for International Mountain Cartography, www.icc.es/workshop/abstracts/ica_paper_web3.pdf, marzec 2006;
- [5] Hofton M., Dubayah R., Blair J. B., Rabine D.: Validation of SRTM Elevations Over Vegetated and Non-vegetated Terrain Using Medium-Footprint Lidar, „Photogrammetric Engineering & Remote Sensing”, volume 72, number 3, marzec 2006;
- [6] JPL, Shuttle Radar Topography Mission,

<http://www2.jpl.nasa.gov/srtm/index.html>, marzec 2006;

- [7] JPL, SRTM - Band C - Euroasia, <ftp://eOsrp01u.ecs.nasa.gov/srtm/version2/SRTM3/Eurasia/>, marzec 2006;
- [8] JPL, SRTM Data Editing Rules, ftp://eOsrp01u.ecs.nasa.gov/srtm/version2/Documentation/SRTM_edit_rules.pdf, marzec 2006;
- [9] JPL, SRTM Water Body Datasets, <ftp://eOsrp01u.ecs.nasa.gov/srtm/version2/SWBD/SWBDDeast/>, marzec 2006;
- [10] Panorama 2000, DTM-C dla obszaru Polski wraz z przykładowymi mapami, www.panorama2000.org/ge2261/SRTM-PL;
- [11] Rodriguez E., Morris E. C., Belz J. E.: A Global Assessment of the SRTM Performance, „Photogrammetric Engineering & Remote Sensing”, volume 72, number 3, marzec 2006;
- [12] Rosen P. A., Hensley I. R., Joughin F. K., Li S. N., Madsen E., Rodriguez R. M., Goldstein: Synthetic Aperture Radar Interferometry, Proceedings IEEE, v. 88, 2000;
- [13] Sugimoto T.: Kashmir 3d, <http://www.kashmir3d.com/index-e.html>, marzec 2006;
- [14] Swisstopo, DHM25, <http://www.swisstopo.ch/products/digital/height/dhm25>, marzec 2006;
- [15] Werner M.: Comparison of DEMs Derived from SRTM / X- and C-band, <http://edc.usgs.gov/conferences/SRTM/WorkshopPresentations.html>, marzec 2006.