



Integracja satelitarnych modeli wysokościowych

ARTUR KAROL KARWEL¹, BARTŁOMIEJ KRASZEWSKI¹,
ZDZISŁAW KURCZYŃSKI², DARIUSZ ZIÓLKOWSKI¹

¹Institut Geodezji i Kartografii, 02-679 Warszawa, ul. Modzelewskiego 27,
karwel@igik.edu.pl, bartlomiej.kraszewski@igik.edu.pl, dariusz.ziolkowski@igik.edu.pl

²Politechnika Warszawska, Wydział Geodezji i Kartografii,
00-661 Warszawa, Pl. Politechniki 1, kurczynski@wp.pl

Streszczenie. W artykule zaprezentowano metodę integracji danych wysokościowych z interferometrycznej misji satelitarnej SRTM (model SRTM-C, rozdzielczość 3", tj. około 90 m) oraz stereoskopowych pomiarów scen satelitarnych ASTER, pozyskanych w kanale bliskiej podczerwieni, do opracowania Numerycznego Modelu Pokrycia Terenu (NMPT) o rozdzielczości przestrzennej 1". Model ASTER charakteryzuje się większą rozdzielczością (1", tj. około 30 m), ale może wykazywać lokalne błędy o charakterze systematycznym, spowodowane głównie błędami dopasowania obrazów w obszarach o regularnej strukturze pól uprawnych. Opracowana metoda zakłada uszczegółowienie modelu interferometrycznego z wykorzystaniem modelu ASTER. Bazuje na modelu różnicowym obu NMPT poddanych działaniu filtra uśredniającego ważonego, co zachowuje w nim ewentualne błędy systematyczne. Przefiltrowany model różnicowy posłużył do poprawy modelu ASTER. Zaproponowaną metodę przetestowano na fragmencie obszaru centralnej Polski o powierzchni 31 tys. km². Ocenę wizualną i ilościową otrzymanego zintegrowanego modelu względem danych źródłowych przeprowadzono dla trzech typów pokrycia terenu z wykorzystaniem profili terenowych oraz NMPT pozyskanego w ramach projektu ISOK. Wyboru obszarów o określonym typie pokrycia dokonano z wykorzystaniem bazy CORINE Land Cover. Miarą oceny dokładności modeli były błędy średnie liczone na podstawie różnic wysokości punktów interpolowanych z modelu oraz odpowiadających im punktów kontrolnych profili terenowych, pomierzonych techniką GPS, a także odchylenie standardowe różnic wysokości pomiędzy modelem referencyjnym ISOK a analizowanymi modelami. Ocena wizualna przeprowadzona została na fragmencie wydzielonym z całego obszaru opracowania. W wyniku zastosowania opracowanej metody otrzymany NMPT charakteryzuje się wyższą szczegółowością w porównaniu z modelem SRTM-C. Skompensowane zostały w nim również lokalne błędy systematyczne charakterystyczne dla modelu ASTER.

Słowa kluczowe: NMPT, interferometria radarowa, fotogrametria satelitarna, SRTM, ASTER, analiza dokładności

DOI: 10.5604/12345865.1157319

1. Wprowadzenie

Na rynku danych geoinformacyjnych jest wiele ogólnodostępnych, globalnych, numerycznych modeli wysokościowych pozyskanych wyłącznie z pułapu satelitarne- go. Zaliczamy do nich m.in. ASTER, SRTM-C, SRTM-X, EuroDEM. Dla opraco- wań średnioskalowych najbardziej interesujące są modele o wyższej rozdzielczości (mniejsze oczko siatki), tj. SRTM-X i ASTER. Model SRTM-X, ze względu na wąski pas zobrazowania powierzchni Ziemi w paśmie X, zawiera przerwy w pokryciu informacją wysokościową. Z powodu znacznych braków w danych produkt ten nie ma charakteru modelu globalnego, w pełni zadowalającego wszystkich użytkow- ników. Model SRTM-C, ze względu na jego jednorodność, ciągłość i dokładność (Rodrigues et al., 2006; Karwel, 2006; Karwel et al., 2010; Kolecka et al., 2013; Przy- była et al., 2013), ma szerokie zastosowanie, np. w analizach geomorfologicznych czy krajobrazowych, lecz jego głównym ograniczeniem jest niska rozdzielczość (3", tj. około 90 m). Pod względem rozdzielczości i zasięgu najlepszym modelem globalnym wydaje się model ASTER, ale czy na pewno? Twórcy modelu ASTER podają, że druga jego wersja uwzględni poprawę błędów wysokościowych, a jego dokładność wysokościowa wynosi 20 m. Z dotychczas przeprowadzonych badań wynika, że średni błąd wysokości modelu ASTER waha się w granicach od 5 m do 30 m w zależności od użytych metod korekcji i obszaru odwzorowania (Kaab, 2005; Lorraine et al., 2009; Colosimo et al., 2009; Shangmino et al., 2011). Więk- szość badań wykazuje również, że model obciążony jest błędami grubymi, tzw. artefaktami, główne źródło ich powstania upatruje się w niedoskonałości procesu automatycznej obróbki danych. Dość duża wartość błędu średniego i liczne szumy modelu ASTER powodują, że model ten pomimo małego oczka siatki (30 m) nie spełnia pokładanych w nim oczekiwań. Zachodzi więc potrzeba opracowania modelu, który charakteryzowałby się dokładnością i ciągłością modelu SRTM-C oraz rozdziel- czością ASTER. Jednym z rozwiązań, zaproponowanym przez autorów niniejszego artykułu, jest integracja danych wysokościowych polegająca na połączeniu modelu SRTM-C i ASTER w taki sposób, aby nowy model zachował ciągłości rzeźby terenu SRTM-C, a zarazem zyskał szczegółowość modelu ASTER. W ogólnościatowych badaniach pierwsze próby połączenia tych dwóch modeli pokrycia terenu związane były z uzupełnieniem brakujących informacji wysokościowych modelu SRTM-C z modelu ASTER i określeniem na tej podstawie spływu lodowca w górach Bhutan (Kääb, 2005). Dokonanie fuzji modelu interferometrycznego i modelu korelacyj- nego przez (Karkee et al., 2008) związane było z wypełnieniem szumów modeli, wykorzystując do tego wysokość, nachylenie i położenie z drugiego modelu. Fuzji wspomnianych wyżej numerycznych modeli pokrycia terenu dokonali również Robinson i in., otrzymując model EarthEnv-DEM90 o oczku siatki 90 m.

W artykule autorzy przedstawili metodę opracowania zintegrowanego nume- rycznego modelu pokrycia terenu (NMPT) na podstawie ogólnodostępnych danych

wysokościowych. Do wygenerowania tego modelu wykorzystano dane wysokościowe pochodzące z misji interferometrycznej SRTM oraz satelity ASTER. Opracowana metoda zakładała, że do modelu SRTM-C dołączona zostanie informacja z modelu ASTER z wykorzystaniem przefiltrowanego modelu różnicowego tych źródłowych modeli. Uzyskany model poddano ocenie wizualnej i dokładnościowej.

2. Charakterystyka danych testowych

W procesie integracji wykorzystano dwa modele wysokościowe: SRTM-C i ASTER. Modele z obu źródeł, z racji specyfiki pozyskanych danych wysokościowych, to numeryczne modele pokrycia terenu (NMPT), a nie numeryczne modele terenu (NMT).

Dane modelu wysokościowego SRTM-C pozyskano w 2000 roku przy współpracy NASA (*National Aeronautics and Space Administration*) i JPL (*Jet Propulsion Laboratory*) oraz Niemieckiego Centrum Kosmicznego DLR (*Deutsches Zentrum für Luft und Raumfahrt*) i Włoskiej Agencji Kosmicznej ASI (*Agenzia Spaziale Italiana*) (Kurczyński, 2000). Dane wysokościowe pozyskano interferometrem SAR (*Synthetic Aperture Radar*), pracującym w paśmie C (długość fali 5,6 cm), obrazującym pas powierzchni o szerokości 225 km. Z danych opracowano NMPT w strukturze GRID o oczku siatki 3" na 3" (około 60 m na 90 m). Model SRTM-C, wersja 4, stanowi zbiór punktów zapisany w formacie GeoTIFF, w segmentach o wymiarach 5° na 5°, z których każdy opisany jest macierzą o wymiarach 6001 wierszy na 6001 kolumn. Układem odniesienia przestrzennego dla danych SRTM jest układ WGS-84, a wysokość odniesiona jest do elipsoidy EGM 96 (*Earth Gravitation Model*). Wersja 4 modelu SRTM-C jest poprawioną wersją modelu, uwzględniającą brak danych wysokościowych w modelu źródłowym.

Dane modelu wysokościowego ASTER pozyskano przy współpracy Ministerstwa Ekonomii, Handlu i Przemysłu Japonii (METI — *Ministry of Economy, Trade and Industry of Japan*) oraz Narodowej Agencji Aeronautyki i Przestrzeni Kosmicznej NASA, na podstawie automatycznego opracowania obrazów stereoskopowych, pozyskanych w latach 1999-2008 z pokładu satelity Terra radiometrem pracującym w zakresie podczerwieni (kanał VNIR) *Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer*. Tworzenie par stereoskopowych obrazów było możliwe dzięki obrazowaniu w nadirze i wstecz (kąt wychylenia około 0° i wstecz 27,7°). Rozdzielczość przestrzenna obrazu w nadirze równa 15 m pozwoliła na wygenerowanie NMPT w strukturze GRID o oczku 1" (około 30 m). Model ASTER pokrywa powierzchnię lądów między równoleżnikami 83°S i 83°N, jego dokładność wysokościową określono na 20 m, zaś dokładność poziomą na 30 m. Model dostępny jest w formacie GeoTIFF w segmentach o wymiarach 1° na 1°, z których każdy opisany jest macierzą o wymiarach 3601 wierszy na 3601 kolumn. Układem

odniesienia przestrzennego jest układ WGS-84. W badaniach wykorzystano drugą wersję modelu wysokościowego uwzględniającą poprawę błędów wysokości.

Integrację modeli wykonano dla obszaru testowego, który obejmował część województwa mazowieckiego, łódzkiego i lubelskiego, pomiędzy 51,5 a 53,0 stopniem szerokości geograficznej oraz południkami 19,5 i 22,3 stopnia. Powierzchnia obszaru opracowania wynosiła ok. 31 tys. km².

3. Metodyka integracji numerycznych modeli terenu

Na wybranym obszarze testowym zlokalizowane były dwa segmenty modelu SRTM-C i 24 segmenty modelu ASTER. W pierwszym etapie prac przeprowadzono proces ich łączenia w celu wygenerowania pojedynczych spójnych modeli obejmujących swym zasięgiem obszar opracowania. Po połączeniu każdy z modeli został przycięty do obszaru opracowania.

Satelitarne NMPT obarczone są błędami systematycznymi i przypadkowymi związanymi z niedoskonałością wykorzystanych do ich opracowania technik pomiarowych (Karwel et al., 2006; Shangmino et al., 2011). W celu podniesienia dokładności wysokościowej wspomnianych modeli należy wyznaczyć i usunąć błędy systematyczne, na przykład przy wykorzystaniu profili terenowych. W opracowaniu wykorzystano 45 profili o średniej długości 2 km. Profile pomierzono techniką GPS z wykorzystaniem metody kinematycznej. Dokładność wyznaczenia punktu profilu oceniono na 5 cm poziomo i 10 cm wysokościowo. Miarą oceny dokładności wysokościowej modelu (Kaczyński R., 2000; Ewiak et al., 2004; Paszotta et al., 2005) były różnice wysokości pomiędzy poszczególnymi punktami profilu oraz odpowiadającymi im wyinterpolowanymi punktami modelu. Analizę dokładności wykonano w środowisku SCOP++ firmy Inpho. Tabela 1 przedstawia ocenę dokładności źródłowych NMPT, a tabela 2 dokładność wysokościową modeli po usunięciu błędów systematycznych użytych w dalszych badaniach. Składową systematyczną błędów określono jako średnią arytmetyczną rozbieżności między modelem badanym a profilem terenowym, a składową przypadkową jako odchylenie standardowe tych rozbieżności.

TABELA 1

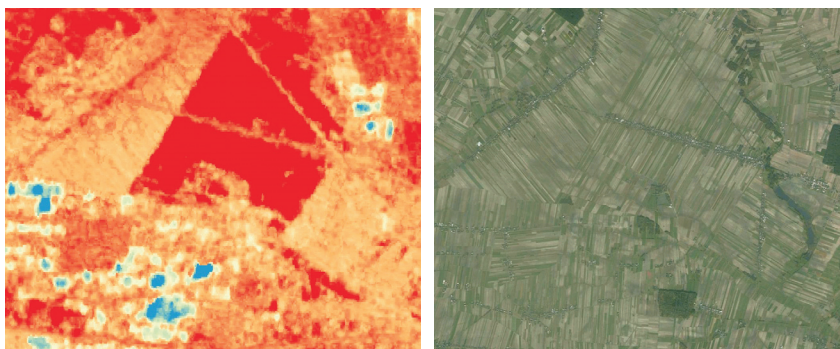
Charakterystyka dokładnościowa źródłowych NMPT

NMPT	Błąd średni pomiaru [m]	Składowa przypadkowa [m]	Składowa systematyczna [m]
SRTM-C	3,8	1,4	-3,5
ASTER	9,5	8,1	-4,9

TABELA 2

Charakterystyka dokładności źródłowych NMPT po usunięciu błędów systematycznych

NMPT	Błąd średni pomiaru [m]
SRTM-C	1,4
ASTER	8,0



Rys. 1. Przykład błędów NMPT ASTER. Widoczne obszary obniżonej (kolor niebieski) i podwyższonej (kolor czerwony) wysokości w płaskim rolniczym rejonie

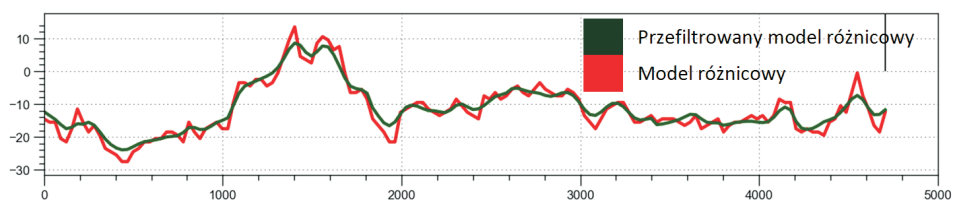
W wyniku porównania dwóch źródłowych satelitarnych modeli wysokościowych autorzy stwierdzili, że pomimo wyższej rozdzielczości terenu model ASTER obarczony jest stosunkowo dużymi błędami lokalnymi, ale o systematycznym charakterze, wynikającymi z wykorzystywanej do jego generowania techniki korelacji obrazów. Zauważono mianowicie związek występowania tych błędów z niekorzystnym ułożeniem regularnych geometrycznych elementów pokrycia terenu (regularna szachownica pól uprawnych). Przykład taki ilustruje rysunek 1, gdzie równoległe do bazy stereogramu ułożona siatka pól uprawnych spowodowała błędy korelacji i w konsekwencji systematyczne błędy wysokościowe modelu.

Lokalizacja i eliminacja takich błędów jest utrudniona z powodu charakteru ich rozkładu, który można określić jako „lokalny, powierzchniowy”. Pomimo tych błędów model ASTER stanowi doskonale źródło informacji o terenie, które można wykorzystać do uszczegółowienia modeli o niższej rozdzielczości. Autorzy zaproponowali metodę podwyższenia rozdzielczości NMPT SRTM-C z wykorzystaniem modelu ASTER.

Podstawą zaproponowanej metody jest wyznaczenie nieznaczących względnych różnic pomiędzy modelami SRTM-C i ASTER. Jako model wyjściowy przyjęto model interferometryczny — charakteryzuje się on wyższą dokładnością wysokościową i lepszym odwzorowaniem pokrycia terenu. Metoda bazuje na modelu różnicowym pomiędzy źródłowymi NMPT. Model różnicowy charakteryzuje się rozdzielczością przestrzenną około 30 m, a jego wysokość wyliczana jest na podstawie wzoru:

$$H_{\text{różnicowy}} = H_{\text{ASTER}} - H_{\text{SRTM-C}}$$

W celu zachowania lokalnych różnic wysokościowych zarejestrowanych na modelu ASTER model różnicowy został poddany filtracji z wykorzystaniem filtra uśredniającego ważonego 5×5 . Zastosowanie tego filtra pozwoliło na zniwelowanie punktowych różnic wysokości pomiędzy sąsiadującymi punktami (wynikających z przypadkowych punktowych błędów w modelu ASTER), a jednocześnie na zachowanie błędów występujących powierzchniowo w miejscach błędnej korelacji obrazów (rys. 2). Uzyskany przefiltrowany model różnicowy odjęto od NMPT ASTER, tworząc nowy zintegrowany model. Nowy model poddany został ocenie wizualnej i dokładnościowej.



Rys. 2. Przebieg profilu modelu różnicowego oraz po zastosowaniu filtra uśredniającego [m]

4. Ocena dokładności wynikowego NMPT

Ocenę dokładności opracowanego NMPT przeprowadzono dwoma sposobami. W pierwszym jako dane referencyjne wykorzystano pomierzone profile terenowe, natomiast w drugim NMPT opracowany na podstawie danych z lotniczego skaningu laserowego w ramach projektu ISOK. Model ISOK charakteryzuje się rozdzielczością przestrzenną 0,5 lub 1 m, zależnie od terenu, i dokładnością wysokościową 15 cm. Model referencyjny obejmował powierzchnię 2,1 tys. km². Ze względu na małą rozdzielczość terenową modeli satelitarnych (około 90 m i 30 m) przepróbowano referencyjny model ISOK metodą najbliższego sąsiada do rozdzielczości 10 m. Miarą oceny dokładności analizowanych NMPT względem NMPT ISOK były błędy średnie obliczone na podstawie różnic wysokości pomiędzy modelem wzorcowym a modelami badanymi. W celu poszerzenia analizy o wpływ pokrycia terenu wykorzystano warstwy bazy CORINE Land Cover.

Z analizy źródłowych numerycznych modeli pokrycia terenu (tab. 1 i 2) wynika, że błąd średni modelu wysokościowego SRTM-C dla badanego obszaru wyniósł 3,8 m, a jego część systematyczna wyniosła -3,5 m, zaś dla modelu ASTER odpowiednio 9,5 m i -4,5 m. Po usunięciu systematyki błąd średni wysokości modelu SRTM-C zmalał do 1,4 m, zaś modelu ASTER do 8 m.

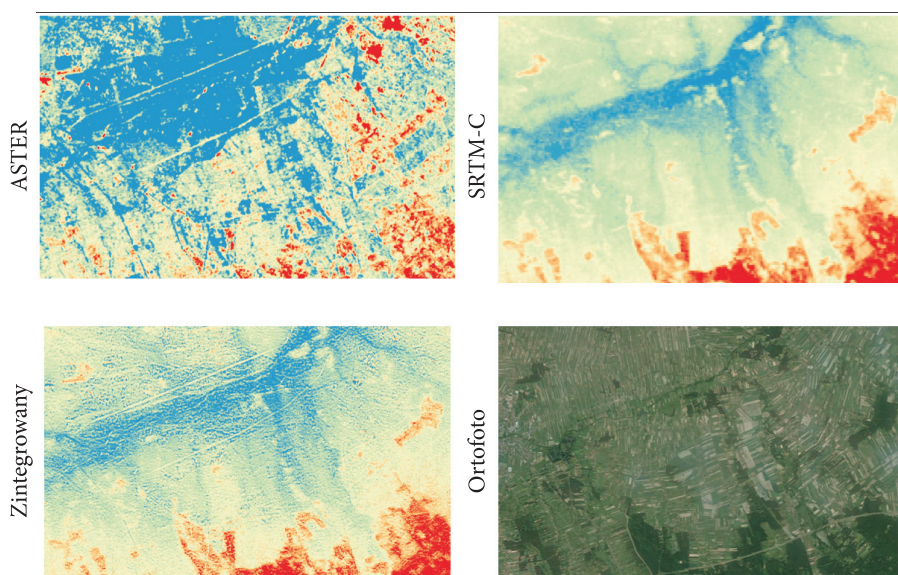
TABELA 3
Charakterystyka dokładności zintegrowanego NMPT określona na podstawie profili terenowych

NMPT	Błąd średni pomiaru [m]	Składowa przypadkowa [m]	Składowa systematyczna [m]
Model zintegrowany	2,3	2,3	-0,1

TABELA 4
Charakterystyka dokładności modeli określona na podstawie modelu ISOK

Obszar analizy	Ocena statystyczna	SRTM-C [m]	ASTER [m]	INTEGRACJA [m]
Cały obszar	Średnia różnica wysokości	-1,6	0,6	-1,5
	Odchylenie standardowe	5,3	8,3	5,3
Tereny zurbanizowane	Średnia różnica wysokości	-1,7	4,9	-1,3
	Odchylenie standardowe	6,5	9,3	5,5
Tereny leśne	Średnia różnica wysokości	-3,5	1,1	-3,2
	Odchylenie standardowe	7,7	9,3	7,3
Tereny rolne	Średnia różnica wysokości	-0,7	-2,3	-0,6
	Odchylenie standardowe	2,9	7,3	3,1

W tabeli 3 przedstawione zostały wyniki analizy wysokościowej modelu zintegrowanego, określone na podstawie profili terenowych, z których wynika, że wartość błędu średniego wysokości tego modelu dla terenu odkrytego wyniosła 2,3 m. Oznacza to, że dokładność ta zbliżona jest do dokładności modelu SRTM-C. W tabeli 4 przedstawiono dokładności modeli określone na podstawie modelu ISOK. Z analizy wynika, że największa wartość odchylenia standardowego występuje w modelu ASTER, zarówno dla całości obszaru (8,3 m), lasu (9,3 m), miasta (9,3 m), jak i terenów rolnych (7,3 m). Modele SRTM-C i model zintegrowany wykazują podobny poziom dokładności, z odchyleniem standardowym odpowiednio: dla terenów rolnych 2,9 m i 3,1 m, dla terenów leśnych: 7,7 m i 7,3 m, dla terenów miejskich: 6,5 m i 5,5 m, zaś dla całego obszaru w obu modelach 5,3 m. W analizie błędu systematycznego (różnica wysokości modeli) największa jego wartość wystąpiła w modelu ASTER (4,9 m w terenie zurbanizowanym, a najmniejsza w modelu ASTER — 0,6 m w całym obszarze) oraz w modelu zintegrowanym (-0,6 m w terenach rolnych). Błędy systematyczne modelu SRTM-C i zintegrowanego mają zbliżone wartości. Średnio w całym obszarze model ASTER znajduje się 0,6 m powyżej, natomiast modele SRTM-C i zintegrowany położone są 1,5 m poniżej modelu referencyjnego ISOK. Wyniki przeprowadzonej analizy potwierdzają podobieństwo modelu interferometrycznego i modelu zintegrowanego pod względem dokładnościowym.

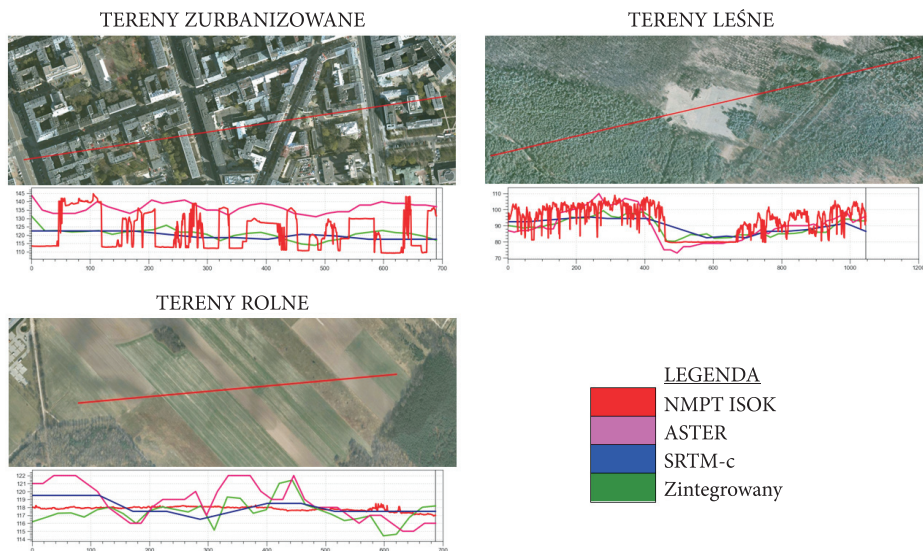


Rys. 3. Fragment terenu przedstawiony dla różnych modeli wysokościowych

Rysunek 3 ilustruje ten sam fragment obszaru testowego na trzech modelach: SRTM-C, ASTER i zintegrowanym. Model SRTM-C z pomiaru interferometrycznego charakteryzuje się ciągłością i jednorodnością, ale widoczna jest na nim mniejsza szczegółowość w stosunku do pozostałych modeli. Model ASTER powstały w wyniku pomiaru autokorelacyjnego charakteryzuje się dużą szczegółowością, widoczne są na nim m.in. drogi. Struktura modelu nie jest ciągła, występuje dużo artefaktów powierzchniowych (barwa niebieska), przez co traci na swej dokładności (Przybyła et al., 2013). Struktura modelu zintegrowanego, powstałego z połączenia dwóch modeli, charakteryzuje się ciągłością i dużą szczegółowością. Można stwierdzić, że model ten przejął wyłącznie najlepsze cechy jakościowe pozostałych modeli pokrycia terenu.

Na rysunku 4 przedstawiono przebieg profili wysokości na analizowanych modelach pokrycia terenu w obszarach o różnym typie pokrycia: tereny zabudowane, leśne i rolne. Analizując przebieg profili dla terenów zurbanizowanych, można zauważyć, że najbliższe do modelu referencyjnego są profile modelu zintegrowanego i SRTM-C. Profil modelu ASTER przebiega blisko maksymalnych wysokości profilu modelu referencyjnego, co oznacza, że model ASTER powstały z automatycznego dopasowania obrazów na obszarach zabudowy miejskiej przebiega na wysokości dachów. Dla terenów leśnych przebiegi wszystkich profili są do siebie zbliżone. Profile modelu SRTM-C i zintegrowanego w terenie rolnym są najbliższe przebiegowi profilu referencyjnego. Największe odchyłki w tym przypadku odnotować można dla modelu ASTER. Profile wysokościowe modeli dla wskazanych form terenowych

potwierdzają, że wynikowy zintegrowany model pokrycia terenu wykazuje najlepsze cechy jakościowe modelu SRTM-C oraz ASTER.



Rys. 4. Profile wysokościowe analizowanych NMPT dla trzech różnych form pokrycia terenu

5. Wnioski

Dokładność modelu zintegrowanego na obszarze testowym, sprawdzana na podstawie referencyjnych profili terenowych pomierzonych w obszarach otwartych, kształtuje się na poziomie 2,3 m.

Dokładność modelu zintegrowanego na obszarze opracowania, określona na podstawie referencyjnego modelu ISOK, wynosi odpowiednio: 5,5 m dla terenów miejskich, 5,3 m dla terenów leśnych oraz 3,1 m dla terenów rolnych.

Analiza wynikowego modelu, powstałego z integracji modeli SRTM-C oraz ASTER według opracowanej metody potwierdziła, że możliwe jest uzyskanie produktu o wyższej jakości niż dane źródłowe. Otrzymany model charakteryzuje się ciągłością i dokładnością modelu SRTM-C oraz szczegółowością modelu ASTER.

Dane wysokościowe zintegrowanego NMPT mogą stanowić źródłowy materiał do generowania warstw na mapach topograficznych w skali 1:50 000 oraz skalach mniejszych, a także mogą być wykorzystane do generowania ortoobrazów z wysokorozdzielczymi danymi satelitarnymi (Ikonos, QuickBird, SPOT). Dane te można wykorzystać na potrzeby przetwarzania obrazów radarowych, mogą również stanowić cenny materiał do analiz geomorfologicznych czy krajobrazowych.

Niniejsza praca przeprowadzona została przy wsparciu Narodowego Centrum Badań i Rozwoju (NCBiR) oraz Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego (MNiSW) w ramach projektu badawczego PBS „Zintegrowany system monitoringu podłoża gruntowego z wykorzystaniem interferometrii radarowej trwałych reflektorów”.

Artykuł wpłynął do redakcji 9.10.2014 r. Zweryfikowaną wersję po recenzji otrzymano 17.02.2015 r.

LITERATURA

- [1] BĘCEK K., *W 10 dni dookoła świata*, Geodeta, 5, 2006, 22-25.
- [2] COLOSIMO G., CRESPI M., DE VENDICTIS L., JACOBSEN K., *Accuracy evaluation of SRTM and ASTER DSMs*, In Proceedings of the 29th EARSeL Symposium, Chania, Greece, 2009.
- [3] EWIAK I., KACZYŃSKI R., *Accuracy of DTM generated from SPOT 4 and SPOT 5 HRS data*, International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, XX ISPRS Congress, 35, B1, Comm. I, 2004, 474-478.
- [4] KAAB A., *Combination of SRTM3 and repeat ASTER data for deriving alpine glacier flow velocities in the Bhutan Himalaya*, Remote Sensing of Environment, 94, 4, 2005, 463-474.
- [5] KACZYŃSKI R., *Technologie opracowania NMT i map cyfrowych metodami fotogrametrycznymi dla celów prognozowania powodzi*, Geodeta, 4, 59, 2000, 27-31.
- [6] KARKEE M., STEWARD B.L., S. ABD AZIZ S., *Improving quality of public domain digital elevation models through data fusion*, Biosystems Engineering, vol. 101, no. 3, 2008, 293-305.
- [7] KARWEL A.K., *Ocena dokładności modelu SRTM-X na obszarze Polski*, Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji, vol. 23, 2012, 139-145.
- [8] KARWEL A.K., EWIAK I., *Ocena dokładności modelu SRTM na obszarze Polski*, Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji, vol. 16, 2006, 289-296.
- [9] KOLECKA N., KOZAK J., *Assessment of the Accuracy of SRTM C- and X-Band High Mountain Elevation Data: a Case Study of the Polish Tatra Mountains*, Pure and Applied Geophysics, 2013.
- [10] KURCZYŃSKI Z., *Radarowa misja promu kosmicznego Endeavour (Nowa era geoinformatyki)*, Geodeta, 8, 63, 2000, 5-9.
- [11] KURCZYŃSKI Z., *Metodyka oceny dokładności i skalania wieloźródłowych numerycznych modeli terenu*, Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji, vol. 18, 2008, 343-353.
- [12] LORRAINE TIGHE M., CHAMBERLAIN D., *Accuracy comparison of the SRTM, ASTER, NED, NEXT-MAP USA Digital Terrain Model over several USA study sites*, LASPRS/MAPPS, Fall Conference November San Antonio, Texas, 2009.
- [13] PASZOTTA Z., SZUMIŁO M., *Application of statistical test of hypothesis to check DTM's accuracy*, Seminar about „Automated Checking of DTMs”, Aalborg, Denmark, 2005.
- [14] PRZYBYŁA C., PYSZNY K., *Porównanie numerycznych modeli terenu SRTM i ASTER GDEM oraz ocena możliwości ich wykorzystania w modelowaniu hydrologicznym w obszarach o małych deniwelacjach*, Rocznik Ochrony Środowiska, tom 15, 2013, 1489-1510.
- [15] ROBINSON N., REGETZB J., GURALNICKA R.P., *EarthEnv-DEM90: A nearly-global, void-free, multi-scale smoothed, 90 m digital elevation model from fused ASTER and SRTM data*, ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 87, 2014, 57-67.
- [16] RODRIGUES E., MORRIS C.S., BELZ J.E., *A Global Assessment of the SRTM Performance*, Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 2006, 261-267.

- [17] SHANGMINO Z., WEIMING C., CHENGHU Z., XI C., SHIFANG Z., ZENGPO Z., HAIJIANG L., HUIXIA C., *Accuracy assessment of the ASTER GDEM and SRTM3 DEM: an example in the Loess Plateau and North China Plain of China*, International Journal of Remote Sensing, 2011, 1-13.
- [18] Shutter Radar Topography Mission WebSite, <http://srtm.usgs.gov/>, 2014.
- [19] Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology WebSite <http://www2.jpl.nasa.gov/srtm/>, 2014.
- [20] German Aerospace Center WebSite, <http://dlr.de>, 2014.

A.K. KARWEL, B. KRASZEWSKI, Z. KURCZYŃSKI, D. ZIÓŁKOWSKI

Integration of satellites digital surface model

Abstract. The article presents the method of developing a 30-m spatial resolution DSM based on integration of height data from InSAR SRTM mission and the stereoscopic measurements of ASTER satellite images. The method involves the use of 30-m ASTER model for refinement of a 90-m interferometric SRTM model. ASTER model has a higher resolution, but it can contain local systematic errors (due to incorrect image matching in areas of the regular pattern of agricultural parcels). The differential model is generated and next smoothed with weighted averaging filter. Such a model is used to correct the ASTER DSM. The method was tested in the area of 31,000 square kilometers located in central Poland. A visual and precise evaluation of the output model relative to source data was performed with the use of terrain GPS profiles and the detailed DSM based on airborne laser scanning (ALS) data for three types of land cover. The accuracy of models was assessed by RMSE calculated from a difference between point heights interpolated from the model and the same height points taken from terrain GPS profiles. Also the standard deviation of height difference between analyzed and ALS DSM was analyzed. In the new integrated DSM, more details were noticed compared to the SRTM DSM. The height errors typical for ASTER model were compensated. The vertical accuracy of the developed DSM is close to SRTM data.

Keywords: interferometry, SRTM, Digital Elevation Model, accuracy, analysis

