

**OCENA DOKŁADNOŚCI GENEROWANIA NMT Z OBRAZÓW
SATELITARNYCH ASTER W OBSZARACH POLARNYCH (SVALBARD)
Z WYKORZYSTANIEM PCI GEOMATICA**

**EVALUATION OF ACCURACY OF ASTER DEM GENERATION IN SVALBARD
REGION WITH THE USE OF PCI GEOMATICA**

Małgorzata Błaszczyk

Wojewódzki Ośrodek Dokumentacji Geodezyjnej i Kartograficznej w Katowicach

SŁOWA KLUCZOWE: NMT, ASTER, lodowce, Svalbard, PCI Geomatica.

STRESZCZENIE: Celem badań prezentowanych w niniejszej pracy była ocena dokładności NMT generowanego z obrazów satelitarnych ASTER w obszarach polarnych oraz możliwości wykorzystania go do ortorektyfikacji obrazów. W ramach badań wygenerowano NMT ASTER w trzech różnych rozdzielczościach 30, 60 i 120 metrów. W celu zbadania wpływu ukształtowania terenu na dokładność generowanego NMT, obszar badań został podzielony na cztery rodzaje pól testowych: wody, lodowce, obszary łąd o niewielkim nachyleniu oraz obszary górskie. Ocenę dokładności produktu NMT ASTER wykonano w oparciu o referencyjny NMT Foto wykonany na podstawie zdjęć lotniczych 1:50 000. Oba modele porównano ze sobą generując dla każdej z rozdzielczości obrazy różnic. W badaniach przyjęto, że NMT o błędzie mniejszym niż 100 m może być wykorzystany do ortorektyfikacji, ponieważ generuje on błąd w poziomie wielkości ok. jednego piksela (15 m). W żadnym miejscu na obszarach płaskich i na obszarze wody błąd NMT nie przekraczał wartości 100 m. Błędy grube wystąpiły na 9.5 % powierzchni obszarów górskich dla NMT ASTER 30, ale już tylko na 6 % powierzchni dla oczka siatki 60 i 120 m. Natomiast odsetek obszarów występowania błędów grubych na lodowcach był znikomy – 2.5 % dla NMT o rozdzielczości 30 m i tylko 1.5 % dla rozdzielczości 120 m.

1. WSTĘP

W obliczu zachodzących zmian klimatycznych bardzo ważnym zagadnieniem glaciologicznym stał się monitoring zachowań lodowców. Szczegółowe badania prowadzone na kilku lodowcach na obszarze Svalbardu nie oddają jednak kondycji dynamicznej lodowców całego archipelagu. Ze względu na trudności w prowadzeniu pomiarów na odległych i trudno dostępnych terenach, tworzenie światowych zasobów powierzchni pokrytych lodem bazować musi więc na danych satelitarnych (Haerberli, 1998).

W skutek recesji lodowców akwen fiordu Hornsund (południowy Spitsbergen) powiększa się w tempie około 1 km² rocznie i jest to zjawisko typowe dla całego Svalbardu (Jania, 2006). Autorka w swoich badaniach nad zmianami dynamicznymi lodowców używa średniorozdzielczych obrazów ASTER. Obrazy te są dobrym źródłem wielu danych np.

o uszczelnieniu (Błaszczuk, Drzewiecki, 2006), zmianach powierzchni czy wielkości recesji lodowców. Recesja klifowego czoła Lodowca Hansbreen w latach 1989–2000 odbywała się w tempie około 40 m/rok. Podobną skalę zmniejszania objętości lodu stwierdzono na lodowcu Aavatsmarkbreen i Kongsvegen (NW Spitsbergen) dla okresu 1936–2002 (Jania, 2006). Zmiany takie mogą być zatem rejestrowane na podstawie obrazów ASTER pozyskanych w odstępie kilku lat. Jednak dla poprawnego wyznaczenia tych zmian, obrazy powinny zostać poddane ortorektyfikacji, co wymaga posiadania NMT.

Jedynym jak dotychczas źródłem danych nt. ukształtowania powierzchni na obszarze całego Svalbardu są analogowe mapy topograficzne w skali 1:100 000 wydane przez Norweski Instytut Polarny. NMT w postaci cyfrowej istnieje tylko dla kilku małych obszarów, a misja SRTM nie objęła swoim zakresem obszarów polarnych. Celem badań prezentowanych w niniejszej pracy była ocena dokładności NMT generowanego z obrazów satelitarnych ASTER oraz możliwości wykorzystania go do ortorektyfikacji danych satelitarnych.

2. DANE ŹRÓDŁOWE

2.1. ASTER

W badaniach wykorzystano obraz satelitarny ASTER poziomu L1B, z zastosowaną przez dystrybutora korekcją geometryczną i radiometryczną. Do wykonania NMT wykorzystano dwa kanały spektralne VNIR (3N, 3B) sceny stereoskopowej ASTER, wykonane z jednej orbity. Rozdzielczość terenowa zastosowanych kanałów wynosi 15 m. Dystrybutor obrazów szacuje błąd produktu DEM ASTER RMSxyz na 10–50 m (Algorithm Theoretical Basis Document for ASTER Digital Elevation Models, <http://asterweb.jpl.nasa.gov/>).

Pozyskany obraz zarejestrowany został w okresie letnim – 23 lipca 2005 roku. Jest to okres zaawansowanej ablacji (topnienia śniegu), co umożliwia najlepszą detekcję zmian powierzchniowych na lodowcach. Obszar sceny charakteryzuje się dużym urozmaiceniem. W jej obrębie znajdują się zarówno lodowce i obszary lądu charakteryzujące się niewielkim nachyleniem, jak i góry (do 1200 m), których strome, wysokie ściany powodują powstawanie głębokich cieni na zdjęciach po północno-wschodniej stronie stoków. Na dużej części sceny znajduje się też obszar morza.

2.2. NMT Foto

Ponieważ wykonanie profili kontrolnych czy pomiar punktów techniką GPS jest w rejonach polarnych przedsięwzięciem trudnym, jako dane referencyjne do oceny dokładności NMT ASTER wykorzystano NMT pozyskany w ramach wykonania ortofotomapy „Werenskioldbreen and surrounding area, Orthophotomap 1:25 000” (Jania *et al.*, 2002). Obszar sceny, dla którego istnieją dane wysokościowe wyniósł 152 km². NMT powstał na drodze obserwacji modeli stereoskopowych zdjęć lotniczych w skali 1:50 000 wykonanych w roku 1990. Dane wysokościowe pomierzono w regularnej siatce kwadratów o boku 20 m oraz uzupełniono o punkty i linie charakterystyczne w postaci grzbietów, cieków i linii nieciągłości (Kolondra, 2002). Błąd średni tego modelu ocenia się na 2 – 3 m

(inf. ustna Kolondra, 2007), co wystarcza na wykorzystanie go jako model referencyjny dla porównań z NMT ASTER o dokładności oczekiwanej 10–50 m.

Dużą część badanego obszaru stanowią lodowce Werenskioldbreen i Hansbreen, na których od wielu lat prowadzone są różnego typu badania glaciologiczne (Bukowska-Jania, Jania, 1988; Czajkowski, 1981; Dąbrowski, Lipert, 1984; Jania, 1986; Jania J., 1988; Kolondra L., 2002; Kostrzewski A, Zwoliński Z. 2003; Vieli *et al.*, 2002).

Należy podkreślić fakt, że zdjęcia lotnicze wykonane zostały 15 lat przed pozyskaniem sceny ASTER. Ma to znaczenie zwłaszcza dla obszarów pokrytych lodowcami, bowiem wysokość powierzchni lodowców ulega stałym zmianom. W czasie ostatniej dekady XX wieku stwierdzono obniżenie miąższości strefy ablacyjnej lodowca Werenskioldbreen o 9.5 m (Kostrzewski, Zwoliński, 2003). W latach 1989–2000 powierzchnia lodowca Hansbreen obniżała się średnio rocznie o 1.8 m w części ablacyjnej (Jania, 2006). Zakładając, że zmiany w ciągu 15 lat sięgnęły dwudziestu kilku metrów, jest to nadal wartość zamykająca się w oczekiwanej dokładności produktu NMT ASTER.

3. METODYKA BADAŃ

Orientację obu kanałów (nadirowego i wstecznego) oraz opracowanie NMT wykonano w oprogramowaniu PCI Geomatica (wersja 9.1). Analizy porównawcze polegały na odjęciu NMT Foto od NMT ASTER i przeprowadzone zostały w środowisku ArcMap. W celu zbadania wpływu ukształtowania terenu, charakterystyki spektralnej obrazu oraz gęstości siatki na dokładność generowanego NMT obszar badań został podzielony na 4 rodzaje pól testowych (Rys. 1).



Rys. 1. Obszar badań i granice pól testowych na tle zobrazowania ASTER

W ramach badań wydzielono obszary wód, obszary pokryte śniegiem, obszary łąd o niewielkim nachyleniu oraz obszary górskie.

3.1. Osnowa fotogrametryczna

Osnowę fotogrametryczną stanowiło 20 fotopunktów (*Ground Control Points*). 9 fotopunktów pochodziło z pomiarów norweskich (NPI Oslo, niepublikowane) i polskich (Zagrajski, Zawadzki, 1936). Punkty te nie pokrywały jednak obszaru całej sceny, dlatego zaistniała konieczność posłużenia się 11 punktami, których współrzędne pozyskano z map topograficznych 1:100 000. Dokładność współrzędnych tych punktów wynikająca ze skali mapy wynosi 33 m. W przypadku zobrazowań średniorozdzielczych, na obszarach na których nie występują zmiany antropogeniczne, dokładność aerotriangulacji była zdeterminowana także dokładnością identyfikacji szczegółów sytuacyjnych. Osnowa fotogrametryczna opierała się głównie na szczytach gór, dla których dokładność identyfikacji na obrazach ASTER oszacowano na 30 m (2 piksele).

Dodatkowo na obszarze testowym, na którym przeprowadzono ocenę NMT pomierzono 5 punktów kontrolnych. Analizę dokładności aerotriangulacji przedstawiono w Tab 1.

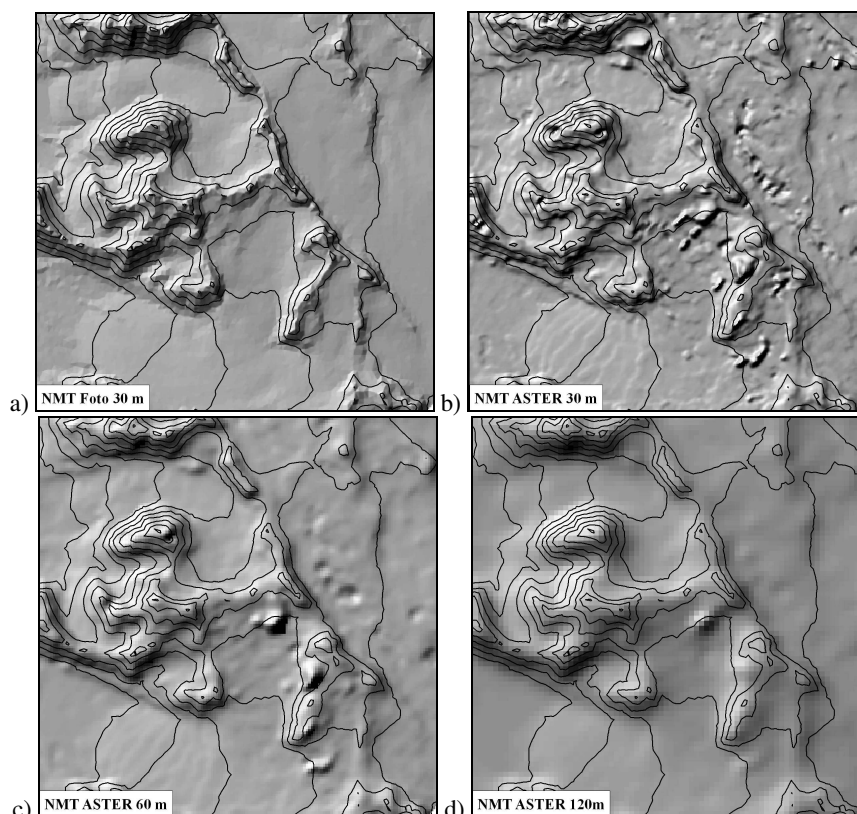
Tab 1. Zestawienie błędów średnich na fotopunktach i punktach kontrolnych (w nawiasach podano ilość punktów).

Scena	Błędy średnie na fotopunktach (20)			Błędy średnie na punktach kontrolnych (5)	
	rms _X [m]	rms _Y [m]	rms _Z [m]	rms _X [m]	rms _Y [m]
3N	20.9	20.0	-	24.4	51.7
3B	23.5	23.11	-	20.6	29.5
Stereo	21.9	21.3	32.4	-	-

Dokładność aerotriangulacji kształtuje się na poziomie 22 m w planimetrii oraz 32 m dla wysokości.

3.2. Pozyskanie NMT ASTER

Na podstawie elementów orientacji sceny ASTER przygotowano obrazy epipolarne wymagane w środowisku PCI Ortho Engine do opracowania numerycznego modelu terenu. Kolejnym etapem było wygenerowanie NMT z wykorzystaniem funkcji *Fill Holes And Filter*. W ramach przeprowadzonych badań wygenerowano NMT ASTER w trzech różnych rozdzielczościach 30, 60 i 120 metrów, które w celu przeprowadzenia oceny dokładności zostały przekonwertowane do formatu GRID ESRI. Wynikowe modele oraz NMT Foto pozyskany na podstawie zdjęć lotniczych przedstawiono na Rys. 2.



Rys. 2. NMT pozyskany ze zdjęć lotniczych (a) oraz NMT wygenerowany z obrazów stereoskopowych ASTER o wielkościach oczka 30 (b), 60 (c) i 120 m (d).

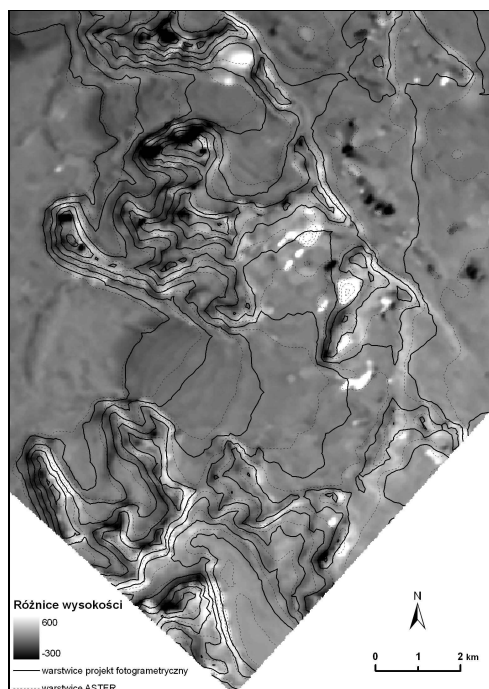
3.3. Analiza dokładności NMT wygenerowanych na podstawie panchromatycznych obrazów ASTER

Ocenę dokładności produktu NMT ASTER wykonano w oparciu o referencyjny NMT Foto. NMT Foto pozyskany ze zdjęć lotniczych został przekonwertowany do formatu TIN ESRI (metoda triangulacji Delaunay'a), a następnie utworzono GRID ESRI (z zastosowaniem interpolacji liniowej) o takich samych wielkościach oczka jak NMT ASTER (30, 60 i 120 m). Oba modele porównano ze sobą generując dla każdej z rozdzielczości obrazy różnic. Ocenę dokładności NMT ASTER przeprowadzono dla poszczególnych obszarów testowych oraz dla różnych wielkości oczka siatki. W tabeli oprócz wartości błędów średnich zestawiono także zakresy błędów tj. maksymalne różnice wysokości pomiędzy badanymi modelami (Tab 2). Uzyskane wartości ujemne pokazują o ile metrów NMT ASTER jest za nisko, a wartości dodatnie – o ile za wysoko w stosunku do referencyjnego NMT Foto.

Tab 2. Uzyskane wartości minimalne i maksymalne oraz dokładność NMT dla poszczególnych obszarów testowych [m].

Pole testowe	Pow [km ²]	NMT_ASTER_30			NMT_ASTER_60			NMT_ASTER_120		
		Błąd średni	Zakres błędów		Błąd średni	Zakres błędów		Błąd średni	Zakres błędów	
01 - lodowiec	76.2	± 33	-143	571	± 28	-97	396	± 23	-83	240
02 - obszar górzysty	48.3	± 48	-304	348	± 42	-262	277	± 48	-189	228
03 - obszar płaski	26.6	± 18	-81	120	± 16	-73	93	± 18	-82	121
04 - woda	0.9	± 19	-10	64	± 18	-3	64	± 19	1	66

Wynikową mapę różnic pomiędzy badanym i referencyjnym modelem terenu przedstawia Rys. 3.



Rys. 3. Mapa różnic wysokości pomiędzy NMT ASTER (30m) i NMT Foto (30m); kolory jasne reprezentują obszary, na których wartości NMT ASTER są za wysokie, ciemne – za niskie. Warstwice o cięciu 100 m; ciągłe - warstwice pozyskane fotogrametrycznie (1990 r), przerywane – z NMT ASTER (2005 r).

Wykonane w ramach badań produkty NMT ASTER 60m i NMT ASTER 120m charakteryzowały się podobnymi wartościami średniego błędu kwadratowego jak NMT ASTER 30m, ale mniejszym zakresem błędów maksymalnych. Największe różnice wysokości pomiędzy modelami pojawiły się na obszarach o charakterze górzystym i na obszarach pokrytych śniegiem. Północne stoki są na obrazach ASTER silnie zniekształcone (skrócone, a nawet ukryte), co jest spowodowane faktem, że kanał 3B jest skierowany wstecz pod kątem aż 27.6° (*back-looking*). Wg Kääb (2005) błędy NMT w takich miejscach mogą sięgać nawet 600 m. Odnotowany duży zakres błędów NMT na obszarach pokrytych śniegiem wynika z tego, że obraz powierzchni lodowca pozbawiony jest wyraźnych szczegółów. Obraz taki jest trudny w jednoznacznej identyfikacji, co utrudnia korelację obrazów, a NMT może być obciążony dużym błędem (Kolondra, 2002). Podobny błąd, trudności w korelacji obrazów - występuje na obszarach wody.

Testy przeprowadzone przez Kääb'a (2005) wykazały, że rozdzielczość oczka większa niż 30 m (2 piksele) znacznie poprawia dokładność NMT ASTER, eliminując błędy grube, jednak gubiąc szczegóły terenu. Można to zaobserwować na Rys. 2. NMT ASTER 60m jest bardziej zbliżony do NMT Foto pomimo, że charakteryzuje się mniejszą szczegółowością od NMT ASTER 30m. Błędy spowodowane brakiem korelacji obrazów zostały na NMT ASTER 60m „rozmyte”, co widać zwłaszcza na płaskich powierzchniach lodowców.

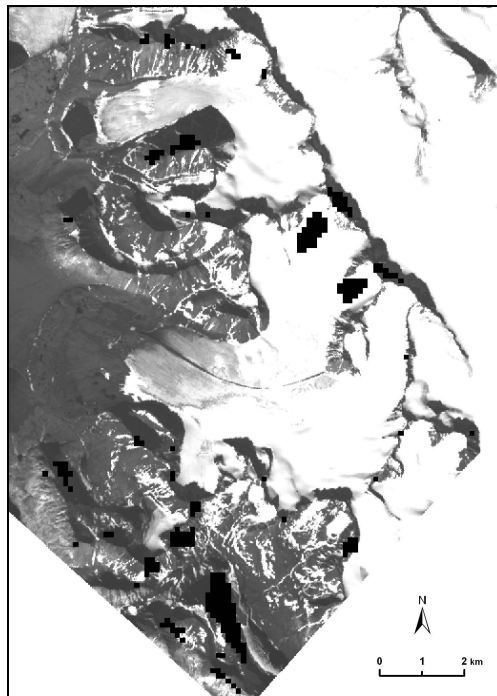
Cel przeprowadzonych analiz stanowiła ocena możliwości wykorzystania NMT ASTER do generowania ortofotomapy, która miałaby być źródłem badań zmian powierzchniowych lodowców. W tym celu wykonano analizę rozkładu błędów grubych na badanym obszarze. Błąd wysokości rzędu 500 m (przy odchyleniu skanera od nadiru do 8.5°) powoduje wygenerowanie podczas ortorektifikacji błędu w płaszczyźnie poziomej około 70m, a błąd wysokości 95 m – 14 metrów (Kääb *et al.*, 2003). W badaniach przyjęto więc, że NMT o błędzie mniejszym niż 100 m może być wykorzystany do ortorektifikacji, ponieważ generuje on błąd wielkości około jednego piksela (15 m), co jest wartością błędu samej fotointerpretacji. W Tab 3 przedstawiono wielkość procentową obszarów występowania błędów grubych (błędów większych od 100 m) na poszczególnych polach testowych, a Rys. 4 przedstawia miejsca ich występowania dla NMT ASTER 120m.

Tab 3. Wielkość procentowa obszarów występowania błędów większych od 100 m.

Błąd NMT > 100m [%]	NMT_ASTER_30	NMT_ASTER_60	NMT_ASTER_120
01 - lodowiec	2.5	2	1.5
02 - obszar górzysty	9.5	6	6
03 - obszar płaski	0	0	0
04 - woda	0	0	0

Największy udział procentowy błędów grubych wystąpił na obszarach górzystych. Większość tych miejsc stanowiły obszary zacienione. Wysokie błędy na stromych zboczach o północnej ekspozycji oraz w miejscach zacienionych występują we wszystkich NMT niezależnie od jego rozdzielczości. Natomiast wysokie błędy wysokości na

lodowcach wystąpiły tylko w kilku miejscach. Odsetek tych obszarów na NMT o rozdzielczości 60 i 120 m jest właściwie znikomy. Po wykonaniu wstępnych analiz (wizualizacja 3D, wygenerowanie warstw) można takie błędy na obszarach stosunkowo płaskich lodowców łatwo znaleźć, a NMT poddać korekcji i wykorzystać go do opracowania ortofotomapy. Ponieważ produktem końcowym ma być informacja dotycząca lodowców, można natomiast zrezygnować z korekcji NMT na obszarach górskich.



Rys. 4. Obszary występowania błędów grubych dla NMT ASTER 120 m

4. WNIOSKI

Z przeprowadzonych badań wynika, że generowanie poprawnego NMT z obrazów satelitarnych ASTER w rejonach polarnych stanowi pewną trudność. Na obszarach tych, z uwagi na brak wyraźnych szczegółów sytuacyjnych występują problemy w jednoznacznej identyfikacji fotopunktów. Ponadto fragmenty wygenerowanego NMT obarczone są wysokimi błędami, z uwagi na słabą korelację na obszarach pokrytych śniegiem oraz na zacienionych stromych zboczach gór. NMT o rozdzielczości 60 i 120 m charakteryzowały się najniższymi wartościami błędów maksymalnych i najmniejszymi obszarami występowania błędów grubych. Z braku innych danych wysokościowych można taki NMT poddać korekcji na obszarach pokrytych śniegiem i wykorzystać go do ortorektifikacji obrazu oraz oceny dynamicznej kondycji lodowców.

5. LITERATURA

- Algorithm Theoretical Basis Document for ASTER Digital Elevation Models, <http://asterweb.jpl.nasa.gov/>
- Błaszczczyk M., Drzewiecki W., 2006. Wstępna ocena możliwości wykorzystania obrazów Satelitarnych ASTER w monitorowaniu lodowców Svalbardu. *Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji*, Vol. 16, s. 29-39.
- Bukowska-Jania E., Jania, J., 1988. Zmiany geometrii czołowej części lodowca Werenskiöld (Spitsbergen) w latach 1957 -1973 - 1982 - 1983. w *Wyprawy Polarne Uniwersytetu Śląskiego*, Uniwersytet Śląski, Katowice, s. 64-91.
- Czajkowski R., 1981. Radarowe pomiary miąższości Lodowca Werenskiölda. w: Jahn A., Pulina M., Jania J., VII Sympozjum Polarne, Sosnowiec, s. 63-68.
- Dąbrowski S., Lipert C., 1984. Dynamika lodowca Hansa (Spitsbergen Zachodni) w latach 1936-1980, *Prace Instytutu Geodezji i Kartografii*, 31(1), s. 71-80.
- Haeberli W., 1998. Historical evolution and operational aspects of worldwide glacier monitoring. *Studies and reports in hydrology, UNESCO*, Paris, 56, s. 35-51.
- Jania J., 1986. Dynamika czoł spitsbergeńskich lodowców uchodzących do morza. *Prace Naukowe Uniwersytetu Śląskiego*, nr 800, T. 9, Katowice, s. 78-100.
- Jania J., 1988. *Dynamiczne procesy glacialne na południowym Spitsbergenie*. Prace Naukowe Uniwersytetu Śląskiego w Katowicach, nr 995, Katowice, ss. 258.
- Jania J., 2006. Charakter i skala zmian pokrywy zlodowacenia w Arktyce. w: Styszyńska A., Marsz A. A., „Zmiany klimatyczne w Arktyce i Antarktyce w ostatnim pięćdziesięcioleciu XX wieku i ich implikacje środowiskowe”, Akademia Morska w Gdyni, s. 77-91.
- Jania J., Kolondra L. Aas H.F., 2002. *Werenskiöldbreen and surrounding area, Orthophotomap 1:25 000*. Wydział Nauk o Ziemi, Uniwersytet Śląski, Sosnowiec i Norsk Polarinstittut, Tromsø.
- Kääb A., 2005. *Remote Sensing of Mountain Glaciers and Permafrost Creep*. Geographisches Institut der Universität Zürich, ss. 266.
- Kääb A., Huggel C., Paul F., Wessels R., Raup B., Kieffer H., Kargel J., 2003. Glacier monitoring from ASTER imagery: Accuracy and applications. *EARSel eProceedings*, 2, s. 43-53.
- Kolondra L., 2002. Problemy fotogrametrycznego pozyskiwania danych w badaniach glaciologicznych - studium metodyczne na przykładzie Spitsbergenu. Rozprawa doktorska, Uniwersytet Śląski, Wydział Nauk o Ziemi, Sosnowiec, 2002, ss. 166 + 3 mapy.
- Kostrzewski A., Zwoliński Z., 2003. *Funkcjonowanie dawnych i współczesnych geosystemów Spitsbergenu*. Stowarzyszenie Geomorfologów Polskich. Poznań – Longyearbyen, ss. 190.
- Vieli A., Jania J., Kolondra L., 2002. The retreat of a tidewater glacier: observations and model calculations on Hansbreen, Spitsbergen. *Journal of Glaciology*, 48(163), ss. 592-600.
- Zagrajski, S., Zawadzki, A., 1936. *Polska wyprawa na Spitsbergen 1934 - Prace geodezyjne i kartograficzne*. Biblioteka Służby Topograficznej, T.16, Wojskowy Instytut Geograficzny, Warszawa, ss.102 + 2 mapy.

**EVALUATION OF ACCURACY OF ASTER DEM GENERATION IN SVALBARD
REGION WITH THE USE OF PCI GEOMATICA**

KEY WORDS: DEM, ASTER, glaciers, Svalbard, PCI Geomatica.

SUMMARY: Evaluation of accuracy of ASTER DEM generation in polar regions and its applicability to ortho-rectification was investigated. In the first phase of the research, ASTER DEMs of three various resolution values (30, 60 and 120 m) were generated. In order to assess the influence of area type on the DEM accuracy, the research territory was divided into four test areas: water, glaciers, lands with small slope and mountainous regions. ASTER DEM accuracy was evaluated on the basis of Photo DEM made from aerial photos scaled 1:50 000. Both products were compared by generating differential images for every resolution. In the research, an assumption was made that ASTER DEM with an error below 100 m can be used for ortho-rectification, as maximum height error of 95 m translates into a horizontal displacement of approximately 14 m (accuracy of about 1 pixel). In the case of waters and flat lands, there was any error larger than 100 m. Gross errors occurred within 9.5 % of mountainous areas for ASTER DEM 30m and 6 % for ASTER DEM 60m and 120m. However, the percentage of gross errors for glaciers amounted to 2.5 % for ASTER DEM 30m and just 1.5 % for ASTER DEM 120m.

Mgr. inż. Małgorzata Błaszczyk
e-mail: mblaszczyk@wodgik.katowice.pl
telefon: +032 2091966