

**METODYKA GENEROWANIA NUMERYCZNEGO MODELU TERENU  
NA PODSTAWIE ROSYJSKICH STEREOSKOPOWYCH  
ZOBRAZWAŃ TK-350**

**METHODOLOGY OF GENERATION OF DEM  
FROM RUSSIAN TK-350 STEREO IMAGES**

**Ireneusz Ewiak**

Zakład Fotogrametrii, Instytut Geodezji i Kartografii w Warszawie

**SŁOWA KLUCZOWE:** fotogrametria cyfrowa, rosyjskie zdjęcia satelitarne, korekcja geometryczna, korelacja obrazów, numeryczny model terenu, analiza dokładności.

**STRESZCZENIE:** W artykule opisano metodykę generowania numerycznego modelu terenu (NMT) na podstawie rosyjskich obrazów stereoskopowych TK-350. Do badań wykorzystano panchromatyczną scenę stereoskopową TK-350 o pokryciu podłużnym 60 %, pozyskaną w październiku 2000 roku, w ramach jednej z ostatnich misji systemu Comet. Scena pokrywała swym zasięgiem obszar południowo-wschodniej Polski, w granicach, którego, znalazły się tereny o różnorodnych formach ukształtowania. Do opracowania danych źródłowych TK-350 wykorzystano oprogramowanie Z-Space będące modułem funkcyjnym systemu fotogrametrycznego Ortho/Z-Space, przeznaczonego głównie dla tego rodzaju danych. Stwierdzono, że wykorzystanie pełnego zestawu precyzyjnych danych orbitalnych do wyznaczenia elementów orientacji zewnętrznej zdjęć TK-350 zapewnia dokładność wyznaczenia tych elementów na poziomie 1/3 piksela obrazu źródłowego. Stwierdzono również, że technika pomiaru korelacyjnego odniesiona do cyfrowych obrazów TK-350 pozwala wygenerować NMT z dokładnością  $m_H = 3.2$  m dla terenów równinnych i falistych oraz 3.9 m dla terenów pagórkowatych i górzystych. Wykazano, że niedostosowanie parametrów programowych pomiaru korelacyjnego NMT na obrazach TK-350 jest główną przyczyną spadku jego dokładności. Stwierdzono, że pomiary wysokościowe realizowane techniką korelacji obrazów na bazie danych TK-350 stanowią doskonały materiał źródłowy do generowania warstwic na mapach topograficznych w skalach od 1:25 000 do 1:20 000, w zależności od charakteru ukształtowania rzeźby terenu.

## **1. WSTĘP**

Archiwum rosyjskich zdjęć satelitarnych obejmuje dane pozyskiwane od przeszło 20 lat. Dotyczy to również stereoskopowych danych obrazowych o rozdzielczości GSD = 10 m rejestrowanych od 1981 roku z pułapu satelitarnego kamerą TK-350. W ciągu tak długiego okresu czasu obrazy z kamery TK-350 były udostępniane wyłącznie rosyjskim federalnym biurom geodezyjnym, których zadaniem była aktualizacja map topograficznych w skali 1:25 000 oraz skalach mniejszych. W 1991 roku obrazy TK-350 stały się dostępne dla szerokiego kręgu użytkowników za sprawą złagodzenia restrykcji Stanów

Zjednoczonych na dystrybucję amerykańskich obrazów satelitarnych o rozdzielczości do 10 m.

System obrazowania satelitarnego TK-350, postrzegany dotychczas jako ważny czynnik służący budowie globalnego archiwum danych fotogrametrycznych, ze względów poza ekonomicznych, nie spotkał się z większym zainteresowaniem w naszym kraju. W Instytucie Geodezji i Kartografii realizowany jest projekt badawczy finansowany ze środków Ministerstwa Nauki i Informatyzacji, którego jednym z zadań jest określenie przydatności tych zobrazowań do generowania produktów fotogrametrycznych mogących zasilić topograficzną bazę danych. Uzasadnieniem dla realizacji tego zadania jest brak wyczerpujących informacji dotyczących dokładności opracowań fotogrametrycznych danych stereoskopowych TK-350, a w szczególności opracowania NMT.

Wyniki publikowane w literaturze zagranicznej, które w rozpatrywanym aspekcie badań dyskwalifikują obrazy stereoskopowe TK-350, odnoszą się głównie do metod pomiarowych stosowanych w fotogrametrii analitycznej oraz analiz dokładności bazujących na niewłaściwie dobranych danych referencyjnych. Niniejsza publikacja prezentuje rzeczywisty potencjał badanych obrazów zweryfikowany poprzez wykorzystanie najnowszych rozwiązań technologicznych fotogrametrii cyfrowej.

## **2. ROSYJSKI SYSTEM OBRAZOWANIA SATELITARNEGO COMET**

### **2.1. Parametry techniczne systemu**

Comet to nazwa rosyjskiego programu strategicznego, realizowanego od 1981 roku, którego zadaniem było kompleksowe badanie powierzchni terenu w skali globalnej, poprzez realizację wysoce precyzyjnych pomiarów topograficznych. Starty raket nośnych Soyuz z kamerami realizującymi misję Comet miały miejsce w kosmodromie Baikonur w Kazachstanie, a ich częstotliwość wynosiła od 1 do 2 w ciągu roku. Krótkie misje statku kosmicznego, który pozostawał na orbicie od 40 do 45 dni, wyróżniały względnie kołowe orbity o inklinacji od  $65^\circ$  do  $70^\circ$  oraz wysokości od 195 km do 280 km. Ostatni statek kosmiczny serii Comet został wystrzelony 29 września 2000 roku i zapisany w nomenklaturze lotów jako Cosmos 2373. Ostatnia misja Comet jest 20 misją podporządkowaną realizacji programu mapowania Ziemi i zyskała miano cywilno-wojskowej misji geodezyjnej. Podczas każdego cyklu fotograficznego, urządzenia pokładowe obejmujące dwie kamery pozycjonowane według gwiazd, altimetr laserowy, sensory nawigacyjne oraz przyrządy synchronizujące, służą do wyznaczenia elementów orientacji zewnętrznej kamer.

Zadaniem kamer fotograficznych jest dostarczenie obrazów gwiazd na moment czasowy wyzwolenia migawki kamery pomiarowej. Wysokościomierz laserowy służy do pomiaru wysokości orbity z dokładnością 2 m. Tak wysoka dokładność jest uzyskiwana dzięki niewielkiemu rozproszeniu wiązki lasera (około 20 m w terenie) oraz precyzyjnej rejestracji momentu odbicia wiązki. Pokładowe wyposażenie dopplerowskie jest wykorzystywane do pomiaru prędkości radialnej statku kosmicznego, zaś system synchronizacji zapewnia prawidłową współpracę wszystkich urządzeń rejestrujących.

Pomiar prędkości radialnej statku kosmicznego, wysokości lotu oraz czasu synchronizacji pozwala zdefiniować elementy liniowe orientacji zewnętrznej kamer pomiarowych.

## 2.2. Cechy pomiarowe kamery TK-350

Elementem składowym rosyjskiego kosmicznego systemu obrazowania Comet jest kamera TK-350 rejestrująca obrazy na filmie fotograficznym. Kamera TK-350 pozwala wykonywać zobrażenia stereoskopowe terenu, w pasie o szerokości 200 km oraz długości do 2 000 km, z orbity o wysokości 220 km.

Przy opracowaniu zobrażeń stereoskopowych TK-350 dokładność wyznaczenia pozycji przestrzennej punktów zależy głównie od stosunku bazy fotografowania (B) do wysokości orbity (H). Ponieważ z technicznego punktu widzenia nie jest możliwe pozyskiwanie obrazów z wysokości mniejszej niż 200 km, terenowy zasięg formatu ramki obrazu można zwiększyć jedynie poprzez zwiększenie stosunku B/H. Zależność tą uwzględniono przy projektowaniu systemu kamery TK-350, dla której wybrano prostokątny format ramki 30×45 cm, co odpowiada w terenie obszarowi o wymiarach 200×300 km. W tak zdefiniowanych pasach, rozciągających się w kierunku orbitalnym, realizowane jest stereoskopowe pokrycie podłużne wynoszące 60 % lub 80 %, przy pokryciu sąsiednich pasów od 10 % do 30 %. Dysponując zdjęciami o maksymalnym pokryciu podłużnym 80 % można opracowywać modele przestrzenne z pokryciem stereoskopowym 20 %, 40 %, 60 % lub 80 %, co pozwala na zwiększenie dokładności stereoskopowego pomiaru wysokości. Dla pokrycia stereoskopowego zdjęć TK-350 wynoszącego 20 %, 40 %, 60 % oraz 80 % stosunek B/H wynosi odpowiednio 1.04, 0.77, 0.52, 0.26.

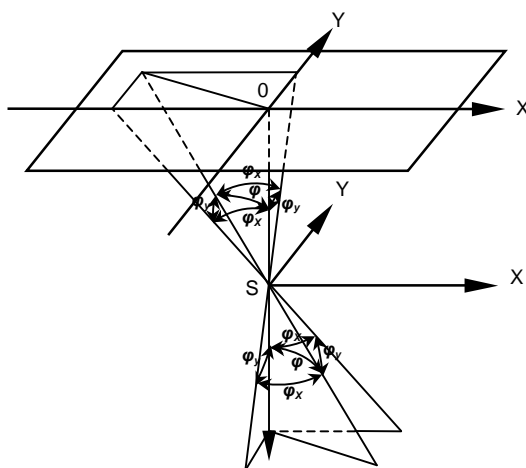
Obrazy pozyskane kamerą TK-350 posiadają zdolność rozdzielczą  $GSD = 10$  m, co odpowiada skali 1:660 000 oraz ogniskowej 350.7 mm. Standardowo kamera TK-350 rejestruje na filmie obraz w kanale panchromatycznym ( $0.58 \div 0.72 \mu\text{m}$ ). Załadowany w ładowniku kamery film pozwala w czasie jednej misji zobrazić obszar o powierzchni 10.5 mln km<sup>2</sup>. Pozyskany materiał fotograficzny przetwarzany jest na postać cyfrową w procesie skanowania z aperturą około 15μm i zapisywany cyfrowo z rozdzielczością 8 bitów/piksel.

Każda nierówność filmu występująca podczas ekspozycji jest eliminowana poprzez docisk do niego płyty szklanej. Proces ten wymaga użycia właściwego nacisku wypłaszczającego film. Metoda dociskowa ogranicza deformacje filmu do  $1.5 \div 2.0 \mu\text{m}$ . Wzdłuż pola kalibracyjnego ramki kamery w odstępach 10 mm rozlokowanych jest 1305 znaczków kalibracyjnych.

W celu skompensowania wzdłużnego przesunięcia obrazu płyta szklana razem z dociskany filmem przesuwa się z pewną prędkością w kierunku lotu satelity. Prędkość kompensacyjnego przesunięcia jest dobrana tak, aby umożliwić przedłużenie czasu ekspozycji dla niskiej czułości i dużej rozdzielczości filmu. Do utrzymania niezmiennych elementów orientacji wewnętrznej kamery, w każdym punkcie płyty dociskowej, w chwili całkowitego otwarcia przysłony obiektywu, rejestrowane są cztery nieruchome znaczniki tłowe. Współrzędne znaczków tłowych są wyznaczone z błędem średnim  $2.0 \div 3.5 \mu\text{m}$ , co pozwala na określenie stopnia deformacji filmu z bardzo wysoką dokładnością.

### 3. KALIBRACJA KAMERY TK-350

Kalibracja kamery TK-350, która polega na wyznaczeniu jej elementów orientacji wewnętrznej oraz dystorsji obiektywu, jest wykonywana z użyciem wysokiej precyzji komparatora przestrzennego z elektro-optycznym systemem obserwacji. Komparator ten pozwala na pomiar kątów przestrzennych  $\varphi_x$  oraz  $\varphi_y$  dla każdej lokalizacji znacznika tłowego na płycie dociskowej kamery, jako kątów nachylenia odpowiednich płaszczyzn składowych wiązek projekcyjnych (rys. 1). Kąty  $\varphi_x$  oraz  $\varphi_y$  muszą mieć wspólny początek, wyznaczony przez kierunek do punktu głównego kamery. Krawędzie tych kątów dwuściennych muszą być wzajemnie prostopadłe. Warunki te zapewniają realizację układu współrzędnych prostokątnych. Schemat ideowy komparatora przedstawia rysunek 1.



Rys. 1. Schemat pomiaru kątów przestrzennych  $\varphi_x$  oraz  $\varphi_y$ .

Układ pomiarowy komparatora obraca się wokół dwóch prostopadłych osi. Osie tego układu przechodzą przez punkt przecięcia osi obrotu. W rzucie środkowym znaczniki kalibracyjne podlegają transformacji, zaś zarejestrowane kąty obrotu dotyczą wyłącznie obrotu wokół osi poziomej. Przy właściwych wartościach nastawień kątów  $\varphi_x$  wartości nastawień kątów  $\varphi_y$  mogą być pomierzone za pośrednictwem precyzyjnej rotacji kamery o  $90^\circ$ . Moduł pomiarowy komparatora posiada układ optyczny oraz fotoelektroniczny. Urządzenie fotoelektroniczne zapewnia obserwacje znaczków kalibracyjnych w trybie dynamicznym z wysoką precyzją. Czułość spektralna układu fotoelektronicznego odpowiada czułości spektralnej izopanchromatycznego filmu z jasnym filtrem OS-14, którego zadaniem jest wyeliminowanie wpływu aberacji chromatycznej. Na podstawie pomiarów w układzie współrzędnych komparatora ( $x_k$ ,  $y_k$ ) do obliczenia wartości składowych dystorsji ( $\delta_x$ ,  $\delta_y$ ) wykorzystuje się poniższe zależności:

$$\delta_x = x_k - f \operatorname{tg} \varphi_x + x_0 \operatorname{tg}^2 \varphi_x \quad (1)$$

$$\delta_y = y_k - f \operatorname{tg} \varphi_y + y_0 \operatorname{tg}^2 \varphi_y \quad (2)$$

Ostateczne wartości dystorsji, odległości obrazowej kamery  $f$  oraz współrzędnych punktu głównego ( $x_0$ ,  $y_0$ ) liczone są metodą najmniejszych kwadratów.

W kamerze TK-350, podczas trwania misji satelitarnej, kalibrowane jest również szkło iluminacyjne. Dodatkowo w czasie lotu mierzone są i kontrolowane temperatura oraz ciśnienie gazu wewnątrz statku kosmicznego. Po uwzględnieniu wartości dopuszczalnej wpływu źródła światła oraz wewnętrznej refrakcji, uzyskuje się wymagane korekcje dla ogniskowej kamery. Właściwe wykonanie kalibracji oraz pomiary orbitalne redukują deformacje filmu do poziomu  $4\div 5 \mu\text{m}$ .

#### **4. BADANIA TESTOWE**

##### **4.1. Zakres opracowania**

Badania testowe zdjęć TK-350 miały na celu określenie ich przydatności do generowania produktów w procesie stereoskopowych wysokościowych pomiarów fotogrametrycznych, w tym numerycznego modelu terenu (NMT). Do badań wykorzystano stereoskopową parę zdjęć TK-350 pozyskaną 20 października 2000 roku przy 60 % pokryciu podłużnym oraz stosunku bazowym  $B/H = 0.52$ . Zdjęcia wykonane były z wysokości 211 km w skali 1:610 000 i pokrywały obszar pola testowego o powierzchni  $2\,500 \text{ km}^2$ , którego centrum znajdowało się w rejonie Rzeszowa. W granicach pola testowego znajdowały się tereny reprezentujące różne formy geomorfologiczne o wysokości od 150 m do 650 m n.p.m. Do badań testowych wykorzystano pełną informację obrazową pary stereoskopowej TK-350, która jest niezbędna w procesie orientacji wewnętrznej zdjęć. Obrazy dostarczone przez rosyjskiego dystrybutora posiadały metadane zawierające ich wstępną orientację zewnętrzną, wyznaczoną na podstawie pomiarów orbitalnych oraz pozycji gwiazd. W celu korekcji elementów orientacji zewnętrznej zaprojektowano 30 punktów terenowej osnowy fotogrametrycznej, rozmieszczonych regularnie w granicach opracowania sceny, z których część pełniła rolę fotopunktów, a część punktów kontrolnych. Punkty osnowy stanowiły wyłącznie kontrastowe elementy liniowe, których dokładność identyfikacji i pomiaru nie mogła być gorsza niż  $\delta_{XY} = 4.5 \text{ m}$ .

##### **4.2. Korekcja geometryczna obrazów TK-350**

Obrazy cyfrowe zdjęć TK-350 uzyskano w procesie skanowania oryginałów aperturą  $10 \mu\text{m}$  na precyzyjnym skanerze EscoScan 3648. Lokalne deformacje obrazu wyznaczono na podstawie pomiaru współrzędnych 1 200 znaczków kalibracyjnych oraz porównania ich ze współrzędnymi katalogowymi dołączonymi do metryki kalibracji kamery. Transformację afiniczną współrzędnych obrazowych do układu tłowego wykonano z dokładnością  $5.5 \mu\text{m}$ . Pomiary współrzędnych obrazowych wykonano w programie OrthoSpace, wykorzystując automatyczną detekcję znaczków kalibracyjnych.

Orientację wzajemną obrazów TK-350 wykonano w procesie automatycznego pomiaru korelacyjnego. Błędy średnie obliczone na podstawie poprawek do współrzędnych tłowych wynosiły  $m_x = m_y = 4.7 \mu\text{m}$ .

Elementy orientacji zewnętrznej obrazów wyznaczono w dwóch wariantach, z których pierwszy wykorzystywał właściwości geometrii rzutu środkowego, drugi zaś właściwości dynamicznego rzutu panoramicznego dla projekcji obrazu. W obu wariantach pomierzono

wstępnie 20 fotopunktów oraz 10 punktów kontrolnych zmieniając kolejno ich proporcje. Pomiary punktów osnowy fotogrametrycznej wykonano metodą manualną wykorzystując narzędzia programu OrthoSpace. Miarą oceny dokładności orientacji zewnętrznej obrazów TK-350 były błędy średnie wyznaczenia współrzędnych punktów kontrolnych, których wartości dla poszczególnych wariantów zestawiono w tabeli 1. W programie OrthoSpace model matematyczny rozwiązania zadania orientacji zewnętrznej bazował na równaniach kolinearności i realizowany był w układzie współrzędnych płaskich PUWG1942.

Tabela 1. Charakterystyka dokładności orientacji zewnętrznej obrazów TK-350 dla różnych wariantów ich projekcji

Liczba fotopunktów	Liczba punktów kontrolnych	Błąd średni wyznaczenia współrzędnych punktów kontrolnych [m]					
		Geometria rzutu środkowego			Geometria rzutu panoramicznego		
		$m_x$	$m_y$	$m_z$	$m_x$	$m_y$	$m_z$
20	10	4.3	4.6	3.9	3.3	3.5	3.6
15	15	4.4	4.7	3.8	3.4	3.5	3.8
12	18	4.6	4.7	4.0	3.6	3.6	3.9
10	20	6.2	5.9	5.2	3.9	4.3	4.0
8	22	7.6	6.2	7.3	6.2	6.7	7.8
5	25	9.6	9.2	10.4	10.2	10.4	11.3

#### 4.3. Metodyka generowania numerycznego modelu terenu (NMT)

Wykorzystując parametry orientacji zewnętrznej pary stereoskopowej zdjęć TK-350 wygenerowano zbiór punktów wysokościowych NMT w siatce o gęstości 25 m. Pomiar przeprowadzono metodą korelacji obrazów cyfrowych w środowisku oprogramowania Z-Space, z wydajnością 150 punktów na sekundę. Parametry korelacji obrazów programu Z-Space dostosowane zostały do lokalnych form ukształtowania terenu i zdefiniowane w oparciu o pomiary w zaprojektowanych poligonach testowych. Pomiar punktów homologicznych modelu przeprowadzono na oryginalnych obrazach TK-350 z dokładnością poniżej 1/3 piksela obrazu źródłowego. Zasadnicze pomiary korelacyjne wykonano na obrazach epipolarnych.

Instytut Geodezji i Kartografii nie dysponuje systemem obserwacji stereoskopowej zdjęć TK-350, dlatego też, edycja pomierzonych punktów NMT bazowała wyłącznie na metodach automatycznych. Do filtracji błędów grubych pomiaru NMT wykorzystano program autorski (Ewiak, 1999). Do automatycznej korekcji pomiarów NMT wykorzystano narzędzia programu Z-Space, archiwalne ortoobrazy zdjęć lotniczych oraz ortoobraz wysokorozdzielczej panchromatycznej sceny satelitarnej Ikonos. Przetestowano 6 metod korekcji autokorelacyjnego pomiarów NMT, wykorzystujących różne algorytmy filtracji ortoobrazów.

Miarą oceny dokładności wygenerowanego NMT były błędy średnie liczone na podstawie różnic wysokości punktów profili terenowych z odpowiadającymi im punktami modelu. Profile terenowe pomierzono techniką GPS z zastosowaniem kinematycznej metody pomiaru. Dokładność wyznaczenia punktu w tak pomierzonym profilu wynosiła  $m_{XY} = 10$  cm, oraz  $m_z = 5$  cm. Łącznie pomierzono ponad 2 000 punktów w 21 profilach. W grupie reprezentującej teren o nachyleniu do 2° znalazło się 7 profili, pozostałe zaś

profile reprezentowały teren o nachyleniu powyżej 2°. Wyniki analizy dokładności korelacyjnych pomiarów wysokości na modelu stereoskopowym TK-350 zestawiono w tabeli 2. Wyniki te odniesiono do grup profili reprezentujących tereny o różnym spadku. Analizę wykonano za pomocą modułów programu MGE Terrain Analyst dla różnych etapów edycji NMT.

Tabela 2. Ocena dokładności pomiaru NMT metodą korelacji obrazów TK-350 dla terenów charakteryzujących się różnym spadkiem

Liczba punktów profili	Odchylenie standardowe [m]			Błąd średni pomiaru NMT [m]		
	Bez eliminacji błędów	Po eliminacji błędów grubych	Po eliminacji błędów systematycznych	Bez eliminacji błędów	Po eliminacji błędów grubych	Po eliminacji błędów systematycznych
671	4.2	3.1	3.1	4.7	3.5	3.2
1388	3.9	3.2	3.2	8.3	8.1	3.9

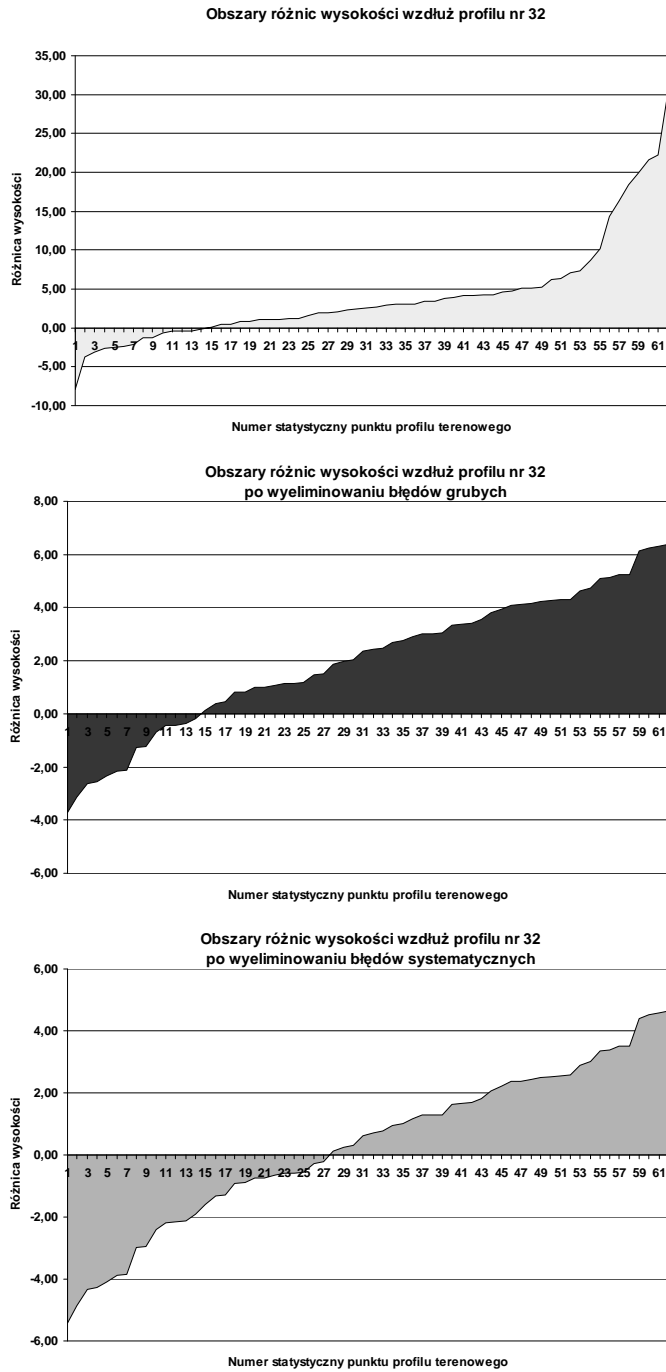
## 5. ANALIZA METODYKI OPRACOWANIA DANYCH TK-350

Dokładność wyznaczenia elementów orientacji zewnętrznej zdjęć TK-350 w oparciu o geometrię rzutu środkowego charakteryzowały błędy średnie na poziomie  $m_x = 4.6$  m,  $m_y = 4.7$  m,  $m_z = 4.0$  m przy włączeniu do rozwiązania zadania orientacji pomiarów współrzędnych 12 fotopunktów. Liczba 12 fotopunktów stanowiła wartość progową, poniżej której zauważany był wyraźny spadek dokładności wyznaczenia elementów orientacji zewnętrznej zdjęć. Zwiększenie liczby fotopunktów do 20 nie wpłynęło zasadniczo na wyniki orientacji scen.

Dla obrazów TK-350, których elementy orientacji zewnętrznej wyznaczone były w oparciu o właściwości geometrii rzutu panoramicznego, dokładność tego wyznaczenia opisywały wartości błędów  $m_x = 3.9$  m,  $m_y = 4.3$  m,  $m_z = 4.0$  m, uzyskane przy pomiarze 10 fotopunktów. Zmniejszenie liczby fotopunktów spowodowało skokowy spadek dokładności orientacji zewnętrznej obrazów TK-350. Przy jednakowej liczbie fotopunktów włączonych do rozwiązania zadania orientacji zewnętrznej zdjęć TK-350 właściwym wydaje się wykorzystanie geometrii rzutu panoramicznego. Wyniki prezentowane w tabeli 1 są zdecydowanie lepsze od wyników publikowanych w literaturze zagranicznej (Buyuksali *et al.*, 2000). Przyczyn tego należy upatrywać w konfiguracji danych źródłowych oraz metodach ich opracowania.

W zależności od stopnia nachylenia terenu wartość przeciętna błędu średniego pomiaru wysokości punktów NMT wynosiła od  $m_H = 4.7$  m do  $m_H = 8.4$  m. Dla obszarów o nachyleniu terenu do 2° maksymalna wartość błędu średniego wynosiła  $m_H = 5.0$  m, zaś minimalna  $m_H = 2.7$  m. Dla terenów o nachyleniu powyżej 2° wartości te wynosiły odpowiednio  $m_H = 11.6$  m oraz  $m_H = 4.7$  m.

Przytoczone wartości uwzględniają również, występujące w zbiorze NMT, punkty wysokościowe skorelowane nad powierzchnią terenu. Po zastosowaniu algorytmu filtracji



Rys. 2. Wpływ błędów grubych i systematycznych na wyniki pomiaru NMT



pomiarów odstających przeciętne wartości błędów średnich zmniejszyły się do poziomu  $m_H = 3.5$  m dla terenów równinnych oraz  $m_H = 8.1$  m dla terenów pagórkowatych i górzystych. Za pomocą narzędzi programu Z-Space, automatycznie wykrywających i korygujących błędy pomiaru korelacyjnego NMT, określono wartość składowej systematycznej tego błędu. Do automatycznej detekcji błędów pomiaru NMT wykorzystano ortoobrazy o rozdzielczości 1 m, wygenerowane ze zdjęć lotniczych oraz panchromatycznych scen Ikonos, które poddawano procesom filtracji w przestrzeni spektralnej i częstotliwościowej. Rozkład różnic wysokości pomiędzy interpolowanymi punktami NMT oraz punktami profilu referencyjnego w poszczególnych etapach edycji pomiarów przedstawiono na rysunku 2. Duże wartości wykrytych błędów systematycznych  $s_H = 1.7$  m dla terenów o nachyleniu do  $2^\circ$  oraz  $s_H = 7.1$  m dla terenów o nachyleniu powyżej  $2^\circ$  spowodowane były niewłaściwym wyborem pól treningowych służących do wyznaczenia parametrów korelacji obrazów TK-350. Po wyeliminowaniu z pomiarów błędów grubych oraz błędów systematycznych określono rzeczywistą dokładność pomiaru NMT, która wynosiła od  $m_H = 3.2$  m do  $m_H = 3.9$  m w zależności od stopnia nachylenia terenu.

## 6. WNIOSKI

Panchromatyczne obrazy TK-350 o rozdzielczości 10 m można skorygować geometrycznie z dokładnością 1/3 piksela obrazu źródłowego. Zakres tej korekcji jest funkcją przyjętego modelu projekcji dla zobrazowania oraz dokładności wyznaczenia elementów orientacji kamery na orbicie.

Wykorzystując algorytmy korelacji obrazów cyfrowych TK-350, bazujące na automatycznej korekcji pomiarów wysokości, można wygenerować NMT z dokładnością  $m_H = 3.2$  m dla terenów równinnych oraz  $m_H = 3.9$  m dla terenów pagórkowatych i górzystych. Dokładność metodycznego pomiaru wysokości na obrazach TK-350 o 60 % pokryciu stereoskopowym wynosi 0.02 ‰ wysokości lotu. Uzyskanie takiego rezultatu wymaga umiejętnego wykorzystania pełnego zestawu danych stereoskopowych TK-350 w algorytmach pomiarowych programu OrthoSpace.

Produkt pomiarów wysokościowych, przeprowadzonych na obrazach stereoskopowych TK-350 techniką cyfrową, stanowi doskonały materiał źródłowy do generowania warstwic na mapach topograficznych w skalach od 1:25 000 do 1:200 000 w zależności od ukształtowania rzeźby terenu na obszarze opracowania.

Wysoka dokładność NMT wygenerowanego na podstawie obrazów stereoskopowych TK-350 oraz zasięg jego opracowania sprawiają, że produkt ten może być również wykorzystywany w procesie ortorektyfikacji średnioskalowych zdjęć lotniczych i wysokorozdzielczych obrazów satelitarnych.

## 7. LITERATURA

Buyuksali G., Kacak G., Oruc M., Akcin H., Jacobsen K., 2000. Accuracy Analysis, DEM Generation on Validation Using Russian TK-350 Stereo-Images. [http://www.sovinformspuutnik.com/jac\\_PR04.pdf](http://www.sovinformspuutnik.com/jac_PR04.pdf)

Chekalin V. F., Fomtchenko M. M., 2000. Russian Concept of Space Images Digital Processing. ISPRS Congress, Amsterdam.

Ewiak I., 1999. Filtracja NMT obszarów zurbanizowanych, *Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji*, Vol. 9, s. 35-39.

Lavrov, V. N., 2000. Mapping with the Use of Russian Space High Resolution Images, *ISPRS Congress*, Amsterdam. [http://www.sovinformspunik.com/lavrov\\_2eng.pdf](http://www.sovinformspunik.com/lavrov_2eng.pdf)

Nekrassov V. V., Chekalin V. F., Moltchachkine N. M., 2006. Ortho/z-space software: highly accurate orthorectification of very high resolution satellite images.

Sovinformspunik. 2006. <http://www.sovinformspunik.com>

### **METHODOLOGY OF GENERATION OF DEM FROM RUSSIAN TK-350 STEREO IMAGES**

**KEY WORDS:** digital photogrammetry, russian satellite photographs, geometric correction, image correlation, DEM, accuracy

#### **Summary**

Russian satellite stereo photographs taken with TK-350 cartographic cameras (GSD = 10m) have been collected for more than 20 years. Till 1991 this data was only available to Russian federal surveying offices and used for updating 1:25 000 scale topographic maps. Data from TK-350 has been made available worldwide after the US lifted the ban on satellite data with resolutions below 10 m. This data has not so far been used in Poland.

The research project sponsored by the Ministry of Science is currently carried out at the Institute of Geodesy and Cartography in Warsaw. It will evaluate the usefulness of TK-350 data for the generation of photogrammetric products for topographic databases including the accuracy of DTM measurements based on stereoscopic TK-350 data. The results published in foreign literature refer mainly to analytical photogrammetry, and are based on inappropriate reference data and disqualify the TK-350 data.

In the described project, one stereoscopic TK-350 scene with a 60 % overlap of southwest of Poland was acquired on 20 Oct. 2000 by a Comet satellite. Russian original Z-Space software was used for orientation of the stereogram. Using this software and the original full set of orbital data orientation, an accuracy of 1/3 of pixel was achieved. Generation of DEM was done with the use of the image correlation method. RMSE (Z) = 3.2 m for flat regions and RMSE (Z) = 3.9 m for hilly regions were achieved. Satellite TK-350 photographs could be used for DEM and contour line generation on topographic maps on scales smaller than 1:25 000 for flat regions and on scales smaller than 1:200 000 for hilly regions.

Dr inż. Ireneusz Ewiak  
e-mail: [rene@igik.edu.pl](mailto:rene@igik.edu.pl)  
tel. +22 3291985