

Thierry Toutin¹
Philip Cheng²

DEMISTYFIKACJA IKONOSA !

IKONOS, „komercyjny” satelita dostarczający obrazów o najwyższej obecnie rozdzielczości geometrycznej, dostępnej ogółowi użytkowników, został pomyślnie umieszczony na orbicie we wrześniu 1999 roku. Skaner IKONOSA może rejestrować obrazy powierzchni Ziemi z rozdzielczością przestrzenną 1 metra w zakresie panchromatycznym oraz 4 metrów w przypadku rejestracji wielospektralnej, przy zmiennym kącie obserwacji, z możliwością odchylenia osi optycznej skanera do 60 stopni od nadiru (w dowolnym kierunku) w celu zwiększenia częstości rejestracji oraz możliwości pozyskiwania obrazów stereoskopowych. Obrazy o wysokiej rozdzielczości dostarczane przez IKONOS będą miały teoretycznie „nieograniczoną” liczbę użytkowników reprezentujących wiele dziedzin takich jak: kartografia, rolnictwo, leśnictwo oraz służb rządowych i samorządowych (administracja rządowa i samorządowa oraz służby ratownicze).

Dane z IKONOSA mogą być wykorzystywane zamiast dotychczas stosowanych zdjęć lotniczych do wykonywania oraz późniejszego aktualizowania szczegółowych map całych krajów. Pozwolą one farmerom kontrolować stan zdrowotny upraw oraz szacować zbiory z większą dokładnością i w krótszym czasie. Dzięki nim naukowcy będą w stanie badać obszary zagrożone ekologicznie i wyznaczać trendy zmian z większą pewnością. Urzędnicy będą mogli monitorować i lepiej planować gospodarowanie przestrzenią, a urbaniści i planiści – wspierać rozwój budownictwa mieszkaniowego. Krótko mówiąc, gama zastosowań obrazów IKONOSA zależy tylko od wyobraźni.

1. Czego oczekujemy od IKONOSA.

Obrazy IKONOSA, którego rozwiązania są wzorowane na podobnych systemach montowanych na samolotach lub promach kosmicznych, mają potencjalnie szerokie możliwości zastosowań kartograficznych. Ich głównym atutem z perspektywy użytkowników jest 1-metrowa rozdzielczość geometryczna (terenowa), która pozwala rozpoznać i „skartować” obiekty występujące na większości typowych, cyfrowych opracowań kartograficznych. Użytkownicy mogą spodziewać się uzyskania dokładności sub-pikselowej

¹ *Dr. Thierry Toutin* is a principal research scientist at the Canada Centre for Remote Sensing, Natural Resources Canada, Ottawa, Ontario, Canada. His email address is thierry.toutin@ccrs.nrcan.gc.ca.

² *Dr. Philip Cheng* is a senior scientist at PCI Enterprises, Richmond Hill, Ontario, Canada. His email address is cheng@pcigeomatics.com

(tak jak to było w przypadku wcześniejszych satelitów, na przykład SPOT czy LANDSAT), ale czy ich oczekiwania dokładnościowe nie są zbyt wygórowane? Możliwość rejestracji obrazów nachylonych (tj. rejestracji przy osi optycznej odchylonej od nadiru) jest również ważną cechą IKONOSA, gdyż zwiększa częstotliwość obrazowania tego samego obszaru do dwóch, trzech dni, jak również (teoretycznie) umożliwia pozyskanie obrazów stereoskopowych. Tak więc użytkownicy mogliby stosować przy opracowywaniu tych obrazów tradycyjne technologie fotogrametryczne aby uzyskać informacje dwu- i trójwymiarowe, takie jak np. cyfrowy model wysokości (DEM). Czy te dane stereoskopowe są dostępne?

2. Co otrzymujemy z IKONOSA?

Dane obrazowe z IKONOSA są oferowane w postaci pięciu różnych produktów o różnych poziomach przetworzenia, dostępnych dla „end user'a” (końcowego odbiorcy) w pięciu różnych cenach, stosownie do wybranego poziomu przetworzenia. Tabela numer 1 zawiera ceny podstawowych produktów uzyskiwanych na podstawie rejestracji w zakresie panchromatycznym. W przypadku niestandardowych, specjalnych produktów lub usług pobierane są dodatkowe opłaty. Produkty IKONOSA są rozpowszechniane w postaci 8 lub 11 bitowych obrazów cyfrowych GeoTiff wraz z tekstowymi plikami metadanych (zawierającymi specyfikację szczegółów zamówienia oraz opis danych źródłowych i produktu). Minimalny koszt zamówienia ustalono na poziomie 1000 USD dla klientów z Ameryki Północnej i 2000 USD dla pozostałych. Zgodnie z zapewnieniami Space Imaging, po potwierdzeniu przyjęcia zamówienia produkty dostępne w archiwum dostarczane są w przeciągu kilku dni; do około tygodnia. Dostarczenie produktów opracowywanych na podstawie nowo gromadzonych danych zwykle zajmuje dwa lub więcej tygodni, w zależności od wielkości zamówienia, warunków pogodowych, żądanej dokładności oraz czasu potrzebnego na pozyskanie i dostarczenie do Space Imaging współrzędnych terenowych punktów kontrolnych (GCP – Ground Control Points) i cyfrowego modelu wysokości terenu (DEM).

Tabela 1. Ceny detaliczne podstawowych produktów panchromatycznych na podstawie informacji umieszczonych na stronie WWW Space Imaging (<http://www.spaceimaging.com>).

Kod produktu	Dokładność CE90	Cena dla klientów z Ameryki Płn.	Cena dla pozostałych klientów
Geo	50 m	\$12	\$29
Reference	25 m	\$29	\$73
Map	12 m	\$39	\$98
Pro	10 m	\$49	\$122
Precision	4 m	\$66	\$149

CE90 - dokładność położenia piksela, określona promieniem okręgu w jakim środek piksela powinien się znaleźć z prawdopodobieństwem 90%. Ceny podano w USD za 1 km².

IKONOS GEO Product najbardziej dostępny ze względu na cenę, charakteryzuje się najmniejszą dokładnością, ponieważ nie jest skorygowany ze względu na deniwelacje terenu, a więc nie jest orto-obrazem. Ma dokładność 50 m (CE90) w płaszczyźnie XY, co oznacza, że dowolny punkt obrazu może być przesunięty o 50 metrów w mierze terenowej od jego właściwej pozycji w dziewięciu przypadkach na dziesięć. Dokładność pogarsza się dla terenów

górzystych jeśli obrazy są rejestrowane w pozycji *off-nadir*, co jest dość powszechne jeśli chodzi o dane z IKONOSA. Wskutek tego *IKONOS GEO Product* spełnia tylko wymagania dokładnościowe stawiane mapom w skali 1:100 000. Ponadto, ani obrazy stereoskopowe odpowiadające produktowi *IKONOS GEO Product*, ani obrazy źródłowe (*RAW* – „surowe”, pierwotne) preferowane przez fotogrametrów, nie są dostępne w sprzedaży.

IKONOS PRECISION Product jest najdroższy, ale oferuje najwyższą dokładność (4 m. CE90). Aby go otrzymać zamawiający powinien dostarczyć do Space Imaging współrzędne punktów kontrolnych (*GCP*) i cyfrowy model wysokości (*DEM*) w celu wygenerowania orto-obrazu. Ponieważ większość obrazów jest rejestrowana w pozycji *off-nadir*, dokładność współrzędnych *XY* punktów *GCP* powinna być lepsza niż 1 m, a dokładność określenia wysokości na podstawie *DEM* nie gorsza niż 5 m. Dokładność sub-pikselowa, którą można uzyskać w przypadku satelitów *SPOT* i *LANDSAT* nie będzie osiągalna dla *IKONOSA* nawet dla terenów płaskich.

3. W czym tkwią problemy?

W odróżnieniu od innych satelitów komercyjnych *IKONOS* nie udostępniła szczegółowych danych o swojej orbicie. Dodatkowo, konieczność dostarczenia do Space Imaging punktów kontrolnych (*GCP*) oraz *DEM* w celu uzyskania *IKONOS PRECISION Product*, może powodować opóźnienie w realizacji zamówienia. Fakt ten stanowi również problem dla użytkowników, którzy nie mają uprawnień do udostępniania, publikowania i rozpowszechniania danych kartograficznych swoich krajów. Ceny produktu *IKONOS PRECISION Product* są bardzo wysokie w porównaniu z cenami *IKONOS GEO Product*. Wszystko to może zniechęcać potencjalnych użytkowników do kupowania produktów *IKONOSA* lub do poprawnego i właściwego ich użytkowania.

Czy jednakże z punktu widzenia użytkownika możliwe jest zakupienie *IKONOS GEO Product* (około 5.5 raza tańszego niż *IKONOS PRECISION Product*) i skorygowanie go do postaci orto-obrazu we własnym zakresie? Krótka odpowiedź brzmi – "Tak". Użytkownicy zaoszczędzą czas i pieniądze. Pozbędą się problemów administracyjnych związanych z przekazywaniem danych *GCP* i *DEM* za granicę i będą w stanie poprawnie wykorzystać to nowe źródło danych.

4. Jakie są rozwiązania?

Do skorygowania *IKONOS GEO Product* można zastosować trzy różne metody:

- Zwykła metoda wielomianowa,
- Ilorazowa¹ metoda wielomianowa,
- Precyzyjny (rygorystyczny), matematyczny model korekcji.

¹ Przyp. Tłum. Metoda nazywana przez autorów "ilorazową metodą wielomianową" jest opisywana jako iloraz dwu wielomianów realizujący przekształcenie współrzędnych punktów terenowych *XYZ* do współrzędnych obrazowych *x,y*. W przypadku pierwszego stopnia tych wielomianów wzory transformujące stają się znanymi w fotogrametrii wzorami przekształcenia rzutowego przestrzeni na płaszczyznę.

Celem badań opisanych w niniejszym artykule było zastosowanie tych trzech metod do korekcji *IKONOS GEO Product* i porównanie uzyskanych wyników.

Zwykła metoda wielomianowa, choć często uważana za przestarzałą, jest bardzo prostą metodą korekcji obrazów. Pozwala ona dokonać korekcji zniekształceń planimetrycznych (tylko w płaszczyźnie X, Y) przy zastosowaniu punktów *GCP*. Ponieważ metoda ta nie uwzględnia wpływu wysokości punktu na jego położenie na obrazie (przesunięcie radialne pikseli spowodowane deniwelacją terenu) jej stosowanie powinno być ograniczone do niewielkich i płaskich obszarów.

Ilorazowa metoda wielomianowa jest podobna do zwykłej metody wielomianowej, z tą różnicą, że jej formuła zawiera iloraz przekształceń wielomianowych, co pozwala uwzględnić w obliczeniach współrzędną Z (wysokość) punktów terenowych (*GCP*).

Metoda ta może być stosowana dla obszarów charakteryzujących się umiarkowanym zróżnicowaniem rzeźby terenu i łagodnością form terenowych. Zarówno ta metoda jak i zwykła metoda wielomianowa nie wymagają znajomości położenia satelity na orbicie oraz orientacji sensorów (skanera) w przestrzeni. Ponieważ żadna z tych metod nie należy do rozwiązań ścisłych (nie jest matematycznym modelem opisującym precyzyjnie proces fizycznej rejestracji obrazu przy przemieszczaniu się urządzenia rejestrującego) dlatego wymaga dużej liczby punktów *GCP* i poprawna jest właściwie tylko na punktach *GCP*. Dystorsje (zniekształcenia obrazu) między punktami *GCP* nie są całkowicie eliminowane w procesie korekcji.)

Rozwiązania ścisłe (precyzyjne, rygorystyczne), tj. modele matematyczne, powinny wiernie odzwierciedlać charakter złożonej geometrii obrazowania oraz deformacji obrazu spowodowanych orientacją i pozycją skanera, ruchem Ziemi a niekiedy i zniekształcenia właściwe odwzorowaniom kartograficznym. Powinny uwzględniać informacje o położeniu satelity i sensorów w przestrzeni. W porównaniu ze zwykłą i ilorazową metodą wielomianową, taka metoda modelowania (rygorystyczna) daje najbardziej dokładne wyniki przy relatywnie małej liczbie punktów *GCP*.

Faktem jest, że szczegółowe informacje o orientacji i pozycji sensorów satelity *IKONOS* nie zostały jeszcze ujawnione (udostępnione). Pomimo tego, autor tego niniejszego artykułu (główny specjalista w Canada Centre for Remote Sensing (CCRS), Natural Resources Canada) z powodzeniem opracował dokładny model orbitalny dla *IKONOSA* wykorzystując podstawowe informacje zawarte w plikach metadanych i nagłówkach plików obrazowych. Na przykład, przybliżony kąt nachylenia można obliczyć przy wykorzystaniu nominalnej wartości wysokości satelity nad Ziemią w chwili rejestracji oraz nominalnej rozdzielczości terenowej w kierunku równoległym i prostopadłym do kierunku skanowania. Model opracowany w CCRS jest oparty na zasadach ruchu orbitalnego satelitów, fotogrametrii, geodezji i kartografii. Został pomyślnie zastosowany przy użyciu tylko kilku (3-6) punktów kontrolnych (*GCP*) dla skanerów pracujących w widmie widzialnym i podczerwieni („optycznych”) takich jak Landsat 5 i 7, SPOT, IRS, ASTER, KOMPSAT, oraz systemów radarowych SAR (ERS, JERS, SIR-C i Radarsat). Przy dobrej jakości *GCP*, tj. precyzyjnie wyznaczonym położeniu punktów *GCP*, uzyskano dokładność tego modelu w granicach 1/3 piksela dla skanerów optycznych i 1 interwału próbkowania (*“resolution cell”*) dla obrazów SAR.

5. Eksperyment.

W celu przetestowania wspomnianych trzech metod korekcji zamówiono w kwietniu 2000 r. *IKONOS GEO Product*, na obszar miasta Richmond Hill, położonego na północ od Toronto w Kanadzie. Różnica wysokości na tym obszarze zawiera się w granicach od 180 do 240 metrów. Space Imaging dostarczyło dane po 30 dniach od daty potwierdzenia zamówienia. Z pliku metadanych zostały odczytane informacje potrzebne do obliczenia parametrów orientacji i położenia satelity, niezbędnych w konstrukcji precyzyjnego modelu. Do przeprowadzenia eksperymentu pozyskano również 30 *GCP* równomiernie rozmieszczonych na obrazie, dla których współrzędne XY zostały zdjęte z cyfrowej ortofotomapy o wymiarach piksela 20x20 cm a współrzędna Z - z *DEM* o wymiarach regularnej siatki 2x2 m. Do wykonania procesu korekcji geometrycznej użyto oprogramowania PCI OrthoEngine Satellite Edition V 7.0 (oprogramowania, które zawiera wszystkie trzy wymienione metody korekcji). PCI OrthoEngine Satellite Edition V 7.0 umożliwia również odczyt różnych formatów danych satelitarnych, ustalanie współrzędnych obrazowych punktów kontrolnych *GCP*, tworzenie modeli geometrycznych, tworzenie orto-obrazów oraz zarówno automatyczne jak i manualne mozaikowanie.

6. Wyniki i analizy.

W tabeli 2 zamieszczono błędy średnie kwadratowe (*RMS*) i maksymalne odchyłki obliczone trzema różnymi metodami. W przypadku zwykłej i ilorazowej metody wielomianowej zastosowano wielomian drugiego stopnia. Jak widać w tabeli nr 2, metoda wielomianowa ilorazowa wykazała najmniejsze odchyłki (błędy szcztatkowe). Jednak ocena dokładności tylko na podstawie odchyłek na punktach *GCP* jest niewłaściwa i tendencyjna, ponieważ obie metody wielomianowe korygują obraz lokalnie (na *GCP*).

Tabela 2: Porównanie odchyłek dla 30 *GCPs* po korekcji metodą: wielomianową zwykłą, wielomianową ilorazową i precyzyjną.

Metoda korekcji	RMS [m]		Odchyłki maksymalne [m]	
	X	Y	X	Y
Wielomianowa zwykła	1.0	3.2	2.4	6.2
Wielomianowa ilorazowa	0.5	0.7	1.1	1.4
Model precyzyjny	0.8	1.1	1.9	2.8

W trakcie pozyskiwania jednego z *GCP* popełniono błąd grubo, który wynosił około 20 m wzdłuż osi Y. Oczywiście żadna z metod wielomianowych nie była w stanie wykryć tego błędnego punktu. Tabela 3 zawiera *RMS* i odchyłki na błędnie wskazanym punkcie. Odchyłka Y na błędnym punkcie według modelu ścisłego była 4 razy większa niż *RMS* i została wykryta wraz z wartością błędu i jego kierunkiem.

Tabela 3: Porównanie błędów i odchyłek na 30 GCP wraz z punktem obciążonym błędem grubym po korekcji metodą: wielomianową zwykłą, wielomianową ilorazową i precyzyjną.

Metoda korekcji	RMS [m]		Punkt obciążony błędem grubym [m]	
	X	Y	X	Y
Wielomianowa zwykła	1.2	3.9	2.2	6.7
Wielomianowa ilorazowa	0.6	1.3	0.3	1.4
Model precyzyjny	1.1	3.0	2.2	11.8

Obiektywną ocenę dokładności transformacji należy przeprowadzać na podstawie zbioru niezależnych punktów kontrolnych (*Independent Check Points - ICP*), nie wykorzystywanych do obliczeń parametrów modelu. W konsekwencji, 23 z 30 GCP zostały zamienione na ICP w kolejnej kontroli.

Dla zwykłej metody wielomianowej zastosowano drugi stopień wielomianu, a dla metody ilorazowej stopień pierwszy ze względu na ograniczoną liczbę GCP. Tabela 4 przedstawia RMS i błędy maksymalne dla zbioru 23 punktów kontrolnych (ICP), w przypadku zastosowania trzech różnych metod. Błędy są mniejsze dla metody precyzyjnej niż dla obu metod wielomianowych i zbliżone do odchyłek z tabel 2 i 3. Pokazuje to, że opracowany model precyzyjny (rygorystyczny) jest zarówno stabilny jak i odporny na błędy grube. Analiza wyliczonych z tego modelu parametrów obrazowania takich jak np. kąty nachylenia osi skanera w chwili rejestracji, potwierdziła przyjęte, podstawowe założenia i wartości przybliżone tych parametrów uzyskane na podstawie metadanych.

Tabela 4. Porównanie wartości błędów przy 23 punktach ICP i 7 punktach GCP dla zwykłej metody wielomianowej, ilorazowej metody wielomianowej oraz modelu precyzyjnego.

Metoda korekcji	RMS [m]		Odchyłki maksymalne [m]	
	X	Y	X	Y
Wielomianowa zwykła	1.7	4.1	4.1	7.5
Wielomianowa ilorazowa	2.2	5.2	5.1	10.4
Model precyzyjny	1.3	1.3	3.0	3.0

Ostateczna ocena dokładności została wykonana na podstawie ilościowego i jakościowego porównania orto-obrazu wygenerowanego przy pomocy modelu precyzyjnego oraz DEM w stosunku do ortofoto wykonanego na podstawie zdjęć lotniczych o wielkości piksela 0.2 m w mierze terenowej. Potwierdza ona wyniki uzyskane uprzednio na podstawie ICP, że błąd nie jest większy niż 4 do 5 metrów. Oznacza to w konsekwencji, że dokładność uzyskana z modelu ścisłego mieści się w granicach dokładności oferowanej przez *IKONOS PRECISION Product*.

7. Wnioski.

IKONOS GEO Product charakteryzuje się dokładnością, która jest stosunkowo niska i odbiega od jakości treści jego obrazu oraz dokładności map wielkoskalowych. Wygenerowanie produktów precyzyjnych może okazać się trudne w przypadku niektórych krajów, a jeśli nawet się uda, to pociągnie za sobą wysokie koszty. W rezultacie, jedną 99z poważnych przeszkód w skutecznym i właściwym wykorzystaniu produktów *IKONOSA*

jest niemożność przetwarzania i wykonywania orto-obrazów przez użytkownika we własnym zakresie.

Obecnie, użytkownicy mogą zastosować model precyzyjny (jeden z nich jest dostępny w oprogramowaniu komercyjnym) do korekcji „taniego” *IKONOS GEO Product*. Użytkownik, jeżeli tylko dysponuje dokładnymi danymi terenowymi, może wytwarzać poprawny orto-obraz, który będzie tak dokładny jak drogi *IKONOS PRECISION Product*. Technologia ta mogłaby zatem promować pozyskiwanie i zastosowanie (wykorzystywanie) tego nowego źródła danych do licznych zastosowań. Nadal prowadzi się badania w CCRS na podstawie innych obrazów *IKONOSA* dla obszarów o różnej topografii (głównie tereny o dużych deniwelacjach) i różnych zastosowań (kartografia, leśnictwo, rolnictwo itd...). Najnowsze wyniki dla obszarów górzystych są obiecujące w przypadku kartografii małoskalowej.

Tłumaczenie z jęz. angielskiego dr inż. Marek Mróz.

Weryfikacja lingwistyczna mgr Aleksandra Poprawska.

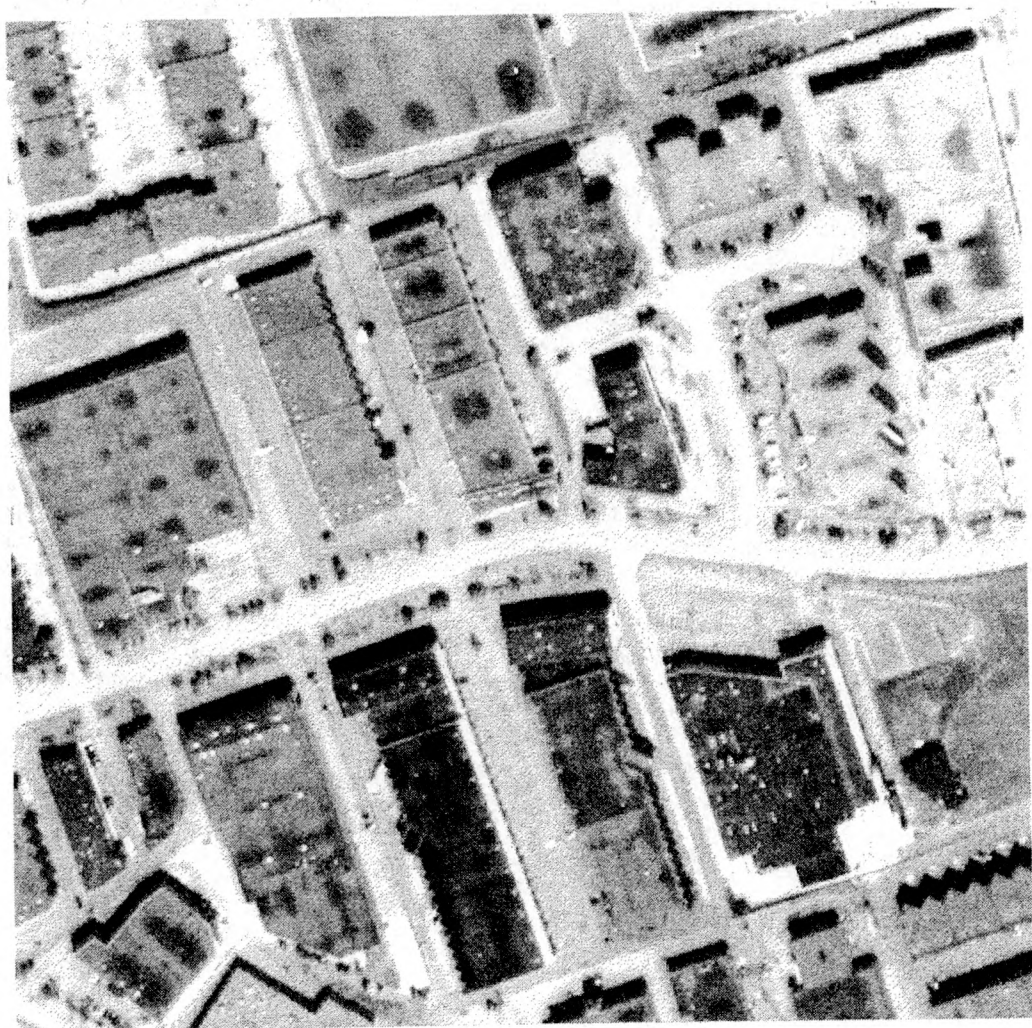
Artykuł został przetłumaczony bez zmian i skrótów z wersji angielskojęzycznej opublikowanej w *EARTH OBSERVATION MAGAZINE* (Vol. 9, No. 7, pp.17-21, July 2000.) pod tytułem "*Demystification of IKONOS !*" autorstwa dr. T. Toutin i dr. Ph. Cheng.

Canada Centre for Remote Sensing (CCRS) zezwoliło na przetłumaczenie tego artykułu przez dr. Marka Mroza jako materiału powstałego na podstawie publikacji objętej prawem autorskim. CCRS zachowuje wszystkie prawa autorskie. CCRS nie zatwierdza tłumaczenia i nie ponosi odpowiedzialności za jakiegokolwiek błędy lub błędne interpretacje występujące w tym tłumaczeniu oryginalnego tekstu angielskiego.

CCRS has allowed the translation of the article "Demystification of IKONOS !" by dr Marek Mroz from Olsztyn University (Department of Photogrammetry and Remote Sensing), a derivative work based on copyrighted materials. CCRS has not certified the translation and is not responsible for any errors or misinterpretations in this translation of the original English text.

Translated by Marek Mróz.

Reviewed linguistically by Aleksandra Poprawska.



Rys. 1a: Fragment obrazu IKONOSA z obszaru Richmond Hill, Ontario, Kanada.



Rys. 1b: Fragment zdjęcia lotniczego w skali 1:8000 z obszaru Richmond Hill, Ontario, Kanada.



Rys. 2a: Fragment obrazu IKONOSA z obszaru Richmond Hill, Ontario, Kanada



Rys. 2b: Fragment zdjęcia lotniczego w skali 1:8000 z obszaru Richmond Hill, Ontario, Kanada.