

**ZDZISŁAW KURCZYŃSKI,
WIESŁAW WOLNIEWICZ**

Rozwój technicznych środków obrazowania satelitarne go na naszych oczach ulega gwałtownemu przyspieszeniu, co prowadzi do przewartościowania pojęć w tym zakresie. Trudno byłoby dziś znaleźć fachowe czasopismo o zasięgu międzynarodowym, w którym nie publikowano by takich obrazów. Serwisy internetowe podają bogactwo szczegółów, katalogi produktów, cenniki. Potencjalny użytkownik może czuć się przytłoczony nadmiarem reklamy przemieszanej z rzetelną informacją. Rodzą się pytania: jak rozumieć przedstawiane parametry? Jaki jest faktyczny potencjał kartograficzny wysokorozdzielczych obrazów satelitarnych? Co i według jakich kryteriów wybierać? Jak porównywać nowe zobrazowania z do- brze znanymi zdjęciami lotniczymi?

● Wydajność obrazowania

Podstawowym użytkowym parametrem systemu obrazowania jest jego wydajność. Dla małego obszaru powinna ona określać szanse zobrazowania w limitowanym czasie, a dla dużego – podawać czas konieczny do jego pokrycia obrazami. Wydajność zależy od parametrów kamery i orbity, a w tym:

- szerokości obrazowanego pasa,
- „manewrowalności” określającej czas konieczny na skierowanie układu optycznego na wybrany obiekt,
- czasu przebywania satelity nad obiektem,
- częstotliwości rewizyt (jak często obiekt może znaleźć się w polu widzenia kamery).

Bliższa analiza tych czynników wskazuje, że pierwszorzędne znaczenie dla wydajności ma wysokość orbity. Z wyższej orbity (przy tym samym kącie wychylenia kamery) w polu widzenia systemu jest szerszy pas terenu. Dla przykładu, przy wychyleniu $\pm 30^\circ$ IKONOS z wysokości 680 km ma w zasięgu pas 780-kilometrowy, a niżej latający QuickBird – 520-kilometrowy. Przy tych parametrach i szerokości geograficznej 35° IKONOS przelatuje nad danym obszarem co 3 dni, a QuickBird – co 4. Zwiększona częstotliwość rewizyt daje większe szanse obrazowania danego obszaru bez chmur lub szybszego pokrycia obrazami obszaru bardzo rozległego.



Wysokorozdzielcze systemy ob

Co oznacza poniżej

Wyższa orbita oznacza również, że satelita dłużej przebywa nad obiektem. Pozwala to w jednym przelocie zarejestrować zwarty obszar o szerokości kilkakrotnie większej niż pojedynczy pas. Przebiega to w ten sposób, że układ optyczny skierowany do przodu rejestruje pierwszy pas, następnie obraca się wstecz i nieco w bok, rejestruje drugi pas z niewielkim podwójnym pokryciem itd. System IKONOS charakteryzuje się bardzo dużą manewrowalnością, skierowanie układu w wybrane miejsce zajmuje kilkanaście sekund (czas zależy od kąta, o jaki należy obrócić układ). W rezultacie IKONOS w jednym przelocie zdąży zarejestrować 4 pasy terenu o długości do 104 km, a QuickBird – 2 pasy o długości do 36 km.



Fot. 1. Warszawa, fragment Starego Miasta, 11 marca 2002 r., system IKONOS-2

satelitarnych. Czy przetworzony produkt, który „spełnia wymagania właściwe dla mapy 1:2500” może być źródłowym dla tworzenia mapy w tej skali? Pytania takie dotyczą również innych zobrazowań prezentowanych w formie cyfrowej.

W przypadku klasycznych zdjęć lotniczych problem ten jest dość jasno zdefiniowany. Istnieje technologiczna relacja między skalą opracowywanej mapy a skalą zdjęć, z których ta mapa może być opracowana. Zależności te poznano w wyniku wielu lat praktyki produkcyjnej. O możliwościach pomiarowych zdjęć czy obrazów cyfrowych decydują dwa czynniki:

- potencjalna dokładność geometryczna opracowania sytuacyjnego i wysokościowego,
- potencjał interpretacyjny, czyli treść możliwa do odczytania.

● Potencjał interpretacyjny

Czynnik ten uwarunkowany jest zdolnością rozdzielczą. Dla tradycyjnych zdjęć lotniczych pojęcie zdolności rozdzielczej jest jednoznacznie zdefiniowane. W popularnym ujęciu wyraża się ono liczbą linii na milimetr, możliwych do odwzorowania na wynikowych zdjęciach. Na przykład 40 linii/mm oznacza, że element rozdzielczości zdjęć wynosi 0,025 mm (znając skalę zdjęcia, łatwo określić, ile to jest w terenie). Trudno tu o większe pomyłki czy nieporozumienia.

Sytuacja wygląda zgoła inaczej w przypadku obrazów cyfrowych. Tu w ogóle nie ma skali, są za to „piksele”. Powszechnie posługujemy się „terenowym wymiarem piksela”, utożsamiając go ze zdolnością rozdzielczą. O obrazie z pikselem 1 m mówimy: „obraz o zdolności rozdzielczej 1 m”. W takim stwierdzeniu tkwi błąd polegający na pomyleniu różnych pojęć: wymiaru piksela i rozdzielczości. Nie ma problemu, dopóki jest to tylko żargon używany w gronie specjalistów rozumiejących różnicę znaczeniową tych pojęć. Gorzej, jeśli żargon ten przejmują mniej zorientowani użytkownicy.

Jaka jest więc relacja między zdolnością rozdzielczą zdefiniowaną tradycyjnie a wymiarem piksela? Na to pytanie odpowiada teoria próbkowania, która – w uproszczeniu – mówi, że element rozdzielczości odpowiada przedziałowi 2-3 piksele. Jeżeli więc chcemy posługiwać się tym pojęciem w rozumieniu tradycyjnym i mamy np. obraz z pikselem terenowym 1 m, to jego zdolność rozdzielcza wynosi 2-3 metry. Oddzielnym zagadnieniem jest, co na takim obrazie można „zobaczyć”. O tym decyduje wielkość i kształt obiektu, jego kontrast z tłem itd. W praktyce rozróżnia się etap „wykrycia” obiektu (coś widać) od rozpoznania (np. widać pojazd) i scharakteryzowania (pojazdem tym jest samochód osobowy). Przechodząc do obrazu cyfrowego – aby wykryć i rozpoznać obiekt, jego obraz musi być zbudowany z wielu pikseli (zależność tę ilustruje fot. 2).

● Dokładność pomiarowa

Użytkownik ma do wyboru produktu o różnym stopniu korekcji geometrycznej, charakteryzujące się różną dokładnością (i ceną). W odniesieniu do obrazów ortorektyfikowanych dokładność jest określana przez błąd położenia i – często – skalę mapy, której wymagania spełnia. Polski odbiorca może się tu natknąć na nieznanne mu określenia dokładności. W kraju jesteśmy przyzwyczajeni do operowania „błędem średniokwadratowym”, tymczasem w publikacjach zagranicznych najczęściej stosuje się pojęcie błędu CE90 (faktyczne położenie punktu z prawdopodobieństwem 90% mieści się w okręgu o podanym promieniu).

zobrazowania satelitarnego, cz. II

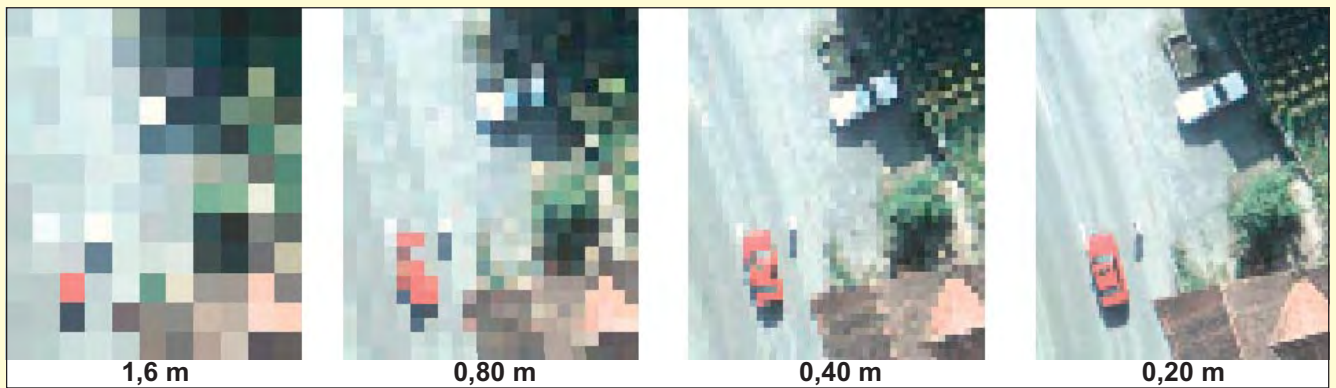
za piksel

metra?

Widać więc, że zmiana wysokości orbity QuickBirda z 600 na 450 km pozwoliła wprawdzie zwiększyć zdolność rozdzielczą, ale kosztem zmniejszenia wydajności obrazowania. Z kolei IKONOS wysoką orbitę, dającą większą wydajność, okupuje większym układem optycznym i zmniejszoną zdolnością rozdzielczą.

● Potencjał kartograficzny

Obrazy satelitarne stają się coraz bardziej dostępne i coraz częściej trafiają do użytkowników spoza branży fotogrametrycznej. Ci, nieprzywykli do „działania na pikselach”, zadają pytanie o rzeczywisty potencjał kartograficzny „metrych” obrazów



Fot. 2. Porównanie obrazów cyfrowych o różnej rozdzielczości (różny wymiar piksela)

Wielkość CE90 jest około 2 razy większa od „naszego” błędu średniokwadratowego.

Produkty o różnym stopniu korekcji mają taki sam wymiar piksela; różnią się tylko dokładnością geometryczną. Produkty okorekcji odpowiadającej drobniejszemu skalom map uzyskuje się bez jakichkolwiek punktów geodezyjnych (fotopunktów), korekcja odbywa się wyłącznie na podstawie rejestrowanych zdużą dokładnością danych pokładowych (trajektorii satelity i kątów nachylenia) oraz znanego modelu geometrycznego kamery. W zakresie wyższych poziomów korekcji – odpowiadających mapom w większych skalach – konieczne są fotopunkty i DTM dla usunięcia wpływu rzeźby terenu.

Jakie są granice takiej korekcji? Obrazy pozyskiwane są zwykle z wychylonym na boki układem optycznym. Korzyści płynące z takiej możliwości zostały opisane powyżej, ale im większe wychylenie, tym większy wpływ deniwelacji i tym większa wymagana dokładność DTM dla jej korekcji. Należy mieć świadomość, że osiągnięcie dokładności korekcji na poziomie błędu położenia sytuacyjnego 1 m (tj. 1 piksel) wymaga fotopunktów o współrzędnych przestrzennych o dokładności nie gorszej niż 0,5 m i DTM o dokładności wysokościowej lepszej niż 5 m.

W opracowaniach obrazów satelitarnych średniej rozdzielczości czy skanowanych zdjęć lotniczych spotyka się „podpiksellowe” dokładności opracowania (tj. z błędem mniejszym od wymiarów piksela). Autorytet w badaniu obrazów satelitarnych Thierry Toutin (CCRS – Kanadyjskie Centrum Teledetekcji)

przestrzega przed przenoszeniem takich wniosków na satelitarne obrazy „metrowe”. Uważa on, że dokładność podpiksellowa nie będzie osiągnięta nawet w płaskim terenie [T. Toutin, P. Cheng „Demistyfikacja IKONOS-a”, GEODETA 10/2000]. Jego praktyczne badania wskazują na możliwość korekcji z wykorzystaniem ściślejszych modeli geometrycznych do poziomu 1-2 m, co odpowiada standardowi map w skali 1:5000 (produkt Precision w IKONOS-ie). Modele uproszczone, oparte na wielomianach, dają odpowiednio gorsze wyniki. Powyższy wniosek dotyczy tylko dokładności sytuacyjnej ortofotobrazów. Stwierdzenia „dokładność odpowiada standardowi mapy w skali 1:5000” nie należy utożsamiać z możliwością produkcji map w tej skali (np. dla produkcji ortofotomap w skali 1:5000 piksel 1 m byłby za duży).

● Granice postępu

Pozostając pod wrażeniem możliwości systemów „metrowych”, stawiamy sobie przekorne pytanie: co dalej? Jakie są granice postępu? Jakie asy trzyma w rękawie wywiad wojskowy? W poprzedniej epoce krążyły legendy o tym, jak to z kosmosu można zobaczyć człowieka czytającego „Prawdę” na placu Czerwonym. Czy była to „bajka”, czy raczej teoretyczna możliwość? Można założyć, że optyka kamer systemów satelitarnych osiągnęła doskonałość. Jeśli tak, to czynnikiem limitującym zdolność rozdzielczą jest tylko dyfrakcja światła. Teoretyczna zdolność rozdzielcza (inaczej: dyfrakcyjna), zgodnie z teorią dyfrakcji, na otworze kołowym wynosi:

$$R_{dyf} = 1,22 \frac{\lambda}{d},$$

gdzie:

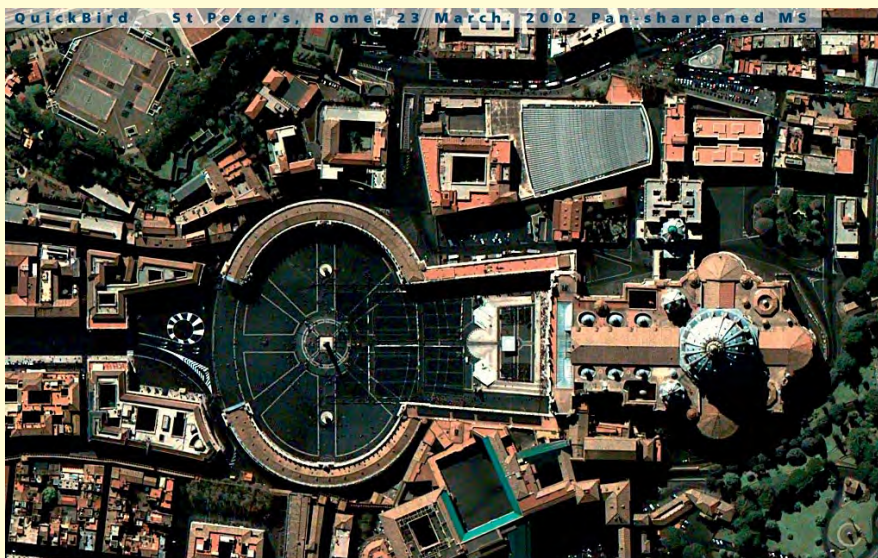
R_{dyf} – kąt, pod jakim widać najmniejszy element rozdzielczości (im mniejszy kąt, tym większa rozdzielczość),

λ – długość fali świetlnej,

d – średnica otworu wejściowego obiektywu.

Warto zauważyć, że teoretyczna zdolność rozdzielcza nie zależy od długości ogniskowej układu optycznego, a tylko od jego średnicy. Teleskop systemu IKONOS ma ogniskową 10 m i średnicę zwierciadła głównego 0,70 m. Teoretyczny terenowy element rozdzielczości takiego układu (wysokość orbity 680 km) w zakresie panchromatycznym ($\lambda = 600 \mu\text{m}$) wyniesie około 0,71 m.

Dla teleskopu systemu QuickBird o og-



Fot. 3. Rzym, Plac św. Piotra, 23 marca 2002; system QuickBird-2

Fot. 4. System IKONOS-2. Porównanie obrazów: wielospektralnego (piksel 4 m), panchromatycznego (piksel 1 m) i wielospektralnego „wyostrzonego” (piksel 1 m)

niskowej 8,78 m, średnicy zwierciadła 0,60 m i wysokości orbity 450 km otrzymamy odpowiednio 0,55 m. Wyniki te wskazują, że oba układy praktycznie już osiągnęły granice limitowane falową naturą światła. Powyższy wywód wskazuje jednocześnie na możliwości dalszego wzrostu rozdzielczości: można go osiągnąć, zwiększając średnicę teleskopu optycznego, co napotyka na poważne bariery technologiczne i finansowe.

Asy wojskowe

Globalna odwilż spowodowała otwarcie archiwów wojskowych. Amerykański program zwiadu kosmicznego o nazwie CORONA oparty był na kamerach fotograficznych serii KH (Key Hole – Dziurka od Klucza), konkurencyjny program ZSRR nosił kryptonim ZENIT [R. Kaczyński, „J-23 nadaje”, GEODETA 11/99]. Surfując po internecie, można podejrzec, jak obecnie toczy się historia satelitów serii KH. Obrazują w zakresie optycznym: widzialnym, bliskiej podczerwieni i podczerwieni termalnej. Układ optyczny kamery bazuje na teleskopie zwierciadlanym opartym na porównywalnych z teleskopem Hubble’a (średnica głównego zwierciadła wynosi aż 2,3 m). Pozwala to na obrazowanie z rozdzielczością 0,15-0,20 m. Od 1992 r. umieszczono na orbicie trzy wersje KH-11 i KH-12.

■ **KH-11** krąży po orbicie eliptycznej z apogeum 1100 km i perygeum 280 km. Posiada zapas paliwa umożliwiający manewrowanie na orbicie. Żywotność satelity obliczona jest na 8 lat.

■ **KH-12** różni się od poprzednika wielkością zapasów paliwa (7 ton!), co pozwala wydłużyć żywotność i daje możliwość manewrowania na orbicie. Paliwo może być uzupełniane z promu kosmicznego. Satelita ma masę 19 ton, długość 15 m i średnicę 4,5 m (dla porównania: IKONOS waży 720 kg i ma wysokość 1,8 m, a QuickBird odpowiednio 945 kg i 3,0 m).

■ **KH-13** jest dodatkowo niewykrywalny przez radary i czujniki podczerwieni.

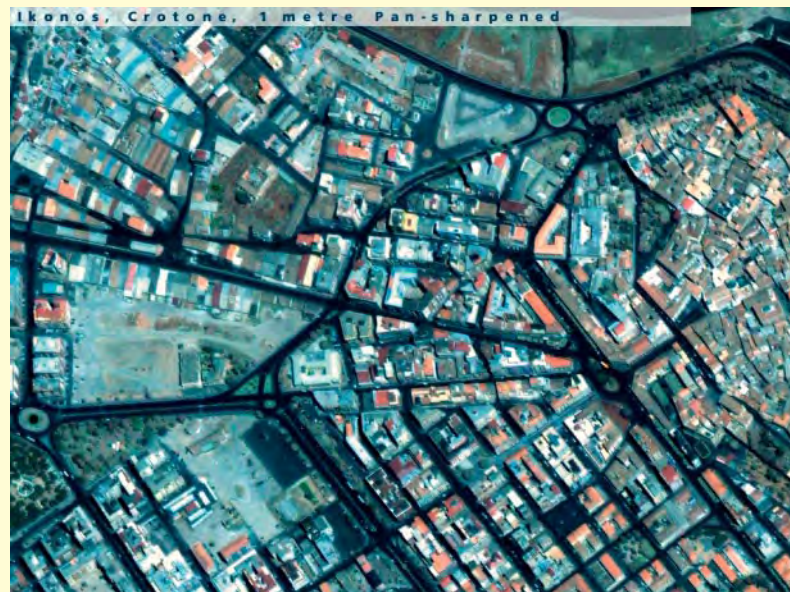
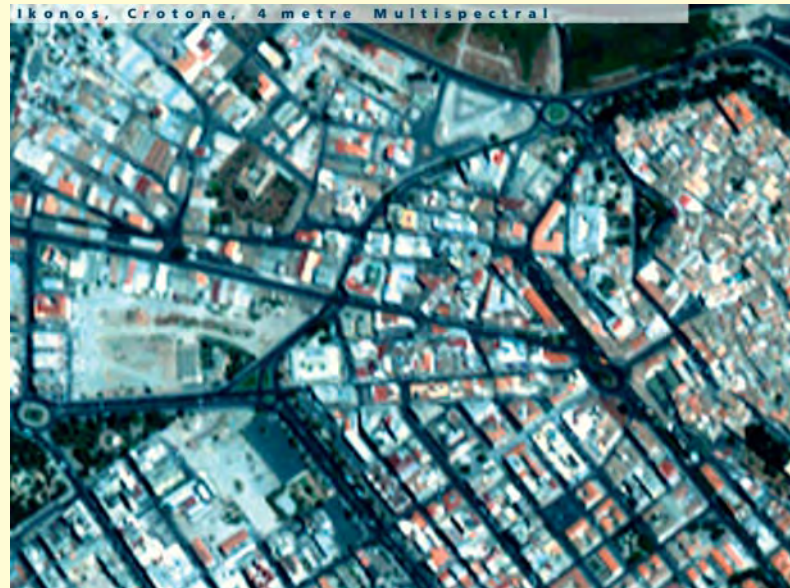
W maju 1999 r. wystrzelono z kolei pierwszego satelitę z serii **8X**, docelowo liczącej 24 satelity. Pozwoli to „rewizytować” dowolny punkt na Ziemi co 15 minut. Satelity te mają zapas paliwa większy niż KH i również mogą go uzupełniać, tankując z promu kosmicznego.

Oprócz systemów obrazowania pracujących w zakresie optycznym, a więc ograniczonych zachmurzeniem, operują satelity LACROSS (znane również jako Onyx lub Vega) obrazujące w zakresie mikrofalowym (radarowym), niezależnym od oświetlenia słonecznego i zachmurzenia. Rozdzielczość obrazów uzyskiwanych z takich systemów dochodzi do 1 m i mogą one wykrywać obiekty w ruchu (samoloty, samochody), podziemne bunkry i łodzie podwodne w zanurzeniu peryskopowym. Od 1995 r. działa również francuski wojskowy satelita Helios 1A o masie 2537 kg, obrazujący z orbity heliosynchronicznej o wysokości 675 km w zakresie optycznym, z pikselem terenowym 1 m.

Ten krótki przegląd satelitów wojskowych wskazuje, że systemy obrazowania dla potrzeb wojskowych i cywilnych stawiają sobie różne cele, rozwijają się według różnych priorytetów i możliwości finansowych.

Perspektywy systemów metrowych

Satelitarne obrazy wysokiej rozdzielczości dostępne są od końca 1999 r., tj. od umieszczenia na orbicie satelity IKONOS-2 – pierwszego komercyjnego systemu „metrowego”. Jednak do-





Fot. 5. Gmach Pentagonu; system EROS-A1, obraz panchromatyczny

piero teraz – po zaistnieniu systemu QuickBird i w przededniu uruchomienia kolejnych – można mówić o rozwoju rynku takich obrazów. Konkurencja wymusiła bogatszą ofertę i obniżenie cen. Należy więc oczekiwać dalszych zmian.

1. Obrazy „metrowe” mogą być wykorzystywane dla rozwiązywania bardzo różnych zadań interpretacyjnych i pomiarowych. Do grudnia 2001 r. IKONOS zarejestrował ponad 500 tys. scen obszarów wolnych od zachmurzenia, pokrywających ponad 20 mln km² i przewiduje się dalszy wzrost zainteresowania tymi zobrazowaniami. Space Imaging zapowiada na 2004 r. umieszczenie systemu z terenowym pikselem 0,5 m.
2. Satelitarne obrazy „metrowe” będą stopniowo wypierać drobnoskalowe zdjęcia lotnicze. Duża wydajność obrazowania powoduje, że systemy takie są bardziej „dyspozycyjne” od systemów lotniczych. Widać to na przykładzie naszego kraju, gdzie wykonanie zdjęć lotniczych nadal napotyka na trudności.
3. Wobec rosnącej popularności obrazów satelitarnych można zapytać o przyszłość tradycyjnych zdjęć lotniczych, szczegól-



Fot. 6. Barcelona – porównanie obrazu panchromatycznego i wielospektralnego; system QuickBird-2

nie wobec pojawienia się lotniczej kamery cyfrowej. Wiarygodne analizy i prognozy wskazują, że każde z tych trzech rozwiązań zajmie właściwe sobie miejsce na rynku. Ta koegzystencja potrwa do końca obecnego dziesięciolecia, ze stopniowym wypieraniem tradycyjnej kamery lotniczej przez cyfrową [Z. Kurczyński, „Lotnicze cyfrowe kamery fotogrametryczne”, GEODETA 12/2000].

● Jak wybierać produkty satelitarne

Jeżeli traktować wysokorozdzielcze obrazy jako zamienniki zdjęć lotniczych do rozwiązywania tradycyjnych zadań pomiarowych (produkcja i aktualizacja map, ortofotomap, DTM), to należy krytycznie podchodzić do potocznych informacji dotyczących pojęcia zdolności rozdzielczej i jakości geometrycznej tych obrazów. Brak tu jeszcze dostatecznego doświadczenia, pozwalającego na ogólniejsze wnioski.

1. Jeżeli zadaniem byłaby aktualizacja mapy topograficznej – co w warunkach krajowych jest bardzo ważne i pilne – to oprócz dokładności należałoby zapytać o możliwości interpretacyjne obrazów „metrowych” w relacji do zawartości aktualizowanej treści. Biorąc to pod uwagę, można postawić tezę, że obrazy „metrowe” pozwalają na aktualizację treści tradycyjnych map topograficznych w skali 1:25 000 i – w ograniczonym zakresie – 1:10 000 oraz produkcję ortofotomap w skali 1:10 000. Stosunkowo małe jeszcze doświadczenie produkcyjne z obrazami „metrowymi” nie upoważnia do sformułowania bardziej kategorycznych wniosków.
2. Oferuje się produkty o znacznie zróżnicowanej jakości i cenie. Przed podjęciem decyzji należy umiejętnie dopasować wybór produktu do konkretnego zadania. W danej sytuacji wystarczające mogą okazać się znacznie tańsze średniorozdzielcze obrazy, np.: EROS-A1, panchromatyczny z pikselem 1,8 m w cenie około 10 dol./km² czy IRS-1C/D, panchromatyczny z pikselem 5,8 m za około 0,5 dol./km².
3. Ważnym parametrem użytkowym obrazów jest wychylenie układu optycznego. Im większe wychylenie, tym większy wpływ rzeźby terenu, a zatem wymagana jest większa dokładność DTM i fotopunktów dla dokonania korekcji. Zwykle dopuszcza się maksymalne wychylenie do 15-25° od linii pionu.
4. Ceny wysokorozdzielczych obrazów i ich produktów nadal są wysokie. Odnosząc się do cen, należy dodatkowo zauważyć, że:

- porównywalny potencjał kartograficzny miałyby zdjęcia lotnicze w skali od 1:25 000 do 1:40 000, których koszt jest znacznie niższy i wynosi około 35-50 złotych/km²,
- dostęp użytkowników do nabytych produktów satelitarnych jest limitowany licencją, a ceny wzrastają, gdy udzielona jest ona dla kilku instytucji,
- standardowo dopuszcza się występowanie chmur na obszarze obejmującym do 20% powierzchni obrazu,
- w ogólnych kosztach przedsięwzięcia należy uwzględnić fakt, że fotopunkty i DTM dostarcza zamawiający.

Dr Zdzisław Kurczyński i dr Wiesław Wolniewicz są pracownikami naukowo-dydaktycznymi w Instytucie Fotogrametrii i Kartografii Politechniki Warszawskiej

Dobrym źródłem informacji o obrazach satelitarnych są serwisy internetowe, np. www.spaceimaging.com, www.sieurasia.com, www.eurimage.com, www.imagesatintl.com, www.digitalglobe.com, www.cdi.org, www.landinfo.com, www.sovinformspunik.com. Ilustracje zamieszczone w publikacji pochodzą z tych serwisów.