

STANISŁAW MULARZ, WOJCIECH DRZEWIECKI\*

### 3.1. INTERPRETACJA GŁÓWNYCH ELEMENTÓW KRAJOBRAZU NA TELEDETEKCYJNYCH OBRAZACH LOTNICZYCH I SATELITARNYCH

### 3.1. INTERPRETATION OF MAIN LANDSCAPE ELEMENTS ON AERIAL AND SATELLITE PHOTOGRAPHS

#### Streszczenie

W artykule przedstawiono teledetekcyjny model pozyskiwania informacji o przestrzeni krajobrazowej oraz walory interpretacyjne danych obrazowych pozyskiwanych z pułapu lotniczego i satelitarnego. Szczególną uwagę zwrócono na zdalne rejestracje multitemporalne w aspekcie dokumentowania zmian zachodzących w krajobrazie, zwłaszcza w odniesieniu do obszarów chronionych, takich jak Ojcowski Park Narodowy czy Bielańsko-Tyniecki Park Krajobrazowy. Dokładniej scharakteryzowano dane obrazowe wykorzystane na potrzeby przeprowadzonych badań: zdjęcia satelitarne amerykańskich systemów wywiadowczych CORONA oraz KH-7 i KH-9, obrazy satelitarne Landsat TM, obrazy satelitarne EROS-A oraz ortofotomapy wykonane w ramach projektów PHARE i LPIS. Przedstawiono również dostępność tego rodzaju materiałów dla obszaru Polski.

*Słowa kluczowe: teledetekcja, fotointerpretacja, krajobraz, obrazy multitemporalne, Ojcowski Park Narodowy, Bielańsko-Tyniecki Park Krajobrazowy*

#### Abstract

This paper presents a remote-sensing model of obtaining landscape data and the interpretation properties of the imagery data obtained from aerial and satellite photographs. Special attention was paid to remote multitemporal imagery in the aspect of documenting changes that occur in the landscape, especially with reference to such protected areas as the Ojcowski National Park or the Bielańsko-Tyniecki Landscape Park. The imagery data used in research were described in detail: satellite pictures from the American CORONA and KH-7 and KH-9 Surveillance System, Landsat TM and EROS-A, as well as orthophotomaps produced under the PHARE and LPIS Projects. The authors also present the availability of such materials with respect to the territory of Poland.

*Keywords: remote sensing, photo interpretation, landscape, multitemporal images, Ojców National Park, Bielany-Tyniec Landscape Park*

\* Dr hab. inż. Stanisław Mularz, prof. AGH, dr inż. Wojciech Drzewiecki, Katedra Geoinformacji, Fotogrametrii i Teledetekcji Środowiska, Wydział Geodezji Górniczej i Inżynierii Środowiska, Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie.

### Teledetekcyjny model rejestracji krajobrazu

Obraz powierzchni Ziemi rejestrowany za pomocą technik teledetekcji zarówno lotniczej, jak i satelitarnej stanowi rodzaj obiektywnej dokumentacji, która pozwala nie tylko na charakterystykę jakościową poszczególnych komponentów krajobrazu, czy też kategorii użytkowania i pokrycia terenu, ale umożliwia również wymierną geometryzację przestrzeni krajobrazowej w aspekcie kartograficznym, (np. w postaci fotomap, ortofotomap czy stereo-ortofotomap). Ponadto, zdalne rejestracje multitemporalne stwarzają możliwość dokumentowania zmian zachodzących w obrębie różnych komponentów krajobrazu, w tym również śledzenia zjawisk i procesów dynamicznych. Szczególnie cenne dla tego rodzaju studiów są fotolotnicze i satelitarne materiały archiwalne, których treść topograficzna i tematyczna stanowi swego rodzaju tło referencyjne dla prowadzenia kompleksowego monitoringu krajobrazu, zwłaszcza w odniesieniu do obszarów chronionych (parki narodowe, parki krajobrazowe itp.). Można uznać, że taką właśnie rolę spełniają zdjęcia satelitarne programu CORONA wykonywane w latach 1960–1972 w ramach amerykańskich misji zwiadowczych, m.in. dla obszaru Polski, a także zachowane i dostępne aktualnie archiwalne zdjęcia lotnicze np. z okresu międzywojennego.

Teledetekcyjny model rejestracji przestrzeni krajobrazowej bazuje na różnorodnych mechanizmach interakcyjnych promieniowania elektromagnetycznego z materią, w tym także na zachodzących w atmosferze ziemskiej. Bowiern różne elementy tworzące w kompleksowym ujęciu przestrzeń krajobrazową odbijają selektywnie padające nań promieniowanie elektromagnetyczne i w związku z tym mogą być zarejestrowane z odpowiednim stopniem wzajemnego kontrastu. Wielkość odbicia (odpowiedź spektralna) danego obiektu czy materiału, w określonym zakresie spektrum, zależy od jego cech fizycznych, chemicznych, stanu skupienia oraz charakteru powierzchni. Obraz, tworzony za pomocą zdalnych technik, stanowi więc mniej lub bardziej doskonały zbiór informacji o powierzchni Ziemi, które odpowiednio odczytane mogą być przydatne, czy wręcz są niezastąpione dla realizacji różnych celów, w tym także dla potrzeb monitorowania krajobrazu.

### Walory interpretacyjne teledetekcyjnych danych obrazowych

W procesie rozpoznawania i interpretacji teledetekcyjnych danych obrazowych zasadnicze znaczenie ma nie tyle poziom jasności spektralnej obiektów, ile wzajemny kontrast między nimi. Dwa obiekty, których różnica jasności spektralnej jest niewielka, będą trudne do wydzielenia na zdjęciu, chociaż obydwa będą posiadały wysoki współczynnik odbicia promieniowania. Współczesne techniki teledetekcyjne pozwalają na znaczne rozszerzenie percepcji krajobrazu poza spektrum widzialne poprzez wizualizację efektów odbicia bądź emisji promieniowania elektromagnetycznego także w ultrafiolecie, bliskiej, środkowej i dalekiej podczerwieni, a także w regionie mikrofal (obrazy radarowe). W tym kontekście szczególne znaczenie mają multi-

spektralne obrazy pozyskiwane przede wszystkim z pałapu satelitarnego, np. systemy Landsat [TM, ETM+], SPOT, IRS, JRS o średniej rozdzielczości przestrzennej (5–30 metrów) czy też wysokorozdzielcze systemy, np. Ikonos, QuickBird, OrbView-3 bądź EROS-B (wielkość piksela od 0,6 do 1,0 metra w trybie panchromatycznym i od 2,44 do 4,0 metrów w trybie wielospektralnym).

Proste odczytywanie treści zdalnych rejestracji obrazowych sprowadza się do rozpoznania obiektów na podstawie zespołu tzw. bezpośrednich cech rozpoznawczych, które są nieodzowną właściwością danego obiektu i charakteryzują go pod względem: geometrii, struktury, właściwości optycznych i spektralnych, a więc: kształtu, wielkości obiektu, tonu lub barwy, jego struktury i tekstury. Natomiast interpretacja obrazu, chociaż bazuje na procesie odczytywania wykorzystującym oznaki bezpośrednie, posługuje się również cechami pośrednimi, takimi jak: cień własny i cień rzucany, lokalizacja danego obiektu i jego powiązanie z innymi elementami krajobrazu, definiowane jako tzw. asocjacje.

Poniżej przedstawiono ogólną charakterystykę podstawowych komponentów przyrodniczych i antropogenicznych tworzących przestrzeń krajobrazową w aspekcie definicji ich cech rozpoznawczych i walorów interpretacyjnych.

Interpretacja ukształtowania powierzchni terenu na pojedynczych zdjęciach obok wykorzystania bezpośrednich cech rozpoznawczych winna wykorzystywać również analizę krajobrazową, uwzględniającą wszystkie komponenty środowiska geograficznego. Należy również brać pod uwagę związki, jakie zachodzą między rzeźbą, roślinnością, glebami oraz różnymi elementami antropogenicznymi. Odzworowane na zdjęciach kompleksy leśne maskują w znacznym stopniu powierzchnię terenu. O jej ukształtowaniu możemy wnioskować na podstawie „morfologii” górnej powierzchni lasu. Interpretator musi wówczas ocenić stopień jednorodności drzewostanu oraz zmiany wysokości, wynikające z różnic wiekowych i gatunkowych określonych partii lasu. Ważnym elementem dla prowadzenia tego rodzaju oceny jest wyznaczanie wysokości drzew na podstawie pomiaru paralaks podłużnych lub cienia rzucanego. Tego rodzaju interpretacja może dotyczyć zarówno wydzielania w obrębie zdjęcia (obrazu) dużych jednostek morfologicznych, jak też poszczególnych form terenowych, takich jak: stoki, linie krawędziowe, załomy, progi terenowe itp. Wykorzystanie obserwacji stereoskopowej niepoziomie zwiększa możliwość prawidłowego rozpoznania cech morfologicznych analizowanego obszaru. Stereoskopowy model terenu pozwala na jednoznaczne zdefiniowanie nie tylko ogólnych cech rzeźby, ale również, w zależności od skali zdjęcia czy obrazu, pozwala na rozpoznanie elementów mezo- i mikroreliefu powierzchni. Dodatkową zaletą analizy stereoskopowej jest możliwość prowadzenia pomiarów, a więc w konsekwencji charakterystyka ilościowa form terenowych, jak na przykład określania wysokości względnej poszczególnych elementów rzeźby, nachylenia zboczy itp. Na zdjęciach lotniczych dobrze czytelne są na ogół różnego rodzaju formy erozyjne i akumulacyjne, takie jak: doliny, wąwozy, erozyjne formy skalne, tarasy, stożki napływowe itp.

Poszczególne elementy sieci hydrograficznej są na ogół łatwe do rozpoznania na zdjęciach lotniczych i obrazach satelitarnych, dzięki kontrastowi spektralnemu, jaki tworzy powierzchnia wody z otaczającym terenem. Cieki powierzchniowe (rzeki, potoki, strumienie itp.) mają wydłużony liniowy kształt oraz charakterystyczny meandrujący przebieg. System wałów przeciwpowodziowych stanowi, zwłaszcza dla większych rzek, dodatkową cechę rozpoznawczą. Mniejsze rzeki, kanały, rowy melioracyjne demaskują zazwyczaj strefy zadrzewień lub zakrzewień o wydłużonym, liniowym kształcie doskonale widoczne na zdjęciach lotniczych, a nawet średniorozdzielczych obrazach satelitarnych. Zbiorniki wodne, naturalne (jeziora) oraz sztuczne (zbiorniki retencyjne, hydroenergetyczne, stawy hodowlane itp.), są z reguły dobrze odwzorowane na zdjęciach lotniczych i obrazach satelitarnych. O jakości wody w zbiornikach oraz warunkach przyrodniczych można wnioskować na podstawie przezroczystości wody, jej barwy oraz obecności roślinności wodnej. Zbiorniki wodne są bardzo zróżnicowane pod względem wielkości i kształtu. Charakteryzuje je mniej lub bardziej urozmaicona linia brzegowa, w zależności od morfologii otaczającego zbiornika terenu.

Szata roślinna – rozumiana jest tutaj jako uprawy rolne i leśne oraz enklawy zbiorowisk naturalnych lub quasi-naturalnych. Zdrowa, zielona roślinność jest na ogół łatwo rozpoznawana na zdjęciach lotniczych (panchromatycznych, barwnych, spektrostrefowych, wielospektralnych), podobnie jak i na multispektralnych zobrazowaniach satelitarnych, ze względu na relacje odbijalności w poszczególnych zakresach spektrum widzialnego i bliskiej podczerwieni, niezależnie od różnic gatunkowych. Podstawowymi cechami rozpoznawczymi dla kompleksów leśnych są barwa lub fototon (w zależności od techniki rejestracji), struktura i tekstura obrazu, pokrój korony, kształt cienia rzucanego, a także związki (asocjacje) z określonym środowiskiem determinującym warunki siedliskowe. Obraz lasu na zdjęciach lotniczych charakteryzuje się strukturą drobną-, średnio- lub gruboziarnistą, w zależności od skali zdjęcia oraz teksturą bezładną lub uporządkowaną (pasmową, kratową) dla upraw leśnych. Kształt korony drzew wpływa na strukturę fotograficznego obrazu lasu, gdyż znaczna różnica w odwzorowaniu oświetlonej części korony i części zacienionej podkreślają ziarnistość w odwzorowaniu górnej powierzchni lasu. Rzucany cień umożliwia interpretację składu gatunkowego kompleksu leśnego, a także daje podstawę do szacowania drzew.

Obszary kultury rolnej charakteryzuje „mozaikowa” (szachownicowa) tekstura obrazu fotograficznego, podkreślająca zazwyczaj swoją geometrią ukształtowanie morfologiczne powierzchni terenu. Interpretacja roślinności uprawowej oraz określenie jej struktury jest zagadnieniem dość złożonym, zależnym od rodzaju i skali zdjęć, fazy fenologicznej, a przede wszystkim od doświadczenia interpretatora.

Stosunkowo najłatwiej rozpoznać obszary trawiaste (łąki i trwałe użytki zielone). Charakteryzują się one zazwyczaj jednolitym fototonem (lub barwą) i amorficzną strukturą obrazu. Ważną cechą są również związki łąk z trwałymi

mi elementami krajobrazu, takimi jak: doliny rzek, polany śródleśne, lokalne obniżenia morfologiczne itp.

Elementy infrastruktury komunikacyjnej strefy zabudowy, jej rodzaje i funkcje stanowią szczególnie ważny wymiar udziału czynników antropogenicznych w krajobrazie. I tak, szlaki komunikacyjne (sieć drogowa i kolejowa) demaskuje na zdjęciach lotniczych i obrazach satelitarnych charakterystyczny liniowy kształt oraz powiązanie i współistnienie z siecią osiedleńczą. Elementy infrastruktury komunikacyjnej kontrastują z reguły z otoczeniem barwą lub fototonem w zależności od charakteru nawierzchni i kategorii danej drogi. Bardzo często drogi o znaczeniu lokalnym maskowane są przez szpalery drzew przydrożnych, które tym samym stanowią cechę rozpoznawczą dla przebiegu drogi, niezwykle cenną, zwłaszcza przy interpretacji zdjęć zimowych. Kręty przebieg, na ogół jasny ton (barwa) oraz mała szerokość – te cechy deszyfrują drogi gruntowe lub polne. Autostrady bądź drogi szybkiego ruchu charakteryzuje z reguły dwupasmowy układ, łagodne łuki oraz odpowiednie do skali zdjęcia: wielkość, obecność rozjazdów, bezkolizyjne skrzyżowania itp.

Linie kolejowe można rozpoznać na podstawie prostoliniowego przebiegu, łagodnych łuków, zazwyczaj obecności nasypów oraz odfotografowania się torowiska na zdjęciach w większych skalach. Stacje kolejowe, dworce, które towarzyszą tym szlakom cechuje obecność bocznicy, rozjazdów powiązanych z lokalizacją charakterystycznych kolejowych obiektów budowlanych.

Sieć osiedleńcza doskonale geometryzuje się na zdalnych zobrazowaniach, praktycznie niezależnie od metody rejestracji. W zależności od skali zdjęć lotniczych można rozpoznawać układ urbanistyczny miast, różnej wielkości osiedli, obiektów przemysłowych czy nawet dokonywać identyfikacji pojedynczych budynków i budowli łącznie z ich funkcją. Podstawowymi cechami rozpoznawczymi są tutaj kształt i wielkość obiektów, ich lokalizacja i wzajemne związki z otaczającą przestrzenią, cień rzucany oraz możliwość obserwacji stereoskopowej. Osadnictwo wiejskie może być bez trudu rozpoznawane, zwłaszcza na zdjęciach lotniczych w większych skalach, które umożliwiają nie tylko określenie cech typologicznych wsi, takich jak: kształt osiedli, ich usytuowanie względem ciągów komunikacyjnych, stopień skupienia gospodarstw, ale także identyfikację zabudowań gospodarczych, budynków mieszkalnych wraz z oceną zamożności jego właścicieli.

Osiedla typu miejskiego cechuje większa koncentracja zabudowy oraz mniej lub bardziej czytelne założenia urbanistyczne, zwłaszcza jego części centralnej. Rozmiary budynków i budowli, obecność zabudowy wielopiętrowej świadczą o znaczeniu i funkcji danego osiedla miejskiego. Śledzenie tego zróżnicowania pozwala często zrekonstruować kolejność rozwoju miasta i jego przebudowy. Stereoskopowa analiza zdjęć lotniczych pozwala na jakościowe rozpoznanie stanu zabudowy, układu ulic, sieci komunikacyjnej, zespołów zabytkowych, obiektów handlowych, usługowych, dzielnic mieszkalnych oraz obszarów i obiektów rekreacyjno-sportowych (parki, skwery, zieleńce, boiska sportowe itp.).

Analiza zdjęć lotniczych umożliwia dokonanie stereofowego podziału aglomeracji miejskiej wraz z obszarami podmiejskimi. Ze zdjęć wielkoskalowych można uzyskać informacje o poszczególnych obiektach, ich wysokości, kształcie, rodzaju pokrycia dachów, o stanie nawierzchni ulic oraz infrastrukturze nadziemnej i podziemnej miasta. Zdjęcia w skalach średnich i małych stwarzają możliwość ogólnego spojrzenia na organizm miejski, zgeneralizowaną strukturę jego części składowych, powiązanie z bliższym i dalszym otoczeniem wraz z oceną walorów krajobrazowych (morfologia powierzchni, rzeki, jeziora, kompleksy leśne itp.). Obiekty przemysłowe oraz niekiedy całe sektory przemysłowe posiadają swoją specyfikę interpretacyjną. Charakterystyczne cechy tych obiektów to kształt, wielkość i z reguły szeregowy układ zabudowań i urządzeń przemysłowych, niekiedy obecność kominów i wież chłodniczych zazwyczaj łatwych do zidentyfikowania.

Niezwykle cennym walorem materiałów fotolotniczych, a obecnie także niektórych zobrazowań satelitarnych (np. systemy SPOT, IRS-1,2), jest możliwość uzyskiwania modelu stereoskopowego terenu. Wykorzystanie efektu stereoskopowego pozwala bowiem obserwatorowi na rekonstrukcję relacji przestrzennych odfotografowanego na zdjęciach terenu, a dodatkowo występujące przewyższenie skali pionowej modelu, umożliwia uchwycenie niewielkich nawet różnic wysokości i ich pomiar. Dotyczy to zarówno ukształtowania powierzchni terenu, jak też elementów pokrycia topograficznego, takich jak: obiekty budowlane, szata roślinna (piętrowość), linie napowietrzne, itp. Stereoscopia w znaczący sposób wspomaga percepcję treści zdjęć lotniczych. Umożliwia m.in. prowadzenie kompleksowych studiów fotointerpretacyjnych, w tym przede wszystkim szeroko pojętych studiów przyrodniczych oraz projektowo-planistycznych. Efekt stereoskopowy ma kapitalne znaczenie dla interpretacji zdjęć lotniczych. W wielu przypadkach już pobieżna analiza modelu stereoskopowego może zastąpić żmudne i mało efektywne procedury dedukcji dla odczytania np. morfologii powierzchni terenu na podstawie obserwacji pojedynczych zdjęć.

U podstaw interpretacji obrazów teledetekcyjnych leży postrzeganie – percepcja wzrokowa, polegająca na odbiciu w świadomości obserwatora obiektów i zjawisk świata zewnętrznego.

W identyfikacji obiektów dużą rolę odgrywają wywołane w świadomości obserwatora stereotypy myślowe i wyobrażenia, czyli obrazy obiektów, zjawisk i procesów oparte na wcześniejszych spostrzeżeniach, doświadczeniach, wiedzy i wyobraźni. Jednak w wielu przypadkach proces interpretacji musi być zakończony na etapie rozpoznania obiektów bez ich szczegółowej identyfikacji. Ma to miejsce zwłaszcza wówczas, gdy rezultaty interpretacji nie mogą być zweryfikowane bądź bezpośrednio w terenie, bądź przynajmniej na podstawie informacji dostępnych z innych źródeł niż analizowane dane teledetekcyjne (materiały kartograficzne, raporty, publikacje itp.). W toku analizy etapy wykrycia i rozpoznawania obiektów przebiegają niemal równocześnie, natomiast identyfikacja obiektu wymaga od obserwatora zazwyczaj większego zaangażowania myślowego, rozpatrzenia istnienia obiektu w szer-

szym kontekście, odkrycia wzajemnych powiązań między różnymi grupami obiektów, czy wreszcie sięgnięcia do innych, niż teledetekcyjne, zasobów informacji o rozpatrywanym obszarze. Etap odczytywania szczegółowego występuje na przemian z kontrolą, podczas której interpretator sprawdza rezultaty odczytywania, uściśla i weryfikuje treść rozpoznanych obiektów i uzupełnia faktami pominiętymi wcześniej. Identyfikacja obiektów stanowi zakończenie etapu odczytywania treści obrazu i pozwala przejść do interpretacji właściwej.

Analiza merytoryczna (znaczeniowa) skupia się na treści zdjęcia/obrazu i jest ona prowadzona w celu wyodrębnienia obiektów, zjawisk i procesów będących przedmiotem interpretacji.

Interpretacja jest zatem procesem modelowania rzeczywistości krajobrazowej, przy czym model rzeczywistości przechodzi przez kolejne stadia: obraz terenu, model w świadomości interpretatora, model uogólniony – abstrakcyjny (na wyższym poziomie świadomości), model hipotetyczny, następnie zweryfikowany (skorygowany) i wreszcie model pragmatyczny (decyzyjny). Przedstawiony zarys metodyki postępowania interpretacyjnego nie jest uniwersalną formułą, uwypukla jedynie najistotniejsze stadia i wyniki wpływające na przebieg i rezultaty interpretacji zdalnych zobrazowań.

#### **Kartometryczność obrazowych danych teledetekcyjnych w aspekcie ich interpretacji tematycznej**

Obrazowe dane teledetekcyjne stanowią obiektywny zapis krajobrazu, kompleksową rejestrację jego komponentów i zachodzących pomiędzy nimi relacji, zwłaszcza przestrzennych (por. [12]). Ze względu na występujące na nich zniekształcenia geometryczne nie mogą być jednak zazwyczaj traktowane jak mapa. Zniekształcenia te spowodowane są niepionowością sensora podczas rejestracji oraz różnicami wysokości występującymi na odwzorowywanym obszarze (im większe różnice wysokości, tym większe zniekształcenia). Ich efektem jest niejednorodność skali odwzorowania i brak zasadniczej cechy mapy – kartometryczności (czyli niemożność pomiaru długości, kątów i pól).

Rezultaty interpretacji treści tematycznej zdalnych zobrazowań, o ile zachodzi taka konieczność, mogą być wnoszone na podkład mapowy, którym jest zazwyczaj mapa topograficzna w odpowiedniej skali. Przy tego rodzaju podejściu kartometryczność samego nośnika informacji (obrazu) nie ma praktycznie znaczenia.

Dla wielu aplikacji, zwłaszcza przyrodniczych, ważniejsza jest przybliżona lokalizacja interpretowanych obiektów, zjawisk czy procesów oraz występujące pomiędzy nimi relacje przestrzenne niż zachowanie wymogów dokładnościowych, wymaganych np. przez instrukcje odnoszące się do opracowywania map topograficznych. Interpretator powinien jednak mieć świadomość istniejących nieścisłości i umieć oszacować ich wielkość. Może się wówczas okazać, iż używane zdjęcia czy obrazy uznać można za w pełni kartometryczne z punktu widzenia dokładności, z jaką chce on określać mierzone wielkości. Niejednokrotnie wymaganą przez interpretatora dokład-



ność można uzyskać w wyniku stosunkowo prostego przetworzenia obrazu – np. z wykorzystaniem metod wielomianowych.

W przypadkach kiedy wymagana jest większa dokładność, niezbędne staje się sięgnięcie po specjalistyczne rozwiązania wypracowane na gruncie fotogrametrii lotniczej i satelitarnej. Pozwalają one na takie przetworzenie opracowywanego obrazu, w wyniku którego zachowana zostaje jego treść fotograficzna, ale uzyskuje on geome-

kształceń krajobrazu) i umożliwić porównanie z dokumentami planistycznymi. Konsekwencję przyjętych założeń stanowiła rezygnacja z wykorzystania archiwalnych zdjęć lotniczych. Wykonywane były one nieregularnie, w różnych skalach, dla różnych obszarów kraju, a ich opracowanie jest czasochłonne i stosunkowo kosztowne. Ponadto na przestrzeni lat 1940–1970 zdjęcia lotnicze w Polsce wykonywane były niemal wyłącznie na potrzeby wojska i do dziś pozostają w jego wyłącznej dyspozycji (praktycznie

Tabela 1

## Wykorzystane materiały teledetekcyjne

Rodzaj obrazu	Data rejestracji
Zdjęcie satelitarne systemu KH-7	13.07.1966
Zdjęcie satelitarne systemu KH-9	01.04.1974
Obraz satelitarny Landsat 5 TM	27.09.1985
Orofotomapy ze zdjęć lotniczych (PHARE)	1997 rok
Orofotomapy ze zdjęć lotniczych (LPIS)	lata 2002–2003
Obraz satelitarny EROS-A	15.10.2007

tryczne (i kartometryczne) cechy mapy. Jeśli w tego rodzaju procesie skorygowany zostanie zarówno wpływ nachylenia obrazu względem powierzchni terenu, jak i wpływ różnic wysokości, w efekcie powstanie orofotomapa – obraz jaki powstałby, gdyby jego rejestracja odbywała się w rzucie ortogonalnym. Jej wykonanie jest możliwe na ogół jedynie z użyciem specjalistycznego oprogramowania fotogrametrycznego (wyjątek stanowią niektóre pakiety GIS, w których istnieje możliwość ortorektifikacji pojedynczych zdjęć lotniczych o znanych elementach orientacji).

## Charakterystyka wykorzystanych materiałów

Interpretacja wieloczasowych obrazowych danych teledetekcyjnych stwarza możliwość wykrycia i prześledzenia zmian, jakie zaszły w przestrzeni pomiędzy datami ich rejestracji. Uzyskane w ten sposób informacje, o rodzaju przekształceń krajobrazu oraz czasie ich wystąpienia, stanowią materiał umożliwiający określenie skuteczności (czy też skutków) prowadzonej polityki przestrzennej, której wyrazem były zapisy zawarte w obowiązujących dokumentach planistycznych. Skala i rozdzielczość interpretowanych obrazów powinny umożliwiać określenie form pokrycia i użytkowania terenu na poziomie szczególności determinowanym skalą i zakresem analizowanych dokumentów. Najkorzystniejsza sytuacja zachodzi wtedy, gdy mamy do dyspozycji obrazy pochodzące z tego samego sensora lub mające zbliżoną charakterystykę (np. barwne zdjęcia lotnicze w zbliżonej skali). Niestety w praktyce sytuacja taka występuje stosunkowo rzadko.

Dobierając materiały teledetekcyjne dla potrzeb zrealizowanego projektu badawczego starano się wykorzystać obrazy dostępne nie tylko dla analizowanych terenów, ale także potencjalnie dla dowolnego innego obszaru Polski. Drugim ważnym kryterium doboru była ich kartometryczność lub łatwość przetworzenia do postaci kartometrycznej, tak by zapewnić sprawne przeprowadzenie procesu fotointerpretacji (a w szczególności ułatwić wykrycie prze-

są one wciąż niedostępne dla celów cywilnych). W efekcie badania oparto na danych satelitarnych oraz orofotomapach lotniczych wykonanych w ramach ogólnokrajowych projektów PHARE i LPIS (por. tab. 1).

Najstarsze wykorzystane w ramach zrealizowanego projektu dane teledetekcyjne stanowią zdjęcia wykonane w ramach realizowanych przez Stany Zjednoczone od 1960 r. misji satelitarnego rozpoznania obrazowego. Cztery pierwsze serie tych misji nosiły kryptonim CORONA. W latach 1960–1972, w czasie trwania programu CORONA i kolejnych programów zwiadowczych ARGON i LANYARD na całym świecie wykonanych zostało z użyciem kamer panoramicznych o różnych parametrach ponad 860 tys. zdjęć. Na szczególną uwagę zasługują zdjęcia programu CORONA zrobione kamerami serii KH-4B, którymi w latach 60. pokryto cały obszar Polski. Kamery tej serii posiadały rozdzielczość terenową wynoszącą 1,8 m, umożliwiającą wykonywanie powiększeń do skali 1:7500<sup>1</sup>.

Zdjęcia systemów CORONA, ARGON i LANYARD odtajnione zostały w roku 1995. Siedem lat później odtajniono zdjęcia systemów KH-7 i KH-9. KH-7 był systemem rozpoznania obrazowego działającym w latach 1963–1967, przeznaczonym do pozyskiwania zdjęć obiektów uznanych za posiadające znaczenie strategiczne. Rozdzielczość terenowa zdjęć wynosiła początkowo 1,2 m, a od roku 1966 wzrosła do 0,6 m. Są to zatem obrazy, które pod względem kartometryczności i potencjału interpretacyjnego uznać można za porównywalne z obrazami panchromatycznymi pozyskiwanymi przez najnowsze cywilne systemy satelitarne, takie jak Ikonos czy QuickBird (por. np. [4]).

Nieco inne było przeznaczenie systemu KH-9 działającego w latach 1973–1980. Rozdzielczość terenowa pozyskiwanych obrazów wynosiła w tym przypadku początkowo około 9, a później około 6 m. Są to więc obrazy porównywalne z późniejszymi panchromatycznymi obrazami cywilnych systemów SPOT i IRS. Miały one nie tyle zastosowanie rozpoznawcze, ile kartograficzne.

Wszystkie odtajnione zdjęcia wykonane przez amerykańskie wojskowe systemy satelitarne dostępne są obecnie w postaci odbitek lub skanów za pośrednictwem EROS Data Center, na którego serwerze znajduje się również serwis umożliwiający wyszukiwanie, przeglądanie i zamawianie tych materiałów. Koszt udostępnienia jednego zdjęcia (niezależnie od jego rozmiarów, które różnią się dla poszczególnych systemów satelitarnych) wynosi 30 USD.

Ponieważ zdjęcia wykonywane w latach 80. przez kolejne amerykańskie wojskowe misje satelitarne (KH-8 i KH-11) pozostają wciąż tajne, a zdjęcia z pułapu satelitarnego wykonywane przez systemy radzieckie są obecnie praktycznie niedostępne, dla zilustrowania stanu z połowy lat 80. posłużyliśmy się obrazem pochodzącym z cywilnego satelity serii Landsat. Umieszczenie na orbicie pierwszego satelity z tej serii (Landsat 1) w roku 1972 dało początek wykorzystaniu teledetekcji satelitarnej dla celów cywilnych. Obrazy użyte w ramach projektu badawczego pochodzą z satelity Landsat 5 umieszczonego na orbicie w roku 1984 i działającego do dnia dzisiejszego. Umieszczony na nim skaner Thematic Mapper (TM) pozyskuje obrazy wielospektralne (6 kanałów) o rozdzielczości przestrzennej wynoszącej 30 m oraz obraz w paśmie termalnym z rozdzielczością 120 m. Wielospektralny tryb rejestracji obrazów, obecność kanałów z zakresu średniej i termalnej podczerwieni oraz ponad dwudziestoletni okres pozyskiwania danych powodują, iż obrazy uzyskane przez tego satelitę stanowią zasób trudny do przecenienia w aspekcie badań dotyczących zmian środowiska.

W roku 1995 w ramach programu pomocowego Unii Europejskiej PHARE rozpoczęto realizację projektu mającego na celu wykonanie kolorowych zdjęć lotniczych dla obszaru całej Polski. Całość projektu zrealizowano praktycznie do roku 1999 (dla niewielkiego obszaru w północno-wschodniej części kraju zdjęcia wykonano w roku 2002). Całość obszaru Polski pokryta została barwnymi zdjęciami lotniczymi w skali 1:26 000, umożliwiającymi wykonanie ortofotomap w skali 1:10 000. Nie podjęto jednak ogólnokrajowego projektu realizacji ortofotomapy. Jedynie niektóre województwa (m.in. małopolskie i śląskie) zdecydowały się na wykonanie ortofotomap dla całości swojego obszaru. W ramach projektu PHARE wykonano dodatkowo również zdjęcia w skali 1:5000 dla dwudziestu miast (Białystok, Elbląg, Gdańsk, Gdynia, Gorzów Wielkopolski, Kalisz, Katowice, Kraków, Lublin, Łódź, Radom, Rzeszów, Słupsk, Szczecin, Tarnów, Toruń, Wałbrzych, Warszawa, Wrocław, Zielona Góra). Zdjęcia dostępne są w Centralnym Ośrodku Dokumentacji Geodezyjnej i Kartograficznej w Warszawie, ortofotomapy – w odpowiednich ośrodkach wojewódzkich.

Ogólnokrajowy program wykonania ortofotomap dla obszaru całego kraju podjęto natomiast w związku z budową Systemu Identyfikacji Działek Rolnych (LPIS), na potrzeby Zintegrowanego Systemu Zarządzania i Kontroli (IACS). W latach 2002–2006 wykonano nowe zdjęcia lotnicze dla większości terytorium Polski (na niewielkich fragmentach wykorzystano wysokorozdzielcze obrazy satelitarne lub zdjęcia lotnicze wykonane w ramach progra-

mu PHARE). Na uwagę zasługuje fakt, iż dla południowo-wschodniej części kraju (województwa podkarpackie, świętokrzyskie, małopolskie, śląskie oraz fragmenty województw opolskiego, łódzkiego, mazowieckiego i lubelskiego) wykonywano zdjęcia w skali 1:13 000. Materiały te dostępne są zarówno w postaci zdjęć, jak i ortofotomap, co znakomicie zwiększa możliwości ich wykorzystania. Aktualną informację o stanie pokrycia terytorium Polski ortofotomapami i ich aktualności uzyskać można w serwisie internetowym Centralnego Ośrodka Dokumentacji Geodezyjnej i Kartograficznej w Warszawie.

Ostatnie, z wykorzystanych w ramach przeprowadzonych badań, obrazy pochodzą z wysokorozdzielczego satelity EROS-A należącego do izraelskiej firmy ImageSat International. Satelita ten rejestruje panchromatyczne obrazy skanerowe o terenowym rozmiarze piksela wynoszącym 1,9 m. Podobnie jak w przypadku innych wysokorozdzielczych satelitów komercyjnych (Ikonos, QuickBird, WorldView) obrazy pozyskiwane są na zamówienie (dostępne są również obrazy archiwalne wykonane na zamówienia innych użytkowników). Użytkownik może uzyskać dane surowe (Level 0A), obrazy poddane korekcji radiometrycznej (Level 1A) lub radiometrycznej i geometrycznej (Level 1B). W tym ostatnim przypadku korekcja przeprowadzana jest dla średniej wysokości w obrębie zarejestrowanej sceny. Na życzenie możliwe jest również dokonanie ortorektyfikacji.

Wykorzystane w ramach przeprowadzonych badań obrazy satelitarne poddano ortorektyfikacji z użyciem specjalistycznego oprogramowania Geomatica OrthoEngine firmy PCI Geomatics. W przypadku obrazów Landsat 5 i EROS-A ortorektyfikację przeprowadzono, używając ścisłego modelu orbitalnego. Dla zdjęć satelitarnych KH-7 i KH-9 zastosowano podejście oparte na wykorzystaniu ilorazów wielomianowych (por. np. [7]). Ortorektyfikację wykonano, opierając się na modelu wysokościowym DTED Level 2. Punkty dostosowania pozyskano z ortofotomap wykonanych w ramach programu LPIS. W tym miejscu należy zaznaczyć, iż w trakcie ponad trzydziestu lat, jakie minęły pomiędzy rejestracją zdjęć satelitarnych i zdjęć lotniczych użytych do wykonania tych ortofotomap, zaszło w terenie wiele zmian polegających m.in. na przebudowie sieci drogowej (poszerzenia dróg, zmiany ich przebiegu, przebudowy skrzyżowań). W tej sytuacji znalezienie odpowiadających sobie punktów na obrazach archiwalnych i użytych ortofotomapach stanowiło zasadniczy problem w procesie korekcji geometrycznej. W punktach dostosowania użytych w procesie ortorektyfikacji uzyskano błędy wynoszące:

- dla zdjęcia satelitarnego KH-7: RMSX = 2,19 m; RMSY = 2,46 m (dla obszaru Bielańsko-Tynieckiego Parku Krajobrazowego) oraz RMSX = 2,08 m; RMSY = 2,31 m (dla obszaru Ojcowskiego Parku Narodowego),
- dla zdjęcia satelitarnego KH-9: RMSX = 4,59 m; RMSY = 4,67 m,
- dla obrazu Landsat 5: RMSX = 12,81 m; RMSY = 12,41 m,
- dla obrazu EROS-A: RMSX = 1,97 m; RMSY = 2,04 m.

Ortoobrazy wygenerowano w układzie współrzędnych PUWG 1992 z terenowym rozmiarem piksela wynoszącym:

- dla zdjęcia satelitarnego KH-7: 1 m,

- dla zdjęcia satelitarnego KH-9: 5 m,
- dla obrazu Landsat 5: 30 m,
- dla obrazu EROS-A: 2 m.

Obrazy te wraz z ortofotomapami lotniczymi z projektów PHARE (piksel o rozmiarze 0,75 m) i LPIS (0,25 m) stanowiły materiał wyjściowy dla fotointerpretacji zmian, jakie zaszły w krajobrazie Ojcowskiego Parku Narodowego i Bielańsko-Tynieckiego Parku Krajobrazowego. Przygotowane zostały również, stanowiące załącznik do niniejszej publikacji, drukowane wersje ortofotomap w skalach 1:35 000 (Ojcowski Park Narodowy) i 1:50 000 (Bielańsko-Tyniecki Park Krajobrazowy).

### Uwagi końcowe

Ogólna ocena walorów interpretacyjnych teledetekcyjnych danych obrazowych dokumentujących w przedmiotowym projekcie badawczym rejon Ojcowskiego Parku Narodowego oraz Bielańsko-Tynieckiego Parku Krajobrazowego pozwala na następujące stwierdzenia:

1. Obrazowe dane teledetekcyjne pozyskiwane zarówno z pułapu lotniczego, jak również satelitarnego charakteryzuje pełna przydatność do prowadzenia wszechstronnych studiów krajobrazu. Należy jednak pamiętać, iż pojemność informacyjna zdalnych zobrazowań determinowana jest w znacznym stopniu ich rozdzielczością przestrzenną. Warto podkreślić, że współczesne cywilne sensory satelitarne umożliwiają pozyskiwanie obrazów o rozdzielczości 50 cm. Współczesne fotogrametryczne kamery lotnicze pozwalają na wykonywanie zdjęć o terenowym rozmiarze piksela liczonym nawet w pojedynczych centymetrach.
2. Rejestracje multitemporalne stwarzają możliwość dokumentowania zmian zachodzących w krajobrazie. Szczególnie cenne dla tego rodzaju studiów są fotolotnicze i satelitarne materiały archiwalne, których treść topograficzna i tematyczna stanowi swego rodzaju tło referencyjne. W tym kontekście na specjalną uwagę zasługują odtajnione zdjęcia satelitarne pochodzące z wywiadowczych misji amerykańskich. Ich rozdzielczość przestrzenna dorównuje rozdzielczości obrazów pozyskiwanych przez współczesne satelity cywilne i są one znacznie łatwiejsze do zdobycia oraz opracowania od pochodzących z tego samego okresu zdjęć lotniczych. Należy jednak wyrazić żal, iż znajdujące się w dyspozycji Centralnego Archiwum Wojskowego archiwalne zdjęcia lotnicze wykonywane w Polsce przez służby wojskowe po roku 1945 pozostają niedostępne dla celów cywilnych.

### Przypisy

<sup>1</sup> Obszerne omówienie potencjału kartometrycznego tych materiałów przedstawia Skocki (2004).

### Literatura

- [1] Ciołkosz A., Kęsik A., *Teledetekcja satelitarna*, PWN, Warszawa 1989.

- [2] Ciołkosz A., Miszański J., Olędzki J.R., *Interpretacja zdjęć lotniczych*, wyd. 2, PWN, Warszawa 1986.
- [3] Ciołkosz A., Trafas K., *Przewodnik do ćwiczeń z geograficznej interpretacji zdjęć lotniczych*, Wydawnictwa Uniwersytetu Warszawskiego, Warszawa 1971.
- [4] Drzewiecki W., Głowienka E., Tokarczyk P., *Ocena możliwości wykorzystania zdjęć satelitarnych systemu KH-7 do badań zmian użytkowania na terenach zurbanizowanych*, Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji, Vol. 17 (w druku), Kraków 2007.
- [5] Furmańczyk K., *Zarys fotointerpretacji z elementami fotogrametrii*, Wyd. Ucz. Uniw. Gdańskiego, Gdańsk 1972.
- [6] Gospodinow G.W., *Odczytywanie zdjęć lotniczych*, PWN, Warszawa 1964.
- [7] Kurczyński Z., Wolniewicz W., *Korekcja geometryczna wysokorozdzielczych obrazów satelitarnych*, Geodeta, 11 (90) 2002.
- [8] Linsenbarth A., *Satelitarne systemy teledetekcyjne*, Wyd. Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1987.
- [9] *Manual of Photographic Interpretation*, American Society of Photogrammetry 1960.
- [10] Mather P.M., *Computer Processing of Remotely-Sensed Images (An Introduction)*, John Wiley & Sons, Chichester, New York, Brisbane, Toronto, Singapore 1987.
- [11] Miller V.C., Miller C.F., *Photogeology*, McGraw-Hill Comp., New York, Toronto, London 1961.
- [12] Mularz S., Drzewiecki W., Pirowski T., *Teledetekcyjne metody rejestracji krajobrazu*, Roczniki Geomatyki, T.V., z. 8, 2007.
- [13] Ostaficzuk S., *Fotogeologia*, Wydawnictwa Geologiczne, Warszawa 1978.
- [14] Reeves R. (Editor in Chief), *Manual of Remote Sensing. Am. Soc. for Photogram And Remote Sensing*, Washington 1975.
- [15] Sabins F.F., jr., *Remote Sensing, Principles and Interpretation*, W.H. Freeman Company, San Francisco 1978.
- [16] Sitek Z. (red.), *Słownik terminologiczny (pięciojęzyczny) z zakresu fotogrametrii i teledetekcji*, t. I i II, Wyd. AGH, Kraków 1988 (wyd. drugie: 1992).
- [17] Sitek Z., *Zarys teledetekcji lotniczej i satelitarnej*, Wyd. AGH, Skrypt 1239, Kraków 1992.
- [18] Skocki K., *Analiza pojemności informacyjnej i przydatności obrazów satelitarnych programu CORONA do badań stanu środowiska przyrodniczego Polski i jego zmian*, Teledetekcja Środowiska 33, 2004.
- [19] Smirnow L.J., *Teoretyczne podstawy fotointerpretacji*, (przekład z j. ros. A. Ciołkosz, A. Kęsik), Warszawa 1970.
- [20] Świątkiewicz A., *Fotogrametria*, PWN, Warszawa 1979.