

ANALIZA OBIEKTOWA W LEŚNICTWIE

Joanna Adamczyk

Streszczenie

Techniki zautomatyzowanego rozpoznawania obiektów są wskazywane jako jeden z najważniejszych elementów rozwoju technologicznego w geoinformacji. Szczególnie dotyczy to praktyki, gdzie wymagana jest wysoka efektywność stosowanych metod połączona z dobrymi rezultatami analiz. Artykuł przedstawia istotne możliwości i zalety, powstałej na przełomie XX i XXI w. analizy obiektowej, w zakresie prowadzenia analiz przestrzennych obszarów leśnych. Metoda ta stanowi jednocześnie rozbudowane narzędzie analityczne, kontrola którego wymaga wysokiego poziomu wiedzy z zakresu teledetekcji i przetwarzania obrazów oraz umiejętności interpretacji wyników. Główną tezę artykułu stanowi pytanie: Czy i w jakim zakresie metoda ta może zostać wykorzystana w praktyce leśnej? Wnioski nie są jednoznaczne, gdyż metoda ta znajduje się na etapie intensywnego rozwoju, co oznacza istotne niedostatki metodyczne. Jednocześnie niektóre jej elementy mogą być bardzo użyteczne.

Słowa kluczowe: analiza obiektowa, rozpoznawanie obiektów

OBJECT ANALYSIS IN FORESTRY

Abstract

Automated object recognition techniques are identified as one of the most important elements of the technological development in geoinformation. It is particularly true in practice, where high efficiency of the methods is required combined with good analysis results. This paper presents significant opportunities and benefits of the late-century analysis of the object regarding spatial analysis of forest areas. This method is also a complex analytical tool, the control of which requires a high level knowledge of remote sensing and image processing and the ability to interpret results. The main thesis of the article is the question: Whether and to what extent this method can be used in practical forest management? Conclusions are not clear, since this method is at the stage of intensive development, which means significant methodological shortcomings. At the same time some of its elements can be very useful.

Keywords: object analysis, object recognition

Przełom czy rewolucja?

Interpretując obraz teledetekcyjny, intuicyjnie człowiek rozpoznaje na nim obiekty, które identyfikuje z istniejącymi w rzeczywistości. Dodatkowo określa różne cechy terenu, które nazywa, np. pokryciem. Poszczególne jego klasy, również rozpoznawane są w postaci obiektów, których granice zazwyczaj są widoczne. Taka naturalna zdolność powoduje, że człowiek, pomimo stworzenia wielu metod automatycznych, nadal dokonuje interpretacji obrazów teledetekcyjnych z najmniejszym błędem. Niestety jednak jest to bardzo kosztowna metoda ze względu na czas, jaki zajmuje taka interpretacja człowiekowi.

Rzów technik zautomatyzowanego rozpoznawania obiektów na podstawie treści obrazów teledetekcyjnych jest wskazywany jako jeden z najważniejszych elementów rozwoju technologicznego w geoinformacji. Automatyzacja procesów przetwarzania ma na celu optymalizację czasu

i kosztów pozyskania informacji o powierzchni Ziemi, np. o pokryciu terenu, która przeprowadzona przez człowieka jest bardzo pracochłonna. Mimo lat doskonalenia, tzw. tradycyjne metody, bazujące na statystycznej analizie informacji zapisanej w pikselach obrazu, nie pozwoliły na osiągnięcie na tyle zadowalających rezultatów, żeby można było przynajmniej częściowo zastąpić interpretację wykonywaną przez człowieka. Dlatego współcześnie nadal przygotowanie istotnych materiałów interpretacyjnych, dla których istnieje konieczność zapewnienia bardzo wysokiej jakości wyników odbywa się przy dużym zaangażowaniu sił ludzkich.

W końcu lat 90. XX w. pojawiła się alternatywa, która posiada potencjał symulowania sposobu myślenia człowieka – analiza obiektowa. Jak na metodę przełomu wieków przystało, w publikacjach (a szczególnie w folderach promujących oprogramowanie komercyjne) była ona entuzjastycznie określana jako przełom (lub nawet rewolucja) w geoinformacji. Polega ona na odejściu od schematu ograniczającego analizę informacji do zapisanej w pikselach obrazu (wartość jasności lub barwa). Podejście do interpretacji obrazu teledetekcyjnego w analizie obiektowej jest zbliżone do sposobu myślenia człowieka. Intuicyjnie, aby wyszukać w obrazie teledetekcyjnym powierzchni Ziemi pewne całości (obiekty), bierze on pod uwagę znacznie więcej zmiennych, między innymi: natężenie jasności, kształt, teksturę, powierzchnię, tło tematyczne.

Opracowania teoretyczne dotyczące elementów analizy obiektowej pojawiały przez całe lata 90. XX w. Jednak właściwe wdrożenie metody związane było z wprowadzeniem na rynek w roku 2001 pierwszego oprogramowania komercyjnego eCognition. Dzięki wysokiej efektywności oraz wielu innym zaletom (omówionymi niżej) analiza obiektowa od razu zyskała dużą popularność i jest wykorzystywana w coraz szerszym spektrum zastosowań. Znalazła ona uznanie wśród użytkowników o znacznej polaryzacji zainteresowań – od przyrodniczych, technicznych, po biomedyczne. Szybkość z jaką metoda ta rozwija się obecnie jest związana między innymi z wykorzystaniem współczesnych środków komunikacji. Wielu użytkowników wypróbowało jej możliwości w wielu zastosowaniach i dzieli się doświadczeniami. Powstają rozwiązania pozwalające na dopasowanie metody do specyficznych potrzeb użytkowników, jak również dopracowanie jej niektórych elementów.

W ostatnich kilku latach metoda ta jest na tyle uniwersalnie stosowana, że pojęcie „analiza obiektowa” zaczęło rozumieć w sposób znacznie szerszy niż jedynie jako metodę przetwarzania obrazów teledetekcyjnych (klasyfikacja). Coraz częściej rozumiana jest jako nowy paradygmat pozwalający na traktowanie informacji uzyskanych w wyniku interpretacji obrazu teledetekcyjnego w dowolny sposób, wynikający z praktycznych potrzeb użytkownika.

Rola analizy obiektowej w geoinformacji stała się na tyle duża, że zaczęto ją określać mianem nowej subdyscypliny. Rozwinęły się centra doskonałości tylko nią się zajmujące (5 ośrodków na całym świecie). Doczekała się również konferencji tematycznych do dnia dzisiejszego odbyły się dwie w latach: 2006 w Salzburgu (Austria) i 2008 w Berkeley (USA).

Na forum międzynarodowym dyscyplina ta najczęściej określana jest akronimem GEOBIA (*GEO-Object Based Image Analysis*), co można przetłumaczyć jako analiza obrazów bazująca na obiektach geograficznych. Nazwa ta jest nadal dyskutowana i przeciwstawiana określeniu „*object oriented*”. Według zwolenników pozwala ono na poszerzenie koncepcji i właściwą realizację paradygmatu. W języku polskim najczęściej stosowana jest nazwa analiza obiektowa. Uzasadnieniem może być uniwersalność i nieco bardziej zgrabna forma niż dokładne tłumaczenia z języka angielskiego.

Obecnie metoda ta znajduje się na takim etapie rozwoju, który wymusza przedstawienie jej w dwóch kontekstach jako:

- Technika klasyfikacji obrazów teledetekcyjnych, pozwalająca na przeprowadzenie następujących operacji przetwarzania danych:
- Integracja danych teledetekcyjnych i GIS z różnych źródeł, zarejestrowanych w różnym czasie, posiadających o różną rozdzielczość i zasięg przestrzenny, ale związanych układem współrzędnych.
- Segmentacja obrazów o różnej rozdzielczości przestrzennej (w jednym zestawie danych),
- Interaktywne (nadzorowane i nienadzorowane) rozpoznawanie i klasyfikacja obiektów na obrazach rastrowych, oparte na „uczeniu” bazy wiedzy i logice rozmytej.
- Automatyzacja przetwarzania z jednoczesną z możliwością ingerencji w proces oraz kontroli wyników.
- Nowy sposób rozumienia przestrzeni przyrodniczej w GIS – którego konsekwencją jest wprowadzenie nowej metodyki analiz przestrzennych bazującej na podejściu obiektowym.

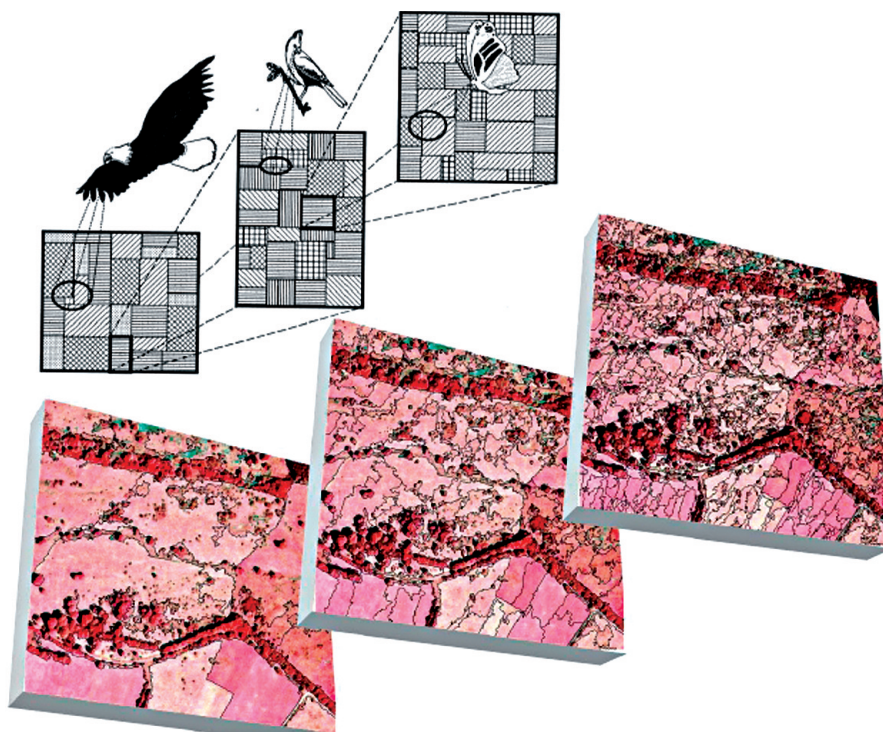
Efektywna metoda klasyfikacji obrazów

Podstawą metody klasyfikacji obiektowej jest zdolność do rozpoznawania obiektów na podstawie analizy informacji zapisanej w treści obrazów teledetekcyjnych oraz dodatkowych warstw tematycznych. Określony układ struktur przestrzennych jest odwzorowywany w postaci hierarchii obiektów. Główne etapy klasyfikacji treści obrazów teledetekcyjnych przedstawiono na przykładzie wyróżniania klas pokrycia terenu przy użyciu znanego oprogramowania Definiens (ryc. 1):

- Wprowadzenie do systemu danych obrazowych (kanały obrazów satelitarnych lub lotniczych) i tematycznych (warstwy wektorowe lub rastrowe, zazwyczaj o charakterze dyskretnym, uzupełniające treść danych obrazowych o informację dodatkową, trudną do bezpośredniej interpretacji np. sieć dróg).
- Segmentacja obrazu – generowanie obiektów na podstawie jego treści. Obrazy są wstępnie dzielone na pojedyncze obiekty na podstawie różnic w ich odpowiedzi spektralnej oraz kształtu. W każdym z cykli segmentacji, w procesie iteracyjnym, wybierane jest najlepsze odwzorowanie obiektów obrazu poprzez optymalizację ustawień dotyczących parametrów: dozwolonej homogeniczności obiektów (np. jak mało elementów powinno zostać zawarte w jednym obiekcie) oraz ich kształtu i barwy. Przykład sposobu dostosowania parametrów klasyfikacji do charakteru analizowanego zjawiska (np. taksonów organizmów) przedstawia ryc. 1.
- Tworzenie hierarchii klas – stanowiącej rodzaj legendy dla właściwej klasyfikacji. Może ona zawierać jeden lub wiele poziomów zależności pomiędzy obiektami. Mogą one na przykład: nawiązywać do wyglądu obiektów (np. pokrycie terenu) lub odwzorowywać zależności funkcjonalne wynikające z roli tych obiektów np. funkcji ekologicznej jako płatów w krajobrazie. Hierarchia klas może być również wyrazem złożonego systemu zależności prowadzącego do wyodrębnienia klas.
- Wybór obiektów wzorcowych – płatów pokrycia terenu stanowiących dobrze udokumentowane przykłady, na podstawie których baza wiedzy „uczona” jest rozróżniania pozostałych obiektów obrazowych oraz kwalifikowania ich do odpowiednich klas. Jednoznaczność (i częściowo również trafność) wyboru może zostać zweryfikowana przy pomocy zestawu narzędzi (histogramy, statystyki) pozwalających na porównanie z wzorcami w tej samej bądź innych klasach.
- Wybór zestawu cech obiektów¹ – będących podstawą algorytmu kwalifikującego obiekty wyznaczone na obrazie do klas, na podstawie wyznaczonych wcześniej obiektów wzorcowych.

¹Terminu cecha obiektu użyto w znaczeniu charakterystyki, która może zostać użyta do budowy opisu klasy przy pomocy logiki rozmytej (Definiens Imaging 2004)

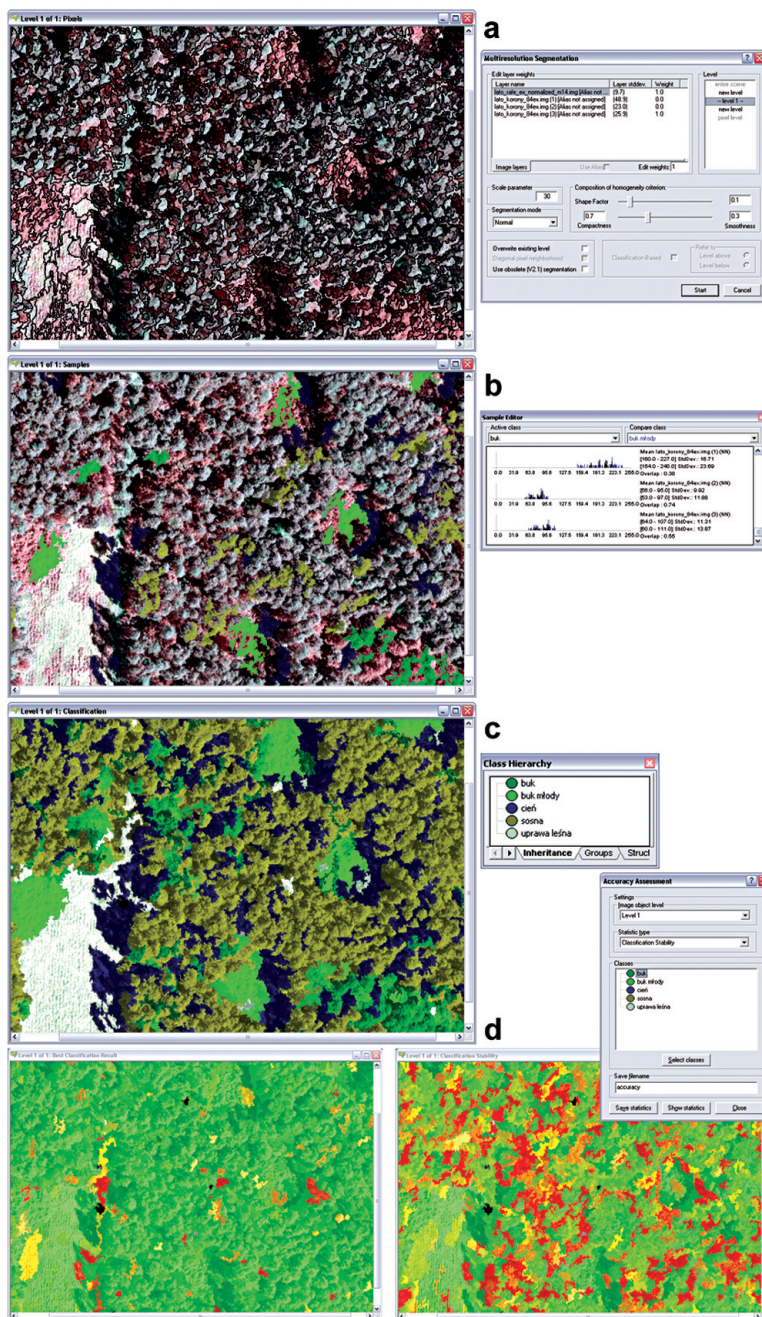
- Procedura ta może zostać przeprowadzona ręcznie, bądź poprzez optymalizację przestrzeni cech – automatyczne wyszukanie zestawu cech najlepiej separujących obiekty z różnych klas.
- Klasyfikacja – przeprowadzona na przynajmniej jednym poziomie hierarchicznym obiektów. Takich poziomów może być wiele, w zależności od potrzeb operatora oraz charakterystyk obiektów, które znajdują się w badanym terenie.
 - Ocena dokładności klasyfikacji – ten kluczowy etap bywa zakończeniem procedury, ale również pełni rolę punktu zwrotnego iteracyjnym procesie doskonalenia wyników klasyfikacji. Ocena jakości klasyfikacji może zostać przeprowadzona zarówno przy użyciu metod tradycyjnych – bazujących na ocenie zgodności obiektów kontrolnych z wynikami klasyfikacji przy pomocy indeksów m.in. Kappa². Istnieje też możliwość zastosowania metod bazujących na logice rozmytej: oceny stopnia prawdopodobieństwa przynależności do określonej klasy (*Classification Stability*) oraz wizualizację najlepszego wyniku klasyfikacji (*Best Classification Result*) – posiadającego najwyższą wartość współczynnika przynależności do danej klasy.



Ryc. 1. Prawidłowy sposób dopasowania wielkości oraz poziomu homogeniczności wyznaczonych segmentów w zależności od analizowanych grup taksonomicznych organizmów. Zdjęcie lotnicze przedstawiające krajobraz pastwisk (Blaschke 2005)

Fig. 1. The proper method of matching the size and homogeneity parameters for segments in relation to analyzed taxa levels. Aerial photo of pasture landscape

²Indeks Kappa – miara stopnia nieprzypadkowej zgodności pomiędzy dwoma obserwacjami (w tym wypadku obrazami: sklasyfikowanym i wzorcowym), dla pewnej specyficznej zmiennej nominalnej



Ryc. 2. Podstawowe etapy procesu klasyfikacji obiektowej:

- a) segmentacja,
- b) wybór obiektów wzorcowych,
- c) wyniki klasyfikacji,
- d) ocena dokładności klasyfikacji – stabilność klasyfikacji, najlepszy wynik klasyfikacji (opracowanie własne)

Fig. 2. The main stages of object-based classification process:

- a) the image after segmentation,
- b) selection of sample objects,
- c) result of classification,
- d) classification quality assessment – Classification Stability, Best Classification Result (own research)

Zazwyczaj najlepszy efekt klasyfikacji uzyskiwany jest metodą iteracyjną, po przeprowadzeniu kilku udoskonaleń, następujących elementów procedury:

- Struktury klas – poprzez dopasowanie do rzeczywistych możliwości interpretacyjnych wynikających z charakterystyk obrazu.
- Wyboru obiektów wzorcowych – w celu polepszenia sposobu reprezentowania realnych obiektów terenowych i zwiększenia zdolności do ich rozróżniania.
- Przestrzeni cech obiektów – optymalizacja trafności doboru wzorów opisujących cechy i stworzonej w ten sposób charakterystyki.

Nowy paradygmat?

Dzięki stworzeniu technicznych możliwości, pozwalających na wykraczanie poza rozpoznawanie obiektów w obrazie teledetekcyjnym, analiza obiektowa coraz częściej określana jest mianem nowego paradygmatu. Pozwala na traktowanie elementów przestrzeni jako obiektów, niezależnie od ich rodzaju, np. zarówno jednogatunkowego drzewostanu, czy kompleksu leśnego, jak i pojedynczego budynku. Podstawą w wydzieleniu obiektów jest zatem kontekst wynikający z potrzeb użytkownika, kształtującego odpowiednio atrybuty i hierarchie jednostek przestrzennych.

Można zatem sobie wyobrazić, że za pomocą omawianej metody, przyjmując odpowiednie parametry klasyfikacji oraz budując zgodną z potrzebami hierarchię klas i obiektów, badacz będzie mógł wyznaczyć znacznie bardziej złożone przyrodnicze jednostki przestrzenne, niż klasy pokrycia terenu. Poniżej wymieniono przykłady perspektywicznych zastosowań wykorzystujących możliwość modelowania w GIS obiektów przyrodniczych jako mozaiki obiektów.

Zastosowania w leśnictwie i ochronie przyrody

Obecnie wśród najpopularniejszych zastosowań analizy obiektowej przoduje rozpoznawanie klas pokrycia terenu. Najczęściej przeprowadzane jest ono na podstawie danych satelitarnych z zakresu promieniowania widzialnego oraz podczerwieni w średnich lub wysokich rozdzielczościach³. Potrzebne jest ono między innymi w zastosowaniach związanych z: inwentaryzacją różnych klas pokrycia terenu (Cruse, Hempel 2005), rolnictwem np. wyszukiwanie zasięgów różnych rodzajów pól uprawnych (Fisette i inni 2006, Hansen i inni 2006), wyszukiwaniem zabudowy wśród innych klas pokrycia terenu (Esch i inni 2005) oraz leśnictwem.

Najwcześniejsze zastosowania analizy obiektowej dla potrzeb określania atrybutów powierzchni leśnych były, w tym zakresie rozdzielczości, ograniczone do rozpoznawania ich granic oraz różnicowania składu gatunkowego (np. Kayitakire i inni. 2002, Kristóf i inni. 2002, Hájek 2005), często jedynie z podziałem na gatunki liściaste i iglaste (Sasakawa, Tsuyuki, 2003, Onishi 2004). Obok standardowych, opartych na zbliżonej do wizualnej interpretacji treści obrazu teledetekcyjnego, przykładem ciekawego podejścia było wykorzystanie do rozpoznawania rodzajów drzewostanów tekstury reprezentowanej przez obrazy panchromatyczne (Halounová 2003).

Bardzo popularne są również zastosowania związane z monitoringiem stanu powierzchni leśnych oraz rozwoju zachodzących w nich zjawisk. Rozpoznawanie granic obszarów zalesionych oraz ich cech było często wykorzystywane dla wykrywania zmian w składzie gatunkowym oraz sięgu powierzchni leśnych. Uzyskiwanie takich informacji wiąże się z zestawieniami danych wie-

³ Zazwyczaj rozmiar piksela dla podanych przedziałów rozdzielczości definiowany jest następująco: średnie rozdzielczości (MR Middle Resolution) – kilkanaście metrów, wysokie (HR High Resolution) – kilka metrów

loterminowych, pochodzących z różnych źródeł i często posiadających różne charakterystyki. Przykładem takiego porównania, wykonanego na bardzo różnych danych, jest ocena zmian struktury lasu i jego degradacji w Papui Nowej Gwinei w latach 1972–2002 (Shearman i inni. 2008). W ramach badań przeprowadzona została klasyfikacja pokrycia terenu, ze szczególnym uwzględnieniem powierzchni leśnych, na materiałach teledetekcyjnych o kontrastowo różnych charakterystykach (nisko- i wysokorozdzielcze). Na tej podstawie stwierdzono, że tylko 50% lasów, które porastały wyspę w 1972 r. zachowało się do dnia dzisiejszego.

Wielkopowierzchniowe porównanie danych o średniej rozdzielczości pomiędzy latami 1989 a 2000, wykonane zostało w ramach projektu SIBERIA (Hese, Schullius 2005). Analiza obiektowa stała się podstawową metodą zapewniającą automatyzację, a co za tym idzie umożliwiła przeprowadzenie analiz dla bardzo dużych fragmentów Syberii. Na tym terenie stwierdzono zarówno deforestację jak i aforestację, dotykające około 20% powierzchni obszaru. Innym przykładem jest porównanie pomiędzy stanem drzewostanów porastających Laponię utrwalonym na archiwalnych zdjęciach lotniczych z 1947 r. a stanem obecnym (Middleton 2008). Stwierdzono istotne zmiany spowodowane efektem ocieplenia klimatu, szczególnie dotyczące ekspansji oraz wycofywania się gatunków.

Stosunkowo prostymi metodami identyfikowane są powierzchnie zrębów, które kontrastują z obszarami leśnymi. Tego typu zastosowania mogą być realizowane nawet w niskich rozdzielczościach, przykładem jest detekcja przeprowadzona przez Flanders i inni (2003), którzy wykorzystali w pracy dane z satelity Landsat (o pikselu 30 m).

W innej pracy (Johansen i inni, 2008) stwierdzono następujące zalety analizy obiektowej z punktu widzenia przeprowadzania wieloterminowej detekcji zmian: Brak konieczności wykonywania dodatkowych przetworzeń związanych z poprawianiem wyniku porównania między obrazami; Mniejszy wpływ małych nałożeń pomiędzy poligonami znajdującymi się w dwóch zestawach danych, co znacznie zmniejsza szum informacyjny; Możliwość wprowadzenia dodatkowych treści tematycznych, które poprawią wyniki detekcji zmian.

Przy pomocy analizy obiektowej realizuje się również podejście do monitoringu stanu lasów poprzez ocenę zasobów drzewostanu z punktu widzenia ich podatności na klęski żywiołowe. Jedną z takich analiz, opierającą się na prostej metodzie oceny zwarcia drzewostanu oraz jego zmian w przestrzeni czasu przedstawili Platt i Schoennagel (2008). Porównali oni zdjęcia lotnicze z lat 1938 i 1940 z obrazami z 1999 r. Zauważono zmiany w zarówno w kierunku zwiększenia jak i zmniejszenia zwarcia, w obie strony o około 5%.

Zdolność do rozpoznawania granic obszarów zalesionych oraz ich cech jest często wykorzystywana dla wykrywania strat oraz opracowywania metod zapobiegania klęskom żywiołowym. Szczególnie licznie występują w literaturze zastosowania dotyczące pożarów lasów. Standardem stało się wykonywanie map drzewostanu z punktu widzenia jego palności (Arroyo i inni 2005, Stefanacci 2006, Gitas 2007), przeprowadzane dla różnych wielkości obszarów. Mallinis i inni (2008) przedstawiają bardziej zaawansowane zintegrowane podejście do przewidywania zagrożenia pożarowego składające się z: wykonania szczegółowych map materiału palnego oraz symulacji rozprzestrzeniania się ognia. Dokładności uzyskane przy użyciu modelu statystycznego sięgają 80%, co wydaje się dość wysokim wynikiem, biorąc pod uwagę dużą różnorodność analizowanego terenu. Ocena strat pokłeskowych, ze szczegółowym rozróżnieniem ich rodzaju z punktu widzenia siły ognia, przeprowadzona została w pracy Mitri i Gitas (2008). W ramach pracy wyznaczono obszary, które wymagają natychmiastowej interwencji oraz zapewniono dane do modeli predykcyjnych rozprzestrzeniania się ognia. Ogólna dokładność metody oceniona została na 83%.

Ocena skutków huraganów przy pomocy analizy obiektowej jest stosunkowo rzadko spotykana jest w literaturze, choć zastosowanie to mogło by wydawać się oczywiste w stosunku do lasów. Takie badanie w odniesieniu do szwajcarskich lasów alpejskich przeprowadził Schwarz i inni (2001). Wykazano bardzo wysoką efektywność analizy obiektowej dla wykrywania różnych rodzajów zmian pohuraganowych – osiąganą przede wszystkim dzięki zastosowaniu miar tekstury, które nie są dostępne w innych rodzajach oprogramowania.

Inne rodzaje klęsk żywiołowych, takich jak powódzie i trzęsienia ziemi, bardzo rzadko rozpatrywane są w specyficznym ujęciu dotyczącym powierzchni leśnych. Jednak drzewostany uwzględniane jest w ogólnym bilansie strat a ich ochrona w budowaniu modeli predykcyjnych. Takie podejście zastosowali Van der Sande i inni (2004), gdzie zbudowano model symulujący zagrożenie powodziowe, który pomagał ocenić straty powodziowe między innymi w powierzchniach leśnych na podstawie głębokości lustra wody w trakcie powodzi. Bardziej szczegółowo obszary leśne zostały uwzględnione w projekcie dotyczącym restytucji obszarów zalewowych w Holandii (Addink i inni 2008). W jego ramach przeprowadzona została obiektowa inwentaryzacja powierzchni leśnych, znajdujących się wewnątrz dolin rzecznych, pod kątem oceny ich zdolności do retencji. Wyszukano również strefy, w których mogły by zostać odtworzone takie obszary, np. na drodze sukcesji.

Bardzo perspektywiczne są obiektowe analizy satelitarnych danych hiperspektralnych oraz radarowych, które pozwalają na uzyskanie większej „głębokości informacyjnej”, a co za tym idzie rozpoznawanie obiektów i zjawisk, które nie są osiągalne przy użyciu standardowych danych. W pierwszym przypadku możliwe jest to dzięki zwiększeniu liczby kanałów obrazu, szczególnie tych rejestrowanych w podczerwieni, w drugim – poszerzeniu zakresu rejestrowanych fal elektromagnetycznych dla powierzchni leśnych. Zastosowanie analizy obiektowej w obu przypadkach jest bardzo podobne do postępowania ze zwykłymi obrazami teledetekcyjnymi. W literaturze (np. Eckert, Kneubuehler, 2004) opisano też specjalne algorytmy stosowane w celu wykrycia roślinności wysokiej i oceny istotnych indeksów np. LAI (Leaf Area Index) na podstawie danych hiperspektralnych. Podkreślane są również bardzo wysokie wartości użytkowe danych radarowych przy klasyfikacji obiektowej obszarów leśnych (Benz i inni 2001). Zostały one również wykorzystane przez Kelldorfer i Ulaby (2003) dla potrzeb oceny biomasy drzewostanów. W porównaniu z zastosowaniem standardowych obrazów, wykazano znacznie wyższą korelację uzyskanych danych z referencyjnymi.

Prawdziwy jednak przełom w zastosowaniach analizy obiektowej pojawił się wraz z wkroczeniem technik bardzo wysoko rozdzielczych⁴, a szczególnie z pojawieniem się możliwości integracji danych ze skanowania laserowego. Dzięki tym nowym możliwościom wzrosła dokładność wyznaczania obiektów, co pozwoliło na zaspokojenie potrzeb dziedzin nauki potrzebujących bardziej szczegółowego podejścia. Powstały też jednak nowe wyzwania związane z potrzebą opracowania metod radzenia sobie z nadmiarem informacji oraz szumem tworzonym w ten sposób (Hoffmann, Van Der Vegt 2001). Dane bardzo wysoko rozdzielcze, są szczególnie chętnie wykorzystywane w leśnictwie, gdyż pozwalają one na analizy, które do tej pory były nie możliwe do przeprowadzenia metodami GIS. Szczególnie istotne pola zastosowań danych o bardzo wysokiej rozdzielczości w leśnictwie zostały omówione poniżej.

Inwentaryzacja lasu od strony składu gatunkowego i podstawowych parametrów, przeprowadzana w skali szczegółowej pojawia się w wielu publikacjach. Rezultaty badań np. prowadzonych

⁴ Bardzo wysoka rozdzielczość (eng. VHR – Very High Resolution) identyfikowana jest z rozmiarem piksela około lub poniżej 1m

przez Shiba i Itaya (2006) wykazały bardzo wysoki potencjał połączenia metod dla podejmowania decyzji w leśnictwie tzw. precyzyjnym.

Chubey i inni (2006) przeprowadzili ocenę dokładności określania poszczególnych cech drzewostanów na przykładzie danych pozyskanych z satelity IKONOS-2. Wyniki są następujące (1 = 100% zgodności wyniku z danymi weryfikującymi): i. pokrycie terenu, określenie gatunków – 0,92; ii. procent pokrycia przez sosnę – 0,81; iii. zwarcie – 0,78, wysokość drzewostanu (sosna) – 0,32; iv. wiek drzewostanu (sosna) – 0,46. Można zauważyć, że wszystkie cechy drzewostanu można ocenić tylko na podstawie danych obrazowych. W podsumowaniu szczególnie podkreślana była potrzeba uzupełnienia danych obrazowych wysokościami, np. pochodzącymi ze skanowania laserowego.

Przeprowadzone zostały (Förster, Kleinschmit 2006) również testy zastosowania informacji tematycznej uzupełniającej wysokorozdzielczy obraz satelitarny w ramach analizy obiektowej. Badano następujące warstwy informacyjne: wysokość drzewostanu, wystawa względem stron świata, opady, wilgotność oraz zakwaszenie gleb. Polepszenie jakości klasyfikacji stwierdzone zostało pod wpływem informacji o podłożu glebowym. Dla obszarów podgórskich (różnice wysokości) istotna była również informacja wysokościowa oraz ekspozycja. Inne parametry miały mniejszy wpływ na efekt klasyfikacji.

Tiede i inni (2004) testowali metodę inwentaryzacji gatunków oraz określania struktury drzewostanu przy pomocy wysokorozdzielczych zdjęć lotniczych oraz danych lidarowych, poddanych przetworzeniu w procesie analizy obiektowej, ze szczególnym uwzględnieniem możliwości rozróżnienia faz rozwoju drzewostanu. Uzyskane wyniki po porównaniu z danymi pochodzącymi z inwentaryzacji terenowej potwierdziły, że metoda jest obiecująca, choć opisano również trochę wątpliwości związanych trudnościami w rozróżnieniu klas podobnych do siebie. Z kolei Leppänen i inni (2008), rozwinęli nową metodę inwentaryzacji obszarów zajętych przez poszczególne gatunki drzewostanów poprzez wymuszenie homogeniczności obiektów, które miały zawierać drzewa o tych samych gatunkach. Wykazano bardzo dużą efektywność tej metody, w porównaniu do innych oferowanych w ramach oprogramowania eCognition (obecnie Definiens). Warto jednak podkreślić, że testy przeprowadzone zostały na specyficznych lasach Finlandii, charakteryzujących się stosunkowo mało zróżnicowanym składem gatunkowym.

Prosta charakterystyka właściwości drzewostanu określanych jako trójwymiarowe: wysokość, zwarcie oraz kształt koron, przeprowadzona została przez Tokola i innych (2008). Do tego celu wykorzystano miary kształtu płatów dopasowane do poszczególnych gatunków. Uzyskano klasyfikację o bardzo wysokiej dokładności (powyżej 85%) jednak rozróżniano jedynie trzy gatunki drzewostanów. Znacznie gorsze wyniki (55-60%) osiągnęli Collins i inni (2004), którzy stosowali równie proste metody, jednak w zastosowaniu do lasów okolic rzeki Missisipi dla wielu gatunków drzewostanów.

Znacznie lepsze wyniki uzyskiwano przy pomocy parametrów bardziej złożonych, np. trójwymiarowych charakterystyk struktury drzewostanów przeprowadzanych za pomocą analizy obiektowej. Są one ostatnio jedną z bardziej rozwijanych metod, gdyż wstępne wyniki badań sugerują, iż za pomocą trójwymiarowych wskaźników będzie można pomierzyć cechy drzewostanu, wyrażające jego strukturę wewnętrzną, standardowo zbierane w ramach inwentaryzacji leśnych. Szybka ocena tych parametrów może pozwolić np. na uzupełnienie systemów wspomagania decyzji o nową informację, która pochodzi bezpośrednio z ekologicznych uwarunkowań funkcjonowania drzewostanów.

Blaschke i inni (2004) wykorzystali chmury punktów ze skanowania laserowego do podsumowania statystycznego parametrów wysokości przypisanych do punktów, zawartych w obiektach wyrażających trzy kategorie drzewostanów: liściaste, iglaste oraz martwe. Opracowane w ten spo-

sób proste wskaźniki wykazują prawie całkowitą korelację z pomierzonymi cechami. Jednak metoda ta nie jest jeszcze na tyle dopracowana, żeby można było je jednoznacznie dopasować do cech drzewostanu, rozumianych w tradycyjny sposób.

Inną metodę opisu trójwymiarowej struktury drzewostanu zaproponował Maier i inni (2008). Opiera się ona na wyznaczeniu obiektów na dwóch poziomach skali: pojedynczych koron drzew – podzielonych na klasy wysokości oraz płatów gatunków drzewostanów. Ocena struktury drzewostanu opiera się na wyznaczeniu wskaźników krajobrazu: Shannon Evenness Index (SHEI) i Division Index (DIVI) – wyrażających zróżnicowanie wewnętrzne i kompozycję struktury koron wewnątrz obiektów. Wskaźniki te okazały się szczególnie użyteczne w następujących polach zastosowań: SHEI – dla wyznaczenia płatów o dużym zwarcie, wartości DIVI – charakteryzowały się dużą korelacją z parametrem zwarcia, choć nie przeprowadzono dokładnego przetłumaczenia indeksu na dyskretne typy zwarcia.

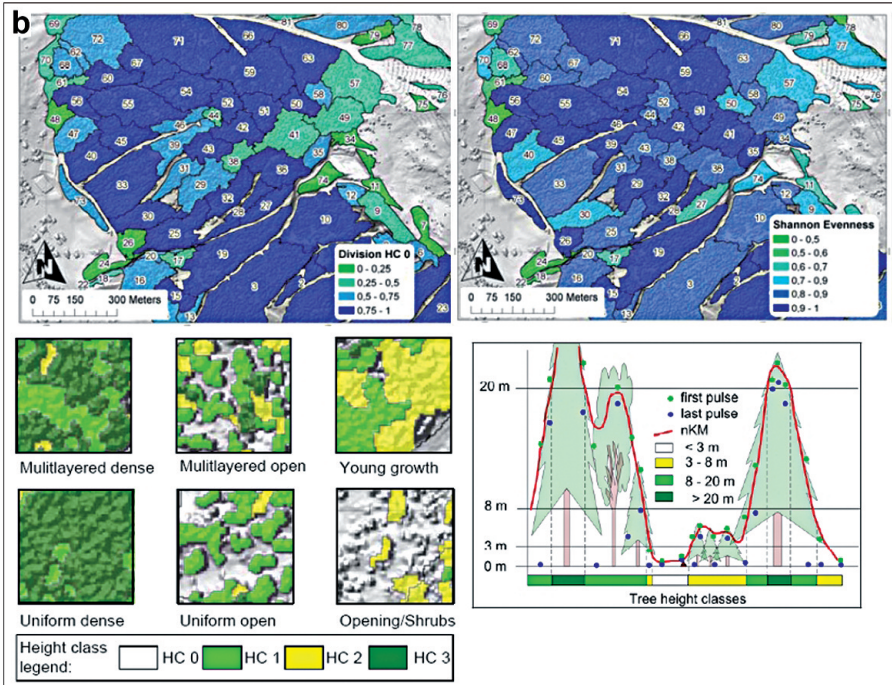
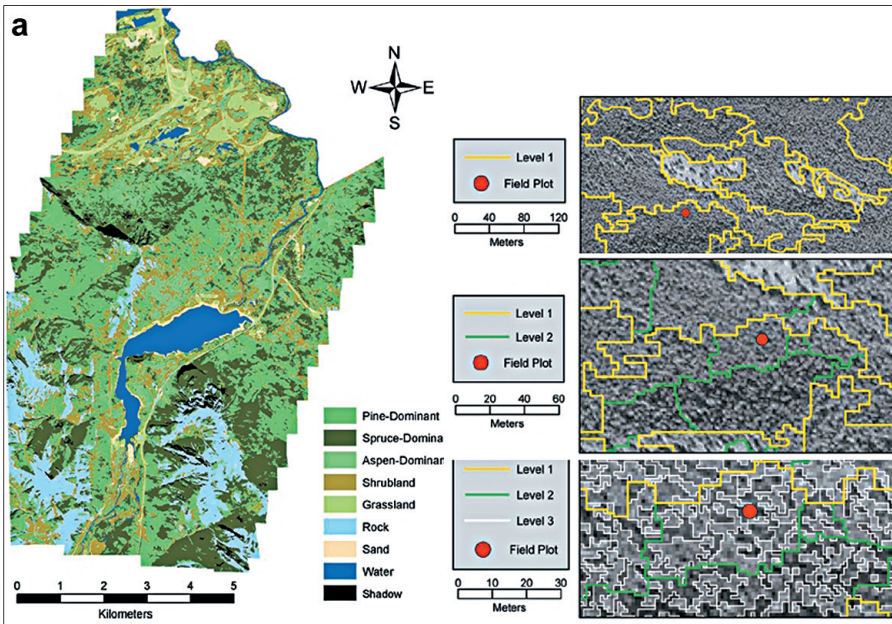
Jest wiele prac, które mają za zadanie rozwiązać zagadnienie oceny zasobności drzewostanu. Na przykład Van Aardt (2004) w rozprawie doktorskiej, ocenił przydatność analizy obiektowej do oceny biomasy, bazując jedynie na danych pochodzących ze skanowania laserowego. W tym celu zastosowany został cyfrowy model powierzchni koron. Opracowano też nowe metody segmentacji obrazu, w celu określenia granic poszczególnych typów drzewostanów. Ogólna ocena jakości klasyfikacji wykazała 89.2% zgodności z obiektami weryfikującymi pochodzącymi z inwentaryzacji terenowej, co, jak do tamtego czasu, było najlepszym osiągnięciem w porównaniu do innych metod.

Analiza obiektowa wykorzystywana była również do oceny stanu zdrowotnego drzewostanów. Np Reusen i inni (2002) przeprowadzili identyfikację drzewostanów będących pod wpływem zanieczyszczenia metalami ciężkimi. Ocena ta wykazała bliskie powiązanie pomiędzy lokalizacją uszkodzonych osobników sosny a źródłami emisji zanieczyszczeń.

W leśnictwie najbardziej oczywistym zastosowaniem obiektowej analizy danych pochodzących ze skanowania laserowego, uzupełnionych danymi obrazowymi, jest modelowanie warstwy koron drzew prowadzące do segmentacji (wyznaczania zasięgów) pojedynczych koron. Trójwymiarowy model warstwy koron jest uważany za istotny z punktu widzenia zarządzania lasu, a wykonany z danych lidarowych oszczędza czas i koszt przeprowadzonej analizy. Udowadniają to Chen i inni (2005), przeprowadzając postępowanie polegające na połączeniu chmury punktów pochodzących ze skanowania laserowego z danymi wysokorozdzielczymi w celu utworzenia rekonstrukcji warstwy koron. Następnie wykonana została analiza obiektowa w celu wyznaczenia zasięgu obszaru pokrytego warstwą koron, w ramach którego wyznaczono pojedyncze korony drzew. Wyniki zostały określone jako bardzo obiecujące.

Modelowanie pojedynczych koron drzew, poprzez segmentację (fragment analizy obiektowej), jest jednym z najczęściej poruszanych tematów w literaturze dotyczącej zastosowania danych laserowych w leśnictwie. Jedną z najbardziej kompleksowych analiz uwarunkowań dotyczących sposobu prowadzenia przetworzeń przedstawili Burnett i inni (2003), wynika z tego, że segmentacja wykonana przy pomocy analizy obiektowej jest bardzo efektywną metodą. Tiede i inni (2006) przeprowadzili nadzorowaną klasyfikację pojedynczych koron drzew stosując analizy w wielu skalach. Wstępne przetworzenie prowadziło do przygotowania danych wyrażających specyficzne cechy drzewostanów w zależności od typów. Przygotowane w ten sposób warstwy stały się bazą do przyjęcia różnych metod segmentacji koron drzew w zależności od specyfiki typu drzewostanu. Metody te opracowane zostały specjalnie dla potrzeb tej analizy, przy użyciu języka Cognition Network Language. Jest to metoda poszerzająca standardowe możliwości oprogramowania Definiens.

Analiza obiektowa jest tylko jedną z metod stosowanych w segmentacji koron drzew. Z literatury wywnioskować można, że posiada ona porównywalną, wysoką, efektywność do innych po



Ryc. 3. Wybrane zastosowania analizy obiektowej w badaniach powierzchni leśnych: a) u góry: Inwentaryzacja cech drzewostanu (źródło: Wulder i inni 2006), b) na dole: Ocena struktury lasów górskich w Alpach Salzburskich, przy użyciu skanowania laserowego oraz indeksów krajobrazu (źródło: Maier i inni, 2008)

Fig. 3. Selected applications of the object-based image analysis for forest areas research: a) up: Estimation of forest inventory parameters (Wulder et al., 2006), b) down: Characterising Mountain Forest Structure using landscape metrics on LiDAR-based Canopy Surface Models

pularnych metod. Jednak z doświadczeń autorki wynika, że specyfika polskich lasów powoduje, że jedną z najważniejszych przeszkód w stosowaniu tych metod jest występujący standardowo efekt mieszających się koron.

Pojawiły się również bardziej zaawansowane zastosowania analityczne związane z wykorzystaniem analizy obiektowej w charakterze paradygmatu. Zazwyczaj związane są one z badaniami prowadzonymi w skalach mniej szczegółowych, niż standardowo przyjmowane w leśnictwie. Przykładem takiej analizy jest badanie połączeń w krajobrazie i wyznaczanie przebiegu korytarzy ekologicznych, przeprowadzone przez Ivits i Koch (2002). Autorki badały możliwość opracowania jednolitej metody wyznaczania sieci ekologicznych dla całej Europy za pomocą analizy obiektowej.

Innym podejściem są zastosowania związane z funkcjonowaniem obszarów zielonych w skali lokalnej. Schöpfer i inni (2005) wyznaczyli indeks zieleni dla osiedla mieszkaniowego. Został on zastosowany w celu zbadania postrzegania przez mieszkańców przestrzeni porośniętych roślinnością. Podejście to opierało się na wykorzystaniu danych lidarowych, które posłużyły jako materiał podstawowy do detekcji obszarów zielonych. Wynikiem była mapa ważonej jakości spowodowanej obecnością zieleni.

Krytyczne spojrzenie

Na podstawie wyżej określonych obszarów zastosowań, stwierdzić można że szczególne istotnymi zaletami analizy obiektowej są:

- Zbliżenie metody rozpoznawania obiektów na obrazie teledetekcyjnym do naturalnego sposobu rozumowania człowieka, a co za tym idzie łatwość w interpretacji wyników.
- Automatyzacja – oszczędzająca czas potrzebny na przeprowadzenie przetworzeń, ale z możliwościami ingerencji w ich proces oraz kontroli wyników.
- Wykraczanie poza analizę obrazów teledetekcyjnych poprzez możliwość wplecenia w proces rozpoznawania obiektów dodatkowych atrybutów, zawartych np. w warstwach wektorowych, danych lidarowych, radarowych.
- Stosowanie podejścia rozmytego, pozwalającego na pewną swobodę w interpretacji wyników.
- Duży wybór charakterystyk obiektów – pozwalający na zwiększenie dokładności wydzielenia ich granic.
- Wysoka dokładność i łatwa interpretacja wyników.

Jednak dla stworzenia pełnego obrazu analizy obiektowej należy ponownie zwrócić uwagę, że jest to metoda nowa. Okres jej testowania od czasu wynalezienia do zaimplementowania w oprogramowaniu komercyjnym był bardzo krótki. W tym czasie podejmowane były liczne zabiegi marketingowe, mające na celu podkreślenie wyżej wymienionych zalet. Spowodowało to, że

użytkownicy dostali do rąk narzędzie jeszcze nie do końca opracowane od strony metodycznej. W miarę coraz bardziej świadomego jego wykorzystania w literaturze podnoszone są wątpliwości, które powinny leć u podstaw dalszego jej rozwoju. Należą do nich między innymi przedstawione poniżej przemyślenia opracowane na podstawie literatury (Hay, Castilla 2006; Lang, Blaschke 2006; de Kok 2007) oraz własnych doświadczeń autorki:

- Nie ma do tej pory konsensusu dotyczącego prawidłowości relacji pomiędzy obiektami wyznaczonymi przy pomocy segmentacji a, reprezentowanymi przez nie, obiektami znajdującymi się realnie w krajobrazie. Wiadomo na przykład, że segmentacja daje prawie zawsze dobre efekty gdy obiekty mają łagodne kształty, np. zbiorniki wodne. W związku z tym właściwie nie możemy wygenerować błędnych obiektów o łagodnych kształtach nawet przy pomocy losowych ustawień parametrów segmentacji. Jednak jeżeli w ten sam sposób potraktowalibyśmy klasy użytkowania terenu, takie jak np. tereny rolnicze o rozproszonej strukturze działek o specyficznych (np. wydłużonych) kształtach, efekty będą kontrastowe w zależności od ustawień. Zjawisko to wymaga dokładnego zbadania.
- Nie do końca wyjaśniono też hierarchiczne relacje pomiędzy obiektami wyznaczonymi na różnych poziomach rozdzielczości i skal. Problem ten jest konsekwencją możliwości integracji danych o różnej rozdzielczości. Jako, że efekt segmentacji zależy w dużym stopniu od charakteru danych de Kok (2007) postawił następujące pytania, pozostające do tej pory bez przekonującej odpowiedzi:
 - Czy segmenty wyznaczone w mniejszej rozdzielczości rzeczywiście wynikają z tych wyznaczonych przy dużych rozdzielczościach?
 - Czy granice obiektów powinny rzeczywiście całkowicie pokrywać się pomiędzy skalami? Taka potrzeba wydaje się oczywista z punktu widzenia prowadzenia analiz, ale czy taka potrzeba ma ekologiczne podstawy?
 - Jak należało by postępować w przypadku granic w krajobrazie o charakterze ekotonów?

Wymienione wątpliwości potwierdza eksperyment który każdy łatwo może przeprowadzić (Neubert i inni 2006): Opracowano klucz interpretacyjny dla obrazu satelitarnego i przeprowadzono klasyfikację przy użyciu logiki rozmytej, a potem sprawdzono które piksele reprezentują wyznaczone obiekty w wynikach klasyfikacji. Wykazano, że od 1% do nawet 5% pikseli będących elementami obiektów wzorcowych mogą w efekcie zostać zaliczone do sąsiadujących klas. Nie znaleziono jednak pełnej interpretacji tego zjawiska. Oprócz wspomnianej zależności pomiędzy poziomem niedokładności a rodzajem interpretowanego obiektu.

Problemem w rozwiązywaniu wyżej wymienionych niejasności jest brak obiektywnych metod oceny jakości klasyfikacji (Hofmann, Reinhardt 2000). Obecnie ocena przeprowadzana jest przy pomocy metod tradycyjnych, pozwalających jedynie na oszacowanie efektu, bądź metodą wizualną. Dodatkowo warto zwrócić uwagę że efekt błędu możliwego do popełnienia w trakcie klasyfikacji obiektowej może zostać spotegowany przez cechę, którą zazwyczaj uważa się za zaletę profesjonalnego oprogramowania (np. Definiens), możliwość daleko idącej ingerencji w proces przetworzeń.

Wprowadza ona znaczący czynnik subiektywności operatora, który ręcznie określa parametry przetworzeń, nie zawsze jednocześnie dysponując wiarygodną metodą weryfikacji efektu. Powyższe wątpliwości merytoryczne pozwalają sądzić, że obecnie nie należy wykonywać przetworzeń opartych na tej samej metodyce na scenach zarejestrowanych w (nawet tylko trochę)

odmiennych warunkach. Nie jest też do końca udowodniona możliwość przeprowadzenia klasyfikacji całej sceny na podstawie charakterystycznych metody opracowanej na wybranym (ale reprezentatywnym) jej fragmencie.

Wykorzystanie oprogramowania do analizy obiektowej jest również obciążone pewnymi ograniczeniami, które czasem mogą zostać odebrane jako decydujące:

- Wysoki koszt oprogramowania powoduje, że nie jest ono dostępne dla przeciętnego użytkownika. Chwilowo nic nie zapowiada tendencji spadkowej cen pakietów analizy obiektowej (również rozszerzeń programów geoinformacyjnych jak np. ArcGIS).
- Złożoność opcji oprogramowania komercyjnego oraz wysoki poziom wiedzy teledetekcyjnej potrzebnej dla osiągnięcia dobrych wyników – powoduje, że jest ono trudne w użyciu. Być może rozwiązaniem jest zaimplementowanie gotowych ścieżek przetworzeń w formie narzędzi, kosztem kontroli nad przebiegiem całego procesu, ale jednak znacznie ułatwiając wykorzystanie metody. Na rynku oprogramowania istnieje obecnie taka tendencja poprzez udostępnianie zoptymalizowanych (najlepszych) opracowanych przez wybitnych specjalistów algorytmów przetworzeń stosowanych w typowych przypadkach. Tego typu rozwiązania implementowane są między innymi w formie rozszerzeń do popularnego oprogramowania GIS (np. *Feature Analyst* dla *ArcGIS*). Obecność takich narzędzi zwiększa popularność pakietu oprogramowania i w związku z tym wydaje się być nieuniknionym trendem w geoinformacji. Wydaje się, również że dla metod, które zostały już wystarczająco opracowane metodycznie taka tendencja nie przynosi dużych strat.
- Zamknięcie oprogramowania na budowę własnych narzędzi wpływa na zakres analiz, które można przeprowadzić za pomocą metody. Widoczny jest co prawda postęp w tej dziedzinie, gdyż w najnowszych wersjach oprogramowania istnieje możliwość wprowadzenia własnych opisów cech obiektów lub definiowania parametrów analizy, jednak nadal oprogramowanie to uważane jest za zamknięte. Prawdopodobnie ograniczenia te będą stopniowo zanikać w miarę rozwoju dziedziny oraz wzrostu konkurencyjności na rynku oprogramowania. Szczególne nadzieje związane są z rozwojem pakietów *open source*.

Wyżej wymienione zalety oprogramowania przyciągają uwagę wielu producentów oprogramowania do przetwarzania obrazów teledetekcyjnych. Coraz bardziej intensywnie rozwijają oni rozszerzenia do segmentacji i uzupełniają nimi swoje pakiety. Pozwoli to w przyszłości na odejście od praktyk monopolistycznych oraz stworzenie szerszego wyboru dla praktyków. Powoduje to jednak znaczne różnice pomiędzy pakietami oprogramowania i sposobem działania dostępnych narzędzi. Co za tym idzie coraz trudniej osiąga się konsensus dotyczący metodyki analizy obiektowej. Dyskutanci na forach internetowych (np. Wikipedia GEOBIA) często wyrażają niepokój, czy ta różnorodność połączona z brakiem protokołów, formatów oraz standardów nie wpłynie bardziej na rozszerezenie dziedziny, niż na konsolidację i opracowanie spójnych metod.

Podsumowanie

Jak wynika z powyższych rozdziałów, metoda analizy obiektowej stanowi bardzo atrakcyjną i efektywną alternatywę dla dotychczasowego sposobu prowadzenia analiz przestrzennych. Pomimo wątpliwości, posiada ona wysoki potencjał jako narzędzie przyrodnika i nie należy z niej rezygnować, co wykazuje wielu autorów publikacji.

Jednak należy pamiętać, że tendencja do bezkrytycznego traktowania wyników, zwiększająca się wraz z rozwojem narzędzi ułatwiających analizy, jest bardzo niebezpieczna. Na ten problem

należy zwrócić szczególną uwagę, gdyż we współczesnym społeczeństwie informacyjnym coraz więcej decyzji podejmowane jest na podstawie wyników analiz przestrzennych.

Literatura

- Addink E. A., Haaf M. E., de Jong S. M., 2008, Monitoring vegetation structure in floodplains for flood risk estimation. W: Hay G.J, Blaschke T. Marceau D. (Red.). GEOBIA 2008 – Pixels, Objects, Intelligence. GEOgraphic Object Based Image Analysis for the 21st Century. University of Calgary, Calgary Alberta, Canada, August 05-08. ISPRS Vol. No. XXXVIII-4/C1. Archives.
- Arroyo L., Healey S., Cohen W., Cocero D., Manzanera J. A., 2005, Regional fuel mapping using an object-oriented Classification of Quickbird imagery. W: Proceedings of NARGIS 2005 - Applications In Tropical Spatial Science. 4th - 7th July 2005 Charles Darwin University, Darwin, NT, Australia.
- Benz U., Baatz M., Schreier G., 2001, OSCAR – Object Oriented Segmentation and Classification of Advanced Radar Allow Automated Information Extraction. W: Proceedings of the International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Hawaii, USA.
- Blaschke T., 2004, Towards a framework for change detection based on image objects, W: Erasmí, S., Cyffka, B. and M. Kappas (Red.): Göttinger Geographische Abhandlungen.
- Blaschke T., Tiede D. Heurich M., 2004, 3D landscape metrics to modelling forest structure and diversity based on laser scanning data. International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, vol. XXXVI-8W2, Freiburg.
- Burnett C., Heurich M., Tiede D., 2003, Exploring Segmentation-based Mapping of Tree Crowns: Experiences with the Bavarian Forest NP Lidar/Digital Image Dataset. ScandLaser 2003 International Conference and Workshop, Umeå, Sweden, September 2-4, 2003.
- Chen L., Chiang T., Teo T., 2005, Fusion of LIDAR Data and High Resolution Images for Forest Canopy Modelling. W: Proceedings of the 26th Asian Conference on Remote Sensing. Hanoi, Vietnam. 7 - 11 November 2005.
- Chubey, M., Franklin S. E., Wulder M. A., 2006, Object-oriented classification of Ikonos-2 satellite data for estimation of forest inventory parameters, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 72(4).
- Collins C.A., Parker R.C., Evan D.L, 2004, Using multispectral imagery and multi-return LIDAR to estimate tree and stand attributes in a southern bottomland hardwood forest. Proceedings of the ASPRS 2004 Annual Conference, Denver, USA. May 23-28.
- Cruse B., Hempel C., 2005, Object based land cover mapping for Groote Eylandt: a tool for reconnaissance and land based surveys. W: Proceedings of NARGIS 2005 – Applications in Tropical Spatial Science. 4th - 7th July 2005 Charles Darwin University, Darwin, NT, Australia.
- De Kok, 2007, Materiały niepublikowane: Szkolenie z zakresu oprogramowania eCognition ver. 5.0 Professional (Definiens), 4-6 stycznia 2007 Kraków.
- Definiens Imaging, 2004, eCognition Users Guide – dokumentacja oprogramowania.
- Eckert S., Kneubuehler M., 2004, Application of HYPERION data to agricultural land classification and vegetation properties estimation in Switzerland. In Proceedings of the ISPRS 2004 Annual Conference, Istanbul, Turkey. July.
- Esch T., Roth A., Dech S., 2005, Robust approach towards an automated detection of built-up areas from high resolution radar imagery. W: Proceedings of the ISPRS WG VII/1 'Human Settlements and Impact Analysis' 3rd International Symposium Remote Sensing and Data Fusion Over Urban Areas (URBAN 2005) and 5th International Symposium Remote Sensing of Urban Areas (URS 2005). Tempe, AZ, USA. March.

- Flanders D., Hall-Beyer M., Pereverzoff J., 2003, Preliminary evaluation of eCognition object-based software for cut block delineation and feature extraction. W: Canadian Journal of Remote Sensing, Vol. 29, No. 4, pp. 441–452, August 2003.
- Förster M., Kleinschmit B., 2006, Integration of ancillary information into object-based Classification for Detection of Forest Structures and habitats, W: Lang S., Blaschke T., Schöpfer E., (Red.), 1st International Conference on Object-based Image Analysis (OBIA 2006), Workshop proceedings, Salzburg.
- Gitas I., Polychronaki A., Katagis T., Mallinis G., Minakou C., 2007, Fast mapping results provide deeper insights – wildfires & remote sensing, W: GEOinformatics, Oct/Nov 2007.
- Hájek F., 2005, Object-oriented classification of remote sensing data for the identification of tree species composition. Proceedings of ForestSat 2005 conference, May 31 - June 3, 2005, Boras, Sweden.
- Halounová L., 2003, Textural classification of B&W aerial photos for the forest classification. EARSeL conference in Gent in June 2003.
- Hansen D., Curlis C., Simpson B., 2006, Techniques for discrimination between agriculture and similar land cover types with fuzzy logic and spectral polygon characteristics W: Proceedings of ASPRS 2006 Annual Conference, Reno, Nevada; May 1-5, 2006.
- Hay G., Castilla G., 2006, Object-based image analysis, strengths, weaknesses, opportunities and threats (SWOT), W: Lang S., Blaschke T., Schöpfer E., (Red.), 1st International Conference on Object-based Image Analysis (OBIA 2006), Workshop proceedings, Salzburg.
- Hese S., Schmulius C., 2005, Object Oriented Deforestation Mapping in Siberia – Results from the SIBERIA-II Project, DGPF Jahrestagung, Rostock, Proceedings CD.
- Hoffmann, A. Van Der Vegt J. W., 2001, New Sensor systems and new Classification Methods: Laser- and Digital Camera-data meet object-oriented strategies. W: GeoBIT/GIS 6.
- Hofmann P., Reinhardt W., 2000, The extraction of GIS features from high resolution imagery using advanced methods based on additional contextual information – first experiences. W: ISPRS, Vol. XXXIII, Amsterdam, 2000.
- Ivits E., Koch B., 2002, Object-Oriented Remote Sensing Tools for Biodiversity Assessment: a European Approach. W: Proceedings of the 22nd EARSeL Symposium, Prague, Czech Republic, 4-6 June 2002, Millpress Science Publishers, Rotterdam, Netherlands.
- Johansen K., Arroyo L.A, Phinn S., Witte C., 2008, Development of process trees for object-oriented change detection in riparian environments from high spatial resolution multi-spectral images. W: Hay G.J, Blaschke T. Marceau D. (Red.). GEOBIA 2008 – Pixels, Objects, Intelligence. GEOgraphic Object Based Image Analysis for the 21st Century. University of Calgary, Calgary Alberta, Canada, August 05-08. ISPRS Vol. No. XXXVIII-4/C1. Archives.
- Kayitakire F., Farcy C., Defourny P., 2002, Ikonos-2 imagery potential for forest stands mapping. ForestSAT Symposium, Heriot Watt University, Edinburgh, August 5-9.
- Kellndorfer J.M., Ulaby F.T., 2003, Forest Biomass Inversion from SAR using Object Oriented Image Analysis Techniques. W: Proceedings of IGARSS 2003 IEEE, July 2003, Toulouse.
- Kristóf D., Csató É., Ritter D., 2002, Application of high-resolution satellite images in forestry and habitat mapping - evaluation of Ikonos images through a Hungarian case study. W: Joint International Symposium on Geospatial Theory, Processing and Applications. Ottawa, Canada.
- Lang S., Blaschke T., 2006, Bridging Remote Sensing and GIS – which are the main supportive pillars?, W: Lang S., Blaschke T., Schöpfer E., (Red.), 1st International Conference on Object-based Image Analysis (OBIA 2006), Workshop proceedings, Salzburg.

- Leppänen V.J., Tokola T., Maltamo M., Mehtätalo L., Pusa T., Mustonen J., 2008, automatic delineation of forest stands from lidar data. W: Hay G.J, Blaschke T. Marceau D. (Red.). GEOBIA 2008 – Pixels, Objects, Intelligence. GEOgraphic Object Based Image Analysis for the 21st Century. University of Calgary, Calgary Alberta, Canada, August 05-08. ISPRS Vol. No. XXXVIII-4/C1. Archives.
- Maier B., Tiede D., Dorren L., 2008. Characterising Mountain Forest Structure using landscape metrics on LiDAR-based Canopy Surface Models, W: Blaschke T., Lang S., Hay G. (Eds.). Object-Based Image Analysis – Spatial concepts for knowledge-driven remote sensing applications, Berlin: Springer.
- Mallinis G., Mitsopoulos I., Dimitrakopoulos A., Gitas I., Karteris M., 2008, Local-Scale Fuel-Type Mapping and Fire Behavior Prediction by Employing High-Resolution Satellite Imagery. W: IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observation and Remote Sensing, volume 1, no. 4, December 2008.
- Middleton M., Närhi P., Sutinen M.L., Sutinen R., 2008, Object-based change detection of historical aerial photographs reveals altitudinal forest expansion. W: Hay G.J, Blaschke T., Marceau D. (Red.). GEOBIA 2008 – Pixels, Objects, Intelligence. GEOgraphic Object Based Image Analysis for the 21st Century. University of Calgary, Calgary Alberta, Canada, August 05-08. ISPRS Vol. No. XXXVIII-4/C1. Archives.
- Mitri G H, Gitas I Z, 2008, Mapping the severity of fire using object-based classification of IKONOS imagery, W: International Journal of Wildland Fire 2008, volume 17.
- Neubert M., Herold H., Meinel G., 2006, Evaluation of remote sensing image segmentation quality - further results and concepts, W: Lang S., Blaschke T., Schöpfer E., (Red.), 1st International Conference on Object-based Image Analysis (OBIA 2006), Workshop proceedings, Salzburg.
- Onishi N., 2004, Approach to hierarchical forest cover type classification with object-oriented method. W: Proceedings of the 25th Asian Conference on Remote Sensing. Chiang Mai, Thailand. 22 - 26 November 2004.
- Platt R.V., Schoennagel T., 2008, Have forests really become denser? An object-oriented assessment of a key premise in wildfire policy. W: Hay G.J, Blaschke T. Marceau D. (Red.). GEOBIA 2008 – Pixels, Objects, Intelligence. GEOgraphic Object Based Image Analysis for the 21st Century. University of Calgary, Calgary Alberta, Canada, August 05-08. ISPRS Vol. No. XXXVIII-4/C1. Archives.
- Reusen I., Bertels L., Debruyen W., Deronde B., Fransaeer D., Sterckx S., 2002, Species Identification and Stress Detection of Heavy-Metal Contaminated Trees. Presentation at the Conference Spectral Remote Sensing of Vegetation. Las Vegas, NV, USA. March 12 - 14, 2003.
- Sasakawa H., Tsuyuki S., 2003, Development of the forest type classification technique for the mixed forest with coniferous and broad-leaved species using the high resolution satellite data. W: Proceedings of the 24th Asian Conference on Remote Sensing. Busan, South Korea. 2003.
- Schöpfer E., Lang S., Blaschke T., 2005, A 'Green Index' incorporating remote sensing and citizen's perception of green space. International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and spatial information sciences, Vol. No. XXXVII-5/W1, Tempe.
- Schwarz M., Steinmeier Ch., Waser L., 2001, Detection of storm losses in alpine forest areas by different methodic approaches using high-resolution satellite data. W: 21st EARSeL Symposium, Paris.
- Shearman P.L, Ash J, Mackey B, Bryan J.E., Lokes B, 2009, Forest Conversion and Degradation in Papua New Guinea 1972–2002, W: Biotropica, the Journal fo Tropical Biology and Conservation, volume 42, Issue 2.

- Shiba M., Itaya A., 2006, Using eCognition for improved forest management and monitoring systems in precision forestry. W: Ackerman PA, Längin DW, Antonides MC (Red.) Precision Forestry in plantations, semi-natural and natural forests. Proceedings of the International Precision Forestry Symposium, Stellenbosch University, South Africa, March 2006. Stellenbosch University, Stellenbosch.
- Stefanacci J., 2006, Automated stand delineation and fire fuels mapping W: Proceedings of ASPRS 2006 Annual Conference, Reno, Nevada; May 1-5, 2006.
- Tiede D., Lang S., Hoffmann C., 2006, Supervised and forest type-specific multi-scale segmentation for a one-level-representation of single trees. W: Lang S., Blaschke T., Schöpfer E., (Red.), 1st International Conference on Object-based Image Analysis (OBIA 2006), Workshop proceedings, Salzburg.
- Tiede D., Heurich M., Blaschke T., 2004, Object-based semi automatic mapping of forest stands with Laser scanner and Multi-spectral data. International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, vol. XXXVI-8W2, Freiburg.
- Tokola T., Vauhkonen J., Leppänen V., Pusa T., Mehtätalo L., Pitkänen J., 2008, applied 3d texture features in als based tree species segmentation. W: Hay G.J, Blaschke T. Marceau D. (Red.). GEOBIA 2008 – Pixels, Objects, Intelligence. GEOgraphic Object Based Image Analysis for the 21st Century. University of Calgary, Calgary Alberta, Canada, August 05-08. ISPRS Vol. No. XXXVIII-4/C1. Archives.
- Van Aardt, J., 2004, An Object-Oriented Approach to Forest Volume and Aboveground Biomass Modeling using Small-Footprint Lidar Data for Segmentation, Estimation, and Classification. PhD Dissertation, Virginia Polytechnic Institute and State University.
- Van Der Sande C., De Jong S.M., De Rooc A..P.J., 2004, A segmentation and classification approach of IKONOS-2 imagery for land cover mapping to assist flood risk and flood damage assessment. W: ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing 58 (2004), 217-229.
- Wikipedia GEOBIA, Forum internetowe OBIA, <http://wiki.ucalgary.ca/page/Talk:OBIA> (maj 2009).

Joanna Adamczyk

Katedra Urządzenia Lasu, Geomatyki i Ekonomiki Leśnictwa
Wydział Leśny
Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie
Joanna.Adamczyk@wl.sggw.pl