

Rozdział 2

BOGDAN ZAGAJEWSKI

Uniwersytet Warszawski

ZASTOSOWANIE TELEDETEKCJI DO OCENY STANU ZAGOSPODAROWANIA PRZESTRZENNEGO W POLSCE

Abstract: Application of Remote Sensing for an Evaluation of Spatial Organization in Poland. Modern space management is based on actual and high-quality data. Such solutions offers remote sensing technology information and techniques that are used for land cover monitoring and inventory. For less experienced users are particularly useful high-resolution images (*e.g.* QuickBird, Ikonos or Google Map) that allow visual interpretation of the earth's surface. More advanced users are particularly recommended multispectral images (*e.g.* Landsat, Spot, IRS, or new going Sentinel series) that allow the classification of land cover and an analysis of the environment, such as vegetation. These data can be processed and modeled in GIS.

This paper presents a basic set of information for independent remote sensing data acquisition and assessment of possible measures for land cover inventory. Satellite systems allow the continuous acquisition of information, which is used in the long-term monitoring. This element can have practical importance, such as verification of illegal construction and evaluation of the land use plan.

Key words: Classification, remote sensing, spatial management, spectral characteristics.

Wstęp

Potencjał teledetekcji nie jest obecnie należycie wykorzystywany do oceny stanu zagospodarowania przestrzennego w Polsce. Wydaje się, że kluczową przyczyną jest brak należytej świadomości oraz przygotowania decydentów. Wynika to również z bardzo szybkiego rozwoju technologii teledetekcyjnej

i jej powszechnego dostępu do wysokorozdzielczych oraz wielospektralnych danych (szczególnie po przystąpieniu Polski do NATO). Wcześniej dane lotnicze były traktowane jako materiał poufny i dostępność zdjęć była ograniczona, natomiast zobrazowania satelitarne były bardzo drogie, a procedury przetwarzania obrazów wymagały zaawansowanych algorytmów i specjalistycznego oprogramowania. Po przystąpieniu Polski do NATO coraz szerszym strumieniem zaczęły płynąć do kraju zarówno dane, jak i specjalistyczne oprogramowanie oraz sprzęt komputerowy. Jeszcze na początku 2000 r. komputery osobiste klasy PC w wielu przypadkach nie gwarantowały możliwości przetwarzania danych, które zapisane były w dużych plikach. Większość profesjonalistów wykorzystywała stacje robocze, najczęściej działające pod systemem operacyjnym UNIX. Ograniczało to niewątpliwie popularyzację oraz rozwój teledetekcji. Znaczne zmiany nastąpiły wraz z upowszechnieniem Internetu oraz zwiększeniem możliwości operacyjnych komputerów klasy PC.

Od kilku lat darmowy dostęp do legalnych danych *on-line*, jak i *open-source'owych* programów geoinformatycznych pozwala na szerokie wykorzystywanie technologii geoinformatycznych przede wszystkim przez studentów, jak i mniej zaawansowanych użytkowników danych teledetekcyjnych. Jest to ważny element popularyzacji teledetekcji, gdyż absolwenci szkół wyższych zasilają podstawowe komórki administracji samorządowej oraz różnego rodzaju agencje, wykorzystując do swoich analiz zdjęcia lotnicze, satelitarne oraz ich produkty w postaci, np. ortofotomap, cyfrowych map i wektorowych warstw informatycznych. Należy jednak zwrócić uwagę na to, że zainteresowanie teledetekcją na szczeblach administracji publicznej nie jest duże, gdyż urzędnicy koncentrują się na wytycznych prawnych i urzędowo ustalonych schematach postępowania. Natomiast dane teledetekcyjne są wykorzystywane bardzo często przez grupy niezależnych użytkowników, np. w organizacjach typu NGO.

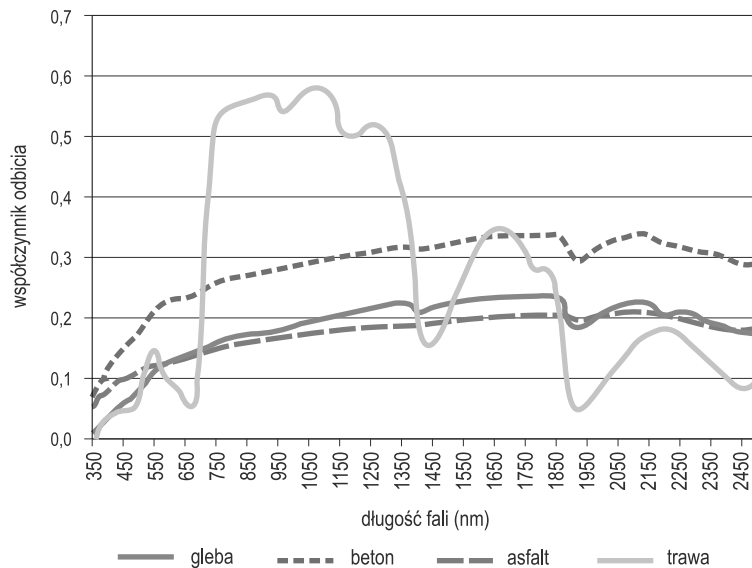
Kluczowym elementem w analizie potencjału danych teledetekcyjnych jest poznanie ograniczeń technicznych, jakie wynikają ze stosowania technologii lotniczej i satelitarnej. Pierwszym i zasadniczym elementem jest to, że pozyskanie informacji bazuje na rejestracji fali (najczęściej elektromagnetycznej) odbitej lub wyemitowanej przez badany obiekt. Źródłem promieniowania jest najczęściej słońce, które emituje całe spektrum promieniowania elektromagnetycznego; od fal bardzo krótkich (np. promieniowanie rentgenowskie, gamma), aż po metrowe fale. Atmosfera ziemską przepuszcza tylko niewielką ilość promieniowania w zakresie widzialnym (VIS), bliskiej (NIR), średniej (SWIR) oraz termalnej (TIR) podczerwieni oraz centy-, metrowe

długości w zakresie mikrofal. Do specjalistycznych zadań (np. analizy zanieczyszczeń ropopochodnych) w zobrazowaniach lotniczych wykorzystuje się zakres ultrafioletu (UV).

Kluczowym elementem przed podjęciem decyzji o wykorzystaniu danych teledetekcyjnych jest określenie potrzeb i możliwości technicznych. Jednym z kluczowych zagadnień jest *rozdzielczość przestrzenna*, która definiowana jest najmniejszą wielkością zobrazowanej powierzchni, czyli wielkością piksela. W przypadku satelitów wysokorozdzielczych (np. Ikonos, QuickBird) piksel ma wielkość rzędu 0,6 do 4 m. Satelity środowiskowe cechują się większą liczbą kanałów, ale wielkość piksela waha się w granicach 4-1000 m, np. WorldView 2: 4m, Landsat ETM+: 15-60 m, SPOT 10-1000 m. Największy piksel mają obrazy pozyskane z sensorów meteorologicznych, gdyż wynosi on 1-3 km, np. 1-3 km MSG SEVIRI lub 1,1 km NOAA AVHRR.

Rozmiar piksela wynika najczęściej z rozdzielczości spektralnej sensora, czyli szerokości połówkowej zastosowanych filtrów, a więc zakresu promieniowania elektromagnetycznego, jaki jest przepuszczany przez filtr i dociera do detektora. Dobór szerokości filtrów podyktowany jest przeznaczeniem sensora do określonych zadań, gdyż poszczególne obiekty w sposób charakterystyczny absorbują lub odbijają promieniowanie w ściśle określonych długościach promieniowania (ryc. 1). Konstrukcja sensora pozwala zarejestrować charakterystyczne minima lub maksima absorpcji promieniowania, co umożliwia szczegółową analizę badanych obiektów, np. występowanie chlorofilu, wody, rozróżnienie asfaltu i betonu.

Szerokość połówkowa filtru bezpośrednio warunkuje liczbę kanałów spektralnych występujących w danym sensorze, gdyż satelita porusza się ze stałą prędkością (wynoszącą kilka kilometrów na sekundę). W bardzo krótkim czasie do sensora musi dopłynąć określona liczba fotonów, która pobudzi detektor do rejestracji sygnału. Z technicznego punktu widzenia, do dobrego funkcjonowania urządzeń możliwe jest zwiększenie albo szerokość filtrów (w przypadku sensorów panchromatycznych obejmuje ona najczęściej cały zakres widzialny, dając w zamian piksel obrazu wynoszący kilkadziesiąt centymetrów, np. QuickBird), albo zwiększa się wielkość piksela ograniczając szerokość filtrów (np. Landsat ETM+ szerokość filtrów wynosząca kilkadziesiąt nanometrów, ale wielkość piksela 30 m). W najnowocześniejszych detektorach wzmocnienie sygnału jest bardzo duże i udaje się ograniczyć szumy elektroniki. Pozwala to stosować bardzo wąskie przedziały (np. 20 nm) z zachowaniem dużych rozdzielczości przestrzennych, np. 30 m (jako przykład takiej konstrukcji może służyć sensor hiperspektralny EnMAP).

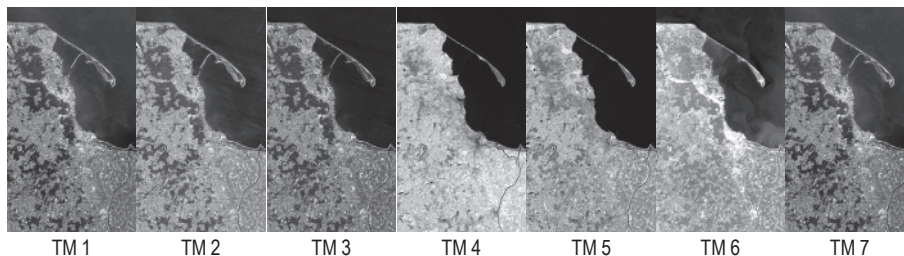


Ryc. 1. Wybrane charakterystyki spektralne

Źródło: Opracowanie własne.

W poszczególnych zakresach spektrum zobrazowany jest poziom odbicia promieniowania od danego obiektu w sposób charakterystyczny dla danej długości fali. Jako przykład może służyć roślinność, która w zakresach widzialnych jest ciemnoszara (ryc. 2, TM1-TM-3), natomiast w podczerwieni staje się ona relatywnie jaśniejsza (roślinność liściasta jest jasnoszara, natomiast roślinność iglasta jest ciemniejsza od liściastej, ale jaśniejsza od obrazu w zakresach widzialnych). Odwrotna sytuacja ma miejsce w przypadku wód, gdyż w zakresie widzialnym promieniowanie elektromagnetyczne odbija się w niewielkim stopniu od wód, natomiast w podczerwieni czysta woda absorbuje niemal całość promieniowania, co objawia się czarnym fotofonem (ryc. 2, TM4-TM6). Obraz wód zanieczyszczonych sedimentami lub roślinami jest jaśniejszy, gdyż wszystkie te obiekty odbijają promieniowanie, co skutkuje jaśniejszymi fotofonami zanieczyszczonych akwenów (ryc. 2, TM6).

Ważnym zagadnieniem w procesie automatycznego przetwarzania obrazów jest rozdzielczość radiometryczna, która oznacza liczbę możliwych stopni szarości obrazu pomiędzy czernią i bielą. Oko ludzkie rozróżnia kilkanaście stopni, jednak we współczesnych sensorach zapisuje się obraz w skali od 256 (zapis 8 bitowy) do 32 768 stopni szarości (15 bitów), rzadko stosuje



Ryc. 2. Kanały spektralne Landsat TM

Źródło: Global Land Cover Facility, University of Maryland, USA,
<http://glcf.umd.edu/data/landsat/>.

się zapis 16 bitowy, czyli 65 536 stopni szarości. Tak duża czułość detektora umożliwia bezproblemową rejestrację bardzo silnego sygnału odbicia fal elektromagnetycznych od śniegu, czy lodu, jak i słabych sygnałów pochodzących z puszc tropikalnych. Z punktu widzenia przetwarzania danych i ich klasyfikacji większa rozdzielczość umożliwia łatwiejszą klasyfikację danych.

Ostatnim kluczowym elementem w prowadzeniu obserwacji zmian zachodzących na powierzchni Ziemi jest rozdzielczość czasowa, która mówi, ile upływa dni do rewizyty sensora nad danym terenem. Standardowo, w przypadku satelitów meteorologicznych jest on bardzo krótki, gdyż wynosi od kilkunastu minut (MSG – 15 min, Meteosat – 30 min) do kilku godzin (NOAA – 12 godzin). Dla satelitów środowiskowych czas powtórnego zobrazowania tego samego obszaru wynosi kilkanaście dni (Ikonos – 11 dni, Landsat i Hyperion – 16 dni). Problem ten rozwiązuje się przez umieszczenie bliźniaczych satelitów, np. NOAA i planowane europejskie misje serii Sentinel 1-3.

1. Źródła danych

Podstawą wszelkich prac w badaniach teledetekcyjnych są obrazy lotnicze i satelitarne. W Polsce istnieje zbyt małe zapotrzebowanie na dane satelitarne, gdyż administracja publiczna i samorządowa bazuje w większości na mapach, których aktualność pozostawia bardzo często wiele do życzenia, tj. część kraju (głównie największe miasta i obszary ważne strategicznie, np. tereny przemysłowe, objęte inwestycjami, parki narodowe) posiadają aktualne dane, natomiast większość terenu wiejskich i mniejszych miejscowości nie ma ujednoczonych i aktualnych baz danych. Oznacza to, że w skali kraju brakuje jednolitego co do treści lub aktualności materiału referencyjnego. Braki

te stara się uzupełnić Centralny Ośrodek Dokumentacji Geodezyjnej i Kartograficznej przez projekt geoportal.gov.pl, który przygotował infrastrukturę techniczną według Krajowej Infrastruktury Informacji Przestrzennych (KIIP). Portal jest zgodny z europejskimi wytycznymi INSPIRE. Zadaniem Geoportalu jest udostępnianie użytkownikom danych i usług geoprzestrzennych. Implementuje on rozwiązania zgodne z normami ISO, zaleceniami OGC oraz z krajowymi standardami. Jednak zasobność Geoportalu w dane, porównując nawet do darmowych serwisów amerykańskich, czy europejskich jest bardzo skromna. Wiele dużych firm udostępnia wiele zasobniejsze dane bezpłatnie. Dane Geoportalu mogą stanowić podstawowe źródło danych referencyjnych, jednak na ich podstawie nie można prowadzić bardziej zaawansowanych analiz (jakie można z powodzeniem tworzyć bazując na teledetekcyjnych danych wielospektralnych).

Duża część aktualnych danych teledetekcyjnych pozyskiwana jest bezpośrednio od dostawców technologii geoinformatycznych na potrzeby konkretnych opracowań zleczanych przez, np. agencje administracji rządowej lub prywatne firmy, które wykorzystują dane lotnicze i satelitarne, np. do weryfikacji informacji, np. zeznań rolników dotyczących upraw do dopłat z UE lub też firm telekomunikacyjnych do rozwoju infrastruktury komunikacyjnej. Bardzo często działania poszczególnych organów, np. parków narodowych nie są skoordynowane i każdy podmiot przygotowuje zobrazowania lotnicze lub kupuje zdjęcia satelitarne według własnych specyfikacji technicznych, co w skali kraju utrudnia porównywanie wyników, a część analiz jest zupełnie niemożliwa do przeprowadzenia w sposób ujednolicony dla wszystkich podmiotów.

Relatywnie płytkie zapotrzebowanie rynku na produkty teledetekcyjne nie zachęca do tworzenia ogólnokrajowej infrastruktury przeznaczonej do pozyskiwania, przetwarzania, archiwizacji i udostępniania danych, co doskonale funkcjonuje w państwach UE, np. Centralna Biblioteka Danych Teledetekcyjnych w Niemczech (DLR Oberpfaffenhofen/Monachium), Holandii, Francji, czy Belgii. Polskie jednostki naukowe bazują głównie na darmowych serwisach internetowych (podane poniżej), natomiast firmy komercyjne wykonują lub zakupują komercyjnie zobrazowania na własne potrzeby zgodnie ze specyfikacją jednostek zamawiających. Bardzo często zdarza się, że wykonawcami tych zamówień są zagraniczne jednostki.

Znaczna część danych jest dostępna bezpłatnie, pozyskanych głównie z amerykańskich satelitów. Dane pozyskiwane przez europejskie misje satelitarne są zwolnione z opłat dla członków ESA (European Space Agency), Polska niestety nie jest członkiem ESA i korzystanie z danych może odbywać

się za pośrednictwem państw należących do ESA lub też bezpośrednio z serwisu ESA, ale po uzyskaniu zgody na korzystanie z danych (pozwolenia te są wydawane często bezpłatnie).

Najpopularniejsze serwisy udostępniające bezpłatne dane to:

- GLOVIS (<http://glovis.usgs.gov>)
- GLCF (<http://glcfapp.glcf.umd.edu:8080/esdi/index.jsp>)
- USGS (<http://www.usgs.gov/pubprod>)
- Earth Explorer (<http://edcsns17.cr.usgs.gov/EarthExplorer>)

Najpopularniejsze produkty zwolnione z opłat:

- LANDSAT (<http://landsat.org>)
- MODIS (<https://wist.echo.nasa.gov/api>)
- NOAA (<http://edc2.usgs.gov/glcc/glcc.php>)
- METEOSAT (<http://badc.nerc.ac.uk/data/meteosat>)

Dane te są wstępnie przetworzone (poziom 1b – wykonana jest korekcja geometryczna i radiometryczna) i mogą one być z powodzeniem wykorzystane do wizualizacji, jak i klasyfikacji zdjęć.

Komercyjnie dane dystrybuowane są przez:

- Eurimage (<http://www.eurimage.com/>)
- EOLI (<http://earth.esa.int/EOLi/EOLi.html>)

Serwisy te udostępniają wszystkie rodzaje danych w wybranych przez zamawiającego formacie i poziomie przetworzenia.

Darmowe serwisy tematyczne:

- CLC CorineLand Cover (<http://www.eea.europa.eu/data-and-maps>)
- ASTER DEM (Digital ElevationModel, <http://www.gdem.aster.ersdac.or.jp>)
- SRTM ShuttleRadar TopographyMission (<http://www.gdem.aster.ersdac.or.jp/search.jsp>)
- EEA EuropeanEnvironment Agency (<http://www.eea.europa.eu/data-and-maps>)

Ponadto, do wielu zastosowań informacyjnych, lokalizacyjnych i referencyjnych przydatne są obrazy (np. ortofotomapy) znajdujące się w serwisach: Google Earth, Geoportal, Bing, Yahoo, Zumi, Targeo, Techmex (płatny, ale dokładny Numeryczny Model Terenu Polski), Wrota Mazowsza.

Popularne dane tematyczne:

- NASA (<http://www.nasa.gov>)
- Earth Resources Observation and Science Center (<http://eros.usgs.gov>)
- National EnvironmentalSatellite, Data, and InformationService (<http://www.nesdis.noaa.gov>)

- Mapy topograficzne (<http://poehali.org/maps>, <http://www.davidrumsey.com>).

Najpopularniejsze formaty zapisu danych przestrzennych:

- GeoTIF File –obraz zapisany w formacie TIF z georeferencjami GTF File –charakterystyka produktu zawierająca: *.txt, *.gcp –raport kalibracyjny oraz mtl –informacje o produkcji)
 - *.prj –dane o odwzorowaniu
 - *.shp –format wektorowy obsługiwany przez większość oprogramowania
 - *.g.zip, *.g.rar (należy dwukrotnie rozpakować)
1. Do przetwarzania danych rastrowych:
 - GRASS GIS (<http://grass.osgeo.org/>)
 - CAPAWARE (3D, <http://www.capaware.org/>)
 - BEAM (<http://www.brockmann-consult.de/cms/web/beam/welcome>)
 2. Do przetwarzania danych wektorowych:
 - SAGA GIS (<http://www.saga-gis.org/en/index.html>)
 - MapWindow GIS (<http://www.mapwindow.org/>)
 - Quantum GIS (<http://qgis.org/>)
 - uDig (<http://udig.refrains.net/>)
 - gvSIG (<http://www.gvsig.gva.es>)
 - Open JUMP (<http://jump-pilot.sourceforge.net/>)
 - KALYPSO (<http://sourceforge.net/projects/kalypso/>)
 - MAPNIK (<http://mapnik.org/>)
 - Map Guide (<http://mapguide.osgeo.org/>).

2. Wykorzystanie danych satelitarnych do szczegółowej inwentaryzacji zagospodarowania terenu

Na potrzeby monitoringu przestrzeni miejskiej szczególnie przydatne są wysokorozdzielcze dane satelitarne i lotnicze. Z punktu widzenia technologii oba rodzaje danych są porównywalnej jakości, jednak jednostkowy koszt pozyskania obrazu satelitarnego jest niższy. W Polsce powszechnie wykorzystuje się tego rodzaju dane do prowadzenia monitoringu obszarów rolniczych; za pomocą wysokorozdzielczych danych weryfikowane są deklaracje rolników dotyczące upraw i zasiewów w przypadku ubiegania się o dofinansowanie z budżetu UE. Weryfikacje te prowadzone są na podstawie komercyjnych zobrazowań pochodzących z satelitów OrbView, Ikonos, QuickBird lub GeoEye. Sensory tych satelitów oferują rozdzielczość ok. 1 m (kanał panchromatyczny rejestrujący promieniowanie w zakresie widzialnych



Ryc. 3. Zobrazowanie panchromatyczne centrum Warszawy o rozdzielczości 1 m z satelity IKONOS

Źródło: Uniwersytet Warszawski, Wydział Geografii i Studiów Regionalnych.

o rozdzielczości przestrzennej poniżej jednego metra po połączeniu z wielospektralnymi, barwnymi kanałami o rozdzielczości 2-4 m pozwala wydzielać obiekty o wielkości ok. 1 m, ryc. 3).

Wysokorozdzielcze obrazy są szczególnie przydatne do: tworzenia map i ich aktualizacji; inwentaryzacji budynków (w tym wykrywania samowoli budowlanych), identyfikacji infrastruktury cywilnej oraz wojskowej, np. wyrzutni raket; monitorowania obszarów chronionych i specjalnych, np. konfliktowych planowania misji ratunkowych (powietrznych, lądowych i morskich), szacowania zniszczeń i katastrof, w tym m.in. obszarów nielegalnego wycinania lasów; określania gatunków drzew, biomasy, stanu zdrowotnego, przedziału wiekowego; szacowania stresu roślin związanego z działalnością człowieka, np.: zanieczyszczenia; modelowania 3D.

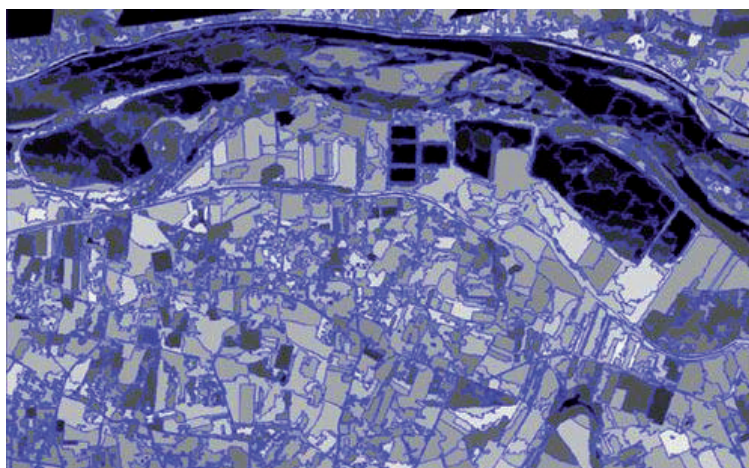
Szczególne miejsce w badaniach powierzchni terenu zajmują zobrażenia wielospektralne, które pozwalają na: precyzyjne analizy zmian pokrycia terenu, np. rozwoju zabudowy; monitorowanie procesów pustoszczenia, wylesiania, urbanizacji; dostarczanie informacji do zarządzania obszarami chronionymi; szczegółowe kartowanie geomorfologiczne, glebowe i analizy

zmian zachodzących na powierzchni Ziemi; kartowanie globalnych procesów energetycznych, hydrologicznych i określenia dynamiki globalnych zmian środowiska; rozmieszczenia roślinności, gleb i ich zmian w celu określenia produktywności biologicznej, interakcji między lądem, atmosferą i hydrosferą, monitorowanie zmian ekosystemów; zmian zasięgu i efektów pożarów, powodzi, erozji wybrzeży, zniszczeń.

3. Klasyfikacja obrazów lotniczych i satelitarnych

Jednym z kluczowych pól rozwoju teledetekcji są algorytmy klasyfikacji danych. Prace naukowe zmierzają w kierunku automatyzacji procedur, by móc analizować dane na dużych powierzchniach terenu. Obecnie najlepiej rozwinięte są algorytmy z klasyfikacją obiektową oraz sztucznymi sieciami neuronowymi. W pierwszym przypadku analizuje się całe regiony, które mają podobne charakterystyki spektralne, tj. odbicie. Umożliwia to identyfikację obiektów w sposób hierarchiczny, tj. w pierwszym etapie identyfikuje się wszystkie obszary pokryte roślinnością, a następnie poszczególne poligony zalicza do określonej grupy, np. lasy liściaste, iglaste, łąki (ryc. 4).

Wykorzystanie sieci neuronowych zmierza do opracowania wzorców poszczególnych obiektów, a następnie wprowadzeniu do sieci cech najbardziej charakterystycznych dla danego obiektu (barwa, struktura i tekstura



Ryc. 4. Przykład zobrazowania z nałożonymi homogenicznymi obiektami

Źródło: <http://www.terraimaging.nl/index.php?id=42>.

elementów budujących analizowany obiekt). W następnym kroku następuje wyuczenie sieci neuronowej pod kątem rozpoznawania cech charakterystycznych przez zaprogramowanie odpowiednich wartości wag połączeń między neuronami sieci, co pozwala wzmacniać lub hamować przepływ sygnałów. W efekcie prowadzi to do identyfikacji i klasyfikacji danej formy na obrazach satelitarnych, umożliwiając prowadzenie klasyfikacji na różnych scenach tego samego typu sensora (tab. 1).

W analizach terenów zabudowanych niezwykle przydatne są obrazy hiperspektralne, ze względu na dużą rozdzielczość spektralną, czyli mnogość wąskich kanałów oraz dużą rozdzielczość przestrzenną. Większość danych

Tabela 1

Dokładność klasyfikacji form pokrycia terenu

	13 kanałów MNF 1x1		13 kanałów MNF 3x3		40 kanałów 1x1		40 kanałów 3x3	
	Całkowita: 80,1%		Całkowita: 88,1%		Całkowita: 85,3%		Całkowita: 91,35%	
	Kappa: 0,7563		Kappa: 0,8546		Kappa: 0,8204		Kappa:0,8620	
	Prod. (%)	Użyt. (%)	Prod. (%)	Użyt. (%)	Prod. (%)	Użyt. (%)	Prod. (%)	Użyt. (%)
Łąki	87,6	91,2	94,3	92,4	93,1	92,2	97,6	96,7
Nieuzytki	81,5	53,9	81,7	89,3	83,9	75,6	92,7	91,6
Las iglasty	81,6	89,6	87,3	92,0	84,8	89,2	90,7	94,2
Las mieszany	80,7	83,0	91,3	88,1	86,3	84,2	94,4	91,1
Las liściasty	83,6	74,3	84,9	88,3	85,8	80,6	92,5	92,1
Zadrzewienia	33,9	33,9	60,4	53,0	43,6	39,8	70,6	80,8
Sad	37,1	28,4	70,2	76,9	44,3	56,9	–	–
Buraki	19,8	70,3	74,0	85,2	75,0	84,5	96,7	100,0
Ziemniaki	61,0	40,6	64,1	88,7	81,7	75,3	96,8	94,3
Owies	97,2	93,8	99,2	98,3	98,9	96,6	99,7	99,3
Ściernisko	97,5	96,9	97,3	97,7	98,8	94,8		
Grunt zaorany	93,9	99,3	100,0	99,9	98,7	100,0	100,0	100,0
Droga asfaltowa	38,9	23,3	39,5	42,2	4,6	40,6	51,6	89,6
Droga polna	60,5	27,3	95,6	67,4	55,5	72,6	99,1	94,5
Tereny zabudowane	0,6	46,0	63,0	65,0	43,2	57,5	–	–
Budynki	69,8	61,7	68,8	75,1	75,3	68,4	–	–

Źródło: [Zagajewski, Olesiuk 2009].

hiperspektralnych pozyskiwana jest z misji lotniczych. Ogranicza to pozyskanie danych do lokalnych skal opracowań, prawie uniemożliwiając wykonanie takich analiz dla obszarów dużych, np. całej Polski. Dane te zawierają informacje do szczegółowego rozpoznania pokrycia miast. Jako jedną z pierwszych i przykładowych prac może służyć rozprawa doktorska dr Uty Heiden [GFZ Poczdam, DLR Oberpfaffenhofen, Heiden *et al.* 2005], która przeanalizowała szczegółowo najważniejsze materiały występujące w mieście, analizy przeprowadzone zostały dla Drezna (tab. 2). Uzyskane wyniki są satysfakcjonujące dla klasyfikacji skomplikowanych przestrzeni miejskich. Podobne wyniki uzyskane zostały dla Berlina [Hostert *et al.* 2005].

Klasyfikacja pokrycia terenu jest także powszechnie wykonywana na obrazach wielospektralnych z wykorzystaniem standardowych metod, np. klasyfikacji największego prawdopodobieństwa. Ze względu na mniejszą liczbę kanałów spektralnych ograniczeniu ulega liczba potencjalnych wydzieleni. Jako przykład takiego opracowania mogą służyć obrazy wielospektralne z indyjskiego satelity Indian Remote Sensing Satellite LISS III [Saha *et al.* 2005]. Oryginalna 23,5 m rozdzielczość przestrzenna została zwiększona wysokorozdzielczym obrazowaniem o rozdzielczości 6 m oraz Numerycznym Modelem Terenu o pikselu dostosowanym do wielkości obrazowania wielospektralnego, czyli 23,5 m. W sumie klasyfikacji podano fragment terenu

Tabela 2

Dokładności klasyfikacyjne wybranych materiałów budowlanych w Dreźnie

Material	Liczba spektr wykorzystana do analizy	Błąd klasyfikacyjny (%)
PVC	253	0,0
PE	359	1,2
Żwir	81	1,2
Papa	105	0,0
Bituminy	296	9,1
Dachówka ceramiczna	357	0,3
Beton	171	17,0
Tartan (tworzywo poliuretanowe)	37	0,0
Asfalt	240	7,1
Kostka brukowa	119	5,0
Czerwone łupki	381	3,4
Ciemne łupki	110	2,3

Źródło: [Heiden *et al.* 2005] (tab. 2, 3).

o powierzchni 720 km² (oryginalna szerokość pasa zobrazowania IRS LISS III wynosi 141 km). W celu zwiększenia dokładności klasyfikacji roślinności dodano dodatkowo mapę rozkładu znormalizowanego wskaźnika zieleni NDVI, który pozwala dość łatwo rozróżnić tereny pokryte zdrową i uszkodzoną roślinnością, ponadto tereny bez roślinności, wody, śnieg. Uzyskana całkowita dokładność klasyfikacji jest bardzo wysoka, gdyż przekracza 92% [tab. 3, Saha *et al.* 2005].

Zastosowanie map rozkładu poszczególnych wskaźników, np. NDVI pozwala odróżnić najważniejsze grupy obiektów (chmury, woda, grunty bez roślinności, roślinność w złym, czy dobrym stanie). Mapy te istotnie poprawiają dokładność klasyfikacji [Zagajewski, Olesiuk 2009].

Do badania skomplikowanych układów przestrzennych szczególnie przydatne są algorytmy sztucznych sieci neuronowych, które dobrze radzą sobie z klasyfikacjami zjawisk występujących nieliniowo, czyli nie występują w ściśle określonej sekwencji zjawisk. Sieci neuronowe do klasyfikacji wykorzystują nie tylko cechy spektralne obiektu, czyli jasność piksela, ale także stałe powtarzające się układy pikseli. Określane jest to mianem struktury i tekstury obrazu. Uzyskiwane w ten sposób dokładności oscylują wokół osiemdziesięciu-dziewięćdziesięciu kilku procent. Problem ten w odniesieniu do skomplikowanych układów przestrzennych roślinności rzeczywistej Tatr Wysokich został szczegółowo omówiony w publikacji Zagajewskiego [2010]. Idea tego typu opracowań opiera się na znalezieniu odpowiednio statystycznie dużych i reprezentatywnych wzorców do uczenia sieci, następnie

Tabela 3

Statystyki klasyfikacji form pokrycia terenu

	Pokrycie terenu	Liczba pikseli wzorcowych do klasyfikacji	Dokładność (%)
1	Zwarty las (<i>Dense Forest</i>)	3779	99,5
2	Roślinność luźna (<i>Sparse vegetation</i>)	1087	90,0
3	Obszary rolnicze (<i>Agriculture</i>)	461	97,5
4	Odłogi (<i>Fallow</i>)	1335	71,5
5	Nieużytki (<i>Barren</i>)	1907	99,0
6	Osiedla (<i>Settlements</i>)	494	92,0
7	Osuwiska, tarasy rzeczne (<i>Fresh sediments</i>)	401	95,5
8	Wody powierzchniowe (<i>Water body</i>)	618	84,5
9	Śnieg (<i>Snow</i>)	1642	99,0

wyuczona sieć podlega ocenie jakości klasyfikacji. Odpowiednio wytrenowana sieć pozwala wykorzystać ją do badania innych terenów, na których występują analizowane obiekty.

Spośród licznych symulatorów sztucznych sieci warto zwrócić uwagę na algorytmy wektorów podtrzymujących (*Support Vector Machines*), sieci o logice rozmytej oraz algorytmy ze wsteczną propagacją błędów. Symulatory te bazują nie tylko na odpowiedzi spektralnej piksela, ale także przestrzennym ułożeniu poszczególnych elementów obrazu (struktura i tekstura obrazu). Elementy te pozwalają na lepsze powiązanie kształtu z cechami spektralnymi poszczególnych obiektów.

Innym rozwiązaniem przydatnym do klasyfikacji skomplikowanych układów przestrzennych są klasyfikacje obiektowe, które bazują na tworzeniu obiektów na podstawie grupowania pikseli o podobnych cechach spektralnych, następnie obiekty te można w sposób hierarchiczny łączyć w wyższego rzędu jednostki [Lewiński 2007].

Reasumując należy stwierdzić, że wykorzystanie zdjęć satelitarnych oraz półautomatycznych procedur klasyfikacji pozwala na uzyskiwanie aktualnych informacji o obiektach występujących na powierzchni Ziemi. Uzyskiwane dokładności oscylują wokół 80-90%, co w powiązaniu z częstymi rewizytami satelitów nad danym obszarem pozwala na dość dokładny monitoring zmian pokrycia i użytkowania przestrzeni, a materiały teledetekcyjne są:

- Bardzo dobrym źródłem informacji o ładzie i zagospodarowaniu przestrzennym.
- Obecnie łatwiej dostępne niż jeszcze było to kilka lat temu. Wynika to z powszechnej dostępności geoserwerów w Internecie i umieszczaniu tam danych z bardzo licznych sensorów lotniczych i satelitarnych.
- Dostarczane razem z algorytmami przetwarzania obrazów. W znacznej części dane oraz algorytmy są darmowe dla całego kraju, jednak wymagają znajomości cyfrowego przetwarzania obrazów teledetekcyjnych od osób zajmujących się tym zagadnieniem.

Ponadto należy stwierdzić, że:

- W Polsce nie ma dostępnego, jednego komplementarnego zbioru zawierającego zarówno darmowe, jak i płatne serwisy informacyjne. Polscy dystrybutorzy danych udostępniają kompletne informacje o usługach komercyjnych. Natomiast darmowe serwery danych dostępne są na zagranicznych serwisach danych (głównie europejskich i amerykańskich).
- Darmowe serwisy danych udostępniają obrazy do celów edukacyjnych, naukowych i prywatnego stosowania. W celu wykorzystania ich do działalno-

ści komercyjnej musi być wykupiona odpowiednia licencja. Podobnie sytuacja wygląda w przypadku chęci pozyskania danych na innym poziomie przetworzenia (dane darmowe są wstępnie skorygowane i przepróbkowane). Problem ten można rozwiązać zamawiając interesujące dane u lokalnego przedstawiciela, np. w Europie jest to firma Eurimage (w Polsce przedstawicielami komercyjnymi są firmy, np. IGiK, Geosystems, ProGea). Oznacza to, że darmowe dane można wykorzystać do celów niekomercyjnych, natomiast dane oryginalne do komercyjnego wykorzystania są płatne.

- Nie ma jednej prostej metody na pozyskanie informacji dla całego kraju. Przeprowadzenie klasyfikacji obrazów dla tak dużych powierzchni, jak Polska wymaga zastosowania kilku procedur (korekcja geometryczna, atmosferyczna, pozyskanie wzorców analizowanych obiektów do klasyfikacji i weryfikacji danych poklasyfikacyjnych, analiz statystycznych dla danych poklasyfikacyjnych). Uzyskane dokładności w zależności od rodzaju danych i przyjętych metod mogą cechować się dokładnością na poziomie 70-90%.
- Bardzo trudno jest określić koszt wykonania takiego opracowania, gdyż zależy od skali opracowania (jakiego rodzaju dane można wykorzystać, czy darmowe, czy np. płatne)? Do czego dane te będą wykorzystywane (jeśli dane mają być wykorzystane do celów naukowych lub edukacyjnych potencjalne koszty zakupu danych i oprogramowania są zdecydowanie niższe niż w przypadku prac komercyjnych)? Jaką dokładność musi mieć opracowanie (koszt generowany jest przez dostępność materiałów weryfikujących dane poklasyfikacyjne, w przypadku ich braku pomiary terenowe będą głównym czynnikiem generującym koszty)?
- Ze względu na dostępność wysokorozdzielczych danych należy zwrócić uwagę na pozyskiwanie materiałów lotniczych i wysokorozdzielczych obrazów do weryfikacji upraw zgłaszanych deklaracji przez rolników celem uzyskania dopłat z UE. Dane te mogłyby posłużyć do pozyskania wielu szczegółowych informacji o zagospodarowaniu przestrzennym kraju.
- Z punktu widzenia „zwykłego” użytkownika dostępność danych satelitarnych jest powszechna i większość osób pozyskuje je przez liczne serwisy internetowe, np. Mapy Google, Zumi, serwisy mobilne, np. ortofotomapy przy lokalizacjach GPS. Użytkownika takiego interesuje głównie wysoka rozdzielczość przestrzenna danych (duża dokładność oraz aktualność obrazu).
- Użytkownikowi bardziej zaawansowanemu przydatne są natomiast dane o większej rozdzielczości spektralnej (większa liczba kanałów, obraz barwny składa się tylko z 3 kanałów – kompozycja RGB, która do klasyfikacji jest zdecydowanie zbyt mało dokładna).

Przydatność danych teledetekcyjnych do badania zagospodarowania przestrzennego Polski jest ogromna, jednak na chwilę obecną w niewielkim stopniu wykorzystywana, wynika to głównie ze słabego zainteresowania ze strony administracji (zamawianie odpowiednich danych, ich gromadzenie i udostępnianie, problemy prawne z dostępem i wykorzystaniem), braku należnych stymulacji do rozwoju społeczeństwa geoinformatycznego i należytej edukacji pracowników samorządowych do korzystania z tego rodzaju danych.

Literatura

- Heiden U., Segl K., Roessner S., Kaufmann H., 2005, *Determination and Verification of Robust Spectral Features for an Automated Classification of Sealed Urban Surfaces*, [w:] *Imaging Spectroscopy. New Quality in Environmental Studies*, B. Zagajewski, M. Sobczak (red.). EARSeL & University of Warsaw, Warsaw.
- Hostert P., Damm A., Diermayer E., Schiefer S., 2005, *Characterizing Heterogeneous Environments: Hyperspectral Versus Geometric Very High Resolution Data for Urban Studies*, [w:] *Imaging Spectroscopy...*, op. cit.
- Lewiński St., 2007, *Obiektowa klasyfikacja zdjęć satelitarnych jako metoda pozyskiwania informacji o pokryciu i użytkowaniu ziemi*. Seria Monograficzna, nr 12, Instytut Geodezji i Kartografii, Warszawa.
- Saha A. K., Arora M. K., Csaplovics E., Gupta R. P., 2005, *Land Cover Classification Using IRS LISS III Image and DEM in a Rugged Terrain: A Case Study in Himalayas*. Geocarto International, t. 20, nr 2.
- Zagajewski B., 2010, *Ocena przydatności sieci neuronowych i danych hiperspektralnych do klasyfikacji roślinności Tatr Wysokich*. Teledetekcja Środowiska, t. 43. http://telegeo.wgsr.uw.edu.pl/Teledetekcja_Srodowiska/Tom_43.html.
- Zagajewski B., Olesiuk D., 2009, *SNNS Classification of Hyperspectral Data of Extensively Used Agricultural Areas*. EARSeL eProceedings; 8(2).