

**Marcin Sobczak<sup>1) 2)</sup>, Bogdan Zagajewski<sup>1)</sup>, Małgorzata Krówczyńska<sup>1) 2)</sup>,  
Ewa Wilk<sup>1) 2)</sup>, Anna Jarocińska<sup>1)</sup>, Piotr Pabjanek<sup>1)</sup>, Adriana Marcinkowska<sup>1)</sup>,  
Adrian Ochtyra<sup>1)</sup>, Marlena Kycko<sup>1)</sup>**

<sup>1</sup> Zakład Geoinformatyki i Teledetekcji  
Wydział Geografii i Studiów Regionalnych  
Uniwersytet Warszawski

<sup>2</sup> WGS84 Polska Sp. z o.o.

e-mail: marcin.sobczak@wgs84.pl

## **Teledetekcyjne metody badania wód śródlądowych**

### **Wstęp**

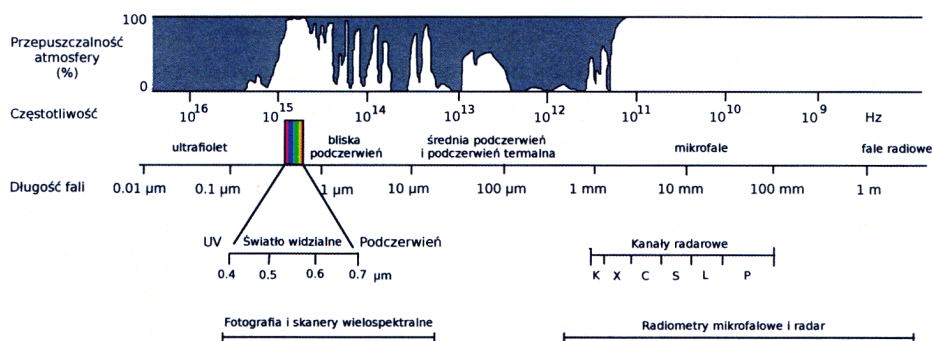
Badania teledetekcyjne pozwalają na nowe spojrzenie na wiele zjawisk i procesów zachodzących w przyrodzie. Dzięki wykorzystaniu obrazów powierzchni Ziemi z pułapu lotniczego lub satelitarnego, możliwe jest dokonanie przeglądu dużego obszaru jednocześnie i w sposób jednolity. Umożliwia to kompleksową analizę obiektów będących przedmiotem zainteresowania, a także tych stanowiących ich otoczenie. Niebagatelne znaczenie ma również możliwość łączenia danych teledetekcyjnych z innymi informacjami posiadającymi odniesienie przestrzenne. Dzięki temu możliwe jest porównanie danych pochodzących z różnych źródeł oraz różnych terminów, a także ich kompilacja i wspólna analiza.

### **Istota badań teledetekcyjnych**

Teledetekcja wykorzystuje zdalne metody pozyskiwania informacji o otaczającym świecie, podobnie jak oko ludzkie. Istota badań teledetekcyjnych polega na rejestracji przez sensor promieniowania elektromagnetycznego odbitego od badanych przedmiotów, w konkretnych zakresach spektralnych. Głównym źródłem promieniowania wykorzystywanym w teledetekcji jest Słońce, które oświetlając powierzchnię Ziemi pozwala na obserwację znajdujących się na niej obiektów. Wykorzystywany jest wtedy zakres optyczny promieniowania. W odróżnieniu od powyższego rozwiązania, aktywne systemy teledetekcyjne

wykorzystują promieniowanie wysyłane przez samo urządzenie na zasadzie radaru, w dużej mierze niezależniąc się dzięki temu od pory dnia, w której wykonywane jest zobrazowanie.

W najszerszym zakresie wykorzystywane są dane obrazowe, które pozyskiwane są zwykle z poziomu lotniczego lub satelitarnego. W odróżnieniu od narządu wzroku wykorzystywanego przez człowieka, sensory teledetekcyjne są w stanie zarejestrować promieniowanie elektromagnetyczne w dużo szerszym zakresie spektralnym. O ile oko ludzkie wykorzystuje tylko promieniowanie widzialne mieszczące się w zakresie 400–700 nm, narzędzia teledetekcyjne rejestrują zakres sięgający aż do zakresu fal radiowych. Najczęściej jednak w badaniach środowiskowych wykorzystywane są sensory optyczne przystosowane do promieniowania od 400 do 2 500 nm. Szczegółowe zakresy spektralne wykorzystywane w teledetekcji wynikają z właściwości atmosfery ziemskiej, której przepuszczalność dla promieniowania elektromagnetycznego przedstawiono na rycinie 1.



Ryc. 1. Przepuszczalność atmosfery w zależności od długości fali (<http://www.geog.ucsb.edu>).

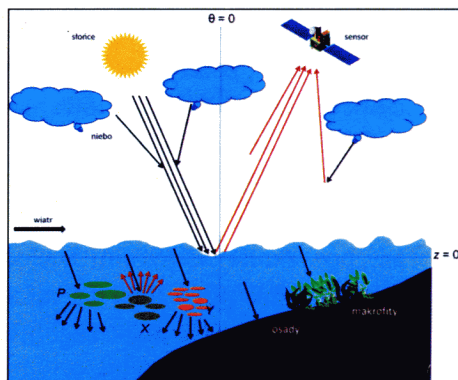
Widoczne na powyższym wykresie tzw. okna atmosferyczne (białe obszary) umożliwiają transmisję promieniowania na drodze Słońce – atmosfera – powierzchnia Ziemi, a po odbiciu od obiektu również na drodze od powierzchni Ziemi do górnej granicy atmosfery. Przepuszczalność atmosfery decyduje o sile sygnału docierającego do sensora, dlatego też przy wykorzystaniu danych teledetekcyjnych bardzo istotne jest wyeliminowanie wpływu tego czynnika poprzez zastosowanie korekcji atmosferycznej. Jest to szczególnie istotne, jeśli konieczne jest porównanie danych satelitarnych z pomiarami naziemnymi lub danymi pochodzącymi z innego terminu.

Oprócz procesu pochłaniania w atmosferze zachodzi również proces rozpraszania, który jest kolejnym czynnikiem osłabiającym sygnał docierający do sensora. Jego wpływ również musi zostać wyeliminowany. Na rycinie 2 przedstawiona została w sposób schematyczny droga promieniowania elektromagnetycznego od źródła do badanego obiektu, uwzględniająca również opisane powyżej procesy.

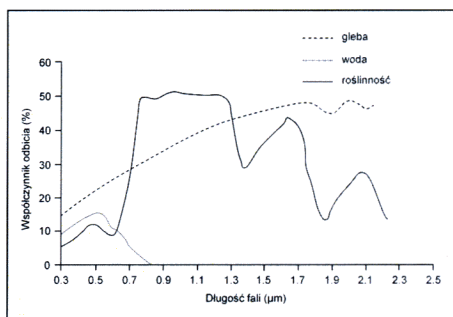
Sensory teledetekcyjne rejestrują promieniowanie odbite od powierzchni Ziemi i zapisują tak pozyskane dane w formie obrazu składającego się z wielu warstw, z których każda odpowiada wydzielonemu zakresowi spektralnemu. W zależności od charakterystyki sensora liczba tych kanałów spektralnych jest różna. Najczęściej obrazy te posiadają od kilku do kilkunastu kanałów spektralnych, dlatego nazywane są obrazami wielospektralnymi.

Dzięki opisanym właściwościom obrazów teledetekcyjnych związanych z możliwością rejestracji i zapisu poziomego odbitego promieniowania w zdefiniowanych zakresach spektralnych oraz dla konkretnego obszaru, możliwe jest uzyskanie dla każdego piksela wykresu odbicia spektralnego. Analizując przebieg tego wykresu, w szczególności jego charakterystyczne elementy (np. piki), można określić, jaki typ obiektu dominuje w danym pikselu. Na rycinie 3 przedstawiony został typowy przebieg wykresów spektralnych dla odsłoniętej gleby, wody oraz zdrowej roślinności.

Bazując na tych charakterystykach można przypisać każdy z pikseli obrazu satelitarnego do odpowiedniej klasy: gleby, wody lub roślinności. Daje to bardzo szerokie możliwości przeprowadzania automatycznej klasyfikacji treści tych obrazów. W odniesieniu do jezior można na pod-



Ryc. 2. Schematyczne przedstawienie drogi promieniowania od źródła promieniowania do sensora (Melzer 2008).



Ryc. 3. Typowe krzywe odbicia spektralnego dla gleby, wody oraz roślinności (Mather 1999).

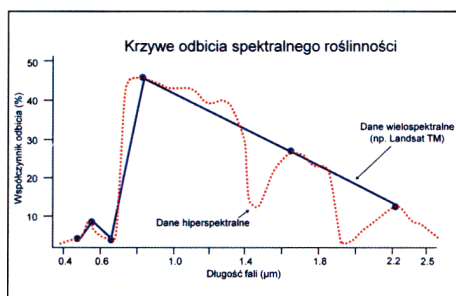
stawie wymienionych wyżej charakterystyk wydzielić obszary zdominowane przez roślinność, osady lub też obszary z głęboką wodą pochłaniającą większość docierającego promieniowania.

## Teledetekcja hiperspektralna

Obrazy pozyskane skanerami wielospektralnymi niosą ze sobą bardzo dużo informacji, które pozwalają na identyfikację obiektów na podstawie wartości zarejestrowanych w poszczególnych kanałach spektralnych. Jednak pewną niedogodnością tych danych, w szczególności w zakresie ich porównywania z danymi spektralnymi pozyskanymi w terenie, jest ich niewielka rozdzielczość spektralna. Dane te posiadają zwykle kilka kanałów o dość szerokim zakresie spektralnym.

Powyższe ograniczenie zostało wyeliminowane wraz z opracowaniem skanerów hiperspektralnych, które charakteryzują się dużo większą liczbą rejestrowanych kanałów spektralnych, dodatkowo do siebie przylegających. Dzięki temu rejestrowana informacja jest bardzo szczegółowa, odpowiadając w dużo większym stopniu rzeczywistemu przebiegowi krzywych odbicia spektralnego. W porównaniu do danych wielospektralnych zarejestrowanych przez jeden z najpopularniejszych satelitów (Landsat), dane te na wykresie prezentują spektralny charakter dużo bardziej precyzyjnie (ryc. 4).

Dzięki zastosowaniu danych hiperspektralnych możliwe jest również dużo bardziej szczegółowe wyróżnianie na obrazie satelitarnym obiektów będących przedmiotem zainteresowania. Dzieje się tak dlatego, że umożli-



Ryc. 4. Porównanie krzywych odbicia spektralnego dla roślinności: dane wielospektralne – linia ciągła oraz dane hiperspektralne – linia kropkowana (<http://blog.neosgeo.com/2011/05/08/hyperspectral-101/>).

wiona jest identyfikacja dużo większej liczby szczegółów przebiegu krzywej odbicia spektralnego, charakterystycznych dla badanego obiektu. O ile na podstawie danych wielospektralnych wykonalne jest sklasyfikowanie pikseli obrazu do głównych klas, np. woda, roślinność niska, wysoka, odśnieżona gleba, to dzięki zastosowaniu technik hiperspektralnych można już wydzielać np. poszczególne gatunki roślin albo typy minerałów występujące na danym obszarze.

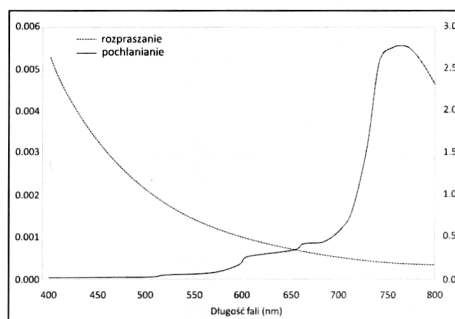
## Teledetekcja w badaniach wód

Przedstawione powyżej dane oraz opisane metody teledetekcyjne wykorzystywane są na szeroką skalę w różnego rodzaju badaniach środowiskowych. Z uwagi na dużą różnorodność sensorów, charakteryzujących się różną rozdzielczością spektralną i obejmujących różne zakresy spektralne, możliwe jest dobranie odpowiedniego instrumentu do przedmiotu badań.

Badanie wód śródlądowych obejmuje swoim zakresem wiele poddziedzin. Analizie może podlegać zarówno aspekt typowo fizjograficzny (np. zasięg linii brzegowej, położenie), jak też bardziej złożony aspekt jakościowy (np. zawartość materii zawieszanej, obecność sinic). W zależności od planowanego zastosowania wykorzystywane mogą być różne zakresy spektralne, rejestrowane przez różne sensory satelitarne.

Głównym wyzwaniem w pozyskiwaniu i interpretacji danych teledetekcyjnych dla obszarów wodnych jest usunięcie wpływu samej wody na sygnał rejestrowany przez sensor. Wpływ ten jest znaczny, a jego składowe to zarówno pochłanianie jak i rozpraszanie promieniowania elektromagnetycznego (ryc. 5). Oba te czynniki sprawiają, że w wielu przypadkach wykorzystanie danych teledetekcyjnych jest ograniczone, szczególnie w głębokich wodach, w których większość promieniowania elektromagnetycznego jest pochłaniana i nie dociera do sensora.

Pomimo tych trudności, zakres wykorzystania danych teledetekcyjnych w badaniach wód, w tym wód śródlądowych, sukcesywnie się zwiększa. Również w zakresie danych hiperspektralnych można zauważyć zwiększone ich zastosowanie do badania wód, również tych charakteryzujących się większą głębokością (Kutser i in. 2003). Istotne jest to, że pozwalają one na wyróżnienie szczegółowych klas, np. zanurzonej roślinności wodnej (Fyfe 2003). Również ciągłość rejestrowanych zakresów spektralnych pozytywnie wpływa na możliwości wykorzystania tych danych w badaniach wód. Możliwe jest zastosowanie bardziej wyrafinowanych algorytmów pozwalających na automatyczną klasyfikację treści tych danych. Dane tego typu zostały z powodzeniem wykorzystane w wielu badaniach prowa-



Ryc. 5. Rozpraszanie i pochłanianie promieniowania elektromagnetycznego przez wodę (Buiteveld i in. 1994).

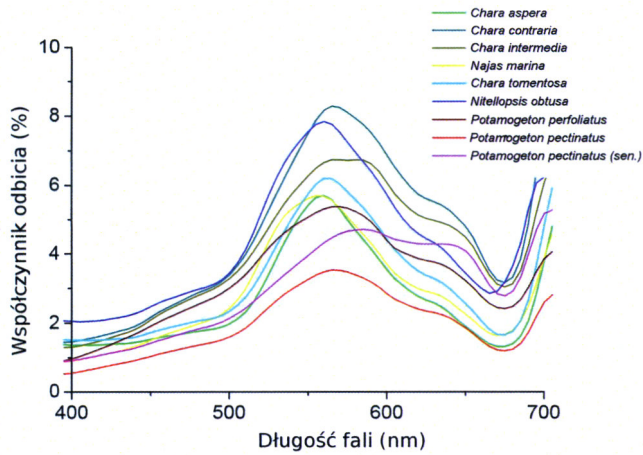
dzonych w środowiskach wód śródlądowych (Jernakoff i Hick 1994, Bajjouk i in. 1998, Dunk i Lewis 1999, Williams i in. 2003, Pinnel 2006).

### **Przykład zastosowania teledetekcji w badaniach wód śródlądowych – Jeziora Constance i Starnberg**

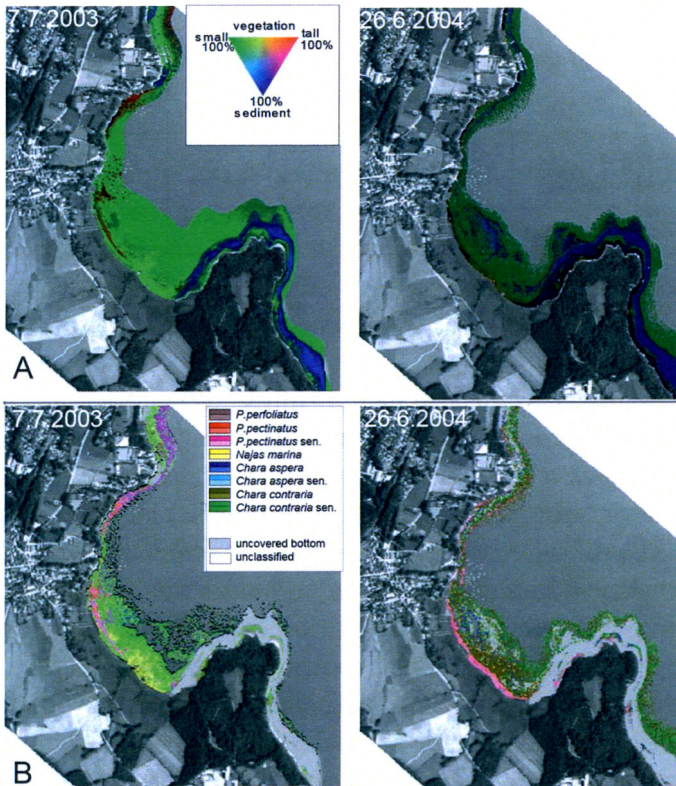
Dotychczasowe doświadczenia w wykorzystaniu teledetekcji w badaniach wód śródlądowych wskazują zarówno na potencjał tych danych, jak też na trudności związane z ich zastosowaniem. Przykład zaprezentowany poniżej ma na celu jedynie ogólne przybliżenie potencjału tego typu danych w badaniach jezior i nie wyczerpuje wszystkich możliwych ich zastosowań. Teledetekcja daje przede wszystkim warsztat narzędziowy oraz dane, które mogą zostać wykorzystane na wiele różnych sposobów i na wielu różnych polach.

W omawianym projekcie głównym celem było określenie możliwości wykorzystania obrazów satelitarnych do identyfikacji i automatycznego kartowania roślinności wodnej w jeziorach Constance i Starnberg w Niemczech (Pinnel 2006). W pierwszej części badań przeanalizowanych zostało kilkadziesiąt gatunków makrofitów, natomiast do dalszych, szczegółowych analiz wybrano 8 najbardziej charakterystycznych gatunków. Ich charakterystyki spektralne w zakresie widzialnym zaprezentowane są na rycinie 6. Zarejestrowane krzywe zostały w pierwszym etapie przeanalizowane pod kątem występowania statystycznie istotnych różnic pomiędzy ich krzywymi spektralnymi reprezentującymi poziom odbicia promieniowania elektromagnetycznego w funkcji długości fali. Pozytywne wyniki tego etapu pozwoliły na przeprowadzenie wstępnej klasyfikacji danych teledetekcyjnych, których celem było wyodrębnienie na zarejestrowanym obrazie obszarów charakteryzujących się co najmniej 70% pokryciem roślinnością. Obszary te zostały w dalszym etapie poddane szczegółowej analizie polegającej na identyfikacji, z wykorzystaniem algorytmów genetycznych, poszczególnych gatunków zaprezentowanych na rycinie 6.

Wyniki klasyfikacji przeprowadzone zostały w dwóch etapach, z których pierwszy prezentuje podział badanego obszaru na roślinność wysoką, roślinność niską oraz osady (ryc. 7A). Kolejny etap, bardziej szczegółowy, prezentuje wyniki klasyfikacji w odniesieniu do poszczególnych gatunków makrofitów (ryc. 7B). Dokładność klasyfikacji została oszacowana poprzez porównanie z badaniami terenowymi oraz porównanie z informacjami uzyskanymi ze zdjęć lotniczych. W pierwszej fazie analizy, w której wyróżniono jedynie główne typy roślinności, uzyskano ogólną dokładność klasyfikacji na



Ryc. 6. Krzywe odbicia spektralnego dla gatunków będących przedmiotem badań (Pinnel 2006).



Ryc. 7. Wyniki klasyfikacji 5 gatunków makrofitów dla jeziora Starnberg (Pinnel 2006).

poziomie 73% (tab. 1), przy czym warto zauważyć, że dokładność użytkownika (*User's Accuracy*), dla roślinności wysokiej była stosunkowo niska (64.2%). Wynik ten należy interpretować w ten sposób, że spośród wszystkich punktów kontrolnych należących w rzeczywistości do tej klasy, tylko 64.2% zostało do niej zaliczonych na podstawie przeprowadzonej klasyfikacji obrazu. Jednocześnie dla tej grupy roślinności uzyskano wysoką dokładność producenta (*Producer's Accuracy*) oznaczającą, że spośród wszystkich pikseli na obrazie zaklasyfikowanych do klasy roślinności wysokiej, aż 91.7% zostało zaklasyfikowanych poprawnie. Odwrotnie sytuacja przedstawia się w przypadku roślinności niskiej, gdzie dokładność producenta była niska (52.8%), a dokładność użytkownika wysoka (87.5%).

Tabela 1. Wyniki oszacowania dokładności w pierwszej fazie analizy.

	Klasy roślinności	Wynik klasyfikacji			Dokładność użytkownika
		niska roślinność (s)	wysoka roślinność (t)	osady (u)	
Pomiary terenowe	niska roślinność (s)	56	8	0	87.5%
	wysoka roślinność (t)	48	88	1	64.2%
	osady (u)	2	0	13	86.7%
	Dokładność producenta	52.8%	91.7%	92.9%	73%

W drugiej fazie oszacowana została dokładność klasyfikacji na poziomie poszczególnych gatunków (tab. 2). W tym przypadku jedynie dwa spośród czterech zaprezentowanych gatunków można uznać za poprawnie sklasyfikowane – w obu przypadkach są to gatunki ramienic. W przypadku rdestnicy dokładność klasyfikacji jest niska, rzędu 50–60%, przez co należy uznać, że ich klasyfikowanie na obrazie satelitarnym obarczone jest dużym prawdopodobieństwem popełnienia błędu.

Uzyskane wyniki pokazują, że na podstawie wykorzystanych danych tele-detekcyjnych istnieje możliwość wyróżnienia tych gatunków makrofitów, dla których istnieją wyraźne różnice w przebiegu krzywych spektralnych. Wśród badanych gatunków obecne były również takie, dla których istniało zbyt duże podobieństwo między charakterystykami spektralnymi, w związku z czym nie było możliwości ich wiarygodnego rozróżnienia.



Tabela 2. Wyniki oszacowania dokładności klasyfikacji dla 4 gatunków makrofitów.

	Gatunki makrofitów	Wynik klasyfikacji				%
		<i>Potamogeton perfoliatus</i>	<i>Potamogeton pectinatus</i>	<i>Chara contraria</i> / <i>C. aspera</i>	<i>Chara tomentosa</i>	
Pomiary terenowe	<i>Potamogeton perfoliatus</i>	66.7%	33.3%	0%	0%	100
	<i>Potamogeton pectinatus</i>	35.7%	50.0%	14.3%	0%	100
	<i>Chara contraria</i> / <i>C. aspera</i>	0%	3.7%	92.6%	3.7%	100
	<i>Chara tomentosa</i>	0%	0%	0%	100%	100

## Podsumowanie

Wykorzystanie danych teledetekcyjnych w badaniach wód śródlądowych w dużym stopniu zwiększa możliwość analizy tego środowiska, w szczególności w zakresie identyfikacji i rozróżniania jego elementów. Pozyskanie informacji obrazowej z pułapu lotniczego lub satelitarnego, obejmującej dużo szerszy zakres promieniowania elektromagnetycznego niż jest w stanie zarejestrować ludzkie oko, umożliwia uwzględnienie również tych właściwości fizyko-chemicznych, które wpływają na zróżnicowane odbicie promieniowania w zakresie promieniowania elektromagnetycznego wykraczającym poza zakres widzialny.

Decydując się na wykorzystanie danych teledetekcyjnych, należy zwrócić szczególną uwagę na ich prawidłowe dobranie pod względem rozdzielczości spektralnej i przestrzennej, a także przeprowadzenie odpowiedniej korekcji wstępnej. Odpowiednia rozdzielczość przestrzenna, rzędu kilku do kilkunastu metrów, zapewnia możliwość rozróżnienia obiektów o niewielkich rozmiarach, podczas gdy zwiększona rozdzielczość spektralna, w połączeniu z dużą liczbą dostępnych kanałów spektralnych, zwiększa możliwości rozróżniania pomiędzy obiektami różnego typu, np. gatunkami roślin.

Bardzo istotne jest przeprowadzenie korekcji atmosferycznej, pozwalającej na wyeliminowanie negatywnego wpływu atmosfery na sygnał rejestrowany przez satelitę. Brak takiej korekcji utrudnia analizę obrazów satelitarnych rejestrowanych z wysokiego pułapu, a wręcz uniemożliwia prawidłowe wykorzystanie takich obrazów łącznie z teledetekcyjnymi pomiarami naziemnymi.

## Bibliografia

- Bajjouk T., Populus J., Guillaumont B., 1998, Quantification of subpixel cover fractions using principal component analysis and a linear programming method: application to the coastal zone of Roscoff (France), *Remote Sensing of Environment*, Vol. 64 (2), 153–165.
- Buiteveld H., Hakvoort J., Donze M., 1994, Optical properties of pure water, [w:] Jaffe J. (red.), *Ocean Optics XII*, Bellingham, Washington, USA, 174–183.
- Dunk I., Lewis M., 1999, Seagrass and shallow water feature discrimination using Hymap imagery, [w:] *Materiały z 10. Australijskiej Konferencji Teledetekcyjnej i Fotogrametrycznej*, 1092–1108.
- Fyfe S., 2003, Spatial and temporal variation in spectral reflectance: Are seagrass species spectrally distinct? *Limnology and Oceanography, Light in shallow water*, Vol. 48, 464–479.
- Jernakoff P., Hick P., 1994. Spectral measurement of marine habitat: simultaneous field measurements and CASI data, [w:] *Materiały z 7. Australijskiej Konferencji Teledetekcyjnej*, 706–713.
- Kutser T., Dekker A., Skirving W., 2003, Modeling spectral discrimination of Great Barrier Reef benthic communities by remote sensing instruments, *Limnology and Oceanography, Light in shallow water*, Vol. 48, 497–510.
- Mather P., 1999, *Computer processing of remotely-sensed images – An introduction*, John Wiley and Sons, Nowy Jork, Wydanie 2.
- Melzer A., 2008, *Identifikation und Massenabschätzung von Makrophythen mit Methoden der Fernerkundung*, Konferencja «Elodea nuttallii im Goitzschensee», Magdeburg, Niemcy.
- Pinnel N., 2006, *A method for mapping submerged macrophytes in lakes using hyperspectral remote sensing*, Rozprawa doktorska, Technischen Universität München, Monachium, Niemcy.
- Williams D., Rybicki N., Lombana A., O'Brien T., Gomez R., 2003, Preliminary investigation of submerged aquatic vegetation mapping using hyperspectral remote sensing, *Environmental Monitory and Assessment*, Vol. 81, 383–392.

Internetowe źródła danych:

<http://blog.neosgeo.com/2011/05/08/hyperspectral-101/>, Neos Geosolutions, 2011, *Hyperspectral Imaging. Narrated Web Slideshow*,

<http://www.geog.ucsb.edu>, UC Santa Barbara, Department of Geography.