

Rozpoznawanie dębu czerwonego *Quercus rubra* L. na zdjęciach lotniczych wykonanych w końcowej fazie sezonu wegetacyjnego

Krzysztof Będkowski, Krzysztof Stereńczak

Abstrakt. W pracy przedstawiono próbę wykorzystania zdjęć lotniczych do identyfikacji osobników dębu czerwonego i innych gatunków na podstawie cyfrowej analizy wybranych cech spektralnych obrazu. Zastosowano zdjęcia wykonane za pomocą cyfrowych kamer niemetrycznych Sigma DP2, które rejestrowały obrazy w czterech zakresach spektralnych: niebieskim, zielonym, czerwonym oraz podczerwonym. Kamery były przenoszone przez bezzałogowy statek latający AVI-1. Zdjęcia wykonano w dniu 27 października 2011 r. Testowano dwie metody automatycznego rozpoznania (klasyfikacji) treści zdjęć: najmniejszej odległości oraz największego prawdopodobieństwa. Najlepsze rezultaty klasyfikacji uzyskano dla sosny, następnie brzozy. Rozróżnienie dębu czerwonego od pozostałych dębów jest trudne. W końcowej fazie sezonu wegetacyjnego, jest on bardzo podobny spektralnie do dębu bezszypułkowego, z liśćmi przebarwionymi na kolor brązowy.

Słowa kluczowe: dąb czerwony, *Quercus rubra*, teledetekcja, fenologia

Abstract. Recognition of Red oak *Quercus rubra* L. on aerial photographs taken in the final stage of the growing season. The paper presents test of use aerial photographs to identify the red oak and other species based on spectral image analysis. Images in four spectral bands: blue, green, red and infrared were taken by digital non metric Sigma DP2 cameras, which were carried by Unmanned Aerial Vehicle - AVI-1. Pictures were taken on 27 October 2011. Two methods for the automatic recognition (classification) were tested: the minimum distance and the maximum likelihood. The best results were obtained for the classification of pine and birch respectively. The differentiation between red oak and other oaks was difficult due to the fact that in the final stage of the growing season it is spectrally very similar to the oaks, with brown leaves discoloration.

Keywords: red oak, *Quercus rubra*, remote sensing, phenology

Wstęp

Dąb czerwony jest gatunkiem dosyć często spotykanym w naszych lasach. Pochodzi z wschodniej części Ameryki Północnej, a do Polski został sprowadzony w XIX wieku. Uważa się, że jest gatunkiem inwazyjnym – przypisuje się mu zdolność wypierania rodzimych gatunków dębów. Stwierdzono także jego niekorzystny wpływ, poprzez opad trudno

rozkładających się liści, na skład flory lasów. W lasach wprowadzany był na ubogich siedliskach w celu wzbogacenia składu gatunkowego monokultur sosnowych.

Obserwowana przez nieuzbrojone oko barwa aparatu asymilacyjnego drzew jest wyrazem zdolności liści lub igieł do odbijania promieniowania elektromagnetycznego (słonecznego) z zakresu widzialnego. Jest to cecha silnie związana z rodzajem, a nawet gatunkiem drzewa lub krzewu, jego stanem zdrowotnym, zawartością wody i pierwiastków (np. azotu lub metali ciężkich) oraz porą roku. Zróżnicowanie barwne spowodowane zmianami stanu zdrowotnego jest z powodzeniem wykorzystywane do oceny stanu lasów i upraw rolnych (Greer et al. 1990, Ciołkosz et al. 1999, Redfern i Boswell 2004).

Ważne miejsce w badaniach ekologicznych zajmują obserwacje i analizy zjawisk fenologicznych. Prowadzone są na różnym poziomie – pojedynczych drzew lub ich grup, lokalnych populacji (drzewostanów), gatunków, ekosystemów. Szczególną uwagę zwraca się na zjawiska występujące na początku i końcu sezonu wegetacyjnego. Obserwacje są prowadzone – zależnie od obiektu badań – metodami naziemnymi, lotniczymi oraz satelitarnymi (Fisher et al. 2006, 2007, Muraoka et al. 2009, Richardson et al. 2009). Badania fenologiczne mają na celu poznanie natury zjawiska, jego przyczyn i przebiegu, powiązania z innymi cechami lub zjawiskami. Przyczyn zróżnicowania faz fenologicznych wewnątrz danego gatunku upatruje się w czynnikach genetycznych, zmienności chemizmu gleby, uszkodzeniach i chorobach, wpływie żeru owadów, pozycji biosocjalnej drzew i in. Niezależnie od wymienionych czynników, powszechnie znanym faktem jest, że gatunki liściaste są bardzo zróżnicowane barwnie w końcówce sezonu wegetacyjnego, na skutek zmian składu barwników w liściach. Dla teledetekcji zwiększanie się różnic barwnych ma podstawowe znaczenie w rozpoznawaniu gatunków. Z tego powodu interesującym jest m.in. uzyskanie informacji, czy dąb czerwony w tej fazie rozwoju różni się istotnie od innych gatunków liściastych, w tym od krajowych gatunków dębu. Różnice te mogą wynikać z różnego tempa wchodzenia w okres spoczynku i innej, specyficznej dla gatunku, zawartości barwników.

Bezzałogowe statki latające są coraz częściej wykorzystywane do pozyskiwania informacji obrazowych w tych sytuacjach, gdy użycie samolotów jest nieopłacalne lub napotyka na ograniczenia. Nieopłacalne jest np. użycie samolotów dla małych obiektów lub przy niekorzystnych warunkach atmosferycznych (zbyt krótkie okresy odpowiedniej „fotogrametrycznej” pogody”, lub zbyt niski pułap chmur). Bezzałogowe statki latające od dawna są stosowane w celach militarnych, a od pewnego czasu znalazły się w ofercie usług firm cywilnych. Uzyskiwane za ich pomocą obrazy są wykorzystywane w inwentaryzacji przestrzeni miejskiej (Gruen 2012), badaniach archeologicznych (Eisenbeiss et al. 2005), analizie stanu roślinności, w tym upraw rolniczych oraz lasów (Grenzdörffer et al. 2008, Clark et al. 2010, Suzuki et al. 2010, Riggins et al. 2011). Pod względem konstrukcyjnym przypominają samoloty lub śmigłowce. Przenoszone przez nie lekkie kamery rejestrują obrazy w barwach naturalnych lub w podczerwieni, często zapewniając bezpośrednią transmisję do operatora naziemnego. Sterowanie lotem może być ręczne lub w pełni zautomatyzowane – wówczas aparat porusza się po zaprogramowanej trasie. Istnieją konstrukcje „inteligentne”, wyposażone dodatkowo w skanery laserowe, które samodzielnie rozpoznają ukształtowanie terenu i na tej podstawie wybierają odpowiednią trasę lotu (Kumar 2012). Mogą być wówczas stosowane przy eksploracji np. budynków grożących zawaleniem (po trzęsieniu ziemi) w poszukiwaniu zaginionych osób. Istnieje kilka rozwiązań dostępnych w kraju, są to jednakże najczęściej prototypy, które nie są przeznaczone lub jeszcze nie weszły do produkcji

seryjnej. Przeglądy systemów statków bezzałogowych w polskiej literaturze opublikowali m.in. Królikowski (2011), Przywara (2012) i Sawicki (2012).

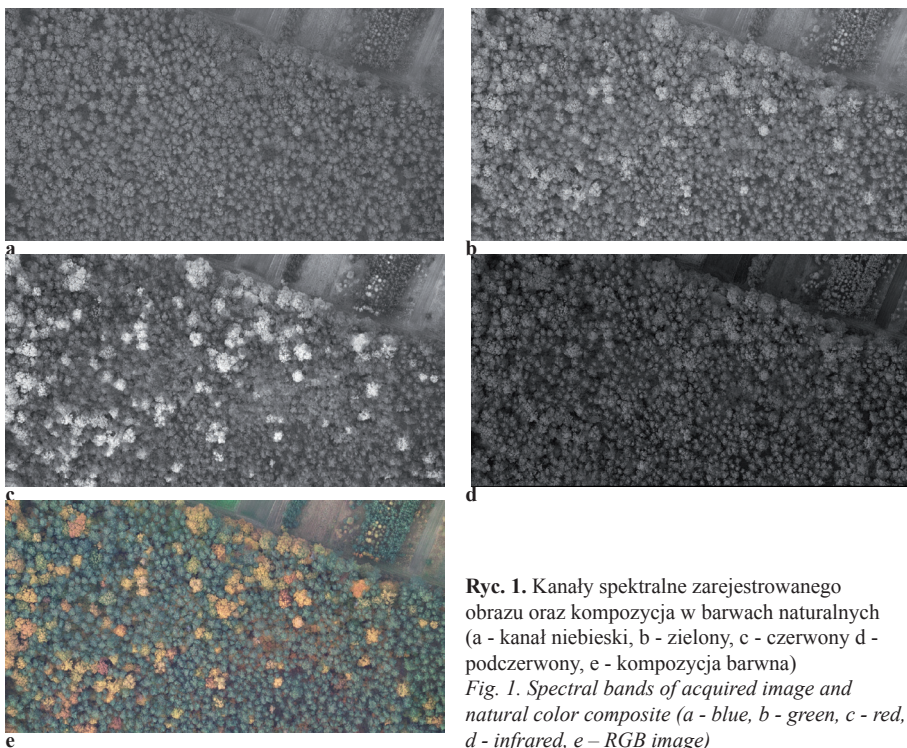
Materiały i metodyka pracy

W pracy przedstawiono próbę wykorzystania zdjęć lotniczych do identyfikacji osobników dębu czerwonego na podstawie cyfrowej analizy wybranych cech obrazu. Zastosowano zdjęcia wykonane za pomocą cyfrowych kamer niemetrycznych Sigma DP2, które rejestrowały obrazy w czterech zakresach spektralnych: niebieskim, zielonym, czerwonym oraz podczerwonym (ryc. 1). Możliwość rejestracji podczerwieni uzyskano poprzez ingerencję w konstrukcję jednego z aparatów - usunięcie fabrycznie zainstalowanego filtra podczerwieni. Filtr ten jest umieszczany na matrycy elementów światłoczułych, a jego zadaniem jest niedopuszczenie do niej promieniowania podczerwonego, bowiem jest uczulona na to promieniowanie (ryc. 2) (Cheak Seck 2004). Jednocześnie aparat ten został wyposażony w filtr (umieszczony na obiektywie), odcinający dostęp promieniowania widzialnego. W ten sposób aparat został przystosowany do rejestrowania wyłącznie promieniowania podczerwonego⁴.

Platformą przenoszącą kamery był bezzałogowy statek latający AVI-1 firmy Taxus SI z Warszawy (Taxus SI 2010, Zmarz 2011), który zaprojektowano specjalnie dla wykonywania lotów fotogrametrycznych. Statek napędzany jest silnikiem elektrycznym, rozpiętość skrzydeł wynosi 3,5 m, sterowanie odbywa się za pomocą autopilota. Udźwieg AVI-1 wystarcza do przenoszenia aparatu cyfrowego typu lustrzanka lub dwóch kompaktowych aparatów cyfrowych.

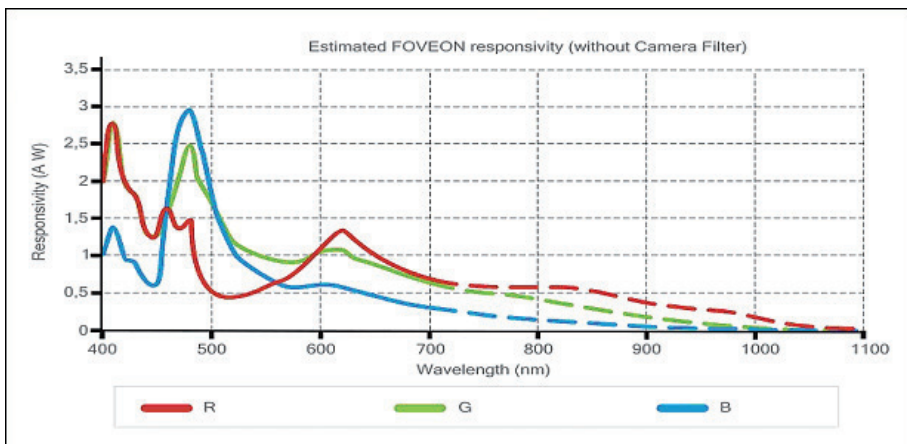
Bardzo ważnymi czynnikami, które wyróżniają zastosowaną procedurę od typowych zadań fotogrametrycznych, jest pora wykonania zdjęć (27 października) oraz warunki oświetlenia panujące w czasie nalotu. W końcowej fazie sezonu wegetacyjnego pojawiają się duże zmiany w aparacie asymilacyjnym, które przejawiają się m.in. w zmianie jego barwy oraz ilości. Jesienią pogarszają się warunki oświetlenia na skutek niskiego położenia Słońca. Trudno także o odpowiednio dobre warunki atmosferyczne. Z tych powodów rzadko wykonuje się wówczas zdjęcia lotnicze. Bezzałogowe statki latające poruszają się jednak na niskich wysokościach i mogą wykonywać zdjęcia także pod niskim pułapem chmur. Brak bezpośredniego oświetlenia słonecznego okazuje się okolicznością sprzyjającą, gdyż zdjęcia są mało skonstrastowane – małe są różnice tonalne między oświetlonymi i zacienionymi częściami koron drzew. Bezcieniowe zdjęcia uzyskane za pomocą tego samego zestawu kamer zastosowano już do oceny stanu zdrowotnego świerka (Zmarz et al. 2012). Z powodzeniem wyróżniono za ich pomocą różne stopnie uszkodzeń wyrażające się zmianą ilości igieł lub ich barwy.

⁴ Przebudowę aparatu wykonano na potrzeby badań prowadzonych przez Zmarz A. (2011)



Ryc. 1. Kanaly spektralne zarejestrowanego obrazu oraz kompozycja w barwach naturalnych (a - kanał niebieski, b - zielony, c - czerwony d - podczerwony, e - kompozycja barwna)

Fig. 1. Spectral bands of acquired image and natural color composite (a - blue, b - green, c - red, d - infrared, e - RGB image)



Ryc. 2. Uczulenie matrycy FOVEON kamer cyfrowych Sigma DP2 w zakresie widzialnym i podczerwieni (Cheak Seck 2004, za Zmarz 2011, nieznacznie zmienione)

Fig. 2. Estimated FOVEON responsivity in visible and infrared spectrum

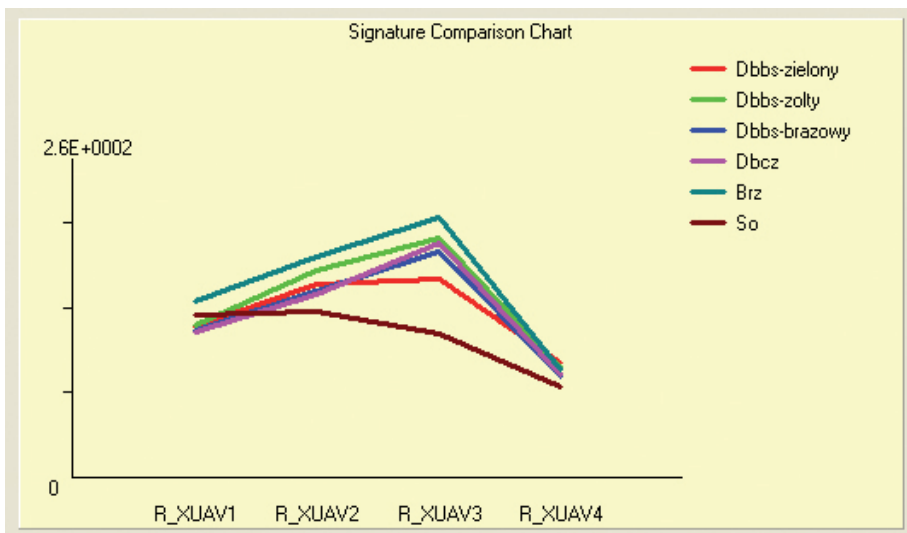
Na terenie leśnictwa Głuchów (Leśny Zakład Doświadczalny SGGW w Rogowie) wybrano drzewostany sosnowe z udziałem domieszek gatunków liściastych. Wszystkie gatunki liściaste wykazywały jesienne przebarwienie aparatu asymilacyjnego. Na wydrukach zdjęć, przetworzonych z wykorzystaniem programu EnsoMOSAIC (MosaicMill 2012) do postaci ortomozaiki, zlokalizowano poszczególne egzemplarze drzew, a następnie odnaleziono je w terenie i sprawdzono przynależność gatunkową. Zastosowane dalej procedury przetwarzania obrazów miały na celu uzyskanie odpowiedzi, czy dąb czerwony różni się spektralnie istotnie od pozostałych gatunków tworzących drzewostan. Właściwa ocena rozróżnialności gatunków opiera się w teledetekcji na specjalnych wskaźnikach „separowalności”: *divergence*, *transformed divergence*, *Bhattacharyya distance* (Idrisi Taiga 2009), które syntetycznie uwzględniają wartości średnie jasności ze wszystkich kanałów spektralnych oraz rozrzut wartości jasności poszczególnych pikseli (odchylenie standardowe). Im większa wartość wskaźnika, tym bardziej dana klasa (w tym przypadku gatunek) różni się spektralnie od pozostałych.

Kolejnym etapem była klasyfikacja nadzorowana treści zdjęć. W klasycznych procedurach służy ona poznaniu składu gatunkowego drzewostanów. Jako pola treningowe (wzorcowe) wykorzystano obrazy rozpoznanych w terenie koron drzew gatunków znajdujących się w drzewostanie. W pracy analizowano odwzorowanie następujących gatunków drzew: dąb czerwony *Quercus rubra* L., sosna zwyczajna *Pinus sylvestris* L., brzoza brodawkowata *Betula pendula* L. oraz dąb bezszypułkowy *Quercus petraea* (Mattuschka) Liebl. W przypadku ostatniego z gatunków uwzględniono także jego wyraźne trzy fazy przechodzenia w stan spoczynku zimowego, wyrażające się zabarwieniem koron na kolor zielony, żółty oraz brązowy.

Przyjęto, że jakość klasyfikacji będzie oceniona poprzez sprawdzenie, jak zostały sklasyfikowane piksele pól treningowych. Dobry wynik klasyfikacji to taki, gdy wszystkie piksele z obrazów koron drzew zaliczonych do danego gatunku na podstawie obserwacji terenowych, są klasyfikowane do tego samego gatunku za pomocą procedury cyfrowej. Analityczną miarą jakości klasyfikacji jest wskaźnik *Kappa* (Adameczyk i Będkowski 2007), który przyjmuje wartości z zakresu $0 \div 1$. Podstawę obliczeń stanowi porównanie sklasyfikowania każdego z pikseli korony. Wskaźnik *Kappa* równy zero oznacza zupełny brak podobieństwa, gdy każdy piksel koron drzew został sklasyfikowany inaczej metodą numeryczną, niż podczas rozpoznania przeprowadzonego w terenie. Wskaźnik równy jedności oznacza pełną zgodność porównywanych zbiorów pikseli.

Wyniki

Przetworzenia obrazów zrealizowano za pomocą systemu Idrisi Taiga (2009). Określono wartości średnie jasności koron tych drzew, które rozpoznano w terenie. Obliczono je oddzielnie dla poszczególnych gatunków oraz poszczególnych kanałów spektralnych zarejestrowanych przez kamery Sigma DP2. W obliczeniach uwzględniono wszystkie piksele obrazu, które znajdowały się w obrębie koron drzew. Jak wynika z ryc. 3, najniższe wartości jasności, we wszystkich kanałach, miała sosna, natomiast najwyższe – brzoza. Widoczne są też różnice pomiędzy poszczególnymi fazami barwnymi dębu bezszypułkowego. Dąb czerwony ma wartości podobne do dębu bezszypułkowego.



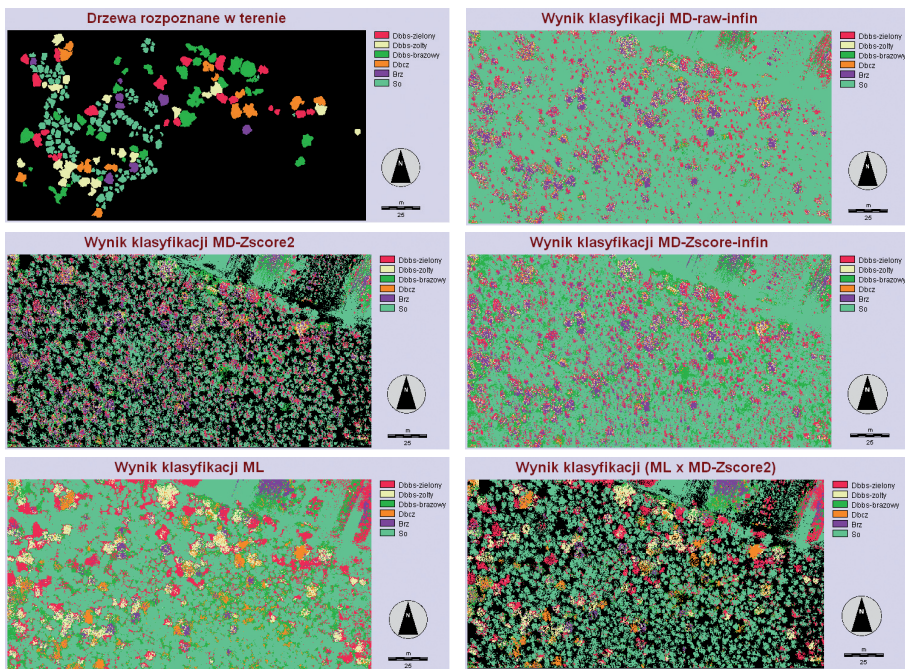
Ryc. 3. Średnie wartości jasności obrazu koron drzew dla gatunków w poszczególnych kanałach spektralnych (od lewej: 1 – niebieskim, 2 – zielonym, 3 – czerwonym, 4 – podczerwonym)

Fig. 3. Mean intensity of crowns images for trees species with regard to spectral bands (from left to right: blue, green, red, infrared)

Tab. 1. Wskaźniki separowalności gatunków

Table 1. Separability between species

Divergence						
	Dbbs(ziel.)	Dbbs(żółty)	Dbbs(brąz.)	Dbcz	Brz	So
Dbbs(ziel.)		3,93	5,17	10,54	6,23	25,23
Dbbs(żółty)			1,48	4,79	2,89	53,02
Dbbs(brąz.)				1,21	2,05	42,59
Dbcz					4,95	54,01
Brz						45,46
Transformed divergence						
	Dbbs(ziel.)	Dbbs(żółty)	Dbbs(brąz.)	Dbcz	Brz	So
Dbbs(ziel.)		775,82	952,57	1464,39	1081,82	1914,63
Dbbs(żółty)			337,41	900,54	607,13	1997,35
Dbbs(brąz.)				281,68	452,41	1990,25
Dbcz					923,06	1997,66
Brz						1993,19
Bhattacharaya distance						
	Dbbs(ziel.)	Dbbs(żółty)	Dbbs(brąz.)	Dbcz	Brz	So
Dbbs(ziel.)		449911	18863	328319	1153640	628614
Dbbs(żółty)			14984	142419	231422	1976601
Dbbs(brąz.)				26211	679890	1246180
Dbcz					601140	1448335
Brz						3003742



Ryc. 4. Wyniki klasyfikacji treści obrazu (od góry: korony rozpoznane w terenie, klasyfikacja MD-raw-inf, MD-Zscore-2, MD-Zscore-inf, ML-eq-prob oraz ML-eq-prob po usunięciu pikseli leżących poza koronami drzew)

Fig. 4. Classification results (from top: crowns of species recognized in the field, classification MD-raw-inf, MD-Zscore-2, MD-Zscore-inf, ML-eq-prob and ML-eq-prob after removing pixels not belonging to the crowns)

Ocena rozróżnialności gatunków analizowanych w pracy przedstawiona została w tabeli 1. Na podstawie uzyskanych wyników można stwierdzić, że z badanych gatunków najłatwiejsza do wyróżnienia jest sosna, następnie brzoza oraz dęba. Dąb czerwony jest bardzo podobny spektralnie do dębu bezszypułkowego w fazie brązowych liści.

W dalszych etapach analizy przeprowadzono klasyfikację nadzorowaną obrazów. Testowano klasyfikację przeprowadzoną za pomocą dwóch metod – najmniejszej odległości oraz największego prawdopodobieństwa. W metodzie najmniejszej odległości wybrano trzy opcje: z odległością do centrów klas obliczaną na podstawie oryginalnych wartości jasności obrazu i bez ograniczenia zasięgu stref (MD-raw-inf), na podstawie standaryzowanych wartości jasności i z ograniczeniem zasięgu stref do 2 odchyłań standardowych (MD-Zscore-2) oraz na podstawie standaryzowanych wartości jasności lecz bez ograniczenia zasięgu stref (MD-Zscore-inf). Klasyfikację metodą największego prawdopodobieństwa zrealizowano przyjmując jednakowe prawdopodobieństwa *a priori* wystąpienia klas. Szczegóły zastosowanych metod podają Adamczyk i Będkowski (2007) oraz pomoc (*Help*) systemu Idrisi Taiga (2009).

Położenie koron drzew rozpoznanych w terenie oraz wyniki wszystkich wariantów klasyfikacji cyfrowej przedstawiono na ryc. 4 oraz w tab. 2. Na podstawie danych z tab. 2 oraz uzyskanych warstw można stwierdzić, że najlepsze wyniki uzyskano za pomocą metody ML-eq-prob. Aby poprawić wizualnie efekt klasyfikacji usunięto z warstwy utworzonej za pomocą tej ostatniej metody piksele, które nie zostały zaliczone do koron drzew w metodzie MD-Zscore-2. Efekt, widoczny na ostatniej warstwie ryc. 4, wydaje się najlepiej oddawać rzeczywiste relacje między koronami drzew. Nie dokonano wcześniejszego wydzielenia lasu spośród innych obiektów, stąd część pola również klasyfikowana była, jak fragment drzewostanu.

Tab. 2. Wskaźnik Kappa w poszczególnych metodach klasyfikacji (dotyczy wyłącznie pikseli obrazu znajdujących się w obrębie koron drzew rozpoznanych w terenie)

Table 2. Kappa index basing on classification results (applied only to pixels within crowns extents)

Gatunek	Md-raw-inf	MD-Zscore-2	MD-Zscore-inf	ML-eq-prob
Dbbs(ziel.)	0,2189	0,2217	0,2658	0,7017
Dbbs(żółty)	0,0730	0,0790	0,0834	0,4873
Dbbs(brąz.)	0,1017	0,1482	0,1963	0,2187
Dbcz	0,1549	0,1207	0,1224	0,4850
Brz	0,4942	0,2924	0,5017	0,5322
So	0,7145	0,4680	0,6330	0,9597
<i>Kappa</i> (ogólny)	0,2806	0,2413	0,3091	0,5717

Wnioski

Na podstawie przeprowadzonych badań można stwierdzić, że dąb czerwony ma w końcowej fazie sezonu wegetacyjnego charakterystyki spektralne podobne do dębu bezszypułkowego w fazie liści brązowych. Fakt ten utrudnia rozróżnienie tych dwóch gatunków na zdjęciach wykonanych w końcowej fazie sezonu wegetacyjnego. Optymistyczny jest fakt, że dobranie odpowiedniej pory okresu wegetacyjnego pozwala na odróżnienie domieszek dębowych spośród innych gatunków liściastych występujących w drzewostanie razem z sosną. Niewielkie koszty nalotu oraz automatyzacja pracy pozwala na stworzenie mapy przestrzennego rozkładu domieszek w drzewostanie.

Największą zgodność wyników obserwacji terenowych z klasyfikacją numeryczną obrazów uzyskano przy metodzie ML-eq-prob. Wynik ten można poprawić wizualnie, poprzez odpowiednie skompilowanie z rezultatem klasyfikacji ML-Zscore-2. Pozwoli to na usunięcie z obrazu pikseli leżących poza koronami drzew

Zdjęcia wykonane w końcowej fazie sezonu wegetacyjnego zmodyfikowanymi kamerami niemetrycznymi mogą być wykorzystane do detekcji gatunków lub grup gatunków drzew w drzewostanach.

Warto także zauważyć, że wykonane zdjęcia pozwoliły na zaobserwowanie zmienności odwzorowania koron drzew dębu bezszypułkowego. Wskazuje to na możliwość wykorzystania tego rodzaju materiału do badań zjawisk fenologicznych oraz długości okresu wegetacyjnego poszczególnych osobników.

W dalszych badaniach warto rozważyć użycie wysokościowego modelu koron (Stereńczak 2008), można bowiem w ten sposób wydzielić obiekty nieleśne i poprawić efektywność klasyfikacji. Wykorzystana w pracy metoda klasyfikacji (tzw. pikselowej klasyfikacji

wielospektralnej) znana jest w teledetekcji od dawna, jednak wykorzystywana była w analizach obrazów o małej rozdzielczości przestrzennej. Wysoka rozdzielczość obrazów powoduje zbyt dużą zmienność jasności pomiędzy pojedynczymi pikselami na powierzchni korony. Wydaje się wobec tego uzasadnione, aby podjąć próbę klasyfikacji, w której pierwszym etapem byłoby wyróżnienie zasięgów koron - tzw. segmentacja (Będkowski 2011), następnie wyznaczenie ich charakterystyk spektralnych i ostatecznie zaliczenie całych koron (a nie pojedynczych pikseli) do odpowiednich klas obiektów. Postępowanie to będzie podobne do tzw. klasyfikacji obiektowej.

W pracy przedstawiono część wyników uzyskanych podczas realizacji projektu 505-10-03260052, p.t. Ocena stanu zdrowotnego drzewostanów sosnowych na podstawie niemytrycznych wielospektralnych zdjęć cyfrowych uzyskanych za pomocą bezzałogowego statku latającego, wyłonionego w 2011 r. w SGGW w Warszawie w ramach wewnętrznego trybu konkursowego.

Literatura

- Adamczyk J., Będkowski K., 2007. *Metody cyfrowe w teledetekcji*. Wyd. SGGW, Warszawa.
- Będkowski K. 2011: *Trees crowns segmentation on the basis of a digital surface model obtained from the interpolation of airborne laser scanning data*. Information Systems in Management XIII. Warsaw University of Life Sciences Press: 7-18.
- Cheak Seck F., 2004. *Detecting near-UV and near-IR wavelengths with the FOVEON image sensor*. Naval Postgraduate School, Monterey, California, USA.
- Ciołkosz A., Miszański J., Ołędzki J.R. 1999. *Interpretacja zdjęć lotniczych*. WN PWN Warszawa.
- Clark A. F., Woods J. C., Oechle O., 2010. *A low-cost airborne platform for ecological monitoring*. Int. Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. XXXVIII, Part 5, Com. V.
- Eisenbeiss, H., K. Lambers and M. Sauerbier, 2005. *Photogrammetric recording of the archaeological site of Pinchango Alto (Palpa, Peru) using a mini helicopter (UAV)*. Int. Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, vol. XXXIV-5/C34, pp. 238-243.
- Fisher J.I., Mustard J.F., 2007: *Cross-scalar satellite phenology from ground, Landsat, and MODIS data*. Remote Sensing of Environment 109: 261-273.
- Fisher J.I., Mustard J.F., Vadeboncoeur M.A., 2006: *Green leaf phenology at Landsat resolution: scaling from the field to the satellite*. Remote Sensing of Environment 100: 265– 279.
- Greer J.D.; Hoppus M.L. Lachowski, H.M. 1990. Color infrared photography for resource management—unique attributes improve vegetation mapping and resource management. *Journal of Forestry*. 88(7): 12–17.
- Grenzdörffer G. J, Engelb A., Teichert B., 2008. *The photogrammetric potential of low-cost UAV's in forestry and agriculture*. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Vol. XXXVII. Part B1.
- Gruen A., 2012. *First civilian photogrammetric UAV flight over Singapore*. www.asmmag.com/201203213420/first-civilian-photogrammetric-uav-flight-over-singapore.html (29.04.2012).
- Idrisi Taiga 2009. Clark Labs, Worcester, USA.
- Królikowski J. 2011. *Latać każdy może*. Geodeta 7(194), s. 48-51.
- Kumar V. 2012. *Autonomous agile aerial robots*. Wykład konferencji TED. http://www.youtube.com/watch?v=4ErEBkj_3PY&feature=player_embedded (dostęp 12.05.2012).
- Mosaic Mill 2012. MosaicMill Oy, Finlandia. <http://www.ensomosaic.com/index.html> (dostęp 18.09.2012).
- Muraoka H., Koizumi H., 2009: *Satellite Ecology (SATECO) - linking ecology, remote sensing and micrometeorology, from plot to regional scale, for the study of ecosystem structure and function*. *J. Plant Res.* 122: 3–20.

- Przywara J., 2012. *Inwazja dronów*. Geodeta 10(209): 10-15.
- Redfern D.B., Boswell R.C. 2004. *Assessment of crown condition in forest trees: comparison of methods, sources of variation and observer bias*. Forest Ecology and Management 188: 149–160.
- Richardson A.D., Braswell B.H., Hollinger D.Y., Jenkins J.P., Ollinger S.V., 2009. *Near-surface remote sensing of spatial and temporal variation in canopy phenology*. Ecological Applications 19: 1417-1428.
- Riggins J.J., Defibaugh y Chávez J.M., Tullis J.A., Stephen F.M., 2011. *Spectral Identification of Previsual Northern Red Oak (Quercus rubra L.) Foliar Symptoms Related to Oak Decline and Red Oak Borer (Coleoptera: Cerambycidae) Attack*. South. J. Appl. For. 35(1): 18-25.
- Sawicki P. 2012. *Bezzałogowe aparaty latające UAV w fotogrametrii i teledetekcji – stan obecny i kierunki rozwoju*. Archiwum Fotogrametrii Kartografii i Teledetekcji vol. 23: 365-376.
- Stereńczak K. 2008. *Możliwości wykorzystania wysokościowego modelu koron w badaniach środowiska leśnego*. Czasopismo Techniczne 2-Ś, 273-279.
- Suzuki T., Amano Y., Hashizume, Suzuki S., Yamaba A. 2010. *Generation of Large Mosaic Images for Vegetation Monitoring Using a Small Unmanned Aerial Vehicle*. Journal of Robotics and Mechatronics 22(2): 212-213.
- Taxus, 2010. Taxus SI Sp. z o.o. *Samolot do fotografii z powietrza*. Dokumentacja techniczna. Warszawa.
- Zmarz A., 2011. *Zastosowanie bezzałogowych statków latających do pozyskania danych obrazowych o lesie*. Katedra Urządzenia Lasu, Geomatyki i Ekonomiki Leśnictwa, SGGW w Warszawie (praca doktorska).
- Zmarz A., Będkowski K., Miścicki S., Plutecki W., 2012. *Ocena stanu zdrowotnego świerka na podstawie analizy zdjęć wielospektralnych wykonanych fotograficznymi aparatami cyfrowymi przenoszonymi przez bezzałogowy statek latający*. Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji vol. 23: 541-550.

Krzysztof Będkowski, Krzysztof Stereńczak

Katedra Urządzenia Lasu, Geomatyki i Ekonomiki Leśnictwa
SGGW w Warszawie

krzysztof.bedkowski@tlen.pl, krzysztof.sterenczak@wl.sggw.pl