



Piotr Wężyk^{*}, Bogdan Wertz^{*}, Andrzej Waloszek^{}**

**SKANER HIPERSPEKTRALNY AISA
(AIRBORNE IMAGING SPECTROMETER FOR APPLICATIONS)
JAKO NARZĘDZIE POZYSKIWANIA INFORMACJI
O EKOSYSTEMIE LEŚNYM**

**HIPERSPECTRAL SCANNER AISA
(AIRBORNE IMAGING SPECTROMETER FOR APPLICATIONS)
– TOOL FOR FOREST ECOSYSTEM DATA GATHERING**

^{*} *Akademia Rolnicza im. H. Kołłątaja w Krakowie, Wydział Leśny, Katedra Ekologii Lasu, Laboratorium GIS i Teledetekcji*

Agriculture University of Cracow, Faculty of Forestry, Department of Forest Ecology, Laboratory of GIS and Remote Sensing

^{**} *Uniwersytet Jagielloński w Krakowie, Wydział Biotechnologii, Zakład Fizjologii i Biochemii Roślin*

Jagiellonian University of Cracow, Faculty of Biotechnology, Department of Plant Physiology and Biochemistry

STRESZCZENIE: W projekcie FOREMMS (5 FP IST) realizowanym na obszarze kilku państw europejskich w tym i w Polsce (Puszcza Niepołomicka) wykorzystano zobrazowania skanera hiperspektralnego AISA (nalot 13.08.2001) oraz wyniki oznaczeń laboratoryjnych (metoda spektrofotometryczna) barwników zawartych w aparacie asymilacyjnym sosny pospolitej (*Pinus silvestris* L). Materiał do analiz pochodził z drzew przeciętych, wybranych i ściętych na powierzchniach monitoringowych projektu FOREMMS. Zakresy 32 kanałów spektralnych skanera AISA zostały dobrane do charakterystyk absorpcji i odbicia promieniowania przez poszczególne barwniki, tj.: chlorofil *a* i *b* oraz karotenoidy.

Praca wykazała przydatność wysokorozdzielczych obrazów AISA jako cennego źródła danych dla celów szacowania tzw. „indeksów barwników”, w tym szczególnie zawartości chlorofilu w aparacie asymilacyjnym sosny. Analizy laboratoryjne wykazały spadek zawartości chlorofilu w igłach sosny (we wszystkich rocznikach) wraz ze starzeniem się drzew (klasy wieku). Wszystkie obliczone na podstawie zobrazowania AISA indeksy chlorofilu w igłach sosny wykazały tendencję spadkową wraz ze starzeniem się igieł (rocznika I–III). Dla indeksu mSR705 prawidłowość ta była najbardziej wyraźna (współczynnik korelacji Pearsona z oznaczeniami laboratoryjnymi = 0.65). W wyniku analiz przestrzennych GIS wygenerowano mapę numeryczną zawartości chlorofilu w aparacie asymilacyjnym sosen Puszczy Niepołomickiej.

SŁOWA KLUCZOWE: AISA, chlorofil, teledetekcja, GIS, indeksy barwników

1. WSTĘP I CEL PRACY

W ramach międzynarodowego projektu FOREMMS (ang. *Forest Environmental Monitoring and Management System*) 5 FP UE (IST-1999-11228 / IST-1999-71228) stworzono prototyp systemu monitorowania i zarządzania zasobami leśnymi w Europie. W ramach projektu wzorcowe powierzchnie (węzły systemu) zlokalizowano w trzech dominujących na naszym kontynencie biomach leśnych. Dla każdego z nich wytypowano kompleks leśny, charakterystyczny ze względu na swoje położenie geograficzne, skład gatunkowy i warunki siedliskowe. Biom lasów mieszanych strefy umiarkowanej Europy Środkowej reprezentowała Puszcza Niepołomska [14]. Projekt FOREMMS zakładał szerokie wykorzystanie danych pozyskanych metodami tradycyjnymi wspieranymi technikami teledetekcyjnymi oraz ich udostępnianie szeroko pojmowanemu społeczeństwu informacyjnemu [13].

Zdalne pozyskiwanie informacji (teledetekcja) o ekosystemach leśnych z poziomu satelitarnego i lotniczego w ostatnich latach poczyniło ogromny postęp związany z udostępnieniem służbom cywilnym świata nauki nowoczesnych technologii. Kamery analogowe montowane w samolotach zastępowane są kamerami cyfrowymi oraz skanerami wspomaganymi systemami INS i DGPS pozwalającymi na poprawne geopozycjonowanie automatycznie mozaikowanych obrazów. Rozdzielczość spektralna (liczba kanałów) skanerów została zwiększona do kilkuset zakresów, a rozdzielczość terenowa osiągnęła wielkości w granicach 1×1 m [7]. Bez zrozumienia procesów fizjologicznych i właściwości przyrodniczych obiektów badań nie sposób już wyciągać poprawnych wniosków z „morza informacji” (terabajty danych) pozyskiwanych tą drogą.

Celem prezentowanej pracy było określenie możliwości wykorzystania zobrazowań skanera hiperspektralnego AISA dla oszacowania zawartości barwników w aparacie asymilacyjnym sosny (*Pinus silvestris* L).

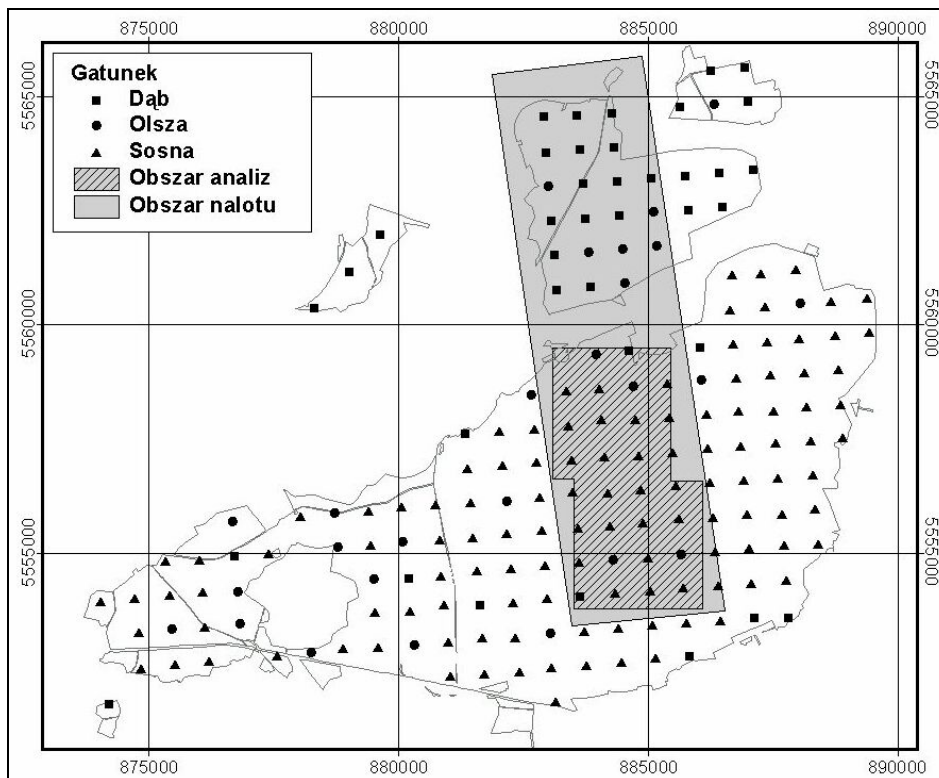
2. TEREN BADAŃ

Terenem badań były drzewostany Puszczy Niepołomickiej, położonej w widłach rzek Wisły i Raby, w odległości ok. 25 km na wschód od Krakowa. Wykorzystane cyfrowe obrazy hiperspektralnego skanera AISA obejmowały fragment Puszczy Niepołomickiej dla terenu Uroczyska Głównego o powierzchni około 1.532 ha (rys. 1.). Prezentowane analizy dotyczyły zależności między zawartością barwników w aparacie asymilacyjnym sosny pospolitej (główny gatunek lasotwórczy Puszczy Niepołomickiej) a sygnałem zarejestrowanym przez skaner AISA.

3. METODYKA BADAŃ

Na 185 powierzchniach monitoringowych FOREMMS ulokowanych w węzłach regularnej sieci o boku 750 metrów (rys. 1.) wyznaczonej metodą pomiaru DGPS [6], w lipcu i sierpniu 2001 roku wykonano szereg prac badawczych. Obejmowały one m.in.: prace urządzeniowe, monitoringowe a także pozyskanie ze ściętych drzew

przebiegu aparatu asymilacyjnego do oznaczeń laboratoryjnych. Zbiór próbek w terenie dokonywano niezwłocznie po ścięciu drzewa z jego oświetlonych części korony. Dla celów oznaczenia zawartości barwników asymilacyjnych dokonywano zbioru około 25–40 par: I, II i III rocznika igieł sosny. W terenie próbki były zamrażane w ciekłym azocie, po czym do momentu prac laboratoryjnych przechowywano je w zamrażarce utrzymującej stałą temperaturę -83°C .



Rys. 1. Mapa lokalizacji badań (obszar nalotu AISA, obszar testowy dla indeksów) oraz siatki 185 powierzchni FOREMMS w Puszczy Niepołomickiej (UTM 33N)

Fig. 1. Map of study area of Niepołomice Forest (area covered by AISA, test area) with marked 185 FOREMMS monitoring plots (UTM 33N)

Dnia 13 sierpnia 2001 roku dokonano nalotu nad obszarem Puszczy Niepołomickiej z użyciem samolotu SC7 Skyvan wyposażonego w hiperspektralny skaner AISA (SPECIM). Odległość między kolejnymi szeregami nalotu wynosiła 250 m, wysokość względna nalotu 1000 m, co przy polu widzenia układu CCD wynoszącym 1 miliradian oraz prędkości lotu równej 55 m/s wyznaczyło rozdzielczość terenową wykonanych zobrażeń na około $1,0 \times 1,0$ metr [7].

Dla potrzeb projektu zakres rejestrowanego promieniowania został podzielony na 32 kanały o zróżnicowanej szerokości spektralnej. Charakterystykę zdefiniowanych

kanałów przedstawiono poniżej (tab. 1). Rejestracja w kanale o numerze 23 z przyczyn technicznych nie następowała poprawnie, stąd nie został on uwzględniony w toku dalszych analiz.

Zawartość barwników w aparacie asymilacyjnym drzew określano wg metodyki przyjętej za Lichtenthalerem [5], która obejmowała: homogenizację 40 sztuk 3,5 centymetrowych próbek igieł sosny w buforze fosforanowym, odwirowanie w acetonie i w końcowej fazie oznaczenie stężenia barwników w ekstrakcie w kuwecie spektrofotometru SPECORD (Zeiss–Jena) lub DW–2000 SLM Aminco (Urbana).

Tabela 1

Table 1

Charakterystyka kanałów spektralnych rejestrowanych w czasie nalotu
Characteristics of spectral channels prepared for AISA flight

Kanał nr	Minimum [nm]	Maksimum [nm]	Szerokość [nm]	Kanał nr	Minimum [nm]	Maksimum [nm]	Szerokość [nm]
1	430,39	438,15	7,76	17	676,43	681,51	5,08
2	438,16	445,92	7,76	18	685,74	689,12	3,38
3	445,92	453,68	7,76	19	691,66	696,74	5,08
4	455,24	463,00	7,76	20	726,20	731,33	5,13
5	463,01	470,77	7,76	21	734,75	739,88	5,13
6	483,20	490,96	7,76	22	741,59	746,72	5,13
7	503,39	511,15	7,76	23*	760,40	765,53	5,13
8	522,02	529,78	7,76	24	768,95	774,08	5,13
9	532,89	540,65	7,76	25	786,05	791,18	5,13
10	551,53	559,29	7,76	26	794,60	799,73	5,13
11	579,99	588,45	8,46	27	811,70	816,83	5,13
12	590,14	598,60	8,46	28	837,35	842,48	5,13
13	623,98	632,44	8,46	29	854,45	859,58	5,13
14	647,67	656,13	8,46	30	861,29	866,42	5,13
15	657,82	666,28	8,46	31	880,10	885,23	5,13
16	669,67	678,13	8,46	32	892,07	897,20	5,13

Wartości absorbancji dla każdej próbki określano przy ustalonych długościach fal ($\lambda = 470$ nm, $\lambda = 624$ nm, $\lambda = 645$ nm, $\lambda = 663$ nm i $\lambda = 730$ nm). Jako próbkę referencyjną stosowano kuwetę napełnioną czystym acetonem. Na podstawie absorbancji fal o określonej długości obliczono [μg barwnika/ml próbki mierzonej]: stężenie chlorofilu *a* (Wzór 1), chlorofilu *b* (Wzór 2) oraz karotenoidów (Wzór 3). Po odrzuceniu próbek pomiarowych z błędem przekraczającym 20% dokonywano przeliczenia otrzymanych wyników na zawartość barwników w jednostce suchej masy [mg barwnika/g s.m.].

$$C_{chl.a} = 12,67 * (a_{663} - a_{730}) - 2,65 * (a_{645} - a_{730}) - 0,29 * (a_{624} - a_{730}) \quad \text{Wzór 1}$$

$$C_{chl.b} = 23,6 * (a_{645} - a_{730}) - 4,23 * (a_{663} - a_{730}) - 0,33 * (a_{624} - a_{730}) \quad \text{Wzór 2}$$

$$C_{kar} = \frac{1000 * (a_{470} - a_{730}) - 1,82 * C_{chl.a} - 85,02 * C_{chl.b}}{198}$$

Wzór 3

Do analiz obrazów cyfrowych skanera AISA wykorzystano oprogramowanie ENVI ver. 3.5 (Research Systems). Pola treningowe tzw. ROI (ang. *Region Of Interest*), obejmujące oświetlone fragmenty koron drzew służyły do określenia wartości pikseli obrazu w wybranych kanałach spektralnych. Na tej podstawie dokonano obliczenia tzw. „indeksów zawartości barwników” (tab. 2) zaproponowanych przez: Gamona i in. [1], Gitelsona i Merzlyaka [2], Penuelasa i in. [9], Merzlyaka i in. [8] wraz z poprawkami Simsa i Gamona [10].

Dodatkowo dokonano wyliczenia autorskiego indeksu ND_{chl} , utworzonego w oparciu o szeroko stosowany w teledetekcji znormalizowany indeks wegetacji (NDVI), oraz bazującego na wstępnej analizie przebiegu zarejestrowanych krzywych spektrofotometrycznych.

4. WYNIKI I DYSKUSJA

Zawartość barwników [mg/g s.m.] w aparacie asymilacyjnym oznaczono oddzielnie dla każdego rocznika igieł sosny dla 108 powierzchni monitoringowych FOREMMS (rys. 1.). Interpretacja wyników zawartości barwników asymilacyjnych w igliwiu sosny w klasach wieku wykazała wyraźnie wzrost ich zawartości wraz z wiekiem igieł (rys. 2) oraz spadek wraz ze wzrostem wieku drzew. Odstępstwo od tej prawidłowości obserwowano w 4 i 5 klasie wieku, gdzie zawartość ta była nieznacznie podwyższona. Zmienność tej cechy we wszystkich klasach wieku była jednak bardzo duża. Stosunek chlorofilu *a* do chlorofilu *b* wykazywał również spadek wartości wraz ze wzrostem wieku drzew, jedynie w igłach drugiego rocznika ta tendencja zarysowywała się niewyraźnie. Wraz ze wzrostem rocznika igieł (I–III) spadał nieznacznie stosunek wartości chlorofilu *a* do chlorofilu *b*. Zawartość chlorofilu *b* spada bowiem wraz z wiekiem igieł proporcjonalnie wolniej niż chlorofilu *a*, co potwierdzają dane uzyskane przez Szaniawskiego [12].

Zawartość chlorofilu *a* w igłach sosny pochodzących z Puszczy Niepołomickiej była trzykrotnie niższa od oznaczonego przez Świebodę [11] dla sosen z rejonu Olkusza i Ojcowskiego PN. W przypadku chlorofilu *b* wartości te były aż czterokrotnie wyższe niż w igłach sosen Puszczy Niepołomickiej (0,36 mg/g sm).

Badany stosunek chlorofilu *a* do chlorofilu *b* w igłach sosny dla wszystkich roczników wyniósł średnio 2,6 co potwierdzają wyniki Langleta [4] podającego zakres 2,07 do 2,66. Świeboda [11] określił stosunek chlorofilu *a* do chlorofilu *b* dla sosny w granicach 1,37–2,13, co wskazuje, że wyniki uzyskane w Puszczy Niepołomickiej wykazały względnie wyższą zawartość chlorofilu *a* niż chlorofilu *b*.

W badaniach Łabaja [3], dotyczących sumy zawartości wszystkich barwników fotosyntetycznych w igliwiu sosen Puszczy Niepołomickiej wartości dla III rocznika igieł mieściły się w granicach 2,34 do 4,91 mg/g s.m. W prezentowanej pracy wartości te wahają się w granicach 1,23–3,23 mg/g s.m., przy wartości średniej wynoszącej 1,47 mg/g s.m.

Tabela 2

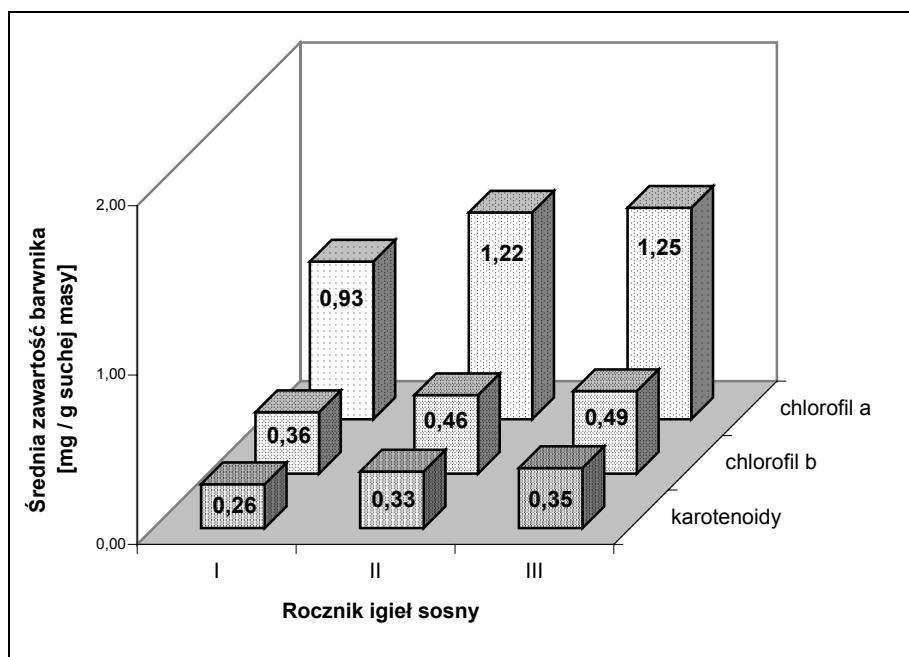
Table 2

Indeksy zawartości barwników wyliczone na podstawie zobrazowań skanera AISA
Spectral indices of pigment concentration based on AISA spectrometer image

Indeks		Wzór	
Indeksy zawartości chlorofilu	ND _{chl}	$ND_{chl} = \frac{(\sum_{i=25}^{31} R_i / 35,91) - (R_{18} / 3,38)}{(\sum_{i=25}^{31} R_i / 35,91) + (R_{18} / 3,38)}$	Wzór 4
	SR ₆₈₀	$SR_{680} = \frac{R_{26} / 5,13}{R_{17} / 5,08}$	Wzór 5
	SR ₇₀₅	$SR_{705} = \frac{R_{22} / 5,13}{R_{19} / 5,08}$	Wzór 6
	ND ₆₈₀	$ND_{680} = \frac{(R_{26} / 5,13) - (R_{17} / 5,08)}{(R_{26} / 5,13) + (R_{17} / 5,08)}$	Wzór 7
	ND ₇₀₅	$ND_{705} = \frac{(R_{22} / 5,13) - (R_{19} / 5,08)}{(R_{22} / 5,13) + (R_{19} / 5,08)}$	Wzór 8
	mSR ₇₀₅	$mSR_{705} = \frac{(R_{22} / 5,13) - ((R_2 + R_3) / 31,04)}{(R_{19} / 5,08) - ((R_2 + R_3) / 31,04)}$	Wzór 9
	mND ₇₀₅	$mND_{705} = \frac{(R_{22} / 5,13) - (R_{19} / 5,08)}{(R_{22} / 5,13) + (R_{19} / 5,08) - 2 * ((R_2 + R_3) / 31,04)}$	Wzór 10
Indeksy zawartości karotenoidów do chlorofilu	PRI	$PRI = \frac{((R_8 + R_9) / 31,04) - ((R_9 + R_{10}) / 32,44)}{((R_8 + R_9) / 31,04) + ((R_9 + R_{10}) / 32,44)}$	Wzór 11
	SIPI	$SIPI = \frac{(R_{26} / 5,13) - ((R_2 + R_3) / 31,04)}{(R_{26} / 5,08) - (R_{17} / 5,08)}$	Wzór 12
	PSRI	$PSRI = \frac{(R_{17} / 5,08) - ((R_6 + R_7) / 31,04)}{(R_{19} / 5,08)}$	Wzór 13

Łączna zawartość barwników w igłach II rocznika sosny mieściła się w zakresie 1,02÷3,46 mg/g s.m. (wartość średnia 2,03 mg/g s.m.) i była znacznie niższa niż wykazał Łabaj [3], tj. 3,31 do 4,75 mg/g s.m. Dodatkowo ten sam autor wykazał, że zawartości barwników w aparacie asymilacyjnym zwiększała się wraz z oddalaniem się od Huty im. Sendzimira, leżącej na zachód od Puszczy Niepołomickiej. Przeprowadzone w ramach projektu FOREMMS oznaczenia zawartości barwników nie potwierdziły

tej tezy. Może to świadczyć o silnym zróżnicowaniu zawartości barwników w zależności od wielu nieuwzględnionych czynników, lub też o spadku wielkości imisji zanieczyszczeń (w przypadku traktowania ich jako głównej przyczyny obniżenia zawartości barwników).

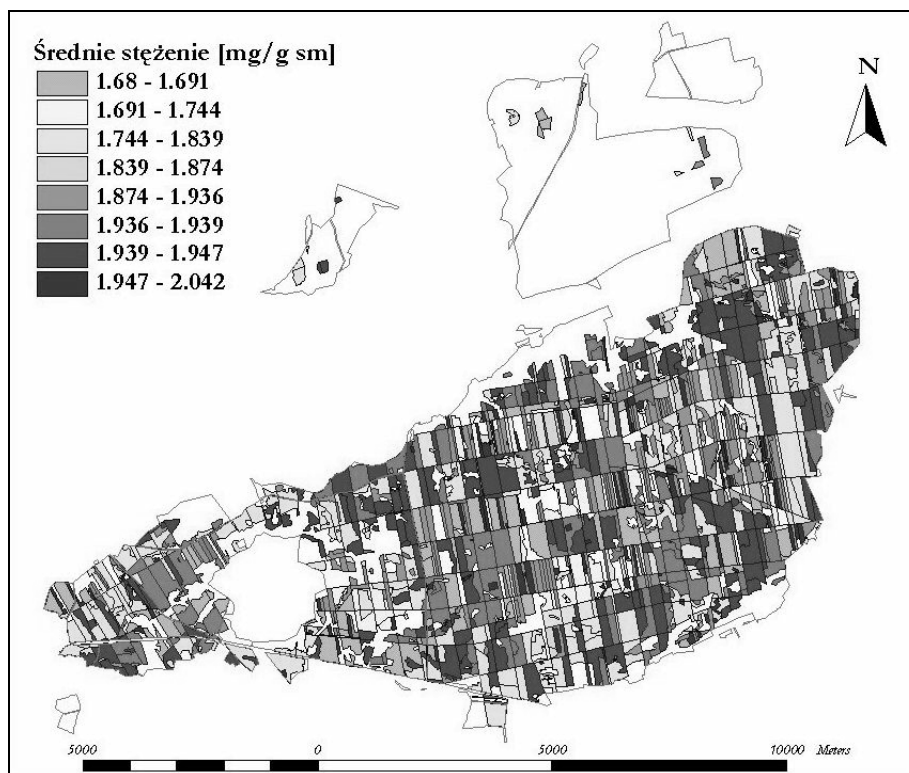


Rys. 2. Średnia zawartość barwników asymilacyjnych oznaczonych laboratoryjnie dla trzech roczników igieł sosny

Fig. 2. Average concentration of pigments based on laboratory measurements for three generations of needles of scotch pine

Uzyskane wyniki oznaczeń laboratoryjnych chlorofilu oraz oprogramowanie GIS (ArcView ver.3.2a ESRI), wykorzystujące warstwy informacyjne w postaci bazy geometrycznej (Leśna Mapa Numeryczna) i opisowej (SILP) pozwoliły na wygenerowanie mapy zawartości chlorofilu w koronach sosny w Puszczy Niepołomickiej (rys. 3.). Wykonane analizy przestrzenne bazowały na przypisaniu do odpowiedniej klasy wieku drzewostanów wyników oznaczeń laboratoryjnych (średnia dla przedziału wieku w 20-letnich przedziałach klasowych dla sosny) i zastosowaniu odpowiedniej klasyfikacji (8 klas).

Wartości wszystkich wyliczonych indeksów zawartości chlorofilu wykazały tendencję spadku ich wartości wraz ze wzrostem klasy wieku drzewostanów. Niewielki wzrost wartości występował zazwyczaj w 3 klasie wieku (41–60 lat).



Rys. 3. Mapa średniego stężenia barwników asymilacyjnych w igłach sosny w Puszczy Niepołomickiej

Fig. 3. Map of the average pigments concentration in Scotch Pine needles of the forest stands of Niepolomice Forest

Zmienność wszystkich indeksów poza indeksem PRI była niewielka, i nie przekroczyła 12%. Wśród indeksów chlorofilu najwyższą zmienność wykazały indeksy SR_{680} oraz SR_{705} . Najniższą zmiennością wśród indeksów dla chlorofilu odznaczały się indeksy ND_{680} i ND_{705} utworzone na bazie wzoru indeksu wegetacji NDVI. Wśród indeksów stosunku karotenoidów do chlorofilu zwraca uwagę silnie zróżnicowany indeks PRI, którego współczynnik zmienności przekracza 40%. Pozostałe indeksy stosunku karotenoidów do chlorofilu odznaczają się znacznie niższą zmiennością. Indeks SIPI wykazuje najmniejszą zmienność.

Porównania wyników oznaczeń laboratoryjnych z wyliczonymi indeksami zawartości barwników przeprowadzono dla 19 powierzchni monitoringowych FOREMMS. Indeksy stosunku zawartości karotenoidów do chlorofilu zestawiono z wyliczoną na podstawie oznaczeń laboratoryjnych zawartością karotenoidów podzieloną przez sumę zawartości chlorofilu a i b .

Współczynniki korelacji wyników oznaczeń laboratoryjnych z wyliczonymi indeksami barwników asymilacyjnych przedstawia tabela 3.

Tabela 3

Table 3

Współczynniki korelacji pomiędzy oznaczoną laboratoryjnie zawartością barwników w aparacie asymilacyjnym a indeksami barwników wyliczonymi na podstawie zobrażeń skanera AISA
Correlation coefficients between concentration of pigments in scotch pine needles gathered by laboratory measurements and estimated during AISA image analysis

Indeks	Współczynnik korelacji Pearsona (r)	Poziom istotności (p)
ND _{chl}	0,56	0,012
SR ₆₈₀	0,53	0,020
SR ₇₀₅	0,60	0,006
ND ₆₈₀	0,51	0,025
ND ₇₀₅	0,58	0,009
mSR ₇₀₅	0,65	0,002
mND ₇₀₅	0,57	0,011
PRI	0,04	0,858
SIPI	0,20	0,418
PSRI	-0,02	0,935

Wszystkie przetestowane indeksy zawartości chlorofilu okazały się statystycznie istotnie skorelowane z danymi z oznaczeń laboratoryjnych. Współczynniki korelacji Pearsona zawierały się w przedziale od 0,51–0,65, co oznacza istnienie zależności liniowej pomiędzy tymi zestawami danych. Wśród indeksów zawartości chlorofilu w aparacie asymilacyjnym sosny największe wartości wykazały indeksy mSR₇₀₅ oraz SR₇₀₅, czyli wskaźniki bazujące na wartości odbicia fali o długościach 705 i 750 nm i opierające się na prostym iloczynie tych wartości. Nieco niższe wartości współczynnika korelacji osiągnęły indeksy ND₇₀₅ i mND₇₀₅, bazujące na tej samej fali, lecz oparte na wzorze indeksu wegetacji NDVI. Najniższe współczynniki korelacji stwierdzono dla indeksów bazujących na długościach fal 680 i 800 nm. Spośród indeksów dla szacowania zawartości karotenoidów żaden nie okazał się być istotnie skorelowany z wynikami oznaczeń laboratoryjnych. W badaniach Simsa i Gamona [10], przeprowadzonych dla wielu gatunków roślin przydatność indeksów kształtowała się podobnie. Indeks, osiągającym współczynnik korelacji równy 0,91 okazał się być mND₇₀₅, drugim w kolejności był indeks mSR₇₀₅, dla którego współczynnik korelacji osiągnął wartość 0,86. Charakterystyczny jest fakt, że wśród przebadanych indeksów podobnie jak w niniejszej pracy najniższe wartości współczynników korelacji osiągnęły również indeksy SR₆₈₀ i ND₆₈₀ (odpowiednio 0,2 i 0,28). Indeksy SIPI i PSRI dla stosunku karotenoidów do chlorofilu w badaniach Simsa i Gamona [10] okazały się być podobnie jak w prezentowanej pracy nieskorelowane z wynikami oznaczeń laboratoryjnych. Jedynie indeks PRI osiągnął współczynnik korelacji 0,62 co wg Simsa i Gamona [10] wskazywało na celowość jego stosowania dla potrzeb szacowania zawartości karotenoidów. Wyniki wyliczeń otrzymane w toku analiz zobrażeń skanera AISA nie potwierdziły tej tezy.

5. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Niniejsza praca mająca charakter interdyscyplinarny udowodniła, że możliwe jest wykorzystanie technik zdalnego obrazowania terenu dla pozyskania danych dla różnych dziedzin nauki. W prezentowanej pracy udało się połączyć wiedzę dotyczącą fizjologii roślin oraz technologii zdalnego pozyskania danych dla celu oszacowania istotnych charakterystyk koron drzew, jakimi jest zawartość barwników w aparacie asymilacyjnym.

Zobrazowania hiperspektralne skanera AISA mogą być cennym źródłem informacji dla celu szacowania zawartości barwników w aparacie asymilacyjnym drzew. Dzięki wysokiej rozdzielczości terenowej (1 m × 1 m) oraz spektralnej (32 kanały spośród 254 możliwych do użycia) obrazowań możliwe jest odnajdywanie poszczególnych koron drzew lub niewielkich obiektów terenowych.

Obrazowanie terenu za pomocą hiperspektralnego skanera AISA umożliwia wykonanie analiz bazujących na odpowiedzi spektralnej obiektów na nich zarejestrowanych. Tym samym możliwe staje się szacowanie zawartości barwników (tzw. indeksów barwników) w aparacie asymilacyjnym drzew.

Wszystkie wyliczone na podstawie obrazowań skanera hiperspektralnego AISA indeksy zawartości chlorofilu w aparacie asymilacyjnym sosny wykazały tendencję do spadku ich wartości wraz z wiekiem (rocznikiem) igieł oraz starzeniem się drzewostanu. Dla indeksów mSR₇₀₅ oraz SR₇₀₅ charakteryzujących się podobnym trendem prawidłowość ta była najbardziej wyraźna. Wyniki otrzymane dla indeksów opisujących stosunek karotenoidów do chlorofilu (wyliczonych na podstawie obrazowań skanera AISA) nie potwierdziły celowości ich stosowania.

Neinwazyjność badań oraz relatywnie niskie koszty pozyskania danych za pomocą skanera hiperspektralnego AISA wskazują na celowość jego stosowania w monitoringu ekosystemów leśnych.

6. LITERATURA

- Gamon J. A., Penuelas J., Field C. B.: A narrow-waveband spectral index that tracks diurnal changes in photosynthetic efficiency. *Remote Sensing of Environment*, 41, 35–44. 1992.
- Gitelson A., Merzlyak MN.: Spectral reflectance changes associated with autumn senescence of *Aesculus hippocastanum* L. and *Acer platanoides* L. leaves. Spectral features and relation to chlorophyll estimation. *Journal of Plant Physiology*, 143: 3, 286–292; 24 ref. 1994.
- Łabaj A.: Przestrzenna zmienność uszkodzeń aparatu asymilacyjnego sosny (*Pinus silvestris* L.) w Puszczy Niepołomickiej. Praca magisterska w Zakładzie Ekologii Ekosystemów Instytutu Biologii Środowiskowej UJ. Kraków 1998.
- Langlet O.: Einige Beobachtungen über die Winterfärbung bei der gemeinen Kiefer (*Pinus silvestris* L.). *Svensk. Bot. Tidskr.* 36. 1942.
- Lichtenthaler HK.: Chlorophyll and carotenoids – pigments of photosynthetic biomembranes za Colowick S.P., Kaplan N.O. *Methods in Enzymology*. Vol. 148. Pp. 350–382. Academic Press, San Diego – New York – Berkley – Boston – London – Sydney – Tokyo – Toronto 1987.
- Madejczyk A.: Zakładanie sieci powierzchni monitoringowych w Puszczy Niepołomickiej metodą DGPS dla potrzeb projektu Forest Environmental Monitoring and Management

- System (FOREMMS IST 5 FP). Praca magisterska w Katedrze Ekologii Lasu, Wydziału Leśnego Akademii Rolniczej. Kraków 2003.
- Makisara K., Meinander M., Rantasuo M.: Airborne Imaging Spectrometer for Applications (AISA). Materiały 1993 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS'93), pp. 479–481, Tokyo, Japan 1993.
- Merzlyak M.N., Gitelson A.A., Chivkunova O.B., Rakitin, V.Y.: Non-destructive optical detection of pigment changes during leaf senescence and fruit ripening. *Physiologia Plantarum*, 106, 135–141. 1999.
- Penuelas J., Baret F., Filella I.: Semi-empirical indices to assess carotenoids/chlorophyll a ratio from leaf spectral reflectance. *Photo-synthetica*, 31, 221–230. 1995.
- Sims DA., Gamon JA.: Relationships between leaf pigment content and spectral reflectance across a wide range of species, leaf structures and developmental stages. *Remote Sensing of Environment* 81: 2–3, 337–354. 2002.
- Świeboda M.: Chlorophyll content in pine (*Pinus sylvestris* L.) needles exposed to flue dust from lead and zinc works. *Acta Societatis botanicorum Poloniae* Vol. XLV, nr 4, S. 411–419. 1976.
- Szaniawski R.: Charakterystyka niektórych procesów fizjologicznych w trakcie rozwoju i starzenia aparatu asymilacyjnego roślin iglastych. *Wiadomości Botaniczne*, Tom XX, Zeszyt 3, s. 147–154. 1976.
- Wężyk P.: Integracja technologii geoinformatycznych w systemie monitoringu i zarządzania ekosystemami leśnym Europy, na przykładzie projektu FOREMMS (V PR UE). W: Materiały Ogólnopolskie Sympozjum Geoinformacji. Geoinformacja zintegrowanym narzędziem badań przestrzennych, s. 94. Wysowa 2001.
- Wężyk P.: Projekt FOREMMS (SPR) – nowe technologie geoinformatyczne w lasach Europy. I Konferencja SIP w Lasach Państwowych 4–6 grudzień 2001 roku. Rogów 2001.

HIPERSPECTRAL SCANNER AISA
(AIRBORNE IMAGING SPECTROMETER FOR APPLICATIONS)
– TOOL FOR FOREST ECOSYSTEM DATA GATHERING

S u m m a r y

During the FOREMMS (5 FP IST) project, performed in selected EU countries, including candidate country – Poland (Niepolomice Forest), the hyperspectral images made by AISA airborne spectrometer (at 13.08.2003) and results of laboratory (spectrophotometry method) measurements of pigments concentration in Scotch Pine (*Pinus sylvestris* L.) needles, were used. Samples of Scotch Pine needles were collected from common trees, selected and cut on the FOREMMS monitoring plots. Ranges of the selected 32 spectral channels of AISA spectrometer were specially selected to ensure the correspondence with absorption and reflectance characteristics of pigments i.e.: chlorophyll *a*, *b* and carotenoids.

The study shows usefulness of high-resolution AISA images as a valuable source of data for estimating “pigments indexes” purposes, especially for estimate concentration of chlorophyll in pine needles. Laboratory analyses demonstrated decrease of chlorophyll content in Scotch Pine needles (all three generation of needles) during growth of tree stand. All of chlorophyll indexes calculated from AISA image had decreasing trend along with the age of needles generation. For mSR₇₀₅ index this regularity was strongest (Pearson’s correlation

coefficient = 0.65). As a result of spatial GIS analyses, the digital map representing concentration of chlorophyll in Scotch Pine needles in Niepolomice Forest, was generated.

KEY WORDS: AISA, chlorophyll, Remote Sensing, GIS, pigment indices

Recenzent: dr Bogdan Zagajewski, Uniwersytet Warszawski