

Zróźnicowanie wskaźników teledetekcyjnych i biometrycznych

Zestawienie danych statystycznych przedstawiających wyniki pomiarów terenowych spektralnych wskaźników roślinnych (LAI i f_{APAR}) (tabela 7), daje podstawy do stwierdzenia, że najbardziej zróżnicowane wartości reprezentuje LAI. Jednak gdyby z analizy wykluczyć punkt, w którym zanotowano wartość LAI=7,03, zarówno odchylenie standardowe, jak i współczynnik zmienności LAI przybierają mniejsze wartości, wskazując na to, że w obrębie stosunkowo jednorodnego pod względem LAI zbiorowiska kosodrzewiny występują powierzchnie o bardzo dużym lokalnym zróżnicowaniu. Na 47,62% rozpatrywanych stanowisk wartości LAI zawierają się w przedziale 2-3 [m^2m^{-2}], a zaledwie na 4,76% punktów wartości przekraczające 5 [m^2m^{-2}].

Wskaźnik f_{APAR} charakteryzujący produktywność i świadczący o kondycji badanego zbiorowiska odznacza się najmniejszym zróżnicowaniem spośród przedstawianych parametrów (tabela 7). Jednocześnie zmierzone w terenie wartości zawierają się w dwóch przedziałach i na 90,48% punktów f_{APAR} osiąga wartości przekraczające 0,9, a na pozostałych stanowiskach mieści się w przedziale 0,8-0,9. Świadczy to o tym, że kosodrzewina odznacza się dobrą kondycją i efektywnie wykorzystuje większość docierającej do niej energii słonecznej.

Analiza wskaźników biometrycznych wskazuje także na duże znaczenie lokalnego zróżnicowania cech zarośli

kosodrzewiny dla ich całościowej charakterystyki. Najwyższe wartości współczynnika zmienności zanotowano dla wysokości krzewów, które średnio osiągają wysokość zbliżoną do 1,5 m (tabela 8). Za drugi parametr różnicujący zarośla kosodrzewiny można uznać zwarcie, które średnio osiąga stosunkowo duże wartości, przekraczające 60% (tabela 8). Żadna z cech nie wykazuje jednak prawidłowości (ryc. 11) związanych z warunkami wzrostania krzewów (np. wysokością n.p.m., nachyleniem stoku, ekspozycją).

Spektralne wskaźniki roślinne

W celu określenia najlepszego hiperspektralnego wskaźnika roślinnego został policzony współczynnik korelacji (R^2) pomiędzy wszystkimi możliwymi dwukanałowymi wariantami rozpatrywanych wskaźników (tabela 9, 10) i z uwzględnieniem różnych typów danych hiperspektralnych (dane obrazowe ze skanera ROSIS, spektra zmierzone za pomocą spektrometrów FieldSpec HH – w terenie i FieldSpec Pro 2 – w laboratorium), a teledetekcyjnymi wskaźnikami stanu roślinności. Wyniki przedstawiono w formie dwuwymiarowych wykresów korelacji. Optymalne pary kanałów zidentyfikowano na wykresach korelacji na podstawie wartości R^2 .

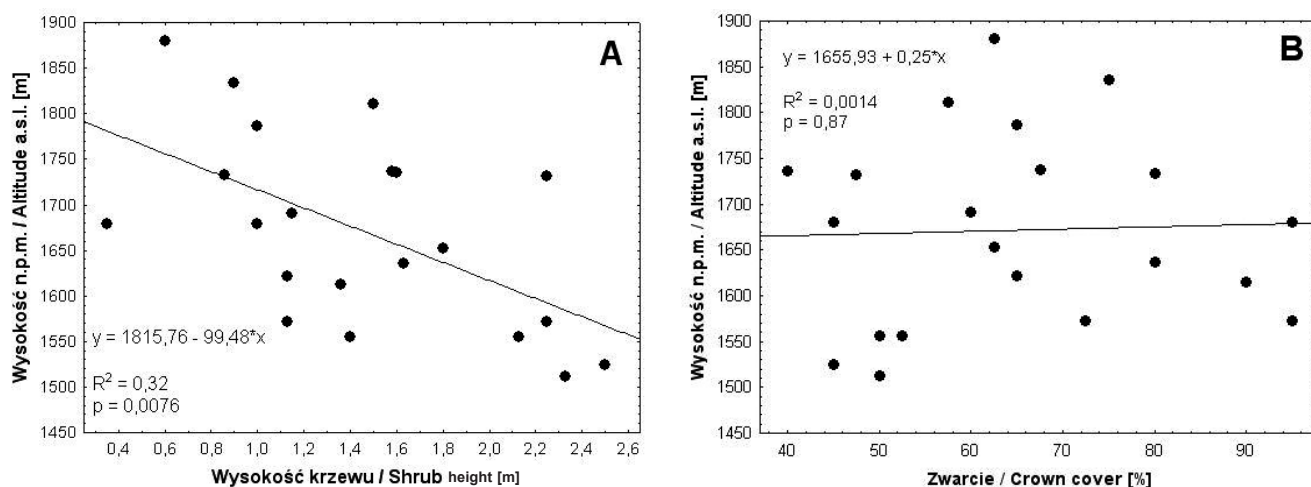
Tabela 7 Statystyki podsumowujące wyniki pomiarów terenowych spektralnych wskaźników stanu roślinności.

Table 7 Summary statistics for ground measurements of spectral vegetation condition indices.

Wskaźnik Variable	Średnia Mean	Odchylenie standardowe Standard deviation	Wartość mak- symalna Maximum	Wartość mini- malna Minimum	Zakres wartości Range	Współczynnik zmienności Coefficient of variation
LAI [$m^2 m^{-2}$]	2,90	1,26	7,03	1,36	5,67	0,43
f_{APAR}	0,92	0,03	0,96	0,85	0,11	0,03
$t_s - t_a$ [°C]	-3,56	0,86	-1,96	-5,20	3,24	-0,24

Tabela 8 Statystyki podsumowujące wyniki pomiarów terenowych cech biometrycznych kosodrzewiny.
 Table 8. Summary statistics for ground measurements of dwarf pine biometrical parameters.

Wskaźnik Variable	Średnia Mean	Odchylenie standardowe Standard deviation	Wartość mak- symalna Maximum	Wartość mi- nimalna Minimum	Zakres war- tości Range	Współczyn- nik zmien- ności Coefficient of variation
wysokość/ height [m]	1,45	0,60	2,50	0,35	2,15	0,41
długość igiel / needle length [cm]	4,55	0,48	5,43	3,83	1,60	0,10
liczba roczników igiel / number of needle rings	5,67	1,15	8,00	4,00	4,00	0,20
zwarcie / crown closure[%]	64,64	16,53	95,00	40,00	55,00	0,26



Ryc. 11. Zależność wysokości (A) i zwarcia (B) krzewów kosodrzewiny od wysokości nad poziomem morza
 Fig. 11. Relationship between dwarf pine shrub height (A) and crown cover (B) and altitude above sea level.

Powierzchnia projekcyjna igiel – LAI

W analizie zależności wskaźników roślinnych i LAI zastosowano trzy typy danych spektralnych (dane obrazowe ze skanera ROSIS, spektra zmierzone za pomocą spektrometrów FieldSpec HH – w terenie i FieldSpec Pro 2 – w laboratorium). Poszczególne sensory rejestru-

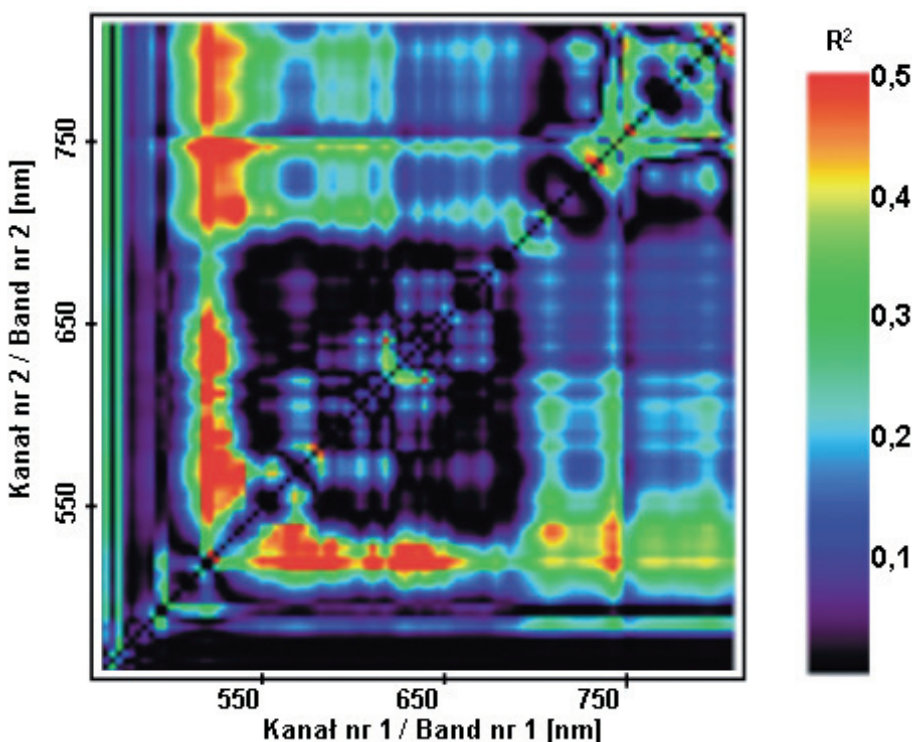
ją informacje spektralne w różnych zakresach i w kanałach o zróżnicowanej rozpiętości, co ma wpływ na uzyskane wyniki (tabela 9). Najslabiej zaprezentował się skaner hiperspektralny ROSIS. Współczynnik korelacji pomiędzy LAI a najlepszym ze wskaźników roślinnych – VI – osiągnął wartość zaledwie 0,48 (ryc. 12), podczas gdy na podstawie danych ze skanera FieldSpec HH –

Tabela 9 Pary kanałów budujące wskaźniki roślinne najlepiej oddające LAI.
 Table 9. Pairs of spectral channels used to compute narrow band indices best describing LAI.

Wskaźnik Index	ROSIG		FieldSpec HH		FieldSpec Pro	
	Para optymal- nych kanałów spektralnych Pair of the best spectral channels [nm]	Współczynnik korelacji R ² Correlation coefficient R ²	Para optymal- nych kanałów spektralnych Pair of the best spectral channels [nm]	Współczynnik korelacji R ² Correlation coefficient R ²	Para optymal- nych kanałów spektralnych Pair of the best spectral channels [nm]	Współczynnik korelacji R ² Correlation coefficient R ²
NDVI	510 / 630	0,47	886 / 518	0,72	2170 / 985	> 0,90
PVI	510 / 630	0,47	353 / 1049	0,62	1026 / 1741	
SAVI2	758 / 458	0,47	1073 / 609	0,44	483 / 1476	
TSAVI	758 / 470	0,35	703 / 1062	0,48	383 / 2099	
VI	510 / 630	0,48	886 / 518	0,72	2170 / 986	

Tabela 10. Pary kanałów budujące wskaźniki roślinne najlepiej opisujące f_{APAR} Table 10. Pairs of spectral channel used to compute narrow band indices best describing f_{APAR}

Wskaźnik Index	ROSIS		FieldSpec HH		FieldSpec Pro	
	Para optymalnych kanałów spektralnych Pair of the best spectral channels [nm]	Współczynnik korelacji R^2 Correlation coefficient R^2	Para optymalnych kanałów spektralnych Pair of the best spectral channels [nm]	Współczynnik korelacji R^2 Correlation coefficient R^2	Para optymalnych kanałów spektralnych Pair of the best spectral channels [nm]	Współczynnik korelacji R^2 Correlation coefficient R^2
NDVI	510 / 502	0,31	541 / 540	0,59	1453 / 2398	> 0,90
PVI	506 / 758	0,42	376 / 1029	0,62	1782 / 759	
SAVI2	454 / 502	0,34	1071 / 1027	0,81	956 / 594	
TSAVI	658 / 570	0,72	329 / 1060	0,57	2083 / 1061	
VI	510 / 502	0,48	541 / 540	0,55	1453 / 2398	

Ryc. 12. 2-wymiarowy wykres ilustrujący rozkład wartości współczynnika korelacji (R^2) pomiędzy LAI i VI utworzonym z danych z obrazu zarejestrowanego przez skaner hiperspektralny ROSIS.Fig. 12. 2D-correlation plot that shows the distribution of correlation coefficient (R^2) between LAI and VI created from data registered by hyperspectral scanner ROSIS.

R^2 przyjął wartość 0,72 (tabela 9) dla dwóch wskaźników VI i NDVI zbudowanych z takich samych kanałów spektralnych (886 nm i 518 nm). Podobna sytuacja ma miejsce dla danych ze skanera FieldSpec Pro (tabela 9), gdzie porównywalnym wartościom R^2 dla VI i NDVI przypisane są takie same lub bardzo zbliżone zakresy spektralne (2170 nm i 985 nm).

Zwiększającej się sile związku pomiędzy LAI a wskaźnikiem roślinnym towarzyszy przesunięcie zakresów spektralnych (lub przynajmniej jednego z nich) budujących dany wskaźnik roślinny w kierunku bliskiej podczerwieni (FieldSpec HH) i średniej podczerwieni (FieldSpec Pro). W przeciwieństwie do tradycyjnych wariantów wskaźników roślinnych wykorzystujących informacje z kanału czerwonego i bliskiej podczerwieni, znacznie lepsze rezultaty daje wykorzystanie w analizie średniej podczerwieni (co pokazują wyniki analizy spektr zarejestrowanych spektrometrem FieldSpec Pro). Potwierdzają to także wyniki badań dotyczących wielu innych gatunków roślin, w tym także drzew iglastych

(Fassnacht i in., 1997; Broge, Leblanc, 2000; Schlerer i in., 2005; Darvishzadeh i in., 2006)

Podstawowe zakresy wykorzystywane do tworzenia wskaźników roślinnych w tradycyjnym rozumieniu to długości fal obejmujące widmo czerwone i bliską podczerwień. Przedstawione hiperspektralne warianty wskaźników pokazały, że można dobrać pary kanałów odpowiadające nie tylko wykorzystywanym w teledetekcji wielospektralnej zakresom. Należy zwrócić uwagę, że w parze kanałów tworzących nowe wąskokanałowe wskaźniki także występują prawidłowości polegające na tym, że jeden z zakresów odpowiada pikowi na krzywej spektralnej lub znajduje się na ramieniu danej cechy absorpcyjnej, a drugi leży w miejscu, gdzie zaznacza się minimum absorpcji lub w bezpośrednim jego sąsiedztwie.

W przypadku danych ze skanera ROSIS najlepsza kombinacja kanałów odpowiada promieniowaniu zielonemu i czerwonemu, związanym odpowiednio z rejonem

maksimum absorpcji β -karotenu i niewielkiej absorpcji chlorofilu a (510 nm) oraz z rejonem silnej absorpcji chlorofilu a i chlorofilu b (630 nm) (Jakomulska, 1999b; Kumar i in., 2001; Schmidt, 2003).

Spektra zarejestrowane przez spektrometr FieldSpec HH dały rezultat wskazujący na przydatność bliskiej podczerwieni w połączeniu z zakresem światła zielonego. Zidentyfikowane kanały tworzące wskaźnik (NDVI i VI) opisujący najlepszy związek z LAI można przypisać do tych obszarów spektrum, które są związane z absorpcją wody (886 nm) (Kumar i in., 2001; Schlerf i in., 2005) i podobnie jak w przypadku danych z ROSIS'a z rejonem absorpcji β -karotenu (518 nm) (Jakomulska, 1999b; Schmidt, 2003).

Wskaźniki zbudowane w oparciu o dane ze spektrometru FieldSpec Pro korzystają z par kanałów, z których jeden należy do obszaru średniej podczerwieni (1300-2500 nm), gdzie istotną rolę odgrywa absorpcja przez wodę. Ponadto zakresom, które odpowiadają za interakcje z wodą są przypisywane cechy związane z absorpcją przez: białka i azot (2170 nm), celulozę (1741 nm, 2099 nm), skrobię (2099 nm, 1476 nm), ligninę (1476 nm). Drugi z kanałów tworzących rozpatrywane wskaźniki ma także związek z absorpcją wody (985 nm, 1026 nm), chlorofilu a (483 nm) i chlorofilu b (383 nm) (Jakomulska, 1999b).

Produktywność – f_{APAR}

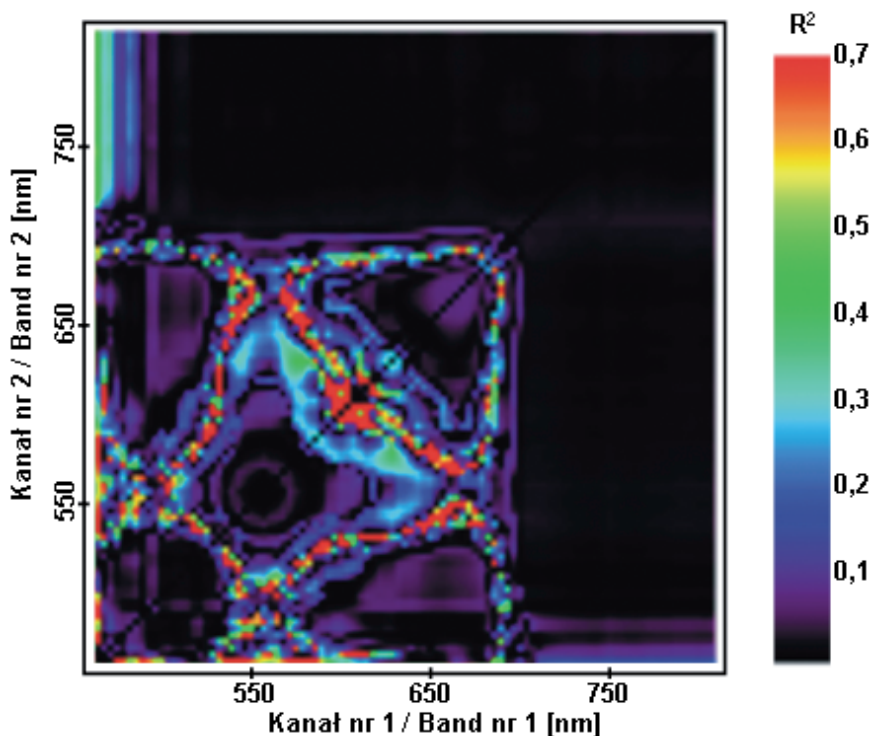
Fracja APAR, czyli f_{APAR} , jest charakteryzowana przez silniejsze niż w przypadku LAI związki ze wskaźnikami roślinnymi (tabela 10). Dane pozyskane ze skanera hiperspektralnego ROSIS pozwoliły zbudować wąskokanałowy wskaźnik, którego wartości kore-

lują dobrze z f_{APAR} , co potwierdza wysoki współczynnik korelacji R^2 osiągający wartość 0,72 (ryc. 13). Jeszcze lepsze zależności pomiędzy f_{APAR} a wskaźnikami roślinnymi oddają dane z pomiarów terenowych (FieldSpec HH) i laboratoryjnych (FieldSpec Pro). Zmierzone przez FieldSpec HH współczynniki odbicia zarejestrowane w kanałach 747 nm i 703 nm (tabela 10) umożliwiły zbudowanie wskaźnika (SAVI2), którego związek z f_{APAR} opisuje $R^2=0,81$. W przypadku danych ze spektrometru FieldSpec Pro współczynniki korelacji dla wszystkich analizowanych wskaźników przyjmują wartości powyżej 0,90 (tabela 10).

Kanały tworzące najlepsze związki z f_{APAR} obejmują zakres widzialny, który jest związany z procesem fotosyntezy, w przypadku danych z ROSIS'a i obszar spektrum nazywany *red edge*, związany z gwałtowną zmianą wartości współczynnika odbicia, od niskiej w paśmie czerwonym do bardzo wysokiej w zakresie bliskiej podczerwieni (Horler i in., 1983; Danson, Curran, 1993), w przypadku danych ze spektrometru FieldSpec HH.

Wskaźniki oddające najlepsze relacje z f_{APAR} są zbudowane z kanałów, które odzwierciedlają charakterystyczne cechy absorpcyjne. Wskaźnik TSAVI, który charakteryzuje związek f_{APAR} z informacją spektralną pozyskaną z obrazu ROSIS, budują kanały 658 nm i 570 nm. Są one związane z rejonem minimum (570 nm) i maksimum (658 nm) absorpcji chlorofilu a i b (Jakomulska, 1999b; Kumar i in., 2001; Schmidt, 2003).

SAVI2 – wskaźnik stworzony w oparciu o dane z FieldSpec HH, jest skonstruowany z zakresu 1071 nm, który odpowiada za absorpcję przez wodę (Kumar i in., 2001; Schlerf i in., 2005) i zakresu 1027 nm, który znajduje się w rejonie spektrum, gdzie istotną rolę odgrywa absorpcja przez białka (Kumar i in., 2001; Schmidt, 2003). Położenie obu zakresów na krzywej



Ryc. 13. 2-wymiarowy wykres ilustrujący rozkład wartości współczynnika korelacji (R^2) pomiędzy f_{APAR} i TSAVI utworzonym z danych z obrazu zarejestrowanego przez skaner hiperspektralny ROSIS.

Fig. 13. 2D-correlation plot that shows the distribution of correlation coefficient (R^2) between f_{APAR} and TSAVI created from data registered by hyperspectral scanner ROSIS.

odbicia spektralnego – jednego w rejonie lokalnego minimum (1027 nm), a drugiego – maksimum (1071 nm) może świadczyć o tym, że rejon spektrum około 1027 nm może także być związany z absorpcją przez wodę.

Wskaźniki wyliczone na podstawie danych ze spektrometru FieldSpec Pro budują kanały ze wszystkich przedziałów spektrum począwszy od światła widzialnego (594 nm – zakres związany ze spadkiem absorpcji

chlorofilu a i b) przez bliską podczerwień (759 nm – obszar, gdzie na współczynnik odbicia wpływa budowa wewnętrzna liści; 956 nm i 1061 nm – absorpcja przez wodę) po średnią podczerwień. Średnia podczerwień odpowiada głównie za absorpcję przez wodę (1453 nm) (Carter, 1991) oraz skrobię i celulozę (1782 nm, 2083 nm) (Kumar i in., 2001; Schmidt, 2003).