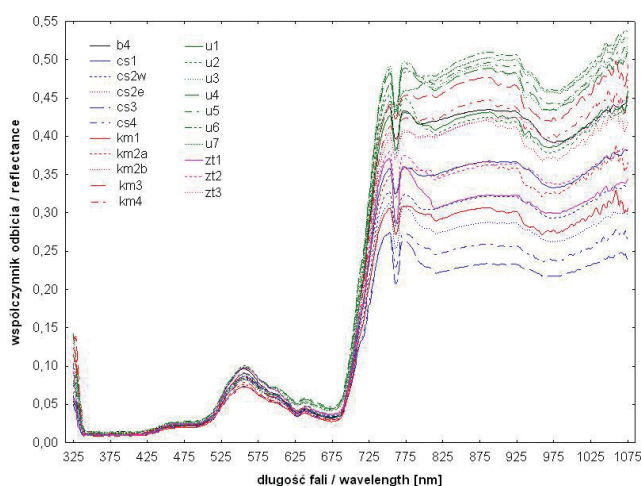


Charakterystyka przestrzennego zróżnicowania kosodrzewiny

Charakterystyka spektralna kosodrzewiny

Charakterystyka spektralna kosodrzewiny została wykonana na podstawie wartości minimalnych, maksymalnych, zakresu wartości, odchylenia standardowego oraz współczynnika zmienności ilustrujących wartości współczynnika odbicia, zarejestrowane podczas pomiarów terenowych przez spektrometr FieldSpec HH oraz pomiarów laboratoryjnych spektrometrem FieldSpec Pro. Ponadto wykonano analizę istotności statystycznej różnic (test t-Studenta) odpowiedzi spektralnych kosodrzewiny dla każdego z punktów pomiarowych.

Krzywe uśrednionych spektr kosodrzewiny zmierzonych wzdłuż poszczególnych transektów charakteryzują się kształtem typowym dla spektr roślinności zielonej (ryc. 4). W zakresie związanym z aktywnością fotosyn-



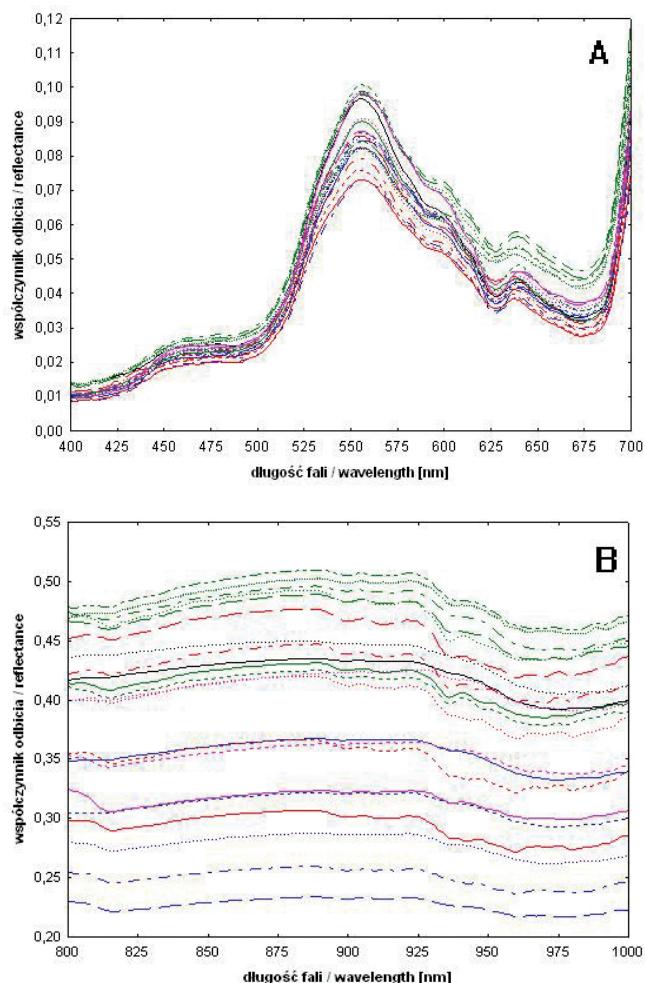
Ryc. 4. Krzywe odbicia spektralnego kosodrzewiny w zakresie 325-1075 nm. Każda krzywa reprezentuje średnią z pomiarów zarejestrowanych wzdłuż transektów spektrometrem FieldSpec HH.

Fig. 4. Reflectance curves of dwarf pine in the part of the spectrum from 325 nm to 1075 nm. Each reflectance curve represents average of measurements made with FieldSpec HH spectrometer along transects.

tetyczną roślin wartości współczynnika odbicia kosodrzewiny przyjmują wartości, których rozpiętość nie przekracza 0,05 w przypadku kanału odpowiadającego długości fali 700 nm (min. – 0,07; maks. – 0,12) i 0,04 w przypadku kanałów odpowiadających długościom fali 696-698 nm (min. – 0,07; maks. – 0,11), czyli w rejonie spektralnym, w którym następuje gwałtowny wzrost wartości współczynnika odbicia. Zakres pozostałych wartości współczynnika odbicia w widzialnym przedziale spektrum to 0,04 w przypadku kanałów odpowiadających długościom fali 557-561 nm (min. – 0,07; maks. – 0,11) (ryc. 5A). Współczynnik zmienności (8-20%) także odzwierciedla niewielkie zróżnicowanie wartości współczynnika odbicia od kosodrzewiny w zakresie 400-700 nm. Nieznacznie większe zróżnicowanie (V_I nie przekracza 21%) jest widoczne w zakresie bliskiej podczerwieni, gdzie w przedziale spektrum 800-1000 nm współczynnik odbicia przyjmuje wartości od 0,22 do 0,51 (ryc. 5B). Rozpiętość wartości współczynnika odbicia przyjmuje wartość 0,27 dla długości fal 873-893 nm (min. – 0,23; maks. – 0,51).

Odbicie od kosodrzewiny jest też zależne od wszystkich elementów, które znajdują się w polu widzenia instrumentu rejestrującego odpowiedź spektralną, jednak w przypadku kosodrzewiny nie zanotowano prawidłowości wskazujących podwyższenie lub obniżenie wartości współczynnika odbicia ze względu na obecność roślin runa, ściółki i skał. Fakt ten wiąże się ze strukturą krzewów kosodrzewiny, której pędy tworzą splecioną gąszcz i mimo przeciętnego zwarcia około 65% ograniczają rejestrację sygnału od podłoża. Nie zaobserwowano także spodziewanego zróżnicowania odpowiedzi spektralnej kosodrzewiny ze względu na wysokość nad poziomem morza, tak jak miało to miejsce w przypadku świerka czerwonego (*Picea rubens*) i jodły balsamicznej (*Abies balsamea*), co odnotował A.D. Richardson z zespołem (2001).

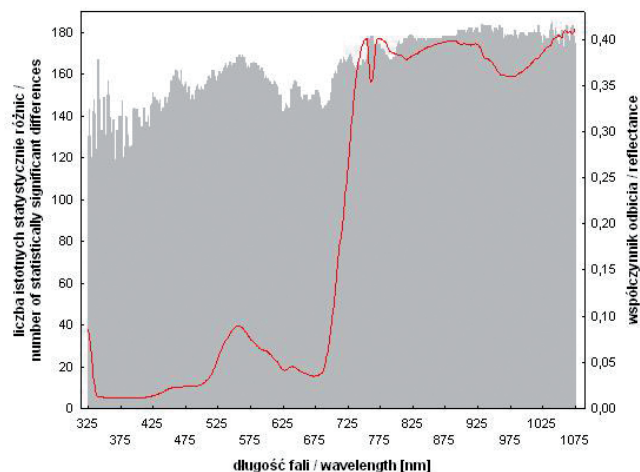
Analiza istotności statystycznej różnic pomiędzy spektrami zarejestrowanymi w terenie spektrometrem FieldSpec HH wykazała, że w całym rozpatrywanym



Ryc. 5. Krzywe odbicia spektralnego kosodrzewiny w zakresie 400-700 nm (A) i w zakresie 800-1000 nm (B). Każda krzywa reprezentuje średnią z pomiarów zarejestrowanych spektrometrem FieldSpec HH wzdłuż transektów (oznaczenia jak na ryc. 4).

Fig. 5. Reflectance curves of dwarf pine in the part of spectrum from 400 nm to 700 nm (A) and in the part of spectrum from 800 nm to 1000 nm (B). Each reflectance curve represents average of measurements made with FieldSpec HH spectrometer along transects (description like in the fig. 4).

przedziale spektralnym (325-1075 nm) istnieje możliwość odróżnienia poszczególnych krzewów i płatów kosodrzewiny (ryc. 6). Rozkład liczebności zaobserwowanych różnic pokazuje, że informacja spektralna cenniejsza z punktu widzenia wyodrębniania kosodrzewiny o określonych cechach przypada na zakres bliskiej podczerwieni (ryc. 6). Różnice statystyczne najczęściej występują dla kanałów w zakresie 800-1075 nm (ponad 170 przypadków na 199 możliwych kombinacji rozpatrywanych par spektr). W zakresie światła widzialnego (400-700 nm) najwięcej istotnych statystycznie różnic (169) przypada na kanały odpowiadające długościom fal 557-563 nm, czyli maksimum odbicia w świetle zielonym. W bliskiej podczerwieni, na rejon absorpcji przez wodę (około 970 nm) przypada blisko 180 istotnych statycznie różnic między parami spektr kosodrzewiny (ryc. 6). Można więc zauważyć, że częstość występowania istotnych statystycznie różnic nawiązuje do cech



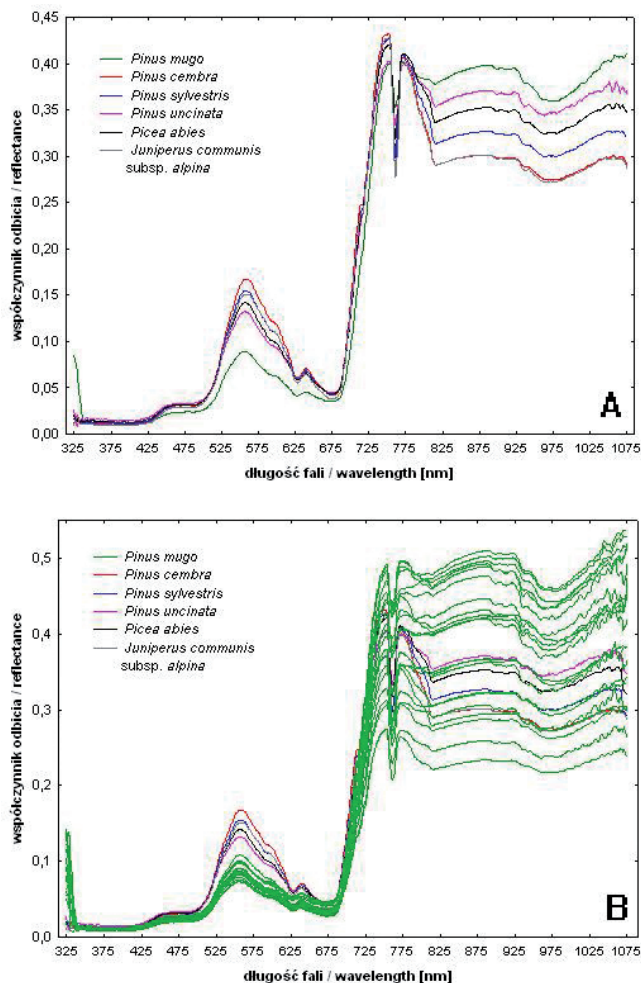
Ryc. 6. Liczba istotnych statystycznie różnic (szare słupki) pomiędzy średnimi wartościami współczynnika odbicia dla spektr kosodrzewiny zarejestrowanych we wszystkich punktach pomiarowych (poziom istotności $p < 0,05$). Krzywa odbicia od kosodrzewiny (czerwona linia) ilustruje charakterystyczne cechy odbicia spektralnego od roślinności zielonej.

Fig. 6. Frequency plot of statistically significant differences (grey bars) between the field reflectance means of all dwarf pine plots at every channel. Average reflectance curve of dwarf pine (red line) indicates typical vegetation reflectance features.

absorpcyjnych i charakterystycznych dla roślinności zielonej lokalnych maksimum odbicia promieniowania elektromagnetycznego.

Z porównania wartości współczynnika odbicia kosodrzewiny (średnia ze wszystkich pomiarów spektralnych) z pozostałymi gatunkami iglastymi (limbą *Pinus cembra*, sosną zwyczajną *Pinus sylvestris*, sosną hakowatą *Pinus uncinata*, świerkiem *Picea abies* i jałowcem halnym *Juniperus communis* subsp. *alpina*) występującymi w piętrze subalpejskim lub w reglu górnym wynika, że odróżnienie od nich kosodrzewiny metodami spektralnymi może nastęrczać pewne trudności. Widoczne jest to na przykładzie ryciny 7A, przedstawiającej krzywą odbicia spektralnego kosodrzewiny w postaci średniej ze wszystkich pomiarów krzewów tego gatunku. Spektrum charakteryzujące kosodrzewinę wyróżnia się jedynie w zakresie zielonym, gdzie obserwowany jest wzrost odbicia od roślinności (ryc. 7A). Współczynnik odbicia od kosodrzewiny przyjmuje w tym rejonie wartość 0,09 (maksimum odbicia), podczas gdy od sosny hakowatej (najniższe wartości spośród pozostałych rozpatrywanych gatunków iglastych) – 0,13, a od limby, najsilniej ze wszystkich analizowanych gatunków iglastych odbijającej światło zielone – 0,17 (ryc. 7A). W bliskiej podczerwieni zachodzi odwrotna sytuacja, gdyż to kosodrzewina odbija najsilniej (0,38) w zakresie 800-1075 nm, a wartości współczynnika odbicia dla limby i jałowca halnego mają najniższe wartości (0,29).

Przy porównaniu spektr kosodrzewiny ze wszystkich punktów pomiarowych (ryc. 7B), okazuje się, że współczynniki odbicia pozostałych gatunków iglastych są zawarte pomiędzy najmniejszymi a największymi wartościami współczynnika odbicia od kosodrzewiny w bliskiej podczerwieni (ryc. 7B). W przedziale spek-



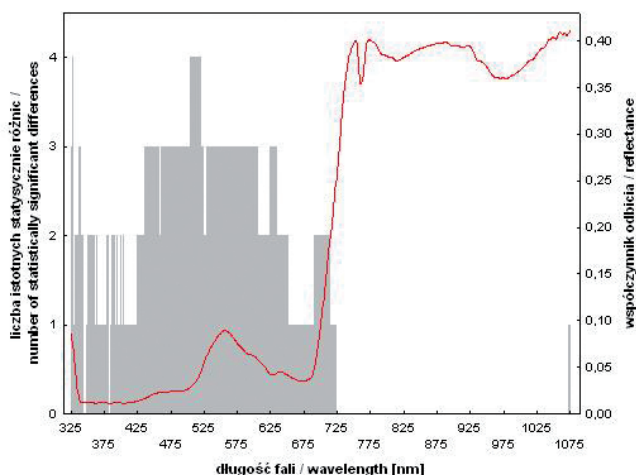
Ryc. 7. Spektrum kosodrzewiny (A – średnia ze wszystkich pomiarów, B – spektra ze wszystkich punktów) na tle spektr innych gatunków iglastych (limby – *Pinus cembra*, sosny zwyczajnej – *Pinus sylvestris*, sosny hakowatej – *Pinus uncinata*, świerka – *Picea abies* i jałowca halnego – *Juniperus communis* subsp. *alpina*), występujących w piętrze kosodrzewiny.

Fig. 7. Reflectance curve of dwarf pine (A – average of all measurements, B – reflectance curves of all dwarf pine measurements) against a background of reflectance curves of other coniferous species (*Pinus cembra*, *Pinus sylvestris*, *Pinus uncinata*, *Picea abies* and *Juniperus communis* subsp. *alpina*) occurring in the subalpine belt.

trum 325-700 nm wszystkie spektra kosodrzewiny mają współczynniki odbicia niższe niż pozostałe analizowane gatunki roślin iglastych (ryc. 7B).

Analiza istotności statystycznej różnic pomiędzy odpowiedzią spektralną od kosodrzewiny (średnia ze wszystkich pomiarów) i pozostałymi iglastymi gatunkami roślin rosnących w reglu górnym i piętrze subalpejskim wskazuje, że odróżnienie od nich kosodrzewiny jest możliwe jedynie w widzialnej części spektrum (ryc. 8). Potencjalnie najlepiej można oddzielić rozpatrywane gatunki w zakresie światła zielonego (504-519 nm), w którym spektrum kosodrzewiny istotnie różni się od spektr czterech pozostałych gatunków (ryc. 8).

Krzywe ze spektrometru FieldSpec Pro (ryc. 9) są zbliżone kształtem do krzywych ze spektrometru FieldSpec HH (ryc. 7), z tą różnicą, że na wykresie z pomia-



Ryc. 8. Liczba istotnych statystycznie różnic (szare słupki) pomiędzy średnią wartością współczynnika odbicia od kosodrzewiny a wartościami współczynnika odbicia pozostałych gatunków iglastych występujących w piętrze subalpejskim (poziom istotności $p < 0,05$). Krzywa średniego odbicia od kosodrzewiny (czerwona linia) ilustruje charakterystyczne cechy odbicia spektralnego od roślinności zielonej.

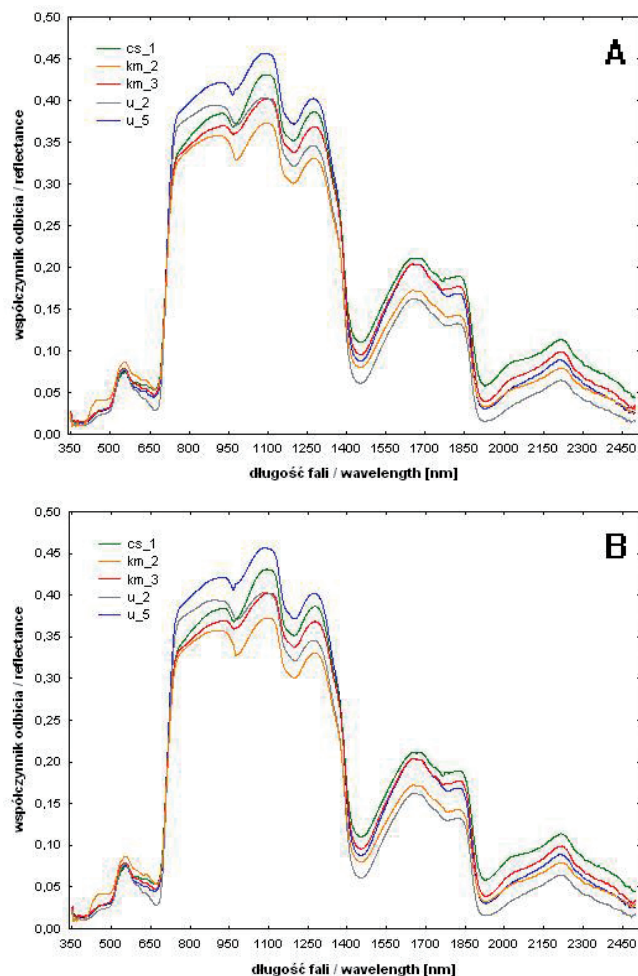
Fig. 8. Frequency plot of statistically significant differences (grey bars) between average reflectance curve of dwarf pine and other coniferous species occurring in the subalpine belt. Average reflectance curve of dwarf pine (red line) indicates typical vegetation reflectance features.

rów terenowych widoczny jest nagły spadek wartości współczynnika odbicia w zakresie 762 nm spowodowany pochłanianiem przez tlen w tym zakresie.

Współczynniki odbicia od zielonych igieł kosodrzewiny zarejestrowane w laboratorium charakteryzują wyższe wartości (ryc. 9A) niż w przypadku pomiarów całych gałązek (ryc. 9B) oraz pomiarów terenowych (ryc. 7). W zakresie 400-700 nm w rejonie maksymalnego odbicia obejmują wartości od 0,10 do 0,13, natomiast w bliskiej podczerwieni 0,56-0,63.

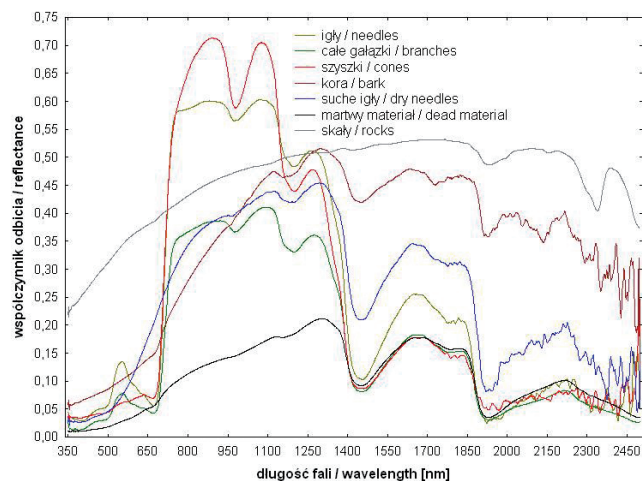
Obecność szyszek, kory oraz przebarwionych i suchych igieł na mierzonych gałązkach kosodrzewiny (ryc. 10) spowodowała obniżenie wartości współczynnika odbicia i w zakresie światła zielonego sięgają one 0,08, a najniższe 0,06 (ryc. 10). W bliskiej podczerwieni w obszarze (750-1400 nm), gdzie występuje największe odbicie (ryc. 10), wartości współczynnika odbicia zawierają się w przedziale 0,36-0,46. Współczynniki odbicia zmierzone w terenie mają wartości podobne do wyników pomiarów laboratoryjnych całych gałązek (ryc. 10).

Zróźnicowanie odbicia spektralnego w terenie jest zależne od wielu czynników między innymi obecności takich elementów jak, rośliny runa, ściółka, skały itp. Na rycinie 30 przedstawiono przykłady krzywych spektralnych reprezentujących zielone igły, całe gałązki kosodrzewiny, korę, szyszki (dojrzewające, roczne), przebarwione igły, ściółkę oraz skały występujące w podłożu. Dojrzewające szyszki o chropowatej powierzchni charakteryzują się bardzo wysokim odbiciem (ryc. 10) w zakresie bliskiej podczerwieni (maksymalnie powyżej 0,7). W zakresie zielonym nie ma charakterystycznego piku, co wpływa na obniżenie wartości współczynnika



Ryc. 9. Średnie z pomiarów spektralnych całych gałązek (A) i zielonych igieł (B) kosodrzewiny, wykonanych spektrometrem FieldSpec Pro.

Fig. 9. Average reflectance curve of dwarf pine branches (A) and green needles (B), measured with FieldSpec Pro spectrometer.



Ryc. 10. Średnie z pomiarów spektralnych spektrometrem FieldSpec Pro różnych obiektów wpływających na odbicie spektralne kosodrzewiny.

Fig. 10. Average reflectance curves of different materials (measured with FieldSpec Pro spectrometer) affecting reflectance of dwarf pine.

odbicia od kosodrzewiny w tym rejonie (ryc. 10). Na obniżenie wartości współczynnika odbicia kosodrzewiny w zakresie widzialnym ma wpływ także odpowiedź spektralna suchych igieł i ściółki (ryc. 10). Ze względu na zmniejszoną zawartość wody, suche igły, podobnie jak kora, podwyższają odbicie w bliskiej podczerwieni, w rejonie od 1300 nm (ryc. 10). W przypadku roślin o niewielkim LAI i małym zwarcie czynnikiem zwiększającym wartości współczynnika odbicia są skały.