

## Materiały i metody badań

Do realizacji celu głównego, jak i celów szczegółowych oraz potwierdzenia prawdziwości hipotezy badawczej niezbędne było pozyskanie materiałów teledetekcyjnych, przeprowadzenie badań terenowych oraz wykonanie prac kameralnych.

### Materiały źródłowe

W pracy posłużono się czterema arkuszami map topograficznych w skali 1:10 000 (1998) obejmującymi swym zasięgiem obszar badań (ryc. 1). Zostały one wykorzystane do przeprowadzenia geometryzacji zdjęć lotniczych oraz do wyznaczenia zasięgu kosodrzewiny. Ponadto wykorzystano mapy tematyczne: zakrytą mapę geologiczną w skali 1:10 000 (1958-80) oraz mapę gleb Tatrzańskiego Parku Narodowego w skali 1:10 000 (Ski-ba, 2002). Były one potrzebne do określenia wpływu utworów geologicznych oraz pokrywy glebowej na zróżnicowanie spektralne zarośli kosodrzewiny.

Do analizy spektralnych cech kosodrzewiny oraz do wyznaczenia jej rozmieszczenia na obszarze Doliny Gąsienicowej wykorzystano cyfrowe hiperspektralne zdjęcia lotnicze zarejestrowane 4 sierpnia 2002 roku około godziny 10:30 czasu lokalnego przez skaner hiperspektralny ROSIS (Reflective Optics System Imaging Spectrometer) umieszczony na pokładzie samolotu Dornier Do-228. Samolot, lecąc wysokości około 2000 m nad poziomem terenu, zarejestrował obrazy hiperspektralne ROSIS w równoległych pasach. Do analizy wykorzystano fragmenty trzech pasów przebiegających przez obszar badań.

W czasie nalotu wysokość słońca nad horyzontem wynosiła 38°, a azymut słońca 145° i pokrywał się on z kierunkiem lotu samolotu, dzięki temu uniknięto efektu słabszego doświetlenia na brzegach obrazów. W czasie rejestracji zdjęć panowały dobre warunki atmosferyczne charakteryzujące się niewielkim zachmurzeniem (1-2 w ośmiostopniowej skali), brakiem opadów, wysokim poziomem usłonecznienia i niską wilgotnością powietrza.

Skaner ROSIS (charakterystyka skanera została przedstawiona w tabeli 2) dostarczył zdjęć z rozdzielczością przestrzenną 2 m w 101 kanałach spektralnych, w zakresie od 430 do 830 nm, co odpowiada długościom fal elektromagnetycznych przypadających na światło widzialne i bliską podczerwień.

Tabela 2. Charakterystyka skanera ROSIS (Gege i in., 1998; Müller i in., 2002).

*Table 2. Characteristics of the ROSIS scanner (Gege i in., 1998; Müller i in., 2002).*

| ROISIS   |                          |
|--|--------------------------|
| Typ skanera<br>Scanner type  | wymiatający<br>pushbroom |
| Rozdzielczość radiometryczna<br>Radiometric quantization   | 14 bit                   |
| Pole widzenia<br>Field of view   | 8°                       |
| Chwilowe pole widzenia<br>Instantaneous field of view  | 0,56 mrad                |
| Wielkość piksela przy wysokości lotu 3 km nad powierzchnią terenu<br>Pixel size at 3km flight altitude | 1,8 x 1,8 m <sup>2</sup> |
| Możliwość wychylenia skanera wzdłuż kierunku lotu<br>Tilt capability along flight direction            | ±20°                     |
| Zakres spektralny<br>Spectral range  | 430-830 nm               |
| Liczba kanałów spektralnych<br>Number of spectral channels   | 115                      |
| Rozpiętość kanału<br>Spectral sampling interval  | 4 nm                     |
| Liczba elementów obrazujących<br>Number of imaging elements  | 512                      |

W pracy wykorzystano także numeryczny model terenu (NMT) Doliny Gąsienicowej wykonany w Katedrze Geoinformatyki i Teledetekcji WGiSR UW o rozdzielczości przestrzennej 2 m. Model został wykonany na podstawie map topograficznych w skali 1:10 000 o cięciu poziomicowym 2,5 m, dodatkowo uwzględniono informa-

cje o wysokości szczytów. Dokładność współrzędnych  $x$  i  $y$  NMT określono na 3 m, natomiast dokładność współrzędnej  $z$  nie oszacowano, jednak należy się spodziewać, że jest ona mniejsza niż w przypadku współrzędnych  $x$  i  $y$ . NMT został zastosowany do stworzenia map ekspozycji i nachylenia stoków, modelu potencjalnego promieniowania słonecznego (bezpośredniego i rozproszonego, które po zsumowaniu dały promieniowanie całkowite) i modelu średniej rocznej temperatury powietrza.

### Badania terenowe i laboratoryjne

Realizacja niniejszej pracy wymagała wykonania szeregu badań terenowych, które prowadzono latem 2002, 2004 i 2005 roku w rejonie Hali Gąsienicowej. Zasadnicza część pomiarów przypadła na sezon letni 2004 roku.

W lipcu i sierpniu 2002 roku w ramach projektu HySens została przeprowadzona seria badań terenowych bezpośrednio związanych z rejestracją zdjęć hiperspektralnych (Jakomulska i in., 2003). Dla potrzeb prezentowanej pracy niezbędne były wyniki pomiarów spektrometrycznych wykonanych przy pomocy spektrometru GER 3700 (Geophysical and Environmental Research Corp., Millbrook, NY), mierzącego wielkość odbitego od powierzchni terenu promieniowania elektromagnetycznego w zakresie 350-2500 nm, w 704 kanałach spektralnych. Spośród zarejestrowanych charakterystyk spektralnych różnych elementów pokrycia terenu, do przeprowadzenia korekcji radiometrycznej zdjęć ze skanera ROSIS wykorzystano spektra odpowiadające kosodrzewinie, wodzie i skałom.

Badania terenowe realizowane w sezonie 2004 i 2005 poprzedził dobór punktów testowych. Rozmieszczenie punktów na tle obszaru badań przedstawiono na rycinie 1.

Podczas wybierania miejsc predysponowanych do przeprowadzenia pomiarów kierowano się zróźnicowaniem ze względu na ekspozycję, nachylenie stoku, wysokość nad poziomem morza, wielkość płatu kosodrzewiny, warunki geologiczne i glebowe, obecne i historyczne uwarunkowania antropogeniczne oraz dostępność terenu. W okresie od czerwca do sierpnia 2004 roku, kiedy roślinność górską była w pełni rozwoju, zostały przeprowadzone po dwie serie pomiarowe w każdym z 21 punktów wytypowanych do badań. W tej liczbie są dwie lokalizacje podwójne – z powodu znacznego zróźnicowania cech morfologicznych kosodrzewiny w sąsiadujących ze sobą płatach. Podczas wykonywania większości pomiarów panowały dobre warunki pogodowe, (niebo bezchmurne bądź nieznacznie zachmurzone (1-2), wysoki poziom usłonecznienia, względnie niska wilgotność powietrza i brak opadów).

W terenie badano następujące cechy kosodrzewiny: charakterystyki spektralne, wskaźniki teledetekcyjne, cechy biometryczne oraz jej bezpośredniego otoczenia – stan runa i podłoża.

### Charakterystyki spektralne

Wartości odbicia spektralnego (współczynnik odbicia). Pomiarów spektralne w terenie wykonano latem 2004 przy pomocy spektrometru ASD FieldSpec HandHeld (FieldSpec HH) (w zakresie 325-1075 nm) (Analytical Spectral Devices, Inc., Boulder Colorado, USA), który rejestruje promieniowanie elektromagnetyczne w zakresie światła widzialnego i bliskiej podczerwieni (325-1075 nm) w 751 kanałach spektralnych. Pole widzenia spektrometru wynosi 25°. Każdy pomiar poprzedzała kalibracja spektrometru wykonywana z wykorzystaniem spektralonu.

Spektrometr umieszczano około 0,5 m nad rośliną, tak aby w jego polu widzenia znalazła się jak najbardziej jednorodna powierzchnia. Charakterystyki spektralne mierzono w dwóch seriach, wykonując dla każdej z lokalizacji od 10 do 30 pomiarów w regularnych odstępach. Jednostkowy pomiar stanowi średnią z 10 odczytów. Z dalszej analizy wykluczano pomiary, które znacząco odbiegały od średniej.

W 2005 roku przeprowadzono dodatkowe pomiary spektrometryczne. W terenie zebrano w pięciu lokalizacjach próbki żywych pędów kosodrzewiny, tak aby obecne były na nich igły zielone, przebarwione oraz szyszki (w żadnej z lokalizacji nie zanotowano obecności dojrzałych, zdrewniałych szyszek). Ponadto zgromadzono próbki skał występujących na obszarze badań oraz organicznego podłoża w postaci opadłych igieł – świeżych i częściowo rozłożonych.

Materiały do badań zostały przewiezione do laboratorium, gdzie z wykorzystaniem spektrometru ASD FieldSpec Pro II (350-2500 nm, 2149 kanałów) (Analytical Spectra Devices, Inc., Boulder, Colorado, USA), w warunkach sztucznego oświetlenia wykorzystując specjalistyczne lampy halogenowe (Pro Lamp) (Analytical Spectral Devices, Inc., Boulder, Colorado, USA), zmierzono charakterystyki spektralne: całych gałązek kosodrzewiny, igieł zielonych, suchych i przebarwionych, kory, szyszek, podłoża organicznego i skał. Pomiary laboratoryjne zapewniają większą stabilność pomiarów niż badania *in situ* (Foley i in., 2006). Jednakże ich wadą jest fakt, że próbki żywych roślin przed pomiarem zostają wystawione na duży stres. Stres, jakiego doświadczają rośliny wyraża się zmianami ilości barwników asymilacyjnych i wody w komórkach (Sobhan, 2007). Zmiany fizjologii liści mają swoje odzwierciedlenie w charakterystyce spektralnej (Carter, Knapp, 2001), zatem wyniki pomiarów laboratoryjnych mogą nie w pełni odpowiadać wynikom pomiarów w terenie.

Wśród metod pozwalających na zachowanie próbek żywych roślin w stanie nienaruszonym, opisywanych przez różnych badaczy, znajdują się: umieszczenie ściętych pędów czy liści w plastikowych torebkach ze zwilżonym ręcznikiem papierowym, bądź niewielką ilością wody, umieszczenie ogonków liści lub pędów w wodzie w celu uniknięcia odwodnienia (Foley i in., 2006) oraz sztuczne schładzanie próbek i umieszczanie ich w ciemnym chłodnym pomieszczeniu w celu ograni-

Tabela 3. Upływ czasu między zebraniem próbki a pomiarem w laboratorium (na podstawie Sobhan, 2007, zmodyfikowane):

Table 3. Time gap between sample collection and spectral measurement in laboratory (based on Sobhan, 2007, modified):

| Czas pomiędzy zebraniem próbki a wykonaniem pomiaru<br>Time gap between sample collection and spectral measurement | Odwołanie do literatury<br>References   |
|--|---|
| 15 min.  | Asner, 1998   |
| 1 godzina<br>1 hour  | Cochrane, 2000  |
| 2 godziny<br>2 hours   | Schmidt, Skidmore, 2001; Cho, Skidmore, 2006  |
| 4 godziny<br>4 hours   | Vaiphasa i in., 2005; Skidmore, Knowles, 1996   |
| 6 godzin<br>6 hours  | Horler, 1983  |
| 10 godzin<br>10 hours  | Ramsey III, Jansen, 1996  |
| 12 godzin<br>12 hours  | Clark i in., 2005   |
| 24 godziny<br>24 hours   | Hunt, Rock, 1989  |
| 30 min. do 48 godzin<br>30 min. To 48 hours  | Sobhan, 2007  |
| ten sam dzień<br>the same day  | Zarco-Tejada i in., 2005  |
| natychmiast po zebraniu próbek<br>immediate after harvest but no time specification                                | Peñuelas i in., 1994; Blackburn, 1998b  |
| nie podano<br>not mentioned  | Gao, 1996; Blackburn, 1998a; Carter, Knapp, 2001; Gitelson i in., 2002; Gong i in., 2002; Sims, Gamon, 2002 |

czenia transpiracji (Sims, Gamon, 2002). W literaturze znaleźć można także informacje na temat czasu, jaki może upłynąć od momentu pobrania próbek do pomiaru w laboratorium, by nie zaszły zmiany w strukturach badanych liści (tabela 3).

W przypadku badań wykonanych na potrzeby niniejszej pracy, czas, jaki upłynął między pobraniem próbek a wykonaniem pomiarów spektralnych, wyniósł 24 godziny. Próbki umieszczono w pojemnikach, końcówki pędów zostały zanurzone w niewielkiej ilości wody. Pojemniki przechowywano w ciemnym, chłodnym pomieszczeniu.

Spektra igieł (zielonych, suchych i przebarwionych) zmierzono wykorzystując sferę, dzięki czemu światło odbite od próbek jest zbierane w całej hemisferze. Sfera dzięki swoim właściwościom (odbicie lambertowskie) jest nieczuła na odbicie kierunkowe i zapewnia powtarzalność wyników. Pozostałe próbki zmierzono za pomocą sondy umożliwiającej precyzyjne skierowanie sensora na badany obiekt.

### Wskaźniki teledetekcyjne

Powierzchnia projekcyjna igieł – LAI. Pomiary LAI wykonano przy pomocy aparatu Licor LAI-2000 Plant Canopy Analyzer (LAI-2000 Plant Canopy Analyzer. *Instruction Manual*, 1992, LiCor Inc., Lincoln, Nebraska,

USA), który szacuje efektywne wartości LAI (Chen, 1996) wykorzystując promieniowanie rozproszone docierające do górnej części rośliny oraz przenikające przez roślinę – mierzone pod rośliną.

Instrument jest wyposażony w sensor optyczny, który składa się z pięciu detektorów ułożonych w koncentrycznych pierścieniach (o określonym polu widzenia: 7°, 23°, 38°, 53° i 68°), mierzących promieniowanie w zakresie światła niebieskiego (320-490 nm), które zapewnia minimalne rozpraszanie przez liście.

Pomiary przeprowadzano w warunkach promieniowania rozproszonego. W obrębie każdego punktu w dwóch seriach wykonywano pięciokrotnie po jednym pomiarze ponad powierzchnią kosodrzewiny i po pięć pomiarów pod krzewem w regularnych odstępach (przy czym każdy jednostkowy pomiar jest średnią z pięciu pomiarów). Do dalszej analizy wykorzystano średnią z pomiarów wykonanych w dwóch seriach.

Na uzyskane wyniki pomiarów LAI wpłynęło kilka czynników. Należą do nich: stan nieba, ukształtowanie terenu, efekt granicy, agregacja igieł, rozmieszczenie igieł w roślinie, zdrewniałe części roślin, nakładanie się pędów i faza fenologiczna, w jakiej aktualnie znajdowały się obiekty badań (Chen, Cihlar, 1995).

W niniejszych badaniach nie określano udziału materiału zdrewniałego w wartości zmierzonego LAI, ponieważ wpływ pni i gałęzi na wynik pomiaru jest trudny do oszacowania. Przyjęto w związku z tym założenie, że niedoszacowanie LAI z powodu agregacji igieł zostało

zrekompensowane przeszacowaniem jego wartości wywołanym obecnością części zdrewniałych (Schlerf i in., 2005). Ze względu na to, że nie korygowano pomiarów względem agregacji igieł w pęczkach i rozmieszczenia gałęzi i pozostałych elementów w ramach całego krzewu, otrzymany wynik reprezentuje LAI efektywne, a nie rzeczywiste.

Akumulowane promieniowanie w zakresie fotosyntezy (400-700 nm) – APAR. Pomiar APAR wykonano przy pomocy aparatu AccuPar PAR-80 (*AccuPAR Model PAR-80. Operator's Manual. Ver.3.1*, 1999, Decagon Devices, Pullman, Washington, USA), wyposażonego w detektor o długości 80 cm, w którym co 1 cm umieszczonych jest 80 fotodiod.

Wartość APAR otrzymuje się po zsumowaniu 4 składowych wyników: (*ang. photosynthetically active radiation*) – ilości promieniowania docierającego do powierzchni rośliny,  $PAR_c$  – ilości promieniowania odbitego przez roślinę,  $PAR_t$  – ilości promieniowania, które przeniknęło przez roślinę i  $PAR_s$  – ilości promieniowania, które zostało obite od podłoża. W każdym z punktów testowych wykonano w dwóch seriach po 10 pomiarów w regularnych odstępach. Do dalszej analizy wykorzystano średnią otrzymanych wartości APAR i  $PAR_0$  otrzymanych dla każdej z lokalizacji, które posłużyły do obliczenia frakcji względnej energii akumulowanej –  $f_{APAR}$ , rozpatrywanej w niniejszych badaniach.

### Cechy biometryczne

Określono je jako parametry pomocnicze, które mają wpływ na odpowiedź spektralną kosodrzewiny.

Wysokość kosodrzewiny mierzono z dokładnością do 0,1 m. W każdym z punktów wykonano w dwóch seriach po 5 odczytów i obliczono średnią.

Zwarcie kosodrzewiny, rozumiane jako rodzaj i stopień wypełnienia przestrzeni przez jej pędy (Mała Encyklopedia Leśna, 1991), szacowano według wytycznych zawartych w Instrukcji Urządzania Lasu (2003).

Udział igieł z widocznymi uszkodzeniami (głównie przebarwienia spowodowane chorobami, patogenami lub czynnikami abiotycznymi) na jednym  $m^2$  powierzchni zarosli kosodrzewiny oceniano szacunkowo.

Średnią długość igieł mierzono z dokładnością do 0,1 cm każdorazowo na dziesięciu różnych pędach. Długość igieł decyduje o wielkości biomasy, a co za tym idzie także LAI.

Liczba roczników igieł na pojedynczych pędach może stanowić wyznacznik stanu rośliny, świadczy o produkcji biomasy i wpływa na wielkość LAI.

Liczba przyrostów stanowi orientacyjny wyznacznik wieku danego pędu rośliny.

Obecność i ilość suchych pędów na jednym  $m^2$  może świadczyć o stanie kosodrzewiny.

Faza fenologiczna została określona na podstawie następujących cech: obecność tegorocznych igieł, obecność kwiatów żeńskich, obecność kwiatów męskich, kwiaty przekwitnięte, pylenie (silne, niewielkie).

### Stan runa i podłoża

Opisywano obecność i powierzchnię (% powierzchni pod rozpatrywanym krzewem) pokrytą przez opadłe igły, skały i glebę oraz mchy, porosty i rośliny naczyniowe.