

Wskaźniki stanu roślinności

Powierzchnia projekcyjna liści (igieł) – LAI

Powierzchnię projekcyjną liści (igieł) (*ang. leaf area index – LAI*) definiuje się jako połowę całkowitej powierzchni liści lub igieł (powierzchnia rzutowana na płaszczyznę) na jednostkę powierzchni (gleby, podłoża) (Scurlock i in., 2001; Myneni i in., 2002; Asner i in., 2003). LAI jest wielkością bezwymiarową opisaną wzorem (Scurlock i in., 2001):

$$LAI = \frac{s}{G} \text{ [m}^2\text{m}^{-2}\text{]},$$

gdzie:

s – funkcjonalna powierzchnia liści

G – jednostka powierzchni terenu

LAI należy do grupy podstawowych miar opisujących strukturę roślinności oraz do kluczowych zmiennych w większości modeli produktywności ekosystemów, modelowaniu cykli klimatycznych, hydrologicznych, biogeochemicznych i ekologicznych (Chen i in., 1999). Wywiera także wpływ na przebieg i efektywność procesów takich jak ewapotranspiracja, transpiracja, fotosynteza oraz warunkuje produkcję pierwotną, wielkość plonów i równowagę energetyczną (Kumar i in., 2001, Darvishzadeh i in., 2006). LAI determinuje wymianę energii, pary wodnej, dwutlenku węgla pomiędzy różnorodnymi ekosystemami na powierzchni Ziemi a atmosferą (Bonan, 1993). Charakteryzuje przemiany roślinności w skali globalnej, jak i lokalnej, ponieważ reaguje szybko na zmieniający się klimat i na obecność czynników wywołujących stres u roślin (Stenberg i in., 2004).

Ze względu na rolę, jaką LAI odgrywa w środowisku przyrodniczym, istnieje potrzeba prowadzenia badań zmierzających do określenia przestrzennego rozkładu tego wskaźnika. Bezpośrednie pomiary LAI (zbieranie liści, które opadły czy wycinanie roślinności, szczególnie drzew i krzewów), mimo że najdokładniejsze, są nie tylko czasochłonne i kosztowne (Gower i in., 1999; Jonckheere i in., 2004), ale nierzadko także niemożliwe do wykonania ze względu na charakter i rozmiar ana-

lizowanego obszaru (np. trudnodostępne tereny góryste), w jakim są realizowane, jak i samego przedmiotu badań. Ponadto nie mają praktycznego zastosowania w długoterminowych projektach, w których mierzy się przestrzenne i czasowe zróżnicowanie wartości LAI.

Pośrednie metody szacowania LAI *in situ* wykorzystują urządzenia, np. Li-Cor LAI-2000 Plant Canopy Analyzer, TRAC. Mierzą one ilość promieniowania bezpośredniego lub/i rozproszonego, które dotarło do rośliny, przeniknęło przez roślinę i osiągnęło podłoże. Wśród optycznych metod pomiaru LAI znajdują się także fotografia hemisferyczna, coraz częściej stosowana do oceny LAI w lasach (Jonckheere i in., 2004).

Wiele uwagi poświęcono także szacowaniu LAI na podstawie zdjęć lotniczych i satelitarnych. Badania prowadzono w różnorodnych typach roślinności, od naturalnych zbiorowisk trawiastych, przez zboża (Haboudane i in., 2004) i inne rośliny uprawne (Colombo i in., 2003) po rosnące w różnych warunkach lasy gospodarcze (Schlerf i in., 2005) i naturalne (Running i in., 1986) rosnące w różnych warunkach. Najwyższe wartości LAI odnotowano dla gatunków iglastych (Asner i in., 2003), przy czym w lasach gospodarczych LAI przyjmuje niższe wartości (Schlerf i in., 2005). W większości analiz wykorzystywano zależności empiryczne pomiędzy odpowiedzią spektralną od roślin wyrażoną w postaci wskaźnika roślinnego (*ang. vegetation index – VI*) a LAI. Początkowo skupiano się na wskaźnikach liczonych na podstawie danych wielospektralnych (Sternberg i in., 2004), ale w ostatnich latach pojawiło się wiele opracowań, w których nacisk położono na zastosowanie danych hiperspektralnych do komponowania wskaźników (Chen i in., 1999) i ocenę, które ze wskaźników – szeroko- czy wąskopasmowe – dają lepsze efekty w badaniach LAI (Schlerf i in., 2005). Z punktu widzenia prezentowanej pracy zasadne wydaje się podkreślenie możliwości zastosowania modeli empirycznych opartych na wskaźnikach roślinnych utworzonych na podstawie materiałów hiperspektralnych w badaniach LAI gatunków iglastych (tabela 1), do których zalicza się kosodrzewina.

Produktywność – f_{APAR}

Wskaźnik f_{APAR} (*ang. fraction of absorbed photosynthetically active radiation*), czyli frakcja względna energii akumulowanej w procesie fotosyntezy (APAR), nazywana także współczynnikiem produktywności, określa, jaką część PAR (*ang. photosynthetically active radiation*), czyli promieniowania w zakresie 400-700 nm, która dotarła do rośliny, została przez nią pobrana i wykorzystana do przeprowadzenia procesu fotosyntezy. f_{APAR} pozwala ocenić sprawność aparatu asymilacyjnego, a co za tym idzie stan całej rośliny (Daughtry i in., 1992). f_{APAR} , podobnie jak LAI, uznawana jest za jedną z kluczowych zmiennych w modelowaniu klimatu, obiegu dwutlenku węgla, w modelach hydrologicznych, biogeochemicznych i ekologicznych oraz w prognozowaniu plonów (Gower i in., 1999; Kumar i in., 2001). Ma charakter względny i dzięki temu jest wykorzystywana do porównań stanu różnych typów roślinności, okresowych zmian kondycji roślin, śledzenia długości okresu wegetacyjnego, przebiegu faz fenologicznych oraz analiz zjawisk takich jak susze czy degradacja ziemi (Gobron i in., 2006).

Informacje o rozkładzie f_{APAR} uzyskuje się na podstawie danych satelitarnych, głównie MERIS, MODIS i SeaWiFS. Wskaźnik jest wyliczany na podstawie wartości współczynnika odbicia w paśmie czerwonym i podczerwonym, specjalnie w tym celu skonstruowanego wskaźnika roślinnego (Gobron i in., 2006), jak rów-

nież generowany przy użyciu LAI, dzięki wzajemnym zależnościom, jakie łączą oba parametry (Smith i in., 2008). Można go także uzyskać jako dodatkowy produkt, podobnie jak LAI, przy przeprowadzaniu korekcji atmosferycznej (Richter, 2005).

Wskaźnik f_{APAR} szacuje się także poprzez porównanie ze wskaźnikami roślinnymi budowanymi w oparciu o kanały zarejestrowane w zakresie światła widzialnego oraz bliskiej podczerwieni (np. NDVI) (Kumar i in., 2001).

Wskaźnik f_{APAR} można wyrazić wzorem (Gower i in., 1999):

$$f_{APAR} = APAR/PAR_0,$$

gdzie APAR (*ang. absorbed photosynthetically active radiation*) oznacza promieniowanie aktywne fotosyntetycznie PAR, czyli promieniowanie w zakresie 400-700 nm, pochłaniane przez zielone części roślin i wykorzystywane do produkcji biomasy. Wielkość APAR otrzymuje się poprzez pomiary terenowe wykonane przy pomocy instrumentów optycznych (np. AccuPAR, Li-Cor LAI-2000 Plant Canopy Analyzer). Na bezpośredni pomiar APAR w terenie składają się wartości czterech elementów: promieniowanie w zakresie aktywnym fotosyntetycznie, bezpośrednio docierające do roślin (PAR_0), promieniowanie odbite przez rośliny (PAR_c), promieniowanie przechodzące przez warstwę roślin (PAR_t) i promieniowanie odbite od podłoża (PAR_s) (Epiphanyo, Huete, 1995):

Tabela 1. Przykłady prac opisujących empiryczne zależności pomiędzy wskaźnikami roślinnymi utworzonymi z danych hyperspektralnych a LAI:

Table 1. Selection of literature results on the estimation of forest LAI using hyperspectral data:

| Sensor | Zastosowany wskaźnik Index used | Badany gatunek Investigated species | Zakres wartości LAI LAI values range | Liczba próbek Number of samples | Siła związku Relation | Odniesienie do literatury References |
|--------------|--|---|--------------------------------------|---------------------------------|---|--------------------------------------|
| CASI | NDVI | <i>Pinus ponderosa</i> , <i>Pinus contorta</i> , <i>Abies douglaisi</i> | 1-12 | 30 | $r^2=0,80$ RMSE<1,0 | Gong i in., 1995 |
| CASI | SR | <i>Picea mariana</i> , <i>Pinus banksiana</i> | 1,29-4,97 | 13 11 | $r^2=0,55$ $r^2=0,43$ | Chen i in., 1999 |
| Hyperion | SR, NDVI, PVI, RDVI, SAVI, NLI, MNLI, MSR, WDVI, NDVI*SR, SAVI*SR, TSAVI | <i>Pinus ponderosa</i> , <i>Pinus contorta</i> , <i>Abies douglaisi</i> | brak danych/not mentioned | 32 | $r^2=0,55$ (SR, NDVI), $r^2=0,75$ (MNLI) | Gong i in., 2003 |
| HyMap | SR, PVI, REIP | <i>Picea abies</i> | 1,66-5,47 | 40 | $r^2=0,70$ | Schlerf i in., 2005 |
| ROSIS | NDVI, PVI | <i>Pinus montana ssp.arborea</i> , <i>Pinus cembra</i> | 1,78-3,99 | 9 (4) | $r^2=0,36$ | Beusch i in., 2005 |
| FieldSpec HH | SR, NDVI | <i>Picea abies</i> , <i>Pinus sylvestris</i> | 1,8-3,9 | brak danych/not mentioned | $r^2=0,76$ | Eriksson i in., 2006 |

Użyte w tabeli skróty/Abbreviations used: SR – simple ratio, NDVI – normalize difference vegetation index, PVI – perpendicular vegetation index, SAVI - soil adjusted vegetation index, NLI – non-linear vegetation index, RDVI – re-normalized difference vegetation index, MSR – modified simple ratio, WDVI – weighted difference vegetation index, MNLI – modified non-linear vegetation index, TSAVI – transformed soil adjusted vegetation index, REIP – red edge inflection point, HyMap – Hyperspectral Mapper, CASI – Compact Airborne Spectrographic Imager

$$APAR = (PAR_0 \downarrow + PAR_s \uparrow) - (PAR_t \downarrow + PAR_c \uparrow).$$

Badania dotyczące f_{APAR} koncentrują się na pozyskaniu informacji o globalnym rozkładzie wartości tego wskaźnika (Myneni i in., 2002). Do nielicznych należą analizy w skali lokalnej. J.A. Gamon i inni (1995) badali zależność pomiędzy wskaźnikami roślinnymi a f_{APAR} dla różnych typów roślinności w Kalifornii. B. Zagajewski i inni (2005a, b, c; 2006a) wykorzystywali pomiary terenowe f_{APAR} do oceny stanu zbiorowisk roślinnych piętra alpejskiego w Tatrach.

Spektralne wskaźniki roślinne

Wskaźnik roślinny jest kombinacją dwóch lub więcej wybranych wartości współczynnika odbicia zmierzonego w terenie, laboratorium lub zarejestrowanego z pokładu samolotu lub satelity. Wykorzystuje się go w celu podkreślenia swoistych cech roślin oraz wyodrębnienia roślinności spośród innych materiałów. Wskaźniki roślinne były i są tworzone w oparciu o spektralne właściwości roślin. Korzystają one przede wszystkim ze znacznej różnicy w wielkości odbicia promieniowania elektromagnetycznego w zakresie czerwonym i podczerwonym. Kontrast ten wynika z silnego pochłaniania przez chlorofil światła czerwonego i wysokiego odbicia w zakresie bliskiej podczerwieni spowodowanego wielokrotnym odbijaniem promieniowania podczerwonego w przestrzeniach międzykomórkowych liści. Zaletą wskaźników roślinnych jest ich prostota i powiązanie z cechami biochemicznymi (zawartość barwników asymilacyjnych) i biofizycznymi (LAI, f_{APAR}) roślin (Elvidge, Chen, 1995). Do korzyści płynących ze stosowania teledetekcyjnych wskaźników spektralnych należy zdolność do niwelowania wpływu na odpowiedź spektralną roślinności zróżnicowania wynikającego z budowy rośliny, czynników atmosferycznych i podłoża oraz kąta padania promieni słonecznych, co ma szczególne znaczenie podczas szacowania LAI czy biomasy (Gao i in., 2000). Wskaźniki roślinne są uznawane za nieodzowne narzędzia między innymi w klasyfikacjach porycia terenu, śledzeniu zmian klimatu i pokrycia terenu czy monitorowaniu przebiegu suszy (Glenn i in., 2008).

Wiele wskaźników roślinnych zostało opisanych w literaturze naukowej począwszy od lat siedemdziesiątych XX wieku (Broge, Leblanc, 2000), jednak zaledwie niewielka ich część była i jest regularnie wykorzystywana, i znalazła szerokie zastosowanie w badaniach roślinności.

Szerokopasmowe wskaźniki roślinne dzielne są na dwie grupy. Pierwszą z nich stanowią wskaźniki oparte na stosunku wybranych kanałów (*ang. ratio based indices*) takie jak VI (*ang. ratio vegetation index*) (Pearson, Miller, 1972) i NDVI (*ang. normalized difference vegetation index*) (Rouse i in., 1974). Do drugiej zaliczane są wskaźniki wykorzystujące istnienie tzw. linii gleby, takie jak PVI (*ang. perpendicular vegetation index*) (Richardson, Wiegand, 1977) czy TSAVI (*ang. transformed soil adjusted vegetation index*) (Baret i in., 1989).

Wskaźniki roślinne opracowywano do tej pory korzy-

stając z danych wielospektralnych, a co za tym idzie, obliczanie ich wartości odbywało się na podstawie kanałów obejmujących szeroki zakres spektralny. Niemniej jednak szerokopasmowe spektralne wskaźniki roślinne okazały się być dobrze skorelowane z LAI i f_{APAR} , co wykorzystywano w licznych studiach nad strukturą roślinności. J.M. Chen i J. Cihlar (1996) badali możliwość określenia LAI w lasach iglastych Ameryki Północnej na podstawie wskaźników roślinnych obliczonych z wykorzystaniem zdjęć z satelity Landsat. Dane z satelity Landsat posłużyły także to znalezienia zależności pomiędzy wskaźnikami roślinnymi a LAI m.in. dla amerykańskich sosn *Pinus banksiana* i *Pinus resinosa* (Fassnacht i in., 1997). D.P. Turner i inni (1999) wykazali pozytywną zależność między NDVI, VI i SAVI wyliczonymi ze zdjęć z satelity Landsat a LAI w monokulturach iglastych w Ameryce Północnej. P. Stenberg i inni (2004) określili siłę związku pomiędzy LAI a trzema wybranymi wskaźnikami (NDVI, VI) w lasach sosnowych i świerkowych w Finlandii.

Wraz z pojawieniem się sensorów hiperspektralnych zaczęto konstruować wskaźniki korzystając z wąskich zakresów spektralnych i porównywano je z wynikami, jakie dają wskaźniki tworzone na podstawie danych wielospektralnych. Większość badań skupiających się na stosowaniu hiperspektralnych wariantów wskaźników do charakteryzowania roślinności dotyczy roślin uprawnych (Thenkabail i in., 2000; Haboudane i in., 2004; Zarco-Tejada i in., 2004). Także obszary leśne doczekały się opracowań, w których kładzie się nacisk na wykorzystanie hiperspektralnych wskaźników roślinnych (Gong i in., 2003; Schlerf i in., 2005). Przeważnie jednak przedmiotem badań są lasy gospodarcze, co podobnie jak w przypadku roślin uprawnych, wiąże się z faktem, że na znacznych powierzchniach występują rośliny jednego gatunku i w jednym wieku.

Hiperspektralne wskaźniki roślinne dają także nadzieję na rozwiązanie problemu saturacji przy szacowaniu biomasy i LAI. Wspomniane ograniczenia dotyczą szczególnie NDVI opartego na czerwonej i podczerwonej części spektrum elektromagnetycznego. Wartość NDVI wyliczanego z wykorzystaniem materiałów wielospektralnych dąży asymptotycznie do poziomu wysycenia osiąganego przy określonej wielkości LAI czy biomasy (Gao i in., 2000). Szerokopasmowe NDVI i jemu podobne wskaźniki nie sprawdzają się dobrze na obszarach o gęstej pokrywie roślinnej, jak również nie są zbyt dokładne w ocenie biomasy w pełni sezonu wegetacyjnego (Thenkabail i in., 2000). W obliczu tych ograniczeń istnieje potrzeba opracowania nowych bądź ulepszenia istniejących metod pozwalających na dokładne szacowanie biofizycznych cech roślinności na obszarach, gdzie człowiek nie ingeruje w przebieg naturalnych procesów lub jego wpływ jest ograniczony do minimum. Teledetekcyjne metody hiperspektralne umożliwiają tworzenie wskaźników roślinnych z użyciem wąskich kanałów spektralnych obejmujących całe spektrum elektromagnetyczne (350-2500 nm) zamiast, jak dotychczas, koncentrować się jedynie na zakresie czerwonym i bliskiej podczerwieni.