

Leszek Bolibok<sup>1</sup>

## Zastosowanie zdjęć hemisferycznych do opisu struktury warstwy koron i modelowania warunków świetlnych pod okapem drzewostanów

### The use of hemispherical photographs for canopy description and light condition modeling in tree stands

**Abstract.** The use of hemispherical photographs allows rapid assessment of canopy openness, which is the complement of canopy closure. Both mentioned parameters describe the canopy as seen from a single point. The hemispherical photography could also be used to assess canopy cover (attribute which refers to ground area) but in practical application it is rather slower than other methods. Leaf area index (LAI) is also a canopy feature often measured by this method. The modeling of light conditions under the canopy is another main application of hemispherical photography. The modeled levels of incident and diffuse radiation are usually comparable with direct measurement in most forest conditions but under the very dense canopy the discrepancy could be bigger. Photographs taken in forest are analyzed by researchers with specialized software. Special care should be taken in using proper initial software settings describing light conditions above the canopy. Another important source of subjectivity in the analysis could be the thresholding process when all pixels of the image are classified as canopy or open sky. In older applications it was researcher's task to choose appropriate brightness level, which distinguishes canopy and sky in the picture. Fortunately in the last decade a few automated methods of thresholding were invented and successfully implemented.

**Key words:** canopy openness, canopy cover, LAI, image segmentation, thresholding

## 1. Wstęp

Wykorzystanie zdjęć hemisferycznych do charakteryzowania struktury sklepienia drzewostanu oraz do modelowania warunków świetlnych pod okapem ma już długą historię (Anderson 1964) i wraz z upowszechnianiem się fotografii cyfrowej zyskuje na znaczeniu. Niewątpliwie na dużą popularność tej techniki badawczej wpływa fakt, że dzięki analizie jednego zdjęcia można uzyskać dość szeroki zakres wskaźników opisujących strukturę sklepienia drzewostanu oraz wiarygodną charakterystykę zmienności warunków świetlnych w badanym fragmencie drzewostanu, w tym ich zmienności w ciągu całego roku. Główne kierunki wykorzystania fotografii hemisferycznej w badaniach leśnych to określanie wskaźnika powierzchni liści (LAI) oraz charak-

teryzowanie względnego poziomu dostępności światła pod okapem drzewostanu, chociaż ciągle pojawiają się przykłady nowych zastosowań tej metodyki, np. szacowanie proporcji pomiędzy aparatem asymilacyjnym, gałęziami i pniami (Chapman 2007), czy też określanie tempa tajania śniegu pod okapem (Essery et al. 2008).

Procedura wykonania i analizy zdjęć hemisferycznych składa się z trzech etapów: wykonania zdjęcia, segmentacji uzyskanego obrazu i interpretacji tego obrazu. Wykonanie przydatnego do analiz hemisferycznego zdjęcia sklepienia drzewostanu wymaga stosowania specjalnych obiektywów (typu rybie oko) lub innych rozwiązań optycznych (konwertery na zwykły obiektyw – por. Strzeleński 2006) dających obraz całej hemisfery znajdującej się nad skierowanym pionowo w górę obiektywem. Istotną rolę odgrywają w tym przypadku odpo-

<sup>1</sup> Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego, Wydział Leśny, Katedra Hodowli Lasu, ul. Nowoursynowska 159, 02-776 Warszawa, Tel. +48 225938106, e-mail: leszek.bolibok@wl.sggw.pl

wiednie warunki pogodowe (jednolite pełne zachmurzenie) i właściwie dobrana ekspozycja zdjęcia (Bolibok 2010).

W procesie segmentacji następuje uproszczenie obrazu tak, że składa się on z elementów należących najczęściej tylko do dwóch kategorii: nieboskłonu (białe piksele) i sklepienia drzewostanu (czarne piksele). W ten sposób powstaje przestrzenny schemat opisujący rozmieszczenie obiektów (liści, pędów, pni) tworzących sklepienie drzewostanu.

Na etapie interpretacji algorytm komputerowy, na podstawie tego schematu, dokonuje opisu wybranych charakterystyk sklepienia drzewostanu (ażurowość, LAI) lub określa warunki świetlne pod okapem, ustalając, które elementy sklepienia oraz w jakich porach dnia i roku mogą odcinać dopływ światła rozproszonego bądź bezpośredniego do miejsca, w którym wykonano zdjęcie.

Specyfika warunków świetlnych pod sklepieniem drzewostanu sprawia, że nie zawsze założenia przyjęte w analizie zostaną potwierdzone. Celem tego artykułu jest przedstawienie parametrów struktury sklepienia drzewostanu, które można badać za pomocą fotografii hemisferycznej oraz czynników utrudniających precyzyjne oszacowanie warunków świetlnych na podstawie analizy zdjęcia hemisferycznego na etapie segmentacji i interpretacji zdjęcia. Należy do nich zaliczyć przede wszystkim zróżnicowanie intensywności światła docierającego z różnych części nieboskłonu pod sklepienie drzewostanu oraz specyfikę przenikania światła pod okap drzewostanu (dyfrakcja, odbicie i przenikanie światła przez liście). Szerzej opisane zostały uwarunkowania procesu segmentacji, ponieważ założenia przyjęte w tym procesie mogą zasadniczo zmieniać schemat sklepienia drzewostanu. Ponadto w artykule zwrócono uwagę na niektóre współczynniki opisujące przenikanie promieniowania słonecznego przez atmosferę. Wybór odpowiednich ich wartości ma podstawowy wpływ na uzyskanie wyników modelowania warunków świetlnych pod okapem porównywalnych z bezpośrednim pomiarem. Ograniczenia związane bezpośrednio z wykonywaniem zdjęć zostały przedstawione w artykule Boliboka w Leśnych Pracach Badawczych, Vol. 71 (1), 2010.

## 2. Wybrane cechy sklepienia drzewostanu badane za pomocą fotografii hemisferycznej

### Ażurowość

Zarówno w polskiej, jak i anglojęzycznej literaturze panuje dość duża swoboda w nazywaniu poszczególnych parametrów sklepienia drzewostanu. Aby uporządkować dalsze rozważania, w tej pracy przyjęto nomen-

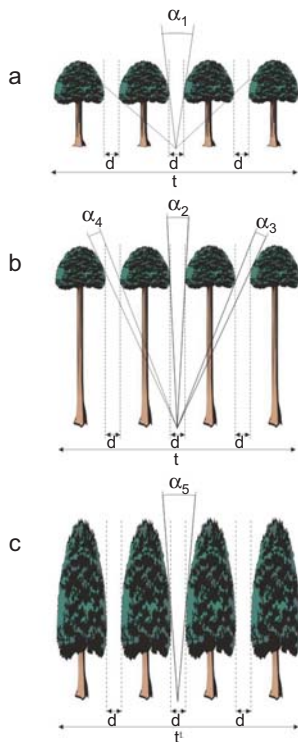
klaturę angielską używaną przez Jennings i in. (1999). Cytowani autorzy podkreślają zasadniczą różnicę pomiędzy cechami określanymi jako *canopy closure* i *canopy cover* (celowo pominięte zostały na tym etapie nazwy polskich odpowiedników).

*Canopy cover* – odpowiada proporcji dna lasu pokrytego przez rzut pionowy koron drzew. W polskiej nomenklaturze leśnej odpowiada to pojęciu stopnia zwarcia (Włoczewski 1968, str. 130) lub zwarcia poziomego (Obmiński 1977, str. 210).

*Canopy closure* – odpowiada proporcji nieboskłonu zasłoniętego przez roślinność, gdy jest ona oceniana z jednego punktu. Proporcja nieboskłonu nie zasłoniętego przez elementy sklepienia (dopełnienie *canopy closure*) określana jest mianem *canopy openness*. W polskim piśmiennictwie leśnym, w sposób bezpośredni, nikt się do tej definicji nie odnosił. Natomiast dość liczne są przykłady badań, w których badana cecha sklepienia drzewostanu odpowiadała *canopy openness* i określana była jako ażurowość (Robakowski et al. 2000; Robakowski 2003; Kałuża et Strzeliński 2008).

Według Matusza (1960) „miarą ażurowości pułapu drzewostanu jest stosunek sumarycznej powierzchni rzutów pionowych wszelkich przerw w pułapie do ogólnej powierzchni pionowego rzutu pułapu”. Cytowany autor, uzasadniając wprowadzenie nowego terminu opisującego strukturę pułapu drzewostanu, zwrócił uwagę na potrzebę uwzględniania przerw w sklepieniu drzewostanu nie tylko pomiędzy brzegami koron (zwarcie), ale także w obrębie samych koron.

Równocześnie z wprowadzeniem pojęcia ażurowości Matusz (1960) opisał przyrząd (ażurometr) mający służyć do szybkiego i efektywnego określania proporcji powierzchni wszelkich przerw w sklepieniu do całej powierzchni sklepienia. Ze względu na jego konstrukcję (pomiar z jednego punktu, wykorzystanie zwierciadeł wypukłych) obraz, jaki podlega analizie w tym przyrządzie, nie jest rzutem pionowym sklepienia drzewostanu, ale jest zbliżony do rzutu środkowego. Wszystkie przyrządy i metody nawiązujące do rzutu środkowego: densitometr Lemmona (1957), ażurometr Matusza (1960), fotografia szerokokątna (Robakowski 2003), w tym fotografia hemisferyczna (Strzeliński 2006), dają oszacowanie cechy okapu określanej przez Jennings i in. (1999) jako *canopy openness*. Z racji licznych precedensów takiego użycia (Matusz 1960; Robakowski et al. 2000; Robakowski 2003; Kałuża et Strzeliński 2008), można by, jako polski zamiennik terminu *canopy openness* używać terminu *ażurowość*, jednak należy pamiętać, że jest to sprzeczne z pierwotną definicją tego pojęcia (Matusz 1960). W dalszej części tego artykułu ażurowość w tym nowym znaczeniu będzie oznaczana terminem *ażurowość punktowa*, natomiast ażurowość w znaczeniu pierwotnym (Matusz 1960) określana będzie, jako *ażurowość powierzchniowa*.



**Rycina 1. Ażurowość punktowa (reprezentowana przez kąty  $\alpha_1... \alpha_5$ ) i powierzchniowa (reprezentowana przez sumę długości odcinków odcinki  $d_1-d_3$ ) w schematycznym drzewostanie złożonym z czterech drzew (a). Zmiana wysokości drzew bez zmiany szerokości koron wpływa na ażurowość punktową, ale nie wpływa na ażurowość powierzchniową (b), również zmiana długości koron bez zmiany ich szerokości wpływa na ażurowość punktową, lecz nie wpływa na ażurowość powierzchniową.**

Figure 1. Canopy openness (represented by angles  $\alpha_1... \alpha_5$ ) and canopy cover (represented by sum of segments  $d_1-d_3$ ) in schematic tree stand made of four trees (a). The change of tree height without the change in their crown diameters influences canopy openness but does not influence canopy cover (b). Also the change of tree crown length without the change in crown diameters influences canopy openness but does not influence canopy cover (c).

Szacowanie udziału powierzchniowego luk w sklepieniu drzewostanu w rzucie pionowym i rzucie środkowym może prowadzić do odmiennych wniosków. Na rycinie 1 schematycznie przedstawiono trzy drzewostany składające się z czterech drzew, pomiędzy którymi znajdują się luki o szerokości  $d$ . Wszystkie one mają tę samą ażurowość powierzchniową, wyrażającą się stosunkiem sumarycznej szerokości luk ( $3d$ ) do szerokości drzewostanu ( $t$ ), natomiast różnią się wartością ażurowości punktowej. Dla potrzeb ilustracyjnych, jako miarę ażurowości punktowej można przyjąć sumę kątów wpisanych w przerwy w sklepieniu drzewostanu, o wierzchołkach znajdujących się w miejscu, z którego oceniana jest ażurowość punktowa. Na rycinie 1a ażu-

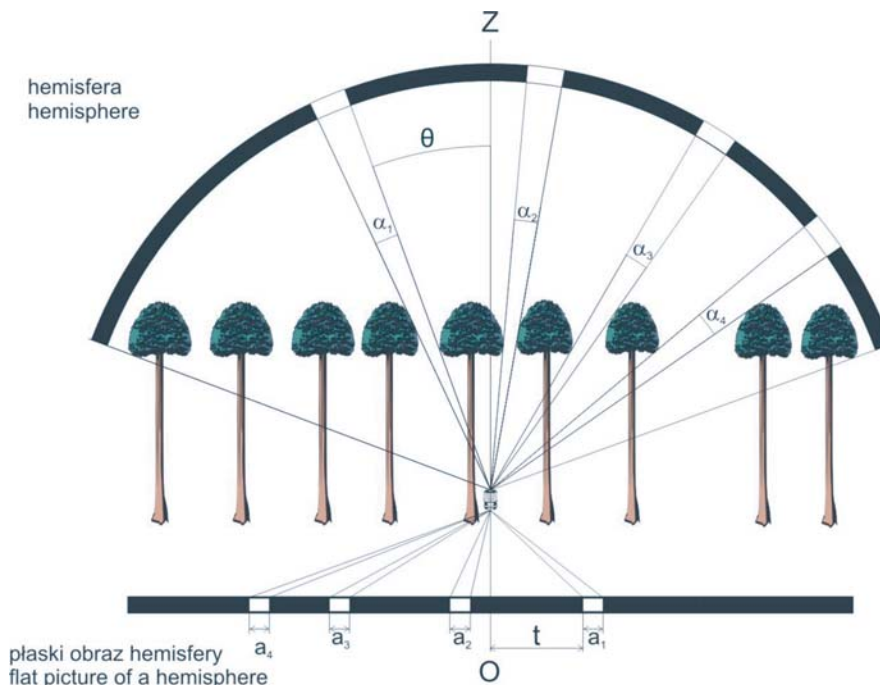
rowość punktowa jest proporcjonalna do kąta  $\alpha_1$  wpisanego w środkową lukę, bo tylko tej luki nie zasłaniają korony drzew. Wraz ze wzrostem wysokości drzewostanu, ale przy zachowaniu szerokości koron, maleje wartość kąta wpisanego w środkową lukę ( $\alpha_2$ ), ale sumaryczna ażurowość punktowa w tym przykładzie zwiększa się, ponieważ z punktu pomiaru widoczne są luki przy drzewach zewnętrznych (kąty  $\alpha_3$  i  $\alpha_4$ ). Na rycinie 1c ażurowość jest mniejsza (kąty  $\alpha_5$ ) niż na rycinie 1b, ponieważ długie korony drzew zasłaniają zewnętrzne luki.

Przedstawiona na rycinie 1 idea analizy ażurowości punktowej, jako analizy obrazu w rzucie środkowym, jest w przypadku fotografii hemisferycznej przydatnym uproszczeniem. W rzeczywistości obraz hemisfery nad obiektywem może być projektowany na płaszczyznę matrycy (błony fotograficznej) w aparacie fotograficznym w sposób nieprzystający dokładnie do definicji rzutu środkowego. W obiektywach hemisferycznych stosuje się różne odwzorowania hemisfery na płaszczyznę, nie zawsze dające takie same proporcje pomiędzy obrazem luk i koron, co w rzeczywistości.

Na rycinie 2 przedstawiono schemat odwzorowania, w którym odległość  $t$  obrazu obiektu od środka kadru  $O$  jest wprost proporcjonalna do kąta zenitalnego  $\theta$  pomiędzy zenitem  $Z$  i rzeczywistym obiektem (krawędzią korony). Ciekawą właściwością tego odwzorowania jest fakt, że luki różniące się szerokością w rzucie pionowym, ale o tej samej wielkości kątowej ( $\alpha_1=\alpha_2=\alpha_3=\alpha_4$ ), na fotograficznym obrazie sklepienia drzewostanu będą miały te sam rozmiar (mierzony wzdłuż promienia obrazu).

Odwzorowania stosowane w obiektywach hemisferycznych wpływają na oszacowanie rzeczywistej wartości ażurowości punktowej. Najczęściej proporcja pomiędzy sumą kątów bryłowych reprezentujących otwarty nieboskłon (powierzchnia niezasłoniętego nieboskłonu) a sumą kątów bryłowych reprezentujących elementy sklepienia drzewostanu (powierzchnia sklepienia drzewostanu) na obserwowanej hemisferze różni się od proporcji pomiędzy ilością jasnych i ciemnymi pikseli na fotografii hemisferycznej (zakładając, że jakość fotografii nie stwarza żadnych problemów w odróżnieniu sklepienia od nieboskłonu).

Większość programów do analizy zdjęć hemisferycznych posiada opcję pozwalającą przeliczyć ażurowość punktową uzyskaną na podstawie zliczania ciemnych (okap) i jasnych (luka) pikseli z obrazu hemisferycznego na ażurowość punktową odpowiadającą rzeczywistym proporcjom koron i otwartego nieboskłonu w hemisferze widocznej z miejsca wykonania zdjęcia. Ponieważ przy przeliczaniu powierzchni luk na zdjęciu jest korygowana (ważona) na podstawie ich kąta zenitalnego, w piśmiennictwie anglojęzycznym często ta cecha sklepienia jest określana jako *weighted openness*.



**Rycina 2. Graficzne porównanie ażurowości punktowej rzeczywistej i liczonej na podstawie analizy płaskiego obrazu hemisfery. Rzeczywista ażurowość punktowa to stosunek sumy kątów brylowych  $\Sigma(\alpha_1 \dots \alpha_4)$  przechodzących przez okna w sklepieniu drzewostanu do kąta brylowego obejmującego całą hemisferę. Ażurowość liczona na podstawie analizy płaskiego obrazu hemisfery jest to stosunek sumarycznej powierzchni obrazów okien  $\Sigma(a_1 \dots a_4)$  do całej powierzchni obrazu. Ze względu na sposób projekcji hemisfery na płaszczyznę w zdjęciach hemisferycznych obie proporcje zazwyczaj się różnią.**

Figure 2. Graphical comparison between the real canopy openness and canopy openness assessed from a flat picture of hemisphere. The value of real canopy openness can be calculated as the ratio of sum of solid angles  $\Sigma(\alpha_1 \dots \alpha_4)$  penetrating canopy gaps to the solid angle representing whole hemisphere. The canopy openness calculated based on the analysis of a flat picture of hemisphere is the ratio of the sum of gap areas in the picture of  $\Sigma(a_1 \dots a_4)$  to the area of the whole picture. Due to the way of projection of hemispherical lenses, both mentioned ratios are usually different.

Z definicji ażurowość powierzchniowa jest cechą opisującą strukturę warstwy koron na pewnej powierzchni drzewostanu. W przeciwieństwie do niej ażurowość punktowa opisuje strukturę warstwy koron opisywaną lokalnie z jednego miejsca. Z tego powodu lepiej nadaje się do charakteryzowania warunków wzrostu w wybranym miejscu na dnie lasu, a zwłaszcza do charakterystyki warunków świetlnych.

Biorąc pod uwagę zakres zbieranej informacji, można powiedzieć, że fotografia hemisferyczna jest najlepszą z możliwych metod badania ażurowości punktowej, ponieważ na każdej fotografii rejestrowany jest obraz całej hemisfery znajdującej się ponad pionowo wzniesionym obiektywem (kąt bryłowy  $180^\circ$ ). Przy ocenie ażurowości sklepienia można uzyskać zbliżone wyniki jedynie za pomocą przyrządu LAI-2000, który może rejestrować światło napływające z nieco mniejszej części hemisfery (kąt bryłowy  $148^\circ$ ). Inne przyrządy do pomiaru ażurowości punktowej analizują mniejsze wycinki hemisfery – przykładowo densitometr Lemonna obejmuje kąt bryłowy  $60^\circ$ , obiektyw o ogniskowej 50 mm

dedykowany do popularnego systemu 35 mm obejmuje wycinek hemisfery  $37 \times 25^\circ$ , a o ogniskowej 100 mm – wycinek  $18,5 \times 12,5^\circ$  (Vales et Bunnell 1985).

Instrumenty zaprojektowane tak, aby utrzymać pionowy kierunek patrzenia na korony, obejmują zdecydowanie mniejszy zakres niż hemisfera – przykładowo popularny za oceanem przyrząd moosehorn obejmuje zakres  $10,2^\circ$ , a pionowana lunetka z celownikiem krzyżowym –  $0,67^\circ$  (Vales et Bunnell 1985).

Jeżeli badacze posługują się instrumentami obejmującymi różne fragmenty hemisfery, wyniki ich pomiarów mogą nie być porównywalne. Valles i Bunnell (1985) twierdzą, że gdy kąt obserwacji przekracza  $10^\circ$  wyniki oceny ażurowości powierzchniowej są już obciążone pewnym błędem, chociaż Korhonen i in. (2006) zauważają, że przy kącie bryłowym obserwacji mniejszym niż  $30^\circ$  wyniki, w zasadzie, są zbliżone do oceny ażurowości powierzchniowej. Zbieżność ta wynika z praw geometrii. Rzut pionowy jest szczególnym przypadkiem rzutu środkowego. Im mniejszy jest rzutowany wycinek hemisfery w okolicach punktu zenitalnego, tym

mniej linie rzutowania są zbieżne. Gdy środek rzutu znajduje się w nieskończoności, linie rzutowania stają się równoległe tak jak w rzucie pionowym. Gdy obszar hemisfery objęty obserwacją jest większy, wartość liczbową ażurowości powierzchniowej może być zawyżona (Korhonen et al. 2006). Trzeba ją zatem traktować jako ażurowość punktową.

Niewątpliwą zaletą fotografii hemisferycznej jest fakt, że obraz sklepienia utrwalony na zdjęciu można poddać obróbce ograniczającej pole widzenia do dowolnego kąta bryłowego, takiego jak w innym porównywanym przyrządzie. Valles i Bunnell (1985) opisali sposób wykorzystania fotografii hemisferycznej do oceny ażurowości powierzchniowej na podstawie analizy wewnętrznej części kadru o kącie bryłowym  $10^\circ$ . Na tą część kadru przykładano specjalny szablon, sprawdzając czy zaznaczone na szablonie punkty znajdują się na tle nieboskłonu niezastłoniętego czy na tle koron. Cytowani autorzy stwierdzili, że była to najbardziej precyzyjna, tzn. obciążona najmniejszym błędem, spośród dziewięciu analizowanych technik oceny ażurowości powierzchniowej (ang. overstory cover).

Podsumowując tę część rozważań, można stwierdzić, że fotografia hemisferyczna jest bardzo uniwersalną techniką, pozwalającą badać ażurowość punktową w dowolnym zakresie kąta obserwacji. Umiejętne wykorzystanie fotografii hemisferycznej pozwala również badać ażurowość powierzchniową, lecz wymaga to przeanalizowania dla jednego drzewostanu większej liczby fotografii i z praktycznego punktu widzenia lepiej stosować w tym celu inne techniki, np. próbkowanie punktowe za pomocą pionowanych przezierników.

### Wskaźnik powierzchni liści

Analiza zdjęć hemisferycznych pozwala na szacowanie wskaźnika powierzchni liści LAI (ang. leaf area index) w sposób pośredni, bezkontaktowo. Tak jest w przypadku stosowania w tym celu przyrządu firmy Licor LAI-2000 (Sławski 2000). Podstawą do obliczenia wskaźnika LAI są dwie właściwości warstwy koron: frakcja luk (ang. gap fraction) lub alternatywnie rozkład wielkości luk (ang. gap size distribution).

Frakcja luk może być zdefiniowana jak stosunek powierzchni niezastłoniętej przez rośliny do całej powierzchni wybranego sektora hemisfery (zdefiniowanego poprzez kąt zenitalny  $\Theta$  i azymut  $\beta$ ). Jest to liczba niemianowana, określająca prawdopodobieństwo, że promień światła prostopadły do powierzchni hemisfery docierający z danego sektora do punktu pomiarowego nie zostanie zatrzymany przez sklepienie drzewostanu. W obliczeniach wykorzystuje się prawo Lamberta-Beera, opisujące pochłanianie promieniowania elektromagnetycznego przy przechodzeniu przez częściowo absor-

bujący i rozpraszający ośrodek (w tym przypadku sklepienie drzewostanu). Przy dodatkowym założeniu, że elementy tego ośrodka (liście i pędy) są rozmieszczone losowo, na podstawie zmierzonej wartości frakcji luk można określić wskaźnik powierzchni liści. W większości przypadków podczas analizy, zarówno w przypadku stosowania urządzenia LAI-2000, jak też zdjęć hemisferycznych, nie rozróżnia się, czy elementem blokującym światło są liście czy inne składniki warstwy koron (gałązki, konary, pnie). Uzyskany wynik w zasadzie nie odnosi się jedynie do powierzchni liści i nie powinien być wprost porównywany z wartościami LAI obliczonymi innymi metodami (np. bezpośrednimi). Jonckheere i in. (2004) obszernie opisali uwarunkowania stosowania fotografii hemisferycznej na tle innych metod oceny LAI. Autorzy zwracają uwagę, że metoda ta sprawdza się tylko w przypadku, gdy wartość rzeczywista LAI nie przekracza 5 oraz w sytuacji, gdy usprawiedliwione jest założenie o losowym rozmieszczeniu w przestrzeni elementów asymilujących. To ostatnie założenie, szczególnie w przypadku drzew iglastych, często nie jest spełnione, co może prowadzić do zaniżenia wartości LAI. Konieczne jest wówczas wprowadzanie do obliczeń poprawki uwzględniającej skupiskowe rozmieszczenie liści, tzw. wskaźnika skupiskowości liści (ang. clumping index), opisującego, jak bardzo ich rozmieszczenie odbiega od losowego.

Wskaźnik skupiskowości liści może być badany empirycznie, na przykład za pomocą specjalnego przyrządu TRAC, który mierzy gęstość strumienia fotonów aktywnych fotosyntetycznie (Leblanc et al. 2005). Operator, chodząc z tym przyrządem pod okapem, może określić, jaki jest rozkład wielkości luk. Informacja ta jest wykorzystywana do określenia wskaźnika skupiskowości liści, a następnie może być wykorzystana do precyzyjnego określenia LAI. Leblanc i in. (2005) opracowali program komputerowy (udostępniany nieodpłatnie), który pozwala na podstawie analizy fotografii hemisferycznej oszacować rzeczywistą wartość wskaźnika skupiskowości liści.

Gdy celem badań jest określenie rzeczywistej powierzchni liści, istotne jest określenie, jaką część nieboskłonu przysłaniają liście, a jaką pędy, konary i szczególnie pnie drzew. W tego typu badaniach może być stosowane specjalistyczne oprzyrządowanie (MVI Multiband Vegetation Imager – Kucharik et al. 1998) rejestrujące obraz sklepienia drzewostanu w dwóch zakresach promieniowania widzialnego i bliskiej podczerwieni (NIR ang. – near infrared). Ponieważ promieniowanie z zakresu bliskiej podczerwieni zdecydowanie silniej przenika przez liście niż promieniowanie widzialne, na obrazie zarejestrowanym w tym zakresie widma konary i pnie są zdecydowanie ciemniejsze od liści i łatwo je wyodrębnić podczas obróbki zdjęcia. Jak wy-

każał Chapman (2007), podobną analizę można przeprowadzić za pomocą przerobionego we własnym zakresie aparatu cyfrowego z serii Nikon COOLPIX zaopatrzonego w nasadkę do zdjęć hemisferycznych. Jak zauważył autor, matryce starszych modeli aparatów z tej serii mają zdolność rejestracji promieniowania z zakresu bliskiej podczerwieni. Domowa modyfikacja sprowadza się do wyjęcia z aparatu szklanego filtra blokującego promieniowanie podczerwone i nakręcenie na obiektyw filtra blokującego promieniowanie widzialne (ang. cold mirror filter). Część nieboskłonu zasłoniętą przez liście można obliczyć odejmując od oszacowania dotyczącego całego sklepienia drzewostanu, dokonanego na podstawie zwykłego zdjęcia, oszacowanie dotyczące tylko pni i gałęzi ze zdjęcia wykonanego w podczerwieni. Zdolność do rejestracji promieniowania podczerwonego mają również matryce aparatów fotograficznych innych producentów (np. Canon EOS 20Da, za Strzeliński 2006), co może zachęcać do eksperymentowania z tą techniką.

Inną metodą rejestracji promieniowania podczerwonego jest stosowanie specjalnych filtrów (Strzeliński 2006). W przypadku filtrów nasadkowych mogą one ograniczać kąt widzenia obiektywu, z tego względu lepiej jest stosować filtry wewnętrzne (o ile konstrukcja obiektywu na to pozwala, np. tak jak w obiektywie hemisferycznym SIGMA 8 mm F3.5)

Zbliżone wyniki można uzyskać za pomocą klasycznej fotografii hemisferycznej, wykonując zdjęcie w ściśle określonym położeniu w okresie ulistnienia drzew i w okresie bezlistnym. Jak podają Kucharik i in. (1998), rozwiązanie takie zaniża udział powierzchni liści, ponieważ nie jest uwzględniany fakt, że w okresie wegetacyjnym liście przysłaniają większość drobnych gałęzi. Według opinii Jongheree i in. (2004) fotografia hemisferyczna jest najbardziej godna polecenia spośród pośrednich i bezkontaktowych metod badania LAI. Jednak nie jest ona całkowicie wolna od błędów, z tego powodu zalecane jest równoległe stosowanie metod bezpośrednich (na mniejszej części badanych obiektów) w celu weryfikacji dokładności tej metody w wybranych warunkach drzewostanowych.

### 3. Fizyczne uwarunkowania przenikania światła pod okap drzewostanu

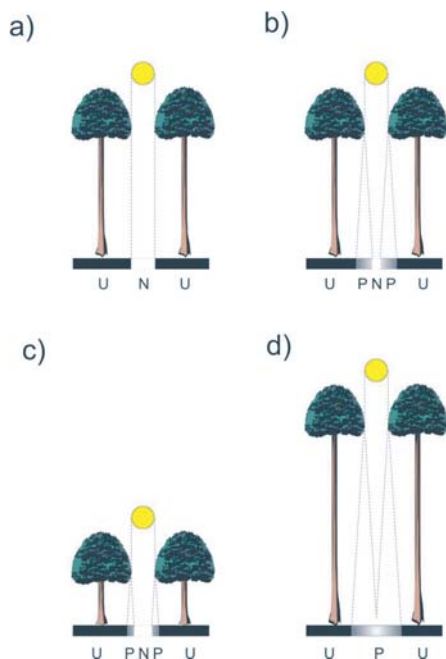
#### Wzbogacenie strumienia światła pod okapem

Większość autorów oprogramowania do analizy zdjęć hemisferycznych zakłada, że liście i pędy drzew są całkowicie nieprzenikliwe dla promieniowania świetlnego oraz, że obrazek świetlny jest zwykłym rzutem okna w sklepieniu drzewostanu na dno lasu. Takie założenia są

wygodnym, ale niestety ograniczającym uproszczeniem. Mogą one zaniżać oszacowanie warunków świetlnych na dnie lasu (Canham i in. 1994, Gendron i in. 1998). Założenia te ignorują zjawisko wzbogacenia strumienia światła docierającego pod okap drzewostanu (ang. beam enrichment, Hutchison et Matt 1976, za Canham i in. 1994). Wzbogacenie w tym kontekście oznacza dodatkową porcję energii, ponad tą niesioną przez promienie, które nie trafiły na elementy sklepienia. Może to być światło przenikające przez liście lub pochodzące z odbicia przez liście w kierunku pod okap drzewostanu. Za wzbogacenie strumienia świetlnego docierającego pod okap drzewostanu odpowiada również zjawisko dyfrakcji światła bezpośredniego na krawędzi wszelkich przerw w sklepieniu drzewostanu (zarówno wewnątrz koron drzew, jak i pomiędzy nimi). Badania Canhama i in. (1994) wskazują, że nieuwzględnienie wzbogacenia strumienia światła pod okapem drzewostanu w trakcie analizy zdjęć hemisferycznych może niekiedy zniżyć wynik oszacowania nawet o 37–41%. Energia świetlna ze wzbogacenia strumienia świetlnego ma szczególnie znaczenie w przypadku bardzo małej ażurowości drzewostanu. W takiej sytuacji nawet niewielkie dodatkowe ilości światła mogą mieć kluczowe znaczenie dla przeżywalności nalotów. Niestety powszechnie stosowana metodyka analizy fotografii hemisferycznych ignoruje zjawisko wzbogacenia strumienia świetlnego pod okapem drzewostanu. Jest to prawdopodobnie najważniejszą przyczyną małej zgodności pomiarów bezpośrednich z wynikami modelowania na podstawie zdjęć hemisferycznych w warunkach małej podaży światła pod okapem drzewostanu (mniejszej niż 10% ilości światła z powierzchni otwartej).

#### Dyfrakcja światła w oknach sklepienia drzewostanu

Dyfrakcja to zjawisko fizyczne polegające na zmianie kierunku rozchodzenia się fali na krawędziach przeszkód oraz w ich pobliżu. Większość autorów programów do analizy zdjęć hemisferycznych nie uwzględnia tego zjawiska, zakładając, że obecność okna w sklepieniu drzewostanu spowoduje powstanie obrazka świetlnego będącego rzutem na płaszczyznę dna lasu zarysu okna w sklepieniu drzewostanu (ryc. 3a). Dysk słoneczny widoczny na nieboskłonie nie jest punktowym źródłem światła (kąt bryłowy dysku słonecznego to około  $0,5^\circ$ ), dlatego wiązka promieni słonecznych na granicy okna w sklepieniu drzewostanu będzie ulegała dyfrakcji tak, jak to zostało schematycznie przedstawione na rycinie 3b. Podczas przenikania przez okno w sklepieniu drzewostanu wiązki promieni światła bezpośredniego następuje dyfrakcja, tzn. część promieni ulega rozproszeniu i dociera do dna lasu w postaci światła rozproszonego, co wpływa na postać obrazka świetl-



**Rycina 3. Wpływ dyfrakcji na kształtowanie się warunków świetlnych na dnie lasu: w większości programów do analizy zdjęć hemisferycznych przyjęto uproszczone założenie (a), że obrazek świetlny na dnie lasu jest jasną plamą - numbra (N) tworzoną przez światło bezpośrednie, otoczoną przez całkowicie zacieniony obszar - umbra (U). W rzeczywistości obrazek świetlny na dnie lasu ma bogatszą strukturę (b), ponieważ pomiędzy obszarem w pełni oświetlonym (N) i w pełni zacienionym (U) występuje obszar półcienia - penumbra (P), do którego dociera światło rozproszone na krawędzi okna drzewostanu. Struktura obrazka zależy od wysokości drzewostanu. Przy tej samej średnicy okna w niskich drzewostanach do dna lasu dociera więcej światła bezpośredniego (c) niż w drzewostanach wysokich, gdzie może ono nawet nie docierać wcale do dna lasu (d).**

Figure 3. The influence of diffraction on light availability on the forest floor. In most cases in software used for the analysis of hemispherical photographs, a simple assumption is made (a) that a sunfleck on a forest floor consists only of the area with full incident light numbra (N) which is surrounded by the entirely shaded area – umbra (U). In reality, a sunfleck has a more complex structure (b) because between the area of direct light (N) and the area of full shade (U) there is the area of partial shade – penumbra (P), which is illuminated by diffuse light made by the diffraction on the gap edge. The structure of sunfleck depends on the tree stand height. With the same gap diameter in lower tree stands more incident light reaches the forest floor (c) whereas in higher tree stands the incident light could even be unable to reach the forest floor (d).

nego na dnie lasu. W najbogatszej formie składa się on z centralnie położonego obszaru o pełnym oświetleniu (N – numbra<sup>1</sup>) i obwodowych obszarów półcienia (P – penumbra), w których warunki świetlne stopniowo się pogarszają, aż do całkowitego cienia (U – umbra). Zjawisko dyfrakcji powoduje również zwiększenie rozmiarów obrazka. Nieuwzględnienie tego zjawiska podczas modelowania warunków świetlnych może zaniżać oszacowanie dopływu światła pod okap. Średnica okna w sklepieniu drzewostanu nie jest jednym czynnikiem warunkującym zmienność warunków świetlnych na obszarze obrazka świetlnego. W niskich drzewostanach duża część obrazka będzie otrzymywała światło bezpośrednie (ryc. 3c). W wysokich drzewostanach (ryc. 3d), gdy stosunek średnicy okna do wysokości drzewostanu spadnie poniżej 0,01, światło bezpośrednie może w ogóle nie dotrzeć do dna lasu i ulec całkowitej zmianie w światło rozproszone (Smith i in. 1989, za ter Steege 1997).

Jednym z niewielu programów próbujących uwzględnić zjawisko dyfrakcji jest program Winphot, udostępniany nieodpłatnie przez ter Steege (1996). Podstawą do modelowania tego zjawiska jest oszacowanie wysokości, na której położone są okna w sklepieniu drzewostanu. Jeżeli w menu programu, który ma być wykorzystywany do analizy fotografii hemisferycznych, nie ma opcji uwzględniającej tę wysokość, to prawdopodobnie zjawisko dyfrakcji nie jest uwzględniane przez ten program.

Zjawisko dyfrakcji może być odpowiedzialne również za tworzenie błędnych, nieodpowiednich do dalszych analiz obrazów sklepienia drzewostanu. Gdy małe okno jest oświetlone silnym światłem bezpośrednim, dyfrakcja powoduje, że jego obraz na matrycy aparatu cyfrowego staje się nieproporcjonalnie duży w stosunku do rzeczywistych rozmiarów okna. Opiswane zjawisko może być przyczyną przeszacowania dostępu światła bezpośredniego do dna w lasu w młodych drzewostanach, w których okna w sklepieniu drzewostanu są liczne, ale relatywnie małe (Frazer et al. 2000).

### Zróznicowane pochłanianie światła z różnych zakresów widma

Podczas przenikania przez liście drzew najsilniej absorbowana jest niebieska część widma promieniowania świetlnego. Można tę okoliczność wykorzystać do ograniczenia błędów oszacowania warunków świetlnych pod okapem wynikających z przenikania światła przez liście lub odbijania się światła od liści drzew. W nowoczesnych aparatach cyfrowych obraz jest rejestrowany poprzez równoczesny zapis promieniowania świetlnego z trzech zakresów widma (niebieskiego, zielonego i czerwonego), a następnie przetwarzany na obraz wielobarwny. Na obrazie zarejestrowanym w niebieskim zakresie widma liście są najciemniejsze i dlatego odwzorowanie sklepienia jest najbardziej precyzyjne. Na etapie segmentacji zdjęć niektórzy autorzy zalecają uży-

<sup>1</sup> z łac., umbra – cień

wanie tylko tego kanału barwnego (Leblanc et al. 2005). Frazer i in. (2001) zwracają uwagę, że dla pewnych rozwiązań optycznych (konwerter FC-E8 i aparaty serii Nikon COOLPIX) to rozwiązanie zawodzi. Duża, nieskorygowana aberracja chromatyczna jest przyczyną znacznych błędów w oszacowaniu warunków świetlnych tylko na podstawie analizy jednego kanału barwnego, szczególnie gdy zdjęcie wykonywane jest przy bezchmurnym niebie. W takich przypadkach autorzy zalecają analizę zdjęcia wielobarwnego. Również Jonckheere i in. (2005) używali informacji ze wszystkich kanałów barwnych, ponieważ to podejście lepiej się sprawdzało w przypadku silnie nasłonecznionego sklepienia drzewostanu.

### **Zróźnicowanie intensywności oświetlenia okapu w dni słoneczne**

Z wielu powodów, zdjęcia hemisferyczne, aby były przydatne do analizy warunków świetlnych pod okapem, powinny być wykonywane jedynie przy całkowicie i równomiernie zachmurzonym niebie. Obecność dysku słonecznego w kadrze prowadzi do znacznych błędów w oszacowaniu wskaźnika powierzchni liści LAI (Wells et Norman 1991), ponieważ ogólnie zaniża oszacowanie części nieboskłonu zasłoniętej przez drzewostan.

Bezchmurny, lub też częściowo zachmurzony nieboskłon, z niezasłoniętym dyskiem słonecznym, charakteryzuje się bardzo dużą zmiennością intensywności światła docierającego z różnych fragmentów hemisfery. Niemożliwe jest wówczas wybranie właściwej ekspozycji. W takich warunkach zazwyczaj część zdjęcia – w rejonach w pobliżu dysku słonecznego lub we fragmentach nieboskłonu niezakrytych chmurami – będzie prześwietlona. W tych rejonach zarejestrowany obraz przerw w sklepieniu drzewostanu jest nieproporcjonalnie duży w stosunku do ich rzeczywistych rozmiarów. Wynika to po części z powodu wcześniej opisywanego zjawiska dyfrakcji. Inny powód jest taki, że silnie oświetlone liście, ze względu na jasną barwę, mogą w procesie segmentacji obrazu zostać uznane za fragment niezasłoniętego nieboskłonu. Podobnie błędnie mogą zostać sklasyfikowane oświetlone światłem bezpośrednim pnie i gałęzie drzew. Gdy ekspozycja zdjęcia jest ustalana tak, aby skompensować obecność dysku słonecznego w kadrze, to niektóre fragmenty zdjęcia zostaną niedoświetlone, a istniejące tam małe przerwy zostaną odwzorowane za pomocą ciemnych plam, które w procesie segmentacji mogą zostać zaklasyfikowane jako fragmenty sklepienia drzewostanu. Silne bezpośrednie promieniowanie słoneczne może wywołać w niektórych fragmentach matrycy aparatu cyfrowego przelewanie się ładunków do sąsiednich pikseli (ang. blo-

oming), co też skutkuje zarejestrowaniem zbyt dużego obrazu przerwy w sklepieniu drzewostanu.

Niektórzy autorzy (Rich 1990; Macfarlane et al. 2000) proponują wykonywanie zdjęć przy bezchmurnej pogodzie przed lub po zachodzie słońca. W rejonach globu, gdzie dni pochmurne są rzadkością, jest to jedyne rozwiązanie. Nieboskłon wówczas ma w miarę jednorodną jasność w danej chwili, lecz z minuty na minutę jasność całego nieboskłonu może ulegać dość szybkim zmianom. Zmiany te powodują konieczność częstego powtarzania pomiarów referencyjnych ekspozycji na otwartej powierzchni w celu aktualizacji poprawki stosowanej przy ekspozycji zdjęć pod sklepieniem drzewostanu (Macfarlane et al. 2000; Bolibok 2010). Ponadto wadą tego rozwiązania jest stosunkowo krótki okres w ciągu doby, gdy można prowadzić obserwacje. Na szczęście klimat Polski obfituje w dni pochmurne i nie trzeba korzystać z tego rozwiązania. Niemniej jednak nadal pozostaje konieczność dostosowania harmonogramu badań do warunków pogodowych.

### **Zenitalne zróźnicowanie intensywności światła docierającego pod okap**

Nawet w dni pochmurne światło dociera nie ze wszystkich fragmentów nieboskłonu z tą samą intensywnością. Jak wskazują badania Granta i in. (1996), intensywność światła rozproszonego docierającego z poszczególnych części zachmurzonego nieboskłonu znacznie zmniejsza się wraz ze wzrostem kąta zenitalnego (w zenicie jest zdecydowanie większa niż nad horyzontem). Zjawisko to przekłada się na zenitalną zmienność intensywności światła rozproszonego pod drzewostanem (Gendron i in. 2006). Zmienność ta utrudnia dobranie idealnej ekspozycji fotografii. Badania Zhanga i in. (2005) wskazują, że najlepsze oszacowanie wartości LAI uzyskiwano za pomocą aparatu cyfrowego przy prześwietleniu zdjęcia względem ustawień dla powierzchni otwartej wynoszącym 2EV. Zalecane prześwietlenie fotografii względem ustawień automatycznych dla przestrzeni otwartej daje najbardziej kontrastowe zdjęcia pod okapem (Bolibok 2010). W części centralnej (przy małym kącie zenitalnym) takie zdjęcie może być jednak lekko prześwietlone (liście wydają się jaśniejsze, a obraz luk, na skutek dyfrakcji, wydaje się większy niż w rzeczywistości), natomiast w peryferyjnych częściach kadru (przy dużym kącie zenitalnym) – niedoświetlone, tak że małe luki mogą być mniej widoczne. Wybór właściwej ekspozycji jest balansowaniem pomiędzy prześwietleniem części centralnej kadru i niedoświetleniem części peryferyjnych.



#### 4. Zalecane techniki segmentacji obrazu

Segmentacja obrazu utrwalonego na fotografii cyfrowej jest podstawą dalszych etapów obróbki kameratej zdjęć. Teoria analizy obrazów określa segmentację obrazu (ang. image segmentation), jako proces podziału obrazu na obszary, które są jednorodne pod względem wybranych własności (np. jasności). Uproszczone w wyniku segmentacji obraz jest znacznie łatwiejszy do dalszej analizy. Zazwyczaj celem segmentacji zdjęć hemisferycznych sklepienia drzewostanu jest wyróżnienie dwóch uzupełniających się zbiorów pikseli: jednego reprezentującego niezastłonięty nieboskłon i drugiego – stanowiącego jego dopełnienie, reprezentującego elementy sklepienia drzewostanu. Ten rodzaj segmentacji jest dominującym kierunkiem przetwarzania zdjęć hemisferycznych stosowanych w badaniach drzewostanowych.

U zarania analizy zdjęć hemisferycznych segmentacja obrazu była dokonywana bardzo prymitywnymi metodami. Polegała na przykładaniu szablonów dzielących obraz na mniejsze fragmenty i wizualnej, subiektywnej ocenie przynależności wyróżnionego fragmentu obrazu do klas: nieboskłon bądź sklepienie drzewostanu (Anderson 1964). Taka technika segmentacji w sposób oczywisty prowadziła do dużego subiektywizmu w oszacowaniu warunków świetlnych (Magwick et Brumfield 1969).

Wraz z upowszechnieniem komputerowej obróbki obrazów proces segmentacji uległ zdecydowanemu usprawnieniu. Początkowo czarno-białe zdjęcia sklepienia drzewostanu zamieniano w formę cyfrową przez skanowanie. Zarejestrowany cyfrowo obraz sklepienia drzewostanu to macierz składająca się z pikseli, których jasność waha się zależnie od tego, czy przedstawiają jasne fragmenty zdjęcia (niezastłonięte niebo) czy ciemne (ocieniony pień drzewa). Jasność każdego piksela jest określona liczbowo jako DN (ang. digital number). Dla obrazów 8-bitowych wartość DN waha się od 0 (piksele całkowicie czarne) do 255 (piksele całkowicie białe). Wraz z wprowadzeniem komputerowej analizy zdjęć hemisferycznych upowszechniła się metoda segmentacji polegająca na progowaniu obrazów.

Progowanie polega na subiektywnym bądź zautomatyzowanym ustaleniu wartości progowej jasności piksela ( $T$ ). Piksele o jasności większej ( $DN > T$ ) są interpretowane jako niezastłonięty nieboskłon i przypisywana jest im maksymalna wartość DN (stają się białe). Piksele o jasności mniejszej lub równej wartości progowej ( $DN \leq T$ ) są interpretowane jako obraz elementów sklepienia drzewostanu i przypisywana jest im minimalna wartość DN (stają się czarne). Po operacji progowania otrzymuje się tak zwany obraz binarny, składający się z samych zer i jedynek, czyli w praktyce z

pikseli czarnych i białych. Metodyka wypracowana dla zdjęć czarno-białych jest łatwa do zastosowania również dla zdjęć kolorowych wykonywanych aparatem cyfrowym. Obraz cyfrowy jest pierwotnie rejestrowany równocześnie w trzech kanałach barwnych czerwonym (R), zielonym (G) i niebieskim (B) i dopiero wtórnie na podstawie tej informacji generowane są różne inne kolory. Następnie w większości aparatów cyfrowych jest on poddawany obróbce i zapisywany w formacie JPG. Algorytmy dokonujące obróbki zdjęcia zoptymalizowane są pod kątem wizualnej atrakcyjności zdjęć. Nie oznacza to większej ich przydatności do analiz, a raczej wręcz przeciwnie. Część aparatów cyfrowych pozwala na zapis tych surowych danych w bezstratnym formacie RAW, zachowującym informację o jasności każdego piksela w wybranym kanale barwnym (np. niebieskim). Jak wcześniej wspomniano, wykorzystanie do analizy danych tylko z niebieskiego kanału barwnego, może ograniczyć błędy oszacowania warunków świetlnych związane ze specyfiką przenikania światła przez sklepienie drzewostanu.

W pierwszych programach komputerowych do modelowania warunków świetlnych pod okapem na podstawie analizy zdjęć hemisferycznych, progowanie było procesem interaktywnym i subiektywnym (Chazdon et Field 1987; Rich 1989). Progowa wartość jasności piksela ( $DN=T$ ) nie była bezpośrednio poszukiwana. Użytkownik porównywał zeskanowane zdjęcie z drugim obrazem, którym manipulował w celu przekształcenia go na obraz binarny. Do użytkownika należała ocena, czy obraz binarny dobrze oddaje wygląd sklepienia drzewostanu. Manipulacje wykonywane na obrazie mogą zwiększać lub zmniejszać udział czarnych bądź białych pikseli, co wprost przekłada się na wyniki oszacowania warunków świetlnych pod okapem, dlatego już w 1990 roku Rich zwracał uwagę na możliwy subiektywizm oszacowania warunków świetlnych przy wykorzystaniu ręcznego progowania zdjęć.

Lata dziewięćdziesiąte XX wieku to okres stosowania ręcznego progowania w analizie zdjęć hemisferycznych. W tym okresie niektórzy badacze starali się ograniczyć wpływ subiektywności progowania na wyniki oszacowania warunków świetlnych poprzez wprowadzenie specjalnych protokołów progowania zdjęć (Canaham et al. 1990; Clark et al. 1996; Englund et al. 2000). Jednakże problem subiektywizmu pozostawał w dużej mierze nierozwiązany.

Kato i Komiyama (1990), jako jedni z pierwszych, zastosowali odmienne podejście do zagadnienia progowania zdjęć. Przeprowadzili oni serię analiz badających związek wartości progowej  $T$  przyjętej przy tworzeniu obrazu binarnego oraz oszacowania dostępu światła rozproszonego pod okap drzewostanu. Następnie zbadali korelację pomiędzy wynikami oszacowania

dostępu światła rozproszonego uzyskanymi na podstawie analizy zdjęć przetworzonych przy zastosowaniu różnych wartości  $T$  a wynikami bezpośrednich pomiarów światła rozproszonego w miejscu wykonywania zdjęć. Okazało się, że dla obrazów 8-bitowych z 256 odcieniami szarości wartość  $T = 115$  pozwalała uzyskać największą zgodność oszacowania z bezpośrednim pomiarem. Zdaniem autorów, można tę wartość używać w dalszych badaniach, jako arbitralnie przyjętą optymalną wartość prognozy  $T$ , pod warunkiem stosowania takiego samego sprzętu do wykonywania zdjęć oraz przestrzegania określonego przez autorów protokołu wstępnej obróbki zdjęć.

Jeden z pierwszych programów wykonujących automatyczne progowanie zdjęć hemisferycznych wykorzystywanych do analizy warunków świetlnych został napisany przez Ishidę (2004). Program ten – RGBFisheye, udostępniany nieodpłatnie przez autora wykonuje progowanie zdjęcia i oblicza procent światła rozproszonego, jaki dotarł pod okap drzewostanu. Binarny obraz uzyskany za pomocą tego programu może być następnie wykorzystany w dowolnym innym programie do analizy zdjęć hemisferycznych, w celu modelowania dostępu światła bezpośredniego. Jak podaje autor, dzięki zastosowaniu automatycznego progowania udało mu się uzyskać współczynnik determinacji powyżej 0,99 w badaniu zależności pomiędzy modelowanym a mierzonym poziomem światła rozproszonego po okapie drzewostanów. Istotą algorytmu do wyszukiwania wartości progowej  $T$  jest analiza histogramu przedstawiającego frekwencję pikseli z analizowanego zdjęcia w różnych klasach intensywności (DN). Na podstawie histogramu algorytm konstruuje odpowiadającą mu linię trendu, a następnie wyszukuje maksymalną krzywiznę tej linii. Wartość DN, dla której algorytm stwierdzi największą krzywiznę linii trendu, jest uznawana za wartość progową  $T$  do binarnego podziału pikseli. Ważne jest również, aby podczas wykonywania fotografii stosować korektę ekspozycji +2EV względem odczytów dla powierzchni otwartej.

Inne podejście do automatycznego progowania zastosowali Nobis i Hunziker (2005) w swoim również nieodpłatnie udostępnianym programie SideLook. Najpierw analizowany obraz jest progowany z użyciem wszystkich dostępnych wartości DN w celu utworzenia serii obrazów binarnych. W obrazach binarnych można wyróżnić krawędzie pomiędzy białymi i czarnymi obszarami. Algorytm bada w oryginalnym obrazie kontrast pomiędzy ciemnymi i jasnymi obszarami wzdłuż krawędzi wskazanych przez dany poziom progowania i liczy średnią różnicę jasności. Ostatecznie, jako próg  $T$  przyjmowana jest ta wartość DN, dla której średnia różnica jasności była największa. Nobis i Hunziker (2005) porównali zmierzony poziom przenikania świa-

ła rozproszonego pod okap drzewostanów z modelem na podstawie automatycznego progowania zdjęć i otrzymali współczynnik determinacji 0,91. Cytowani autorzy otrzymali mniejszą zgodność modelowania z pomiarami niż cytowany wcześniej Ishida (2004). Nie musi to świadczyć o mniejszej przydatności algorytmu, gdyż cytowani autorzy wykonywali zdjęcia w trybie automatycznej ekspozycji, co zazwyczaj prowadzi do pogorszenia oszacowania (por. Bolibok 2010).

Progowanie, jako technika analizy obrazu cyfrowego jest od dawna stosowane w różnych dziedzinach nauki i w różnych zastosowaniach gospodarczych. Jonckheere i in. (2005) przeprowadzili badania nad zastosowaniem 35 różnych metod automatycznego progowania do analizy zdjęć hemisferycznych pod kątem ustalania wskaźnika powierzchni liści (LAI). Badania wskazały algorytm Ridleira jako najbardziej uniwersalną metodę segmentacji, sprawdzającą się w przypadku różnych postaci sklepienia drzewostanu. Zdaniem autorów algorytm ten jest stosunkowo łatwy do implementacji w oprogramowaniu komputerowym. Omawiane badania były prowadzone z zastosowaniem wysokiej jakości obrazów zarejestrowanych w formacie 36-bitowym (po 12 bitów na kanał barwny). Daje to zdecydowanie szerszy zakres stopni jasności DN (0-4095), więc nie jest jasne, czy przy obrazach 8-bitowych, obecnie bardziej popularnych, algorytm ten okaże się równie efektywny.

Cytowane dotychczas metody automatycznego progowania zakładają, że istnieje jedna graniczna wartość jasności piksela DN, na podstawie której idealnie da się rozróżnić nieboskłon niezastłonięty od elementów sklepienia drzewostanu. Ten rodzaj progowania określany jest mianem progowania globalnego. A przecież istnieją dobrze udokumentowane przesłanki, by takie założenie odrzucić. W obrębie obrazu hemisferycznego obserwuje się zmniejszanie jasności pikseli odwzorowujących nieboskłon nieprzesłonięty przez sklepienie drzewostanu od centrum ku obwodowi zdjęcia. Zjawisko to jest związane z wcześniej opisywaną w tym artykule zenitalną zmiennością intensywności światła rozproszonego nad drzewostanem (im niżej nad horyzontem, tym ciemniej) lub może wynikać z właściwości optycznych obiektywu (winietowanie). W konsekwencji globalna wartość  $T$  może klasyfikować jaśniejsze fragmenty koron drzew w centrum kadru jako fragmenty otwartego nieboskłonu, a ciemne małe okna w sklepieniu w części obwodowej kadru jako elementy sklepienia. Oczywiście odpowiednio dobrana ekspozycja może zredukować zmienność jasności pikseli reprezentujących otwarty nieboskłon (por. Bolibok 2010), ale jest też rozwiązanie alternatywne, polegające na zastosowaniu tak zwanego lokalnego progowania obrazu. Istotą takiej koncepcji jest ustalenie różnych wartości  $T$  dla poszczególnych rejonów kadru. Wagner (2001) zaproponował segmentację

zależną od kąta zenitalnego. Oznacza to podział obrazu na koncentryczne kręgi o zbliżonej wartości kąta zenitalnego (np. od  $45^\circ$  do  $55^\circ$ ) i poszukiwanie wartości progowej  $T$  oddzielnie dla każdego kręgu. Praktyczną implementację tej idei zastosował Leblanc w swoim nieodpłatnie udostępnianym programie DHP.exe do modelowania wskaźnika LAI na podstawie zdjęć hemisferycznych (Leblanc et al. 2005). Program ten implementuje też inną nową koncepcję w zakresie progowania obrazów – podwójne progowanie.

Idea podwójnego progowania sprowadza się do sprostowania, że niektóre piksele w obrazie sklepienia są szare, ponieważ zawierają mieszany obraz elementów sklepienia i otwartego nieboskłonu, więc klasyfikowanie ich do jednej z kategorii powoduje utratę części informacji i może skutkować błędem w oszacowaniu warunków świetlnych pod okapem. Rozwiązanie tego problemu dla zdjęć utrwalanych na kliszy fotograficznej proponował już wcześniej Wagner (1998). Leblanc w swoim programie założył, że do pierwszego progu jasności  $DN < T_1$  wszystkie piksele obrazują całkowicie nieprzenikliwe dla światła sklepienie drzewostanu, natomiast powyżej drugiego progu  $DN \geq T_2$  obrazują całkowicie otwarty nieboskłon. Piksele pomiędzy progami  $T_1$  i  $T_2$  obrazują mieszkankę nieba i elementów sklepienia w różnych proporcjach. W modelowaniu wskaźnika powierzchni liści (LAI) istotne jest ustalenie, jaki procent nieboskłonu nie jest zasłonięty przez liście. Procent ten autor proponuje wyliczać jako sumę powierzchni pikseli reprezentujących otwarty nieboskłon oraz pewien odsetek powierzchni pikseli reprezentujących częściowo zasłonięty nieboskłon, w myśl zasady, że im jaśniejsze są piksele z zakresu  $T_1 < DN < T_2$ , tym większy odsetek ich powierzchni zostanie doliczony do całkowitej powierzchni otwartego nieboskłonu. Badania Leblanca i in. (2005) wskazują, że użycie podwójnego lokalnego progowania zmienia oszacowanie udziału otwartego nieboskłonu o 1–3%, co przekłada się na zmiany oszacowania LAI rzędu 5–10%.

## 5. Liczbowa charakterystyka warunków świetlnych na podstawie analizy zdjęć hemisferycznych

### Zgodność modeli i pomiarów

Analiza informacji zawartych w zdjęciach hemisferycznych sklepienia drzewostanu pozwala na modelowanie ilości światła docierającego do miejsca, w którym było wykonywane zdjęcie. Zależnie od używanego oprogramowania możliwe jest modelowanie ilości energii słonecznej wyrażonej w jednostkach bezwzględnych bądź w procentach ilości energii, jaka docierałaby do

powierzchni terenu w danej lokalizacji na terenie zupełnie otwartym.

Badania wskazują, że dla pewnego zakresu warunków drzewostanowych możliwe jest uzyskanie dużej zgodności pomiarów bezpośrednich i wyników modelowania. Chazdon i Field (1987) uzyskali korelację wyników modelowania z wynikami pomiarów bezpośrednich na poziomie  $R=0,908$ . Easter i Spies (1993) oraz Gendron i in. (1998) również w swoich badaniach uzyskali wysoką zależność pomiędzy mierzoną a modelowaną ilością promieniowania aktywnego fotosyntetycznie, wyrażającą się współczynnikiem determinacji  $R^2=0,9$ . Nie wszystkie badania dają tak dobre wyniki. Rich i in. (1993) stwierdzili w swoich badaniach słabszą zależność wyrażającą się współczynnikiem determinacji  $R^2$  z zakresu 0,7–0,8. Cytowani autorzy prowadzili badania pod mało azurowym okapem drzewostanów tropikalnych, gdzie docierało 1–10% światła pełnego. Również Roxburgh i Kelly (1995) zaobserwowali większe rozbieżności między pomiarami i modelowaniem na podstawie zdjęć hemisferycznych w warunkach słabszego dostępu światła pod okap (poniżej 5% światła pełnego). Wyjaśnienie gorszych wyników modelowania dla słabych warunków świetlnych wiąże się częściowo z omawianymi wcześniej trudnościami w modelowaniu wzbogacenia strumienia świetlnego pod okapem. Innym ważnym powodem braku zgodności może być brak odpowiednich danych dotyczących jakości i ilości światła docierającego nad okap drzewostanu w danej lokalizacji, niezbędnych do kalibracji modelu. W przypadku modelowania zmienności warunków świetlnych w dłuższym okresie czasu np. w ciągu roku, dodatkowym czynnikiem pogarszającym zgodność wyników modelowania z pomiarami bezpośrednimi są zmiany struktury sklepienia związane z takimi czynnikami jak: wzrost pędów, pojawianie się i opadanie liści, gradacja owadów zjadających liście czy niemożliwe do przewidzenia poważne uszkodzenia koron wywołane przez śnieg lub wiatr.

### Założenia dodatkowe w modelach

Podstawą uzyskania wysokiej zgodności wyników modelowania z bezpośrednimi pomiarami są dokładne dane określające ilość energii słonecznej (promieniowania bezpośredniego i rozproszonego) na otwartej przestrzeni w w pobliżu terenu badań (z bliskiej stacji meteorologicznej, która prowadzi tego typu pomiary). Ponieważ tego typu dane nie są zbyt powszechne, w większości przypadków modelowanie odbywa się w oparciu o dodatkowe założenia dotyczące między innymi ilości promieniowania pochłanianego przez atmosferę, jak też proporcji energii niesionej przez promieniowanie bezpośrednie i rozproszone w danej lokalizacji. Podczas

użytkowania programów do analizy zdjęć hemisferycznych należy zwracać uwagę na wartości omawianych zmiennych, publikując wyniki podawać, przy jakich założeniach zostały one uzyskane.

Algorytmy charakteryzujące warunki świetlne na podstawie zdjęcia hemisferycznego (np. Chazdon i Field 1987) bazują na wcześniej dokonanych obserwacjach fizycznych opisujących energię promieniowania słonecznego i jego przenikanie przez atmosferę. Początkowo modelowane są warunki świetlne nad okapem drzewostanu. Podstawą do tych obliczeń jest stała słoneczna. Jest to całkowita energia niesiona przez promieniowanie słoneczne w jednostce czasu na jednostkową powierzchnię ustawioną prostopadle do promieniowania w średniej odległości Ziemi od Słońca przed wejściem promieniowania do atmosfery, około  $1360 \text{ Wm}^{-2}$ . Wartość ta jest korygowana (zmniejszana) przez algorytm tak, aby uwzględnić rozproszenie energii w atmosferze (w oparciu o dodatkowy współczynnik uwzględniający przejrzystość atmosfery oraz długość drogi światła w atmosferze). Kolejna redukcja służy wyliczeniu, jaki procent transmitowanej energii to aktywne fotosyntetycznie promieniowanie. Chazdon i Field (1987) przyjęli, że stanowi ona 51%, zaznaczając, że ta poprawka może mieć różną wartość w różnych lokalizacjach geograficznych. Na tym etapie pojawia się kolejne założenie mające wpływ na większość modelowanych wskaźników opisujących warunki świetlne pod okapem. Dotyczy ono tego, jaki procent energii aktywnej fotosyntetycznie w danej lokalizacji niesiony jest przez promieniowanie bezpośrednie, a jaki przez promieniowanie rozproszone przez atmosferę. Udział światła bezpośredniego w promieniowaniu całkowitym zależy od przejrzystości atmosfery i zazwyczaj waha się w granicach 70–90% (Rich 1990). Różni autorzy przyjmują różną wartość tego wskaźnika. Chazdon i Field (1987), na podstawie badań Gatesa (1980) przyjęli, że tylko 15% promieniowania aktywnego fotosyntetycznie stanowi światło rozproszone, podczas gdy Canham i in. (1990), na podstawie badań Knappa i in. (1980) – że aż 50%. Użytkownik programu analizującego zdjęcia hemisferyczne powinien świadomie wybrać odpowiednią wartość tej zmiennej.

Kolejny etap modelowania przebiega dwutorowo, ponieważ równolegle i niezależnie modelowane jest przenikanie światła rozproszonego i bezpośredniego pod okap drzewostanu. Oszacowanie energii rozproszonego promieniowania aktywnego fotosyntetycznie, która dociera pod okap, w większości modeli odwołuje się do założenia, że jest ona proporcjonalna do powierzchni hemisfery niezastłoniętej przez korony drzew, choć zależność ta nie musi być liniowa. Chazdon i Field (1987) w swoim algorytmie przyjęli model jednorodnie zachmurzonego nieba (UOC – ang. uniform overcast sky),

który zakłada, że ze wszystkich fragmentów nieba światło rozproszone dociera z tą samą intensywnością. Przy takim założeniu model obliczając dostępność światła rozproszonego pod okapem redukuje wartość obliczoną wcześniej dla powierzchni otwartej (nad okapem) uwzględniając wskaźnik ażurowości punktowej ważonej. Modelowana ilość energii niesionej przez światło rozproszone pod okap jest zatem wprost proporcjonalna do części hemisfery niezastłoniętej przez liście, gałęzie i pnie drzew. Nowsze badania wskazują, że ten model rozkładu intensywności światła rozproszonego należałoby odrzucić (Gendron i in. 2006). Alternatywnym jest model standardowo zachmurzonego nieba (SOC – ang. standard overcast sky), który zakłada, że im dalej od zenitu, tym ilość światła rozproszonego docierającego z danego fragmentu nieba jest mniejsza. Przy takim założeniu algorytm musi uwzględnić dodatkowe współczynniki opisane przez model SOC. Wybór odpowiedniego modelu opisującego zenitalną zmienność światła rozproszonego jest kolejnym zadaniem użytkownika programu modelującego dostęp światła.

Szacowanie energii promieniowania bezpośredniego aktywnego fotosyntetycznie docierającego pod okap opiera się na założeniu, że jest ona proporcjonalna do czasu, w którym dysk słoneczny jest widoczny w miejscu wykonania zdjęcia przez okna w sklepieniu drzewostanu. Na podstawie współrzędnych geograficznych miejsca wykonania zdjęcia algorytm oblicza trajektorię pozornego ruchu dysku słonecznego po nieboskłonie i nakłada ją na zdjęcie hemisferyczne. Następnie zliczane są okresy, gdy dysk słoneczny widoczny jest w jakimś oknie w sklepieniu drzewostanu. Pozwala to na modelowanie czasu trwania i rozkładu w ciągu dnia występowania obrazków świetlnych w badanym miejscu na dnie lasu w dowolnym okresie sezonu wegetacyjnego.

Opisana metodyka szacowania dopływu energii słonecznej może być zastosowana do każdego zakresu promieniowania (nie tylko aktywnego fotosyntetycznie, ale na przykład dla podczerwonego), ponieważ bazuje na zależnościach geometrycznych, a nie na bezpośrednim pomiarze. Oszacowane wartości energii promieniowania słonecznego w warunkach podokapowych mogą być podawane przez algorytm w jednostkach absolutnych, np. jako mole strumienia aktywnych fotosyntetycznie fotonów (PFD ang. photosynthetically active photon flux density) [ $\text{mmol} \times \text{s}^{-1} \times \text{m}^{-2}$ ], waty, lub w sposób względny [%], w odniesieniu do ilości energii, jaka dotarłaby na powierzchnię otwartą. Absolutne wartości lepiej określają biofizyczne ograniczenia dla danej lokalizacji, podczas gdy jednostki względne podkreślają pochłanianie promieniowania przez okap drzewostanu (Rich 1990).

Podstawowy względny wskaźnik odnosi się do tego, jaki procent światła pełnego jest dostępny pod okapem. Wskaźnik ten w literaturze anglojęzycznej określany jest jako global site factor (GSF). Nazwa tego wskaźnika odnosi się do dwóch jego właściwości. Słowo global (całkowity, pełny) oznacza, że wskaźnik obejmuje energię niesioną łącznie przez światło bezpośrednie i rozproszone, a słowo site (miejsce) zwraca uwagę, że jest to wartość dla konkretnej lokalizacji pod okapem drzewostanu, w której wykonywano zdjęcie. W tłumaczeniu na język polski można by ten wskaźnik określić, jako lokalny wskaźnik dostępności światła pełnego (WDŚP). W niektórych programach (np. Gap Light Analyzer 2.0) jest on liczony za pomocą wzoru na tzw. gap light index (GLI) zaproponowanego przez Canhama (1988):

$$GLI = \left[ (T_{roz} \times P_{roz}) + (T_{bez} \times P_{bez}) \right] \times 100$$

We wzorze tym występują proporcje pomiędzy światłem rozproszonym (roz) i bezpośrednim (bez) dla powierzchni otwartej w badanej lokalizacji ( $P_{roz}=1-P_{bez}$ ) i w warunkach podokapowych (T). Wskaźniki  $T_{bez}$  i  $T_{roz}$  wyrażone nie jako ułamek, lecz w procentach, w literaturze anglojęzycznej mają własne określenia: Direct Site Factor (DSF) i Indirect Site Factor (ISF), które na język polski można by przetłumaczyć jako wskaźnik dostępności światła bezpośredniego (WDŚB) i wskaźnik dostępności światła rozproszonego (WDŚR). Warto tu przypomnieć, że przy pewnych (omawianych wcześniej) założeniach wartość liczbową WDŚR jest identyczna jak wartość rzeczywistej ażurowości punktowej (ang. weighted canopy openness).

## 6. Wnioski

Fotografia hemisferyczna jest bardzo dobrym narzędziem do badania ażurowości punktowej drzewostanów, natomiast jest zdecydowanie mniej wygodna do określania zwarcia czy też ażurowości powierzchniowej drzewostanów.

Manualne progowanie obrazów utrudnia oszacowanie warunków świetlnych na podstawie zdjęć hemisferycznych. Różnice w ocenie wyników progowania manualnego sprawiają, że trudno uzyskać powtarzalność wyników oszacowań. Z tego względu należy stosować techniki automatycznego progowania obrazów, chociaż czasami stawiają one większe wymagania, co do ekspozycji zdjęć w terenie.

Dodatkową zaletą automatycznego progowania jest możliwość automatyzacji obróbki zdjęć, co może być szczególnie istotne przy analizie większej liczby zdjęć.

Modelowanie warunków świetlnych na podstawie zdjęć hemisferycznych nie może być traktowane jako zamiennik pomiarów bezpośrednich, zwłaszcza przy

bardzo niskim poziomie promieniowania słonecznego pod okapem badanego drzewostanu. Ten rodzaj modelowania może jednak być dobrym narzędziem do porównań warunków świetlnych w obrębie jednego drzewostanu lub w jakimś regionie, ale pod warunkiem ścisłego przestrzegania procedur wykonania i analizy zdjęć.

## Literatura

- Anderson M.C. 1964. Studies of the woodland light climate I. The photographic computation of light condition. *Journal of Ecology*, 52: 27-41.
- Bolibok L. 2010. Sprzęt i ekspozycja zdjęć w fotografii hemisferycznej w badaniach leśnych. *Leśne Prace Badawcze*, 71 (1): 105–115
- Canham C.D. 1988. An index for understory light levels in and around canopy gaps. *Ecology*, 69: 1634-1638.
- Canham C.D., Denslow J.S., Platt W.J., Runkle J.R., Spies T.A., White P.S. 1990. Light regimes beneath closed canopies and tree-fall gaps in temperate and tropical forests. *Canadian Journal of Forest Research*, 20: 620-631.
- Canham C.D., Finzi A.C., Pacala S.W., Burbank D.H. 1994. Causes and consequences of resource heterogeneity in forests: interspecific variation in light transmission by canopy trees. *Canadian Journal of Forest Research*, 24: 337-349.
- Chapman L. 2007. Potential applications of near infra-red hemispherical imagery in forest environments. *Agricultural and Forest Meteorology*, 143: 151-156.
- Chazdon R.L., Field C.B., 1987. Photographic estimation of photosynthetically active radiation: evaluation of a computerized technique. *Oecologia*, 73(4): 525-532.
- Clark D.B., Clark D.A., Rich P.M., Weiss S., Oberbauer S.F., 1996. Landscape-scale evaluation of understory light and canopy structure: methods and application to a neotropical lowland rain forest. *Canadian Journal of Forest Research*, 26: 747-757.
- Englund S.R., O'Brien J.J., Clark D.B. 2000. Evaluation of digital and film hemispherical photography and spherical densitometry for measuring forest light environments. *Canadian Journal of Forest Research*, 30: 1999-2005.
- Easter M.J., Spies T.A. 1994. Using hemispherical photography for estimating photosynthetic photon flux density under canopies and in gaps in Douglas-fir forests of the Northwest Pacific. *Canadian Journal of Forest Research*, 24: 2050-2058.
- Essery R., Pomeroy J., Ellis C., Link T. 2008. Modelling longwave radiation to snow beneath forest canopies using hemispherical photography or linear regression. *Hydrological Processes*, 22, 15, 2788-2800.
- Frazer G.W., Fournier R.A., Trofymow J.A., Hall R.J. 2001. A comparison of digital and film fisheye photography for analysis of forest canopy structure and gap light transmission. *Agricultural and Forest Meteorology*, 109: 249-263.
- Frazer G.W., Trofymow J.A., Lertzman K.P. 2000. Canopy openness and leaf area in chronosequences of coastal temperate rainforests. *Canadian Journal of Forest Research*, 30: 239-256.

- Gap Light Analyzer 2.0, <http://www.ecostudies.org/gla/> (dostęp z dnia: 2009.08.06).
- Gendron F., Messier C., Comeau P.G. 1998. Comparison of various methods for estimating the mean growing season percent photosynthetic photon flux density in forests. *Agricultural and Forest Meteorology*, 92: 55–70.
- Gendron F., Messier C., Lo L., Comeau, P.G. 2006. The angular distribution of diffuse photosynthetically active radiation under different sky conditions in the open and within forest stands. *Annals of Forest Science*, 63: 43–53.
- Grant R.H., Gordon M.H., Gao W. 1996. Photosynthetically-active radiation: sky radiance distributions under clear and overcast conditions. *Agricultural and Forest Meteorology*, 82: 192–267.
- Ishida M. 2004. Automatic thresholding for digital hemispherical photography. *Canadian Journal of Forest Research*, 34: 2208–2216.
- Jennings S.B., Brown N.D., Sheil D. 1999. Assessing forest canopies and understorey illumination: canopy closure, canopy cover and other measures. *Forestry*, 72(1): 59–73.
- Jonckheere I., Fleck S., Nackaerts K., Muysa B., Coppin P., Weiss M., Baret F. 2004. Review of methods for in situ leaf area index determination Part I. Theories, sensors and hemispherical photography. *Agricultural and Forest Meteorology*, 121: 19–35.
- Jonckheere I., Nackaerts K., Muys B., Coppin P. 2005. Assessment of automatic gap fraction estimation of forests from digital hemispherical photography. *Agricultural and Forest Meteorology*, 132: 96–114.
- Kaluża T., Strzełiński P. 2008. Wykorzystanie zdjęć hemisferycznych w badaniach struktury roślinności krzewiastej terenów zalewowych. *Infrastruktura i Ekologia Terenów Wiejskich*, 7: 233–242.
- Kato S., Komiyama A. 2000. A calibration method for adjusting hemispherical photographs to appropriate black-and white images. *Journal of Forest Research*, 5: 109–111.
- Korhonen L., Korhonen K. T., Rautiainen M., Stenberg P. 2006. Estimation of forest canopy cover: a comparison of field measurement techniques. *Silva Fennica*, 40(4): 577–588.
- Kucharik C.J., Norman J.M., Gower S.T. 1998. Measurements of branch area and adjusting leaf area index indirect measurements. *Agricultural and Forest Meteorology*, 91: 69–88.
- Leblanc S.G., Chen J.M., Fernandes R., Deering D.W., Conley A. 2005. Methodology comparison for canopy structure parameters extraction from digital hemispherical photography in boreal forests. *Agricultural and Forest Meteorology*, 129: 187–207.
- Lemmon P.E. 1957. A New Instrument for Measuring Forest Overstorey Density. *Journal of Forestry*, 55(9): 667–668.
- Matusz S. 1960. Metoda określania ażurowości pułapu drzewostanu. *Prace Instytutu Badawczego Leśnictwa*, 202: 3–80.
- Madgwick H.A.I., Brumfield G.L. 1968. The use of hemispherical photographs to assess light climate in the forest. *Journal of Ecology*, 57: 537–542.
- Macfarlane C., Coote, M., White D.A., Adams M.A., 2000. Photographic exposure affects indirect estimation of leaf area in plantations of *Eucalyptus globulus* Labill. *Agricultural and Forest Meteorology*, 100: 155–168.
- Nobis M., Hunziker U. 2005. Automatic thresholding for hemispherical canopy-photographs based on edge detection. *Agricultural and Forest Meteorology*, 128: 243–250.
- Obmiński Z. 1977. Ekologia Lasu. PWN, Warszawa.
- Rich P.M. 1989. A manual for analysis of hemispherical canopy photography. Los Alamos National Laboratory Report LA-11733-M.
- Rich P.M. 1990. Characterizing plant canopies with hemispherical photographs. w: Goel N.S., Norman J.M. (ed.): Instrumentation for studying vegetation canopies for remote sensing in optical and thermal infrared regions. *Remote Sensing Reviews*, 5: 13–29.
- Rich P. M., Clark D. B., Clark D. A., Oberbauer S. F. 1993. Long-term study of solar radiation regimes in a tropical wet forest using quantum sensors and hemispherical photography. *Agricultural and Forest Meteorology* 65(1): 107–127.
- Robakowski P., Modrzyński J., Niemczyk M., Zwaduch P. 2000. Ażurowość i fotosyntetyczna gęstość strumienia fotonów w drzewostanach z odnowieniem jodły pospolitej (*Abies alba* Mill.). *Opera Corcontica*, 37(2): 506–510.
- Robakowski P. 2003. Retrospektywna analiza przyrostów sadzonek jodły pospolitej (*Abies alba* Mill.) rosnących pod okapem różnych gatunków drzew w Karkonoskim Parku Narodowym. *Sylvan*, 1: 41–50.
- Roxburgh J.R., Kelly D. 1995. Uses and limitations of hemispherical photography for estimating forest light environments. *New Zealand Journal of Ecology*, 19(2): 213–217.
- Sławski M. 2000. Możliwość zastosowania pomiarów wskaźnika powierzchni liści (LAI) w monitoringu środowiska leśnego. *Sylvan*, 1: 109–115.
- Strzełiński P. 2006. Zastosowanie zdjęć hemisferycznych w badaniach ekosystemów leśnych. *Roczniki Geomatyki*, 4, 2: 103–112.
- ter Steege H. 1997. WINPHOT, a Windows 3.1 programme to analyse vegetation indices, light and light quality from hemispherical photographs. Tropenbos-Guyana Reports 97-3. Tropenbos - Guyana Programme, Georgetown, Guyana. pp. 1–52.
- Vales D.J., Bunnell F.L. 1985. Comparison of methods for estimating forest overstorey cover. Research, Ministries of Environment and Forests. IWIFR-20. Victoria, B.C.: 1–128.
- Wagner S. 1998. Calibration of grey values of hemispherical photographs for image analysis. *Agricultural and Forest Meteorology*, 90: 103–117.
- Wagner S. 2001. Relative radiance measurements and zenith angle dependent segmentation in hemispherical photography. *Agricultural and Forest Meteorology*, 107: 103–115.
- Welles J., Norman J. 1991. Instruments for indirect measurements of canopy architecture. *Agronomy Journal*, 82: 818–825.
- Włoczewski T. 1968. Ogólna hodowla lasu. PWRiL, Warszawa.
- Zhang Y., Chen J. M., Miller J. R. 2005. Determining digital hemispherical photograph exposure for leaf area index estimation. *Agricultural and Forest Meteorology*, 133: 166–181.