

Leszek Bolibok<sup>1</sup>

## Sprzęt i ekspozycja zdjęć w fotografii hemisferycznej w badaniach leśnych

Equipment and photo exposure in hemispherical photography in forest research

**Abstract.** The first and very important step in modeling regime of solar radiation below forest canopies is acquisition of proper canopy picture. This review is focused on factors influencing quality of hemispherical photographs applied for modeling of light conditions under canopy. Although numerous cameras and lenses are presently offered on the market, only few types may be considered useful for this purpose. The quality of picture depends not only on quality of camera lenses and sensor, but on proper exposure as well. The overexposure (2-3 EV) based on open sky light measurements is suggested to achieve proper quality photographs with high contrast between sky and forest canopy elements.

**Key words:** equipment selection, lenses optical properties, picture acquisition protocol, exposure correction

### 1. Wstęp

Badania czynników wpływających na dynamikę niałotów i podrostów mają podstawowe znaczenie w doskonaleniu metod odnawiania drzewostanów. Sprzyjający mikroklimat radiacyjny (promieniowanie słoneczne docierające do dolnych warstw drzewostanu, zarówno aktywne fotosyntetycznie, jak i ciepłe) jest jednym z ważniejszych czynników warunkujących sukces odnowienia. Bezpośrednia charakterystyka mikroklimatu radiacyjnego wymaga złożonych pomiarów i dość zróżnicowanego oprzyrządowania. W drzewostanach intensywnie penetrowanych przez ludzi (np. grzybiarzy) ryzykowne może się okazać pozostawianie w lesie cennej aparatury do pomiarów bezpośrednich przez kilka tygodni czy miesięcy.

Z wyżej wymienionych powodów równoległe do metod bezpośrednich rozwijają się metody pośrednie, które na podstawie analizy struktury sklepienia drzewostanu zmierzają do charakterystyki warunków wzrostu odnowień (Liefers et al. 1999, Lhotka et Loewenstein 2006, Fiala et al. 2006). Jedną z najbardziej zaawansowanych metod pośrednich jest analiza zdjęć hemisferycznych obrazujących strukturę sklepienia drzewostanu. Obecnie, w dobie gwałtownego rozwoju fotografii

cyfrowej, metoda ta staje się coraz łatwiejsza i tańsza w stosowaniu.

Zdjęcie hemisferyczne jest projekcją obrazu całej hemisfery (np. nieboskłonu) na płaszczyznę (np. matrycę w aparacie cyfrowym), dokonywaną za pomocą specjalnego obiektywu krótkoogniskowego typu rybie oko. Pierwszy obiektyw tego typu powstał na potrzeby badań meteorologicznych, aby utrwalić kompletny obraz nieboskłonu w wybranym momencie (Hill 1924, za Chazdon et Field 1987). Stosunkowo szybko fotografia hemisferyczna znalazła zastosowanie w badaniach leśnych. Evans i Coombe (1959) próbowali oszacować przenikanie światła przez luki w warstwie koron poprzez nanoszenie wykresu pozornej drogi słońca po nieboskłonie na zdjęcie hemisferyczne wykonane pod okapem drzewostanu. Anderson (1964) przedstawiła podstawy obliczeniowe oszacowania dostępu światła bezpośredniego i rozproszonego na podstawie analizy zdjęć hemisferycznych. Wzrost dostępności komputerów i odpowiedniego oprogramowania (Chazdon et Field 1987, Rich 1989), wykonującego długie i żmudne obliczenia konieczne przy analizie zdjęć, przyczynił się do upowszechnienia tej metody badawczej. Jednocześnie poszerzeniu uległ zakres stosowania tej metody. Początkowo utrwalony obraz struktury warstwy koron służył jedynie do charakterystyki warunków

<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

światlnych. Wraz ze wzrostem znaczenia wskaźnika powierzchni liści (LAI) w badaniach ekologicznych, fotografia hemisferyczna stała się jednym z podstawowych narzędzi do jego oszacowania (Jonckheere et al. 2004). Analiza zdjęć hemisferycznych pozwala również modelować dopływ promieniowania cieplnego do dna lasu, co jest wykorzystywane do oszacowania np. tempa tania śniegu (Hardy et al. 2004).

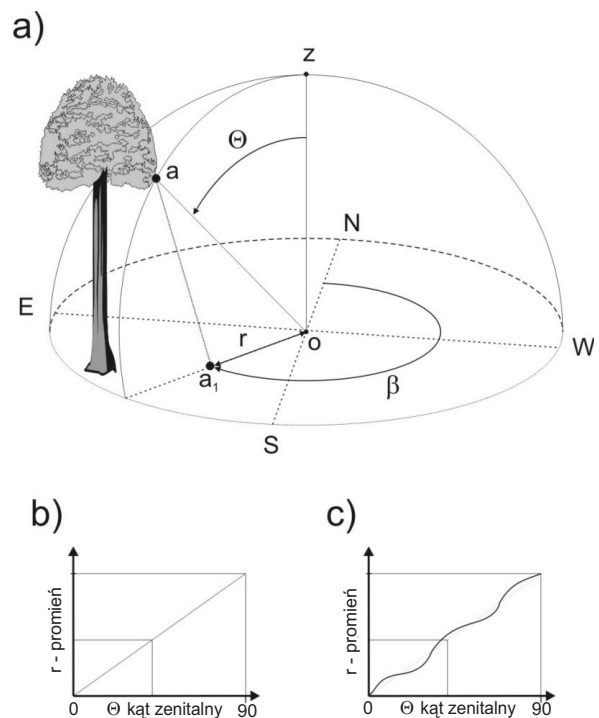
Pierwszym warunkiem odniesienia sukcesu w modelowaniu przenikania promieniowania słonecznego pod okap drzewostanu jest uzyskanie wartościowego obrazu sklepienia drzewostanu. W dalszej części tego artykułu omówione zostaną czynniki mogące niekorzystnie wpływać na przydatność fotografii hemisferycznych do charakterystyki warunków świetlnych pod okapem drzewostanu, w lukach i na gniazdach oraz metodyka ustalania parametrów ekspozycji pozwalających uzyskać zdjęcia wysokiej jakości, przydatne do analiz. Analiza takich zdjęć pozwala oszacować warunki świetlne porównywalnie, w większości warunków drzewostanowych, z pomiarami bezpośrednimi (por. Chazdon et Field 1987, Gendron et al. 1998).

## 2. Obiektywy hemisferyczne

Najczęściej w badaniach używane są obiektywy hemisferyczne typu kolistego rybie oko (ang. circular fish-eye), dające odwzorowanie hemisfery w postaci kolistego obrazu całkowicie wpisanego w kadr i otoczonego czarnym (nie nasświetlonym) obszarem. Rzadziej stosowane są obiektywy typu rybie oko pełnoklatkowe (Macfarlane et al. 2007), w których kołowy obraz jest opisany na prostokącie kadru (ang. fulframe fish-eye). Obraz wypełnia kadr całkowicie, lecz znaczna jego część „wylewa się” poza kadr.

Położenie przestrzenne wybranego obiektu na hemisferze (np. punktu „a” na krawędzi łuki w sklepieniu drzewostanu; ryc. 1a.) można określić przez wskazanie dwóch kątów: kąta zenitalnego ( $\Theta$ ) i azymutu ( $\beta$ ). Wierzchołek kąta zenitalnego znajduje się w środku koła (o) stanowiącego podstawę hemisfery, jedno z ramion skierowane jest pionowo w najwyższy punkt hemisfery (z), a drugie przechodzi przez wybrany punkt (a). Obiektyw typu kolistego rybie oko odwzorowuje obraz hemisfery tak, że zenit nieboskłonu (z) znajduje się dokładnie w centrum kadru, w środku koła „o”, a horyzont na krawędziach kolistego odwzorowania. Położenie obrazu obiektu ( $a_1$ ) w kadrze można określić za pomocą współrzędnych kątowych. W odwzorowaniu zostaje zachowany azymut ( $\beta$ ), natomiast kąt zenitalny jest transformowany na odległość od środka koła ( $r$ ). Sposób odwzorowania hemisfery na powierzchnię błony fotograficznej lub matrycy światłoczułej aparatu

zależy od konstrukcji optycznej obiektywu (Herbert 1987). Z reguły obiektywy hemisferyczne nie zmieniają wartości azymutu obiektu, więc różnice między nimi dotyczą odwzorowania kąta  $\Theta$  w odległość  $r$ . Najczęściej stosowane w badaniach są obiektywy z odwzorowaniem równoodstępnym (ang. polar projection, equiangular projection). W tym odwzorowaniu zaprojektowanym przez Hilla (1924, za Chazdon et Field 1987) kąt zenitalny  $\Theta$  obiektu jest liniowo transformowany na odległość od środka kadru (ryc. 1b). Obiekty znajdujące się niżej nad horyzontem będą odwzorowane proporcjonalnie bliżej krawędzi kolistego odwzorowa-



**Rycina 1. Projektcja hemisfery na płaszczyznę: a) kąt zenitalny  $\Theta$  i azymut  $\beta$  opisujące położenie punktu (a) w przestrzeni oraz odległość  $r$  i azymut  $\beta$  opisujące położenie obrazu punktu ( $a_1$ ) na płaszczyźnie, b) teoretyczna liniowa zależność pomiędzy kątem zenitalnym  $\Theta$  a odległością  $r$  obrazu obiektu ( $a_1$ ) od środka płaszczyzny (o) w odwzorowaniu równoodstępnym, c) nieliniowa zależność pomiędzy kątem zenitalnym  $\Theta$  a odległością obrazu obiektu ( $a_1$ ) od środka płaszczyzny w odwzorowaniu dokonywanym przez rzeczywisty obiektyw**

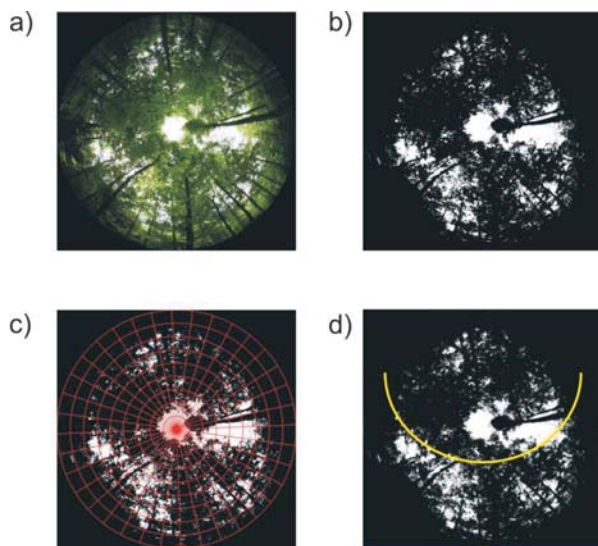
Figure 1. Hemispherical projection: a) zenithal angle  $\Theta$  and azimuth  $\beta$  describing placement of the point (a) in a three dimensional space and distance  $r$  and azimuth  $\beta$  describing placement of the point image ( $a_1$ ) on a plane; b) theoretical linear relationship between zenithal angle  $\Theta$  and distance  $r$  from the center of the plane (o) to the point image ( $a_1$ ) in equiangular projection, c) nonlinear relationship between zenithal angle  $\Theta$  and distance  $r$  from the center of the plane in the projection made by real lenses

nia. Ponadto obiekty (np. luki w sklepieniu drzewostanu) o tych samych wymiarach kątowych na hemisferze będą miały takie same rozmiary liniowe w kadrze.

### 3. Procedura wykonywania i analizy cyfrowych zdjęć hemisferycznych

Aby zdjęcia hemisferyczne dostarczyły informacji porównywalnych z bezpośrednim pomiarem warunków świetlnych, konieczne jest rygorystyczne przestrzeganie procedury ich wykonywania i analizy. Procedura ta składa się z następujących etapów: wykonanie dobrej jakości zdjęcia (ryc. 2a), segmentacja zarejestrowanego obrazu (ryc. 2b) i interpretacja przetworzonego obrazu obejmująca: oszacowanie dopływu światła rozproszonego (ryc. 2c) i bezpośredniego (ryc. 2d).

Dobra jakość zdjęcia hemisferycznego oznacza przede wszystkim, że uzyskano zbalansowany kontrast pomiędzy elementami zasłaniającymi niebo-



**Rycina 2. Etapy wykonania i obróbki fotografii hemisferycznej: a) wykonanie zdjęcia, b) segmentacja zdjęcia, c) analiza przenikania światła rozproszonego przez sklepienie drzewostanu - zliczanie czarnych i białych pikseli w poszczególnych partiach obrazu, szacowanie ażurowości i LAI, d) analiza przenikania światła bezpośredniego poprzez wykreślenie pozornej drogi słońca po nieboskloń. Oryginalne zdjęcie zostało przetworzone za pomocą programu GLA 2.0 (Gap Light Analyzer 2.0 <http://www.ecostudies.org/gla/> dostęp z dnia 2009.08.06)**

Figure 2. Steps of hemispherical photography acquisition and analysis: a) acquisition of good quality picture, b) picture segmentation, c) analysis of diffuse light penetration through canopy based on counting of black and white pixels in selected picture fragments, estimation of canopy openness and LAI, d) analysis of direct light penetration through canopy based on modeling of sun disc movement above canopy

skłon (liśćmi, gałęziami, pniami drzew) a nie zasłoniętymi fragmentami nieba (ryc. 2a), pozwalający na ich rozróżnienie. Niestety nie można tutaj liczyć na wbudowaną w większość współczesnych aparatów cyfrowych automatykę, ponieważ ta została zoptymalizowana pod innym kątem. Zarejestrowany cyfrowo obraz sklepienia drzewostanu to macierz składająca się z pikseli, których jasność waha się zależnie od tego, czy przedstawiają jasne fragmenty zdjęcia (nie zasłonięte niebo) czy ciemne (ocieniony pień drzewa). Jasność każdego piksela jest określona liczbowo. Wartość piksela jest określaną jako DN (ang. digital number).

Segmentacja obrazu to proces, w którym poszczególne piksele tworzące zdjęcie są zaliczane do oddzielnych kategorii. Zazwyczaj celem tego procesu jest rozróżnienie pikseli obrazu przedstawiających niezasłonięty nieboskłon od pikseli przedstawiających elementy sklepienia drzewostanu. Najczęściej stosowaną metodą segmentacji, choć nie zawsze najlepszą, jest progowanie (ang. thresholding). Polega ono na subiektywnym bądź zautomatyzowanym ustaleniu progowej wartości jasności piksela (DN). Piksele o większej jasności są interpretowane jako niezasłonięty nieboskłon i przypisywana jest im maksymalna wartość DN (stają się białe). Piksele o mniejszej lub równej wartości DN są interpretowane jako obraz elementów sklepienia drzewostanu i przypisywana jest im minimalna wartość DN (stają się czarne) (ryc. 2 b).

Do interpretacji zdjęcia stosuje się program komputerowy, który wykorzystuje informację zawartą w przetworzonym zdjęciu do modelowania warunków świetlnych w miejscu wykonania fotografii. Ponieważ nie jest to pomiar bezpośredni, program ten liczy tylko, jaka część światła docierającego nad sklepienie drzewostanu mogłaby dotrzeć pod okap drzewostanu do miejsca, gdzie został umieszczony obiektyw aparatu. Podstawą do obliczeń jest ustalenie, jakim wycinkom hemisfery odpowiadają poszczególne piksele obrazu. Stosowany program wykonuje to zadanie, uwzględniając informację o projekcji użytego obiektywu fotograficznego.

Obliczenia przebiegają zazwyczaj dwutorowo, z rozbićciem na światło bezpośrednie docierające do badanego punktu z dysku słonecznego oraz na światło rozproszone docierające do badanego punktu ze wszystkich niezasłoniętych fragmentów nieba.

W przypadku analizy dopływu światła rozproszonego kolisty obraz hemisfery jest dzielony na mniejsze sektory (ryc. 2c), w których ustalany jest procent powierzchni hemisfery zasłonięty przez czarne piksele (elementy sklepienia drzewostanu) i na podstawie przyjętych w modelu założeń dotyczących intensywności światła rozproszonego docierającego z różnych sektorów nieba szacowany jest procent światła zatrzymanego przez korony drzew.

Do oszacowania, jaka część światła bezpośredniego docierałaby do miejsca wykonania zdjęcia, niezbędne są dodatkowe informacje dotyczące szerokości geograficznej, na jakiej znajdował się aparat fotograficzny, oraz orientacji obrazu fotograficznego względem kierunków geograficznych (podczas wykonywania zdjęcia zazwyczaj aparat jest ustawiany tak, aby boki kadru były równoległe do głównych kierunków geograficznych). Na podstawie tych informacji można modelować pozorny ruch słońca po nieboskłonie dla każdego dnia w roku (ryc. 2d) i obliczyć czas, w którym światło bezpośrednie docierałoby do obiektu z dysku słonecznego nie zasłoniętego przez korony drzew (przez białe piksele).

#### **4. Przyczyny błędów szacowania warunków świetlnych pod okapem za pomocą fotografii hemisferycznej**

Uzyskanie wiarygodnej charakterystyki warunków świetlnych w miejscu wykonania zdjęcia hemisferycznego wymaga skrupulatnego przestrzegania procedury wykonywania i analizy zdjęć. Rich (1990) szczegółowo wymienił źródła błędów, jakie mogą pojawić się na trzech głównych etapach procedury: 1) przy wykonywaniu zdjęcia, 2) przy jego skanowaniu 3) przy analizie obrazu. Rozwój fotografii cyfrowej wyeliminował problem skanowania obrazów rejestrowanych na kliszy fotograficznej i liczne źródła błędów, które mogłyby na tym etapie procedury powstawać. Wykonywanie zdjęć hemisferycznych za pomocą współczesnych aparatów cyfrowych pozwala na uzyskanie podglądu wykonanego zdjęcia i na ponowne wykonanie zdjęcia w przypadku, gdyby poprzednie okazało się być niezadowolające. W przypadku zdjęć wykonywanych tradycyjną metodą, efekt był widoczny dopiero po odebraniu zdjęć z laboratorium fotograficznego, co w przypadku niezadowolającej jakości zdjęć oznaczało konieczność ponownej wyprawy do badanego drzewostanu. Dawniej badacze chcąc zabezpieczyć się przed taką ewentualnością, w każdym badanym punkcie wykonywali po kilka zdjęć, często z różnymi ustawieniami ekspozycji. W przypadku fotografii cyfrowej takie postępowanie również może okazać się przydatne. Ze względu na dużą pojemność pamięci aparatów cyfrowych będzie to o wiele prostsze i tańsze niż ponowne wizyty w badanym drzewostanie.

Za przydatne do analizy może być uznane takie zdjęcie hemisferyczne, na którym elementy sklepienia drzewostanu i fragmenty niezasłoniętego nieba są przedstawione w rzeczywistych proporcjach. Różne czynniki mogą sprawiać, że luki w sklepieniu drzewostanu bywają rejestrowane jako większe, niż są w istocie,

bądź odwrotnie, w ogóle nie są rejestrowane. Poprawnie zarejestrowany obraz sklepienia drzewostanu jest podstawą do prawidłowej segmentacji obrazu. Na uzyskanie przydatnego do analizy cyfrowego zdjęcia hemisferycznego mają wpływ dwie grupy czynników: właściwości sprzętu fotograficznego (np. rodzaj matrycy rejestrującej obraz w aparacie) oraz technika wykonywania fotografii (np. wybór właściwej ekspozycji zdjęcia lub terminu wykonania zdjęcia).

#### **5. Właściwości sprzętu a jakość wykonywanych zdjęć**

Skompletowanie sprzętu fotograficznego niezbędnego do rejestracji przydatnych zdjęć hemisferycznych może wiązać się z większymi wydatkami. Niebagatelną pozycją w liście zakupów jest wysokiej jakości obiektyw hemisferyczny. Tańszą, lecz raczej gorszą alternatywą, mogą być stosowane w fotografii amatorskiej nasadki na obiektywy standardowe. Pozwalają one uzyskać obraz podobny do zdjęć wykonanych specjalistycznym obiektywem. W początkach stosowania fotografii hemisferycznej (Chazdon i Field 1987), jak i obecnie (Strzeliński 2006), wykorzystywano takie rozwiązania. We współczesnych publikacjach stosunkowo dużo uwagi poświęcono nasadce FC-E8 (Hale et Edwards 2002, Zhang et al. 2005, Inoue et al. 2004, Leblanc et al. 2005) dedykowanej do popularnych aparatów fotograficznych serii CoolPix (modele 900, 950, 990, 4500, 5000) firmy Nikon. Obraz uzyskany w ten sposób jest zwykle gorszej jakości niż uzyskany za pomocą lepszych układów optycznych (Frazer i in. 2001). Szybki rozwój technologii aparatów cyfrowych sprawia, że publikacje naukowe oceniające przydatność konkretnego aparatu w warunkach terenowych ukazują się zazwyczaj, gdy jest on wycofywany ze sprzedaży. Jak wykazały badania Inoue i in. (2004), wybór modelu aparatu cyfrowego serii CoolPix może mieć istotny wpływ na wyniki badań.

Idealny obiektyw powinien odwzorować punktowe źródło światła w obrębie jednego piksela matrycy. Rozproszenie wiązki światła przechodzącej przez elementy obiektywu sprawia, że część światła trafia do sąsiednich pikseli i jest odwzorowana jako tzw. krążek rozproszenia. Im mniejszy jest krążek rozproszenia, tym ostrzej obiektyw rysuje obraz. Zjawisko, które jedynie trochę pogarsza jakość amatorskich fotografii, może mieć istotny wpływ na wyniki badań naukowych. Du i Voss (2004) zbadali rozpraszanie jednobarwnego promienia laserowego przez elementy optyki obiektywu i stwierdzili, że chociaż krążek rozproszenia ma dość ostre granice, to jednak światło może się rozpraszać na „odległość” do stu pikseli od właściwego piksela przedstawiającego punktowe źródło światła. W bada-

niach radiometrycznych sumowanie się tego zjawiska daje istotne różnice. Jak zauważają Kuusk i Paas (2007), nawet drobne zarysowania zewnętrznej soczewki obiektywu lub zakurzenie może istotnie zwiększać wielkość krążka rozproszenia.

Światło białe przechodząc przez soczewki obiektywu ulega refrakcji (rozszczepieniu, tak jak w doświadczeniu z pryzmatem) na granicy ośrodków. W układach optycznych refrakcja powoduje aberrację chromatyczną widoczną na granicach kontrastowych obszarów (krawędzie koron drzew) pod postacią kolorowej obwódki (pomarańczowej lub niebieskiej) W obiektywach wysokiej jakości materiał, z którego wykonane są soczewki, w znacznym stopniu ogranicza to zjawisko. W tańszych rozwiązaniach optycznych pojawia się rozszczepienie kolorów, zwłaszcza przy krawędziach kadru. Szczególnie źle pod tym względem wypada wspomniana nasadka FC-E8 (Frazer et al. 2001). Nieskorygowanie aberracji chromatycznej może mieć negatywny wpływ na przebieg procesu progowania zdjęcia i co za tym idzie – na ocenę warunków świetlnych.

Obiektywy typu rybie oko mogą się różnić sposobem odwzorowania obrazu. Jeżeli chodzi o badania warunków świetlnych pod sklepieniem drzewostanu, to sposób odwzorowania właściwie nie ma znaczenia, natomiast znaczenie ma model obiektywu. Dwa obiektywy o takiej samej ogniskowej i o takim samym odwzorowaniu, ale o różnej jasności, mogą tworzyć istotnie różne odwzorowania obrazu sklepienia drzewostanu na matrycy aparatu fotograficznego. Wynika to ze zjawiska określanego jako dystorsja obrazu. Jest to wada układu optycznego polegająca na różnym powiększeniu obrazu w zależności od jego odległości od osi optycznej instrumentu. W przypadku odwzorowania równokątnego zależność pomiędzy kątem zenitalnym obiektu w sklepieniu drzewostanu a odległością obrazu obiektu od środka matrycy powinna mieć charakter liniowy (ryc. 1b). Na skutek dystorsji zależność ta nie jest prosto-liniowa nawet w wysokiej klasy obiektywach. Herbert (1987) wykazał, że nieuwzględnienie dystorsji obiektywu podczas interpretacji zdjęcia może prowadzić do istotnych błędów w oszacowaniu warunków świetlnych. Z tego powodu w większości algorytmów do analizy zdjęć hemisferycznych przewidziano opcję korekty dystorsji. Przed zakupem obiektywu należałoby sprawdzić, czy dany model obiektywu został uwzględniony w używanym oprogramowaniu i czy będzie możliwe stosowanie poprawki. Jeżeli nie został, to kupując taki obiektyw należy się liczyć z koniecznością samodzielnej kalibracji obiektywu (ustalenia matematycznej formuły funkcji opisującej rzeczywiste odwzorowanie obiektywu – por. Schwalbe 2005) i wprowadzenia funkcji korygującej do posiadanego oprogramowania (jeżeli takie uzupełnienie jest możliwe).

Jasność obiektywu, rozumiana jako ilość światła przepuszczanego przez obiektyw do wnętrza aparatu, charakteryzowana za pomocą tzw. liczby przysłony  $F$ , może mieć istotne znaczenie przy fotografowaniu sklepienia drzewostanu Im mniejsza jest wartość  $F$ , tym jaśniejszy jest obiektyw. Jaśniejszy obiektyw pozwala na stosowanie krótszego czasu rejestracji obrazu. Dzięki temu liście i pędy drzew na obrazie sklepienia pozostają nieporuszone, a zdjęcie jest przydatne do analizy.

Winietowanie jest wadą obiektywów polegającą na niedoświetleniu brzegów kadru. W przypadku obiektywów typu rybie oko oznacza to gorsze rejestrowanie luk w sklepieniu drzewostanu, które mają wysoką wartość kąta zenitalnego. Silne winietowanie obiektywu może oznaczać, że przy brzegu kolistego obrazu niektóre luki nie zostaną zarejestrowane w ogóle (zwykle te najmniejsze). Inne będą zarejestrowane jako obszary o małej jasności i w procesie progowania będą zakwalifikowane do kategorii „elementy sklepienia drzewostanu”, co zafałszuje wyniki analizy warunków świetlnych (Wagner 1998). Nawet w przypadku obiektywów sygnowanych przez dobrych producentów sprzętu optycznego nasilenie winietowania może być znaczne (Wagner 2001).

Istnieje kilka przesłanek technicznych mogących wpływać na wybór aparatu fotograficznego. Pierwszą z nich jest wielkość matrycy wyrażona w pikselach. Im większa jest matryca, tym z większą rozdzielczością można będzie zarejestrować obraz. Spadnie wówczas odsetek tzw. pikseli mieszanych, obejmujących wycinek nieboskłonu, w którym występują razem elementy sklepienia drzewostanu i otwarte niebo. Przy dużej matrycy zamiast jednego piksela o uśrednionej jasności (DN) uzyskuje się w obrazie kilka pikseli ciemnych (sklepienie) i kilka jasnych (niebo). Duża rozdzielczość obrazu zdecydowanie poprawia precyzję interpretacji zdjęcia (Blennow 1995, Inoue et al. 2004, Macfarlane et al. 2007). Ostatnio nawet popularne kompaktowe aparaty amatorskie mają matryce typu CCD (ang. Charge Coupled Device) o bardzo dużej liczbie pikseli. Niestety duże upakowanie elementów światłoczułych na małej powierzchni potęguje zjawisko przelewania się ładunków elektrycznych (ang. blooming) z intensywnie naświetlonych pikseli do pikseli przyległych. Na skutek tego zjawiska obraz małych silnie naświetlonych luk jest nieproporcjonalnie duży do ich rzeczywistej wielkości. Matryce fotograficzne o innej konstrukcji, typu CMOS (ang. Complementary Metal Oxide Semiconductor), są mniej podatne na takie zakłócenia. Ten typ matrycy jest często stosowany w droższych aparatach (głównie cyfrowych lustrzankach). Podjęcie decyzji o zakupie wymiennego obiektywu typu rybie oko bardzo ogranicza wybór modelu cyfrowego aparatu fotograficznego. Muszą to być aparaty tzw. pełnoklatkowe. To żargonowe określenie oznacza, że rozmiary fizyczne matrycy

światłoczułej (w mm) są identyczne bądź bardzo zbliżone (np. w Canonie 5D 23,9×35,8 mm) do rozmiarów jednej klatki błony filmowej formatu 35 mm (24×36 mm). Po zamontowaniu obiektywu typu rybie oko przeznaczonego do aparatów formatu 35 mm do aparatu niepełnoklatkowego, obraz sklepienia drzewostanu po prostu nie zmieściłby się na mniejszej matrycy. Cyfrowe aparaty pełnoklatkowe (zazwyczaj droższe aparaty profesjonalne) dają mniej szumów, czyli przypadkowo pojawiających się na zdjęciu plamek na obszarach jednolitego koloru, które podczas progowania mogą zostać uznane za luki. Zjawisko szumów w tańszych aparatach nasila się w przypadku wykonywania zdjęć w trybie podwyższonej czułości matrycy (ISO100). Aparaty pełnoklatkowe mają zdecydowanie mniejsze szumy w tym trybie pracy, co może okazać się szczególnie korzystne, gdy zdjęcia są wykonywane w słabym oświetleniu pod okapem gęstego drzewostanu.

## 6. Pozycjonowanie aparatu

W celu wykonania przydatnego zdjęcia aparat musi być zamontowany na statywie. Dzięki temu podczas dłuższego czasu ekspozycji pozostaje on nieruchomy, co ułatwia uzyskanie „ostrych” zdjęć. Jeżeli warunki świetlne pod okapem wymuszają dłuższy czas otwarcia migawki (1/60 s), to zamiast ręcznego wyzwiania migawki (zależnie od posiadanego wyposażenia) należy stosować wężyk spustowy, zdalny wyzwalacz lub opóźnione samoczynne otwarcie migawki. Zamocowanie aparatu na statywie pozwala również precyzyjnie zorientować aparat fotograficzny w przestrzeni. Oś optyczna obiektywu musi być skierowana pionowo w górę. Można to uzyskać poprzez zamontowanie na statywie głowicy samopoziomującej się, bądź poprzez regulację położenia aparatu w oparciu o poziomnicę fotograficzną wsuniętą w uchwyt mocujący lampę błyskową. Ponadto, aby możliwe było modelowanie dostępu światła bezpośredniego do dna lasu na podstawie zdjęcia, krawędzie prostokątnej matrycy rejestrującej obraz muszą być równoległe do głównych kierunków geograficznych. Regulacji położenia aparatu dokonuje się na podstawie wskazań busoli. Zwyczajowo krótsza oś matrycy jest równoległa do kierunku NS. Podczas fotografowania należy zdecydować, czy górna część matrycy jest skierowana na północ czy na południe i pamiętać o podjętej decyzji podczas obróbki zdjęcia w programie do analizy warunków świetlnych. Podczas wykonywania zdjęcia warto zarejestrować pozycję geograficzną i wysokość n.p.m. za pomocą odbiornika

GPS. Jeżeli warunki drzewostanowe utrudniają odczyt danych GPS w miejscu wykonywania zdjęcia (Bolibok 2005), wystarczające będą dane odczytane w pobliższej większej luce. Informacje te są przydatne z dwóch powodów. Po pierwsze są one (w zasadzie tylko szerokość geograficzna) wymagane przez program analizujący zdjęcie. Drugim powodem jest deklinacja magnetyczna, skutkująca rozbieżnością pomiędzy północą magnetyczną (wskazywaną przez busolę) i północą geograficzną. Orientacja obrazu względem północy geograficznej jest konieczna do prawidłowej interpretacji zdjęcia. Na podstawie położenia geograficznego można po wykonaniu zdjęcia ustalić poprawkę na deklinację magnetyczną (np. na podstawie serwisu internetowego NGDC<sup>1</sup>), a następnie wprowadzić tą informację do programu analizującego zdjęcie. W przypadku rejestracji zdjęć na potrzeby szacowania wskaźnika powierzchni liści (LAI) należy dodatkowo zwrócić uwagę, czy badany drzewostan znajduje się na terenie płaskim. W drzewostanach rosnących na zboczu sklepienie drzewostanu wydaje się zazwyczaj rzadsze, gdy obserwator spogląda w dół stoku, w porównaniu do wrażenia, gdy spogląda w górę stoku (przy założeniu, że oceniany jest wycinek niebosłonu o tym samym kącie zenitalnym). Wynika to z dłuższej drogi światła przez warstwę koron w drugim przypadku (Monteset al. 2007). Aby wprowadzić poprawkę w obliczeniach, należałoby zanotować wartość pochylenia stoku, bowiem ma ona duży wpływ na wynik oszacowania tego wskaźnika (Schleppi et al. 2007).

Ważnym zaleceniem praktycznym jest wykonywanie zdjęć przy równomiernie i całkowicie zachmurzonym niebie lub przy niebie bezchmurnym, ale przed wchodem lub po zachodzie słońca. Unika się w ten sposób silnego zróżnicowania jasności niebosłonu w obrębie kadru.

## 7. Ekspozycja automatyczna

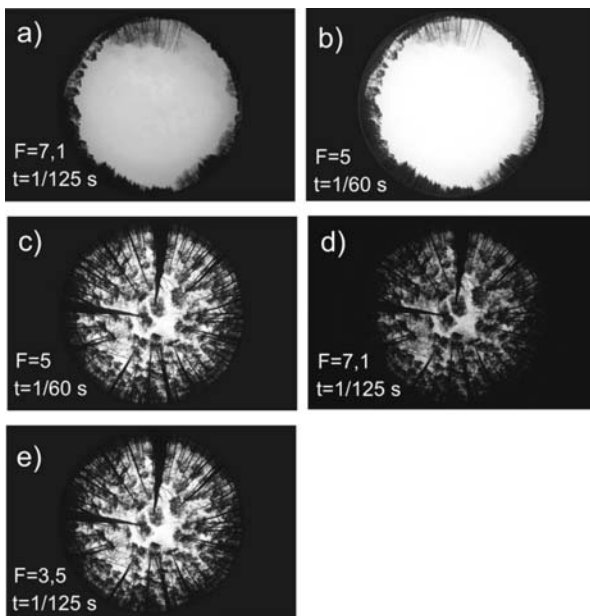
Podstawowym warunkiem wykonania przydatnego do analiz zdjęcia jest prawidłowa ekspozycja. Ekspozycja jest to ilość światła padającego na błonę fotograficzną lub matrycę konieczna do zarejestrowania prawidłowego zdjęcia. Określenie „prawidłowa” w tym przypadku jest pojęciem względnym, bowiem inna ilość światła powinna zostać dopuszczona do matrycy, gdy zamierzeniem fotografującego jest uzyskanie zdjęcia przydatnego do segmentacji, a inna gdy celem jest zdjęcie ilustracyjne. W przypadku zdjęć przydatnych do segmentacji należy tak regulować parametry ekspozycji,

<sup>1</sup> NGDC <http://www.ngdc.noaa.gov/geomag/declination.shtml>, dostęp z dnia 16.06.2009

aby niezastłonięte fragmenty nieboskłonu były odwzorowane w jak najjaśniejszych barwach (najlepiej białej), a elementy sklepienia drzewostanu w możliwie najciemniejszych.

Ilość światła, jaką należy „wpuścić”, zależy od ustawienia czułości matrycy aparatu cyfrowego i jest regulowana czasem otwarcia migawki i przysłoną aparatu. Zaletą krótkiego czasu naświetlania jest ograniczenie nieostrości obrazu związanej z poruszaniem się fotografowanych obiektów w trakcie ekspozycji. Krótki czas ekspozycji „unieruchamia” korony drzew poruszane lekkimi powiewami wiatru. Frazer i in. (1997) zalecają, aby przy wietrznej pogodzie stosować czas naświetlania nie dłuższy niż 1/125 s. Oczywiście krótki czas otwarcia migawki musi być kompensowany przez równoczesne zwiększenie otworu przysłony, w przeciwnym razie zdjęcie może stać się bardzo niedoświetlone i mało kontrastowe (por. Zhang i in. 2005, ryc. 3).

Przysłona aparatu przy wykonywaniu zdjęć zwykłym obiektywem wpływa na głębię ostrości zdjęcia. W przypadku obiektywów hemisferycznych o bardzo krótkiej ogniskowej (8 lub 10 mm) nie ma to praktycznie znaczenia. Mają one bardzo dużą głębię ostrości i już



**Rycina 3. Zdjęcia wykonane na otwartej przestrzeni: a) z automatycznym ustawieniem ekspozycji, b) z prześwietleniem 2 EV; oraz pod okapem dojrzałego drzewostanu sosnowego: c) z automatycznym ustawieniem ekspozycji, d) z niedoświetleniem 2 EV, e) z prześwietleniem 2 EV**

Figure 3. Examples of manual exposition correction:

- a) picture made on the open area with automatic exposition,
- b) picture made in the same place with overexposure +2EV,
- c) picture made under canopy of old Scots pine stand with automatic exposition, d) picture made in the same place with underexposure -2EV, e) picture made in the same place but with exposure value EV the same value as in picture 3b

przy szeroko otwartej przysłonie pozwalają na uzyskanie wyraźnych konturów elementów sklepienia drzewostanu. Stosowanie wyższych wartości przysłony (mniejszego otworu) może natomiast ograniczać aberracje chromatyczne w obrazie. Należy jednak pamiętać, że zwiększenie liczby przysłony oznacza konieczność wydłużenia czasu ekspozycji, co zwiększa prawdopodobieństwo, iż obraz będzie „poruszony”.

Zdecydowana większość współczesnych aparatów cyfrowych posiada opcję automatycznego ustawiania ekspozycji. Aparat po uwzględnieniu zadanej czułości matrycy, sam ustala czas otwarcia migawki i liczbę przysłony. Algorytm optymalizujący te parametry ekspozycji bierze pod uwagę wskazania wbudowanego w aparat światłomierza mierzącego ilość światła (luminację) docierającego z fotografowanej sceny. Następnie automatycznie ustala parametry ekspozycji, zakładając, że światło dociera z jasnoszarej powierzchni odbijającej 18% światła (Macfarlane et al. 2000). W praktyce oznacza to, że korzystając z automatycznego ustalania ekspozycji do zrobienia zdjęcia obejmującego jedynie idealnie białą kartkę papieru z otrzymamy obraz jasnoszary. Podobny efekt będzie również przy fotografowaniu czarnej kartki papieru. Mniej abstrakcyjny przykład działania tego algorytmu można zaobserwować analizując zdjęcia zaśnieżonego krajobrazu wykonane w dzień słoneczny z wykorzystaniem automatycznej ekspozycji. Śnieg jest na nich nie biały, lecz szary. Sytuacje takie należą do ekstremalnych sytuacji fotograficznych. W większości zwykłych sytuacji fotograficznych opisywany automatyczny algorytm ustala parametry ekspozycji (czas otwarcia migawki i liczbę przysłony) tak, aby w miarę możliwości widoczne były szczegóły obrazu w jasnych (różne odcienie chmur) i ciemnych obszarach kadru (różne odcienie liści i gałęzi). Takie ustawienia nie są najlepsze dla szacowania warunków świetlnych. Automatyczne ustawienie ekspozycji zazwyczaj daje mały kontrast pomiędzy niezakrytym nieboskłonem a koronami drzew, utrudniający późniejszą segmentację zdjęcia. Analiza tego typu zdjęć daje szczególnie duże błędy w drzewostanach o bardzo dużym lub bardzo małym zwarcie (Zhang et al. 2005). Liczne badania wskazują, że cyfrowe fotografie hemisferyczne wykonane w trybie automatycznej ekspozycji pod gęstym sklepieniem drzewostanu mają tendencję do zawyżania warunków świetlnych (Englund et al. 2000, Frazer et al. 2001, Ishida 2004).

## 8. Manualne ustawianie ekspozycji

Na zdjęciu przydatnym do analiz niezastłonięty nieboskłon powinien być biały lub jak najbardziej zbliżony do białego. Aby uzyskać ten efekt, należy wyłączyć tryb

automatyczny w aparacie i ustalić parametry ekspozycji ręcznie, tak, aby dopuścić do matrycy większą ilość światła, świadomie powodując prześwietlenie zdjęcia (ang. *overexposure*). Zmniejszenie liczby przysłony o jeden stopień ponad wskazania automatu (np. poprzez zmianę liczby przysłony z 8 na 5,6) oznacza zwiększenie o połowę otworu przysłony, co skutkuje pewnym rozjaśnieniem obrazu. Ten sam efekt można uzyskać poprzez zwiększenie o połowę czasu naświetlania (np. z 1/60 do 1/30 s). Obydwa te działania określane są jako zwiększenie wartości ekspozycji EV (ang. *exposure value*) o 1 w stosunku do automatycznej wartości EV. Ustalona przez automat ekspozycja EV ma wartość liczbowa, którą można obliczyć ze wzoru:  $EV = \log_2(A^2/T)$ , gdzie  $A$  jest to liczba przysłony, a  $T$  to czas otwarcia migawki wyrażony sekundach.

Przy automatycznej ekspozycji równomiernie zachmurzone, lecz nie zasłonięte drzewami niebo (np. na bardzo dużym zrębie) zostanie przedstawione jako jasnoszary obszar (odbijający 18% światła). Aby został on przedstawiony jako biały obszar (100% odbitego światła), wartość ekspozycji EV trzeba by teoretycznie zwiększyć o 2,5 (Macfarlane et al. 2000). Ze względu na spadek jasności zachmurzonego nieboskłonu przy większym kącie zenitalnym Wagner i Hagemeyer (2006) zalecają nawet prześwietlenie większe – o 3EV. Poprawka ta została ustalona jeszcze przy użyciu aparatów z kliszą fotograficzną, lecz również nowe badania z użyciem aparatów cyfrowych (Zhang et al. 2005) potwierdzają, że najlepszy kontrast pomiędzy niebem a listowiem można uzyskać stosując zwiększenie ekspozycji o 2–3 jednostki w stosunku do wskazań z powierzchni otwartej.

Niektórzy autorzy (np. Canham et al. 1994, Hale et Edwards 2002), opisując parametry ekspozycji właściwe do wykonania przydatnych do analizy zdjęć hemisferycznych, polecają niedoświetlenie zdjęć (ang. *underexposure*) w celu otrzymania obrazu, na którym elementy sklepienia drzewostanu zostaną przedstawione w barwach zdecydowanie ciemniejszych niż przy automatycznej ekspozycji. Często proponowana jest zmiana wartości ekspozycji o 2 stopnie, ale na minus względem wskazań z trybu automatycznego (np. Canham et al. 1994), co w praktyce może oznaczać skrócenie czasu naświetlania z 1/30 do 1/125 s dla stałej wybranej wartości liczby przysłony. Frazer i in. (1997) zalecają niedoświetlenie o 3–4 jednostki w stosunku do wskazań trybu automatycznego. Zalecenia te nie są sprzeczne z zaleceniami przedstawionymi uprzednio. W przypadku, gdy automat ustali parametry ekspozycji dla otwartej przestrzeni, to mimo ustawienia prześwietlenia o 2 jednostki, sklepienie drzewostanu będzie niedoświetlone i jego elementy na zdjęciu będą bardzo ciemne.

Procedura regulacji ustawień ekspozycji względem warunków świetlnych z przestrzeni otwartej daje lepszy kontrast pomiędzy niezasłoniętym nieboskłonem a sklepieniem drzewostanu, ponieważ nieboskłon zawsze jest odwzorowany jako biały, niezależnie od zwartości sklepienia drzewostanu. Podgląd obrazu dostępny w aparatach cyfrowych może skłaniać do manipulacji parametrami ekspozycji w celu uzyskania najbardziej kontrastowego zdjęcia, ale takie postępowanie eliminuje powtarzalność i wprowadza subiektywizm do oceny sklepienia drzewostanu. Badania porównujące wyniki oceny wskaźnika powierzchni liściowej (LAI) za pomocą fotografii hemisferycznej wskazują, że parametry ekspozycji mają bardzo duży wpływ na wynik oceny (Zhang et al. 2005). Zmiana ekspozycji o 1 może zmienić oszacowanie LAI o 13% (Macfarlane et al. 2000). Jednocześnie porównanie wyników oceny LAI uzyskanych za pomocą innych metod (Macfarlane et al. 2000, Zhang et al. 2005) wskazuje, że właściwa ekspozycja powinna być ustalana względem warunków świetlnych na otwartej przestrzeni.

W praktyce badacz znajdujący się pod okapem drzewostanu musi ustalić parametry ekspozycji dla terenu otwartego przy ustawieniu automatycznym, a następnie wprowadzić do nich korektę. Jest kilka sposobów rozwiązania tego problemu. Najlepszy metodycznie sposób polega na zastosowaniu światłomierza zewnętrznego przystosowanego do punktowego pomiaru światła. Wówczas po ustawieniu w tym urządzeniu wybranej czułości matrycy (np. ISO 100) i czasu otwarcia migawki (np. 1/125 s) czujnik takiego światłomierza należy skierować na pobliską, nawet niezbyt dużą, lukę w sklepieniu drzewostanu. Wskazania światłomierza (podaną wartość liczby przysłony) należy potraktować jako wyjściową wartość EV i następnie w aparacie fotograficznym zmienić odpowiednio liczbę przysłony aby uzyskać pożądane prześwietlenie (np. +2, poprzez zmniejszenie liczby przysłony o dwa stopnie np. z  $F16$  do  $F8$ ). Alternatywnym rozwiązaniem jest wykorzystanie wbudowanego w aparat światłomierza. Wbudowany światłomierz bada luminację w różnych obszarach matrycy światłoczułej i uśrednia wynik. W bardziej zaawansowanych aparatach użytkownik może wybrać obszar w centralnej części kadru (pomiar centralny). Ustawiając aparat tak, że środek kadru pokrywa się ze środkiem dużej luki, automat aparatu wskaże parametry ekspozycji podobne do wskazania światłomierza zewnętrznego. Jak zauważa Ishida (2004), w normalnym obiektywie (ogniskowa 50 mm) pomiar centralny oznacza pobieranie próby z fragmentu nieboskłonu wyciętego przez kąt bryłowy o wartości 10 stopni, dla obiektywu hemisferycznego kąt ten będzie szerszy, więc oznaczałoby to przerywanie co jakiś czas wykonywania zdjęć w badanym drzewostanie i konieczność poszuki-



wania dużej luki (Chen et al. 2006) lub otwartej przestrzeni (Canham et al. 1990). Niektórzy badacze (Zhang et al. 2005) w celu zmniejszenia kąta bryłowego, dla którego światłomierz wewnętrzny mierzy luminację, wymieniały obiektyw hemisferyczny na obiektyw o dłuższej ogniskowej. W przypadku aparatów cyfrowych częsta wymiana obiektywów, zwłaszcza w środowisku leśnym, prowadzi do zakurzenia matrycy i w konsekwencji do błędnych pomiarów.

W praktyce ręczne ustawianie parametrów ekspozycji może początkowo wydawać się trudne z kilku względów. Na pierścieniu obiektywu służącym do manualnego ustawiania przysłony najczęściej znajdują się nie tylko pełne liczby przysłony (np.  $F8$  i  $F11$ ), ale także wartości pośrednie ( $F=8, 9, 10, 11$ ), ustalone w odstopniowaniu co  $1/3$  EV (por. tab. 1).

**Tabela 1. Wartość ekspozycji w zależności od czasu otwarcia migawki i liczby przysłony. Przy obliczeniach posłużono się rzeczywistymi wartościami czasu otwarcia migawki  $1/64$  s i  $1/128$  s opisywanymi na obudowie aparatu jako  $1/60$  i  $1/125$**

Table 1. Exposure values calculated for different exposure time and aperture F-number. During calculation real exposure time was used  $1/64$  s and  $1/128$  s, described on camera body as  $1/60$  and  $1/125$

Liczba przysłony (z odstopniowaniem co 1/3 EV) F – number (in steps of 1/3 EV)	Wartość ekspozycji wyliczona dla czasu otwarcia migawki Exposure values for exposure time:	
	1/60 s	1/125 s
2	8,00	9,00
2,2	8,28	9,28
2,5	8,64	9,64
2,8	8,97	9,97
3,2	9,36	10,36
3,5	9,61	10,61
4	10,00	11,00
4,5	10,34	11,34
5	10,64	11,64
5,6	10,97	11,97
6,3	11,31	12,31
7,1	11,66	12,66
8	12,00	13,00
9	12,34	13,34
10	12,64	13,64
11	12,92	13,92
13	13,40	14,40
14	13,61	14,61
16	14,00	15,00
18	14,34	15,34
20	14,64	15,64
22	14,92	15,92

Szarym tłem oznaczono pełne stopnie przysłony  
Grey background signifies full steps

Ekspozycja ustalona poprzez wbudowany w aparat automat może zawierać kombinację niepełnej liczby przysłony (np. 10) i wybranego czasu otwarcia migawki. Pierwsza trudność wiąże się z koniecznością ustalenia pozycji pierścienia przysłony, aby uzyskać zakładaną korektę wartości ekspozycji. Przykładowo, gdy automatycznie ustalona liczba przysłony wyniesie  $F 7,1$ , to aby zmienić wartość ekspozycji o 2 jednostki, należy ustawić w aparacie bądź na obiektywie liczbę przysłony równą  $F 3,5$ .

Teoretycznie, aby zwiększyć wartość ekspozycji o 2 jednostki, można wogóle nie korygować otwarcia przysłony, ale jedynie czterokrotnie wydłużyć czas otwarcia migawki np. z  $1/250$  s do  $1/60$  s. Jednakże w niektórych okolicznościach (np. gdy fizycznie nie ma w danym obiektywie możliwości ustawienia wyliczonej wartości przysłony) może być konieczna korekta ekspozycji równocześnie za pomocą zmiany liczby przysłony i czasu otwarcia migawki.

Wykonanie kilku zdjęć przy różnych ustawieniach pozwala sprawdzić efekt stosowania korekty ekspozycji na otwartej przestrzeni (ryc. 3a-b) i w warunkach drzewostanowych (ryc. 3c-d). Przy użyciu automatycznej ekspozycji ( $EV=12,66$ , por. tab. 1) otwarta przestrzeń jest szara. Korekta ekspozycji o +2 jednostki ( $EV=10,61$ , por. tab. 1) daje efekt prześwietlenia, a nieboskłon wydaje się biały. Efekt prześwietlenia można było uzyskać zmniejszając liczbę przysłony z  $F7,1$  do  $F3,5$  przy zachowaniu czasu otwarcia migawki równego  $1/125$  s. W tym przypadku zdano się na automatykę aparatu fotograficznego i ustawiono korektę ekspozycji na wartość +2EV. Zalecane prześwietlenie algorytm zrealizował ustalając parametry ekspozycji na  $F5$  i  $t=1/60$ s ( $EV=10,61$ , por. tab. 1). Czytelnika może zaniepokoić fakt, że w opisywanym przykładzie zadana korekta ekspozycji wynosiła +2EV, a liczbowa wartości ekspozycji zmniejszyła się o blisko 2 jednostki w stosunku do wartości wyjściowej. Nie jest to błąd, a jedynie kwestia przyjętej konwencji. Zmiana liczby przysłony z  $F 7,1$  na  $F 3,5$  zwiększa wielkość otworu przysłony, więc zwiększa dopływ światła do matrycy aparatu i dlatego zmiana ta jest określana w żargonie fotograficznym jako „zwiększenie wartości ekspozycji” i tak też opisywana w ustawieniach aparatu cyfrowego, chociaż w praktyce oznacza to zmniejszenie liczbowej wartości ekspozycji.

Na rycinach 3c, 3d i 3e zilustrowano w praktyce zagadnienia właściwej korekty ekspozycji pod okapem. Na ryc. 3c przedstawiono hemisferyczny obraz sklepienia dojrzałego drzewostanu sosnowego przylegającego do poprzednio opisywanej otwartej przestrzeni (ryc. 3a i b) wykonany w kilka minut po wykonaniu zdjęcia z ryc. 3b, z wykorzystaniem automatycznych ustawień ekspozycji ( $EV=10,64$ , por. tab. 1). W tym konkretnym przy-

padku automatyczny algorytm sprawił się zadziwiająco dobrze, ponieważ zdjęcie jest dość kontrastowe, a niezasłonięty nieboskłon wydaje się biały.

Na ryc. 3d przedstawiono zdjęcie z tej samej lokalizacji, ale z wymuszonym niedoświetleniem o 2 jednostki EV względem ekspozycji ustalonej automatycznie pod okapem drzewostanu (EV=12,66, por. tab. 1). To zdjęcie ilustruje zalecenia niektórych autorów omawiane we wcześniejszej części artykułu, zmierzające do uzyskania jak najciemniejszego obrazu elementów sklepienia drzewostanu. Jak widać, w warunkach małej dostępności światła (pochmurny dzień zimowy) takie zalecenia mogą się nie sprawdzić, bowiem całe zdjęcie wydaje się ciemne, w tym również fragmenty niezasłoniętego nieboskłonu. Na ryc. 3e prezentowane jest zdjęcie z tej samej lokalizacji, ale z ustawieniami ekspozycji powodującymi prześwietlenie o 2 EV (10,61, por. tab. 1) względem wartości liczbowej ekspozycji ustalonej na powierzchni otwartej (por. ryc. 3a i b). To zdjęcie można potraktować jako potwierdzenie słuszności strategii polegającej na ustaleniu parametrów ekspozycji pod okapem przyjmując za punkt wyjścia parametry automatyczne z przestrzeni otwartej zwiększone o 2–3 jednostki EV. Uzyskano bowiem bardzo kontrastowe zdjęcie przydatne do dalszej obróbki. Wizualnie zdjęcia z ryc. 3c i 3e wydają się bardzo podobne, ale nie należy tego traktować jako przykładu na to, że automatyczna ekspozycja jest równie dobra co manualna. Jest to raczej ilustracja stwierdzenia, że automatyczna korekta czasami pozwala uzyskać przydatne do analiz zdjęcie, a prawidłowa korekta manualna zawsze.

## 9. Podsumowanie

Jak już wspomniano, fotografia hemisferyczna służy do modelowania warunków świetlnych pod okapem drzewostanu. Aby wyniki tego modelowania były porównywalne z czasochłonnymi i kosztownymi pomiarami bezpośrednimi, należy starannie wybrać sprzęt oraz ściśle przestrzegać procedury wykonywania zdjęć. W dobie powszechnego stosowania oprogramowania do korekty zdjęć cyfrowych może pojawić się pokusa eliminacji niedostatków zdjęć już po ich wykonaniu (np. zwiększenie ich kontrastu). Zabieg taki jest oczywiście możliwy, ale metodycznie niewskazany. Każda subiektywna ingerencja w utrwalony obraz sklepienia drzewostanu sprawia bowiem, że wyniki modelowania przestają być obiektywne i powtarzalne. Aby zachować precyzję i powtarzalność wyników, należy stosować wyższej jakości rozwiązania optyczne (wymienne obiektywy hemisferyczne w połączeniu z pełnoklatkowym aparatem cyfrowym) oraz korektę ekspozycji,

polegającą na prześwietleniu wykonywanych zdjęć w stosunku do wskazań światłomierza z powierzchni otwartej.

## Literatura

- Anderson M.C. 1964: Studies of the woodland light climate I. The photographic computation of light condition. *Journal of Ecology*, 52: 27–41.
- Blennow K. 1995: Sky-view factors from high-resolution scanned fisheye lens photographic negatives. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 12: 1357–1362.
- Bolibok L. 2005: Zastosowanie odbiorników nawigacji satelitarnej klasy turystycznej w szczegółowym planowaniu hodowlanym. *Sylvan*, 149(7): 37–50
- 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 temperature and tropical forest. *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 Forestry Research*, 24: 337–349.
- Chazdon R.L., Field C.B., 1987: Photographic estimation of photosynthetically active radiation: evaluation of a computerized technique. *Oecologia*, 73(4): 525–532.
- Chen J.M., Govind A., Sonnentag O., Zhang Y., Barr A., Amiro B. 2006: Leaf area index measurements at Fluxnet-Canada forest sites. *Agricultural and Forest Meteorology*, 140: 257–268.
- Du H., Voss K.J., 2004: Effects of point-spread function on calibration and radiometric accuracy of CCD camera. *Applied Optics*, 43(3): 665–670.
- 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.
- Evans G.D., Coombe D.E. 1959: Hemispherical and woodland canopy photography and the light climate. *Journal of Ecology*, 47: 103–113.
- Fiala A.C.S., Garman S.L., Gray A.N., 2006: Comparison of five canopy cover estimation techniques in the western Oregon Cascades. *Forest Ecology and Management*, 232: 188–197.
- 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. 1997: A method for estimating canopy openness, effective leaf area index, and photosynthetically active photon flux density using hemispherical photography and computerized image analysis techniques. Technical report, Information Report BC-X-373, Natural Resources Canada, Canadian Forest Service, Pacific Forestry Centre, Victoria, BC.
- 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.
- Hale S.E., Edwards C. 2002: Comparison of film and digital hemispherical photography across a wide range of canopy densities. *Agricultural and Forest Meteorology*, 112: 51–56.
- Hardy J.P., Melloh R., Koenig G., Marks D., Winstral A., Pomeroy J.W., Link T. 2004: Solar radiation transmission through conifer canopies. *Agricultural and Forest Meteorology*, 126: 257–270.
- Herbert T.J., 1987: Area projections of fisheye photographic lenses. *Agricultural and Forest Meteorology*, 39: 215–223.
- Inoue A., Yamamoto K., Mizoue N., Kawahar Y. 2004: Effect of different image quality, size and camera type on forest light environment estimates using digital hemispherical photography. *Agricultural and Forest Meteorology*, 126: 89–97.
- Ishida M., 2004: Automatic thresholding for digital hemispherical photography. *Canadian Journal of Forest Research*, 34: 2208–2216.
- 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
- Kuusk A., Paas M. 2007: Radiometric correction of hemispherical images. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 61: 405–413.
- 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.
- Lhotka J.M., Loewenstein E.F. 2006: Indirect measures for characterizing light along a gradient of mixed-hardwood riparian forest canopy structures. *Forest Ecology and Management*, 226: 310–318.
- Lieffers V. J., Messier C., Stadt K. J., Gendron F., Comeau P. G. 1999. Predicting and managing light in the understory of boreal forests. *Canadian Journal of Forest Research*, 29(6): 796–811.
- 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.
- Macfarlane C.K., Grigg A., Evangelista C. 2007: Estimating forest leaf area using cover and fullframe fisheye photography: Thinking inside the circle. *Agricultural and Forest Meteorology*, 146: 1–12.
- Montes F., Pita P., Rubio A., Canella, I. 2007: Leaf area index estimation in mountain even-aged *Pinus silvestris* L. stands from hemispherical photographs. *Agricultural and Forest Meteorology*, 145: 215–228.
- 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.
- Schleppi P., Conedera M., Sedivy I., Thimonier A. 2007: Correcting non-linearity and slope effects in the estimation of the leaf area index of forests from hemispherical photographs. *Agricultural and Forest Meteorology*, 144 : 236–242.
- Schalwe E. 2005: Geometric Modelling and Calibration of Fisheye Lens Camera Systems. Proceedings of the 2nd Panoramic Photogrammetry Workshop, *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 36, 5/W8.
- Strzebiński P. 2006: Zastosowanie zdjęć hemisferycznych w badaniach ekosystemów leśnych. *Roczniki Geomatyki*, IV, 2: 103–112.
- 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.
- Wagner S., Hagemeyer M. 2006: Method of segmentation affects leaf inclination angle estimation in hemispherical photography. *Agricultural and Forest Meteorology*, 139: 12–24.
- 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.