

Modelowanie warunków świetlnych na dnie lasu

Modeling light conditions on the forest floor

Leszek Bolibok¹✉, Michał Brach², Stanisław Drozdowski¹, Michał Orzechowski²

Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie, Wydział Leśny, ¹Katedra Hodowli Lasu, ²Katedra Urządzania Lasu, Geomatyki i Ekonomiki Leśnictwa, ul. Nowoursynowska 159, 02–776 Warszawa, Polska

✉Tel. +48 22 5938101, fax: (22) + 48 22 5938113, e-mail: leszek_bolibok@sggw.pl

Abstract. Contemporary models of light conditions on the forest floor can be divided into two categories: under-canopy models that allow the light conditions in a stand under the canopy to be simulated, and models that take into account shielding from the side.

Under-canopy models precisely estimate the availability of wavelengths of light spatially distributed under the canopy of stands: however these models require a large amount of data on the spatial structure of forest stands.

The other class of models describes the light conditions on a particular open surface. These incorporate shielding from the side and are easier to use as they require less data than under-canopy models.

In practice, in forest conditions, such models require data on the size, shape, and geographical location of surveyed surfaces (e.g. gaps, and cut areas) and on the height of the surrounding stand. Often, these data are available in databases, such as the State Forest Information System (SILP), can otherwise be obtained relatively easily (and inexpensively). Compared to under-canopy models, these models provide a cheap way to obtain useful information on variation in the light environment that affects the microclimate for regenerating plants on clearcuts and canopy gaps.

Key words: light conditions, diffuse light, direct light, gaps, modelling

1. Wstęp

Określenie warunków świetlnych na dnie lasu od dawna wzbudzało zainteresowanie badaczy i leśników praktyków, głównie w kontekście kształtowania odpowiednich warunków świetlnych przy odnawianiu lasu (Wagner 1923, Dengler 1930), ale też i w innych zastosowaniach, np. przy szacowaniu wodochronnych lub glebochronnych funkcji lasu czy badaniach fitocenozy. Wszystkie sposoby modelowania dostępu światła do powierzchni gruntu muszą uwzględniać jego źródło, jakim jest promieniowanie słoneczne, zarówno bezpośrednie, jak i rozproszone. Najstarsze sposoby modelowania ograniczały się do wyliczenia, z użyciem tablic astronomicznych, długości cienia rzucanego przez drzewostan na przyległą otwartą przestrzeń. Postęp techniki

obliczeniowej ułatwił pracochłonne obliczenia i pozwolił na modelowanie warunków świetlnych pod okapem drzewostanu o różnym stopniu zwarcia.

Współczesne modele warunków świetlnych na dnie lasu można podzielić na dwie kategorie: podokapowe pozwalające modelować warunki świetlne pod okapem drzewostanu i modele przy osłonie bocznej uwzględniające jedynie ograniczenia w dostępie światła powodowane przez przyległy do badanej powierzchni drzewostan. Współczesne modele podokapowe są w stanie z dużą precyzją oszacować dostępność różnych rodzajów światła w dowolnym fragmencie przestrzeni pod koronami drzew, jednak wymagają dużej ilości danych o strukturze przestrzennej drzewostanów. Zebranie takich danych jest bardzo pracochłonne, co istotnie ogranicza przydatność tych modeli do zastosowań praktycznych.

Zanim postępy w teledetekcji i automatyzacji przetwarzania danych zmienią ten stan rzeczy, warto zwrócić uwagę na nie do końca wykorzystany potencjał, jaki ma już istniejąca klasa modeli opisujących warunki świetlne na powierzchni otwartej przy osłonie bocznej. W realiach leśnych potrzebna jest tylko informacja o wielkości, kształcie i geograficznym usytuowaniu analizowanej powierzchni (gniazda, zrębu) oraz o wysokości otaczającego drzewostanu. Często jest ona dostępna w już istniejących bazach danych, np. w Systemie Informatycznym Lasów Państwowych (SILP) lub jest łatwa (tania) do pozyskania. W porównaniu do modeli podokapowych jest to tani sposób uzyskania przydatnych dla praktyki informacji na temat zróżnicowania nasłonecznienia wpływającego na warunki mikroklimatyczne odnawianych powierzchni.

Od dawna w praktyce leśnej funkcjonuje reguła, że na osłonę boczną można liczyć nie dalej niż w odległości równej jednej wysokości otaczającego drzewostanu przylegającego od południa, wschodu lub zachodu. Sprawdza się ona dobrze w płaskim terenie na standardowym prostokątnym zrębie, ale w terenie o zróżnicowanym nachyleniu i wystawie oraz na powierzchniach o nietypowym kształcie jej stosowanie może być niewystarczające. W przypadku gdy dla odnawianego obszaru dostępny jest numeryczny model terenu (a przynajmniej są informacje o pochyleniu i wystawie) modele warunków świetlnych na powierzchni otwartej przy osłonie bocznej mogą okazać się bardzo przydatne. Stosunkowo łatwa wizualizacja wyników takich modeli, na tle już istniejących wydzieleni drzewostanowych, może okazać się cenną wskazówką przy projektowaniu gniazd lub lokalizacji wymagających osłony domieszek na zrębach.

2. Modelowanie promieniowania słonecznego docierającego nad korony drzew

Niezależnie od tego czy celem modelowania jest określenie warunków świetlnych pod okapem drzewostanu, czy też określenie ilości ciepła docierającego do dna gniazda, punktem wyjścia zazwyczaj jest ustalenie ilości promieniowania słonecznego dostającego się na powierzchnię otwartą w badanej lokalizacji. W kontekście badań leśnych można powiedzieć, że chodzi o ustalenie ilości promieniowania docierającego tuż nad korony drzew tworzących sklepienie drzewostanu. Gdy analizowany drzewostan znajduje się niedaleko od istniejącej stacji meteorologicznej, rejestrującej zmiany promieniowania słonecznego bezpośredniego i rozproszonego, możliwe jest wykorzystanie tych informacji. Ponieważ tego typu dane nie są zbyt powszechne, w

większości wypadków modelowanie odbywa się na podstawie dodatkowych założeń dotyczących między innymi ilości promieniowania pochłanianego przez atmosferę, jak też proporcji energii niesionej przez promieniowanie bezpośrednie i rozproszone w danej lokalizacji. Podczas użytkowania programów modelujących dopływ energii słonecznej należy zwracać uwagę na przyjęte wartości omawianych zmiennych, ponieważ mogą one silnie rzutować na wyniki modelowania.

Promieniowanie słoneczne docierające do atmosfery ziemskiej obejmuje większą część spektrum promieniowania elektromagnetycznego. Słońce nie emituje promieniowania gamma, ale wysyła w przestrzeń promieniowanie rentgenowskie, ultrafioletowe, promieniowanie widzialne, podczerwone, jak też fale radiowe. Ten strumień energii opisywany jest za pomocą stałej słonecznej (S). Stała słoneczna to całkowita energia jaką przynosi promieniowanie słoneczne w jednostce czasu poprzez jednostkową powierzchnię ustawioną prostopadle do promieniowania w średniej odległości Ziemi od Słońca. Jej wartość wynosi około 1367 W/m^2 (Marshall, Plum 2008). Nazwa stała jest myląca, ponieważ ze względu na eliptyczny kształt orbity Ziemi ilość energii ulega zmianom, a podawana wartość odnosi się do średniej odległości od Słońca, wynoszącej około $150 \times 10^6 \text{ km}$. Cykliczne zmiany aktywności Słońca mają mały wpływ na tę stałą ($\pm 0.1\%$) (Fu 2003).

Około 95% energii docierającej do górnych warstw atmosfery to promieniowanie z zakresu $0,25$ do $2,5 \mu\text{m}$ (10^{-6} m) (Marshall, Plum 2008). Przypada ona głównie na trzy zakresy promieniowania: około 50% to promieniowanie podczerwone (bliskie i dalekie) ($>0,7 \mu\text{m}$), około 40% to promieniowanie widzialne ($0,4\text{--}0,7 \mu\text{m}$) i około 10% – promieniowanie ultrafioletowe ($<0,4 \mu\text{m}$) (Fu 2003).

Spektrum promieniowania docierającego do powierzchni Ziemi jest modyfikowane przez atmosferę, głównie przez zawarte w niej gazy i aerozole. Para wodna absorbuje promieniowanie o długościach fali świetlnej λ zbliżonej do 1100 , 1400 , 1600 i 1900 nm (10^{-9} m). Ozon absorbuje promieniowanie ultrafioletowe ($\lambda > \text{nm}$), CO_2 absorbuje promieniowanie o $\lambda=2750$ i 4250 nm (Bonhomme 1993). Z tego powodu modele szacujące energię docierającą do powierzchni Ziemi liczą ją zazwyczaj według wzoru:

$$R_g = R_{dir} + R_{diff}$$

gdzie:

- R_g – energia docierająca do powierzchni Ziemi,
- R_{dir} – promieniowanie bezpośrednie,
- R_{diff} – promieniowanie rozproszone.

Zarówno wartość energii promieniowania bezpośredniego, jak i rozproszonego w modelach wyprowadza się z wartości stałej słonecznej S (W/m^2), a więc zmienne oraz odnoszą się do chwilowej gęstości strumienia pro-

mieniowania bezpośredniego lub rozproszonego wyrażonej w W/m^2 . Niektórzy autorzy (ter Steege 1997) używają też innych jednostek, np. $\mu mol/m^2$. O ile użytkownik sobie tego zażyczy, modele mogą również wyliczyć energię poszczególnych rodzajów promieniowania we wskazanym okresie wyrażoną w J/m^2 lub innych jednostkach, np. $kcal/m^2$.

Promieniowanie bezpośrednie (docierające bezpośrednio z dysku słonecznego) zanim dotrze do koron drzew musi pokonać gazy, pyły i aerozole wypełniające atmosferę. Mogą one absorbować (pochłaniać, podgrzewając atmosferę), odbijać (w kierunku kosmosu) lub rozpraszać (zmieniać kierunek padania na Ziemię) promieniowanie bezpośrednie, co prowadzi do częściowej utraty jego energii. Pomiary energii promieniowania na wysokości poziomu morza, wykonywane w całkowicie bezchmurne dni, rzadko przekraczają przy gruncie wartość 75% stałej słonecznej (S) (Monteith, Unsworth 2008). Do obliczenia energii promieniowania bezpośredniego po przejściu przez atmosferę wykorzystywane jest prawo Lamberta-Beera opisujące pochłanianie promieniowania elektromagnetycznego przy przechodzeniu przez częściowo absorbujący i rozpraszający ośrodek. Energia promieniowania bezpośredniego nad koronami drzew R_{dir} jest zależna od tak zwanej głębokości optycznej atmosfery i może być opisana wzorem:

$$R_{dir} = S \cdot e^{-\tau m}$$

gdzie:

- $e^{-\tau m}$ – głębokość optyczna atmosfery,
- m – grubość fizyczna atmosfery,
- τ – skład atmosfery.

Głębokość optyczna atmosfery $e^{-\tau m}$ jest proporcjonalna do grubości fizycznej atmosfery m oraz własności optycznych atmosfery wynikających z jej składu τ .

Grubość fizyczną atmosfery należy rozumieć jako długość drogi, jaką promieniowanie pokonuje, przechodząc przez atmosferę, zanim dotrze do powierzchni gruntu. Jest ona związana z wysokością kątową słońca nad horyzontem i może ona dla wybranego punktu na powierzchni Ziemi zmieniać się dość znacząco w ciągu dnia i w ciągu roku, co istotnie komplikuje modelowanie.

Właściwości optyczne atmosfery nie są takie same dla wszystkich rodzajów promieniowania i znacznie się zmieniają zależnie od zawartości aerozoli (głównie wodnych) i pyłów w atmosferze. Współczynnik atenuacji (ekstynkcji) τ można traktować jako sumę dwóch współczynników $\tau_m + \tau_a$ (Monteith, Unsworth 2008).

Współczynnik τ_m opisuje rozpraszanie światła przez molekuly gazów zawartych w atmosferze, których skład w porównaniu z ilością aerozoli można uznać za stały. Niebieskie zabarwienie bezchmurnego nieba związane jest z większym rozpraszaniem niebieskiego zakresu

widma światła widzialnego przez molekuly gazów. Przy zachodzie lub wschodzie słońca czerwone zabarwienie nieba wynika z faktu, że czerwone pasmo promieniowania widzialnego najlepiej pokonuje najdłuższą o tej porze dnia drogę przez atmosferę.

Współczynnik τ_a opisuje rozpraszanie światła przez cząstki aerozoli unoszące się w atmosferze: mgłę (cząstki ciekłe) i pyły (cząstki stałe). Rzeczywista wartość współczynnika τ_a może być bardzo zmienna w czasie dla tej samej lokalizacji. Monteith i Unsworth (2008), na podstawie pomiarów z Brytanii, podają dla bardzo czystego powietrza arktycznego wartość $\tau_a=0,05$, a dla bardzo zanieczyszczonego powietrza, które pochodziło ze środkowej Anglii $\tau_a=0,6$. Wyliczenia wskazują, że przy $\tau_a=0,6$ redukcja energii promieniowania bezpośredniego wynosiła około 50%. Niektóre badania wskazują, że przejrzystość atmosfery ciągle spada, co związane jest między innymi ze spalaniem paliw kopalnych (Stanhill, Cohen 2001). Modele opisujące dopływ promieniowania bezpośredniego do koron drzew do obliczeń używają pewnych uśrednionych wartości współczynników ekstynkcji τ , a ich wartość przyjęta w modelu może mieć duży wpływ na wyliczone ilości energii.

Promieniowanie rozproszone, jakie dociera z nieboskłonu do koron drzew, składa się głównie z energii promieniowania bezpośredniego rozproszonego przez atmosferę, w mniejszym stopniu jest to promieniowanie odbite przez powierzchnię Ziemi (albedo Ziemi), które z powrotem odbija się od atmosfery i wraca do koron drzew. Energia niesiona przez promieniowanie rozproszone dociera z każdego sektora nieboskłonu, a jej zmienność zależy głównie od zachmurzenia i wysokości kątowej słońca nad horyzontem. Przy bezchmurnym niebie udział promieniowania rozproszonego w ogólnym bilansie promieniowania (R_{diff}/R_g) wynosi około 10–15%, podczas gdy przy całkowicie zachmurzonym niebie dochodzi do 100%.

Promieniowanie rozproszone dociera do wybranego punktu nad koronami drzew ze wszystkich sektorów nieba, co należy uwzględnić podczas modelowania tego zjawiska. Teoretycznie w przypadku idealnego rozproszenia, wszystkie sektory całkowicie zachmurzonego nieba powinny dawać taką samą porcję promieniowania rozproszonego. Takie założenie nosi nazwę modelu jednorodnie zachmurzonego nieba (UOS, ang. uniform overcast sky) (Monteith, Unsworth 2008) i jest wykorzystywane w niektórych modelach. Nowsze badania wskazują, że należałoby odrzucić ten model rozkładu intensywności światła rozproszonego (Gendron et al. 2006). Alternatywnie stosowany 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.

Istotnym elementem omawianego zagadnienia jest udział w transmitowanej energii promieniowania aktywnego fotosyntetycznie (ang. photosynthetically active radiation – PAR) o długości fal z zakresu 0,4 do 0,7 μm . Badania wskazują, że udział PAR w całkowitym promieniowaniu słonecznym docierającym do powierzchni ziemi (R_g) waha się zależnie od lokalizacji w granicach od 45 do 50% (Tsubo, Walker 2005). Udział PAR w R_g wzrasta w miarę, jak wzrasta zachmurzenie (choć bezwzględna wartość R_g w tym czasie maleje). Ponieważ zazwyczaj dane o rzeczywistej zmienności zachmurzenia dla badanego okresu są niedostępne w wielu modelach, dla uproszczenia przyjmowane są założenia dotyczące 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 inni (1990), na podstawie badań Knappa i innych (1980), że aż 50%. Użytkownik programu opisującego dostępność różnych rodzajów promieniowania powinien dokładnie zapoznać się z założeniami przyjętymi przez autorów modelu lub skorzystać z możliwości samodzielnego zdefiniowania wartości odpowiednich współczynników.

Po oszacowaniu ilości energii promieniowania słonecznego, jaka dociera do powierzchni Ziemi (nad korony drzew) w badanej lokalizacji, drogi rozumowania autorów różnych modeli, wykorzystywanych w badaniach i praktyce leśnej, rozchodzą się. Można wyróżnić dwa główne kierunki: modelowanie przenikania światła przez korony drzew do przestrzeni pod okapem drzewostanu oraz modelowanie dostępności promieniowania słonecznego na otwartej powierzchni z uwzględnieniem ograniczeń dostępu związanych z konfiguracją terenu lub występowaniem innych przeszkód, takich jak np. pobliska ściana drzewostanu. W pierwszej grupie modeli większą wagę przykładano do modelowania podaży promieniowania aktywnego fotosyntetycznie, a w drugiej większe znaczenie miało promieniowanie bezpośrednie, a zwłaszcza promieniowanie ciepłe.

3. Modelowanie warunków świetlnych pod okapem

Dominującą filozofią modelowania warunków świetlnych pod okapem była próba powiązania para-

metrów opisujących strukturę sklepienia koron z szansą na przeniknięcie przez nią światła pod okap. Jednym z pierwszych pomysłów było wykorzystanie prawa Lamberta-Beera do opisu pochłaniania promieniowania elektromagnetycznego przy przechodzeniu przez częściowo absorbujący i rozpraszający ośrodek, jakim jest warstwa koron drzew w drzewostanie. Monsi i Saeki (1953, za Lieffers et al. 1999) zaproponowali przekształcenie równania opisującego przenikanie światła przez roztwory do postaci podanej wzorem:

$$R_{\text{under}} = R_{\text{dir}} \cdot e^{-k \cdot LAI}$$

gdzie:

R_{under} – natężenie promieniowania bezpośredniego pod drzewostanem,

k – charakterystyczny dla wybranego gatunku drzewa współczynnik ekstynkcji,

LAI – wskaźnik powierzchni liści (ang. leaf area index).

Czy będzie modelowane bezpośrednio promieniowanie wszystkich rodzajów czy tylko aktywne fotosyntetycznie zależy od poprzednio opisanych ustawień modelu (od wybranej wartości użytego współczynnika redukującego).

Najczęściej zależność ta była wykorzystywana do określania wskaźnika LAI , ale możliwe jest wykorzystanie jej do oceny warunków świetlnych pod okapem, o ile dostępne są wyniki niezależnej oceny LAI . Pierce i Running (1988), stosując tę formułę, uzyskali dużą zgodność ($R^2 \geq 0,94$) mierzonego i przewidywanego natężenia światła pod okapem drzewostanów iglastych. Niestety formuła ta ma ograniczoną przydatność, ponieważ sprawdza się tylko dla wybranych wysokości katowych słońca nad horyzontem oraz dla drzewostanów o zbliżonej wartości współczynnika ekstynkcji k . Cannell i Grace (1993) zaproponowali, aby podczas obliczeń LAI i współczynnik ekstynkcji były określane oddzielnie dla każdego gatunku i łączone przez sumowanie w modelu. Dalsze transformacje formuły pozwoliły na uwzględnienie wpływu wysokości katowej słońca na zmiany wartości współczynnika ekstynkcji (Sampson, Smith 1993, za Lieffers et al. 1999). Uzyskiwana wartość R_{under} jest wartością średnią dla całego drzewostanu, co dla wielu zastosowań jest za mało dokładną informacją. Najdalej idąca zmiana tej koncepcji prowadzi się do modelowania wykorzystującego prawo – Lamberta Beera – prawdopodobieństwa przedostania się do wybranego punktu pod drzewostanem promienia światła z dowolnego sektora niebosłonu. Taki model jest wówczas przydatny również do określania przenikania światła rozproszonego (Oker-Blom et al. 1986).

Trudną do pokonania słabością opisywanych modeli jest założenie o losowym rozmieszczeniu w przestrzeni elementów absorbujących światło, czyli w warstwie

koron drzewostanu. Ogranicza to zdolność predykcijną takich modeli, ponieważ w rzeczywistości koncentracja liści wokół gałęzi, a tych ostatnich wokół pnia, oznacza nielosowość (skupiskowość) rozmieszczenia elementów absorbujących światło. Problem ten próbowano rozwiązać poprzez grupowanie elementów w odrębne, dające identyfikować się obiekty, takie jak: rzędy drzew, korony drzew, poziomy koron drzew czy też poszczególne pędy (Norman, Jarvis 1975). Obiekty te są opisywane za pomocą figur geometrycznych, takich jak: walce, elipsoidy, dyski, których położenie w trójwymiarowej przestrzeni jest ściśle określone. W ten sposób określona jest również przestrzeń niezajęta przez korony, czyli możliwe jest uwzględnienie luk w drzewostanie. Pukkala i inni (1993), Canham i inni (1994) i Bartelink (1998) zastosowali takie podejście jako jedni z pierwszych. W tego typu modelach przenikanie światła pod okap zależy od sumy długości odcinków, jakie przebywa promień świetlny wewnątrz modelowanych koron drzew. Ilość bezpośredniego promieniowania słonecznego docierającego do wybranego punktu pod okapem drzewostanu jest modelowana dla konkretnego punktu w czasie, z uwzględnieniem położenia słońca nad horyzontem w danej lokalizacji, a następnie sumowana dla wybranego okresu (np. dzień, sezon wegetacyjny, rok). Aby uprościć modelowanie przenikania światła rozproszonego, które dociera ze wszystkich kierunków w tego typu modelach, analizuje się pewną ograniczoną liczbę punktów (źródeł światła) równomiernie rozmieszczonych na nieboskłonie (np. 200), dla których dla wybranego momentu modeluje się przenikanie światła przez korony.

Podczas przenikania światła przez korony drzew możliwe jest, że część promieni zdoła przeniknąć przez liście, część od nich odbita trafi pod okap, ponadto pewne znaczenie ma też zjawisko dyfrakcji światła na krawędzi liści i pędów. Zjawiska te powodują pewne trudne do obliczenia zwiększenie dopływu światła pod okap, określane jako wzbogacenie strumienia świetlnego pod okapem (Canham et al. 1994; Bolibok 2010). Zjawiska te są zazwyczaj modelowane dla całej warstwy koron (Norman, Jarvis 1975). Nowsze modele często łączą w sobie modelowanie przenikania światła przez korony drzew, traktowane jako wyodrębnione w przestrzeni obiekty z modelowaniem wzbogacenia strumienia świetlnego liczonym dla całej warstwy koron (Grace et al. 1987; Cescatti 1997a).

Wyniki zaawansowanych modeli określania warunków świetlnych pod okapem wykazują dużą zgodność z bezpośrednimi pomiarami promieniowania słonecznego. Pozwalają one na przewidywanie warunków świetlnych na dnie drzewostanów o złożonej strukturze przestrzennej (Canham et al. 1999; Sprugel et al. 2009). Niekiedy przewidywania modelu są tak trafne, że

w zasadzie mogą zastąpić bezpośrednie pomiary, tak jak w badaniach de Chantal i innych (2003). Autorzy badali wzrost wysiewanych na gniazdach świerków i sosen. Aby opisać warunki świetne dla każdej siewki użyli modelu opracowanego przez Cescatti (1997a, 1997b). Współczynnik determinacji, opisujący związek przewidywań modelu i pomiarów bezpośrednich dla światła rozproszonego, był bardzo wysoki ($R^2=0,97$). Osiągnięcie tak wysokiej zgodności wymaga jednak zgromadzenia dużej ilości danych opisujących drzewostan otaczający gniazdo, takich jak: wysokość drzew, wysokość podstawy koron drzew, wysokość najszerszego przekroju korony, długość promienia korony każdego drzewa w czterech kierunkach kardynalnych oraz określenie współczynnika kształtu dla każdej korony i oczywiście dokładnego mapowania położenia drzew.

4. Rozwój modeli warunków świetlnych przy osłonie bocznej i ich zastosowanie

Zaawansowane modele opisujące warunki świetlne pod okapem drzewostanu mogą być wykorzystane do modelowania warunków świetlnych na powierzchni otwartej, otoczonej lasem. W praktyce gospodarczej duża dokładność dostarczanej przez nie informacji nie usprawiedliwia kosztów jej gromadzenia. Czasami mniej dokładna informacja, ale uzyskana zdecydowanie niższym kosztem może mieć większe znaczenie praktyczne. Przykładem może być informacja o tym do jakiej części zrębu bądź gniazda nie dociera promieniowanie bezpośrednie z powodu ocienienia przez przylegający drzewostan.

Wpływ nasłonecznienia na udatność odnowień sosnowych na zrębach Ogijewski (1898) (za, Morozov 1925) ilustrował za pomocą ryciny przedstawiającej zasięg cienia rzucanego przez drzewostan na zręb o szerokości 40 m. Cytowana rycina jest wynikiem obliczeń astronomicznych dokonanych dla pozycji słońca w dniach pomiędzy 4 i 16 czerwca 1884 r. na szerokości geograficznej $52^{\circ}30'N$. Ogijewski (1898) (za Morozov 1925) przedstawił na szeregu schematach zasięg cienia na zrębie w różnych porach dnia od godziny 6.00 rano do 6.00 po południu, w odstępach co 2 godziny. Dla każdej godziny autor zaprezentował ocienienie na zrębie ułożonym równoleżnikowo i południkowo na kierunkach NE–SW oraz NW–SE. Ten sposób przedstawiania wpływu nasłonecznienia szybko się upowszechnił wśród leśników. Dengler (1930) w swoim podręczniku zacytował za Morozovem tę rycinę w całości (choć błędnie zapisał nazwisko Ogijewskiego). Potem wielokrotnie wracano do tej koncepcji, np. Włoczewski (1968) zamieścił rycinę identyczną co do układu, ale z oblicze-

niami wykonanymi dla 21 czerwca, dla szerokości geograficznej $52^{\circ}02' N$, dla zrębu o szerokości 25 m. Najdalej tę koncepcję graficznie rozwinął Marquis (1965), który przedstawił wyliczony dla szerokości $44^{\circ} N$ zasięg zmian ocienienia na gniazdach o różnym kształcie (prostokątnych, kwadratowych i kolistych) o wielkości $1/10$ i $1/2$ akra (0,04 i 0,2 ha). Ryciny tego autora są najbardziej realistyczne, ponieważ ukazują wpływ ocienienia przez więcej niż tylko jedną ścianę drzewostanu.

Dobowa zmienność ocienienia powierzchni otwartej przez otaczający drzewostan, przedstawiana w cytowanych pracach, uzmysławia czytelnikowi możliwą zmienność tego czynnika, ale posługując się tą konwencją, trudno przedstawić zmienność nasłonecznienia w ciągu roku. Lepszym rozwiązaniem graficznym są izoliny przedstawiające liczbę godzin, przez które światło bezpośrednie dociera do wybranego miejsca. Oczywiście chodzi tu o liczbę godzin teoretyczną, wynikającą z obliczeń astronomicznych. W polskim piśmiennictwie leśnym jako jeden z pierwszych tym zagadnieniem zajął się Graniczny (1952), który obliczył izoliny usłonecznienia przy osłonie południowej w lukach różnego kształtu (prostokątnych, trójkątnych, kolistych) dla całego miesiąca czerwca dla szerokości geograficznej $52^{\circ}N$. W cytowanej pracy przedstawiono rozkład izoliny w sytuacji, gdy lukę otacza drzewostan o wysokości 6, 18 i 25 metrów. Część tych obliczeń cytowali później Mierzejewski i Niedźwiedzki (1954), których badania nad odnowieniem naturalnym na gniazdach potwierdziły zasadność takich dociekań. Graniczny (1959) zwrócił uwagę, że nie tylko czas nasłonecznienia odgrywa rolę w charakterystyce warunków wzrostu, ale również kąt padania promieni słonecznych. Im wyżej nad horyzontem znajduje się słońce, tym więcej dostarcza energii (przy porównywalnych warunkach zachmurzenia) na metr kwadratowy poziomej powierzchni. Zjawisko to bardzo komplikuje obliczenia. Aby przyspieszyć obliczenia, cytowany autor posługiwał się nomogramami, jak również zaproponował przyrząd, który pozwalał na wskazanie linii zasięgu cienia w terenie (na gnieździe lub na zrębie).

Cytowane metody są prawdopodobnie najbardziej zaawansowanymi rozwiązaniami zaproponowanymi leśnikom w okresie przed upowszechnieniem się technologii komputerowej.

Pierwsze wspomagane komputerowo analizy promieniowania słonecznego dotyczyły zasięgu cienia rzucanego przez przylegający do zrębu drzewostan. Halverson i Smith (1974) stworzyli program komputerowy pozwalający określić zasięg cienia dla każdej kombinacji wystawy, nachylenia, szerokości geograficznej pomiędzy $23,45^{\circ}$ a $50^{\circ} N$ i każdego dnia w roku. Dostęp bezpośredniego promieniowania (szczególnie w zakresie podczerwonym) ma decydujące znaczenie dla dłu-

gości zalegania pokrywy śnieżnej. Autorzy przedstawili dane o zaleganiu pokrywy śnieżnej w okresie zimowo-wiosennym na prostokątnym zrębie o szerokości 42 m i orientacji E–W wykonanym w drzewostanie o wysokości 30,5 m. Z danych tych jednoznacznie wynika, że warunki środowiska stopniowo zmieniają się wraz ze zmianami długości cienia rzucanego przez drzewostan. Na wiosnę, gdy zasięg cienia rzucanego przez drzewa kurczy się, proporcjonalnie zmniejsza się grubość i obszar zalegania pokrywy śniegowej, a najszybciej odsłaniana jest północna część zrębu. Dane zebrane dla podobnego zrębu o orientacji N–S, wskazują na równomierne i wolniejsze topnienie śniegu, co jest związane z większym ocienieniem tej powierzchni przez otaczający drzewostan. Wyniki obliczeń uzyskanych za pomocą tego programu pozwoliły również autorom na określenie wpływu jaki ma wystawa na ilość otrzymywanej przez zrąb energii. W kolejnej swojej publikacji Halverson i Smith (1979) opisują w jaki sposób informacje uzyskiwane za pomocą tego programu mogą być przydatne przy podejmowaniu decyzji gospodarczych, zarówno gdy dotyczą one ochrony przeciwerozyjnej (regulacji tempa odpływu wody w okresie roztopów), jak też kwestii tworzenia optymalnych warunków do powstawania odnowień naturalnych.

Kolejny, bardziej zawansowany model promieniowania słonecznego na powierzchni otwartej przy osłonie bocznej drzewostanu powstał na potrzeby badań hodowlanych. Fischer i Merritt (1978) zauważyli, że chociaż zebrano dużo informacji o dostępności promieniowania słonecznego nad koronami drzew lub pod okapem drzewostanu, to brakowało informacji o przestrzennej zmienności tego czynnika na gniazdach i małych zrębach (ang. forest openings). Ponieważ gromadzenie takiej informacji dla wielu gniazd o różnych rozmiarach z wykorzystaniem wówczas dostępnych środków technicznych nie było możliwe z praktycznego punktu widzenia, postanowiono opracować komputerowy model SHADOS i porównać jego wskazania z pomiarami bezpośrednimi. Brown i Merritt (1970) (za Fischer i Merritt 1978) stworzyli pierwszą wersję tego modelu. Charakteryzował on warunki świetlne dla gniazda o dowolnym kształcie, znajdującego się na płaskim terenie i otoczonego przez drzewostan o jednakowej wysokości. Obliczał on ilość promieniowania bezpośredniego docierającego do wskazanych punktów na dnie gniazda w wybranym okresie (np. roku), na podstawie czasu, w którym nie były one zacienione przez otaczający drzewostan. Model szacował również dostępność światła rozproszonego w wybranych punktach. Podstawą tego oszacowania było obliczenie wskaźnika widoczności nieboskłonu (ang. sky view factor), który określa jaki procent hemisfery nieboskłonu jest widoczny z danego punktu (niezasłonięty przez otaczający

drzewostan). Autorzy przyjęli założenia modelu UOS (jednorodnie zachmurzonego nieba). Przy takim założeniu proporcja ilości światła rozproszonego docierającego do wybranego punktu na dnie gniazda do całkowitej ilości światła rozproszonego dostarczanej przez nieboskłon równa jest wskaźnikowi widoczności nieboskłonu. Autorzy świadomie nie uwzględnili w swoim modelu dwóch dodatkowych strumieni promieniowania słonecznego, jakich można by się spodziewać na dnie gniazda: bezpośredniego i rozproszonego promieniowania słonecznego docierającego przez korony otaczających drzew, uznając je za zbyt trudne do modelowania, a jednocześnie za niosące zbyt małą ilość energii, aby warto było je uwzględniać.

Z czasem modele promieniowania słonecznego na powierzchni otwartej przy osłonie bocznej zaczęto doskonalic. Harrington (1984) zbudował model dla zrębów smugowych, w którym podobnie jak w modelu SHADOS, ściany drzewostanu nie są penetrowane przez promienie słoneczne, ale za to model był w stanie podać wyniki również dla powierzchniach pochyłych. Chen i inni (1993) zbudowali model, który działa tylko na gniazdach o eliptycznym kształcie na dowolnej wystawie, ale spośród innych tego typu modeli wyróżniał się tym, że uwzględniono w nim promieniowanie, które może przedostać się przez korony drzew otaczających gniazdo. Model ten był wykorzystywany przy analizie wpływu warunków świetlnych na wzrost odnowień na gniazdach (Coates, Burton 1997; Coates 1998), jak też przy projektowaniu doświadczeń, które miały na celu optymalizację wielkości gniazd (Spittlehouse 2004).

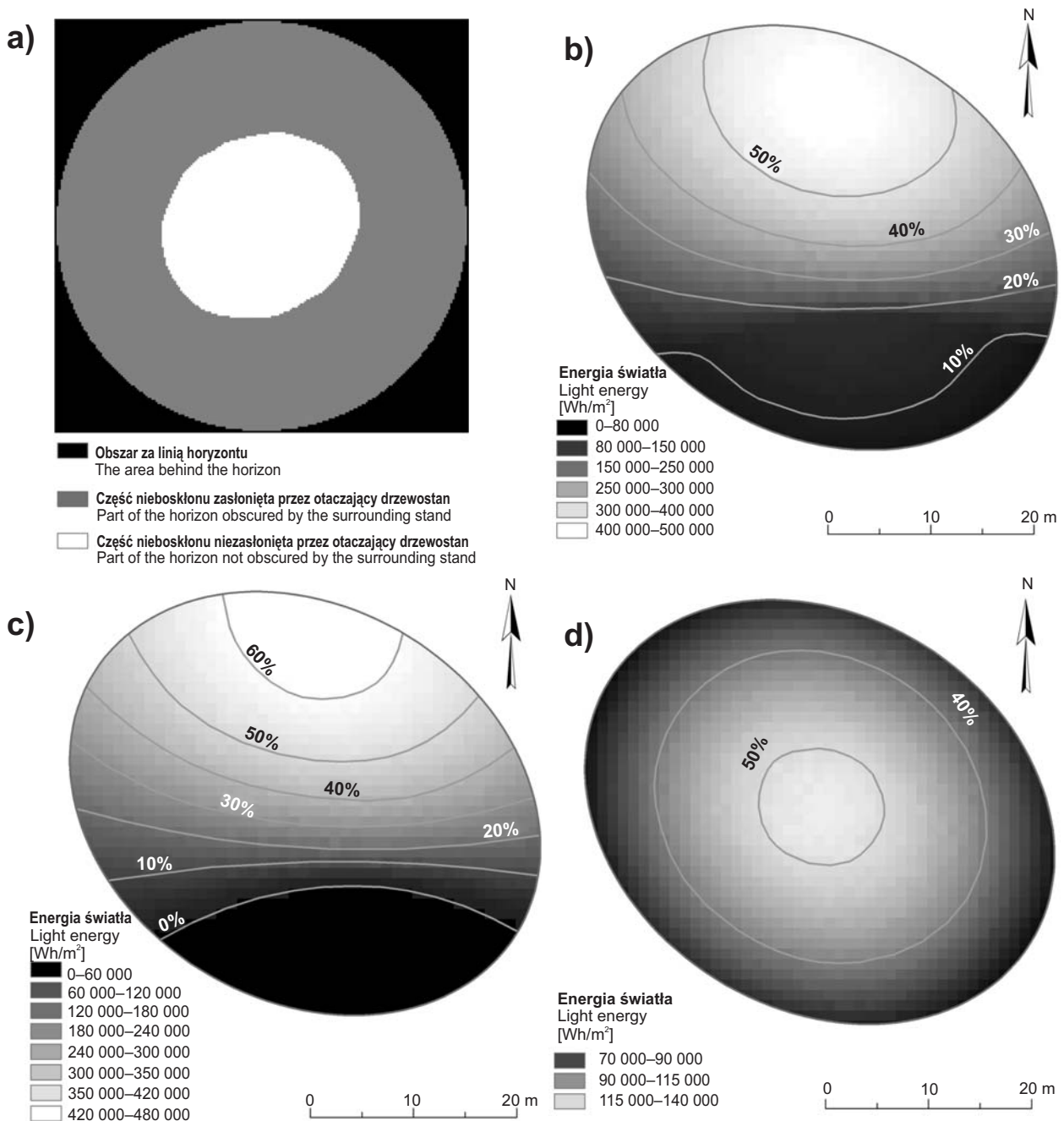
Słabą stroną omawianych modeli jest fakt, że są to oddzielnie działające aplikacje, dla których trzeba specjalnie zbierać i przygotowywać dane. Rozwój systemów informacji geograficznej (GIS, ang. Geographic Information System) sprawił, że powstały olbrzymie bazy danych z informacjami (numeryczny model terenu), które mogą być wykorzystane za pomocą modeli promieniowania słonecznego na powierzchni otwartej przy osłonie bocznej. Jednym z pierwszych takich modeli był program SOLARFLUX (Rich et al. 1994), później rozwinięty i zaimplementowany jako Solar Analyst w programie ArcView (Fu, Rich 1999, 2002). Później powstały inne programy, takie jak: solarradn (Kumar 1997) czy POTRAD (van Dam 2000, za Bolibok, Andrzejczyk 2008) również wykorzystujące potencjał tej technologii, jednak mniej się upowszechniły.

Program SOLARFLUX koncepcyjnie wywodzi się od programu CANOPY opracowanego przez Richa (1989) służącego do określania warunków świetlnych pod koronami drzew na podstawie analizy fotografii hemisferycznych. Idea tego rozwiązania sprowadza się do użycia zdjęcia hemisferycznego przedstawiającego sklepienie drzewostanu widziane z dna lasu (Bolibok

2010). Po odpowiednim przetworzeniu zdjęcie takie dostarcza informacji o tym, które części nieboskłonu, widzianego z miejsca wykonywania zdjęcia, są zasłonięte przez drzewa. Następnie modelowany jest pozorny ruch słońca po nieboskłonie i sprawdzany jest czas promieniowania bezpośredniego, docierającego przez przerwy w sklepieniu drzewostanu (modelowane położenie słońca przypada na niezasłonięty fragment nieboskłonu). Przetworzone zdjęcie może również posłużyć do obliczenia wskaźnika widoczności nieboskłonu (sky view factor), który w kontekście analizy zdjęć hemisferycznych nazywany jest ażurowością punktową (ang. weighted openness) (Bolibok 2010). Na jego podstawie stosunkowo łatwo można oszacować dostępność światła rozproszonego na dnie lasu w miejscu wykonywania zdjęcia.

Główna idea programu SOLARFLUX jest w zasadzie podobna do idei programu CANOPY, ale źródłem informacji o tym, które fragmenty nieboskłonu są przysłonięte, jest numeryczny model terenu, a nie fotografia hemisferyczna. Można by powiedzieć, że algorytm programu SOLARFLUX wykonuje we wskazanych miejscach serię wirtualnych zdjęć hemisferycznych, na których widoczne są przeszkody zasłaniające słońce (ryc. 1a). Na podstawie analizy tych „fotografii” program ten przypisuje dla wybranych miejsc obliczony poziom natężenia promieniowania słonecznego uwzględniający wystawę i pochylenie terenu (ryc. 1 b, c, d).

Modelowanie zmienności natężenia promieniowania słonecznego w skali krajobrazu ma duże znaczenie dla zrozumienia przebiegu procesów ekologicznych obserwowanych w dużych skalach przestrzennych. Model SOLARFLUX (Rich et al. 1995) z założenia miał się odznaczać dużą elastycznością pozwalającą na modelowanie wpływu topografii na natężenie promieniowania słonecznego bezpośredniego i rozproszonego w różnych skalach przestrzennych: w skali krajobrazu, w skali drzewostanu, czy w skali małego gniazda w drzewostanie. Omawiany model oraz jego nowsze implementacje okazały się przydatne w badaniach prowadzonych na dużą skalę. Za jego pomocą stworzono model zmienności temperatury powietrza dla powierzchni terenu Parku Narodowego Yellowstone, pomocny przy wskazywaniu obszarów zimowej koncentracji zwierzyny (Huang et al. 2008; Huang, Fu 2009). Na Alasce za jego pomocą modelowano i analizowano zmiany przebiegu górnej granicy lasu (Stueve et al. 2011). Informacje o wpływie topografii na natężenie promieniowania słonecznego okazały się również przydatne do wyjaśnienia kierunków zmian składu gatunkowego drzewostanów na suchych siedliskach górskich (Harrod et al. 1998), w mniejszej skali przestrzennej prowadzono również analizy. Na podstawie numerycznego modelu opisującego powierzchnię koron luźnych drzewostanów jałowcowo-



Rycina 1. Wyniki modelowania warunków świetlnych na gnieździe wykonane w środowisku programu ARC GIS 10.1. a) widok nieboskłonu modelowany dla środka gniazda, jest to wirtualny odpowiednik zdjęcia hemisferycznego nieboskłonu wykonanego na środku gniazda, b) przestrzenne zróżnicowanie ogólnej dostępności światła w obrębie gniazda, c) przestrzenne zróżnicowanie dostępności światła bezpośredniego, d) przestrzenne zróżnicowanie dostępności światła rozproszonego. Na rycinach b), c), d) izoliny opisują, jaki procent danego rodzaju światła docierającego na powierzchnię otwartą dostaje się w dany rejon gniazda.

Figure 1. Results of modeling of light conditions on the opening in a stand made in the ARC GIS 10.1 environment; a) modeled viewshed in the middle of the gap, it is the virtual equivalent of hemispherical photography of the sky made in the middle of the gap; b) the spatial variability of global light availability within the gap; c) spatial variability of direct light availability; d) spatial variability of the diffuse light availability. Isolines at figures b), c), d) describe what percentage of the type of light that reaches the surface gets the certain gap area.

sosnowych modelowano warunki termiczne na gruncie pomiędzy drzewami (Rich et al. 1993; Dubayah, Rich 1996). Rich i inni (1995) zamieścili ryciny ilustrujące rozkład promieniowania słonecznego w obrębie małych kolistych luk o średnicy 20 m, które wskazują na dużą przydatność tego modelu w badaniach hodowlanych. Powszechności stosowania cięć gniazdowych w naszych lasach nie towarzyszy równie powszechna znajomość zróżnicowania warunków świetlnych w obrębie gniazd. Łatwe w obsłudze, modele warunków świetlnych na powierzchni otwartej, uwzględniające osłonę boczną, mogą stać się najpierw narzędziem pomocnym do interpretacji wzrostu odnowień na gniazdach, a w następnie – narzędziem do projektowania optymalnego kształtu gniazd dla wybranych gatunków w wybranej lokalizacji.

Literatura

- Bartelink H.H. 1998. Radiation interception by forest trees: a simulation study on effects of stand density and foliage clustering on absorption and transmission. *Ecological Modelling*, 105: 213–225.
- Bolibok L. 2010. Zastosowanie zdjęć hemisferycznych do opisu struktury warstwy koron i modelowania warunków świetlnych pod okapem drzewostanów. *Leśne Prace Badawcze*, 71(2): 175–188.
- Bolibok L., Andrzejczyk T. 2008. Analiza zagęszczenia samosiewów brzozy i sosny na gniazdach na podstawie modelu promieniowania słonecznego. *Sylwan*, 152: 10–19.
- Bonhomme R.. 1993. The solar radiation: characterization and distribution in the canopy, w: *Crop Structure and Light Microclimate: Characterization and Applications* (red. C. Varlet-Grancher, R. Bonhomme, H. Sinoquet). Paris, INRA, 17–28. ISBN 2-380-0448-2.
- Canham C.D., Burbank D.H., Pacala S.W., Finzi A.C. 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.
- 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, Coates K.D., Bartemucci P., Quaglia S. 1999. Measurement and modeling of spatially-explicit variation in light transmission through interior cedar-hemlock forests of British Columbia. *Canadian Journal of Forest Research*, 29: 1775–1783.
- Cannell M.G.R., Grace J. 1993. Competition for light: detection, measurement, and quantification. *Canadian Journal of Forest Research*, 23: 1969–1979.
- Cescatti A. 1997a. Modelling the radiative transfer in discontinuous canopies of asymmetric crowns. I. Model structure and algorithms. *Ecological Modelling*, 101: 263–274.
- Cescatti A. 1997b. Modelling the radiative transfer in discontinuous canopies of asymmetric crowns. II. Model testing and application in a Norway spruce stand. *Ecological Modelling*, 101: 275–284.
- Chazdon R.L., Field C.B. 1987. Photographic estimation of photosynthetically active radiation: evaluation of a computerized technique. *Oecologia*, 73: 525–532.
- Chen J.M., Black T.A., Price D.T., Carter R.E. 1993. Model for Calculating Photosynthetic Photon Flux Densities in Forest Openings on Slopes. *Journal of Applied Meteorology*, 32: 1656–1665.
- Coates K.D. 1998. Tree species response to gap formation in partially-cut interior cedar-hemlock forests of northwestern British Columbia, The University of British Columbia.
- Coates K.D., Burton P.J. 1997. A gap-based approach for development of silvicultural systems to address ecosystem management objectives. *Forest Ecology and Management*, 99: 337–354.
- De Chantal M., Leinonen K., Kuuluvainen T., Cescatti A. 2003. Early response of *Pinus sylvestris* and *Picea abies* seedlings to an experimental canopy gap in a boreal spruce forest. *Forest Ecology and Management*, 176: 321–336.
- Dengler A. 1930. *Waldbau auf ökologischer Grundlage: Ein Lehr- und Handbuch*. Berlin, Springer.
- Dubayah R., Rich P.M. 1996. GIS-Based Solar Radiation Modeling, w: *GIS and Environmental Modeling: Progress and Research Issues* (red. M.F. Goodchild, L.T. Steyaert, B.O. Parks, C. Johnston, D. Maidment, M. Crane, S. Glenning), John Wiley & Sons, 129–134.
- Fischer B.C., Merritt C. 1978. SHADOS: a computer model to simulate light energy distribution in small forest openings., w: *Proceedings of the Second Central Hardwood Forest Conference*. (red. P.E. Pope), 302–319.
- Fu P., Rich P.M. 1999. Design and implementation of the Solar Analyst: an ArcView extension for modeling solar radiation at landscape scales, w: *Proceedings of the 19th Annual ESRI User Conference*, 1–33.
- Fu P., Rich P.M. 2002. A geometric solar radiation model with applications in agriculture and forestry. *Computers and Electronics in Agriculture*, 37: 25–35.
- Fu Q. 2003. Radiation (SOLAR), w: *Encyclopedia of Atmospheric Sciences* (red. J.R. Holton). Oxford, Academic Press, 1859–1863.
- Gendron F., Messier C., Lo E., Comeau P.G. 2006. The angular distribution of diffuse photosynthetically active radiation under different sky conditions in the open and within deciduous and conifer forest stands of Quebec and British Columbia, Canada. *Annals of Forest Science*, 63: 43–53.
- Grace J.C., JARVIS P.G., Norman J.M. 1987. Modelling the interception of solar radiant energy in intensively managed stands. *New Zealand Journal of Forest Science*, 17(2/3), 193–209.
- Graniczny S. 1952. *Badania nad dolesianiem powierzchni pod drzewostanami lukowatymi i nadmiernie przerzedzonymi*. Warszawa, Państwowe Wydawnictwa Rolnicze i Leśne.
- Graniczny S. 1959. Prosta metoda określania warunków usłonecznienia jednego z podstawowych czynników ekologicznych w hodowli lasu. *Sylwan*, 103: 31–39.
- Halverson H.G., Smith J.L. 1974. Controlling solar light and heat in a forest by managing shadow sources. Berkeley, California. Pacific Southwest Forest and Range Experi-

- ment Station, Forest Service, U.S. Department of Agriculture. 14 s.
- Halverson H.G., Smith J.L. 1979. Solar radiation as a forest management tool: a primer of principles and application. Berkeley, California. Pacific Southwest Forest and Range Experiment Station, Forest Service, U.S. Department of Agriculture, 13 s.
- Harrington J.B. 1984. Solar radiation in a clear-cut strip — A computer algorithm. *Agricultural and Forest Meteorology*, 33: 23–39.
- Harrod J., White P.S., Harmon M.E. 1998. Changes in xeric forests in western Great Smoky Mountains National Park, 1936–1995. *Castanea*, 63(3): 346–360.
- Huang S., Fu P. 2009. Modeling Small Areas Is a Big Challenge. ESRI, ArcUser Online, 28–31. [3.07.2013].
- Huang S., Rich P.M., Crabtree R.L., Potter C.S., Fu P. 2008. Modeling monthly near-surface air temperature from solar radiation and lapse rate: Application over complex terrain in Yellowstone National Park. *Physical Geography*, 29: 158–178.
- Kumar L., Skidmore A.K., Knowles E. 1997. Modelling topographic variation in solar radiation in a GIS environment. *International Journal for Geographical Information Science*, 11(5): 475–497.
- 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: 796–811.
- Marquis D.A. 1965. Controlling light in small clearcuttings. Northeastern Forest Experiment Station, Forest Service, U.S. Department of Agriculture.
- Marshall J., Plum R.A. 2008. Atmosphere, Ocean, and Climate Dynamics: An Introductory Text. Academic Press. ISBN 9780125586917.
- Mierzejewski W., Niedźwiedzki P. 1954. Z badań nad przebiegiem odnowienia w rębni gniazdowej. *Sylwan*, 98: 51–63.
- Monteith J.L., Unsworth M.H. 2008. Principles of Environmental Physics. Academic Press. ISBN 9780123869104.
- Morozov G.F. 1925. Učenje o lese. Leningrad, Goslesbumizdat.
- Norman J.M., Jarvis P.G. 1975. Photosynthesis in Sitka Spruce (*Picea sitchensis* (Bong.) Carr.): V. Radiation Penetration Theory and a Test Case. *Journal of Applied Ecology*, 12: 839–878.
- Oker-Blom P. 1986. Photosynthetic radiation regime and canopy structure in modeled forest stands. *Acta Forestalia Fennica*, 197: 1–44.
- Pierce L.L., Running S.W. 1988. Rapid estimation of coniferous forest leaf area index using a portable integrating radiometer. *Ecology*, 69(6): 1762–1767.
- Pukkala T., Kuuluvainen T., Stenberg P. 1993. Below-Canopy distribution of photosynthetically active radiation and its relation to seedling growth in a boreal *Pinus sylvestris* stand. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 8: 313–325.
- Rich P.M. 1989. A manual for analysis of hemispherical canopy photography. New Mexico, Los Alamos National Laboratory.
- Rich P.M. 1990. Characterizing plant canopies with hemispherical photographs. *Remote Sensing Reviews*, 5(1): 13–29.
- Rich P.M., Dubayah R., Hetrick W.A., Saving S.C. 1994. Using viewshed models to calculate intercepted solar radiation: applications in ecology. American Society for Photogrammetry and Remote Sensing Technical Papers: 524–529.
- Rich P.M., Hetrick W.A., Saving S.C. 1995. Modeling Topographic Influences on Solar Radiation: A Manual for the SOLARFLUX Model. Los Alamos National Laboratory Report LA-12989-M.
- Rich P.M., Hughes G.S., Barnes F.J. 1993. Using GIS to reconstruct canopy architecture and model ecological processes in pinyon-juniper woodlands, w: Thirteenth Annual ESRI User Conference, 435–445.
- Spittlehouse D.L. 2004. Forest, Edge, and Opening Microclimate at Sicamous Creek. University of British Columbia Press.
- Sprugel D.G., Rascher K.G., Gersonde R., Dovčiak M., Lutz J.A., Halpern C.B. 2009. Spatially explicit modeling of overstory manipulations in young forests: Effects on stand structure and light. *Ecological Modelling*, 220: 3565–3575.
- Stanhill G., Cohen S. 2001. Global dimming: a review of the evidence for a widespread and significant reduction in global radiation with discussion of its probable causes and possible agricultural consequences. *Agricultural and Forest Meteorology*, 107: 255–278.
- Stueve K.M., Isaacs R.E., Tyrrell L.E., Densmore R.V. 2011. Spatial variability of biotic and abiotic tree establishment constraints across a treeline ecotone in the Alaska Range. *Ecology*, 92: 496–506.
- ter Steege H. 1997. Winphot 5.0. A programme to analyze vegetation indices, light and light quality from hemispherical photographs. Tropenbos-Guyana Programme/Utrecht University. Tsubo M., Walker S. 2005. Relationships between photosynthetically active radiation and clearness index at Bloemfontein, South Africa. *Theoretical and Applied Climatology*, 80: 17–25.
- Wagner C. 1923. Der Blendersaumschlag und sein System. Tübingen, Verlag der H. Laupp Buchhandlung.
- Włoczewski T. 1968. Ogólna hodowla lasu: podręcznik dla studentów wydziałów leśnych WSR. Warszawa, Państwowe Wydawnictwo Rolnicze i Leśne.