

Południkowa zmienność warunków radiacyjnych w obrębie gniazd na terenie Polski – wyniki modelowania

Latitudinal variability of the radiation microclimate in artificial forest gaps in Poland – the modelling perspective

Leszek Bolibok^{1*}, Michał Brach², Stanisław Drozdowski¹, Henryk Szeligowski¹

Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie, Wydział Leśny, ¹Katedra Hodowli Lasu,

² Katedra Urządzania Lasu, Geomatyki i Ekonomiki Leśnictwa, ul. Nowoursynowska 159, 02–776 Warszawa, Polska

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

Abstract. The aim of the study was to characterize latitudinal changes in the radiative microclimate of small forest openings (artificial gaps) under Polish conditions. The global, direct and diffuse radiation on the forest floor in gaps was modelled using the Solar Radiation tool in ArcGIS 10.2 Esri. The gaps were modelled as holes of elliptical shape (60m x 40m diameters) in flat terrain and with a depth of 20 to 30 meters to mimic the height of a surrounding tree stand. The range of global radiation diversity on an open and flat surface predicted by our model was comparable with findings of empirical studies. Theoretically, the investigated gaps in the northern-most part of Poland receive only 82% of global solar radiation, 74% direct and 90% of diffuse radiation compared to gaps in the most southern part of the country. The comparison with empirical data indicates that local values of the transmittance parameter of the atmosphere may have a large influence on the actual values of solar radiation and may partially mask the latitudinal impact. Nevertheless, the model constitutes a valuable tool for characterizing solar radiation diversity in a gap and supports silvicultural decision-making.

Keywords: radiation conditions, diffuse radiation, direct radiation, modelling, artificial gap, latitude

1. Wstęp

Cięcia gniazdowe zupełnie są często wykorzystywane w praktyce, zarówno w rębni gniazdowej, jak też w innych rębniach złożonych. Do ważniejszych czynników wpływających na warunki radiacyjne panujące na gnieździe można zaliczyć zarówno jego rozmiary, jak też ich proporcję w stosunku do wysokości otaczającego drzewostanu. Pewną rolę w kształtowaniu warunków radiacyjnych, w tym świetlnych, na gniazdach może również odgrywać szerokość geograficzna. W lokalizacjach znajdujących się na niższej szerokości geograficznej (bliżej równika), słońce w swoim pozornym ruchu po nieboskłonie o tej samej porze roku zajmuje wyższe położenie niż w lokalizacjach usytuowanych dalej od równika. Im wyżej znajduje się słońce nad horyzontem, tym większa część dna gniazda otrzymuje promieniowanie bezpośrednie.

Energia promieniowania emitowanego przez Słońce docierająca do górnych warstw atmosfery niesiona jest w około 50% przez promieniowanie podczerwone (bliskie i dalekie)

(>0,7 μm), w około 40% przez promieniowanie z zakresu widzialnego (0,4–0,7 μm) i w około 10% – przez promieniowanie ultrafioletowe (<0,4 μm) (Fu 2003). Wzrost dostępu promieniowania bezpośredniego do wybranego fragmentu gniazda oznacza wzrost dostępu energii cieplnej. Ma to wpływ na temperaturę powietrza oraz gleby na gnieździe (Tomaneck 1958; Carlson, Groot 1997; Prévost, Raymond 2012) i pośrednio może wpływać na wilgotność gleby w obrębie gniazda (Gray et al. 2002; Ritter et al. 2005). Zmienność warunków wzrostu (temperatury i wilgotności powierzchniowych warstw gleby) będąca pochodną dostępności promieniowania słonecznego może przełożyć się na przestrzenną zmienność zagęszczenia odnowień naturalnych (Minckler et al. 1973; Bolibok, Andrzejczyk 2008) lub zmienność wysokości odnowień sztucznych (Gray, Spies 1996; Bolibok et al. 2011).

Określenie wpływu szerokości geograficznej na warunki radiacyjne w obrębie gniazd, ważne z punktu widzenia doskonalenia metodyki cięć gniazdowych, jest ze względów praktycznych trudne do wykonania na drodze empirycznej.

Wpłynęło: 24.06.2015 r., recenzowano: 17.10.2015 r., zaakceptowano: 4.11.2015 r.

Nawet jeżeli udałoby się w różnych szerokościach geograficznych założyć w celach obserwacji gniazda o identycznym kształcie w drzewostanach o tym samym składzie gatunkowym i takiej samej wysokości, nie rozwiązałyby to wszystkich metodycznych problemów. Jednym z nich, praktycznie nie do ominięcia, jest zróżnicowanie wysokościowe na terenie Polski. Część energii promieniowania słonecznego przechodzącego przez atmosferę ulega rozproszeniu. Teoretycznie z tego powodu w lokalizacjach położonych wyżej nad poziomem morza w tej samej szerokości geograficznej należy oczekiwać większej ilości energii promieniowania słonecznego niż w miejscach położonych niżej. W Polsce przestrzenna zmienność wysokości terenu nad poziomem morza praktycznie uniemożliwia założenie gniazd w porównywalnych warunkach wysokościowych reprezentujących różne stopnie szerokości geograficznej. Zaawansowane modele opisujące warunki świetlne na dnie lasu przy osłonie bocznej drzewostanu mogą być narzędziem umożliwiającym analizę tego zagadnienia (Bolibok et al. 2013). Rich i in. (1995) zaprezentowali, jak za pomocą modelowania można badać wpływ różnych parametrów opisujących położenie i kształt gniazda (szerokości geograficznej, wielkości gniazda i wysokości otaczającego drzewostanu) na kształtowanie się warunków świetlnych w jego wnętrzu. Wpływ wysokości otaczającego drzewostanu, wystawy i nachylenia terenu na kształtowanie się mikroklimatu radiacyjnego na gniazdach w warunkach środkowej Polski za pomocą takiego modelu zostały przedstawione w pracy Boliboka i in. (2015).

Celem niniejszej pracy jest analiza potencjalnej zmienności warunków radiacyjnych w Polsce na eliptycznych gniazdach w zależności od szerokości geograficznej oraz porównanie tej zmienności z publikowanymi informacjami o wieloletniej zmienności nasłonecznienia. Jako narzędzie do modelowania warunków radiacyjnych na gniazdach został wykorzystany program Solar Analyst, opracowany jako rozszerzenie programu ArcView Esri (Fu, Rich 2002). W pracy wykorzystano implementację tegoż programu w ArcMap ArcGIS 10.2 Esri występującą pod nazwą Solar Radiation tool.

2. Metodyka

Program Solar Analyst koncepcyjnie wywodzi się z programu CANOPY, opracowanego przez Richa (1989), służącego do określania warunków świetlnych pod koronami drzew na podstawie analizy zdjęć hemisferycznych. Zdjęcie hemisferyczne przedstawiające sklepienie drzewostanu widziane z dna lasu po odpowiednim przetworzeniu może służyć jako źródło informacji o tym, które fragmenty nieboskłonu są przesłonięte przez korony drzew blokujące zarówno dostęp promieniowania bezpośredniego (z dysku słonecznego), jak i rozproszonego (Bolibok 2010). Można stwierdzić, że program Solar Analyst dla zadanych punktów na dnie gniazda generuje wirtualne zdjęcia hemisferyczne wskazujące, które fragmenty nieboskłonu zasłonięte są przez otaczający drzewostan. Podstawą do tych obliczeń jest numeryczny model pokrycia terenu opisujący gniazdo jako zagłębienie w tere-

nie. Program Solar Analyst modeluje pozorny ruch słońca po nieboskłonie tak, aby sprawdzić czas przez jaki słońce nie jest zasłonięte przez drzewa, co oznacza czas przez jaki promieniowanie bezpośrednie może teoretycznie docierać do wybranego punktu na dnie gniazda. Dostępność promieniowania rozproszonego dla wybranego punktu na dnie lasu jest proporcjonalna do części nieboskłonu widocznej z tego punktu. Na podstawie wspomnianego „zdjęcia” można również oszacować, jaka część nieboskłonu nie jest zasłonięta, a więc określić dostępność promieniowania rozproszonego.

Główną przesłanką powstania programu Solar Analyst było modelowanie związku pomiędzy topografią terenu a ilością docierającego promieniowania słonecznego. Program ten wykorzystuje rastrowy model terenu i wylicza wartości promieniowania docierającego do wybranych komórek rastra. Rozmiar pikseli rastra jest definiowany przez użytkownika w zależności od potrzeb. Do analizy warunków świetlnych na gniazdach przyjęto obszar o wymiarach 200×200 m, dla którego podstawowy piksel miał bok o długości 0,5 m. Gniazdo zdefiniowano jako zagłębienie o głębokości równej wysokości otaczającego drzewostanu położone w środku modelowanego terenu. W tej konwencji powierzchnia terenu odpowiada górnej powierzchni koron drzew, więc można określić ten model jako numeryczny model pokrycia terenu. Przyjęto, że zarówno dno gniazda, jak i górna powierzchnia koron drzewostanu (powierzchnia terenu) są poziome (nie mają nachylenia i wystawy). Metodyka modelowania zakłada, że promieniowanie słoneczne nie może dostać się do gniazda poprzez korony otaczających drzew, ani też nie jest od nich odbijane w kierunku dna gniazda. To założenie jest konieczne, ponieważ wykorzystywany algorytm nie jest w stanie uwzględnić poprawki na przenikanie i odbijanie promieniowania słonecznego przez korony drzew. Niektóre pomiary na gniazdach (Chen et al. 1993) wskazują, że omawiane strumienie promieniowania mogą stanowić 12–17% całego promieniowania rozproszonego rejestrowanego na gnieździe. Przenikliwość koron drzew dla promieni słonecznych jest złożonym zjawiskiem zależnym m.in. od wieku i gatunku drzewa (Canham et al. 1994; Astrup, Larson 2006; Lefrançois et al. 2008) oraz od warunków atmosferycznych (Johnson, Smith 2006). Uwzględnienie wszystkich tych czynników utrudniłoby śledzenie wpływu szerokości geograficznej na mikroklimat radiacyjny gniazd. Wykorzystywany model zakłada również, że do gniazda nie dociera promieniowanie odbite od dalej położonych elementów topografii terenu (np. ośnieżonych gór).

Analizy przeprowadzono dla szeregu modeli terenu reprezentujących gniazda położone na różnych szerokościach geograficznych w Polsce (od 49°N do 55°N). Wszystkie modele terenu opisywały gniazdo o eliptycznym kształcie, o dłuższej osi równoległej do kierunku E-W. Stosunek dłuższej osi do krótszej wynosił 3:2 (60 do 40 m) i był podobny do często spotykanego na gniazdach w drzewostanach gospodarczych. We wszystkich modelach terenu przyjęta została ta sama wysokość dna gniazda nad poziomem morza (190 m n.p.m.) oraz wysokość otaczającego drzewostanu równa 20 m lub 30

m. Chociaż wysokość 190 m n.p.m. nie występuje na polskim wybrzeżu ani w górach, to założenie to jest istotne do modelowania warunków radiacyjnych (Bolibok et al. 2013), ponieważ do pewnego stopnia wyrównuje długość drogi (głębość optyczną atmosfery), jaką pokonuje promieniowanie słoneczne przez atmosferę do dna gniazda. Jednak przyjęcie takiego założenia nie niweluje wydłużenia drogi związane go ze zmianą kąta padania promieni słonecznych na wyższej szerokości geograficznej. Podczas modelowania ujednolicono wszystkie parametry gniazd z wyjątkiem szerokości geograficznej ich położenia, a więc to właśnie ta zmienna będzie odpowiedzialna za różnice w wynikach modelowania.

Punktem wyjścia w modelu jest ustalenie ilości promieniowania słonecznego dostającego się na powierzchnię otwartą w badanej lokalizacji. Promieniowanie słoneczne docierające do atmosfery ziemskiej obejmuje większą część spektrum promieniowania elektromagnetycznego i jest opisywane za pomocą stałej słonecznej (S). Jest to całkowita energia jaką przenosi promieniowanie słoneczne w jednostce czasu poprzez jednostkową powierzchnię ustawioną prostopadle do promieniowania w średniej odległości Ziemi od Słońca. Chociaż jej wartość podlega niewielkim fluktuacjom, w modelu przyjęto jej wartość domyślną z narzędzia Solar Radiation wynoszącą 1367 W/m^2 . Omawiany model wymaga założenia, jaka część promieniowania słonecznego nie ulega pochłonięciu podczas przechodzenia przez atmosferę. Wielkość tę opisuje współczynnik transmisji promieniowania, będący stosunkiem ilości promieniowania całkowitego dochodzącego do powierzchni Ziemi do energii promieniowania dochodzącego do górnej powierzchni atmosfery. Podczas modelowania przyjęto wartość tego parametru równą 0,4 zgodnie z wartością podawaną dla Warszawy (Bogdańska, Podogrocki 2000).

Model Solar Analyst podaje ogólną ilość energii promieniowania słonecznego, która dociera do wybranych punktów na dnie gniazda (bez wyszczególnienia energii niesionej przez poszczególne zakresy widma, przy czym szacuje jaka część tej energii niesiona jest przez promieniowanie bezpośrednie docierające z dysku słonecznego, a jaka przez promieniowanie rozproszone docierające z nieboskłonu). Na powierzchni otwartej energia promieniowania całkowitego jest sumą energii niesionej przez promieniowanie bezpośrednie i rozproszone. Udział promieniowania rozproszonego w promieniowaniu całkowitym średnio dla Polski wynosi 50% (Woś 1996), co przyjęto jako wartość domyślną dla każdej lokalizacji do dalszych analiz. Na podstawie tej informacji program wylicza potencjalną ilość obydwu rodzajów promieniowania. Analizując warunki radiacyjne na dnie gniazda, program uwzględnia przez jaką część analizowanego okresu dysk słoneczny był zasłonięty przez elementy topografii terenu (otaczający drzewostan) i odpowiednio redukuje poprzednio wyliczoną potencjalną ilość promieniowania bezpośredniego. Energia niesiona przez promieniowanie rozproszone dociera z każdego sektora nieboskłonu, a jej zmienność zależy głównie od zachmurzenia i wysokości kątowej słońca nad horyzontem. Otaczający drzewostan również wpływa na dostępność pro-

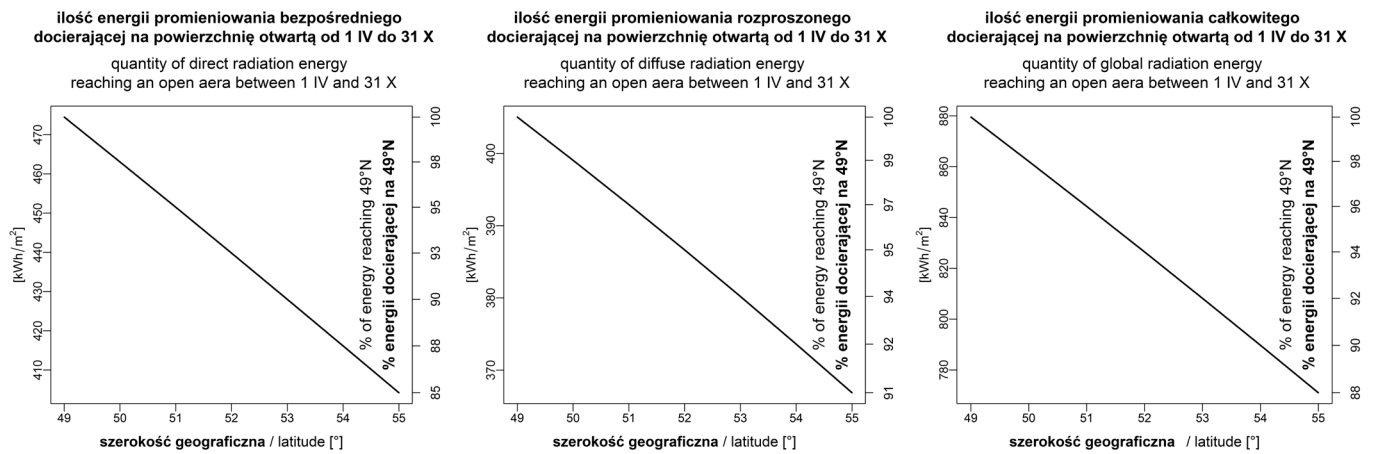
mieniowania rozproszonego, zasłaniając niektóre fragmenty nieboskłonu. Podczas modelowania przyjęto założenie, że promieniowanie rozproszone dociera ze zróżnicowaną intensywnością z różnych sektorów nieba, opisaną przez model SOC (ang. standard overcast sky).

W modelach zarówno wartość energii promieniowania bezpośredniego, jak i rozproszonego wyprowadza się ze stałej słonecznej S , a jej wartość odnosi się do chwilowej gęstości strumienia promieniowania wyrażonej w W/m^2 . Model wyliczał energię poszczególnych rodzajów promieniowania we wskazanym okresie wyrażoną w kWh/m^2 . Obliczenia wykonano w sezonie wegetacyjnym. Początek, koniec i długość okresu wegetacyjnego zależą od położenia, dlatego uwzględnienie rzeczywistej długości okresu wegetacyjnego dla wybranych lokalizacji byłoby dodatkowym źródłem zmienności wyników modyfikującym wpływ szerokości geograficznej. Z tego powodu dla wszystkich lokalizacji przyjęto tę samą długość okresu wegetacyjnego. Punktem wyjścia były parametry sezonu wegetacyjnego z okolic Rogowa (województwo łódzkie), tj. z początkiem – 2 kwietnia i końcem – 2 listopada (Chojnacka-Ożga 1999). Dla uproszczenia obliczeń i w celu porównania z wynikami innych badań ostatecznie przyjęto, że sezon wegetacyjny obejmuje okres od 1 kwietnia do 31 października włącznie.

3. Wyniki i dyskusja

Wyniki modelowania energii promieniowania słonecznego docierającej do powierzchni poziomego otwartego terenu na różnych szerokościach geograficznych w Polsce przedstawiono na rycinie 1. Dla przyjętych parametrów model przewiduje, że w sezonie wegetacyjnym całkowita energia docierająca do poziomej powierzchni otwartej waha się od $771,0 \text{ kWh/m}^2$ dla 55°N do $879,5 \text{ kWh/m}^2$ dla 49°N . Model przewiduje, że w położeniu północnym ilość energii całkowitego promieniowania słonecznego będzie o 12% mniejsza niż na południu. Silniej spada ilość energii promieniowania bezpośredniego (o 15%) niż promieniowania rozproszonego (9%). Ilość energii całkowitego promieniowania słonecznego docierającej do powierzchni otwartej jest zbieżna z danymi pomiarowymi z terenów Polski. Bogdańska i Podogrocki (2000) podają, że w okresie od 1 kwietnia do 31 października w ośmiu wybranych lokalizacjach reprezentujących obserwatoria meteorologiczne od Gdyni do Kasprowego Wierchu ilość energii całkowitego promieniowania słonecznego wahała się od 783 do 922 kWh/m^2 .

Model zakłada (por. ryc. 1) jednostajny spadek ilości energii słonecznej związany ze wzrostem szerokości geograficznej. Jest to efekt wzrostu długości drogi jaką przebywa promieniowanie słoneczne przez atmosferę, aby dotrzeć do lokalizacji bardziej wysuniętych na północ. Dodatkowym czynnikiem uwzględnianym przez model, ale działającym w przeciwnym kierunku, są zmiany długości dnia. Północne krańce Polski w skali roku mają o 20 godzin więcej dziennej części doby niż południowe, a różnica ta nasila się w miesiącach letnich (Bogdańska, Podogrocki 2000).



Rycina 1. Wyniki modelowania południkowej zmienności w dostępności różnych rodzajów promieniowania na powierzchni otwartej w lokalizacjach pomiędzy 49°N i 55°N

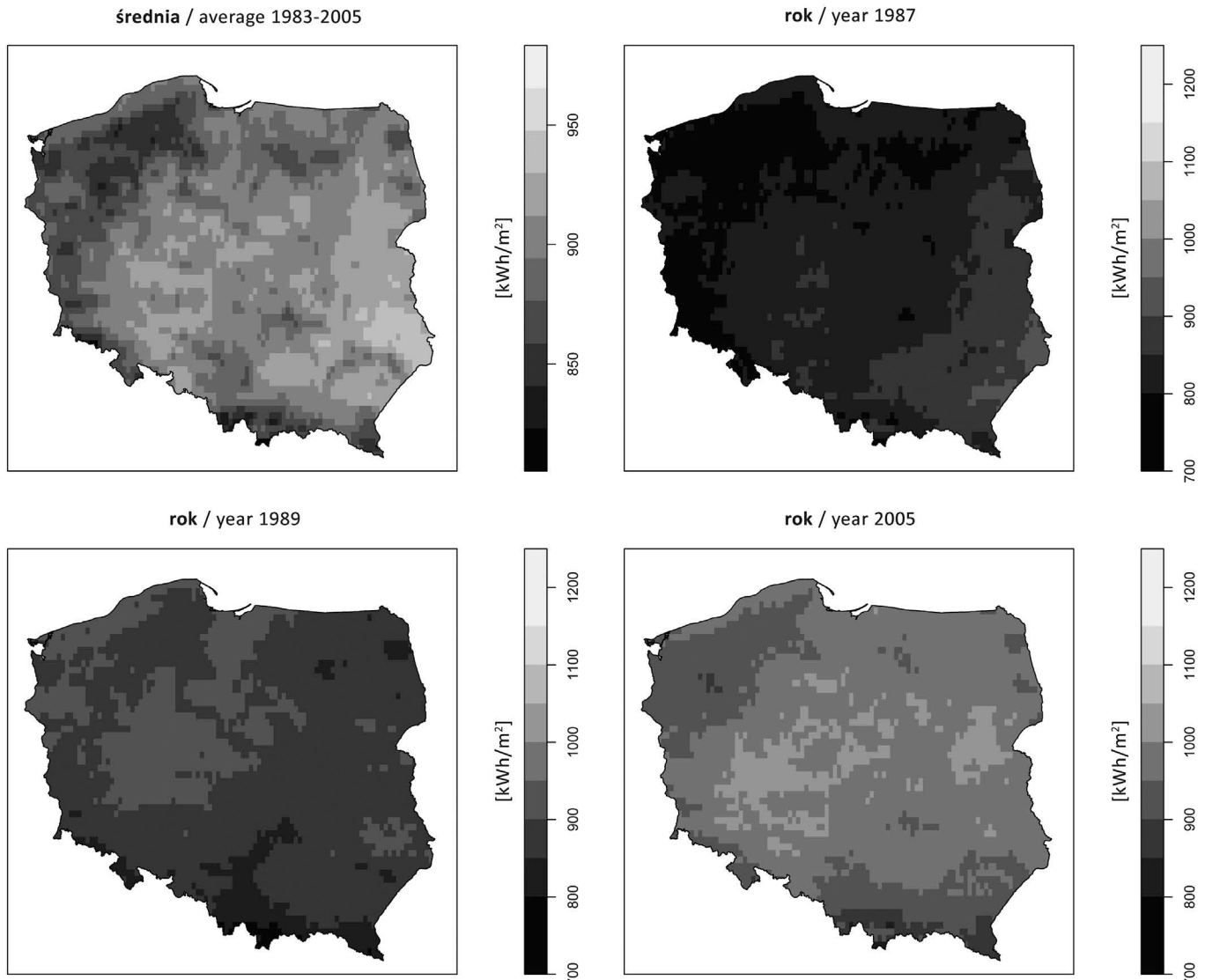
Figure 1. The outcome of modeling of latitudinal changes in supply of different kinds of solar radiation on open area in different localizations between 49°N and 55°N

Dane empiryczne wskazują, że szerokość geograficzna nie jest głównym czynnikiem regulującym dopływ promieniowania słonecznego na powierzchnię otwartą w Polsce. Na rycinie 2. przedstawiono przestrzenną zmienność dostępności całkowitego promieniowania słonecznego w przyjętym sezonie wegetacyjnym. Rycina ta bazuje na danych udostępnianych przez EUMETSAT Satellite Application Facility on Climate Monitoring (CM SAF) w postaci zestawu wartości średnich miesięcznych dla wybranych lokalizacji w latach 1983–2005. Dane te pochodzą z analizy danych satelitarnych opracowanych w sposób opisany przez Muellera i in. (2009). Przestrzenna zmienność dostępu promieniowania całkowitego z ryciny 2. przypomina przestrzenną zmienność średnich rocznych wartości słonecznego promieniowania całkowitego podawaną przez Miarę i in. (1987) dla lat 1956–1975. Do pewnego stopnia przewidywania modelu Solar Analyst pokrywają się z rzeczywistą przestrzenną zmiennością promieniowania całkowitego w Polsce. Ogólnie można zauważyć, że północna część kraju otrzymuje mniej promieniowania słonecznego (szczególnie Pomorze Zachodnie) niż południowa (szczególnie Wyżyna Lubelska). W tym ogólnym trendzie są wyjątki.

Wybrzeże Bałtyku oraz położenia górskie wykazują odwrotną tendencję. Na wybrzeże dociera więcej a w góry mniej promieniowania niż w przyległych rejonach. Ponadto w skali całego kraju można zauważyć wyraźny spadek ilości promieniowania całkowitego w gradiencie wschód–zachód. Jest to związane z przestrzenną zmiennością ważnego czynnika jakim jest usłonecznienie rzeczywiste, czyli liczba godzin, podczas których tarcza słoneczna nie jest zasłonięta przez chmury. Porównanie przestrzennej zmienności promieniowania całkowitego i usłonecznienia na terenie Polski (Kozłowski, Michalska 2001) wskazuje, że w kształtowaniu dostępu promieniowania lokalne usłonecznienie związane z przestrzenną i czasową zmiennością zachmurzenia ma większe znaczenie niż szerokość geograficzna.

Opisane rozbieżności wyników modelowania i danych empirycznych nie podważają sensu posługiwania się modelem Solar Analyst, raczej podkreślają znaczenie właściwego ustawienia parametrów do obliczeń. Z pewnością można uzyskać lepsze dopasowanie wyników, gdy dla danej lokalizacji zostanie odpowiednio dobrana wartość współczynnika transmisji promieniowania oraz udziału promieniowania rozproszonego w promieniowaniu całkowitym, które silnie są powiązane z lokalną wartością usłonecznienia. Właściwy dobór parametrów modelu nabiera jeszcze większego znaczenia, gdy mają one służyć interpretacji zjawisk przyrodniczych (np. przeżywalności nalotów) w konkretnym sezonie wegetacyjnym. W wybranej lokalizacji pomiędzy poszczególnymi latami mogą zachodzić duże różnice ilościowe w dostępności całkowitego promieniowania słonecznego (por. ryc. 2, rok 1987 i 2005). Również przy analizach w większej skali przestrzennej istotne jest dostosowywanie wartości parametrów modelu do lokalnych warunków w danym roku, ponieważ zdarzają się lata, gdy przestrzenna zmienność dostępności promieniowania całkowitego jest odwrotna do tej obserwowanej zazwyczaj (por. ryc. 2, rok 1989). Powyższe rozważania mają również znaczenie praktyczne hodowlane. Z powodu dużej przestrzennej i czasowej zmienności usłonecznienia na terenie Polski nie ma gwarancji, że gniazdo o teoretycznie optymalnych wymiarach zapewni optymalne warunki świetlne i termiczne dla odnowień, niemniej jednak dążenie do optymalizacji parametrów gniazda zwiększa szansę na uzyskanie optymalnych warunków mikroklimatu radiacyjnego.

Na rycinie 3 przedstawiono wpływ szerokości geograficznej na sumaryczną ilość energii promieniowania słonecznego docierającej do powierzchni dna gniazda. Rycina ta pokazuje, że spadek ilości promieniowania słonecznego na dnie gniazda wraz ze wzrostem szerokości geograficznej jest szybszy niż na terenie otwartym co jest związane z wpływem otaczającego drzewostanu.



Rycina 2. Przestrzenna zmienność natężenia promieniowania słonecznego obliczonego na podstawie średnich miesięcznych (IV–X) z lat 1983–2005. Średnie miesięczne dla poszczególnych lokalizacji (SIS METEOSAT 3, Monthly Mean, Version 001 © (2013) EUMESAT) zostały udostępnione przez EUMETSAT Satellite Application Facility on Climate Monitoring (CM SAF).

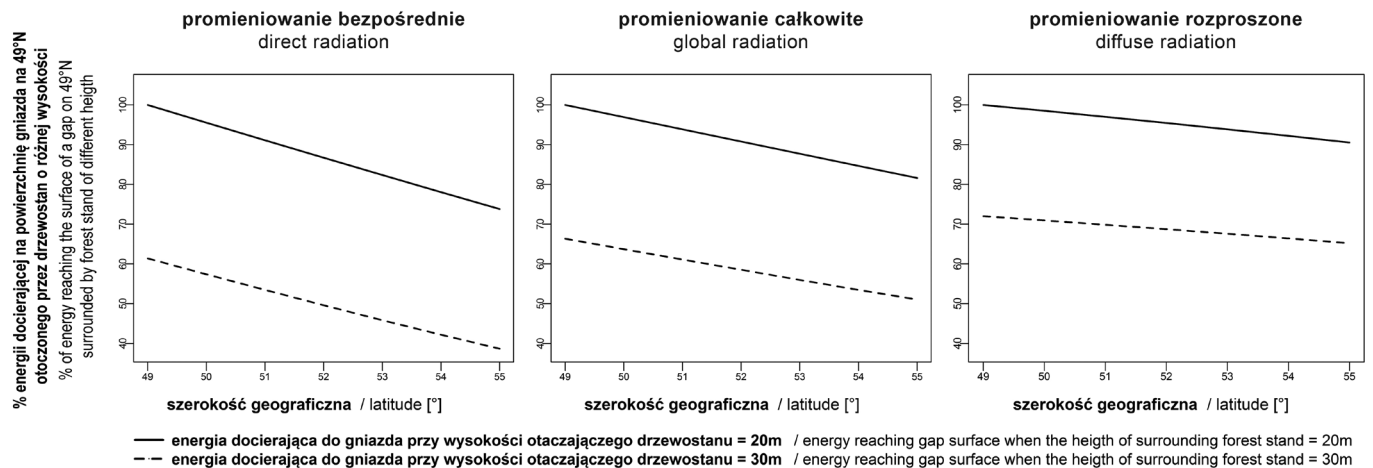
Figure 2. Spatial diversity of global solar radiation intensity calculated on the basis of month averages (April till October) from years 1983–2005. Data on month averages for specific localizations (SIS METEOSAT 3, Monthly Mean, Version 001 © (2013) EUMESAT) were prepared by EUMETSAT Satellite Application Facility on Climate Monitoring.

Najwięcej energii promieniowania słonecznego dociera do gniazd otoczonych drzewostanem o wysokości 20 metrów położnych na 49°N i wraz ze zwiększaniem się szerokości geograficznej ilość energii maleje, spadając na szerokości 55°N do 82% ilości referencyjnej dla gniazda z 49°N. Spadek ilości promieniowania rozproszonego docierającego do dna gniazda jest mniejszy, bo na 55°N dociera aż 90% ilości wyjściowej.

Najbardziej maleje dostępność promieniowania bezpośredniego (do 74%). Mechanizm spadku ilości tego rodzaju promieniowania jest dwójaki. Pierwsza przyczyna jest taka sama jak w przypadku powierzchni otwartej i jest związana z wysokością kątową słońca nad horyzontem, która maleje

wraz ze wzrostem szerokości geograficznej. Im niższa jest ta wysokość, tym dłuższa jest droga promieniowania przez atmosferę, a docierająca do powierzchni Ziemi ilość energii maleje (Bolibok et al. 2013).

Druga przyczyna związana jest z wpływem otaczającego drzewostanu. Na wyższych szerokościach geograficznych słońce nawet w południe znajduje się niżej nad horyzontem i cień rzucany przez drzewa rosnące na południowym skraju gniazda jest dłuższy. Szczególnie przekłada się to na spadek odsetka najbardziej nasłonecznionej powierzchni dna gniazda, która otrzymuje pomiędzy 80 a 100% ilości promieniowania bezpośredniego docierającego na otwartą powierzchnię na danej szerokości geograficznej (por. ryc. 4).



Rycina 3. Wyniki modelowania potencjalnego wpływu szerokości geograficznej na zmienność w dostępności różnych rodzajów promieniowania do powierzchni eliptycznych gniazd o wymiarach osi 60 m i 40 m, położonych pomiędzy 49°N i 55°N otoczonych drzewostanem o wysokości 20 lub 30 metrów. Na rycinach przedstawiono jak się kształtuje suma energii promieniowania słonecznego docierającego do powierzchni gniazd w okresie od 1 kwietnia do 31 października wyrażona w procentach ilości energii otrzymywanej przez gniazdo na 49°N.

Figure 3. Modeling outcome of potential latitude influence on diversity of supplies of different kinds of solar radiation on elliptical artificial gaps with axes length 60 and 40 meters, located between 49°N and 55°N and surrounded by tree stand of height 20 and 30 meters. The figures shows how changes the sum of solar radiation energy received by a gap in the period between 1st April and 31st October expressed as a percent of energy received by the gap placed on 49°N.

Spadek odsetka najsilniej nasłonecznionej powierzchni gniazda (z 18,38 do 10,7%) oznacza, że ta słoneczna plama jest coraz mniejsza i przesuwa się coraz bardziej na północ (ryc. 5). Może ona wychodzić poza powierzchnię gniazda, co ma potencjalnie duże znaczenie dla wzrostu odnowień podokapowych na północ od gniazda. W przypadku małych luk może to oznaczać, że najwięcej promieniowania bezpośredniego związanego z luką dociera nie do jej dna, lecz pod okap drzewostanu na północ od niej (Canham et al. 1990). Dla praktyki hodowlanej oznacza to, że w północnej części Polski dno lasu pod okapem drzewostanu na północ od gniazda będzie miało lepsze warunki świetlne niż na południu naszego kraju.

Przesuwanie się najbardziej nasłonecznionej części gniazda na północ wraz ze wzrostem szerokości geograficznej ma też istotne znaczenie dla wzrostu odnowień w obrębie gniazda. Jak zauważają Lieffers i in. (1999) wskutek tego zjawiska coraz mniej pokrywają się ze sobą dwie strefy w obrębie gniazda: zwiększonej dostępności światła oraz zwiększonej dostępności wody i składników pokarmowych. Centralne położenie tej drugiej strefy wynika w dużym stopniu z konkurencyjnego oddziaływania otaczających drzew (Bolibok 2009) i jest mało podatne na zmiany szerokości geograficznej. Wraz ze wzrostem szerokości geograficznej wzrasta odsetek zajmowany przez najbardziej zacienioną część gniazda (z 23,2 do 30,9%) otrzymującą mniej niż 20% ilości promieniowania bezpośredniego docierającego na otwartą powierzchnię na danej szerokości geograficznej (ryc. 5). W przypadku gleb mniej zasobnych w wilgoć może to być korzystna okoliczność (Bolibok, Andrzejczyk 2008; Bolibok et al. 2011).

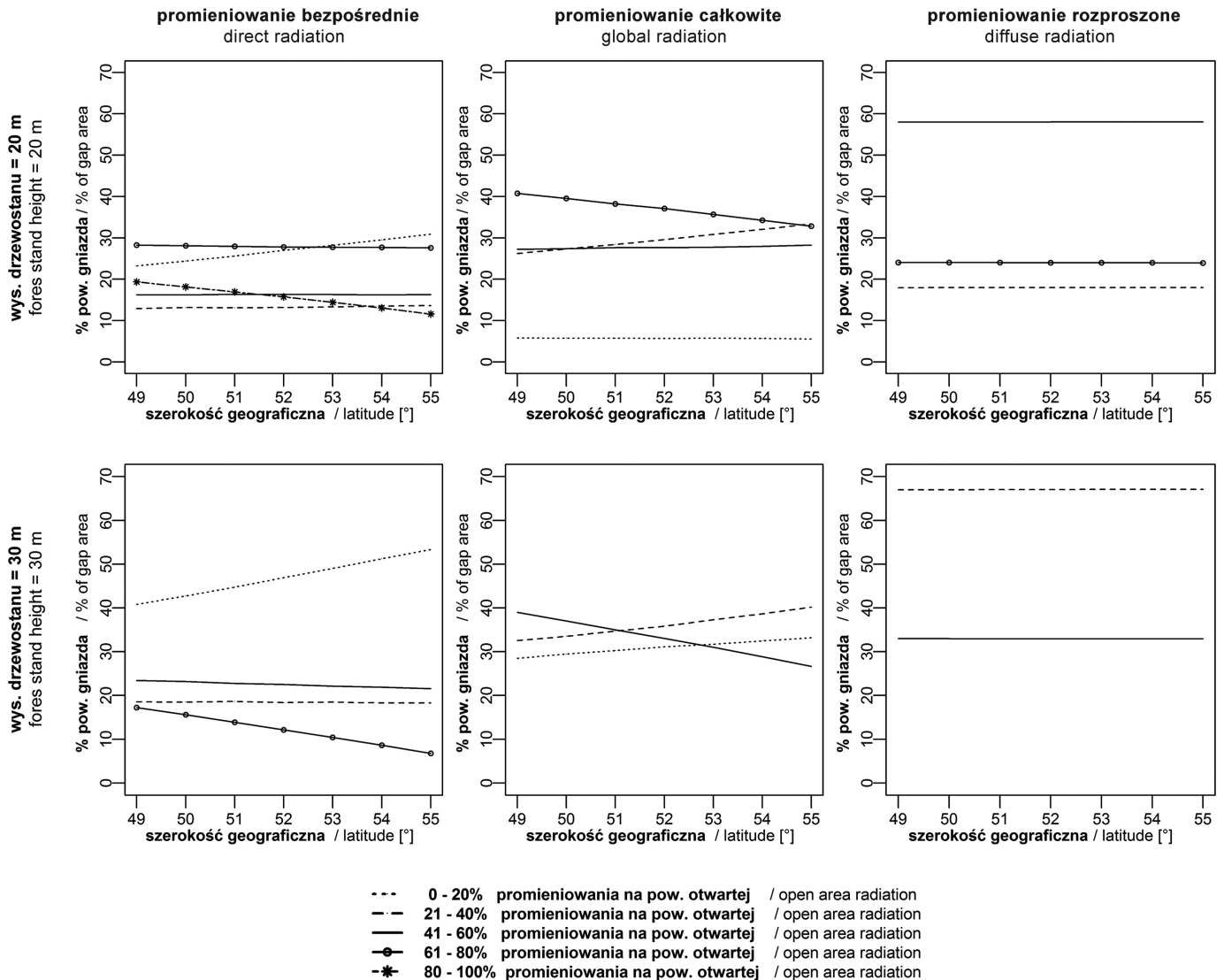
W przypadku spadku dostępności promieniowania rozproszonego działa tylko mechanizm związany ze zwiększeniem się drogi promieniowania przez atmosferę, dlatego względny

spadek energii niesionej przez to promieniowanie jest wyraźnie mniejszy (ryc. 3) i wynosi około 10%. Biorąc pod uwagę ten wynik, można oszacować, że na 26% względnego spadku ilości promieniowania bezpośredniego docierającego do gniazd na 55°N przypada 16% spadku związanego z większą długością cienia i 10% spadku związanego z większą głębokością optyczną atmosfery.

Wzrost szerokości geograficznej nie zmienia udziału powierzchniowego stref wewnątrz gniazda otrzymujących określony procent promieniowania rozproszonego docierającego na powierzchnię otwartą. Zarówno na 49°N, jak i na 55°N na gniazdach model nie wykazał stref otrzymujących poniżej 20%, jak też powyżej 80% promieniowania rozproszonego docierającego na powierzchnię otwartą. Na eliptycznych gniazdach o wymiarach osi 60 m i 40 m otoczonych drzewostanem o wysokości 20 m niezależnie od szerokości geograficznej model wskazuje, że 58% powierzchni gniazda otrzymuje od 41 do 60% promieniowania rozproszonego docierającego na powierzchnię otwartą (ryc. 5).

4. Podsumowanie

Głównym celem analizy było określenie potencjalnego wpływu szerokości geograficznej na mikroklimat radiacyjny w obrębie gniazda. Dwie serie analiz przeprowadzone dla gniazd otoczonych drzewostanem o wysokości 20 i 30 m wskazują, że wielkość charakterystyczna gniazda (stosunek jego średnicy do wysokości otaczającego drzewostanu) ma bardzo duży wpływ na mikroklimat radiacyjny w obrębie gniazda. Mniejszy, lecz dobrze widoczny, wpływ ma również szerokość geograficzna. Dobierając odpowiednie wymiary gniazda, można potencjalnie redukować wpływ



Rycina 4. Wyniki modelowania dostępności różnych rodzajów promieniowania na dnie eliptycznych gniazd o wymiarach osi 60 m i 40 m, położonych w różnych szerokościach geograficznych otoczonych drzewostanem o wysokości 20 lub 30 metrów. Na rycinach przedstawiono jak się zmienia udział powierzchni gniazd z różną względną dostępnością promieniowania słonecznego wyrażoną w procentach ilości energii otrzymywanej przez powierzchnię otwartą w danej lokalizacji.

Figure 4. Modeling outcome of supplies of different kinds of solar radiation on elliptical artificial gaps with axes length 60 and 40 meters supplies, located between 49°N and 55°N and surrounded by tree stand of height 20 and 30 meters. The figures show how changes the share of gap area receiving different levels of solar radiation. The levels are described as the percent of solar energy received by open space in given localization.

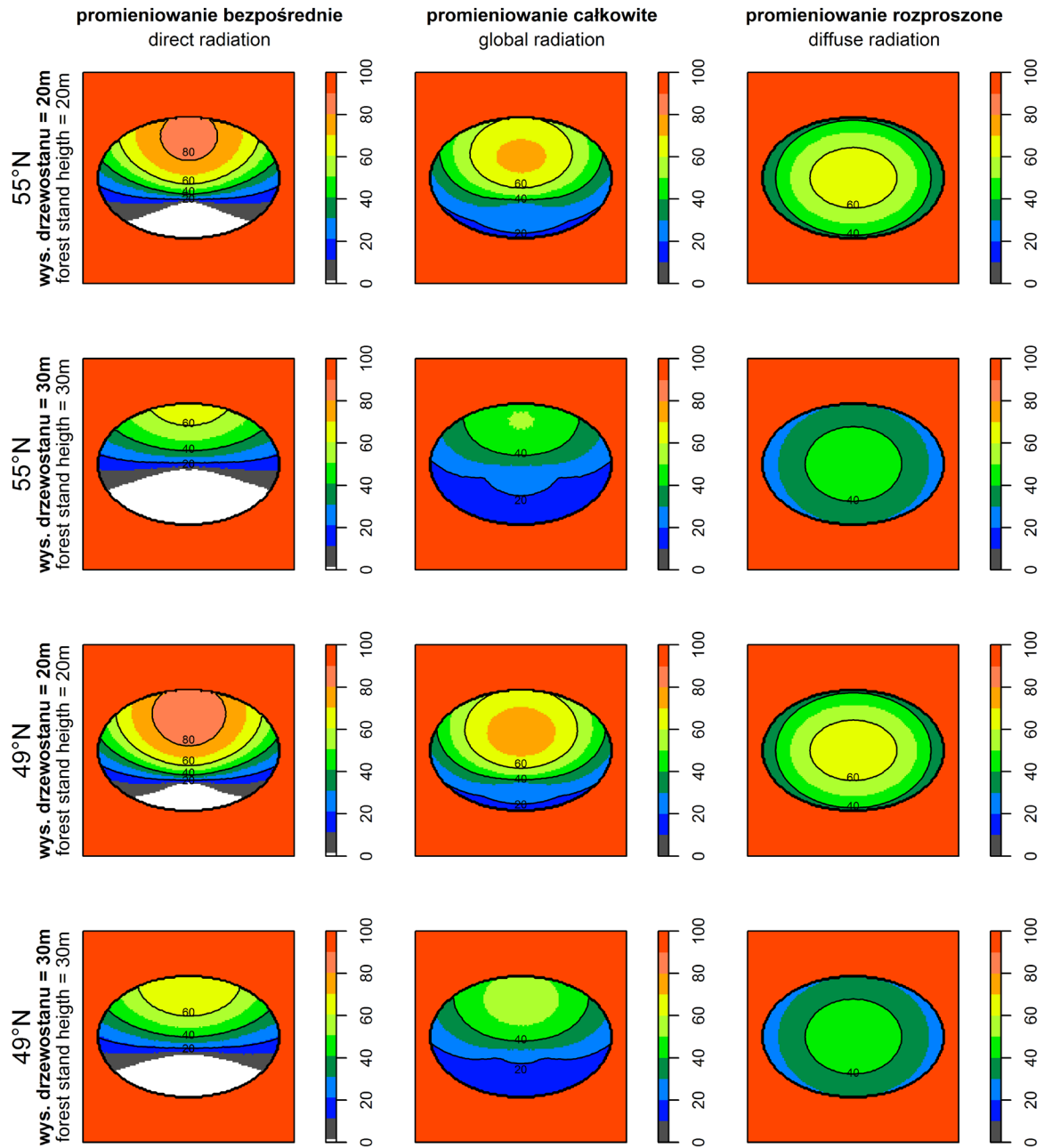
szerokości geograficznej. Jednakże dane o przestrzennej, a zwłaszcza czasowej (pomiędzy kolejnymi latami) zmienności w dostępności całkowitego promieniowania słonecznego na terenie Polski wskazują, że w praktyce zawsze pozostanie pewne ryzyko niedostosowania. Na szczęście powtarzalność warunków usłonecznienia w konkretnych rejonach kraju jest stosunkowo duża. Model Solar Analyst może służyć jako narzędzie do charakterystyki teoretycznej zmienności warunków radiacyjnych na gniazdach i może być wsparciem przy podejmowaniu decyzji hodowlanych dotyczących parametrów gniazd w wybranej lokalizacji.

Konflikt interesów

Autorzy deklarują brak potencjalnych konfliktów.

Podziękowania i źródła finansowania

Badania sfinansowano z grantu OP-2710-4/U/10 „Planowanie hodowlane w rębni stopniowej gniazdowej udoskonalonej” wykonanego w latach 2010-2014 na zlecenie Dyrekcji Generalnej Lasów Państwowych.



Rycina 5. Wyniki modelowania przestrzennej zmienności w dostępności różnych rodzajów promieniowania na dnie eliptycznych gniazd o wymiarach osi 60 m i 40 m, położonych na 49°N i 55°N otoczonych drzewostanem o wysokości 20 lub 30 metrów. Na rycinach przedstawiono jak kształtuje się przestrzenne zróżnicowanie energii promieniowania słonecznego docierającego do powierzchni gniazd w okresie od 1 kwietnia do 31 października wyrażone w procentach ilości energii otrzymywanej przez otwartą przestrzeń w tej samej lokalizacji.

Figure 5. Modeling outcome of spatial diversity of supplies of different kinds of solar radiation on elliptical artificial gaps with axes length 60 and 40 meters, located between 49°N and 55°N and surrounded by tree stand of height 20 or 30 meters. The figures show how changes the share of gap area receiving different levels of solar radiation. The levels are described as the percent of solar energy received by open space in given localization in the period between 1st April and 31st October.

Literatura

Astrup R., Larson B.C. 2006. Regional variability of species-specific crown openness for aspen and spruce in western boreal Canada. *Forest Ecology and Management* 228: 241–250. DOI: 10.1016/j.foreco.2006.02.048.

Bogdańska B., Podogrocki J. 2000. Zmienność całkowitego promieniowania słonecznego na obszarze Polski w okresie 1961–1995, *Meteorologia. Materiały Badawcze IMGW*.

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. DOI: 10.2478/v10111-010-0013-2.

- Bolibok L. 2009. Regulacja warunków wzrostu odnowień na gniazdach - wpływ parametrów gniazd na oddziaływanie czynników biotycznych. *Sylwan* 153: 733–744.
- Bolibok L., Andrzejczyk T. 2008. Analiza zagęszczenia samosiewów brzozy i sosny na gniazdach na podstawie modelu promieniowania słonecznego. *Sylwan* 152: 10–19.
- Bolibok L., Andrzejczyk T., Drozdowski S., Szeligowski H. 2011. Wysokość siedmioletnich odnowień dębowych na gniazdach w różnych warunkach siedliskowych. *Leśne Prace Badawcze* 72(2): 163–170.
- Bolibok L., Brach M., Drozdowski S., Orzechowski M. 2013. Modelowanie warunków świetlnych na dnie lasu. *Leśne Prace Badawcze* 74(4): 335–344.
- Bolibok L., Brach M., Szeligowski H., Orzechowski M., 2015. Wpływ wysokości otaczającego drzewostanu, wystawy i pochyleń terenu na mikroklimat radiacyjny na gnieździe – wyniki modelowania. *Sylwan* 159: 813–823.
- 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. DOI: 10.1139/x90-084.
- Carlson D.W., Groot A., 1997. Microclimate of clear-cut, forest interior, and small openings in trembling aspen forest. *Agricultural and Forest Meteorology* 87: 313–329. DOI: 10.1016/S0168-1923(95)02305-4.
- 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. DOI: 10.1175/1520-0450(1993)032<1656:MFCPPF>2.0.CO;2.
- Chojnacka-Ożga L. 1999. Długość termicznego okresu wegetacyjnego w lasach doświadczalnych SGGW w Rogowie w latach 1926-1998, w: Klimatyczne uwarunkowania życia lasu. Konferencja naukowa, Zakopane 21–22.05.1999, 127–134.
- 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. DOI:10.1016/S0168-1699(02)00115-1.
- Fu Q., 2003. Radiation (SOLAR), w: Encyclopedia of Atmospheric Sciences (red. J.R. Holton). Academic Press, Oxford, 1859–1863.
- Gray A.N., Spies T.A. 1996. Gap Size, Within-Gap Position and Canopy Structure Effects on Conifer Seedling Establishment. *Journal of Ecology* 84: 635–645. DOI: 10.2307/2261327.
- Gray A.N., Spies T.A., Easter M.J. 2002. Microclimatic and soil moisture responses to gap formation in coastal Douglas-fir forests. *Canadian Journal of Forest Research* 32: 332–343. DOI: 10.1139/x01-200.
- Johnson D.M., Smith W.K. 2006. Low clouds and cloud immersion enhance photosynthesis in understory species of a southern Appalachian spruce–fir forest (USA). *American Journal of Botany* 93: 1625–1632.
- Koźmiński C., Michalska B. (red.) 2001. Atlas klimatycznego ryzyka uprawy roślin w Polsce. Akademia Rolnicza Uniwersytet Szczeciński, Szczecin.
- Lefrançois M.-L., Beaudet M., Messier C. 2008. Crown openness as influenced by tree and site characteristics for yellow birch, sugar maple, and eastern hemlock. *Canadian Journal of Forest Research* 38: 488–497.
- 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.
- Miara K., Paszyński J., Grzybowski J. 1987. Zróżnicowanie przestrzenne bilansu promieniowania na obszarze Polski. *Przegląd Geograficzny* 59, 487–509.
- Minckler L.S., Woerheide J.D., Schlesinger R.C. 1973. Light, soil moisture, and tree reproduction in hardwood forest openings. North Central Forest Experiment Station, Forest Service, U.S. Dept. of Agriculture.
- Mueller R.W., Matsoukas C., Gratzki A., Behr H.D., Hollmann R. 2009. The CM-SAF operational scheme for the satellite based retrieval of solar surface irradiance — A LUT based eigenvector hybrid approach. *Remote Sensing of Environment* 113: 1012–1024. DOI: 10.1016/j.rse.2009.01.012
- Prévost M., Raymond P. 2012. Effect of gap size, aspect and slope on available light and soil temperature after patch-selection cutting in yellow birch–conifer stands, Quebec, Canada. *Forest Ecology and Management* 274, 210–221. DOI: 10.1016/j.foreco.2012.02.020
- Rich P.M., 1989. A manual for analysis of hemispherical canopy photography. Los Alamos National Laboratory.
- Rich P.M., Hetrick W.A., Saving S.C. 1995. Modeling Topographic Influences on Solar Radiation: A Manual for the SOLARFLUX Model.
- Ritter E., Starr M., Vesterdal L. 2005. Losses of nitrate from gaps of different sizes in a managed beech (*Fagus sylvatica*) forest. *Canadian Journal of Forest Research* 35: 308–319. DOI: 10.1139/x04-185.
- Tomanek J. 1958. Badania przebiegu temperatury, parowania i opadu w rębni gniazdowej. *Sylwan* 102: 13–31.
- Woś A. 1996. Zarys klimatu Polski. Wydawnictwo Naukowe UAM.

Wkład autorów

L.B. – koncepcja pracy, obróbka danych, przygotowanie manuskryptu; M.B., S.D., H.Sz. – obróbka danych, przygotowanie manuskryptu.

Południkowa zmienność warunków radiacyjnych w obrębie gniazd na terenie Polski – wyniki modelowania

Latitudinal variability of the radiation microclimate in artificial forest gaps in Poland – the modelling perspective

Leszek Bolibok^{1*} , Michał Brach² , Stanisław Drozdowski¹, Henryk Szeligowski¹

Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie, Wydział Leśny, ¹Katedra Hodowli Lasu,

² Katedra Urządzania Lasu, Geomatyki i Ekonomiki Leśnictwa, ul. Nowoursynowska 159, 02–776 Warszawa, Polska

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

Abstract. The aim of the study was to characterize latitudinal changes in the radiative microclimate of small forest openings (artificial gaps) under Polish conditions. The global, direct and diffuse radiation on the forest floor in gaps was modelled using the Solar Radiation tool in ArcGIS 10.2 Esri. The gaps were modelled as holes of elliptical shape (60m x 40m diameters) in flat terrain and with a depth of 20 to 30 meters to mimic the height of a surrounding tree stand. The range of global radiation diversity on an open and flat surface predicted by our model was comparable with findings of empirical studies. Theoretically, the investigated gaps in the northern-most part of Poland receive only 82% of global solar radiation, 74% direct and 90% of diffuse radiation compared to gaps in the most southern part of the country. The comparison with empirical data indicates that local values of the transmittance parameter of the atmosphere may have a large influence on the actual values of solar radiation and may partially mask the latitudinal impact. Nevertheless, the model constitutes a valuable tool for characterizing solar radiation diversity in a gap and supports silvicultural decision-making.

Keywords: radiation conditions, diffuse radiation, direct radiation, modelling, artificial gap, latitude

1. Wstęp

Cięcia gniazdowe zupełnie są często wykorzystywane w praktyce, zarówno w rębni gniazdowej, jak też w innych rębniach złożonych. Do ważniejszych czynników wpływających na warunki radiacyjne panujące na gnieździe można zaliczyć zarówno jego rozmiary, jak też ich proporcję w stosunku do wysokości otaczającego drzewostanu. Pewną rolę w kształtowaniu warunków radiacyjnych, w tym świetlnych, na gniazdach może również odgrywać szerokość geograficzna. W lokalizacjach znajdujących się na niższej szerokości geograficznej (bliżej równika), słońce w swoim pozornym ruchu po nieboskłonie o tej samej porze roku zajmuje wyższe położenie niż w lokalizacjach usytuowanych dalej od równika. Im wyżej znajduje się słońce nad horyzontem, tym większa część dna gniazda otrzymuje promieniowanie bezpośrednie.

Energia promieniowania emitowanego przez Słońce docierająca do górnych warstw atmosfery niesiona jest w około 50% przez promieniowanie podczerwone (bliskie i dalekie)

(>0,7 μm), w około 40% przez promieniowanie z zakresu widzialnego (0,4–0,7 μm) i w około 10% – przez promieniowanie ultrafioletowe (<0,4 μm) (Fu 2003). Wzrost dostępu promieniowania bezpośredniego do wybranego fragmentu gniazda oznacza wzrost dostępu energii cieplnej. Ma to wpływ na temperaturę powietrza oraz gleby na gnieździe (Tomanek 1958; Carlson, Groot 1997; Prévost, Raymond 2012) i pośrednio może wpływać na wilgotność gleby w obrębie gniazda (Gray et al. 2002; Ritter et al. 2005). Zmienność warunków wzrostu (temperatury i wilgotności powierzchniowych warstw gleby) będąca pochodną dostępności promieniowania słonecznego może przełożyć się na przestrzenną zmienność zagęszczenia odnowień naturalnych (Minckler et al. 1973; Bolibok, Andrzejczyk 2008) lub zmienność wysokości odnowień sztucznych (Gray, Spies 1996; Bolibok et al. 2011).

Określenie wpływu szerokości geograficznej na warunki radiacyjne w obrębie gniazd, ważne z punktu widzenia doskonalenia metodyki cięć gniazdowych, jest ze względów praktycznych trudne do wykonania na drodze empirycznej.

Wpłynęło: 24.06.2015 r., recenzowano: 17.10.2015 r., zaakceptowano: 4.11.2015 r.

Nawet jeżeli udało się w różnych szerokościach geograficznych założyć w celach obserwacji gniazda o identycznym kształcie w drzewostanach o tym samym składzie gatunkowym i takiej samej wysokości, nie rozwiązałyby to wszystkich metodycznych problemów. Jednym z nich, praktycznie nie do omińnięcia, jest zróżnicowanie wysokościowe na terenie Polski. Część energii promieniowania słonecznego przechodzącego przez atmosferę ulega rozproszeniu. Teoretycznie z tego powodu w lokalizacjach położonych wyżej nad poziomem morza w tej samej szerokości geograficznej należy oczekiwać większej ilości energii promieniowania słonecznego niż w miejscach położonych niżej. W Polsce przestrzenna zmienność wysokości terenu nad poziomem morza praktycznie uniemożliwia założenie gniazd w porównywalnych warunkach wysokościowych reprezentujących różne stopnie szerokości geograficznej. Zaawansowane modele opisujące warunki świetlne na dnie lasu przy osłonie bocznej drzewostanu mogą być narzędziem umożliwiającym analizę tego zagadnienia (Bolibok et al. 2013). Rich i in. (1995) zaprezentowali, jak za pomocą modelowania można badać wpływ różnych parametrów opisujących położenie i kształt gniazda (szerokości geograficznej, wielkości gniazda i wysokości otaczającego drzewostanu) na kształtowanie się warunków świetlnych w jego wnętrzu. Wpływ wysokości otaczającego drzewostanu, wystawy i nachylenia terenu na kształtowanie się mikroklimatu radiacyjnego na gniazdach w warunkach środkowej Polski za pomocą takiego modelu zostały przedstawione w pracy Boliboka i in. (2015).

Celem niniejszej pracy jest analiza potencjalnej zmienności warunków radiacyjnych w Polsce na eliptycznych gniazdach w zależności od szerokości geograficznej oraz porównanie tej zmienności z publikowanymi informacjami o wieloletniej zmienności nasłonecznienia. Jako narzędzie do modelowania warunków radiacyjnych na gniazdach został wykorzystany program Solar Analyst, opracowany jako rozszerzenie programu ArcView Esri (Fu, Rich 2002). W pracy wykorzystano implementację tegoż programu w ArcMap ArcGIS 10.2 Esri występującą pod nazwą Solar Radiation tool.

2. Metodyka

Program Solar Analyst koncepcyjnie wywodzi się z programu CANOPY, opracowanego przez Richa (1989), służącego do określania warunków świetlnych pod koronami drzew na podstawie analizy zdjęć hemisferycznych. Zdjęcie hemisferyczne przedstawiające sklepienie drzewostanu widziane z dna lasu po odpowiednim przetworzeniu może służyć jako źródło informacji o tym, które fragmenty nieboskłonu są przesłonięte przez korony drzew blokujące zarówno dostęp promieniowania bezpośredniego (z dysku słonecznego), jak i rozproszonego (Bolibok 2010). Można stwierdzić, że program Solar Analyst dla zadanych punktów na dnie gniazda generuje wirtualne zdjęcia hemisferyczne wskazujące, które fragmenty nieboskłonu zasłonięte są przez otaczający drzewostan. Podstawą do tych obliczeń jest numeryczny model pokrycia terenu opisujący gniazdo jako zagłębienie w tere-

nie. Program Solar Analyst modeluje pozorny ruch słońca po nieboskłonie tak, aby sprawdzić czas przez jaki słońce nie jest zasłonięte przez drzewa, co oznacza czas przez jaki promieniowanie bezpośrednie może teoretycznie docierać do wybranego punktu na dnie gniazda. Dostępność promieniowania rozproszonego dla wybranego punktu na dnie lasu jest proporcjonalna do części nieboskłonu widocznej z tego punktu. Na podstawie wspomnianego „zdjęcia” można również oszacować, jaka część nieboskłonu nie jest zasłonięta, a więc określić dostępność promieniowania rozproszonego.

Główną przesłanką powstania programu Solar Analyst było modelowanie związku pomiędzy topografią terenu a ilością docierającego promieniowania słonecznego. Program ten wykorzystuje rastrowy model terenu i wylicza wartości promieniowania docierającego do wybranych komórek rastra. Rozmiar pikseli rastra jest definiowany przez użytkownika w zależności od potrzeb. Do analizy warunków świetlnych na gniazdach przyjęto obszar o wymiarach 200×200 m, dla którego podstawowy piksel miał bok o długości 0,5 m. Gniazdo zdefiniowano jako zagłębienie o głębokości równej wysokości otaczającego drzewostanu położone w środku modelowanego terenu. W tej konwencji powierzchnia terenu odpowiada górnej powierzchni koron drzew, więc można określić ten model jako numeryczny model pokrycia terenu. Przyjęto, że zarówno dno gniazda, jak i górna powierzchnia koron drzewostanu (powierzchnia terenu) są poziome (nie mają nachylenia i wystawy). Metodyka modelowania zakłada, że promieniowanie słoneczne nie może dostać się do gniazda poprzez korony otaczających drzew, ani też nie jest od nich odbijane w kierunku dna gniazda. To założenie jest konieczne, ponieważ wykorzystywany algorytm nie jest w stanie uwzględnić poprawki na przenikanie i odbijanie promieniowania słonecznego przez korony drzew. Niektóre pomiary na gniazdach (Chen et al. 1993) wskazują, że omawiane strumienie promieniowania mogą stanowić 12–17% całego promieniowania rozproszonego rejestrowanego na gnieździe. Przenikliwość koron drzew dla promieni słonecznych jest złożonym zjawiskiem zależnym m.in. od wieku i gatunku drzewa (Canham et al. 1994; Astrup, Larson 2006; Lefrançois et al. 2008) oraz od warunków atmosferycznych (Johnson, Smith 2006). Uwzględnienie wszystkich tych czynników utrudniłoby śledzenie wpływu szerokości geograficznej na mikroklimat radiacyjny gniazd. Wykorzystywany model zakłada również, że do gniazda nie dociera promieniowanie odbite od dalej położonych elementów topografii terenu (np. ośnieżonych gór).

Analizy przeprowadzono dla szeregu modeli terenu reprezentujących gniazda położone na różnych szerokościach geograficznych w Polsce (od 49°N do 55°N). Wszystkie modele terenu opisywały gniazdo o eliptycznym kształcie, o dłuższej osi równoległej do kierunku E-W. Stosunek dłuższej osi do krótszej wynosił 3:2 (60 do 40 m) i był podobny do często spotykanego na gniazdach w drzewostanach gospodarczych. We wszystkich modelach terenu przyjęta została ta sama wysokość dna gniazda nad poziomem morza (190 m n.p.m.) oraz wysokość otaczającego drzewostanu równa 20 m lub 30

m. Chociaż wysokość 190 m n.p.m. nie występuje na polskim wybrzeżu ani w górach, to założenie to jest istotne do modelowania warunków radiacyjnych (Bolibok et al. 2013), ponieważ do pewnego stopnia wyrównuje długość drogi (głębość optyczną atmosfery), jaką pokonuje promieniowanie słoneczne przez atmosferę do dna gniazda. Jednak przyjęcie takiego założenia nie niweluje wydłużenia drogi związane go ze zmianą kąta padania promieni słonecznych na wyższej szerokości geograficznej. Podczas modelowania ujednolicono wszystkie parametry gniazd z wyjątkiem szerokości geograficznej ich położenia, a więc to właśnie ta zmienna będzie odpowiedzialna za różnice w wynikach modelowania.

Punktem wyjścia w modelu jest ustalenie ilości promieniowania słonecznego dostającego się na powierzchnię otwartą w badanej lokalizacji. Promieniowanie słoneczne docierające do atmosfery ziemskiej obejmuje większą część spektrum promieniowania elektromagnetycznego i jest opisywane za pomocą stałej słonecznej (S). Jest to całkowita energia jaką przenosi promieniowanie słoneczne w jednostce czasu poprzez jednostkową powierzchnię ustawioną prostopadle do promieniowania w średniej odległości Ziemi od Słońca. Chociaż jej wartość podlega niewielkim fluktuacjom, w modelu przyjęto jej wartość domyślną z narzędzia Solar Radiation wynoszącą 1367 W/m^2 . Omawiany model wymaga założenia, jaka część promieniowania słonecznego nie ulega pochłonięciu podczas przechodzenia przez atmosferę. Wielkość tę opisuje współczynnik transmisji promieniowania, będący stosunkiem ilości promieniowania całkowitego dochodzącego do powierzchni Ziemi do energii promieniowania dochodzącego do górnej powierzchni atmosfery. Podczas modelowania przyjęto wartość tego parametru równą 0,4 zgodnie z wartością podawaną dla Warszawy (Bogdańska, Podogrocki 2000).

Model Solar Analyst podaje ogólną ilość energii promieniowania słonecznego, która dociera do wybranych punktów na dnie gniazda (bez wyszczególnienia energii niesionej przez poszczególne zakresy widma, przy czym szacuje jaka część tej energii niesiona jest przez promieniowanie bezpośrednie docierające z dysku słonecznego, a jaka przez promieniowanie rozproszone docierające z nieboskłonu). Na powierzchni otwartej energia promieniowania całkowitego jest sumą energii niesionej przez promieniowanie bezpośrednie i rozproszone. Udział promieniowania rozproszonego w promieniowaniu całkowitym średnio dla Polski wynosi 50% (Woś 1996), co przyjęto jako wartość domyślną dla każdej lokalizacji do dalszych analiz. Na podstawie tej informacji program wylicza potencjalną ilość obydwu rodzajów promieniowania. Analizując warunki radiacyjne na dnie gniazda, program uwzględnia przez jaką część analizowanego okresu dysk słoneczny był zasłonięty przez elementy topografii terenu (otaczający drzewostan) i odpowiednio redukuje poprzednio wyliczoną potencjalną ilość promieniowania bezpośredniego. Energia niesiona przez promieniowanie rozproszone dociera z każdego sektora nieboskłonu, a jej zmienność zależy głównie od zachmurzenia i wysokości kątowej słońca nad horyzontem. Otaczający drzewostan również wpływa na dostępność pro-

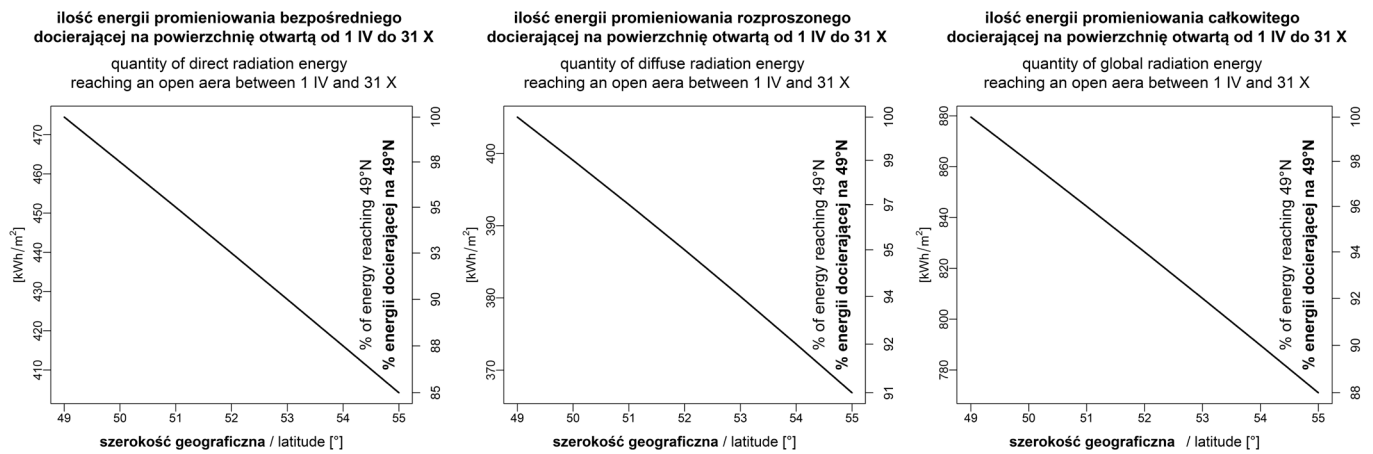
mieniowania rozproszonego, zasłaniając niektóre fragmenty nieboskłonu. Podczas modelowania przyjęto założenie, że promieniowanie rozproszone dociera ze zróżnicowaną intensywnością z różnych sektorów nieba, opisaną przez model SOC (ang. standard overcast sky).

W modelach zarówno wartość energii promieniowania bezpośredniego, jak i rozproszonego wyprowadza się ze stałej słonecznej S , a jej wartość odnosi się do chwilowej gęstości strumienia promieniowania wyrażonej w W/m^2 . Model wyliczał energię poszczególnych rodzajów promieniowania we wskazanym okresie wyrażoną w kWh/m^2 . Obliczenia wykonano w sezonie wegetacyjnym. Początek, koniec i długość okresu wegetacyjnego zależą od położenia, dlatego uwzględnienie rzeczywistej długości okresu wegetacyjnego dla wybranych lokalizacji byłoby dodatkowym źródłem zmienności wyników modyfikującym wpływ szerokości geograficznej. Z tego powodu dla wszystkich lokalizacji przyjęto tę samą długość okresu wegetacyjnego. Punktem wyjścia były parametry sezonu wegetacyjnego z okolic Rogowa (województwo łódzkie), tj. z początkiem – 2 kwietnia i końcem – 2 listopada (Chojnacka-Ożga 1999). Dla uproszczenia obliczeń i w celu porównania z wynikami innych badań ostatecznie przyjęto, że sezon wegetacyjny obejmuje okres od 1 kwietnia do 31 października włącznie.

3. Wyniki i dyskusja

Wyniki modelowania energii promieniowania słonecznego docierającej do powierzchni poziomego otwartego terenu na różnych szerokościach geograficznych w Polsce przedstawiono na rycinie 1. Dla przyjętych parametrów model przewiduje, że w sezonie wegetacyjnym całkowita energia docierająca do poziomej powierzchni otwartej waha się od $771,0 \text{ kWh/m}^2$ dla 55°N do $879,5 \text{ kWh/m}^2$ dla 49°N . Model przewiduje, że w położeniu północnym ilość energii całkowitego promieniowania słonecznego będzie o 12% mniejsza niż na południu. Silniej spada ilość energii promieniowania bezpośredniego (o 15%) niż promieniowania rozproszonego (9%). Ilość energii całkowitego promieniowania słonecznego docierającej do powierzchni otwartej jest zbieżna z danymi pomiarowymi z terenów Polski. Bogdańska i Podogrocki (2000) podają, że w okresie od 1 kwietnia do 31 października w ośmiu wybranych lokalizacjach reprezentujących obserwatoria meteorologiczne od Gdyni do Kasprowego Wierchu ilość energii całkowitego promieniowania słonecznego wahała się od 783 do 922 kWh/m^2 .

Model zakłada (por. ryc. 1) jednostajny spadek ilości energii słonecznej związany ze wzrostem szerokości geograficznej. Jest to efekt wzrostu długości drogi jaką przebywa promieniowanie słoneczne przez atmosferę, aby dotrzeć do lokalizacji bardziej wysuniętych na północ. Dodatkowym czynnikiem uwzględnianym przez model, ale działającym w przeciwnym kierunku, są zmiany długości dnia. Północne krańce Polski w skali roku mają o 20 godzin więcej dziennej części doby niż południowe, a różnica ta nasila się w miesiącach letnich (Bogdańska, Podogrocki 2000).



Rycina 1. Wyniki modelowania południkowej zmienności w dostępności różnych rodzajów promieniowania na powierzchni otwartej w lokalizacjach pomiędzy 49°N i 55°N

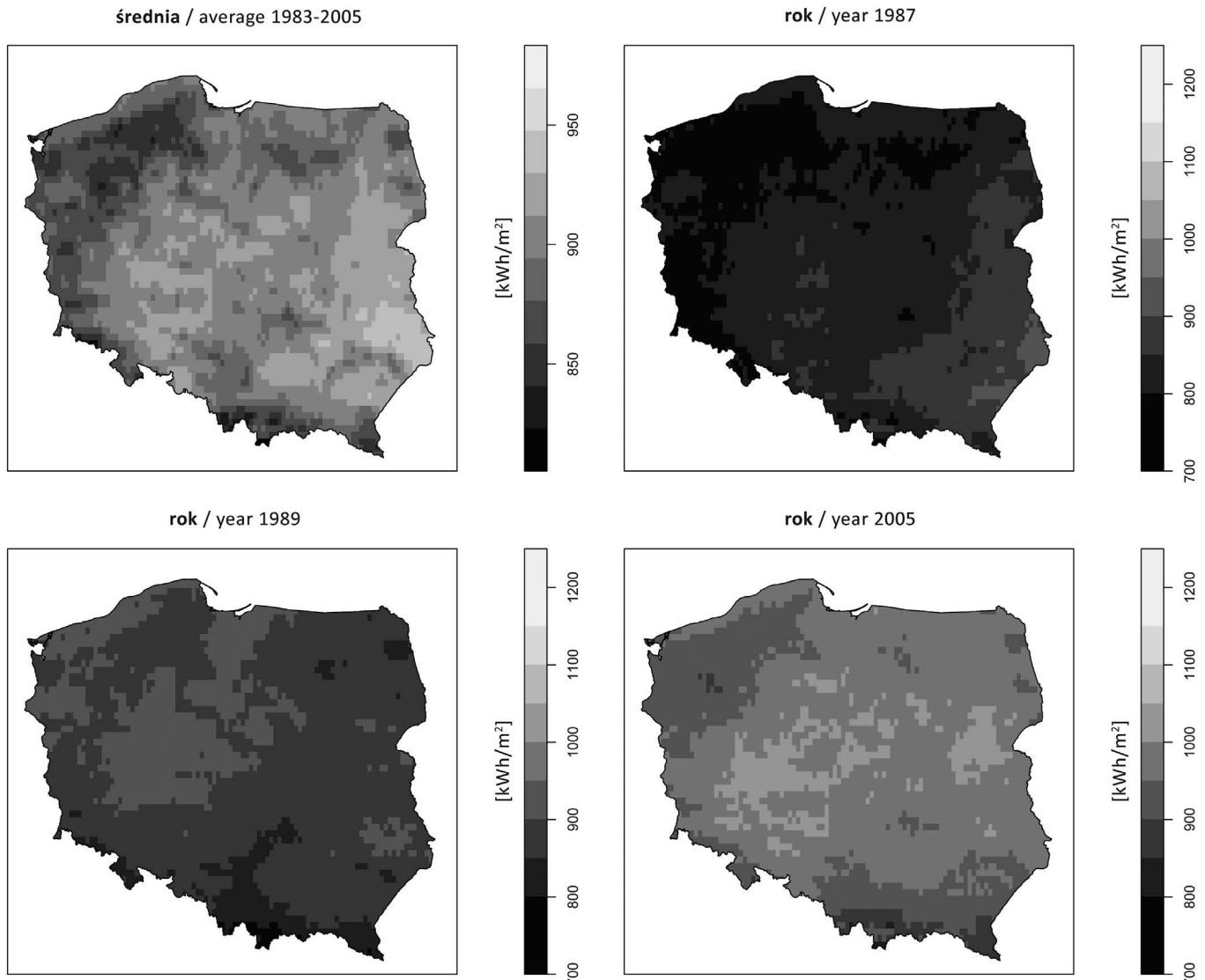
Figure 1. The outcome of modeling of latitudinal changes in supply of different kinds of solar radiation on open area in different localizations between 49°N and 55°N

Dane empiryczne wskazują, że szerokość geograficzna nie jest głównym czynnikiem regulującym dopływ promieniowania słonecznego na powierzchnię otwartą w Polsce. Na rycinie 2. przedstawiono przestrzenną zmienność dostępności całkowitego promieniowania słonecznego w przyjętym sezonie wegetacyjnym. Rycina ta bazuje na danych udostępnianych przez EUMETSAT Satellite Application Facility on Climate Monitoring (CM SAF) w postaci zestawu wartości średnich miesięcznych dla wybranych lokalizacji w latach 1983–2005. Dane te pochodzą z analizy danych satelitarnych opracowanych w sposób opisany przez Muellera i in. (2009). Przestrzenna zmienność dostępu promieniowania całkowitego z ryciny 2. przypomina przestrzenną zmienność średnich rocznych wartości słonecznego promieniowania całkowitego podawaną przez Miarę i in. (1987) dla lat 1956–1975. Do pewnego stopnia przewidywania modelu Solar Analyst pokrywają się z rzeczywistą przestrzenną zmiennością promieniowania całkowitego w Polsce. Ogólnie można zauważyć, że północna część kraju otrzymuje mniej promieniowania słonecznego (szczególnie Pomorze Zachodnie) niż południowa (szczególnie Wyżyna Lubelska). W tym ogólnym trendzie są wyjątki.

Wybrzeże Bałtyku oraz położenia górskie wykazują odwrotną tendencję. Na wybrzeże dociera więcej a w góry mniej promieniowania niż w przyległych rejonach. Ponadto w skali całego kraju można zauważyć wyraźny spadek ilości promieniowania całkowitego w gradiencie wschód–zachód. Jest to związane z przestrzenną zmiennością ważnego czynnika jakim jest usłonecznienie rzeczywiste, czyli liczba godzin, podczas których tarcza słoneczna nie jest zasłonięta przez chmury. Porównanie przestrzennej zmienności promieniowania całkowitego i usłonecznienia na terenie Polski (Kozłowski, Michalska 2001) wskazuje, że w kształtowaniu dostępu promieniowania lokalne usłonecznienie związane z przestrzenną i czasową zmiennością zachmurzenia ma większe znaczenie niż szerokość geograficzna.

Opisane rozbieżności wyników modelowania i danych empirycznych nie podważają sensu posługiwania się modelem Solar Analyst, raczej podkreślają znaczenie właściwego ustawienia parametrów do obliczeń. Z pewnością można uzyskać lepsze dopasowanie wyników, gdy dla danej lokalizacji zostanie odpowiednio dobrana wartość współczynnika transmisji promieniowania oraz udziału promieniowania rozproszonego w promieniowaniu całkowitym, które silnie są powiązane z lokalną wartością usłonecznienia. Właściwy dobór parametrów modelu nabiera jeszcze większego znaczenia, gdy mają one służyć interpretacji zjawisk przyrodniczych (np. przeżywalności nalotów) w konkretnym sezonie wegetacyjnym. W wybranej lokalizacji pomiędzy poszczególnymi latami mogą zachodzić duże różnice ilościowe w dostępności całkowitego promieniowania słonecznego (por. ryc. 2, rok 1987 i 2005). Również przy analizach w większej skali przestrzennej istotne jest dostosowywanie wartości parametrów modelu do lokalnych warunków w danym roku, ponieważ zdarzają się lata, gdy przestrzenna zmienność dostępności promieniowania całkowitego jest odwrotna do tej obserwowanej zazwyczaj (por. ryc. 2, rok 1989). Powyższe rozważania mają również znaczenie praktyczne hodowlane. Z powodu dużej przestrzennej i czasowej zmienności usłonecznienia na terenie Polski nie ma gwarancji, że gniazdo o teoretycznie optymalnych wymiarach zapewni optymalne warunki świetlne i termiczne dla odnowień, niemniej jednak dążenie do optymalizacji parametrów gniazda zwiększa szansę na uzyskanie optymalnych warunków mikroklimatu radiacyjnego.

Na rycinie 3 przedstawiono wpływ szerokości geograficznej na sumaryczną ilość energii promieniowania słonecznego docierającej do powierzchni dna gniazda. Rycina ta pokazuje, że spadek ilości promieniowania słonecznego na dnie gniazda wraz ze wzrostem szerokości geograficznej jest szybszy niż na terenie otwartym co jest związane z wpływem otaczającego drzewostanu.



Rycina 2. Przestrzenna zmienność natężenia promieniowania słonecznego obliczonego na podstawie średnich miesięcznych (IV–X) z lat 1983–2005. Średnie miesięczne dla poszczególnych lokalizacji (SIS METEOSAT 3, Monthly Mean, Version 001 © (2013) EUMESAT) zostały udostępnione przez EUMETSAT Satellite Application Facility on Climate Monitoring (CM SAF).

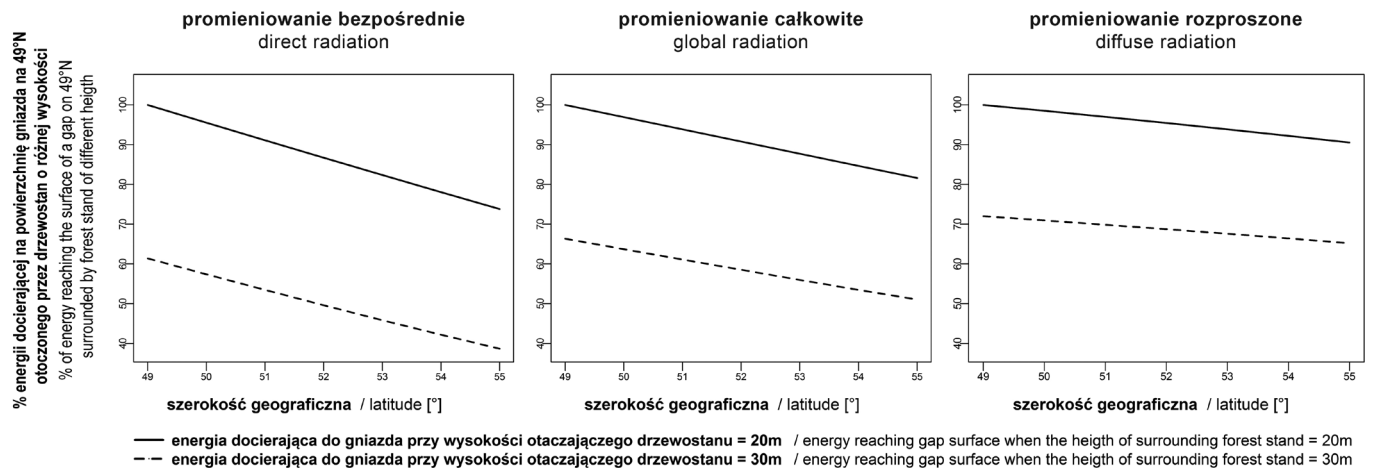
Figure 2. Spatial diversity of global solar radiation intensity calculated on the basis of month averages (April till October) from years 1983–2005. Data on month averages for specific localizations (SIS METEOSAT 3, Monthly Mean, Version 001 © (2013) EUMESAT) were prepared by EUMETSAT Satellite Application Facility on Climate Monitoring.

Najwięcej energii promieniowania słonecznego dociera do gniazd otoczonych drzewostanem o wysokości 20 metrów położnych na 49°N i wraz ze zwiększaniem się szerokości geograficznej ilość energii maleje, spadając na szerokości 55°N do 82% ilości referencyjnej dla gniazda z 49°N. Spadek ilości promieniowania rozproszonego docierającego do dna gniazda jest mniejszy, bo na 55°N dociera aż 90% ilości wyjściowej.

Najbardziej maleje dostępność promieniowania bezpośredniego (do 74%). Mechanizm spadku ilości tego rodzaju promieniowania jest dwójaki. Pierwsza przyczyna jest taka sama jak w przypadku powierzchni otwartej i jest związana z wysokością kątową słońca nad horyzontem, która maleje

wraz ze wzrostem szerokości geograficznej. Im niższa jest ta wysokość, tym dłuższa jest droga promieniowania przez atmosferę, a docierająca do powierzchni Ziemi ilość energii maleje (Bolibok et al. 2013).

Druga przyczyna związana jest z wpływem otaczającego drzewostanu. Na wyższych szerokościach geograficznych słońce nawet w południe znajduje się niżej nad horyzontem i cień rzucany przez drzewa rosnące na południowym skraju gniazda jest dłuższy. Szczególnie przekłada się to na spadek odsetka najbardziej nasłonecznionej powierzchni dna gniazda, która otrzymuje pomiędzy 80 a 100% ilości promieniowania bezpośredniego docierającego na otwartą powierzchnię na danej szerokości geograficznej (por. ryc. 4).



Rycina 3. Wyniki modelowania potencjalnego wpływu szerokości geograficznej na zmienność w dostępności różnych rodzajów promieniowania do powierzchni eliptycznych gniazd o wymiarach osi 60 m i 40 m, położonych pomiędzy 49°N i 55°N otoczonych drzewostanem o wysokości 20 lub 30 metrów. Na rycinach przedstawiono jak się kształtuje suma energii promieniowania słonecznego docierającego do powierzchni gniazd w okresie od 1 kwietnia do 31 października wyrażona w procentach ilości energii otrzymywanej przez gniazdo na 49°N.

Figure 3. Modeling outcome of potential latitude influence on diversity of supplies of different kinds of solar radiation on elliptical artificial gaps with axes length 60 and 40 meters, located between 49°N and 55°N and surrounded by tree stand of height 20 and 30 meters. The figures shows how changes the sum of solar radiation energy received by a gap in the period between 1st April and 31st October expressed as a percent of energy received by the gap placed on 49°N.

Spadek odsetka najsilniej nasłonecznionej powierzchni gniazda (z 18,38 do 10,7%) oznacza, że ta słoneczna plama jest coraz mniejsza i przesuwa się coraz bardziej na północ (ryc. 5). Może ona wychodzić poza powierzchnię gniazda, co ma potencjalnie duże znaczenie dla wzrostu odnowień podokapowych na północ od gniazda. W przypadku małych luk może to oznaczać, że najwięcej promieniowania bezpośredniego związanego z luką dociera nie do jej dna, lecz pod okap drzewostanu na północ od niej (Canham et al. 1990). Dla praktyki hodowlanej oznacza to, że w północnej części Polski dno lasu pod okapem drzewostanu na północ od gniazda będzie miało lepsze warunki świetlne niż na południu naszego kraju.

Przesuwanie się najbardziej nasłonecznionej części gniazda na północ wraz ze wzrostem szerokości geograficznej ma też istotne znaczenie dla wzrostu odnowień w obrębie gniazda. Jak zauważają Lieffers i in. (1999) wskutek tego zjawiska coraz mniej pokrywają się ze sobą dwie strefy w obrębie gniazda: zwiększonej dostępności światła oraz zwiększonej dostępności wody i składników pokarmowych. Centralne położenie tej drugiej strefy wynika w dużym stopniu z konkurencyjnego oddziaływania otaczających drzew (Bolibok 2009) i jest mało podatne na zmiany szerokości geograficznej. Wraz ze wzrostem szerokości geograficznej wzrasta odsetek zajmowany przez najbardziej zacienioną część gniazda (z 23,2 do 30,9%) otrzymującą mniej niż 20% ilości promieniowania bezpośredniego docierającego na otwartą powierzchnię na danej szerokości geograficznej (ryc. 5). W przypadku gleb mniej zasobnych w wilgoć może to być korzystna okoliczność (Bolibok, Andrzejczyk 2008; Bolibok et al. 2011).

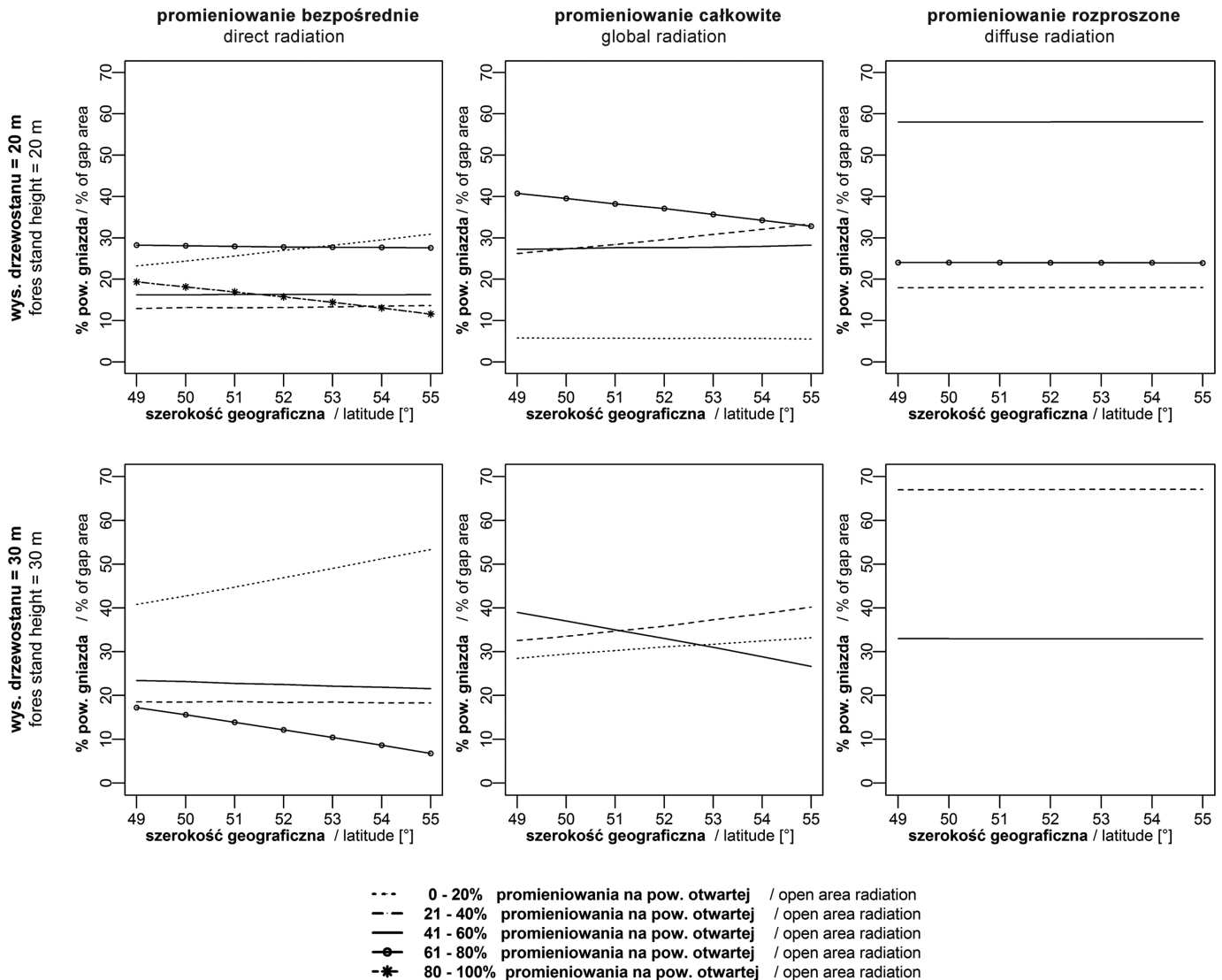
W przypadku spadku dostępności promieniowania rozproszonego działa tylko mechanizm związany ze zwiększeniem się drogi promieniowania przez atmosferę, dlatego względny

spadek energii niesionej przez to promieniowanie jest wyraźnie mniejszy (ryc. 3) i wynosi około 10%. Biorąc pod uwagę ten wynik, można oszacować, że na 26% względnego spadku ilości promieniowania bezpośredniego docierającego do gniazd na 55°N przypada 16% spadku związanego z większą długością cienia i 10% spadku związanego z większą głębokością optyczną atmosfery.

Wzrost szerokości geograficznej nie zmienia udziału powierzchniowego stref wewnątrz gniazda otrzymujących określony procent promieniowania rozproszonego docierającego na powierzchnię otwartą. Zarówno na 49°N, jak i na 55°N na gniazdach model nie wykazał stref otrzymujących poniżej 20%, jak też powyżej 80% promieniowania rozproszonego docierającego na powierzchnię otwartą. Na eliptycznych gniazdach o wymiarach osi 60 m i 40 m otoczonych drzewostanem o wysokości 20 m niezależnie od szerokości geograficznej model wskazuje, że 58% powierzchni gniazda otrzymuje od 41 do 60% promieniowania rozproszonego docierającego na powierzchnię otwartą (ryc. 5).

4. Podsumowanie

Głównym celem analizy było określenie potencjalnego wpływu szerokości geograficznej na mikroklimat radiacyjny w obrębie gniazda. Dwie serie analiz przeprowadzone dla gniazd otoczonych drzewostanem o wysokości 20 i 30 m wskazują, że wielkość charakterystyczna gniazda (stosunek jego średnicy do wysokości otaczającego drzewostanu) ma bardzo duży wpływ na mikroklimat radiacyjny w obrębie gniazda. Mniejszy, lecz dobrze widoczny, wpływ ma również szerokość geograficzna. Dobierając odpowiednie wymiary gniazda, można potencjalnie redukować wpływ



Rycina 4. Wyniki modelowania dostępności różnych rodzajów promieniowania na dnie eliptycznych gniazd o wymiarach osi 60 m i 40 m, położonych w różnych szerokościach geograficznych otoczonych drzewostanem o wysokości 20 lub 30 metrów. Na rycinach przedstawiono jak się zmienia udział powierzchni gniazd z różną względną dostępnością promieniowania słonecznego wyrażoną w procentach ilości energii otrzymywanej przez powierzchnię otwartą w danej lokalizacji.

Figure 4. Modeling outcome of supplies of different kinds of solar radiation on elliptical artificial gaps with axes length 60 and 40 meters supplies, located between 49°N and 55°N and surrounded by tree stand of height 20 and 30 meters. The figures show how changes the share of gap area receiving different levels of solar radiation. The levels are described as the percent of solar energy received by open space in given localization.

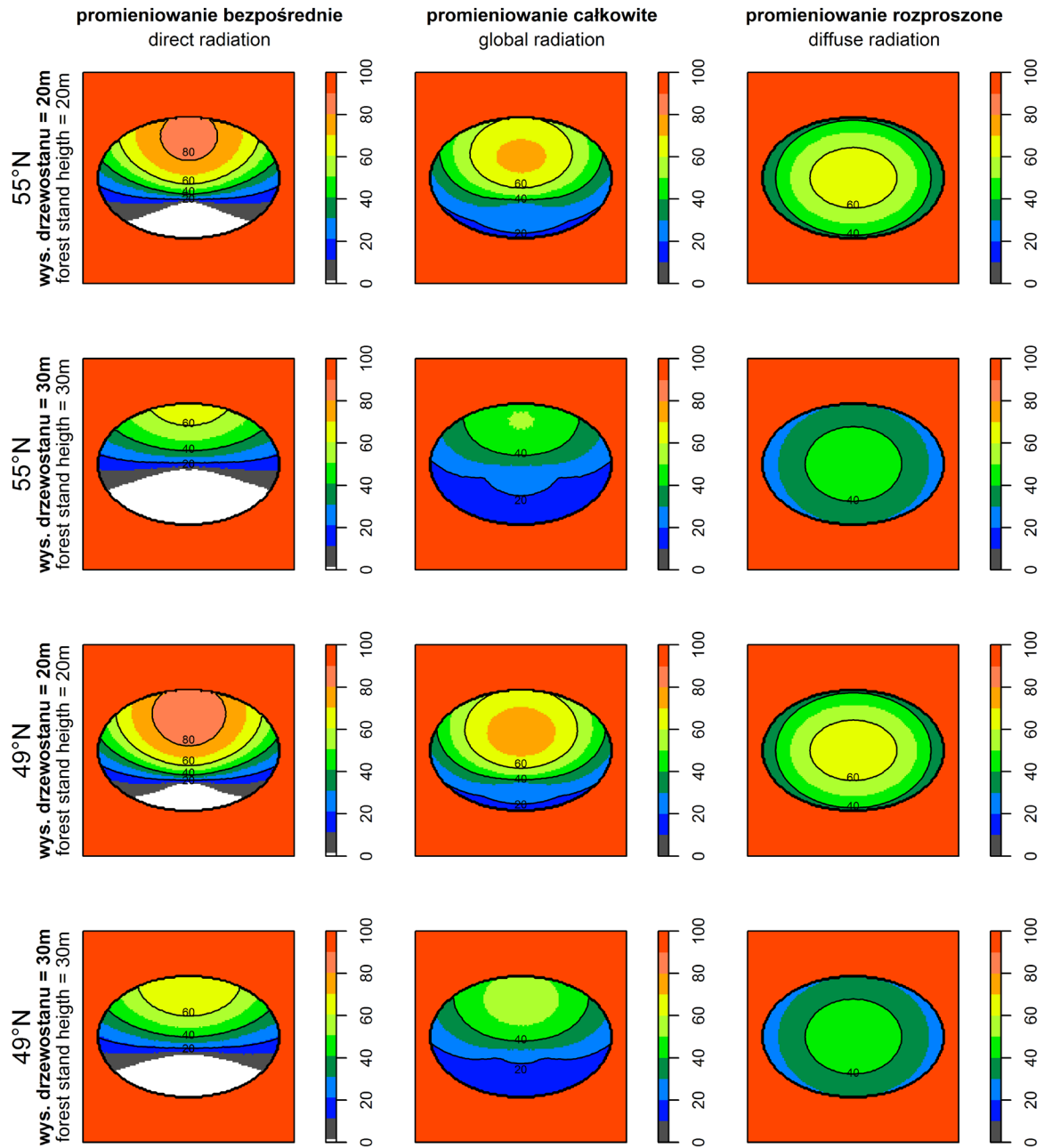
szerokości geograficznej. Jednakże dane o przestrzennej, a zwłaszcza czasowej (pomiędzy kolejnymi latami) zmienności w dostępności całkowitego promieniowania słonecznego na terenie Polski wskazują, że w praktyce zawsze pozostanie pewne ryzyko niedostosowania. Na szczęście powtarzalność warunków usłonecznienia w konkretnych rejonach kraju jest stosunkowo duża. Model Solar Analyst może służyć jako narzędzie do charakterystyki teoretycznej zmienności warunków radiacyjnych na gniazdach i może być wsparciem przy podejmowaniu decyzji hodowlanych dotyczących parametrów gniazd w wybranej lokalizacji.

Konflikt interesów

Autorzy deklarują brak potencjalnych konfliktów.

Podziękowania i źródła finansowania

Badania sfinansowano z grantu OP-2710-4/U/10 „Planowanie hodowlane w rębni stopniowej gniazdowej udoskonalonej” wykonanego w latach 2010-2014 na zlecenie Dyrekcji Generalnej Lasów Państwowych.



Rycina 5. Wyniki modelowania przestrzennej zmienności w dostępności różnych rodzajów promieniowania na dnie eliptycznych gniazd o wymiarach osi 60 m i 40 m, położonych na 49°N i 55°N otoczonych drzewostanem o wysokości 20 lub 30 metrów. Na rycinach przedstawiono jak kształtuje się przestrzenne zróżnicowanie energii promieniowania słonecznego docierającego do powierzchni gniazd w okresie od 1 kwietnia do 31 października wyrażone w procentach ilości energii otrzymywanej przez otwartą przestrzeń w tej samej lokalizacji.

Figure 5. Modeling outcome of spatial diversity of supplies of different kinds of solar radiation on elliptical artificial gaps with axes length 60 and 40 meters, located between 49°N and 55°N and surrounded by tree stand of height 20 or 30 meters. The figures show how changes the share of gap area receiving different levels of solar radiation. The levels are described as the percent of solar energy received by open space in given localization in the period between 1st April and 31st October.

Literatura

Astrup R., Larson B.C. 2006. Regional variability of species-specific crown openness for aspen and spruce in western boreal Canada. *Forest Ecology and Management* 228: 241–250. DOI: 10.1016/j.foreco.2006.02.048.

Bogdańska B., Podogrocki J. 2000. Zmienność całkowitego promieniowania słonecznego na obszarze Polski w okresie 1961–1995, *Meteorologia. Materiały Badawcze IMGW*.

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. DOI: 10.2478/v10111-010-0013-2.

- Bolibok L. 2009. Regulacja warunków wzrostu odnowień na gniazdach - wpływ parametrów gniazd na oddziaływanie czynników biotycznych. *Sylwan* 153: 733–744.
- Bolibok L., Andrzejczyk T. 2008. Analiza zagęszczenia samosiewów brzozy i sosny na gniazdach na podstawie modelu promieniowania słonecznego. *Sylwan* 152: 10–19.
- Bolibok L., Andrzejczyk T., Drozdowski S., Szeligowski H. 2011. Wysokość siedmioletnich odnowień dębowych na gniazdach w różnych warunkach siedliskowych. *Leśne Prace Badawcze* 72(2): 163–170.
- Bolibok L., Brach M., Drozdowski S., Orzechowski M. 2013. Modelowanie warunków świetlnych na dnie lasu. *Leśne Prace Badawcze* 74(4): 335–344.
- Bolibok L., Brach M., Szeligowski H., Orzechowski M., 2015. Wpływ wysokości otaczającego drzewostanu, wystawy i pochyleń terenu na mikroklimat radiacyjny na gnieździe – wyniki modelowania. *Sylwan* 159: 813–823.
- 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. DOI: 10.1139/x90-084.
- Carlson D.W., Groot A., 1997. Microclimate of clear-cut, forest interior, and small openings in trembling aspen forest. *Agricultural and Forest Meteorology* 87: 313–329. DOI: 10.1016/S0168-1923(95)02305-4.
- 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. DOI: 10.1175/1520-0450(1993)032<1656:MFCPPF>2.0.CO;2.
- Chojnacka-Ożga L. 1999. Długość termicznego okresu wegetacyjnego w lasach doświadczalnych SGGW w Rogowie w latach 1926-1998, w: Klimatyczne uwarunkowania życia lasu. Konferencja naukowa, Zakopane 21–22.05.1999, 127–134.
- 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. DOI:10.1016/S0168-1699(02)00115-1.
- Fu Q., 2003. Radiation (SOLAR), w: Encyclopedia of Atmospheric Sciences (red. J.R. Holton). Academic Press, Oxford, 1859–1863.
- Gray A.N., Spies T.A. 1996. Gap Size, Within-Gap Position and Canopy Structure Effects on Conifer Seedling Establishment. *Journal of Ecology* 84: 635–645. DOI: 10.2307/2261327.
- Gray A.N., Spies T.A., Easter M.J. 2002. Microclimatic and soil moisture responses to gap formation in coastal Douglas-fir forests. *Canadian Journal of Forest Research* 32: 332–343. DOI: 10.1139/x01-200.
- Johnson D.M., Smith W.K. 2006. Low clouds and cloud immersion enhance photosynthesis in understory species of a southern Appalachian spruce–fir forest (USA). *American Journal of Botany* 93: 1625–1632.
- Koźmiński C., Michalska B. (red.) 2001. Atlas klimatycznego ryzyka uprawy roślin w Polsce. Akademia Rolnicza Uniwersytet Szczeciński, Szczecin.
- Lefrançois M.-L., Beaudet M., Messier C. 2008. Crown openness as influenced by tree and site characteristics for yellow birch, sugar maple, and eastern hemlock. *Canadian Journal of Forest Research* 38: 488–497.
- 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.
- Miara K., Paszyński J., Grzybowski J. 1987. Zróżnicowanie przestrzenne bilansu promieniowania na obszarze Polski. *Przegląd Geograficzny* 59, 487–509.
- Minckler L.S., Woerheide J.D., Schlesinger R.C. 1973. Light, soil moisture, and tree reproduction in hardwood forest openings. North Central Forest Experiment Station, Forest Service, U.S. Dept. of Agriculture.
- Mueller R.W., Matsoukas C., Gratzki A., Behr H.D., Hollmann R. 2009. The CM-SAF operational scheme for the satellite based retrieval of solar surface irradiance — A LUT based eigenvector hybrid approach. *Remote Sensing of Environment* 113: 1012–1024. DOI: 10.1016/j.rse.2009.01.012
- Prévost M., Raymond P. 2012. Effect of gap size, aspect and slope on available light and soil temperature after patch-selection cutting in yellow birch–conifer stands, Quebec, Canada. *Forest Ecology and Management* 274, 210–221. DOI: 10.1016/j.foreco.2012.02.020
- Rich P.M., 1989. A manual for analysis of hemispherical canopy photography. Los Alamos National Laboratory.
- Rich P.M., Hetrick W.A., Saving S.C. 1995. Modeling Topographic Influences on Solar Radiation: A Manual for the SOLARFLUX Model.
- Ritter E., Starr M., Vesterdal L. 2005. Losses of nitrate from gaps of different sizes in a managed beech (*Fagus sylvatica*) forest. *Canadian Journal of Forest Research* 35: 308–319. DOI: 10.1139/x04-185.
- Tomanek J. 1958. Badania przebiegu temperatury, parowania i opadu w rębni gniazdowej. *Sylwan* 102: 13–31.
- Woś A. 1996. Zarys klimatu Polski. Wydawnictwo Naukowe UAM.

Wkład autorów

L.B. – koncepcja pracy, obróbka danych, przygotowanie manuskryptu; M.B., S.D., H.Sz. – obróbka danych, przygotowanie manuskryptu.