



## Cechy charakterystyczne i parametryzacje dochodzącego promieniowania fotosyntetycznie czynnego w środkowym basenie Biebrzy

### *Characteristics and parametrisations of the photosynthetically active radiation incoming in the Middle Biebrza Basin*

Krzysztof Fortuniak<sup>1</sup>  Jan Górowski<sup>2</sup>  Mariusz Siedlecki<sup>1</sup>   
Włodzimierz Pawlak<sup>1</sup> 

Uniwersytet Łódzki

<sup>1</sup>Instytut Klimatologii i Hydrologii  
ul. Narutowicza 88, 90-139 Łódź

<sup>2</sup>Szkoła Doktorska Nauk Ścisłych i Przyrodniczych  
ul. Matejki 21/23, 90-237 Łódź

[krzysztof.fortuniak@geo.uni.lodz.pl](mailto:krzysztof.fortuniak@geo.uni.lodz.pl) (autor korespondencyjny) • [jan.gorowski@edu.uni.lodz.pl](mailto:jan.gorowski@edu.uni.lodz.pl) • [mariusz.siedlecki@geo.uni.lodz.pl](mailto:mariusz.siedlecki@geo.uni.lodz.pl) • [wlodzimierz.pawlak@geo.uni.lodz.pl](mailto:wlodzimierz.pawlak@geo.uni.lodz.pl)

**Zarys treści.** W pracy przedstawiono wyniki pomiarów dochodzącego do powierzchni Ziemi promieniowania fotosyntetycznie czynnego (PAR) prowadzonych w latach 2013-2021 na stacji w Kopytkowie zlokalizowanej w środkowym basenie Biebrzy na terenie Biebrzańskiego Parku Narodowego (53°35'30,8" N, 22°53'32,4" E). Wartości promieniowania PAR wyrażono w postaci gęstości strumienia fotonów fotosyntetycznie czynnych (PPFD). Analizę przeprowadzono dla wartości 5-minutowych i sum dobowych. Przedstawiono podstawowe charakterystyki PAR w cyklu rocznym i dobowym. Szczególną uwagę zwrócono na relacje pomiędzy promieniowaniem PAR w dni pogodne a jego wartością na górnej granicy atmosfery. Ze względu na ograniczoną dostępność danych pomiarowych dotyczących PAR zaproponowano proste parametryzacje tego elementu. Uwzględniono trzy rodzaje modeli: parametryzacje bazujące na wartościach całkowitego promieniowania słonecznego, parametryzacje dla bezchmurnego nieba z wysokością Słońca jako parametrem wejściowym oraz ich rozwinięcie do parametryzacji sum dobowych w dowolnych warunkach pogodowych wykorzystujące dobową amplitudę temperatury jako zmienną wejściową.

**Słowa kluczowe:** promieniowanie fotosyntetycznie czynne, parametryzacje PAR, Biebrzański Park Narodowy, środkowy basen Biebrzy.

**Keywords:** *photosynthetically active radiation, PAR parametrisation, Biebrza National Park, Middle Biebrza Basin.*

## Wstęp

Dostępność światła jest jednym z głównych czynników warunkujących przebieg fotosyntezy (Bryant i Frigaard, 2006), a promieniowanie słoneczne stanowi podstawowe źródło energii podtrzymującej życie na Ziemi, umożliwiające wzrost i rozwój organizmów autotroficznych. Promieniowanie to charakteryzuje się szerokim zakresem spektralnym, z którego jedynie część jest efektywnie wykorzystywana w procesie fotosyntezy. Część ta, najczęściej definiowana jako fale o długościach od 400 nm do 700 nm, określana jest mianem promieniowa-

nia fotosyntetycznie czynnego (PAR – *photosynthetically active radiation*) (McCree, 1972; Shibles, 1976; Czarnowski, 1983; Alados et al., 1996; Möttus et al., 2012). Na funkcjonowanie ekosystemu oprócz samej długości fal docierających do szaty roślinnej ma również wpływ natężenie dostarczanej przez to promieniowanie energii oraz czas jego trwania w cyklu dobowym i rocznym. Od czynników tych zależy między innymi wykształcanie naziemnych części roślin, w szczególności liści, które w stanowiskach dobrze nasłonecznionych mają mniejszą powierzchnię, a ich epiderma pokryta jest grubszą warstwą kutikuli (Pilarski i Kocurek, 2014). Klimatologiczne charakterystyki promieniowania PAR na terenach naturalnych czy rolniczych stanowią zatem istotny element studiów środowiskowych. Wartości PAR są często używane jako kluczowe zmienne wejściowe modeli ekofizjologicznych pozwalających oszacować produktywność upraw rolniczych (Awal et al., 2006; Liu et al., 2018) czy leśnych (Landsberg i Waring, 1997), a produkcja pierwotna ekosystemu jest wyznaczana przy pomocy hiperbolicznych funkcji PAR (Frolking et al., 1998; Flanagan et al., 2002; Xu et al., 2019). Chociaż podana wyżej definicja sugeruje prostą relację między PAR a całkowitym promieniowaniem krótkofalowym ( $K_d$ ), w rzeczywistości stosunek tych dwóch wielkości zmienia się w pewnym zakresie zależnie od wysokości Słońca i właściwości optycznych atmosfery (Alados et al., 1996; Aguiar et al., 2012; Janjai et al., 2015; Akitsu et al., 2022). W celu poznania klimatologicznych cech promieniowania PAR konieczne są zatem niezależne pomiary lub bardziej zaawansowane modele tej wielkości. Niestety, w chwili obecnej nie istnieje sieć regularnych pomiarów PAR (Ghayas et al., 2022), a wyznaczanie charakterystyk tego elementu bazuje głównie na podejściu modelowym, w którym modele o różnym stopniu zaawansowania cechowane są regionalnie w oparciu o nieliczne serie pomiarowe (Akitsu et al., 2022; de Blas et al., 2022; Ghayas et al., 2022). W rodzimym piśmiennictwie, mimo wielu prac dotyczących promieniowania słonecznego (np. Górczyński, 1903, 1913; Stenz, 1922; Kuczmarska i Paszyński, 1964; Bogdańska i Podogrocki, 2000; Bryś i Bryś, 2001; Matuszko, 2009; Podstawczyńska, 2009; Bryś, 2015; Kleniewska i Chojnicki, 2016), trudno znaleźć opracowania poświęcone klimatologicznym charakterystykom PAR. Nieliczne prace dotyczą głównie pomiarów sezonowych (Tamulewicz, 1988), badań fotobiologicznej reakcji roślin (Murkowski, 2002; Pilarski et al., 2012) czy zastosowania PAR do oceny produktywności ekosystemów rolniczych (Sakowska et al., 2012; Kowalska et al., 2013).

Podstawowym celem podjętego opracowania jest charakterystyka promieniowania fotosyntetycznie czynnego dochodzącego do powierzchni Ziemi w środkowym basenie Biebrzy, bazująca na 9-letniej (lata 2013-2021) serii pomiarowej ze stacji Kopytkowo. Analizę przeprowadzono, zarówno dla wartości chwilowych, jak i sum dobowych promieniowania PAR. Poza podstawowymi charakterystykami statystycznymi serii pomiarowej zwrócono uwagę na promieniowanie w dni pogodne oraz na zależności pomiędzy wartościami PAR na powierzchni Ziemi i na górnej granicy atmosfery. Ze względu na ograniczoną dostępność danych empirycznych zaproponowano proste parametryzacje promieniowania PAR możliwe do wykorzystania w studiach środowiskowych.

## Obszar i metodyka badań

Współczesna dolina Biebrzy zajmuje obszar niegdysiejszej pradoliny uformowanej pod wpływem wód lodowcowych spływających z kierunku północnego oraz północno-wschodniego (Okrusko, 1973). Rejon ten został wyodrębniony w podziale fizycznogeograficznym

Polski, w którym figuruje pod nazwą Kotliny Biebrzańskiej (843.32) (Borzyszkowski i Grzegorzczak, 2021). Ma ona długość przekraczającą 100 km oraz zajmuje ponad 2500 km<sup>2</sup> powierzchni. Samą Kotlinę dzieli się na trzy mniejsze jednostki zwane basenami (górnym, środkowym oraz dolnym) (ryc. 1). Całość Kotliny stanowi unikatowy ekosystem bagienny w skali całej Europy ze względu na swój niewielki stopień przekształcenia antropogenicznego. W związku z tym w 1993 r. utworzono na tym obszarze Biebrzański Park Narodowy, którego zadaniem jest ochrona rozległych torfowisk tego rejonu.

Stanoisko pomiarowe zlokalizowane jest na terenie Biebrzańskiego Parku Narodowego w środkowym basenie Biebrzy (53°35'30,8" N, 22°53'32,4" E), ok. 350 m na północ od niewielkiej wsi Kopytkowo (ryc. 1). W odległości ok. 4-8 km w kierunku północy i północnego zachodu położone jest „Czerwone Bagno” – obszar ochrony ścisłej, który ma za zadanie chronić jego pierwotny charakter. W bezpośrednim sąsiedztwie stacji badawczej przepływa rzeka Kopytkówka, jednak dokładne wyznaczenie jej nurtu jest bardzo trudne ze względu na bujną roślinność szuwarową, która porasta koryto oraz przyległe tereny. Roślinność porastającą okolice stacji badawczej zdominowały przede wszystkim turzycy oraz trzciny (Fortuniak et al., 2016).

Znaczną część podłoża w otoczeniu stacji pomiarowej tworzy torf szuwarowy, który gdzieś jest przykryty torfem turzycowiskowym (Oświt, 1991). Przeprowadzone



**Ryc. 1.** Stanoisko pomiarowe na tle Biebrzańskiego Parku Narodowego wraz ze szkicem użytkowania terenu  
 Legenda: 1 – turzycowiska, 2 – trzcinowiska, 3 – szuwar tatarakowy, 4 – łąki, 5 – pola uprawne, 6 – zalesienia  
*Measurement site in the Biebrza National Park with a sketch showing land use*  
 Map legend: 1 – sedges, 2 – reeds, 3 – swamp with sweet flag, 4 – meadows, 5 – cultivated fields, 6 – forests  
 Źródło / Source: Fortuniak et al., 2016.

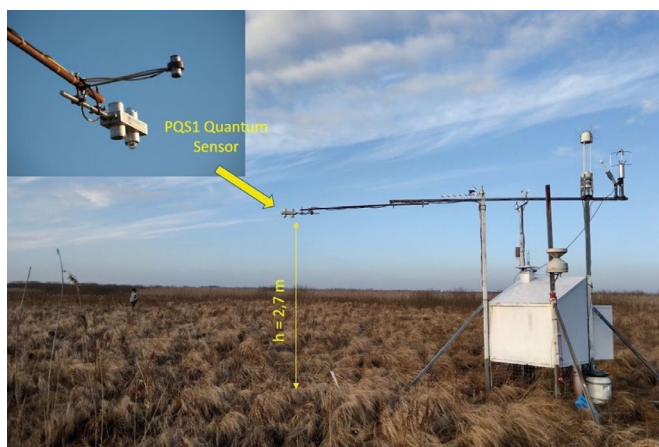
badania wskazują, iż grubość osadów organicznych sięga miejscami nawet do 2 m, a poniżej zalegają utwory fluwialne reprezentowane przez średnio- i gruboziarniste piaski. Powierzchniowa warstwa torfu nie jest dobrze rozłożona i zawiera sporo materii organicznej (60-80%), lecz wraz z głębokością jej ilość zmniejsza się i pojawia się coraz więcej domieszek piaszczystych oraz mulastych (Ziułkiewicz et al., 2014).

W opracowaniu wykorzystano wyniki pomiarów promieniowania PAR z lat 2013-2021 wykonywanych za pomocą czujnika PQS1 PAR Quantum Sensor marki Kipp & Zonen. Czujnik, stanowiący integralną część systemu pomiarowego wymiany gazów cieplarnianych pomiędzy podłożem a atmosferą, został zamontowany na wysięgniku stacji pomiarowej na wysokości 2,7 m nad powierzchnią terenu (ryc. 2). Oprócz promieniowania PAR i danych szybkozmiennych umożliwiających wyznaczenie strumieni masy, pędu i energii, system pomiarowy dostarczał podstawowych danych meteorologicznych, takich jak: całkowite promieniowanie krótkofalowe i długofalowe, temperaturę i wilgotność powietrza, prędkość i kierunek wiatru oraz sumę opadów atmosferycznych. Promieniowanie fotosyntetycznie czynne dochodzące do podłoża powyżej pokrywy roślinnej (podobnie jak inne dane wolnozmiennne) mierzone było z dziesięciosekundowym krokiem czasowym, a następnie automatycznie uśredniane do wyników pięciominutowych, które stanowią bazę empiryczną opracowania. Do zarządzania pomiarami i zapisywania wyników pomiarów wykorzystano datalogger CR 5000 Campbell Scientific. Zgromadzone dane były sprawdzane pod kątem wystąpienia błędów. Prezentowane wyniki odnoszą się do tzw. czasu środkowoeuropejskiego (CET = UTC + 1 godz.). Ze względu na zmiany położenia Ziemi w układzie Ziemia – Księżyc i kształt orbity tego układu godzina wystąpienia prawdziwego południa na stanowisku zmienia się w dosyć szerokim przedziale czasowym między 11:10 a 11:45 czasu CET (tab. 1).

Wartości natężenia PAR wyrażono w postaci gęstości strumienia fotonów fotosyntetycznie czynnych (PPFD – *photosynthetic photon flux density*). Standardową jednostką energii przenoszonej na drodze promieniowania jest wat na metr kwadratowy ( $1 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ ), dlatego bardziej naturalnym wydawać by się mogło wyrażanie natężenia promieniowania PAR, będącego wycinkiem widma słonecznego, w tych właśnie jednostkach. Jednak intensywność przebiegu procesu fotosyntezy łatwiej opisać poprzez liczbę fotonów, które mogą być absorbowane przez zielone części roślinne (McCree, 1972). Z tego względu natężenie promieniowania PAR częściej wyrażane jest przy pomocy gęstości strumienia fotonów fotosyntetycznie czynnych, czyli liczby fotonów padających na określoną powierzchnię w określonym czasie (Möttus et al., 2012). Stosowaną w tym przypadku jednostką jest mikromol na metr kwadratowy na sekundę ( $1 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ), oznaczający  $6,022 \times 10^{17}$  fotonów padających na powierzchnię  $1 \text{ m}^2$  w ciągu 1 s. McCree (1972) podał często stosowaną wartość współczynnika konwersji pomiędzy jednostkami energetycznymi a fotobiologicznymi równą  $4,57 \mu\text{mol} \cdot \text{J}^{-1}$ . W ogólności współczynnik ten zależy jednak od chwilowego składu widmowego promieniowania (Möttus et al., 2012), dlatego w literaturze można spotkać jego wartości z dosyć szerokiego zakresu  $4,23\text{--}4,68 \mu\text{mol} \cdot \text{J}^{-1}$  (Dye, 2004). Aby uniknąć ewentualnych błędów wynikających z konwersji jednostek rejestrowanych przez system pomiarowy i zachować zgodność z powszechnie przyjętymi standardami, zdecydowano się na wyrażenie natężenia PAR w postaci PPFD.

**Tabela 1.** Wybrane parametry astronomiczne dla 15. dnia każdego miesiąca w roku 2017 dla stacji w Kopytkowie (dane na podstawie NOAA Solar Calculator)  
*Selected 2017 astronomical parameters for the 15th of each month at the Kopytkowo measurement site (data according to the NOAA Solar Calculator)*

Miesiąc	Godzina wschodu Słońca (CET)	Godzina zachodu Słońca (CET)	Długość dnia [godz.]	Wysokość górowania Słońca [deg]	Godzina górowania Słońca (CET)
Styczeń	07:37	15:39	8:02	15,42	11:37:43
Luty	06:47	16:39	9:52	23,91	11:42:35
Marzec	05:43	17:33	11:50	36,46	11:37:26
Kwiecień	04:28	18:30	14:02	46,34	11:28:33
Maj	03:28	19:23	15:55	55,38	11:24:47
Czerwiec	02:58	20:00	17:02	59,74	11:28:51
Lipiec	03:18	19:50	16:32	57,87	11:34:23
Sierpień	04:08	18:57	14:49	50,34	11:32:59
Wrzesień	05:02	17:44	12:42	39,30	11:23:48
Październik	05:56	16:32	10:36	27,78	11:14:17
Listopad	06:55	15:31	8:36	17,88	11:12:56
Grudzień	07:39	15:08	7:29	13,19	11:23:24



**Ryc. 2.** Czujnik PQS1 Quantum Sensor na stacji w Kopytkowie (fot. W. Pawlak)  
*PQS1 Quantum Sensor at the Kopytkowo measurement site (photo. W. Pawlak)*

### Charakterystyka PAR w środkowym basenie Biebrzy

Ilość energii słonecznej, jaka dociera do powierzchni Ziemi, zależy od szeregu różnych czynników geograficznych, cyrkulacyjnych czy astronomicznych (Matuszko i Celiński-Mysław, 2016). Do podstawowych czynników astronomicznych należy długość dnia, która warunkuje czas odbierania energii słonecznej emitowanej przez Słońce oraz wysokość Słońca,  $h_s$ , która warunkuje długość drogi optycznej promieni słonecznych w atmosferze i wartość promieniowania na powierzchnię poziomą na górnej granicy atmosfery.

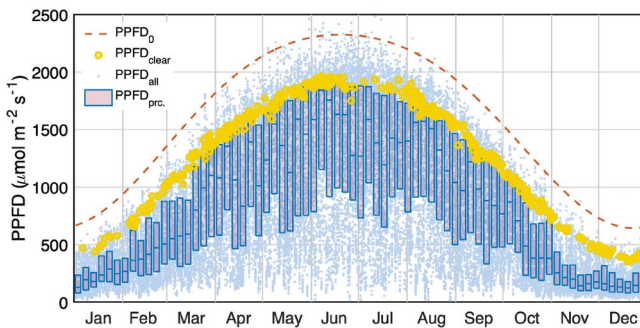
Na potrzeby tego opracowania wartości promieniowania słonecznego padającego na powierzchnię poziomą na górnej granicy atmosfery w zakresie promieniowania całkowitego,  $K_o$ , i w zakresie gęstości strumienia fotonów fotosyntetycznie czynnych,  $PPFD_o$ , wyznaczone zostały z równań:

$$K_o = S_o \cdot (R/R_o)^2 \cdot \sin h_s; \quad (1)$$

$$PPFD_o = S_{PPFD_o} \cdot (R/R_o)^2 \cdot \sin h_s \quad (2)$$

W obliczeniach przyjęto powszechnie stosowaną wartość stałej słonecznej równą  $S_o = 1367 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ , natomiast w zakresie promieniowania PAR, dla którego w literaturze znaleźć można dosyć rozbieżne wartości, posłużono się stałą podaną przez Janjai et al., (2013) równą  $S_{PPFD_o} = 2776,4 \text{ } \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ . Współczynnik  $(R/R_o)^2$ , gdzie  $R$  i  $R_o$  to chwilowa i średnia odległość Ziemi od Słońca ( $R_o = 149,456 \text{ mln km}$ ), pozwala na uwzględnienie zmian odległości Ziemia – Słońce wynikających z eliptycznego charakteru orbity.

Roczny przebieg chwilowych wartości promieniowania PAR jest w dużej mierze determinowany przez  $PPFD_o$ . Przedstawione na rycinie 3 wszystkie wartości z godziny 11:00-12:00 wypełniają obszar pod krzywą  $PPFD_o$ . Niekiedy chwilowe wartości PAR nawet przewyższają wartość na górnej granicy atmosfery. Ten z pozoru paradoksalny wynik jest prawdopodobnie konsekwencją efektu lustrzanego polegającego na zwiększeniu promieniowania docierającego do powierzchni o składnik wynikający odbicia światła przez chmury. Niełatwo zatem wskazać reprezentatywne wartości maksymalne  $PPFD$ . W tym celu na rycinie 3 zaznaczono wartości maksymalne wybrane na podstawie wizualnego przeglądu danych. Wybrano dni charakteryzujące się regularnym przebiegiem  $PPFD$ , świadczącym o braku występowania zachmurzenia powodującego ww. efekt. W wybranych przypadkach maksymalne wartości  $PPFD$  ( $PPFD_{clear}$ ) dochodzą do ok.  $2000 \text{ } \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  w czerwcu, natomiast w połowie grudnia nie przekraczają  $400 \text{ } \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ . Ponieważ efekt lustrzany pojawia się głównie przy zachmurzeniu typu konwekcyjnego, jego wpływ



**Ryc. 3.** Wartości gęstości strumienia fotonów fotosyntetycznie czynnych,  $PPFD$ , w biegu rocznym na stacji w Kopytkowie (2013-2021) zarejestrowane między godziną 11:00 a 12:00 czasu CET:  $PPFD_o$  – wartości na górnej granicy atmosfery w prawdziwe południe;  $PPFD_{all}$  – wszystkie wartości;  $PPFD_{clear}$  – wartości dla bezchmurnego nieba;  $PPFD_{prc.}$  – wykres pudełkowy dla przedziałów 5-dniowych uwzględniający dolny i górny kwartył oraz medianę  
*Annual course noted for photosynthetic photon flux density,  $PPFD$ , at the Kopytkowo site (2013-2021), as recorded between 11:00 and 12:00 CET:  $PPFD_o$  – values at the top of the atmosphere at true noon;  $PPFD_{all}$  – all values;  $PPFD_{clear}$  – values for clear sky;  $PPFD_{prc.}$  – boxplot for 5-day intervals, including lower and upper quartiles and median*

jest szczególnie widoczny w ciepłej połowie roku. Promieniowanie PAR przekraczające wartości dla bezchmurnego nieba jest wtedy wyjątkowo często obserwowane, przez co górny kwartyl w tym okresie jest zbliżony do  $PPFD_{clear}$ . W półroczu chłodnym, mniej więcej od połowy października do drugiej dekady marca, efekt ten występuje rzadziej, a górny kwartyl  $PPFD$  jest wyraźnie niższy niż  $PPFD_{clear}$ .

Zestawione na rycinie 3 dane pozwalają również zauważyć bardzo dużą zmienność intensywności pochłaniania w atmosferze promieniowania PAR dochodzącego do jej górnej granicy. Stopień tego pochłaniania może być określony poprzez współczynnik przezroczystości w zakresie PAR, zdefiniowany jako:  $k_{TPAR} = PPFD/PPFD_0$ . Współczynnik ten zależy zarówno od aktualnych właściwości optycznych atmosfery, głównie występowania chmur, zawartości pary wodnej i aerozoli, jak i drogi optycznej promieni słonecznych w atmosferze. Drugi z wymienionych czynników sugeruje zależność  $k_{TPAR}$  od wysokości Słońca. Jednak zwykłe zestawienie na wykresie ogromnej liczby wszystkich dostępnych danych  $k_{TPAR}$  w funkcji  $h_s$  powoduje, że staje się on zupełnie nieczytelny. Bardziej przejrzysty jest wykres przedstawiający liczbę przypadków dla poszczególnych przedziałów  $k_{TPAR}$  i  $h_s$  (ryc. 4). Na tego typu wykresie przypadki odpowiadające bezchmurnemu niebu grupują się w postaci pasa podwyższonej liczebności dla górnego limitu  $k_{TPAR}$ , co jest wynikiem podobnego pochłaniania promieniowania w tych warunkach. Chmury pochłaniają natomiast promieniowanie w bardzo różnym stopniu, powodując większą zmienność  $k_{TPAR}$  i w efekcie mniejsze liczebności w przedziałach. Przedstawione na rycinie 4 wyniki pozwalają stwierdzić silną, nieliniową zależność  $k_{TPAR}$  od wysokości Słońca w warunkach bezchmurnego nieba (ryc. 4). Przy wysokości Słońca równej  $60^\circ$  współczynnik przezroczystości w zakresie PAR w tych warunkach sięga 82-83%, po czym spada wraz ze zmniejszaniem się  $h_s$ , początkowo dosyć łagodnie, przyjmując dla  $30^\circ$  głównie wartości z zakresu 65-75%, a następnie gwałtownie, dla  $10^\circ$  rzadko przekraczając 55%, a dla  $5^\circ$ , 45%. Górna granica pasa podwyższonej liczebności współczynnika  $k_{TPAR}$  określa przezroczystość w dni słoneczne o najwyższej przejrzystości atmosfery. Zależność  $k_{TPAR}$  od  $h_s$  w takich warunkach dobrze opisuje funkcja hiperboliczna:

$$k_{TPAR} = \frac{a_{k1} \cdot h_s}{a_{k2} \cdot h_s + a_{k3}} \quad (3)$$

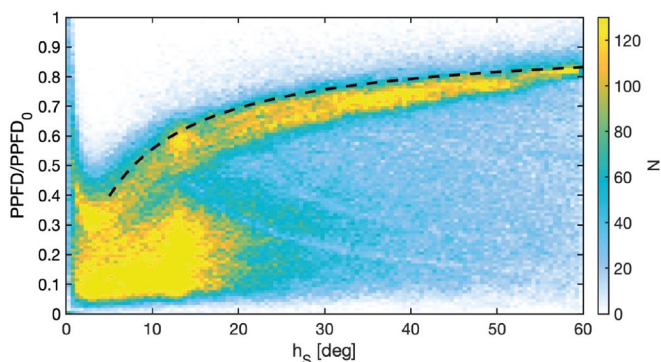
z wartościami parametrów:  $a_{k1} = 3,012$ ,  $a_{k2} = 3,261$  i  $a_{k3} = 21,57$ , zaznaczona linią przerywaną na rycinie 4.

Ważnym wskaźnikiem funkcjonowania ekosystemu jest średnia gęstości strumienia fotonów fotosyntetycznie czynnych w poszczególnych godzinach. Ogólny kształt izoplety  $PPFD$  w przebiegu rocznym (ryc. 5) jest zdeterminowany długością dnia, natomiast wartości średnie odzwierciedlają wpływ wysokości Słońca i przejrzystości atmosfery. Generalnie najwyższe wartości średnie notowane są w przedziale godzinnym 11:00-12:00, co jest konsekwencją czasu górowania Słońca. W czerwcu, w okresie przesilenia letniego, osiągną one prawie  $1440 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ , natomiast w czasie przesilenia zimowego spadają do nieco powyżej  $180 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ . W maju i nieco słabiej w lipcu, bezpośrednio po południu zauważyć można lekkie obniżenie wartości wynikające prawdopodobnie z rozwoju zachmurzenia konwekcyjnego, lecz ogólnie ten stosunkowo często obserwowany efekt jest słabo widoczny. Przeprowadzona dodatkowo analogiczna analiza promieniowania całkowitego pokazuje jednak bardzo zbliżony kształt izoplety, co świadczy, iż jest to ogólna



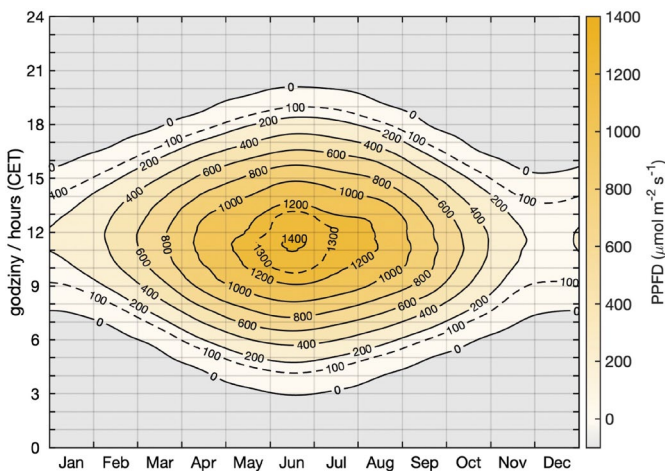
cecha warunków radiacyjnych stacji w Kopytkowie w analizowanym okresie, a nie indywidualność promieniowania PAR.

Rozkład promieniowania w ciągu dnia determinuje sumy dobowe gęstości strumienia fotonów fotosyntetycznie czynnych,  $PPFD_{dob}$ . Na stacji w Kopytkowie najwyższe sumy dobowe, przekraczające w sprzyjających warunkach,  $60 \text{ mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{day}^{-1}$ , w grudniu ich wartości nie przekraczają  $8 \text{ mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{day}^{-1}$  (ryc. 6, tab. 2). W świetle wartości średnich najbardziej sprzyjający rozwojowi wegetacji okres to pierwsza połowa czerwca, kiedy  $PPFD_{dob}$  osiąga średnio prawie  $50 \text{ mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{day}^{-1}$ . Wystąpienie najwyższych wartości jeszcze przed datą przesilenia letniego świadczy o relatywnie niskim stopniu zachmurzenia



**Ryc. 4.** Liczba przypadków,  $N$ , występowania współczynnika przezroczystości w paśmie PAR,  $k_{TPAR} = PPFD/PPFD_0$ , w przedziałach  $k_{TPAR}$  i wysokości Słońca  $h_s$ . Linia przerywaną zaznaczono dopasowanie dla bezchmurnego nieba

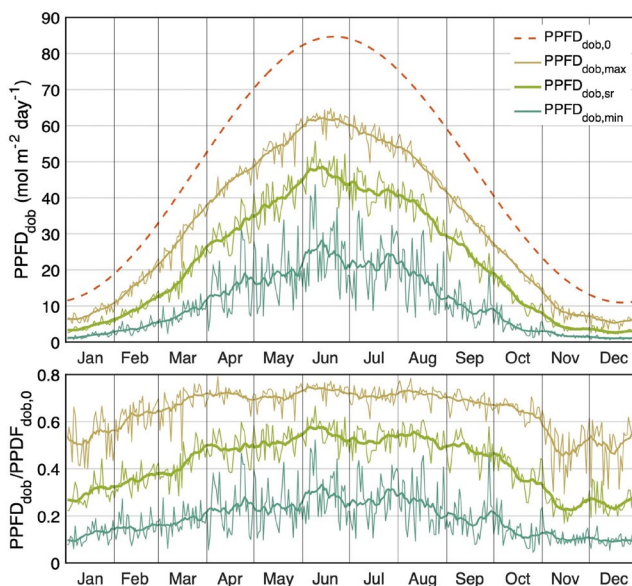
*Number of cases,  $N$ , of clearness index in the PAR spectral range,  $k_{TPAR} = PPFD/PPFD_0$  in the intervals  $k_{TPAR}$  and with Sun height  $h_s$ . The dashed line indicates the match for a cloudless sky*



**Ryc. 5.** Izoplety średnich wartości gęstości strumienia fotonów fotosyntetycznie czynnych, PPFD, ( $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ) w przebiegu rocznym w Kopytkowie (2013-2021)

*Isoleths of average photosynthetic photon flux density, PPFD, ( $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ) in regard to the annual course noted for Kopytkowo (2013-2021)*





**Ryc. 6.** Roczny przebieg sum dobowych PPFD ( $\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{day}^{-1}$ ) w Kopytkowie w latach 2013-2021. Górny wykres:  $\text{PPFD}_{\text{dob},0}$  – sumy dobowe na górnej granicy atmosfery;  $\text{PPFD}_{\text{dob},\text{max}}$  – najwyższe sumy dobowe,  $\text{PPFD}_{\text{dob},\text{sr}}$  – średnie sumy dobowe,  $\text{PPFD}_{\text{dob},\text{min}}$  – najniższe sumy dobowe. Linie pogrubione oznaczają 31-dniowe ( $\pm 15$  dni) średnie ruchome. Dolny wykres – stosunek  $\text{PPFD}_{\text{dob},\text{max}}$ ,  $\text{PPFD}_{\text{dob},\text{sr}}$  i  $\text{PPFD}_{\text{dob},\text{min}}$  do  $\text{PPFD}_{\text{dob},0}$  (oznaczenia linii jak na wykresie górnym)

*Annual course noted for 24-hour PPFD totals ( $\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{day}^{-1}$ ) at Kopytkowo in 2013-2021. Upper plot:  $\text{PPFD}_{\text{dob},0}$  – 24-hour totals at the top of the atmosphere;  $\text{PPFD}_{\text{dob},\text{max}}$  – highest 24-hour totals,  $\text{PPFD}_{\text{dob},\text{sr}}$  – mean 24-hour totals,  $\text{PPFD}_{\text{dob},\text{min}}$  – lowest 24-hour totals. Bold lines represent 31-day ( $\pm 15$  days) moving averages. Lower plot – ratio of  $\text{PPFD}_{\text{dob},\text{max}}$ ,  $\text{PPFD}_{\text{dob},\text{sr}}$  and  $\text{PPFD}_{\text{dob},\text{min}}$  to  $\text{PPFD}_{\text{dob},0}$  (line markings as in upper plot)*

**Tabela 2.** Statystyki dobowych sum PPFD ( $\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{day}^{-1}$ ) w miesiącach i w roku: wartość średnia, odchylenie standardowe, współczynnik zmienności, wartość minimalna, percentyle 10%-90%, wartość maksymalna  
*Statistics for 24-hour PPFD totals ( $\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{day}^{-1}$ ) in months and in a year: mean value, standard deviation, coefficient of variation, minimum value, 10%-90% percentiles, maximum value*

Miesiąc	Średnia	Odchylenie standardowe	Wsp. zmienności	Min.	p10%	p25%	p50%	p75%	p90%	Max.
Styczeń	4,4	2,3	0,52	0,7	1,7	2,5	4,1	5,9	7,8	10,9
Luty	9,6	4,8	0,50	1,7	4,2	5,7	8,8	12,7	16,6	23,1
Marzec	18,7	9,2	0,49	2,4	7,3	10,8	16,9	26,1	32,6	38,2
Kwiecień	30,7	10,9	0,36	3,0	15,5	23,0	32,0	39,5	44,8	51,0
Maj	39,9	13,0	0,33	7,2	19,7	31,4	41,7	50,0	55,0	61,9
Czerwiec	46,6	12,9	0,28	11,9	27,2	38,7	49,2	57,3	61,3	64,8
Lipiec	42,0	12,0	0,29	8,7	24,3	34,2	44,0	50,8	56,5	62,9
Sierpień	35,8	11,6	0,32	6,8	18,3	28,8	37,8	44,7	49,4	57,6
Wrzesień	23,9	9,4	0,39	3,9	10,0	16,3	25,6	31,6	35,5	40,5
Październik	12,4	6,5	0,52	1,2	4,4	6,7	11,8	16,9	21,5	26,8
Listopad	4,3	2,5	0,58	0,8	1,8	2,5	3,5	5,7	7,8	14,2
Grudzień	3,0	1,7	0,57	0,6	1,2	1,7	2,6	3,9	5,9	7,8
Rok	22,1	17,8	0,81	0,6	2,6	5,7	17,4	36,8	49,1	64,8

w tym okresie. Potwierdzają to również najwyższe wartości współczynnika przezroczystości sum dobowych ( $k_{PAR, dob} = \text{PPFD}_{dob} / \text{PPFD}_{dob, 0}$ ) oraz przypadająca na czerwiec najniższa wartość współczynnika zmienności (tab. 2). Relatywne podwyższenie sum dobowych PAR pojawia się jeszcze w drugiej połowie lipca i w pierwszych dwóch dekadach sierpnia oraz w mniejszym stopniu na początku kwietnia. Szczególnie niskimi sumami dobowymi PAR cechują się miesiące od listopada do stycznia, co jest oczywistą konsekwencją występowania w grudniu przesilenia zimowego. Na uwagę zasługuje jednak gwałtowny spadek  $\text{PPFD}_{dob} / \text{PPFD}_{dob, 0}$  na początku listopada i wystąpienie minimum w połowie tego miesiąca. Fakt ten należy wiązać ze zwiększoną częstotliwością dni pochmurnych w tym okresie. Uwagę zwraca również wysoki współczynnik zmienności PAR od października do marca znacznie przewyższający wartości w miesiącach letnich. Miesiące te charakteryzują się ponadto niższą od średniej wartością mediany, jak i dużym w stosunku do mediany rozstępem międzykwartylowym. W wymienionych miesiącach stosunek ten przekracza 80%, podczas gdy dla pozostałych jest mniejszy od 60%, w czerwcu i lipcu spadając do 38%.

### Parametryzacja gęstości strumienia fotonów fotosyntetycznie czynnych

Brak rozwiniętej sieci pomiarowej PAR powoduje, że w analizach środowiskowych uwzględniających procesy fotobiologiczne niezbędne jest szacowanie tego elementu przy pomocy metod pośrednich. W większości prostych modeli PAR wielkość ta jest wyznaczana na podstawie stosunku PAR do całkowitego promieniowania słonecznego,  $K_d$  (Alados et al., 1996; Alados i Alados-Arboledas, 1999; Janjai et al., 2015; de Blas et al., 2022; Ghayas et al., 2022; Wane et al., 2022), przy czym stosunek ten jest z reguły funkcją różnych zmiennych.

W przypadku danych z Kopytkowa już prosta regresja liniowa PAR względem  $K_d$  (Aguiar et al., 2012):

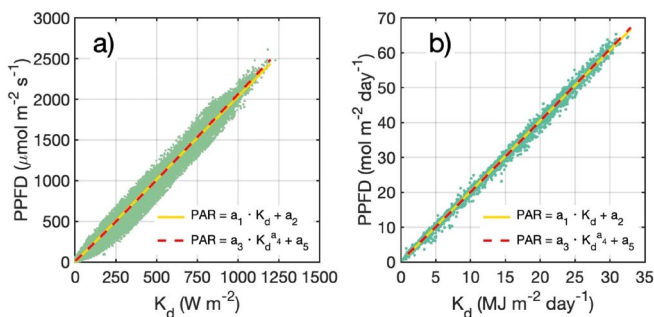
$$\text{PPFD} = a_1 \cdot K_d + b_1 \quad (4)$$

daje zadowalające rezultaty, zarówno w przypadku średnich 5-minutowych, jak i sum dobowych (ryc. 7). Odpowiednie współczynniki regresji wynoszą w przypadku wartości chwilowych (PPFD w  $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ):  $a_1 = 2,037 \mu\text{mol} \cdot \text{J}^{-1}$  i  $b_1 = -2,1 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ , natomiast w przypadku sum dobowych (PPFD w  $\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{day}^{-1}$ ):  $a_1 = 2,024 \text{mol} \cdot \text{MJ}^{-1}$  i  $b_1 = 0,028 \text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{day}^{-1}$ . Nieco większa wartość współczynnika kierunkowego danych chwilowych jest wynikiem zmienności dobowej  $K_d$  i zależności stosunku  $\text{PPFD}/K_d$  od własności optycznych atmosfery. Dobre dopasowanie modelu potwierdzają wartości współczynnika determinacji,  $R^2$ , średniego błędu kwadratowego,  $RMSE$ , i statystyki  $d$  Willmota, wynoszące w pierwszym przypadku:  $R^2 = 0,9936$ ,  $RMSE = 40,0 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  i  $d = 0,9968$ , a w drugim:  $R^2 = 0,9970$ ,  $RMSE = 0,98 \text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{day}^{-1}$  i  $d = 0,9985$ .

Dające się zauważyć na rycinie 7a lekkie podwyższenie  $\text{PPFD}/K_d$  wraz ze wzrostem  $K_d$  sugeruje nieliniowy charakter zależności. Jednakże model:

$$\text{PPFD} = a_2 \cdot K_d^{b_2} + c_2 \quad (5)$$

z wartościami parametrów  $a_2 = 1,45$ ,  $b_2 = 1,05$ ,  $c_2 = 19,2$  (dla PPFD w  $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  i  $K_d$  w  $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ ) oraz  $a_2 = 1,87$ ,  $b_2 = 1,023$ ,  $c_2 = 0,364$  (dla PPFD w  $\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{day}^{-1}$  i w  $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{day}^{-1}$ ) nieznacznie różni się od funkcji liniowej i prowadzi do niewielkiej poprawy statystyk



**Ryc. 7.** Zależność gęstości strumienia fotonów fotosyntetycznie czynnych, PPFD, od natężenia całkowitego promieniowania krótkofalowego,  $K_d$ : a) wartości chwilowe, b) sumy dobowe  
*Relation of photosynthetic photon flux density, PPFD, to the intensity of total short-wave radiation,  $K_d$ : a) instantaneous values, b) 24-hour totals*

dopasowania, odpowiednio:  $R^2 = 0,9939$ ,  $RMSE = 39,0 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ,  $d = 0,9969$  oraz  $R^2 = 0,9970$ ,  $RMSE = 0,972 \text{ mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{day}^{-1}$ ,  $d = 0,9985$ . Poprawę modelu można zatem uzyskać poprzez wprowadzenie dodatkowych zmiennych.

Jedną z najbardziej oczywistych dodatkowych zmiennych, stosowaną w wielu parametryzacjach (de Blas et al., 2022), jest współczynnik przezroczystości,  $k_T$ . Wartości  $k_T$  wyznaczono z definicji:  $k_t = K_d/K_0$ , gdzie  $K_0$  oznacza natężenie promieniowania słonecznego na powierzchni poziomą na górnej granicy atmosfery. Spośród proponowanych modeli uwzględniających, zarówno  $K_d$ , jak i  $k_T$ , najlepsze rezultaty daje zależność liniowa (Aguiar et al., 2012):

$$\text{PPFD} = a_3 \cdot K_d + b_3 \cdot k_t + c_3 \quad (6)$$

z wartościami współczynników  $a_3 = 2,173 \mu\text{mol}\cdot\text{J}^{-1}$ ,  $b_3 = -162,8 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  i  $c_3 = 29,7 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  dla wartości chwilowych oraz  $a_3 = 2,098 \text{ mol}\cdot\text{MJ}^{-1}$ ,  $b_3 = -3,99 \text{ mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{day}^{-1}$  i  $c_3 = 0,90 \text{ mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{day}^{-1}$  dla sum dobowych. Model ten nieco lepiej oddaje rzeczywiste wartości PAR niż model uwzględniający tylko jedną zmienną (statystyki dopasowania odpowiednio:  $R^2 = 0,9956$ ,  $RMSE = 33,0 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ,  $d = 0,9978$  oraz  $R^2 = 0,9977$ ,  $RMSE = 0,849 \text{ mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{day}^{-1}$ ,  $d = 0,9989$ ). Testowane w tym przypadku modele nieliniowe:  $\text{PAR} = K_d \cdot (a \cdot \ln k_T + b)$  (Wandji Nyamsi et al., 2019) oraz  $\text{PAR} = K_d \cdot (a \cdot (\ln k_T)^2 + b \cdot \ln k_T + c)$  (Yu et al., 2015) dają gorsze rezultaty.

Kolejną zmienną mogącą poprawić jakość parametryzacji PAR jest wysokość Słońca,  $h_s$ , przy czym w większości modeli wykorzystywany jest sinus tej wielkości (de Blas et al., 2022; Wane et al., 2022). Porównanie czterech parametryzacji, wykorzystujących jako zmienne niezależne  $K_d$ ,  $k_T$  oraz  $\sin h_s$ , prowadzi do wniosku, że w przypadku chwilowych danych z Kopytkowa najlepsze rezultaty daje wzór (Ge et al., 2011):

$$\text{PPFD} = a_4 \cdot K_d + b_4 \cdot k_T + c_4 \cdot \sin h_s + d_4 \quad (7)$$

z wartościami współczynników:  $a_4 = 1,874 \mu\text{mol}\cdot\text{J}^{-1}$ ,  $b_4 = -0,212 \mu\text{mol}\cdot\text{J}^{-1}$ ,  $c_4 = 0,438 \mu\text{mol}\cdot\text{J}^{-1}$ ,  $d_4 = 8,1 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ . Odpowiednie statystyki dopasowania modelu wynoszą:  $R^2 = 0,9962$ ,  $RMSE = 30,8 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ,  $d = 0,9981$ . Pozostałe parametryzacje:  $\text{PPFD} = K_d \cdot (a \cdot \ln k_T + b \cdot \sin h_s + c)$  (Alados et al., 1996),  $\text{PPFD} = K_d \cdot (a \cdot (\ln k_T)^2 + b \cdot \ln k_T + c \cdot \sin h_s + d)$  (Yu et al., 2015) oraz  $\text{PPFD} = K_d \cdot (a \cdot k_T + b \cdot \sin h_s + c)$  (Wane et al., 2022) prowadzą do nieznacznie gorszych oszacowań, jednakże wciąż nieco lepszych niż modele nieuwzględnia-

jące wysokości Słońca. Ze względu na dosyć sztuczne pojęcie średniej dobowej sinusa wysoki Słońca w przypadku tej kombinacji zmiennych niezależnych nie dopasowywano współczynników dla średnich dobowych.

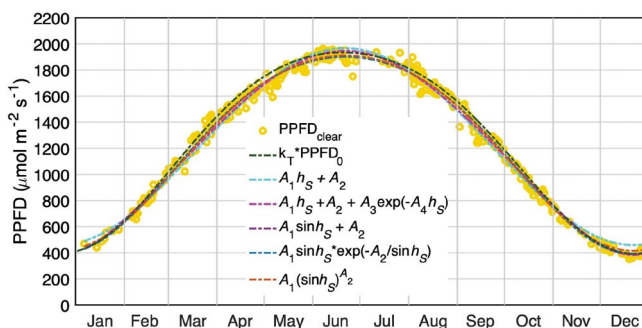
Przedstawione parametryzacje PAR, w których kluczową zmienną niezależną jest natężenie całkowitego promieniowania słonecznego mogą być dodatkowo poprawiane przez dodanie kolejnych zmiennych. Najczęściej stosowane są różne charakterystyki wilgotności (z reguły temperatura punktu rosy i prężność pary wodnej), masa optyczna atmosfery czy wielkość wody opadowej (*precipitable water*). Zmienne te wymagają jednak dodatkowych, nie zawsze dostępnych danych pomiarowych, natomiast włączenie ich do modelu prowadzi jedynie do nieznaczącej poprawy wyników (de Blas et al., 2022). Dlatego w pracy zrezygnowano z dalszych kroków prowadzących do poprawy modelu poprzez dodanie większej liczby zmiennych.

Prezentowane parametryzacje PAR bazują jedynie na natężeniu całkowitego promieniowania słonecznego i łatwych do wyznaczenia danych astronomicznych oraz ich kombinacji. Przy dostępności  $K_d$  pozwalają zatem na stosunkowo proste oszacowanie gęstości strumienia fotonów fotosyntetycznie czynnych. Chociaż wzór (7) daje najlepsze wyniki w świetle miar statystycznych, w wielu prostych zastosowaniach wystarczające okazać się może wykorzystanie równania (4) lub wręcz bezpośrednio stosunku  $PAR/K_d$ . Ze względu na niewielką wartość wyrazu wolnego, stosunek ten jest praktycznie równy współczynnikowi kierunkowemu prostej równania (4). Po przeliczeniu gęstości strumienia fotonów fotosyntetycznie czynnych na jednostki energetyczne z zastosowaniem współczynnika konwersji  $4,57 \mu\text{mol}\cdot\text{J}^{-1}$ , wynosi on 0,446 w przypadku danych 5-minutowych i 0,443 w przypadku sum dobowych. Wartości te, choć nieco niższe od najczęściej przyjmowanych (0,45-0,46), mieszczą się w zakresie przytaczanym w literaturze. Zestawienie wyników uzyskanych przez różnych autorów podane przez Akitsu et al. (2022) pozwala stwierdzić, iż  $PAR/K_d$  zmienia się od 0,42 do 0,54 w zależności od lokalizacji stacji pomiarowej, natomiast przegląd Tsubo i Walker'a (2005) wskazuje, dla przedziału spektralnego 400-700 nm, na zakres 0,42-0,52.

Dane dotyczące całkowitego promieniowania słonecznego nie zawsze są jednak dostępne, dlatego istotne jest również wypracowanie metod parametryzacji PAR przy braku tego typu danych. W przypadku bezchmurnego nieba najprostszym podejściem jest wykorzystanie formuł bazujących na wysokości Słońca. Najbardziej naturalnym w tym wypadku jest zastosowanie wyznaczonego wcześniej współczynnika przezroczystości w paśmie PAR i wartości PFD na górnej granicy atmosfery:

$$PPFD_{\text{clear}} = k_{\text{TPAR}} \cdot PFD_0 \quad (8)$$

Jako alternatywne mogą być stosowane równania wypracowane w celu modelowania promieniowania całkowitego, do których współczynniki dobrane zostały tak, aby opisywały promieniowanie w zakresie PAR. W tabeli 3 przedstawiono wybrane (Badescu, 1997) parametryzacje tego typu z parametrami dopasowanymi do danych z Kopytkowa. Porównanie wartości modelowanych z zanotowanymi największymi wartościami w dni pogodne (ryc. 8) pokazuje, że w podobnie zadowalającym stopniu opisują one cykl roczny  $PPFD_{\text{clear}}$ . Podstawowe statystyki dopasowania analizowanych parametryzacji  $PPFD_{\text{clear}}$  do wybranych danych pomiarowych zestawiono w tabeli 4. Należy jednak podkreślić, że ze względu na dosyć subiektywny wybór  $PPFD_{\text{clear}}$  będący głównym źródłem niepewności, miary statystyczne nie muszą w tym przypadku wskazywać modelu optymalnego.



**Ryc. 8.** Wybrane wartości promieniowania fotosyntetycznie czynnego dla bezchmurnego nieba w południe,  $PPFD_{clear}$  oraz ich proste parametryzacje  
*Selected values for photosynthetic photon flux density for a cloudless sky at noon,  $PPFD_{clear}$  and their simple parameterisations*

**Tabela 3.** Wybrane proste parametryzacje  $PPFD_{clear}$  z wartościami współczynników dopasowanymi do danych z Kopytkowa oraz odpowiednie wartości współczynników  $C_1$  i  $C_2$  równania (10)  
*Selected simple parameterisations for  $PPFD_{clear}$  with the values of the coefficients adjusted to the data from Kopytkowo and the corresponding values for the coefficients  $C_1$  and  $C_2$  from equation (10)*

Symbol	Model	$A_1$	$A_2$	$A_3$	$A_4$	$C_1$	$C_2$
M1	$PPFD_{clear} = A_1 h_s + A_2$	32,1	42,3	–	–	0,0325	0,207
M2	$PPFD_{clear} = A_1 h_s + A_2 - A_3 \exp(-A_4 \cdot h_s)$	30,0	150	820	0,128	0,0335	0,239
M3	$PPFD_{clear} = A_1 \sin h_s + A_2$	2361	-140	–	–	0,0324	0,221
M4	$PPFD_{clear} = A_1 \sin h_s \cdot \exp(-A_2 / \sin h_s)$	2384	0,069	–	–	0,0323	0,218
M5	$PPFD_{clear} = A_1 (\sin h_s)^{A_2}$	2255	1,132	–	–	0,0323	0,214

**Tabela 4.** Statystyki dopasowania  $PPFD_{clear}$  modelowanego przy pomocy prostych parametryzacji do wybranych (ryc. 8) wartości pomiarowych:  $R^2$  – współczynnik determinacji,  $RMSE$  – średni błąd kwadratowy,  $d$  – statystyka dopasowania Willmota  
*Goodness-of-fit statistics for  $PPFD_{clear}$  as modelled with simple parameterisations to selected (Fig. 8) measurement values:  $R^2$  – coefficient of determination,  $RMSE$  – mean square error,  $d$  – Willmot fit statistics*

Symbol	Model	$R^2$	$RMSE$	$d$
M0	$PPFD_{clear} = k_{TPAR} \cdot PPFD_0$	0,9922	53,67	0,9939
M1	$PPFD_{clear} = A_1 h_s + A_2$	0,9877	53,65	0,9938
M2	$PPFD_{clear} = A_1 h_s + A_2 - A_3 \exp(-A_4 \cdot h_s)$	0,9918	43,94	0,9959
M3	$PPFD_{clear} = A_1 \sin h_s + A_2$	0,9928	41,14	0,9964
M4	$PPFD_{clear} = A_1 \sin h_s \cdot \exp(-A_2 / \sin h_s)$	0,9928	41,02	0,9964
M5	$PPFD_{clear} = A_1 (\sin h_s)^{A_2}$	0,9927	41,29	0,9963

Określając maksymalnie dostępne wartości promieniowania PAR parametryzacje dla sytuacji bezchmurnych mogą posłużyć jako baza modeli uwzględniających rzeczywiste warunki pogodowe. Ze względu na zależność docierającego do powierzchni Ziemi promieniowania od aktualnej konfiguracji chmur jest to praktycznie niewykonalne dla danych chwilowych. Można jednak podjąć próbę modelowania wartości średnich z dłuższego

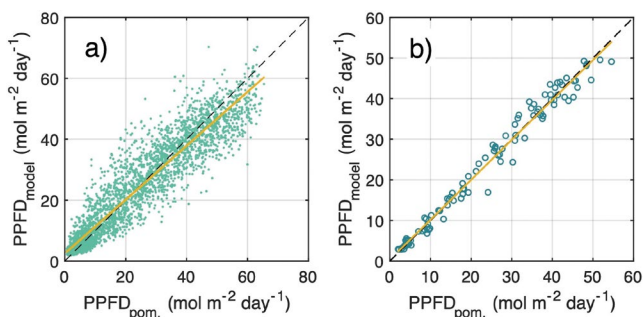
okresu, uzależniając średnią przezroczystość atmosfery od wybranych warunków pogodowych. Aby modele takie były użyteczne, istotnym jest, aby jako parametry wejściowe wykorzystywały one powszechnie dostępne dane. Najczęściej mierzonym elementem meteorologicznym jest temperatura powietrza, natomiast jej dobowa amplituda,  $\Delta T$ , w wielu przypadkach zależy od typu pogody w tym od warunków radiacyjnych. Dlatego (Nöjd i Hari, 2001) zasugerowali, że średniodobowy współczynnik przezroczystości powietrza w zakresie PAR jest liniową funkcją  $\Delta T$ . Podejście to pozwala na oszacowania dobowych wartości PPFD z wykorzystaniem zależności:

$$\text{PPFD}_{\text{dob}} = (B_1 \cdot \Delta T + B_2) \cdot \text{PPFD}_{\text{dob},0} \quad (9)$$

lub

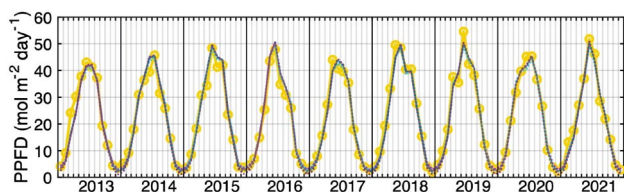
$$\text{PPFD}_{\text{dob}} = (C_1 \cdot \Delta T + C_2) \cdot \text{PPFD}_{\text{clear}} \quad (10)$$

gdzie  $\text{PPFD}_{\text{dob},0}$  i  $\text{PPFD}_{\text{clear}}$  oznacza sumę dobową gęstości strumienia fotonów fotosyntetycznie czynnych na powierzchnię poziomą odpowiednio na górnej granicy atmosfery oraz na powierzchni Ziemi przy bezchmurnym niebie, a  $B_1$ ,  $B_2$ ,  $C_1$ ,  $C_2$  są odpowiednio dobranymi współczynnikami. Porównanie wyników przedstawionych na rycinie 9 z prezentowanymi na rycinie 7b pokazuje, że model (9) z wartościami współczynników  $B_1 = 0,0258$  i  $B_2 = 0,15$  daje zdecydowanie gorsze wyniki niż modele bazujące na wartościach promieniowania całkowitego, lecz wciąż pozwala na w miarę realistyczne ( $R^2 = 0,8878$ ,  $RMSE = 6,0 \text{ mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{day}^{-1}$ ,  $d = 0,9403$ ), proste modelowanie  $\text{PPFD}_{\text{dob}}$  przy bardzo ograniczonej dostępności danych wejściowych. Zdecydowanie lepsze rezultaty podejście to daje w przypadku sum miesięcznych (ryc. 9b), dla których  $R^2 = 0,9821$ ,  $RMSE = 2,1 \text{ mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{day}^{-1}$ ,  $d = 0,9910$ . Zastosowanie równania (10) dla parametryzacji zestawionych w tabeli 3 z odpowiednio dobranymi współczynnikami  $C_1$  i  $C_2$  daje bardzo zbliżone rezultaty. Dla sum dobowych współczynniki determinacji mieszczą się w granicach 0,885-0,887, błąd średniokwadratowy praktycznie dla wszystkich modeli wynosi  $RMSE = 6,0 \text{ mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{day}^{-1}$ , a statystyka  $d = 0,9399 - 0,9411$ . W przypadku średnich miesięcznych sum dobowych odpowiednie zakresy wartości statystyk dopasowania to:  $R^2 = 0,9816 - 0,9826$ ,  $RMSE = 2,16 - 2,44 \text{ mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{day}^{-1}$ ,  $d = 0,9886 - 0,9907$ . Również porównanie przebiegu wieloletniego średnich miesięcznych  $\text{PPFD}_{\text{dob}}$  (ryc. 10) świadczy o poprawnym odzwierciedleniu danych pomiarowych i bardzo zbliżonych wynikach róż-



**Ryc. 9.** Porównanie mierzonych i modelowanych przy pomocy równania (9) wartości PPFD: a) wszystkie sumy dobowe, b) średnie miesięczne

*Comparison of PPFD values measured and modelled with the aid of equation (9): a) all 24-hour totals, b) monthly means*



**Ryc. 10.** Średnie miesięczne wartości sum dobowych promieniowania fotosyntetycznie czynnego: wartości zmierzone – żółta ciągła linia z zaznaczonymi punktami; wartości modelowane przy pomocy dobowej amplitudy temperatury powietrza i  $PPFD_{clear}$  lub  $PPFD_0$  dla bezchmurnego nieba – linie przerywane (kolory odpowiadają modelom z ryciny 8)

*Monthly means for 24-hour totals of photosynthetically active radiation: measured values – yellow continuous line with marked points; values modelled by reference to the 24-hour air temperature amplitude and  $PPFD_{clear}$  or  $PPFD_0$  for a cloudless sky – dashed lines (colours correspond to the models in Fig. 8)*

nych modeli – modelowane wartości są na wykresie praktycznie nierozróżnialne. Parametryzacje tego typu mogą być pomocne przy ocenie wieloletnich zmian środowiskowych, dla których rzadko można znaleźć dane niezbędne do bardziej zaawansowanych modeli.

### Podsumowanie i wnioski

Dziewięcioletnia seria ciągłych pomiarów dochodzącego do powierzchni Ziemi promieniowania fotosyntetycznie czynnego prowadzonych na stanowisku w Kopytkowie w Biebrzańskim Parku Narodowym pozwoliła na poznanie klimatologicznych charakterystyk tego elementu. Chociaż pomiary prowadzono w środkowym basenie Biebrzy, ze względu na stosunkowo małą zmienność przestrzenną analizowanego elementu można uznać, że są one reprezentatywne dla całej Kotliny Biebrzańskiej. Dzięki temu wyniki mogą być użyteczne dla licznych na terenie Biebrzańskiego Parku Narodowego studiów środowiskowych. W studiach tego typu, uwzględniających fotobiologiczną reakcją roślin, bardziej naturalnym jest wyrażenie ilości docierającego promieniowania PAR w postaci gęstości strumienia fotonów fotosyntetycznie czynnych, a nie w jednostkach energetycznych, dlatego w opracowaniu zdecydowano się na wyrażenie PAR w jednostkach PPFD.

Przebieg roczny i dobowy promieniowania docierającego do powierzchni Ziemi jest odzwierciedleniem promieniowania padającego na górną granicę atmosfery. Stopień tłumienia tego promieniowania w atmosferze zależy, zarówno od wysokości Słońca (drogi optycznej), jak i właściwości atmosfery. Konsekwencją pierwszego z wymienionych czynników jest hiperboliczna zależność współczynnika przezroczystości w paśmie PAR od wysokości Słońca, opisująca dane z Kopytkowa w warunkach bezchmurnego nieba. Drugi czynnik, w dużej mierze wynikający z częstotliwości pogód charakteryzujących się różnym stopniem i rodzajem zachmurzenia, pozwala na wydzielenie dwóch sezonów odpowiadających odmiennym reżimom promieniowania PAR w dolinie Biebrzy. Sezon obejmujący głównie półrocze ciepłe rozpoczyna się w drugiej połowie marca i kończy w początkach października. W sezonie tym na charakterystyki PAR ma duży wpływ rozwój zachmurzenia konwekcyjnego. Pozostała część roku cechuje się natomiast większym udziałem dni pochmurnych z chmurami warstwowymi. Oba sezony różnią się, zarówno statystykami sum dobowych, jak i rozkładem promieniowania PAR w godzinach południowych.



Natężenie promieniowania PAR w środkowym basenie Biebrzy (wyrażone w  $W \cdot m^{-2}$ ) stanowi około 44% natężenia całkowitego promieniowania słonecznego docierającego do powierzchni Ziemi. Natomiast w przypadku wyrażenia PAR w postaci gęstość strumienia fotonów fotosyntetycznie czynnych, wartości PAR są mniej więcej dwukrotnie wyższe niż odpowiadające im wartości promieniowania całkowitego.

Średnia gęstość strumienia fotonów fotosyntetycznie czynnych w poszczególnych godzinach jest determinowana długością trwania dnia w ciągu roku. Najwyższe wyniki odnotowywano w przedziale godzinowym 11:00-12:00 CET z maksimum w połowie czerwca. Jednocześnie układ izoplek charakteryzuje się wysokim stopniem symetrii względem godzin południowych, ze stosunkowo słabo zaznaczoną redukcją w godzinach popołudniowych, wynikającą z rozwoju zachmurzenia konwekcyjnego. Wpływ zachmurzenia, związanego z częstością warunków pogodowych, bardziej uwidacznia się w przebiegu rocznym średnich sum dobowych, dla których maksymalne wartości obserwuje się jeszcze przed datą przesilenia letniego. Koniec czerwca i pierwsze dwie dekady lipca cechuje natomiast relatywne zmniejszenie średnich sum dobowych PAR.

Niewielka liczba dostępnych danych pomiarowych promieniowania PAR stwarza konieczność wypracowania metod modelowania tego elementu. W opracowaniu skoncentrowano się na stosunkowo prostych parametryzacjach łatwych do wykorzystania w studiach środowiskowych. Zagadnienie to jest dosyć proste w przypadku dostępności danych całkowitego promieniowania słonecznego. W wielu zastosowaniach wystarczy w tym wypadku szybkie oszacowanie bazujące na udziale procentowym PAR w promieniowaniu całkowitym. Bardziej złożone formuły prowadzą jedynie do nieznacznej poprawy wyników. Jednakże niejednokrotnie pomiary aktynometryczne nie są prowadzone, a dostępne dane meteorologiczne sprowadzają się do podstawowych elementów. Dlatego zaproponowano parametryzacje PAR dla bezchmurnego nieba bazujące jedynie na parametrach astronomicznych. Formuły te, po odpowiednim dopasowaniu współczynników, dają stosunkowo dobre rezultaty. Prostym rozwinięciem tych modeli do dowolnych warunków meteorologicznych jest wykorzystanie zależności średniodobowej przezroczystości atmosfery od dobowej amplitudy temperatury powietrza. Chociaż modeli takich nie można zastosować dla okresów krótszych niż doba, a wyniki w przypadku poszczególnych dni obarczone są dosyć dużym błędem, pozwalają one na oszacowanie wartości promieniowania PAR w skali miesięcznej czy wielodniowej. Mogą być zatem użyteczne do analiz zmian uwarunkowań fotobiologicznych w dłuższym przedziale czasu.

---

Ryciny i tabele, pod którymi nie zamieszczono źródeł, są opracowaniami własnymi autorów artykułu.

Autorzy dziękują Dyrekcji Biebrzańskiego Parku Narodowego za umożliwienie prowadzenia badań na terenie Parku oraz Państwu Krystynie i Adamowi Raczkowskim z gospodarstwa agroturystycznego „Dworek na końcu świata” za opiekę nad stanowiskiem pomiarowym.

Praca finansowana ze środków Narodowego Centrum Nauki przyznanych na podstawie umowy numer UMO-2020/37/B/ST10/01219 oraz środków Uniwersytetu Łódzkiego w ramach umowy 4/IDUB/DOS/2021

**Piśmiennictwo**

- Aguiar, L.J.G., Fischer, G.R., Ladle, R.J., Malhado, A.C.M., Justino, F.B., Aguiar, R.G., & da Costa, J.M.N. (2012). Modeling the photosynthetically active radiation in South West Amazonia under all sky conditions. *Theoretical and Applied Climatology*, 108(3-4), 631-640. <https://doi.org/10.1007/s00704-011-0556-z>
- Akitsu, T.K., Nasahara, K.N., Ijima, O., Hirose, Y., Ide, R., Takagi, K., & Kume, A. (2022). The variability and seasonality in the ratio of photosynthetically active radiation to solar radiation: A simple empirical model of the ratio. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 108, 102724. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2022.102724>
- Alados, I., & Alados-Arboledas, L. (1999). Direct and diffuse photosynthetically active radiation: measurements and modelling. *Agricultural and Forest Meteorology*, 93(1), 27-38. [https://doi.org/10.1016/S0168-1923\(98\)00107-5](https://doi.org/10.1016/S0168-1923(98)00107-5)
- Alados, I., Foyo-Moreno, I., & Alados-Arboledas, I. (1996). Photosynthetically active radiation – measurements and modelling. *Agricultural and Forest Meteorology*, 78(1), 121-131.
- Awal, M.A., Koshi, H., & Ikeda, T. (2006). Radiation interception and use by maize/peanut intercrop canopy. *Agricultural and Forest Meteorology*, 139(1-2), 74-83. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2006.06.001>
- Badescu, V. (1997). Verification of some very simple clear and cloudy sky models to evaluate global solar irradiance. *Solar Energy*, 61(4), 251-264. [https://doi.org/10.1016/S0038-092X\(97\)00057-1](https://doi.org/10.1016/S0038-092X(97)00057-1)
- Bogdańska, B., & Podogrocki, J. (2000). Zmienność całkowitego promieniowania słonecznego na obszarze Polski w okresie 1961-1995. *Materiały Badawcze IMGW, Seria Meteorologia*, 30, 1-43.
- Borzyszkowski, J., & Grzegorzczak, I. (2021). Kotlina Biebrzańska. W: A. Richling, J. Solon, A. Macias, J. Balon, J. Borzyszkowski, & M. Kistowski (red.), *Regionalna geografia fizyczna Polski* (s. 568-569). Poznań: Bogucki Wydawnictwo Naukowe.
- Bryant, D.A., & Frigaard, N.-U. (2006). Prokaryotic photosynthesis and phototrophy illuminated. *Trends in Microbiology*, 14(11), 488-496. <https://doi.org/10.1016/j.tim.2006.09.001>
- Bryś, K. (2015). Zasoby energii słonecznej w dolinie Widawy. *Inżynieria Ekologiczna*, 44, 53-61. <https://doi.org/10.12912/23920629/60025>
- Bryś, K., & Bryś, T. (2001). Wahania natężenia całkowitego promieniowania słonecznego w 55-letniej serii wrocławskiej (1946-2000). *Prace i Studia Geograficzne*, 29, 161-171.
- Czarnowski, M. (1983). Promieniowanie fotosyntetycznie czynne. *Wiadomości Botaniczne*, 27(4), 271-287.
- de Blas, M., García-Rodríguez, A., García, I., & Torres, J.L. (2022). Validation and calibration of models to estimate photosynthetically active radiation considering different time scales and sky conditions. *Advances in Space Research*, 70(7), 1737-1760. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2022.07.005>
- Dye, D.G. (2004). Spectral composition and quanta-to-energy ratio of diffuse photosynthetically active radiation under diverse cloud conditions. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 109(D10), D10203. <https://doi.org/10.1029/2003JD004251>
- Flanagan, L.B., Wever, L.A., & Carlson, P.J. (2002). Seasonal and interannual variation in carbon dioxide exchange and carbon balance in a northern temperate grassland. *Global Change Biology*, 8(7), 599-615. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2486.2002.00491.x>

- Fortuniak, K., Pawlak, W., Bednorz, L., Grygoruk, M., Forsytek, J., Ziulkiewicz, M., Fortuniak, A., & Okupny, D. (2016). Stanowisko pomiarów turbulencyjnych strumieni gazów cieplarnianych w Kopytkowie (Biebrzański Park Narodowy). W: K. Fortuniak (red.), *Wybrane problemy pomiarów wymiany gazowej pomiędzy powierzchnią ziemi a atmosferą na terenach bagiennych* (s. 19-31). Łódź: Katedra Meteorologii i Klimatologii WNG UŁ.
- Frolking, S.E., Bubier, J.L., Moore, T.R., Ball, T., Bellisario, L.M., Bhardwaj, A., Carroll, P., Crill, P.M., Laflour, P.M., McCaughey, J.H., Roulet, N.T., Suyker, A.E., Verma, S.B., Waddington, J.M., & Whiting, G.J. (1998). Relationship between ecosystem productivity and photosynthetically active radiation for northern peatlands. *Global Biogeochemical Cycles*, 12(1), 115-126.  
<https://doi.org/10.1029/97GB03367>
- Ge, S., Smith, R.G., Jacovides, C.P., Kramer, M.G., & Carruthers, R.I. (2011). Dynamics of photosynthetic photon flux density (PPFD) and estimates in coastal northern California. *Theoretical and Applied Climatology*, 105(1-2), 107-118. <https://doi.org/10.1007/s00704-010-0368-6>
- Ghayas, H., Radhakrishnan, S.R., Sehgal, V.K., & Singh, S. (2022). Measurement and comparison of photosynthetically active radiation by different methods at Delhi. *Theoretical and Applied Climatology*, 150(3-4), 1559-1571. <https://doi.org/10.1007/s00704-022-04252-9>
- Gorczyński, W. (1903). Badania nad przebiegiem rocznym insolacji. *Rozpr. Wydz. Mat.-Przyr. Pol. Akad. Um.*, XLIII (ser. A), 1903.
- Gorczyński, W. (1913). O insolacji ziem polskich. W: *Encyklopedia Polska, t.I. Geografia Fizyczna Ziemi Polskich* (s. 161-170). Kraków: Wydawnictwo Polskiej Akademii Umiejętności.
- Janjai, S., Sripradit, A., Wattan, R., Buntoung, S., Pattarapanitchai, S., & Masiri, I. (2013). A Simple Semi-Empirical Model for the Estimation of Photosynthetically Active Radiation from Satellite Data in the Tropics. *International Journal of Photoenergy*, 2013, 1-6.  
<https://doi.org/10.1155/2013/857072>
- Janjai, S., Wattan, R., & Sripradit, A. (2015). Modeling the ratio of photosynthetically active radiation to broadband global solar radiation using ground and satellite-based data in the tropics. *Advances in Space Research*, 56(11), 2356-2364. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2015.09.020>
- Kleniewska, M., & Chojnicki, B.H. (2016). Zmienność całkowitego promieniowania słonecznego w Warszawie w latach 1964-2013. *Acta Geographica Lodziensia*, 104, 67-74.
- Kowalska, N., Chojnicki, B.H., Józefczyk, D., Urbaniak, M., Juszcak, R., & Olejnik, J. (2013). Próba oceny produktywności ekosystemu w warunkach polowych Wielkopolski. *Rocznik Ochrona Środowiska*, 15, 2481-2495.
- Kuczmańska, L., & Paszyński, J. (1964). Rozkład promieniowania całkowitego na obszarze Polski. *Przeegląd Geograficzny*, 4, 691-702.
- Landsberg, J.J., & Waring, R.H. (1997). A generalised model of forest productivity using simplified concepts of radiation-use efficiency, carbon balance and partitioning. *Forest Ecology and Management*, 95(3), 209-228. [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(97\)00026-1](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(97)00026-1)
- Liu, X., Rahman, T., Song, C., Yang, F., Su, B., Cui, L., Bu, W., & Yang, W. (2018). Relationships among light distribution, radiation use efficiency and land equivalent ratio in maize-soybean strip intercropping. *Field Crops Research*, 224, 91-101. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2018.05.010>
- Matuszko, D. (2009). *Wpływ zachmurzenia na usłonecznienie i całkowite promieniowanie słoneczne na przykładzie krakowskiej serii pomiarów*. Kraków: Wydawnictwo Uniwersytetu Jagiellońskiego.  
<https://core.ac.uk/download/pdf/232008296.pdf>
- Matuszko, D., & Celiński-Mysław, D. (2016). Warunki solarne Krakowa i możliwości ich wykorzystania w helioenergetyce. *Acta Scientiarum Polonorum*, 15(1), 103-111.  
<https://doi.org/10.15576/ASP.FC/2016.15.1.103>

- McCree, K.J. (1972). Test of current definitions of photosynthetically active radiation against leaf photosynthesis data. *Agricultural Meteorology*, 10, 443-453.  
[https://doi.org/10.1016/0002-1571\(72\)90045-3](https://doi.org/10.1016/0002-1571(72)90045-3)
- Möttus, M., Sulev, M., Baret, F., Lopez-Lozano, R., & Reinart, A. (2012). Photosynthetically Active Radiation: Measurement and Modeling. W: R.A. Meyers (Ed.), *Encyclopedia of Sustainability Science and Technology* (s. 7902-7932). New York: Springer. <https://doi.org/10.1007/978-1-4419-0851-3>
- Murkowski, A. (2002). Wpływ chłodu i zwiększonego PAR na fluorescencję chlorofilu w liściach roślin pomidora. *Zeszyty Problemowe Postępów Nauk Rolniczych*, 481(1), 199-203.
- Nöjd, P., & Hari, P. (2001). Instantaneous PAR estimated using long records of daily temperature and rainfall. *Agricultural and Forest Meteorology*, 109(1), 47-59.  
[https://doi.org/10.1016/S0168-1923\(01\)00258-1](https://doi.org/10.1016/S0168-1923(01)00258-1)
- Okruszko, H. (1973). Przyrodniczo-rolnicza charakterystyka doliny Biebrzy. *Zeszyty Problemowe Postępów Nauk Rolniczych*, 134, 173-199.
- Oświt, J. (1991). Roślinność i siedliska zabagnionych dolin rzecznych na tle warunków wodnych. *Roczniki Nauk Rolniczych, Ser. D.*, 221.
- Pilarski, J., & Kocurek, M. (2014). *Dystrybucja Promieniowania w roślinach*. Prace Instytutu Elektrotechniki, 267, 109-120.
- Pilarski, J., Tokarz, K., & Mocurek, M. (2012). Plant adaptation to light spectra composition and intensity. *Prace Instytutu Elektrotechniki*, 256, 243-236.
- Podstawczyńska, A. (2009). UV and global solar radiation in Łódź, Central Poland. *International Journal of Climatology*, 30(1), 1-10. <https://doi.org/10.1002/joc.1864>
- Sakowska, K., Juszczak, R., Uździcka, B., & Olejnik, J. (2012). Zmienność dobową strumieni CO<sub>2</sub> wymienianych między atmosferą a różnymi uprawami rolniczymi. *Woda-Środowisko-Obszary Wiejskie*, 2012(38), 221-244.
- Shibles, R. (1976). Terminology Pertaining to Photosynthesis. *Crop Science*, 16(3), 437-438.  
<https://doi.org/10.2135/cropsci1976.0011183X001600030033x>
- Stenz, E. (1922). Natężenie promieniowania słonecznego i insolacja w Warszawie według pomiarów w okresie 1913-1918. W: *Rocznik Państw. Inst. Meteor. za rok 1919*.
- Tamulewicz, J. (1988). Promieniowanie aktywne fotosyntetycznie w okresie wegetacyjnym na Nizinie Wielkopolskiej w rejonie Turwi. *Badania Fizjograficzne Nad Polską Zachodnią. Seria A: Geografia Fizyczna*, 40, 67-74.
- Tsubo, M., & Walker, S. (2005). Relationships between photosynthetically active radiation and clearness index at Bloemfontein, South Africa. *Theoretical and Applied Climatology*, 80(1), 17-25.  
<https://doi.org/10.1007/s00704-004-0080-5>
- Wandji Nyamsi, W., Blanc, P., Augustine, J.A., Arola, A., & Wald, L. (2019). A New Clear-Sky Method for Assessing Photosynthetically Active Radiation at the Surface Level. *Atmosphere*, 10(4), 219.  
<https://doi.org/10.3390/atmos10040219>
- Wane, O., Ramírez Ceballos, J.A., Ferrera-Cobos, F., Navarro, A.A., Valenzuela, R.X., & Zarzalejo, L.F. (2022). Comparative Analysis of Photosynthetically Active Radiation Models Based on Radiometric Attributes in Mainland Spain. *Land*, 11(10). <https://doi.org/10.3390/land11101868>
- Xu, J., Lv, Y., Liu, X., Wei, Q., Qi, Z., Yang, S., & Liao, L. (2019). A general non-rectangular hyperbola equation for photosynthetic light response curve of rice at various leaf ages. *Scientific Reports*, 9(1), 1-8. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-46248-y>
- Yu, X., Wu, Z., Jiang, W., & Guo, X. (2015). Predicting daily photosynthetically active radiation from global solar radiation in the Contiguous United States. *Energy Conversion and Management*, 89, 71-82. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.09.038>

Ziulkiewicz, M., Forsytek, J., Fortuniak, A., Fortuniak, K., Kloss, M., & Okupny, D. (2014). Selected environmental characteristics of the greenhouse gases measurement site at wetland of the Biebrza National Park, Poland. *West Siberian Peatlands and Carbon Cycle: Past and Present*, 152-154.

## Summary

The availability of light is one of the most important factors determining the way in which photosynthesis proceeds. Wave bands of solar radiation in the range 400-700 nm are called photosynthetically active radiation (PAR), given their ability to stimulate the process of photosynthesis. Given that relevant data remain of only limited availability, and that PAR shows relationships at regional and local levels, there is a continued need for independent research in this sphere, not least in relation to areas considered to be of high natural value.

The main goal of the work detailed here has thus been to characterise the photosynthetically active radiation incoming in the Middle Biebrza Basin of NE Poland, on the basis of a 9-year (2013-2021) measurement series obtained at the Kopytkowo site (53°35'30.8" N, 22°53'32.4" E). Analysis was carried out for both the instantaneous values obtained, and their 24-hour totals. In addition to the basic statistical characteristics, attention was also paid to radiation on cloudless days, as well as to the relationship between PAR values noted at the Earth's surface and at the top of the atmosphere. Given that empirical data of the above kind are bound to remain limited, proposals have been made as regards simple parameterisations of PAR radiation suitable for use in environmental studies.

The research was carried out in NE Poland, on the edge of Biebrza National Park, in what is known as the Middle Basin of the River Biebrza (Fig. 1). The area can be characterised as having natural, almost unchanged and uninhabited wetlands overgrown by swamp vegetation. The measurement site is located around 350 m north of the small village of Kopytkowo, which itself has only a handful of permanent residents.

Data were collected using a PQS1 PAR Quantum Sensor from the firm Kipp & Zonen, as mounted at a height 2.7 m a.g.l. (Fig. 2). The sensor is part of an eddy-covariance system measuring the exchange of greenhouse gases between the ecosystem and the atmosphere. Data were sampled every 10 seconds and then stored in a (CR500) datalogger as 5-minute averages. The results are shown as photosynthetic photon flux density (PPFD), the units being micromoles per square metre per second ( $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ). Collection was noted in relation to Central European Time (CET).

Long-term measurements of photosynthetically active radiation in the Middle Biebrza Basin reveal a clear annual cycle. The highest values occur in June, when PAR reaches the level of approximately  $2000 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ . However, in the summer it is possible for the so-called mirror effect to operate, ensuring that instantaneous PAR values may sometimes be higher than those recorded in the circumstances of a cloudless sky. It is in the winter season that PAR values are lowest, even on sunny days, reaching only about  $400 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  (Fig. 3).

The ratio of the measured PAR to its value at the top of the atmosphere (the PAR clearness index,  $k_{\text{TPAR}}$ ) in conditions of a cloudless sky takes the form of a hyperbolic function

of the Sun's height,  $h_s$  (eq. 3) changing from 82-83% for high Sun ( $h_s = 60^\circ$ ) to 65-75% for  $h_s = 30^\circ$  and dropping below 55% for  $h_s = 10^\circ$  (Fig. 4).

The average photosynthetic photon flux density along the Middle Biebrza Basin at particular hours is determined by day-length during the year (Fig. 5). The mean values represent the influence of Sun height and atmospheric transparency. Results with the highest values were recorded in the hours 11:00-12:00. During the summer solstice in June, PPFD values reach  $1440 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ , while in December they may be as low as some  $180 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ . In May and July, a slight decrease in PAR values is to be observed in the afternoon hours, most likely due to the development of convective cloud cover, but this effect is generally weak. The same months also recorded the highest and lowest mean 24-hour totals: June –  $64.8 \text{ mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{day}^{-1}$ , December –  $0.6 \text{ mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{day}^{-1}$  (Table 2). Similarly, the highest mean values for 24-hour PAR totals, above  $50 \text{ mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{day}^{-1}$ , are observed in the first part of June, even as the lowest – of below  $5 \text{ mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{day}^{-1}$  – characterise December (Fig. 6).

Due to the limited availability of PAR data, we proposed three simple ways in which it might be parametrised. Where total solar radiation,  $K_d$ , data are available, PPFD can be expressed (Eq. 4-7) as a function of  $K_d$ , and the easy-to-calculate Sun height,  $h_s$ , and/or clearness index,  $k_T = K_d/K_0$ , where  $K_0$  is solar radiation at the top of the atmosphere (Eq. 1). Although Eq. 7 gives the best results in the light of statistical measures, in many simple applications it may suffice to use Equation 4, or even directly the  $\text{PAR}/K_d$  ratio, which in our case is 0.44 when PAR is expressed in  $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ , and 2.0 for PPFD.

When data on total solar radiation are not available, it is relatively easy to estimate the PPFD on clear days (Eq. 8, Table 3). This can be developed further through the application of a factor dependent on the diurnal air-temperature amplitude,  $\Delta T$  (Eq. 9-10). Although in the case of individual days the results of such parametrisation are subject to quite a high level of uncertainty (Fig. 9), they allow for the value of PAR radiation to be estimated on a monthly or multi-day scale. They can therefore prove useful as changes in photobiological conditions over a longer period are analysed (Fig. 10).

