

## WSTĘPNA ANALIZA FOTOSYNTETYCZNE AKTYWNEJ RADIACJI W REJONIE OŚRODKA SZKOLENIOWO-BADAWCZEGO W OSTOI

Sergiusz Subocz, Krzysztof Matuszak, Wiesław Janicki

*Instytut Inżynierii Rolniczej, Akademia Rolnicza w Szczecinie*

**Streszczenie.** Wzrost i rozwój plantacji roślin proenergetycznych jest procesem przetwarzania energii słońca. W związku z tym, ważnym staje się włączenie w badane modele procesów produkcyjnych, bloków bilansu promieniowania słonecznego. Dynamika składowych strumienia promieniowania słonecznego w ciągu okresu wegetacyjnego pokazuje stały ich wzrost. Okres od połowy maja do końca lipca charakteryzuje się znacznym wzrostem gęstości strumienia promieniowania słonecznego. Od początku sierpnia do końca okresu wegetacyjnego charakterystycznym jest stałe zmniejszenie strumienia promieniowania słonecznego oraz jego integralnej części – fotosyntetycznie aktywnej radiacji (ang. Photosynthetic Active Radiation - PAR).

**Słowa kluczowe:** PAR, promieniowanie słoneczne, rośliny proenergetyczne

### Wstęp

Wzrost i rozwój plantacji roślin proenergetycznych jest procesem przetwarzania energii słońca. W związku z tym, ważnym staje się włączenie w badane modele procesów produkcyjnych, bloków bilansu promieniowania słonecznego.

Prognozowanie tempa rozwoju roślin, a w wyniku intensywności obiegu węgla oraz innych substancji i gazów związane jest z prognozą oczekiwanych warunków meteorologicznych. Jednocześnie wiadomo, iż dokładna metoda prognozowania tych warunków na stosunkowo długi okres czasu nie istnieje.

Przy opracowaniu metody ilościowej oceny fotosyntetycznie aktywnej radiacji, dostępnej roślinom w rejonie Ośrodka Szkoleniowo-Badawczego (AR Szczecin) w Ostoi uwzględniono, iż sezonowy przebieg niektórych parametrów meteorologicznych ma wyraźny charakter periodyczny. W pierwszej kolejności dotyczy to fotosyntetycznie aktywnej radiacji – jednego z podstawowych czynników, wpływających na tempo wzrostu i asymilacji substancji przez plantacje roślin proenergetycznych. Ważne w tym jest nie tyle dokładne prognozowanie pogody, a ogólna charakterystyka warunków meteorologicznych. W takim układzie model nie będzie reagował na krótkoterminowe, impulsowe zmiany warunków meteorologicznych, dając zniwelowany, przeciętny scenariusz pogody na okres prognozowania.

Obecnie obliczenia dopływu energii promieniowania słonecznego dla prognozowania wydajności upraw przeprowadza się według różnych metod [Poluektowa i in. 2000; 2004].

Równolegle, znaczna część z proponowanych metod nie pozwala lub w znacznym stopniu komplikuje jej formalizację [Strojizdat 1992]. Wymusza to, od autorów programów dla obliczeń dopływu energii promieniowania słonecznego uciekać się do konstruowania własnych modeli, opartych na pracach teoretycznych Brinkworta, Kondratjewa [1976, 1978] oraz innych autorów.

W ostatnim czasie obserwuje się podział modeli na dwa podstawowe typy – teoretyczne i stosowane. Stały rozwój środków automatyzacji procesu obliczeniowego przeniósł granicę pomiędzy stosowanymi a teoretycznymi modelami w stronę ostatnich. W gruncie rzeczy, wszystkie modele można odnieść do klasy empirycznych lub częściowo empirycznych. Oznacza to, iż wyłącznie teoretyczne modele nie istnieją. Jednak gromadzona równolegle nowa wiedza daje możliwość unowocześniania opisu poszczególnych procesów, w maksymalnie możliwym stopniu zbliżając je do realnych procesów, biegnących w warunkach naturalnych. Normalnym skutkiem jest to, że oddalając się od empirycznego opisanego w stronę formalizacji realnie istniejących mechanizmów, modele bardziej adekwatnie opisują zjawiska naturalne i w znacznym stopniu poszerzają szereg rozwiązywanych zadań stosowanych.

## Metodyka

Według Matweewa [1976] modele, odwzorowujące dynamikę bezchmurnego nieba opracowane są na dość wysokim poziomie. Wartość sumarycznego dopływu radiacji słonecznej na poziomą powierzchnię można obliczyć według wzoru:

$$Q = R \cdot \left( k + \frac{\eta}{2} \right),$$

gdzie:

- $\eta$  – względna długości promieniowania słonecznego;
- $k$  – współczynnik empiryczny o wartości 0,24 [Poluektow i in. 2004];
- $R$  – dopływ radiacji słonecznej do granicy atmosfery.

Modelowanie względnego czasu promieniowania słonecznego jest zadaniem wieloczynnikowym. Wartość tą można przedstawić jako losową z prawem rozkładu, odpowiadającym rzeczywistym statystycznym danym meteorologicznym. Wyniki powstają według średnich wykresów przebiegu dopływu radiacji słonecznej. Dla realizacji pełnego zadania modelowania dopływu PAR musimy mieć wartości przynajmniej godzinowe. Niestety, niemożliwe jest zrealizowanie tego za pomocą metod prawdopodobieństwa (probabilistycznych), ponieważ o możliwości ich zastosowania decydują wiarygodne probabilistyczne charakterystyki dla niejednoznacznych danych wejściowych, a względna długość promieniowania słonecznego jest niekontrolowanym niestacjonarnym procesem. Uwzględnienie wszystkich czynników, wpływających na wymienioną wartość, jest niemożliwe, co oznacza niemożliwość całkowitego ominięcia zależności empirycznych.

## Wstępna analiza...

---

Optymalnym rozwiązaniem jest wykorzystanie danych wieloletnich obserwacji [Kózmiński, Michalska 2001] i wyznaczenie czasu promieniowania słonecznego jako funkcji empirycznej:

$$\eta = \begin{cases} 0,0046 \cdot x^3 - 0,13 \cdot x^2 + 1,115 \cdot x - 2,8, & \text{dla } x = 1 \dots 6 \\ -0,009 \cdot x^3 + 0,088 \cdot x^2 - 0,12 \cdot x + 0,18, & \text{dla } x = 7 \dots 12, \end{cases}$$

gdzie:

$x$  – odpowiedni miesiąc, dla mniejszych odcinków czasowych jest potrzebna interpolacja.

$$R = S_{max} \cdot \sin(h),$$

gdzie

$S_{max}$  – maksymalna moc radiacji słonecznej na powierzchnię, prostopadłą promieniom słonecznym – stała słoneczna, wynosząca  $1360 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ ;

$h$  – wysokość Słońca.

Wysokość Słońca można obliczyć według wzoru:

$$h = \arcsin \left[ \sin \theta \cdot \sin \delta + \cos \theta \cdot \cos \delta \cdot \cos \left( \frac{2\pi \cdot (t_h + 12)}{24} \right) \right],$$

gdzie:

$\theta$  – szerokość położenia punktu modelowania;

$\delta$  – deklinacja Słońca

$t_h$  – czas, odliczany od południa, godz.

Zgodnie z metodą, zaproponowaną przez Chlorową [2001], deklinację Słońca można obliczyć według wzoru:

$$\delta = 23,5 \cdot \sin \left( \frac{360^\circ + (284 + n)}{365} \right).$$

Wszystkie niezbędne informacje, jak np. wyznaczenie momentu wschodu i zachodu Słońca w każdym momencie można obliczyć na podstawie szerokości geograficznej miejsca modelowania według metody Astronomical Applications Department z U.S. Naval Observatory [2008].

Badania Tamulewicz i Wosia [1996] wskazują, iż proporcje promieniowania bezpośredniego i rozproszonego jako składowych strumienia promieniowania słonecznego są zmienne w ciągu roku. Dla okresu wegetacyjnego, udział stosunkowy bezpośredniego składowego strumienia promieniowania słonecznego znajduje się w zakresie od 0,37 do 0,49 i może być obliczona według wzoru:

$$S/Q = -0,005 \cdot x^2 + 0,07 \cdot x + 0,224,$$

gdzie:

$x$  – numer miesiąca zaczynając od stycznia (marzec-październik).

Wtedy rozproszona składowa strumienia promieniowania słonecznego może być wyrażona wzorem:

$$D/Q = 1 - S/Q.$$

Jak ustalili autorzy, proporcje promieniowania bezpośredniego i rozproszonego jako składowych w strumieniu promieniowania słonecznego są niezmienną wartością dla różnych szerokości geograficznych Polski.

Część spektra promieniowania słonecznego, znajdującego się w zakresie 0,38 - 0,71  $\mu\text{m}$  nazywa się *Fotosyntetycznie Aktywną Radiacją* (ang. PAR). Energia, przychodząca w danym spektrum w całym strumieniu promieniowania słonecznego, jest najbardziej wpływawą na proces fotosyntezy i syntezę chlorofilu.

Stosunkowa ilość PAR w ogólnym strumieniu przychodzącej krótkofalowej radiacji wg oceny Rosa [1975] wynosi 43% bezpośredniej i 65% rozproszonej jej składowej. Dla dni zachmurzonych dany wskaźnik wynosi do połowy całego strumienia promieniowania słonecznego.

Biorąc pod uwagę zależności dla przeliczenia krótkofalowej radiacji na PAR, zaproponowane przez autorów, można zapisać:

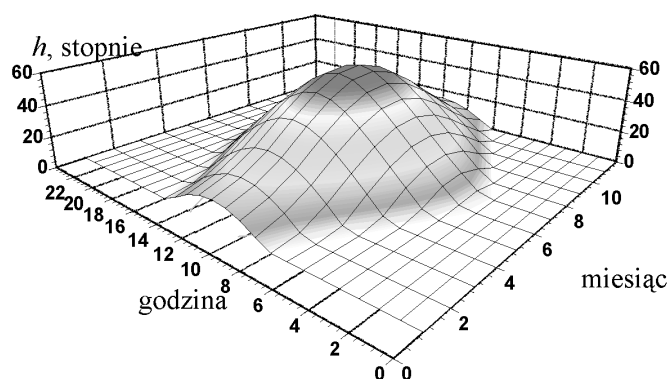
$$R_{PAR} = 0,43 \cdot S + 0,57 \cdot D,$$

gdzie:

S i D – odpowiednio bezpośrednia i rozproszona składowe krótkofalowej radiacji w strumieniu promieniowania słonecznego.

## Wyniki i dyskusja

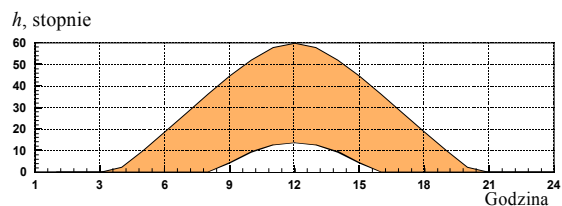
Wysokość Słońca nad horyzontem (rys. 1) zmienia się w szerokim zakresie i osiąga maksymalną wartość 60° w momencie letniego przesilenia. Równolegle zmienia się długość dziennego okresu świetlnego. Przy maksymalnej wysokości słońca długość dnia wynosi 17:01 (wschód słońca 4:32 i zachód 21:33).



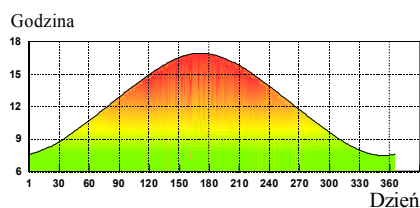
Rys. 1. Wysokość Słońca nad horyzontem w zależności od godziny i miesiąca dla 53.4° N 14.6° W  
Fig. 1. Sun altitude above the horizon depending on hour and month for 53.4° N 14.6° W

## Wstępna analiza...

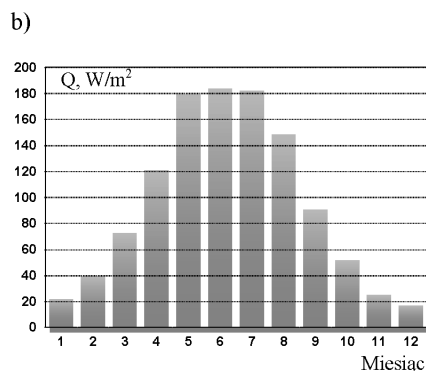
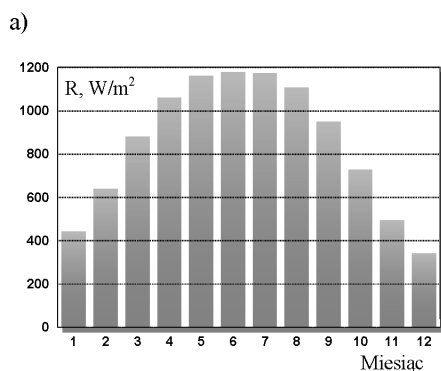
Dla początku okresu wegetacyjnego – 4-5 kwiecień [Kózmiński, Michalska 2001], długość dnia świetlnego wynosi 13:10 godziny przy wysokości słońca  $42^\circ$ . Koniec okresu wegetacyjnego – 4-6 listopada, długość dnia świetlnego wynosi 09:05 godziny przy wysokości słońca  $20^\circ$ .



Rys. 2. Minimalna i maksymalna wysokość słońca w ciągu dnia  
Fig. 2. Minimum and maximum altitude of the Sun during the day



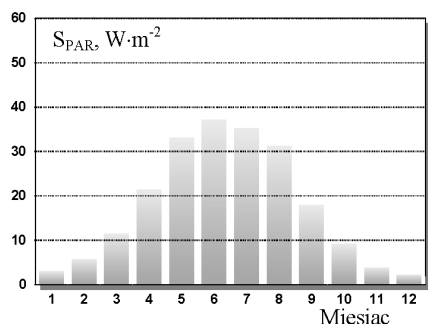
Rys. 3. Zmiana długości dnia w ciągu roku  
Fig. 3. Daytime duration change over the year



Rys. 4. a) Maksymalna gęstość strumienia energii promieniowania słonecznego, przychodzącego na  $1\text{ m}^2$  bez uwzględnienia osłabienia jej przez warstwę atmosfery; b) średnia gęstość strumienia energii promieniowania słonecznego przychodzącego na  $1\text{ m}^2$  powierzchni z uwzględnieniem osłabienia jej przez warstwę atmosfery

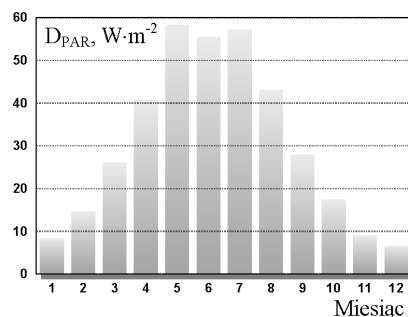
Fig. 4. a) maximum density of solar radiation energy flux per  $1\text{ m}^2$  of surface, not considering its attenuation by atmosphere layer; b) average density of solar radiation energy flux per  $1\text{ m}^2$  of surface, taking into account its attenuation by atmosphere layer

Radiacja słoneczna, przechodząc przez atmosferę, w znacznym stopniu podlega osłabieniu. Na wejściu do atmosfery maksymalna gęstość strumienia promieniowania słonecznego wynosi do  $1200\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ , lecz do powierzchni dociera nie więcej niż  $180\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ . Największe wartości ten wskaźnik osiąga w maju-lipcu –  $179,1\text{--}183,6\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ .



Rys. 5. Bezpośrednia składowa strumienia promieniowania słonecznego

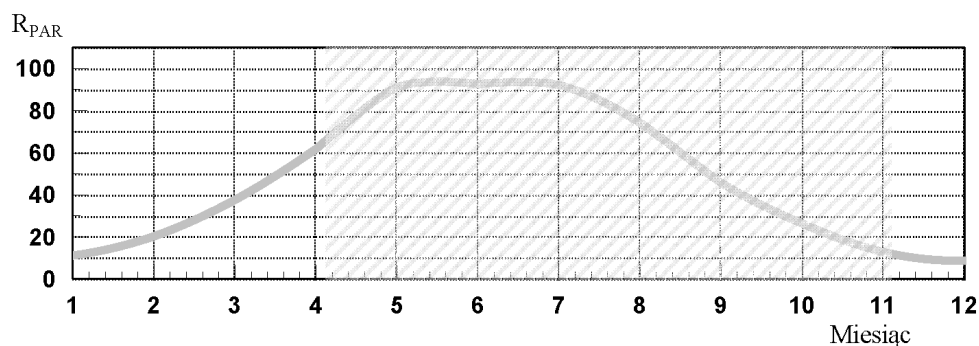
Fig. 5. Direct component of solar radiation flux



Rys. 6. Rozproszona składowa strumienia promieniowania słonecznego

Fig. 6. Dispersed component of solar radiation flux

Fotosyntetycznie aktywna radiacja, jako integralna część ogólnego strumienia promieniowania słonecznego, zmienia się w szerokim zakresie. Dotyczy to bezpośredniej jak również i rozproszonej jej składowej. Bezpośrednia składowa PAR osiąga maksymalnych wartości w maju i w ilościowym przeliczeniu wynosi  $37,1 W \cdot m^{-2}$ . W ciągu okresu wegetacyjnego parametr ten zmienia się w zakresie od  $18,1 W \cdot m^{-2}$  na początku kwietnia, osiąga maksymalne wartości w maju i stopniowo zmniejsza się do końca okresu wegetacyjnego do  $4,6 W \cdot m^{-2}$  (początek listopada).



Rys. 7. Zmiana wartości PAR w skali roku i okresie wegetacyjnym

Fig. 7. Change in the PAR value over the year and during the vegetation period

Rozproszona składowa PAR osiąga maksymalne wartości w czerwcu i w ilościowym przeliczeniu wynosi  $58,2 W \cdot m^{-2}$ . W ciągu okresu wegetacyjnego parametr ten zmienia się w zakresie od  $34,5 W \cdot m^{-2}$  na początku kwietnia, osiąga maksymalną wartość w czerwcu i stopniowo zmniejsza się do końca okresu wegetacyjnego do  $10,8 W \cdot m^{-2}$ .

## Wnioski

1. Dynamika składowych strumienia promieniowania słonecznego w ciągu okresu wegetacyjnego pokazuje stały ich wzrost, osiągający maksymalną wartość w maju dla ogólnego strumienia promieniowania i jego bezpośredniej składowej oraz w czerwcu dla rozproszonej składowej. Najmniejszymi wartościami w ciągu okresu wegetacyjnego charakteryzują się wszystkie składowe strumienia promieniowania słonecznego w listopadzie. Period od połowy maja do końca lipca, charakteryzuje się znacznym wzrostem gęstości strumienia promieniowania słonecznego. Od początku sierpnia do końca okresu wegetacyjnego charakterystycznym jest stałe zmniejszenie strumienia promieniowania słonecznego oraz jego integralnej części – PAR.
2. Zaproponowana metoda pozwala ilościowo określać sumaryczny przychód radiacji słonecznej na poziomą powierzchnię, w tym także gęstość strumienia PAR. Wykorzystane zależności pozwalają ocenić gęstość strumienia PAR w dowolnym momencie z dowolnym krokiem całkowania.
3. Potrzebne dalsze pomiary i obserwacje za zmianą badanych czynników w celu ich uściślenia i sprawdzenia wchodzących w model współczynników empirycznych.

## Bibliografia

- Brinkwort B.** 1976. Energia słońca dla człowieka. Mir. Moskwa. s. 291.
- Chlorowa L.A. i in.** 2001. Wyniki analizy i komputerowego testowania bloków radiacji i fotosyntezy, Izwiestija AGU, Seria chemia, geografia, biologia. Nr 1. s. 61-65.
- Kondratjew K.J., Piwowarowi Z.I., Fedorowa M.P.** 1978. Radiacyjne obliczenie pochylonych powierzchni. Gidrometeoizdat. Leningrad. s. 215.
- Kóźmiński C., Michalska B.** 2001. Atlas klimatycznego ryzyka uprawy roślin w Polsce. Szczecin. ISBN 83-87327-24-7.
- Matweew L.T.** 1976. Kurs ogólnej meteorologii. Fizyka atmosfery. Gidrometeoizdat. Leningrad. s. 639.
- Pawłow N.** (red.). 1992. Wewnętrzne sanitarno-techniczne urządzenia. Cz 3. Wentylacja i kondycjonowanie powietrza. Moskwa Strojizdat. ISBN 5-274-01155-1.
- Poluektow R.A., Nagiew A.T., Szukurow M.S., Mirzoew F.A.** 2004. Matematyczne modelowanie radiacyjnego reżimu upraw i prognozowania tempa rozwoju roślin i plonowania gatunków uprawnych. Zeszyty Akademii Nauk Azerbajdżanu. Seria fizyczno-technicznych i matematycznych nauk, Nr 2. s. 258-262.
- Poluektow R.A., Oparina I.W., Topaź A.G., Fintuszał C.M., Mirszel W.** 2000. Adaptowalność modeli dynamicznych agroekologicznych systemów do różnych warunków glebowo-klimatycznych. Modelowanie matematyczne. Tom 12. Nr 11. s. 3-16.
- Ryszkowski L., French N.R., Kędzióra A. (red.)** 1996. Dynamics of agricultural landscape. PWRiL. Poznań. s. 27-30.
- Approximate Solar Coordinates [on-line]. Washington. U.S. Naval Observatory. Astronomical Applications Department. [dostęp 18-01-2007]. Dostępny w internecie: (<http://aa.usno.navy.mil/faq/docs/SunApprox.html>)

## **PRELIMINARY ANALYSIS OF PHOTOSYNTHETIC ACTIVE RADIATION IN THE AREA OF THE TRAINING AND RESEARCH CENTRE IN OSTOJA**

**Abstract.** Growth and development of plantations with proenergetic plants indicates the process of solar energy conversion. Considering this, it is important to include solar radiation balance blocks in the examined models of production processes. The dynamics of solar radiation flux components during the vegetation season shows their constant growth. The period from mid May until the end of July is characterised by considerable increase in solar radiation flux density. Constant reduction of solar radiation flux and its integral part – Photosynthetic Active Radiation (PAR) is characteristic from the beginning of August until the end of vegetation season.

**Key words:** PAR, solar radiation, proenergetic plants

**Adres do korespondencji:**

Sergiusz Subocz; e-mail: [ssubocz@agro.ar.szczecin.pl](mailto:ssubocz@agro.ar.szczecin.pl)  
Instytut Inżynierii Rolniczej,  
Akademia Rolnicza w Szczecinie  
ul. Papieża Pawła VI/1  
71-459 Szczecin