

POMIAR ENERGII PROMIENIOWANIA PRZY UŻYCIU STANDARDOWEGO
WZORCA RADIACJI CAŁKOWITEJ I SPEKTRALNEJ

Edward Grabikowski, Antoni Murkowski

Zakład Fizyki, Akademia Rolnicza, 71-424 Szczecin, ul. Janosika 8

W badaniach fotobiologicznych, podobnie jak fotochemicznych i fotofizycznych niezbędna jest znajomość jednostek i metod pomiarowych określających wielkość użytego promieniowania optycznego. Promieniowanie optyczne można podzielić na nadfioletowe (UV), widzialne (światło) i podczerwone (IR). W fotobiologii wykorzystana jest część promieniowania optycznego stanowiącego tzw. promieniowanie fizjologiczne obejmujące w przybliżeniu zakres od 300 do 1000 nm. Cechą charakterystyczną promieniowania optycznego, jako promieniowania elektromagnetycznego jest jego właściwość kwantowego przenoszenia i przekazywania energii.

Procesy fotobiologiczne można ogólnie podzielić na takie, w których promieniowanie pełni rolę nośnika energetycznego (fotosynteza, fotodestrukcje) oraz na takie, w których pełni rolę informacyjną (widzenie, fototropizm, fotomorfogeneza, fotoregulacja, fotoperiodyzm i in.), nie wymagające dużej ilości przekazanej energii. Procesy fotobiologiczne mają charakter kwantowy, a ich stadia pierwotne polegają prawie zawsze na oddziaływaniach pojedynczych fotonów (kwantów promieniowania) z pojedynczymi molekułami lub atomami. Koniecznym warunkiem zaistnienia procesu fotobiologicznego jest absorpcja biologicznie aktywnych fotonów przez odpowiednie barwniki, najczęściej związane z wyspecjalizowanymi organelami komórkowymi. Wynika z tego konieczność choćby częściowego pokrywania się widma promieniowania z widmem absorpcji obiektu biologicznego.

Z widmami absorpcyjnymi związane są widma czynnościowe procesów fotobiologicznych, które często wykazują duże podobieństwo. Widma czynnościowe przedstawiają natężenie procesu fotobiologicznego w zależności od długości fali promieniowania, obliczonego na

jednostkę energii, lub na stałą ilość fotonów padających względnie zaabsorbowanych przez obiekt biologiczny.

JEDNOSTKI I PRZYRZĄDY UŻYWANE W FOTOMETRII

Ze względu na kwantowy charakter procesów fotobiologicznych, pomiary promieniowania powinny być przeprowadzane przy użyciu przyrządów mierzących bezpośrednio liczby kwantów promieniowania padającego, względnie pośrednio poprzez pomiar energii przenoszonej przez fotony - energię promieniowania [2]. Wyjątkiem są tu badania wrażeń wzrokowych, przy których celowe może być stosowanie przyrządów fotoelektrycznych wyskalowanych w jednostkach fotometrii wizualnej (kandela, lumen, luks i in.) uwzględniających charakter czułości widmowej oka ludzkiego.

Do pomiaru ilości kwantów promieniowania używa się fotodetektorów wykorzystujących zjawisko fotoelektryczne zewnętrzne (fotokomórka, fotopowielacz) oraz fotodetektorów półprzewodnikowych, w których zachodzi zjawisko fotoelektryczne wewnętrzne lub fotoelektromotoryczne (fotorezystor, fotodioda, fototranzystor, fotoogniwo). Mankamentem wymienionych detektorów jest ich selektywna czułość spektralna uniemożliwiająca pomiar liczebności fotonów w szerokim zakresie widma. Możliwy jest natomiast przybliżony pomiar ilości kwantów w stosunkowo wąskich zakresach widm wydzielonych przez filtry absorpcyjne lub interferencyjne. Są także czynione próby konstrukcji detektorów fotoelektrycznych skorygowanych przy użyciu filtrów.

Inną, bardziej rozpowszechnioną metodą jest pomiar energii promieniowania przy użyciu nieselektywnych detektorów, w których energia kwantów ulega całkowitej absorpcji i zamienia się ostatecznie na ciepło. Detektorami w tym przypadku są bolometry oraz termobaterie zwane także termostatami. W bolometrach wykorzystuje się zwiększenie rezystancji (oporności) cienkiego, poczernionego paska folii metalowej w wyniku jego nagrzania, które następuje po absorpcji fotonów [4]. Termobaterie są szeregowym połączeniem kilkunastu lub kilkudziesięciu termoelementów, których spojenia zostały na przemian przyłączone (bez styku galwanicznego) do poczernionej powierzchni wystawionej na działanie promieniowania oraz do zacienionej części metalowej obudowy. Powstająca różnica temperatur między spojeniami „gorącymi” i „zimnymi” powoduje wy-

tworzenie siły fotoelektromotorycznej proporcjonalnej do różnicy temperatur oraz ilości termoelementów [1]. Charakterystycznym parametrem termobaterii jest jej czułość bezwzględna wyrażana w $\text{mV/W}\cdot\text{m}^{-2}$. Najpopularniejszymi termobateriami są termostosy Kippa i Janiszewskiego.

W zależności od przeznaczenia i funkcji przyrządy pomiarowe z termostosami noszą różne nazwy (solarymetry, pyranometry, albedometry i aktynometry) i mierzą energię promieniowania w całym lub wybranym zakresie widmowym. Przyrządy te są najczęściej wyskalowane w jednostkach natężenia promieniowania - wat na metr kwadratowy ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$), a według starej nomenklatury - $\text{cal}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{min}^{-1}$. W przybliżeniu można przyjąć, że $1\text{ cal}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{min}^{-1} = 700\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$. Odpowiednikiem w fotometrii wizualnej jest luks ($1\text{ lx} = 1\text{ m}\cdot\text{m}^{-2}$). Dla światła słonecznego 1 luks odpowiada 3-5 $\text{mW}\cdot\text{m}^{-2}$.

W badaniach rolniczych, określaniu produktywności fotosyntezy systemów, a także produktywności pierwotnej mórz i oceanów, należy mierzyć sumę dochodzącej energii promieniowania w zadanym zakresie widmowym w ciągu dłuższego okresu, np. godziny lub doby. Do tego celu służą termobaterie współpracujące z elektronicznymi przyrządami sumującymi energię promieniowania - fotointegratory [2]. Fotointegratory są wyskalowane w dżulach na metr kwadratowy i dobę ($\text{J}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{doba}^{-1}$) względnie w kaloriach na centymetr kwadratowy i dobę ($\text{cal}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{doba}^{-1}$).

Jeżeli zachodzi potrzeba ilościowego określenia składu spektralnego promieniowania, to używając termobaterii dokonuje się pomiarów energii promieniowania w stosunkowo wąskich (np. 10 nm) przedziałach widmowych [3]. Uzyskuje się wówczas monochromatyczną gęstość natężenia promieniowania wyrażoną w watach na metr kwadratowy i nanometr ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}/\text{nm}$).

WZORCOWANIE TERMOBATERII I POMIARY ENERGII PROMIENIOWANIA

Termobaterie wytwarzają siłę elektromotoryczną proporcjonalną do absorbowanej energii promieniowania, a współczynnik tej proporcjonalności wyrażonej w $\text{mV/W}\cdot\text{m}^{-2}$ nosi nazwę czułości bezwzględnej. O ile współczynnik ten jest podany, a termobateria współpracuje z urządzeniem elektronicznym dobrej klasy i o bardzo dużej rezystancji wejściowej, to można z odczytanych wartości wyliczać energię promieniowania. W przypadkach kiedy termobateria współpra-

cuje z galwanometrem, miernikiem wskazówkowym lub innym urządzeniem, przez które płynie prąd wzbudzony siłą termoelektromotoryczną należy całość wzorcować za pomocą standardowego źródła promieniowania. Wzorcowanie urządzeń do pomiaru energii promieniowania powinno być okresowo powtarzane.

W przeprowadzonych przez nas pomiarach fotosyntetycznie aktywnej radiacji (FAR), czyli promieniowania fotosyntetycznie czynnego emitowanego przez Słońce oraz różne sztuczne źródła światła, a także przy pomiarach całkowitej energii promieniowania posługiwano się najczęściej termobaterią z 14 par, wykonaną na wzór termobaterii Kippa w Pracowni Termoelektrycznych Przyrządów Pomiarowych w Bydgoszczy. Termobateria, która jest przeznaczona do pomiarów energii promieniowania urządzeń laserowych jest wyposażona dodatkowo w chłodnicę, dzięki której można termostatować obudowę. Czułość bezwzględna termobaterii wynosi $8,3 \mu\text{V}/\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$. Termobateria współpracuje z elektronicznym urządzeniem pomiarowym wykonanym w Zakładzie. Sygnał wejściowy z termobaterii steruje tranzystorem polowym o bardzo wielkiej rezystancji wejściowej, a następnie jest on wzmacniany przez obwody scalone. Wartość sygnału jest odczytywana analogowo na mierniku magnetoelektrycznym. Urządzenie posiada 5 podzakresów (od $43 \text{ W}/\text{m}^2$ do $4700 \text{ W}/\text{m}^2$) i może być zasilane z sieci lub baterii 18 V. Do pomiarów promieniowania w określonych zakresach widmowych służą filtry graniczne.

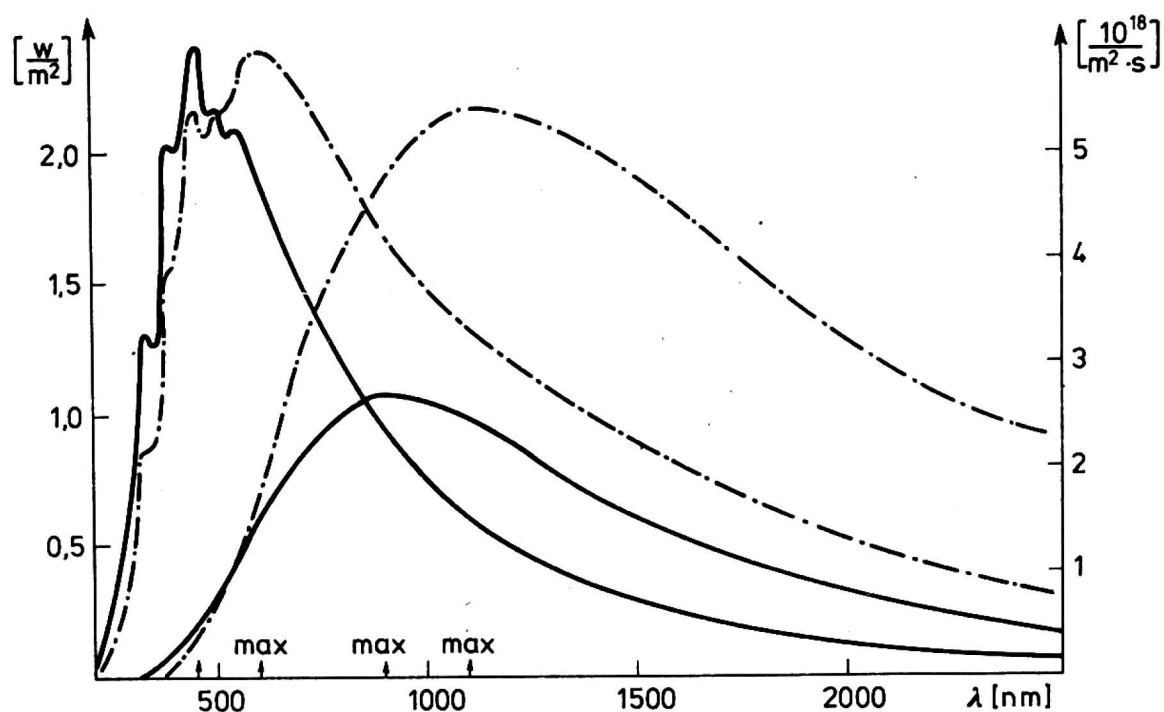
Do cechowania termobaterii służy standardowe źródło promieniowania całkowitego i spektralnego wyprodukowane przez Firmę Optronic Laboratories, Inc. i oznaczone symbolem HTS-113. Jest to lampa wolframowo-halogenowa o mocy około 1000 W i stałym prądzie zasilania 8,0 A. Z odległości 40 cm lampa ta emituje promieniowanie o natężeniu $1460 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$, jest to wartość zbliżona do stałej słonecznej ($1360 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$). Z innej odległości (x) natężenie promieniowania oblicza się wg wzoru

$$E_x = 1460 \frac{(41,2 \text{ cm})^2}{(x + 1,2 \text{ cm})^2} \quad [\text{W}\cdot\text{m}^{-2}]$$

Wartość 1,2 cm to odległość środka obszaru promieniowania od powierzchni czołowej lampy. Wartość promieniowania lampy utrzymuje się z dokładnością $\pm 0,3\%$ przez minimum 50 godzin pracy. Z odleg-

łości 40 cm przy zachowanej wartości prądu 8,00 A z dokładnością do 0,10% standardowa lampa HTS-113 emituje następujące monochromatyczne gęstości natężenia promieniowania wyrażone w $10^{-6} \text{W} \cdot \text{cm}^{-2} / \text{nm}$:

300 nm -	0,532	± 0,9%
400 nm -	8,84	± 0,6%
500 nm -	32,1	± 0,4%
1000 nm -	104,0	± 0,35%
2000 nm -	32,4	± 0,14%



Rys. 1. Energetyczne widma promieniowania Słońca i lampy standardowej HTS-113 (linie ciągłe) oraz odpowiadające im widma kwantowe wyznaczone w przedziale 1 nm (linie przerywane)

Energetyczne widmo promieniowania lampy wyznaczone z 30 punktów od 300 do 2500 nm przedstawia wykres 1.

Widma kwantowe wyliczono z wartości natężeń promieniowania w wąskich przedziałach (monochromatycznych) według wzoru:

$$E_{\lambda} = N \frac{h \cdot c}{\lambda},$$

$$N = \frac{E_{\lambda} \cdot \lambda}{2 \cdot 10^{-16}},$$

$$N = 5 \cdot 10^{15} E_{\lambda} \cdot \lambda,$$

gdzie:

N - ilość fotonów;

E_λ - energia promieniowania dla danej długości fali λ [J];

λ - długość fali [nm];

n - stała Plancka ($6,62 \cdot 10^{-34}$ J·s);

c - prędkość światła w próżni ($3 \cdot 10^{10}$ cm/s).

Możliwość wyznaczania widm energetycznych pozwala na wyliczenie i wykreślenie widm kwantowych, a te z kolei są podstawą wyznaczania widm działania procesów fotobiologicznych.

LITERATURA

1. Czopek M.: Wiad. Bot., 12, 3-23, 1968
2. Czopek M.: Wiad. Ekol., 17, 30-52, 1971
3. Katsumi Inada: Plant Cell Physiol., 17, 355-365, 1976
4. Łapiński M.: Pomiarы elektryczne i elektroniczne wielkości nieelektrycznych. WNT, 1974

Э. ГРАБИКОВСКИ, А. МУРКОВСКИ

ИЗМЕРЕНИЕ ЭНЕРГИИ ИЗЛУЧЕНИЯ ПРИ ПОМОЩИ ИНТЕГРАЛЬНОГО И СПЕКТРАЛЬНОГО СТАНДАРТА ИЗЛУЧЕНИЯ

Р е з ю м е

В фотобиологических исследованиях очень часто необходимо знать энергию использованного излучения. В работе представлено обзор единиц, способов измерений и приборов энергетической фотометрии. Описано также простой метод калибрования термобатареи при помощи стандарта интегрального и спектрального излучения HTS-113 Optronix Lab. Inc.

E. Grabikowski, A. Murkowski

IRRADIATION ENERGY MEASUREMENTS BY MEANS OF STANDARD OF TOTAL AND SPECTRAL IRRADIANCE

S u m m a r y

In the investigations of some photobiologic processes there is necessity to measure the energy of the irradiation applied. This

paper gives a short review of units, methods and energetic photometry instrumentation. A simple thermopile calibration method by means of the high intensity standard of total and spectral irradiance HTS-113 Optronic Lab. Inc. is also described.