

ZASTOSOWANIE SPEKTORADIOMETRII W EKOFIZJOLOGII ROŚLIN

Application of spectroradiometry in plant ecophysiology

Marian CZARNOWSKI

Summary. Spectroradiometry allows the determination of the irradiance at a surface and radiance from a source as a function of its wavelength, known as the spectral power distribution. In radiometry, irradiance is a measure of the intensity of radiant power (the amount of radiant flux) from all direction incident on a unit area of surface. The solar irradiance was expressed in quantum irradiance units (quantum flux density) – $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (preferred in plant ecophysiology units) and in radiant energy flux density units – W m^{-2} . Photosynthetically active radiation (400–700 nm, PAR) was expressed as photosynthetic photon flux density (PPFD) – $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ and photosynthetic irradiance (PI) – W m^{-2} .

The spectral irradiance denotes the irradiance at a given wavelength per unit wavelength interval and was expressed in quantum units $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1} \text{nm}^{-1}$ and in radiant power units – $\text{W m}^{-2} \text{nm}^{-1}$. The spectral solar irradiance in the range 300–1100 nm was registered (with wavelength drive intervals of 2 nm) by means of a portable LI-1800 spectroradiometer (LI-COR, USA). The measurements made on a surface normal to the solar radiant flux and on the horizontal plane were carried out in an open area of cultivated fields in the vicinity of Cracow. The measurement results were elaborated using the computer graphic program PC-1800 ver. 3.01 (LI-COR, USA).

Solar spectral irradiance (300–1100 nm) reaching plant ecosystems varies depending on the time of day, weather conditions, and vegetation season. The spectral quantum irradiance on a bright summer day measured on a surface normal to the photon flux attains a maximum value of $8.7 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1} \text{nm}^{-1}$ at wavelength of 678 nm or $1.85 \text{ W m}^{-2} \text{nm}^{-1}$ at 480 nm. The quantum irradiance (300–1100 nm) at that time reaches $5022 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, the photosynthetically active radiation (400–700 nm, PAR) amounting $2236 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ and energy flux density reaching 902 W m^{-2} (PAR = 488 W m^{-2}). The spectral quantum irradiance measured on the horizontal surface of the ground attains a maximum value of $7 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1} \text{nm}^{-1}$ or $1.6 \text{ W m}^{-2} \text{nm}^{-1}$ and quantum irradiance equals $3996 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (PAR = $1837 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) or 730 W m^{-2} (PAR = 403 W m^{-2}). The scattered spectral quantum irradiance of an ideally clear blue sky attains maximum value of about $1.1 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1} \text{nm}^{-1}$ at a wavelength of 450 nm ($0.3 \text{ W m}^{-2} \text{nm}^{-1}$ at 404 nm), the quantum irradiance reaching $432 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (93 W m^{-2}).

The spectral transmittance of solar irradiation through the plant canopy depends on the value of the leaf area index (LAI) and it shows the smaller values in the PAR range. Photosynthetic quantum irradiance (PQI) below the tomato canopy amounts to $33 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (7.1 W m^{-2}) at LAI = 2.89 and to $12 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (2.6 W m^{-2}) at LAI = 4.03. Thus the PAR transmittance through the tomato plant canopy amounts to about 1–3% of the PAR values above the crop. The optical properties of tomato leaves reveal high absorbance (about 90%) of solar irradiation in the PAR range as well as considerable reflectance and transmittance in near infrared.

The rates of photochemical processes, including photosynthesis, are proportional to the number of the absorbed quanta (photons), and not to the energy contained in them. From a comparison of the relative curves of spectral solar irradiance with the spectral quantum yield of the photosynthesis and photosynthetic action spectrum it follows that for ecophysiological studies it is more advantageous to express spectral irradiance not in radiant energy flux density units and in PAR quantum flux density (PPFD) units.

Key words: spectroradiometry, radiometric units, quantum units, spectral irradiance, photosynthetically active radiation, plant ecophysiology

Prof. dr hab. Marian Czarnowski, Zakład Fizjologii Roślin im. Franciszka Górskiego, Polska Akademia Nauk, ul. Sławkowska 17, 31–016 Kraków

WSTĘP

Fotobiologicznie czynne spektrum elektromagnetyczne (200–1000 nm), obejmujące promieniowanie ultrafioletowe, widzialne i bliską podczerwień, charakteryzuje się dwoma podstawowymi parametrami fizycznymi: długością fali i natężeniem. Spektrometria pozwala na określenie natężenia napromieniowania na jednostkę powierzchni i natężenia promieniowania emitowanego przez źródło energii, jako funkcji jego długości fali, co nazywamy spektralnym rozkładem mocy promienistej [18]. Zadaniem spektrometrii w badaniach z zakresu ekofizjologii roślin jest pomiar spektralnego natężenia napromieniowania słonecznego padającego na fotosyntetyzujące ekosystemy, jak również określenie spektralnej refleksji, transmisji i absorpcji napromieniowania przez zielone liście. Powyższe parametry optyczne stanowią frakcje strumienia energii słonecznej, która może być odbita, zaabsorbowana i przepuszczana w zależności od wskaźnika pokrycia liściowego w zespołach roślinnych.

SŁOŃCE – ŹRÓDŁO ENERGII DLA ŻYCIA NA ZIEMI

Słońce jest pierwotnym źródłem wszelkich postaci energii na Ziemi. Wypromieniowana przez Słońce energia jest 2 miliardy razy większa od energii jaką pobiera Ziemia. Ponad 99% pobranej przez Ziemię energii słonecznej zużywa się na ogrzewanie atmosfery ziemskiej, lądów i oceanów, na parowanie wód i wprowadzenie w ruch mas powietrznych. Reszta natomiast bierze udział w tworzeniu zasobów energetycznych.

Energia napromieniowania słonecznego absorbowana przez świat roślin zielonych jest w procesie fotosyntezy przekształcana na energię chemiczną i wykorzystywana do wiązania CO₂, w efekcie czego powstają związki organiczne biomasy roślinnej. Produkty fotosyntezy stanowią materiał budulcowy i źródło energii dla życia i rozwoju całego świata ożywionego na Ziemi.

Słońce jest najbliższą Ziemi a zarazem naj-

jaśniejszą gwiazdą, w której zachodzą reakcje termojądrowej przemiany wodoru (72,7% masy) w hel (26,2%), dzięki czemu pewna ilość materii zostaje zamieniona w energię zgodnie z prawem Einsteina $E = mc^2$, gdzie: E - oznacza wytworzoną energię, m - przetworzoną masę, c - prędkość światła ($2,998 \times 10^8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$). Przyjmując, że średnia odległość Ziemi od Słońca wynosi prawie 150 milionów km, promieniowanie słoneczne w postaci strumienia fotonów (kwantów energii) po czasie 8,31 minuty lotu w przestrzeni kosmicznej dociera do Ziemi. Przy przepływie strumienia promieniowania przez atmosferę następuje częściowe jego odbicie, absorpcja i rozproszenie. Ultrafiolet (poniżej 380 nm) i promieniowanie widzialne (380–780 nm) są jedynie nieznacznie absorbowane przez tlen i ozon, podczas gdy podczerwień (powyżej 780 nm) może być absorbowana zależnie od stężenia pary wodnej i dwutlenku węgla w atmosferze. Zakres od 300–3000 nm nazywa się często całkowitym promieniowaniem słonecznym. W procesie fotosyntezy roślin zielonych jest wykorzystywana jedynie mała część spektrum napromieniowania słonecznego w zakresie długości fali od 400–700 nm, które w ekofizjologii roślin jest nazwane promieniowaniem fotosyntetycznie czynnym (*Photosynthetically Active Radiation, PAR*). Promieniowanie fotosyntetycznie czynne stanowi przeciętnie około 45% całkowitego promieniowania słonecznego.

TERMINOLOGIA I JEDNOSTKI RADIOMETRYCZNE STOSOWANE W EKOFIZJOLOGII ROŚLIN

STRUMIEŃ ENERGII PROMIENISTEJ

Radiometria jest to pomiar właściwości **energii promienistej** (jednostka *SI* – **dżul, J**), która jest jedną z wielu wymiennych form energii. Szybkość przepływu energii promienistej w postaci fali elektromagnetycznej jest nazwana **strumieniem promieniowania** (mocą promienistą), (jednostka *SI* – **wat, W**; $1 \text{ W} = 1 \text{ J}\cdot\text{s}^{-1}$). Promieniowanie może być mierzone jako strumień

przeptywający od źródła energii (Słońce, w naturalnych warunkach) przez jeden lub więcej ośrodków odbijających, absorbujących, rozpraszających i przepuszczających (atmosfera Ziemi, zespoły roślinne) do powierzchni odbierającej tę energię (fotosyntetyzujące liście), [29].

W radiometrii **natężenie promieniowania** jest właściwością źródła energii, a nie wartości energii docierającej do określonej powierzchni. Natężenie promieniowania (gęstość kątowna strumienia energii promienistej) jest to strumień wychodzący z punktu źródła energii na jednostkę kąta bryłowego przestrzeni otaczającej ten punkt (Jednostka SI – **wat na steradian, $W \cdot sr^{-1}$**).

Zdolność promieniowania (radiacja, radiance) jest to strumień promienisty emitowany przez źródło na steradian i jednostkę powierzchni. (Jednostka – **$W \cdot sr^{-1} \cdot m^{-2}$** .)

Terminem radiometrycznym dla strumienia promieniowania padającego ze wszystkich kierunków na jednostkę powierzchni odbierającej jest **natężenie napromieniowania (napromienienia)**, (gęstość powierzchniowa strumienia energii promienistej) a jednostką SI jest **$W \cdot m^{-2}$** . Natężenie napromieniowania (*irradiance*) jest poprawnym terminem radiometrycznym dla właściwości, która w ekofizjologii roślin jest niesłusznie nazywana „natężeniem światła” [29].

Napromienianie (irradiation) jest to natężenie napromieniowania jakie powstaje w jednostce czasu (**$W \cdot m^{-2} \cdot s$**). Ponieważ $1 W = 1 J \cdot s^{-1}$, zatem jednostką jest **$J \cdot m^{-2}$** .

STRUMIEŃ KWANTÓW

Promieniowanie elektromagnetyczne jest emitowane i absorbowane w postaci elementarnych cząsteczek (porcji) energii zw. fotonami lub kwantami. Energia kwantu jest odwrotnie proporcjonalna do jego długości fali:

$$E = h \cdot \nu = h \cdot c / \lambda = 1,989 \times 10^{-16} / \lambda \text{ J}$$

gdzie: E – energia kwantu (fotonu) wyrażona w dżulach (J),
 h – stała Plancka ($6,626 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$),
 ν – częstotliwość fali elektromagnetycznej (c/λ),
 c – szybkość fali światła ($2,998 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$),
 λ – długość fali (nm).

Jednostką SI strumienia energii promienistej jest **wat (W)**, natomiast jednostką SI **strumienia kwantów (fotonów)** jest **mol (liczba Avogadro, $6,022 \times 10^{23}$)**. W fotobiologii i fotochemii **mol kwantów** jest określany jako **ajnsztajn (E)**. Jednakże ajnsztajn nie jest jednostką SI i dlatego obecnie jest coraz rzadziej używany [21]. Mol kwantów jest to energia mola cząsteczek, z których każda absorbuje 1 kwant promieniowania. Najczęściej stosowaną jednostką SI **gęstości strumienia kwantów (fotonów)** jest **$\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$** .

$$1 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} = 1 \mu\text{E} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} = 6,022 \times 10^{17} \text{ kwantów} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} = 6,022 \times 10^{17} \text{ fotonów} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}.$$

Energia kwantu zmniejsza się wraz ze wzrostem długości fali – w zakresie od 300–3000 nm zmniejszenie to wynosi 10 razy, a w zakresie od 400–700 nm (PAR) 1,75 razy [8–11].

Jeden **mol kwantów monochromatycznego promieniowania** niesie energię $1,2 \times 10^8 / \lambda \text{ J}$. Strumień energii promienistej 1 W jest równoważny strumieniowi kwantów (fotonów):

$$\lambda(1,2 \times 10^8) = 8,35 \times 10^9 \times \lambda(\text{nm}) \text{ mol kwantów} \cdot \text{s}^{-1}.$$

Spektralną gęstość strumienia kwantów (Q_λ) wyrażoną w **$\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{nm}^{-1}$** obliczamy ze wzoru:

$$Q_\lambda = 8,35 \times 10^9 \times \lambda \times I_\lambda$$

gdzie: I_λ – gęstość spektralna strumienia energii wyrażona w **$W \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{nm}^{-1}$** ,
 λ – długość fali w nm.

Natężenie napromieniowania (*irradiance*) jest pomiarem mocy promienistej padającej na jednostkę powierzchni (**$W \cdot \text{m}^{-2}$**), natomiast **natężenie napromieniowania kwantowego (quantum irradiance)** jest to liczba kwantów (fotonów) padająca na jednostkę powierzchni w jednostce czasu (**$\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$**). Używa się również terminu „gęstość strumienia kwantowego” (**Quantum Flux Density**). Zatem terminowi „liczba kwantów (fotonów)” odpowiada termin „ilość promieniowania” a „strumieniowi kwantów (fotonów)” – „strumień energii promienistej”. W wielu badaniach z zakresu fotobiologii i fotochemii są stosowane jednostki kwantowe [5, 12, 13, 34, 42]. Jednostka natężenia napromieniania kwantowego – **$\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$** – jest rów-

niez preferowana w ekofizjologii roślin a szczególnie w badaniach nad produktywnością fotosyntetyczną roślin. Wydajność kwantowa fotosyntezy jest to stosunek liczby związanych cząsteczek CO₂ do liczby zaabsorbowanych kwantów (względnie stosunek liczby związanych moli CO₂ do liczby zaabsorbowanych moli kwantów), [9, 10, 28, 44].

PROMIENIOWANIE FOTOSYNTETYCZNE CZYNNE

Promieniowanie fotosyntetycznie czynne (*Photosynthetically Active Radiation, PAR*) jest definiowane jako promieniowanie w zakresie długości fali od **400–700 nm**. PAR jest głównym terminem, który obejmuje zarówno określenie gęstości strumienia kwantów (fotonów) jak i określenie gęstości strumienia energii promienistej [10–13, 22, 23, 29]

Gęstość strumienia fotosyntetycznych fotonów (*Photosynthetic Photon Flux Density, PPF*) lub gęstość strumienia fotonów (kwantów) PAR (*Quantum Flux Density of PAR*) jest to liczba fotonów w zakresie długości fali od 400–700 nm padająca na jednostkę powierzchni w jednostce czasu. Do pomiaru PPF stosuje się czujnik kwantowy (punktowy lub liniowy, LICOR) [24, 25]. Jednostki:

$$1 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1} = 1 \mu\text{E}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1} = 6,022 \times 10^{17} \\ \text{kwantów}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1} = 6,022 \times 10^{17} \text{ fotonów}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}.$$

Natężenie napromieniowania fotosyntetycznego (*Photosynthetic Irradiance, PI*) lub gęstość strumienia energii promienistej PAR jest to moc promienista w zakresie długości fali od 400–700 nm padająca na jednostkę powierzchni ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$). Relacja pomiędzy natężeniem napromieniowania fotosyntetycznego (*PI*) a gęstością strumienia fotosyntetycznych fotonów (*PPFD*) zależy od spektralnych właściwości źródła promieniowania [29].

Dla napromieniowania słonecznego w zakresie 400–700 nm średni współczynnik zamiany wynosi: $1 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2} \text{ (PAR)} = 4,6 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1} \text{ (PPFD)}$, [8–13, 29]. Terminologia i jednostki miar radiometryczne, kwantowe i fotometryczne

są omówione w wielu publikacjach [5, 9, 21, 29, 33, 36, 43]. Całkowite promieniowanie słoneczne i promieniowanie fotosyntetycznie czynne było przedmiotem badań wielu autorów [1–4, 7–16, 19, 20, 22, 23, 31, 32, 37–42, 45, 46]. Nowoczesne metody określenia całkowitego natężenia napromieniowania jak również w zakresie PAR są prowadzone na podstawie danych satelitarnych [1, 2].

FOTOMETRIA

Promieniowanie widzialne – **światło** – jest częścią spektrum słonecznego. Światło jest definiowane jako promieniowanie elektromagnetyczne o długości fali 380–780 nm, które jest zdolne wywoływać bezpośrednie wrażenia wzrokowe. Względna krzywa spektralna wrażliwości oka ludzkiego na światło o przeciętnym poziomie oświetlenia, posiada maksimum w świetle żółto-zielonym (555 nm) i jest nazwana względną spektralną skutecznością świetlną normalnego obserwatora [CIE, 6]. W fotometrii określenie strumień świetlny zastępuje określenie strumień promieniowania w radiometrii, a termin natężenie oświetlenia odpowiada terminowi natężenie napromieniowania.

Fotometria ma zastosowanie do określenia **natężenia oświetlenia** (jednostka – **luks**, $1 \text{ lx} = 1 \text{ lm}\cdot\text{m}^{-2}$), tam gdzie oko ludzkie jest głównym odbiorcą światła. Do pomiaru natężenia oświetlenia stosuje się czujnik fotometryczny. Ze względu na znaczną rozbieżność pomiędzy spektralną wrażliwością oka ludzkiego a spektralną wydajnością fotosyntezy, jak również spektrami czynnymi innych procesów fizjologicznych (patrz ryc. 18), termin „światło” nie powinien być używany w ekofizjologii roślin, gdyż pojęcie to dotyczy wyłącznie promieniowania widzialnego. Zupełnie błędne są określenia „światło ultrafioletowe” i „światło podczerwone”, ponieważ wykraczają poza pojęcie promieniowania widzialnego [29].

SPEKTORADIOMETRIA

Wszystkie właściwości strumienia energii promienistej zależą od długości fali źródła promieniowania. **Spektralne natężenie napromieniania** (*spectral irradiance*) jest to natężenie napromieniania przy określonej długości fali na jednostkę przedziału długości fali (nanometr). Jednostka SI – $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{nm}^{-1}$. Natomiast jednostką **spektralnego natężenia napromieniania kwantowego** (*spectral quantum irradiance*) jest $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{nm}^{-1}$. Wartości spektralnych pomiarów wykonanych w jednostkach mocy promienistej, można przeliczyć na spektralne wartości wyrażone w jednostkach kwantowych a nawet na spektralne wartości fotometryczne, przy uwzględnieniu współczynnika dla określonej długości fali napromieniania (Tabela 1).

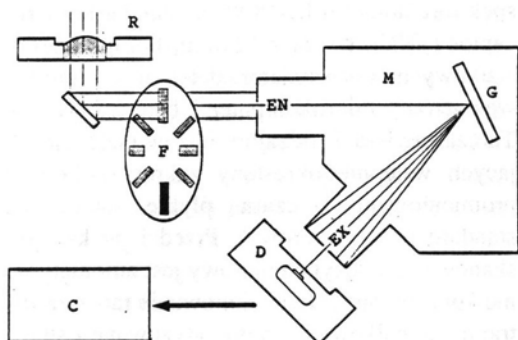
Spektralne natężenie napromieniania słonecznego docierające do ekosystemów roślinnych jest rejestrowane za pomocą spektrometrii. Przenośny **spektromierz LI-1800** firmy *LI-COR (USA)*, zasilany za pomocą baterii i kontrolowany przez mikroprocesor, pozwala na szybkie określenie danych spektrometrycznych, radiometrycznych i fotometrycznych [26, 27]. Podstawowymi częściami składowymi

spektrometrii LI-1800 są: standardowy receptor (180°), tarcza z filtrami, holograficzny siatkowy monochromator, detektor krzemowy, wewnętrzny mikrokomputer i bateria (ryc. 1). Tarcza zawiera 7 rodzajów filtrów (selekcjonujących wstępnie określony zakres spektralny promieniowania) i czarną płytkę, stanowiącą standard (odczyt zerowy). Przed i po każdym skanowaniu odczyt ciemniowy jest automatycznie kontrolowany. Funkcjonowanie tarczy z filtrami jest całkowicie zautomatyzowane i sterowane przez wewnętrzny mikrokomputer. Dyspersja (rozszerzenie) wielobarwnego promieniowania na jego wąskie zakresy spektralne następuje w siatce dyfrakcyjnej monochromatora. Podczas skanowania ($30 \text{ nm}\cdot\text{s}^{-1}$) zmienia się precyzyjnie kąt nachylenia siatki poprzez jej rotację, wywołaną napędem motoru pod kontrolą wewnętrznego mikrokomputera. Rezultatem tej dyfrakcji jest projekcja różnych długości fali pod małymi różnymi kątami w kierunku szczeliny wyjściowej. Detektorem jest fotodioda krzemowa umieszczona na wyjściu wyselekcjonowanych długości fali promieniowania ze szczeliny monochromatora. Wewnętrzny mikrokomputer kontroluje skanowanie, zbieranie, redukcję i przechowywanie danych. Ogólna

Tabela 1. Współczynniki zamiany pomiędzy spektralnymi jednostkami radiometrycznymi, fotometrycznymi i kwantowymi – wg LI-COR, [24].

Table 1. Conversion coefficients among spectral radiometric, photometric and quantum units – according to LI-COR, [24].

Długość fali	Strumień spektralny lampy halogenowej 3200 K ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{nm}^{-1}$)	Współczynniki fotometryczne (lm/W)	Współczynniki kwantowe $\lambda/119.7$ ($\mu\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}/\text{W}$)
Wavelength (nm)	Spectral flux of halogen lamp 3200 K ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{nm}^{-1}$)	Photometric coefficients (lm/W)	Quantum coefficients $\lambda/119.7$ ($\mu\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}/\text{W}$)
400	0.0274	0.3	3.34
450	0.0546	26.0	3.76
500	0.0894	220.6	4.18
550	0.128	679.6	4.59
600	0.165	431.0	5.01
650	0.197	73.1	5.43
700	0.226	2.8	5.85



Ryc. 1. Schemat działania spektrometri LI-1800 (LI-COR, USA). R – receptor kosinusowy, F – tarcza z filtrami, M – holograficzno-siatkowy monochromator, G – siatka dyfrakcyjna, D – detektor krzemowy, C – wewnętrzny mikrokomputer, EN – szczelina wejściowa, EX – szczelina wyjściowa. Reprodukowano za pozwoleniem LI-COR, [26].

Fig. 1. LI-1800 spectroradiometer operational diagram (LI-COR, USA). R – cosine receptor, F – filter wheel, M – holographic grating monochromator, G – diffraction grating, D – silicon detector, C – internal microcomputer, EN – entrance slit, EX – exit slit. Reproduced with permission LI-COR [26].

wewnętrzna pamięć RAM 256 KB znajduje się w 8 bankach 32 KB, co pozwala na automatyczne wykonanie 200 skanowań w zakresie długości fali od 300–1100 nm (1 skanowanie = zebranie 400 danych spektralnych, w przedziale co 2 nm, w ogólnym czasie 27 sekund). Skanowanie może być prowadzone w przedziałach długości fali 1, 2, 5 lub 10 nm. Komunikację ze spektrometrem zapewnia przenośny terminal lub podręczny komputer (laptop). Zbiory z danymi spektrometrycznymi z wewnętrznego mikrokomputera spektrometri mogą być przetransmitowane (przez RS-232) do komputera osobistego (IBM), w celu dalszej analizy lub archiwizacji. Opracowanie graficzne oraz integracja danych w jednostkach energetycznych, kwantowych i fotometrycznych, odbywa się za pomocą odpowiedniego programu komputerowego (PC-1800, ver. 3,01, LI-COR, USA).

Spektrometr wymaga okresowego cechowania przy pomocy kalibratora promieniowania optycznego LI-1800-02 (LI-COR, USA), posiadającego standardową, 200 W lampę kwar-

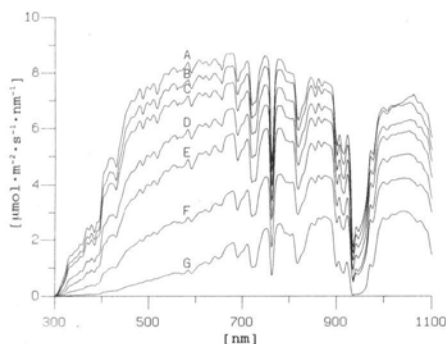
cową, wolframowo-halogenową o dokładnie znanej charakterystyce spektralnego natężenia napromieniowania [26].

Przy wyposażeniu spektrometri w zewnętrzny integrującą sferę (LI-1800-12S, LI-COR, USA) i kwarcowy światłowód optyczny, można określić właściwości spektralne (refleksję – R i transmisję – T) liści różnych gatunków roślin. Spektralną absorpcję (A) oblicza się ze wzoru: $A = 1 - R - T$, [26].

Przy pomiarach spektralnej transmisji napromieniowania w ekosystemach roślinnych, określa się również wskaźnik pokrycia liściowego (Leaf Area Index, LAI), za pomocą analizatora uprawy roślin LAI-2000 (wyposażonego w czujnik optyczny zw. „rybim okiem” – LAI-2050), (LI-COR, USA).

SPEKTRALNE NATĘŻENIE NAPROMIENIOWANIA SŁONECZNEGO W WARUNKACH FITOKLIMATU POŁA UPRAWNEGO

Skład spektralny napromieniowania słonecznego padającego na ekosystemy roślinne zmienia się zależnie od czynników meteorologicznych, ale przede wszystkim zależy od proporcji pomiędzy bezpośrednim promieniowaniem słonecznym a rozproszonym promieniowaniem pochodzącym z błękitnego nieba lub z szaro-białych chmur o różnej gęstości [42]. Spektralne natężenie napromieniowania (300–1100 nm) w letni dzień słoneczny (idealnie czyste, błękitne niebo) mierzone prostopadłe do strumienia energii w godzinach południowych na terenie otwartym pól uprawnych w okolicach Krakowa, osiąga maksymalną wartość $8,7 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{nm}^{-1}$ przy długości fali 678 nm (ryc. 2A) lub $1,85 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{nm}^{-1}$ przy 480 nm (ryc. 3A). Zintegrowane za pomocą programu komputerowego natężenie napromieniowania kwantowego w zakresie długości fali od 300–1100 nm osiąga w tym czasie $5022 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, z czego na promieniowanie fotosyntetycznie czynne (400–700 nm, PAR) przypada $2236 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ (ryc. 2A). Natężenie napromienio-



Ryc. 2. Spektralne natężenie napromieniowania kwantowego w letni dzień słoneczny (idealnie czyste, błękitne niebo) mierzone prostopadłe do strumienia promieniowania słonecznego (godz. 12 i 15–18) wyrażone w jednostkach gęstości strumienia kwantów.

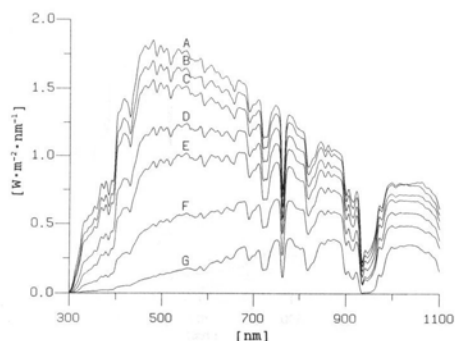
Fig. 2. Spectral quantum irradiance on a sunny summer day (ideally clear, blue sky) measured normally to the solar radiant flux (12 h and 15–18 hrs) expressed in quantum flux density units.

wania energii słonecznej wynosi $902 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ (w tym PAR – $488 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$), (ryc. 3A).

Spektralne natężenie napromieniowania słonecznego (300–1100 nm) mierzone w płaszczyźnie horyzontalnej osiąga maksymalną wartość $7 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{nm}^{-1}$ ($1,6 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{nm}^{-1}$) a natężenie napromieniowania kwantowego wynosi $3996 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ (w tym PAR – $1837 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$) lub $730 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ (w tym PAR – $403 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$) (ryc. 4A).

Spektralne natężenie napromieniowania rozproszonego, pochodzące z idealnie czystego, błękitnego nieba mierzone w płaszczyźnie horyzontalnej, w letni dzień słoneczny osiąga maksymalną wartość około $1,1 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{nm}^{-1}$ przy długości fali 450 nm ($0,3 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{nm}^{-1}$ przy 404 nm), a natężenie napromieniowania osiąga $432 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ($93 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$), (ryc. 4B, 5A). Powyżej długości fali 460 nm zmniejsza się natężenie napromieniowania nieba, w przeciwieństwie do zwiększającego się z długością fali natężenia napromieniowania zachodzącego słońca (ryc. 5B).

Niebieski kolor nieba jest wynikiem większego rozproszenia krótkich długości fal pro-



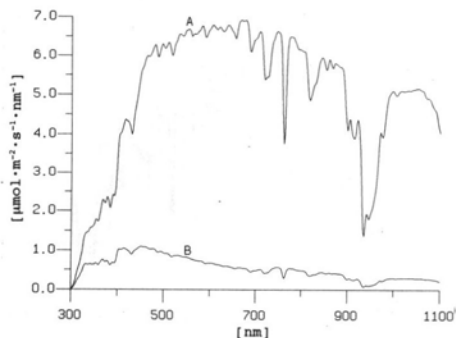
Ryc. 3. Spektralne natężenie napromieniowania w letni dzień słoneczny (idealnie czyste, błękitne niebo) mierzone prostopadłe do strumienia promieniowania słonecznego (godz. 12 i 15–18) wyrażone w jednostkach mocy promieniowej (gęstości strumienia energii).

Fig. 3. Spectral irradiance on a sunny summer day (ideally clear, blue sky) measured normally to the solar radiant flux (12 h and 15–18 hrs) expressed in radiant power (energy flux density) units.

mieniowania słonecznego. Czerwony kolor zachodzącego słońca i otaczającego nieba jest spowodowany usunięciem poprzez rozproszenie większej ilości promieni niebieskich niż czerwonych z bezpośredniego strumienia promieniowania słonecznego [24].

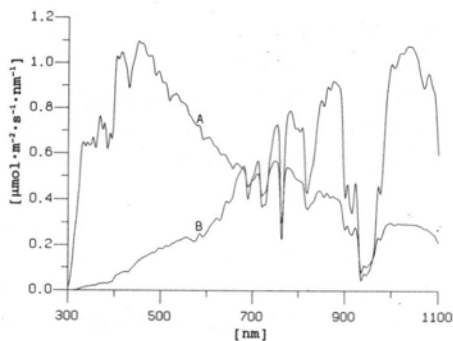
Spektralne natężenie napromieniowania błękitnego nieba mierzone prostopadłe do zacienionej tarczy słonecznej (bezpośrednie promieniowanie nie padało na receptor) charakteryzuje się niższą wartością natężenia napromieniowania w ultrafioletcie i fiolecie (300–400 nm) a wyższą w zakresie widzialnym i w bliskiej podczerwieni (ryc. 6).

Podczas letniego dnia deszczowego (godziny południowe, równomierne zachmurzenie, ciemne chmury) spektralne natężenie napromieniowania osiąga maksymalną wartość tylko $0,1 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{nm}^{-1}$ przy 752 nm ($0,016 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{nm}^{-1}$ przy 572), a natężenie napromieniowania wynosi $35 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ($6 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$), (ryc. 7). Świadczy to o bardzo silnym spadku natężenia napromieniowania w dniu deszczowym w stosunku do dnia słonecznego. Zachmurzenie posiada bardzo silny wpływ na globalny strumień fotonów docierają-



Ryc. 4. Spektralne natężenie napromieniowania kwantowego w letni dzień słoneczny mierzone w płaszczyźnie horyzontalnej (godz. 12). A – bezpośrednie napromieniowanie słoneczne + rozproszone napromieniowanie nieba, B – rozproszone napromieniowanie błękitnego nieba.

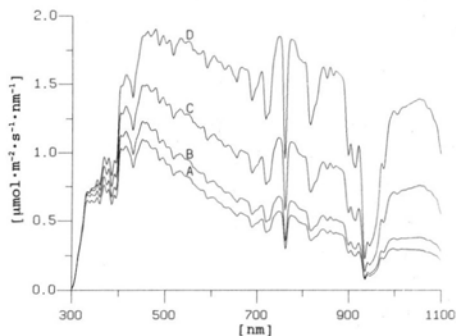
Fig. 4. Spectral quantum irradiance on a sunny summer day, measured on a horizontal surface (12 h). A – direct solar irradiation + scattered blue sky irradiation, B – scattered blue sky irradiation.



Ryc. 5. Spektralne natężenie napromieniowania kwantowego idealnie czystego, błękitnego nieba (A) oraz zachodzącego słońca (B).

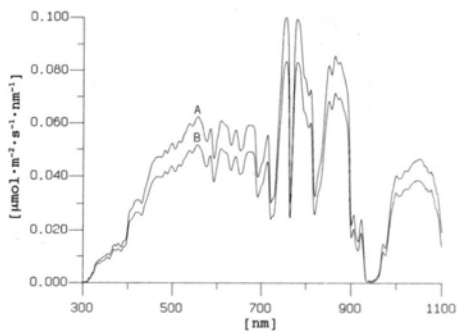
Fig. 5. Spectral quantum irradiance of an ideally clear, blue sky (A) and of the setting sun (B).

cych do ekosystemów, gdyż działa ono jak filtr absorpcyjny, ale stosunkowo małe zmiany zachodzą w składzie spektralnym w bliskiej podczerwieni [30]. Promieniowanie świetlne rozproszone przez chmury jest białe lub szare. Przy całkowitym zachmurzeniu nieba (chmury deszczowe) natężenie napromieniowania docierającego do ekosystemów roślinnych może ulec



Ryc. 6. Spektralne natężenie napromieniowania kwantowego błękitnego nieba w letni dzień słoneczny (godz. 12–16) mierzone prostopadłe do zaciętej tarczy słonecznej (bezpośredni strumień promienisty nie padał na receptor).

Fig. 6. Spectral quantum irradiance of the blue sky on a sunny summer day (12–16 hrs) measured normally to the shadowed solar disc (direct radiant flux was not incident upon the receptor).

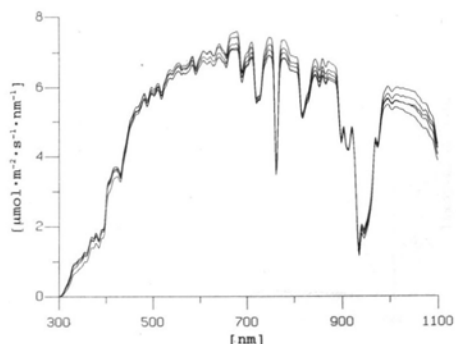


Ryc. 7. Spektralne natężenie napromieniowania kwantowego w letni deszczowy dzień (godziny południowe, równomierne zachmurzenie).

Fig. 7. Spectral quantum irradiance on a rainy day in summer (midday hours, uniform cloud cover).

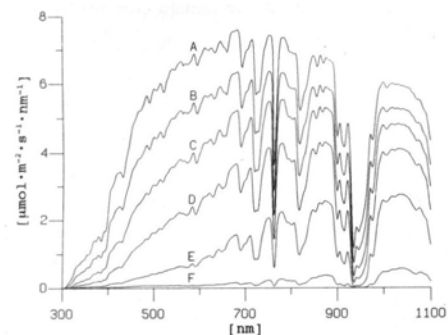
redukcji ponad 90%, co znacznie obniża produkcję fotosyntetyczną roślin [10, 12].

Interesującym faktem radiometrycznym jest stwierdzenie, że przy pomiarze prostopadłym do strumienia energii promienistej w dniu słonecznym (idealnie czyste, błękitne niebo) zarówno charakterystyka spektralna jak i natężenia napromieniowania w godzinach południowych



Ryc. 8. Spektralne natężenie napromieniowania kwantowego w jesienny dzień słoneczny (godz. 11–15).

Fig. 8. Spectral quantum irradiance on a sunny day in autumn (11–15 hrs).

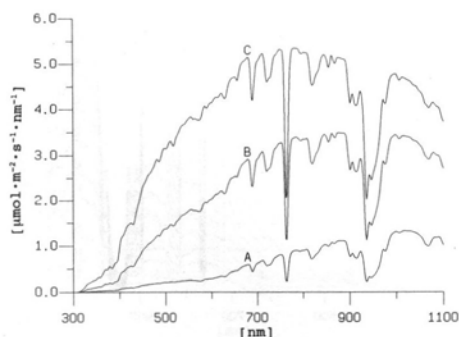


Ryc. 9. Spektralne natężenie napromieniowania kwantowego w jesienny dzień słoneczny (godz. 15–18.25).

Fig. 9. Spectral quantum irradiance on a sunny day in autumn (15–18.25 hrs).

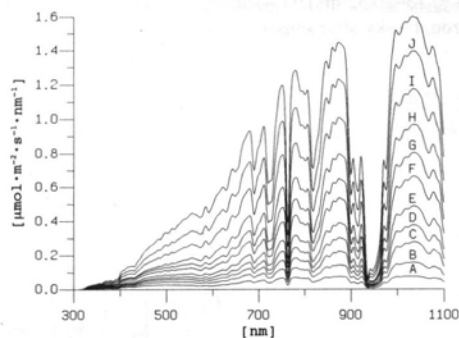
(11–15) wykazują prawie takie same wartości (ryc. 8). Dopiero po godzinie 15 obserwuje się wyraźny spadek natężenia napromieniowania i sukcesywnie zmniejszanie się w spektrum głównie promieniowania niebieskiego (ryc. 9).

W okresie jesieni zaczynają się ujawniać zmiany w składzie spektralnym napromieniowania. W dniu słonecznym następuje spadek natężenia napromieniowania w zakresie od 300–500 nm przy relatywnej wyższe jego wartości powyżej 600 nm. W dniu słonecznym w okresie zimy względny skład spektralny napromieniowania wykazuje jeszcze niższe wartości przy długości



Ryc. 10. Spektralne natężenie napromieniowania kwantowego w zimowy dzień słoneczny (godz. 8–10).

Fig. 10. Spectral quantum irradiance on a sunny day in winter (8–10 hrs).

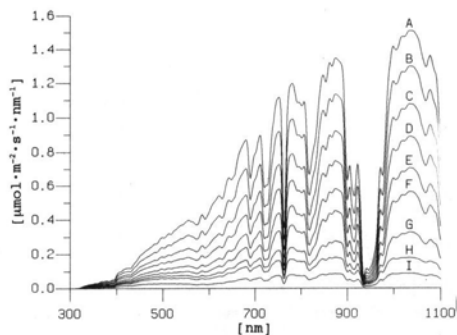


Ryc. 11. Spektralne natężenie napromieniowania kwantowego „czerwono-żółtego” wschodzącego słońca (od godz. 4.35–5.20). A – niebo przed wschodem, B – wschód, C – widoczna cała tarcza słoneczna.

Fig. 11. Spectral quantum irradiance of „red-yellow” rising sun (4.35–5.20 hrs). A – sky before sunrise, B – sunrise, C – whole solar disc visible.

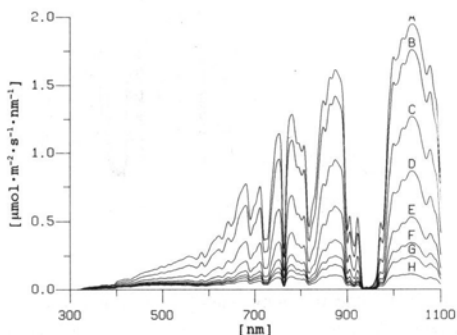
fali poniżej 600 nm i znacznie wyższe powyżej 600 nm w stosunku do dnia słonecznego w okresie letnim (ryc. 10). Jest to spowodowane zmianą kąta padania promieni słonecznych i mniejszym niż w lecie rozproszeniem w atmosferze fal krótszych (w zakresie niebieskim).

Zmiany w składzie spektralnym napromieniowania w ciągu dnia są małe w porównaniu z tymi, jakie zachodzą przy kącie padania promieni poniżej 10° , to jest w czasie wschodu i zacho-



Ryc. 12. Spektralne natężenie napromieniowania kwantowego „czerwono-żółtego” zachodzącego słońca (od godz. 20.15–20.55). G – zachód, H – tarcza słoneczna za horyzontem, I – niebo po zachodzie.

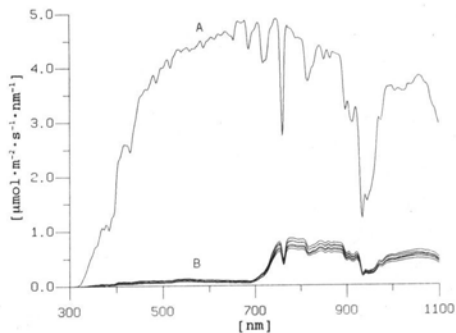
Fig. 12. Spectral quantum irradiance of „red-yellow” setting sun (20.15–20.55 hrs). G – sunset, H – solar disc behind the horizon, I – sky after sunset.



Ryc. 13. Spektralne natężenie napromieniowania kwantowego „czerwonego” zachodzącego słońca (od godz. 20.20–20.44). F – zachód, G – tarcza słoneczna za horyzontem (czerwone niebo).

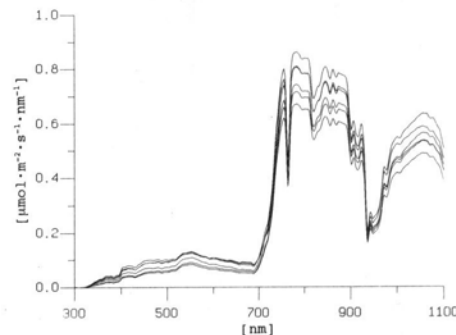
Fig. 13. Spectral quantum irradiance of „red” setting sun (20.20–20.44 hrs). F – sunset, G – solar disc below the horizon (red sky).

du słońca. Pomiary spektralnego natężenia napromieniowania „czerwono-żółtego” wschodzącego i zachodzącego słońca w okresie lata nie wykazały istotnych różnic optycznych między nimi, gdyż warunki atmosferyczne były prawie takie same, a zachód od wschodu słońca dzieliła jedynie pogodna noc (ryc. 11 i 12). Natomiast istotna różnica w składzie spektralnym



Ryc. 14. Spektralne natężenie napromieniowania kwantowego w dzień słoneczny ponad (A) i pod (B) uprawą pomidorów szklarniowych przy wskaźnikach pokrycia liściowego (LAI) od 3.02–3.54.

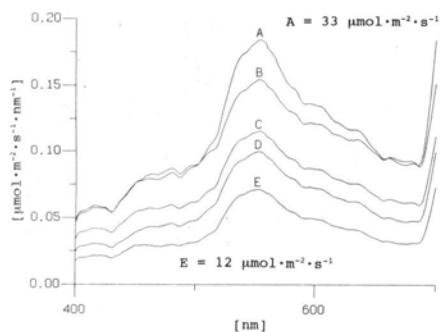
Fig. 14. Spectral quantum irradiance on a sunny day above (A) and below (B) greenhouse tomato crop plants with the LAI = 3.02–3.54.



Ryc. 15. Spektralna transmisja napromieniowania kwantowego przez uprawę pomidorów szklarniowych przy wskaźnikach pokrycia liściowego (LAI) od 3.02 do 3.54 (szczegółowy wykres danych z Ryc. 14B).

Fig. 15. Spectral transmittance of quantum irradiation by greenhouse tomato plants with the leaf area index LAI = 3.02–3.54 (a detailed graph of data from Fig. 14B).

występuje przy pomiarze spektralnego natężenia napromieniowania „czerwonego” zachodzącego słońca (ryc. 13). W charakterystyce spektralnej czerwonej tarczy słonecznej jest znacznie mniej rozproszonego promieniowania w zakresie niebieskim a więcej czerwieni i bliskiej podczerwieni w porównaniu z tarczą czerwono-żółtą. Promieniowanie długofalowe przechodzi przez



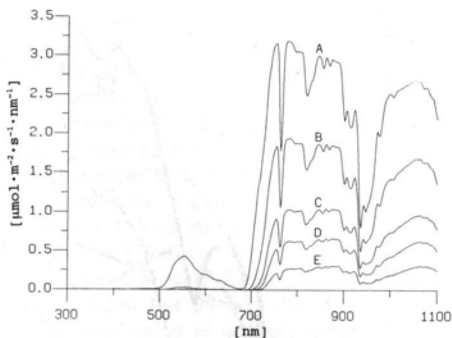
Ryc. 16. Spadek natężenia transmisji napromieniowania kwantowego w zakresie PAR ze wzrostem wskaźnika pokrycia liściowego (LAI) od 2,89 do 4,03 w uprawie pomidorów szklarniowych.

Fig. 16. A decrease of transmittance of quantum irradiation in PAR range with the increasing of leaf area index (LAI) from 2.89 to 4.03 in greenhouse tomato plants.

warstwę atmosfery nierozproszone i zachodząca czerwona tarcza słoneczna jest dobrze widoczna, natomiast promieniowanie krótkofalowe (niebieskie) ulega rozproszeniu w atmosferze, poprzez odchylenie (dewiację) od jego oryginalnego kierunku padania [35].

Transmisja napromieniowania słonecznego poprzez uprawę w ekosystemie roślinnym zależy od wielkości wskaźnika pokrycia liściowego i jest najniższa w zakresie PAR (ryc. 14B, 15). Zintegrowane za pomocą programu komputerowego natężenie PAR w uprawie pomidorów wynosi od $33 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ($7,1 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$) przy LAI = 2,89 (ryc. 16A) do $12 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ($2,6 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$) przy LAI = 4,03 (ryc. 16E). PAR ponad uprawą roślin wynosiło w tym czasie $1289 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ($281 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$), (ryc. 14A), można zatem obliczyć, że transmisja PAR przez uprawę pomidorów mieści się w granicach od około 1–3%, w stosunku do wartości PAR ponad uprawą. Ponieważ refleksja górnej powierzchni blaszki liściowej rośliny pomidora wynosi około 8% PAR, zatem absorpcja uprawy pomidorów osiąga od 89–91% PAR [13].

Pomiary spektralnej transmisji napromieniowania przez warstwę kolejno nakładanych na siebie listków (1–5) złożonego liścia rośliny po-



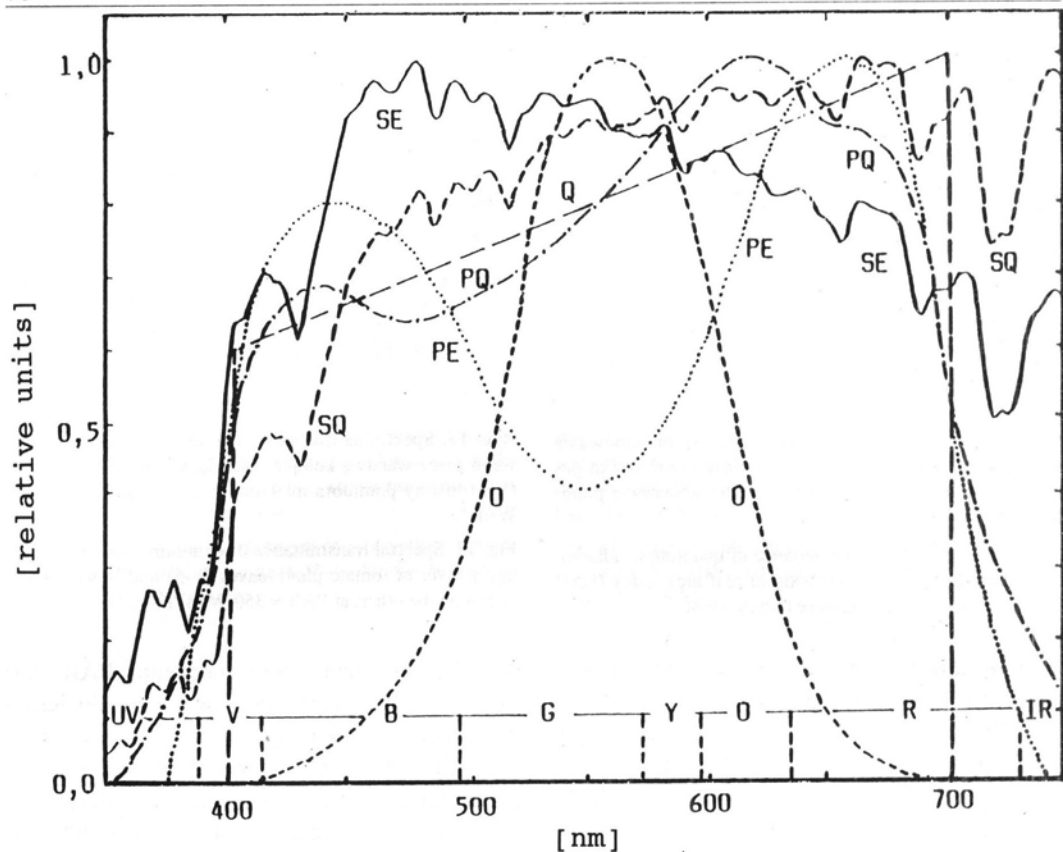
Ryc. 17. Spektralna transmisja napromieniowania kwantowego przez warstwę kolejno nakładanych na siebie listków (1–5) rośliny pomidora mierzona przy natężeniu PAR $350 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$.

Fig. 17. Spectral transmittance of quantum irradiation through a layer of tomato plant leaves (1–5) laid in succession one upon the other, at PAR = $350 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$.

midora, wykonane przy natężeniu PAR $350 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ (boczne napromieniowanie nie docierało do receptora) wykazały, że już jeden listek praktycznie absorbuje całkowicie napromieniowanie w zakresie PAR, a pozostałe z malejącą intensywnością, przepuszczają powyżej 700 nm (ryc. 17). Świadczy to o dobrej transmisji strumienia promieniowania w bliskiej podczerwieni przez liście pomidorów, co chroni je przy silnej insolacji od przegrzania [13].

Absorpcja fotosyntetycznie czynnego napromieniowania przez zielone liście roślin jest wysoka i zazwyczaj mieści się w granicach od 70–90% padającej na liście energii PAR. Pozostałe 10–30% przypada na refleksję i transmisję w zakresie PAR [13].

Na ryc. 18 przedstawiono względną charakterystykę spektralnego natężenia napromieniowania słonecznego docierającego do ekosystemów roślinnych w letni dzień słoneczny. Wartości te są wyrażone w preferowanych w fizjologii roślin jednostkach gęstości strumienia kwantów [10, 12] i w jednostkach mocy promienistej (gęstości strumienia energii). Z porównania danych spektrometrycznych z danymi fitofizjologicznymi wynika, że spektralna wydajność fotosyntezy roślin uprawnych [28] i spektrum



Ryc. 18. Względna charakterystyka spektralna: natężenia napromieniowania słonecznego docierającego do ekosystemów roślinnych (letni dzień słoneczny, błękitne niebo, godz. 12) przedstawiona: SQ – w jednostkach gęstości strumienia kwantów – $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{nm}^{-1}$; SE – w jednostkach mocy promienistej (gęstości strumienia energii) – $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{nm}^{-1}$; PQ – wydajności kwantowej fotosyntezy (średnia z 22 gatunków roślin uprawnych), wg McCree [28], PE – działania fotosyntezy roślin wyższych (spektrum czynne, średnia z kilku gatunków roślin wyższych), wg Geutler i Krochmann [17], O – wrażliwości oka ludzkiego (spektralna wydajność świetlna normalnego obserwatora), [CIE, 6] Q – idealnej „odpowiedzi” kwantowej (wyrównana reakcja na wszystkie fotony w zakresie długości fali od 400–700 nm). UV – promieniowanie ultrafioletowe (niewidzialne), V – fioletowe, B – niebieskie, G – zielone, Y – żółte, O – pomarańczowe, R – czerwone, IR – podczerwone (niewidzialne).

Fig. 18. Relative spectral characteristics: solar irradiance incident upon plant ecosystems (sunny summer day, blue sky, 12 h), expressed in: SQ – quantum flux density units – $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{nm}^{-1}$; SE – radiant energy flux density units ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{nm}^{-1}$); PQ – spectral quantum yield of photosynthesis (average for 22 species of crop plant grown in the field) – according to McCree [28]; PE – photosynthetic action spectrum (average for some species of higher plants) – according to Geutler and Krochmann [17]; O – spectral sensitivity of the human eye (spectral luminous efficiency of the normal observer), [CIE, 6], Q – ideal quantum response (equal response to all photons in 400–700 nm waveband). UV – ultraviolet radiation (invisible), V – violet, b – blue, G – green, Y – yellow, O – orange, R – red, IR – infrared radiation (invisible).

działania fotosyntezy roślin wyższych [17] najlepiej korelują ze spektralnym natężeniem napromieniowania kwantowego. Charakterystyki te są zbliżone do idealnej „odpowiedzi” (reakcji) kwantowej dla zakresu promieniowania fotosyntetycznie czynnego.

Udział promieniowania fotosyntetycznie czynnego (400–700 nm, PAR) w całkowitym napromieniowaniu słonecznym (300–3000 nm) zmienia się w granicach od 38–68% zależnie od warunków meteorologicznych. Jednakże przyjmuje się, że energia PAR stanowi średnio 45%

całkowitego napromieniowania słonecznego [10]. Wartości PAR wysycające proces fotosyntezy liści roślin mieszczą się przeważnie w granicach od 460–690 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ (100–150 $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$), [10, 12]. Ponieważ szereg procesów fizjologicznych (w tym fotosynteza) przebiega w zakresie długości fali od 400–700 nm, właściwym pomiarem i głównym terminem dla badań ekofizjologicznych jest promieniowanie fotosyntetycznie czynne (PAR). Obejmuje ono zarówno określenie gęstości strumienia kwantów (fotosyntetyczne natężenie napromieniowania kwantowego) jak i określenie gęstości strumienia energii promienistej [10, 22, 23, 29, 41]. Natężenie procesów fotochemicznych, w tym również fotosyntezy, jest proporcjonalne do liczby zaabsorbowanych kwantów, a nie do zawartej w nich energii. Relacje pomiędzy spektralną absorpcją napromieniowania kwantowego przez zielone liście a zamianą energii w procesie fotosyntezy są przedstawione w wielu publikacjach [7, 9, 10, 28, 44]. Dlatego też dla badań ekofizjologicznych korzystniejsze jest przedstawianie spektralnego natężenia napromieniowania nie w jednostkach mocy promienistej (strumienia energii), lecz w jednostkach gęstości strumienia kwantów PAR.

LITERATURA

- [1] BARAŃSKI L. A., CHRZANOWSKA H. 1991. Determination of the global radiation and the photosynthetically active radiation using METEOSAT and NOAA satellite pictures. *Adv. Space Res.* **11**(3): 105–108.
- [2] BARAŃSKI L. A., CHRZANOWSKA H., KMIĘCIK P. 1991. Estimation of the photosynthetically active radiation from satellite information. W: J. GLIŃSKI, J. KOSSOWSKI, E. SIKORA (red.), *Climate of the cultivated field – agrophysical, agrometeorological and phytoactinometrical problems. Zeszyty Problemowe Postępów Nauk Rolniczych* **396**: 19–23.
- [3] BIRD R. E., HULSTROM R. L., LEWIS L. J. 1983. Terrestrial solar spectral data sets. *Solar Energy* **30**: 563–573.
- [4] BJÖRKMANN O. 1981. Responses to Different Quantum Flux Densities. W: O. L. LANGE, P. NOBEL, B. OSMOND, H. ZIEGLER (red.), *Physiological Plant Ecology. Encyclopedia of Plant Physiology (New Series)*, **12 A**: Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg-New York, 57–107.
- [5] BRASLAVSKY S. E. 1987. Selected terms and symbols in photochemistry. *J. Photochem. Photobiol., B: Biology*, **1**: 261–270.
- [6] COMMISSION INTERNATIONALE DE L'ECLAIRAGE 1987. *International Lighting Vocabulary*. 4th Editions. CIE Publication No.17.4, Bureau Central de la CIE, Vienna.
- [7] CZARNOWSKI M. 1975. Photosynthesis and solar energy conversion. In: K. PETRUSEWICZ (ed.), *Polish Participation in the International Biological Programme 1964–1973*. PAS Polish National Committee IBP, Warszawa, 175–181.
- [8] CZARNOWSKI M. 1977. Zastosowanie kwantowego radiofotometru LI-COR w badaniach ekofizjologicznych. Application of quantum radiophotometer LI-COR in ecophysiological researches. *Materiały IV Seminarium Fitoaktywności. Proceedings of the 4th Seminar on Phytoactinometry*, Puławy, 8–10.09.1977, 123–127.
- [9] CZARNOWSKI M. 1980. Fotosynteza a produktywność roślin warzywnych. Photosynthesis and productivity of vegetable plants. *Biul. Warzyw.* **24**: 15–83.
- [10] CZARNOWSKI M. 1983. Promieniowanie fotosyntetycznie czynne. Photosynthetically active radiation. *Wiad. Bot.* **27**: 271–288.
- [11] CZARNOWSKI M. 1984. Spektralna wydajność fotosyntezy roślin wyższych. Spectral efficiency of photosynthesis in higher plants. *Wiad. Bot.* **28**: 9–26.
- [12] CZARNOWSKI M. 1993. Spectral composition of solar irradiation incident upon plant ecosystems. W: J. GLIŃSKI, E. SIKORA (eds). *Climate of the cultivated field – agrophysical, agrometeorological and phytoactinometrical problems. Zeszyty Problemowe Postępów Nauk Rolniczych* 405 (in press).
- [13] CZARNOWSKI M. 1993. Solar spectral irradiation in greenhouse tomato crop plants. W: J. GLIŃSKI, E. SIKORA (eds). *Climate of the cultivated field – agrophysical, agrometeorological and phytoactinometrical problems. Zeszyty Problemowe Postępów Nauk Rolniczych* (in press).
- [14] CZARNOWSKI M., STARZECKI W. 1992. Spectral properties and photosynthesis of tomato fruits. *Photosynthetica* **27** (1), (in press).
- [15] DIFFEY B. L. (red.) 1989. *Radiation Measurement in Photobiology. Biological Techniques Series*. Academic Press. London, San Diego, New York, Berkeley, Boston, Sydney, Tokyo, Toronto, pp 230.
- [16] GATES D. M. 1966. Spectral distribution of solar radiation at the earth's surface. *Science* **151**: 523–529.
- [17] GEUTLER G., KROCHMANN J. 1978. Die Messung der für die Photosynthese wirksamen Bestrahlungstärke. *Gartenbauwissenschaft* **43**: 271–275.
- [18] GIBSON P., DIFFEY B. L. 1989. Techniques for Spectroradiometry and Broadband Radiometry. W: B. L. DIFFEY (red.) *Radiation Measurement in Photobiology. Biological Techniques Series*. Academic Press. London, San Diego, New York, Berkeley, Boston, Sydney, Tokyo, Toronto, 71–84.
- [19] GREEN A. E. S. CHAI S. T. 1988. Solar spectral irra-

- diance in the visible and infrared regions. *Photochem. Photobiol.* **48**: 477–486.
- [20] HENDERSON S. T. 1977. *Daylight and its Spectrum*. 2nd Edition. Adam Hilger, Bristol.
- [21] INCOLL L. D., LONG S. P., ASHMORE M. A. 1977. SI units in publications in plant science. *Curr. Adv. Plant Sci.* **9**: 331–343.
- [22] KUBIN Š. 1971. Measurement of Radiant Energy. W: Z. ŠESTAK, J. ČATSKY, P. G. JARVIS (red.), *Plant Photosynthetic Production. Manual of Methods*. Dr W. Junk N. V. Publishers, The Hague, 702–765.
- [23] KUBIN Š. 1973. *Zdroje fotosynteticky účinného záření a metody jeho měření*. Photosynthetically active radiation – the sources and the methods of measurement. Academia, Praha, pp. 235.
- [24] LI-COR. 1982. *Radiation Measurements and Instrumentation*. Lincoln, Nebraska, pp. 29.
- [25] LI-COR. 1986. *Radiation Measurement Instruments*. Lincoln, Nebraska, pp. 24.
- [26] LI-COR. 1989. Theory of Operation. W: *LI-1800 Portable Spectroradiometer. Instruction Manual*. Lincoln, Nebraska, 2.1–2.6.
- [27] LI-COR. 1990. *The LI-1800 Portable Spectroradiometer*. Lincoln, Nebraska, pp. 15.
- [28] MCCREE K. J. 1972. The action spectrum, absorbance and quantum yield of photosynthesis in crop plants. *Agric. Meteorol.* **9**: 191–216.
- [29] MCCREE K. J. 1981. Photosynthetically active radiation. W: O. L. LANGE, P. NOBEL., B. OSMOND, H. ZIEGLER (red.), *Physiological Plant Ecology. Encyclopedia of Plant Physiology (New Series)*, **12 A**, Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg-New York, 41–55.
- [30] MORGAN D. C. SMITH H. 1981. Non-photosynthetic Responses to Light Quality. W: O. L. LANGE, P. NOBEL., B. OSMOND, H. ZIEGLER (red.), *Physiological Plant Ecology. Encyclopedia of Plant Physiology (New Series)*, **12 A**, Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg-New York, 109–134.
- [31] PODOGROCKI J. 1989. On solar energy resources in Poland during the vegetation period. W: J. GLIŃSKI, E. SIKORA, J. KOSSOWSKI (red.), Climate of the cultivated field. Part II. Agrometeorology and phytoactinometry. *Zeszyty Problemowe Postępów Nauk Rolniczych* **369**: 245–249.
- [32] ROBINSON N. 1966. *Solar radiation*. Elsevier Publ. Company, Amsterdam, London, New York, pp. 347.
- [33] SALISBURY F. B. 1981. Responses to Photoperiod. W: O. L. LANGE, P. NOBEL., B. OSMOND, H. ZIEGLER (red.), *Physiological Plant Ecology. Encyclopedia of Plant Physiology (New Series)*, **12 A**, Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg-New York, 133–167.
- [34] SALISBURY F. B. 1991. Systeme Internationale: The Use of SI Units in Plant Physiology. *J. Plant Physiol.* **139**: 1–7.
- [35] SEYFRIED M. 1989. Optical Radiation Interactions with Living Tissue. W: B. L. Diffey (red.), *Radiation Measurement in Photobiology. Biological Techniques Series*. Academic Press. London, San Diego, New York, Berkeley, Boston, Sydney, Tokyo, Toronto, 191–223.
- [36] SHIBLES R. 1976. Committee Report. Terminology pertaining to photosynthesis. *Crop. Sci.* **16**: 437–439.
- [37] SŁOMKA J. 1989. Photosynthetically active insolation in vegetation periods in Poland. W: J. GLIŃSKI, E. SIKORA, J. KOSSOWSKI (red.), Climate of the cultivated field. Part II. Agrometeorology and phytoactinometry. *Zeszyty Problemowe Postępów Nauk Rolniczych* **369**: 251–253.
- [38] SŁOMKA J. 1991. Evaluation of photosynthetically active insolation (influx of the PAR photons) in the area of Poland. W: J. GLIŃSKI, J. KOSSOWSKI, E. SIKORA (red.), Climate of the cultivated field – agrophysical, agrometeorological and phytoactinometrical problems. *Zeszyty Problemowe Postępów Nauk Rolniczych* **396**: 159–162.
- [39] SMITH H. (red.) 1981. *Plants and the Daylight Spectrum*. London, Academic Press, pp. 508..
- [40] STARZECKI W., LIBIK A., WOJASZEK T., MICULOV N. 1989. Relation between the Basic Factors of the Photosynthetic Process in Greenhouse. *Bull. Pol. Acad. Sci., Biol. Sci.* **37 (7–8)**: 207–216.
- [41] SZEICZ G. 1974. *Solar radiation for plant growth*. *J. App. Ecol.* **11**: 617–636.
- [42] TARRANT A. W.S. 1989. Basic Principles of Light Measurement. W: B. L. Diffey (red.), *Radiation Measurement in Photobiology. Biological Techniques Series*. Academic Press. London, San Diego, New York, Berkeley, Boston, Sydney, Tokyo, Toronto, 1–21.
- [43] THIMMIAN R. W., HEINS R. D. 1983. Photometric, radiometric and quantum light units of measure: A review of procedures for interconversion. *Hort. Science* **18**: 818–822.
- [44] TICHÁ I., ČATSKY J., HODÁVOVA D., POSPIŠILOVA J., KAŠE, ŠESTAK Z. 1985. Gas exchange and dry matter accumulation during leaf development. W: Z. Šestak (red.), *Photosynthesis during Leaf Development*. Academia, Praha, 157–216.
- [45] WALCZAK T., MACZEK W., CZARNOWSKI M. 1989. Quantum radiometer for the measurement of photosynthetically active radiation. W: J. GLIŃSKI, E. SIKORA, J. KOSSOWSKI (red.), Climate of the cultivated field. Part II. Agrometeorology and phytoactinometry. *Zeszyty Problemowe Postępów Nauk Rolniczych* **369**: 263–265.
- [46] WÓJCİK G., MARCINIĄK K., ZIEMBIŃSKA H. 1991. Transparency of atmosphere and intensity of direct solar radiation and its spectral composition in the summer of 1983 in Toruń. W: J. Gliński, J. Kossowski, E. Sikora (red.), Climate of the cultivated field – agrophysical, agrometeorological and phytoactinometrical problems. *Zeszyty Problemowe Postępów Nauk Rolniczych* **396**: 187–193.