

PIOTR STREBEYKO

WYMAGANIA ŚWIETLNE ROŚLINY

Światło jako forma materii posiada energię. Energia świetlna ma ogromne znaczenie biologiczne, gdyż od niej zależy proces fotosyntezy, dostarczający około 100 miliardów ton związków organicznych rocznie.

Tylko niektóre bakterie utleniające wodór, amoniak lub sole żelazawe i czerpiące z tych procesów znaczne ilości energii, są zdolne do wiązania dwutlenku węgla i wytwarzania związków organicznych. Proces ten wymaga dużego wkładu energii i tylko nieliczne organizmy, jak wyżej wymienione bakterie, mogą potrzebną energię zdobyć w wyniku utleniania pewnych związków nieorganicznych.

Natomiast rośliny zielone asymilują dwutlenek węgla i wytwarzają potrzebne im związki organiczne, wykorzystując energię świetlną słońca. J. Priestley (1772) pierwszy zauważył tę niezwykłą zdolność u roślin, ale jeszcze nie wiązał jej ze światłem. Dopiero w kilka lat później J. Ingen-Housz (1779) wyjaśnił, że niezbędnym warunkiem asymilacji dwutlenku węgla jest światło. Proces ten nazywamy fotosyntezą. W ciemności rośliny zielone nie wytwarzają związków organicznych, lecz podobnie jak zwierzęta powoli je rozkładają w procesie oddychania, wydzielając CO_2 .

Foton

Gdy M. Planck (1900) nie mógł inaczej zinterpretować wyników swoich badań nad promieniowaniem elektromagnetycznym, przyjął założenie, że emisja nie jest ciągła, lecz odbywa się małymi porcjami energii, które Planck nazwał kwantami. Dziś powszechnie używamy terminu „foton”. Energię fotonu wyraża proste równanie Plancka:

$$e = h \cdot \nu \quad (1)$$

gdzie h jest stałą Plancka ($6,6256 \cdot 10^{-27}$ erg·s z dokładnością $\pm 0,0005 \cdot 10^{-27}$ erg·s), a ν oznacza częstość fali.

W pięć lat później Albert Einstein (1905) wysunął hipotezę, że światło jest nie tylko emitowane i pochłaniane w postaci określonych kwantów energii, lecz że w ten sposób jest ono przenoszone w przestrzeni. Prędkość światła wynosi $299792,5$ km/s i jest wyznaczona z dokładnością $\pm 0,3$ km/s.

Jak wynika z równania Plancka, energia fotonu jest tym większa, im większa jest częstość fali (ν), czyli — im krótsza jest fala elektromagnetyczna, a z częstością i długością fali wiąże się barwa światła. Wzrok nasz jest wrażliwy na stosunkowo wąski zakres fal elektromagnetycznych od 380 do 760 nm, które widzimy w postaci różnych barw od fioletowej do ciemnoczerwonej (tab. 1).

Tabela 1

*Związek barwy światła z długością
fali elektromagnetycznej *)*

Długość fali w μm	Barwa światła
0,40—0,45	fioletowa
0,45—0,50	niebieska
0,50—0,55	zielona
0,55—0,59	żółta
0,59—0,64	pomarańczowa
0,64—0,75	czerwona

*) Ponieważ nie każde oko dostrzega cały zakres światła uważanego za widzialne (0,38—0,76 μm), więc podajemy nieco węższą skalę długości fali i barw od 0,40 do 0,75 μm .

Z długości fali wynika, że foton światła fioletowego ma prawie dwukrotnie większą energię, niż foton światła czerwonego.

Tabela 2

*Energia mola fotonów przy różnej długości
fali świetlnej*

Długość fali w μm	Energia mola fotonów	
	w kJ	w kcal
0,4	300	71,6
0,45	266	63,5
0,50	240	57,3
0,55	218	52,1
0,60	200	47,8
0,65	184	44,0
0,70	171	40,8
0,75	160	38,2

Jeden foton reprezentuje bardzo małą ilość energii (rzędu 10^{-19} J) podobnie jak małe są rozmiary i masa atomu. Jednostką powszechnie używaną w chemii jest mol. W jednym molu znajduje się $6,02252 \cdot 10^{23}$ cząsteczek. Analogicznie możemy mówić o molu fotonów; wówczas okaże się, że mol fotonów, nazywany eisteinem, reprezentuje znaczne ilości energii (tab. 2), odpowiadające energii wielu reakcji chemicznych. Procesy chemiczne, odbywające się pod wpływem światła i czerpiące energię ze światła, nazywamy reakcjami fotochemicznymi. Do nich należy również proces fotosyntezy, który stanowi podstawę życia na Ziemi.

Promieniowanie ciał rozgrzanych

Ciało o wysokiej temperaturze traci ciepło nie tylko w wyniku jego przewodzenia, ale również przez promieniowanie elektromagnetyczne. W myśl równania J. Stefana i L. E. Boltzmannna promieniowanie to wzrasta proporcjonalnie do czwartej potęgi temperatury w skali bezwzględnej (T):

$$\text{energia promieniowania } S = \sigma \cdot T^4 \quad (2)$$

Wartość współczynnika wyznaczono eksperymentalnie; wynosi ona $5,67 \cdot 10^{-12} \text{ J} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$ lub tyleż watów z 1 cm^2 .

Z równania tego wynika, że 1 cm^2 naszej skóry o temperaturze około 310 K promieniuje z mocą 0,05 W; wrząca woda — z mocą 0,11 W na 1 cm^2 . Włókno żarówki o temperaturze 2400 K daje 190 W, a zewnętrzna warstwa słońca zwana chromosferą, której temperatura barwna wynosi około 5800 K, emituje 6 kW z 1 cm^2 .

Od temperatury zależy nie tylko moc promieniowania, ale również długość emitowanych fal elektromagnetycznych: im wyższa temperatura, tym krótsze będą emitowane fale, zgodnie z prawem przesunięcia Wiena:

$$T \cdot \lambda_{\max} = 0,29 \text{ cm} \cdot \text{K} \quad (3)$$

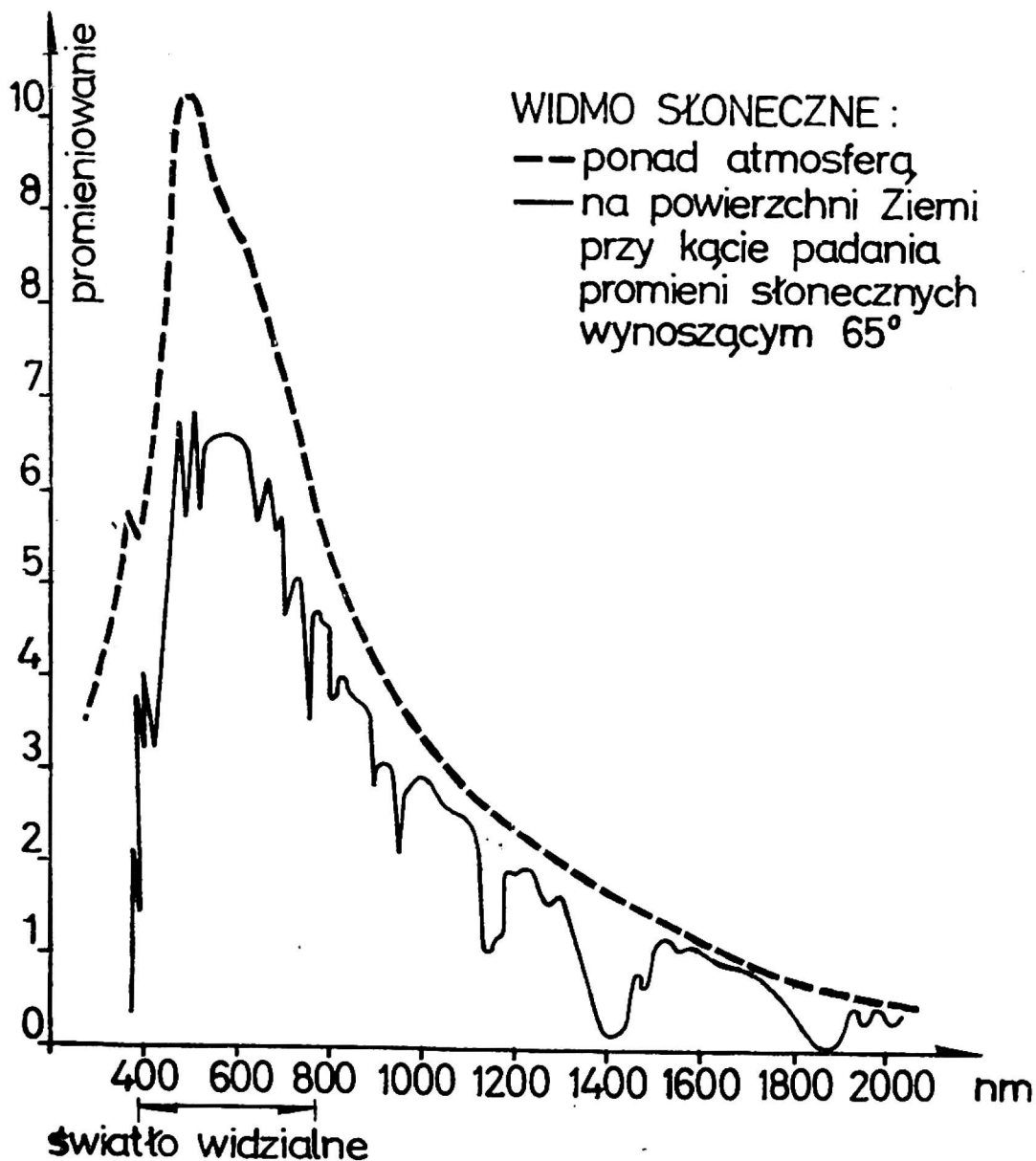
gdzie λ_{\max} oznacza długość fali dominującej w widmie emisyjnym. Dokładniejszą charakterystykę widma emisyjnego daje równanie Plancka:

$$E = \frac{36970}{\lambda^5} \left[\frac{14320}{e^{\lambda \cdot T - 1}} \right] d\lambda \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \mu\text{m}^{-1} \quad (4)$$

w równaniu tym $d\lambda$ oznacza dowolnie małe przedziały długości fali w μm , dla których obliczamy moc promieniowania (E); sumując te drobne ilości energii emitowane w sekundę, znajdujemy moc promieniowania całego widma, a im mniejsze będą wartości $d\lambda$, tym bardziej dokładne będzie nasze obliczenie.

Promieniowanie słońca

Prawo Wiena i równanie Plancka odnoszą się do ciał doskonale czarnych. Ciała nie mające tej cechy emitują energię słabiej, ale ich promieniowanie może być porównywane z promieniowaniem ciała czarnego o znanej temperaturze. Słońce emituje takie światło, jak ciało czarne o temperaturze około 5800 K. Jest to tzw. „temperatura barwna” słońca. Rozkład energetyczny widma słonecznego przedstawia rys. 1.

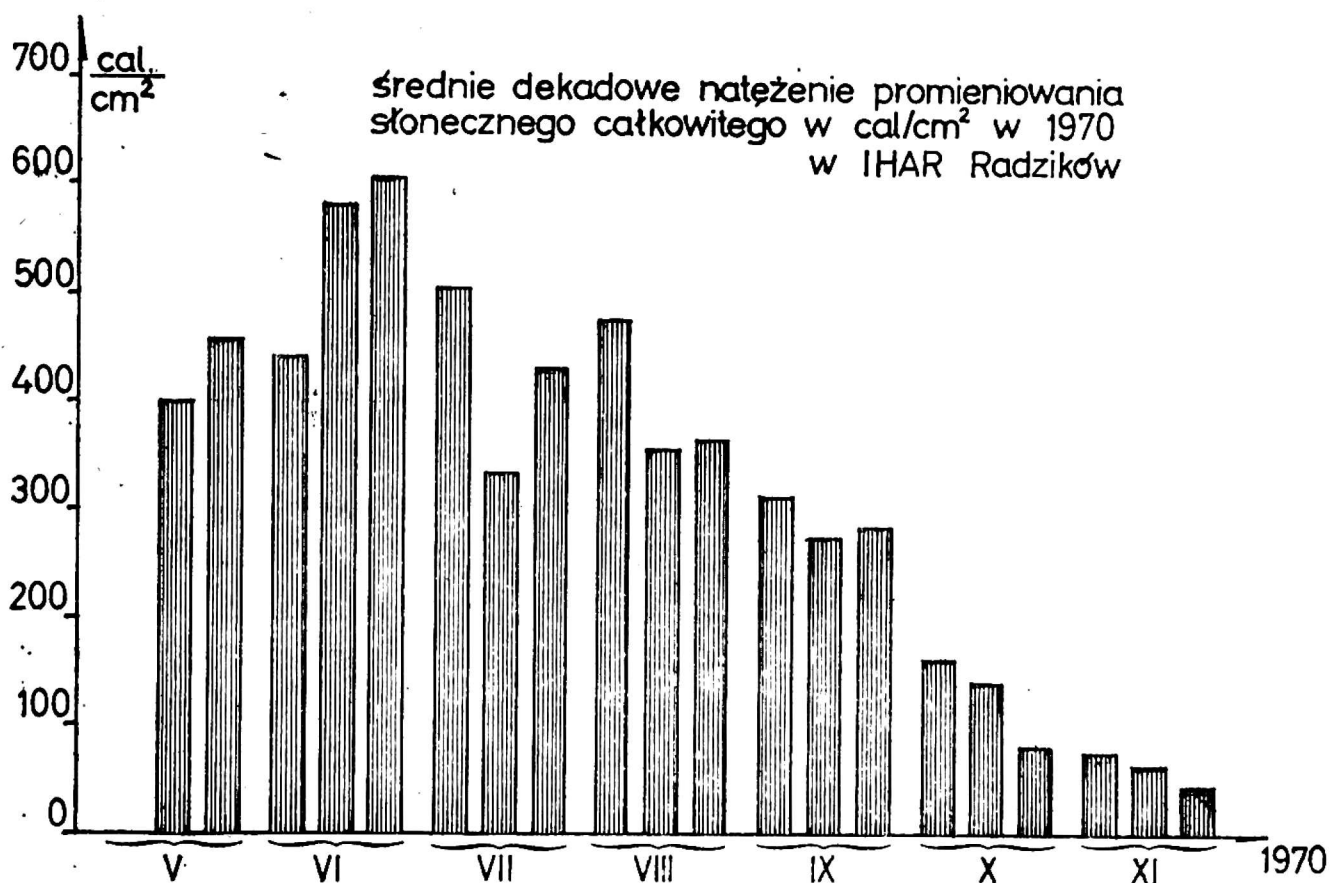


Rys. 1. Widmo słoneczne

W widmie tym dominuje światło widzialne (ok. 54% energii), ale promieniowanie podczerwone stanowi również dużą pozycję (ok. 44%). Mniej energii (ok. 2%) daje promieniowanie nadfioletowe. W sumie promieniowanie słoneczne widzialne i niewidzialne, dochodzące do atmosfery Ziemi przy prostym kierunku światła dostarcza średnio 1,94 cal na centymetr kwadratowy w ciągu minuty, czyli 135 miliwatów na

1 cm²; jest to tzw. „stała słoneczna”, która nie zupełnie odpowiada pojęciu „stałej”, gdyż jak podaje Kopcewicz (5) waha się ona w granicach 3—4‰.

Część promieniowania słonecznego (średnio około 20‰) ulega odbiciu od atmosfery ziemskiej (albedo). Podobna część (około 20‰) zostaje pochłonięta przez atmosferę, więc tylko około 60‰ energii dosięga powierzchni Ziemi przy bezchmurnym niebie. Chmury mogą wielokrotnie zredukować promieniowanie. Poza tym ilość energii dostarczanej przez Słońce zależy od kąta padania światła, a więc od szerokości geograficznej, pory dnia i roku. Według pomiarów prowadzonych od 1970 r. w Zakładzie Biofizyki Roślin Uprawnych IHAR w Radzikowie promieniowanie słoneczne koło Warszawy dostarcza nie więcej, niż ok. 700 cal na 1 cm² dziennie, co przy 16—17-godzinnym dniu daje średnio około 0,7 cal·cm⁻²·min⁻¹. Zwykle natężenie oświetlenia jest znacznie słabsze. W poszczególnych miesiącach odbiór energii jest bardzo różny i całkowicie wyjaśnia, dlaczego wegetacja roślin zaczyna się na wiosnę, a kończy w jesieni (rys. 2). Wegetacja zależy głównie od światła.



Rys. 2. Natężenie promienia słonecznego

Jednostki świetlne

Według międzynarodowego układu jednostek miar — SI (Systeme International 1958) jednostką energii jest dżul (J), a jednostką mocy — dżul na sekundę, czyli wat (W). W układzie CGS często używaną jednost-

ką była też kaloria (1 cal = 4,1868 J); dotychczas występuje ona w pracach chemicznych i geofizycznych; w kaloriach są kalibrowane solarymetry, w kaloriach wyrażamy stałą słoneczną, bilanse energetyczne wód lub wartości energetyczne pokarmów. Zalecane przez SI przejście z kalorii na dżule wymaga pewnego okresu czasu.

W pomiarach światła używamy szeregu specjalnych jednostek. Niektóre z nich warto omówić, gdyż często się nimi posługujemy.

Światło działa na nasz zmysł wzroku. Doskonale odróżniamy pewne stopnie światłości, ale to odczucie zależy nie tylko od liczby fotonów; barwa światła ma również duże znaczenie. Oko ludzkie jest najbardziej wrażliwe na światło zielononiebieskie o długości fali około 500 nm. Jednak ścisła ocena światłości za pomocą oka jest niemożliwa. Jednostką „światłości” według SI jest kandela (cd). Przyjęto umownie, że 1 cm² stopionego dwutlenku toru (ThO₂) o temperaturze krzepnącej platyny (2024 K) pod ciśnieniem 1 atmosfery ma światłość 60 kandel, a jedna kandela odpowiada 1,67 mm² świecącego pola i jest zbliżona do dawnej świecy Hefnera (1 cd = 1,09 świecy).

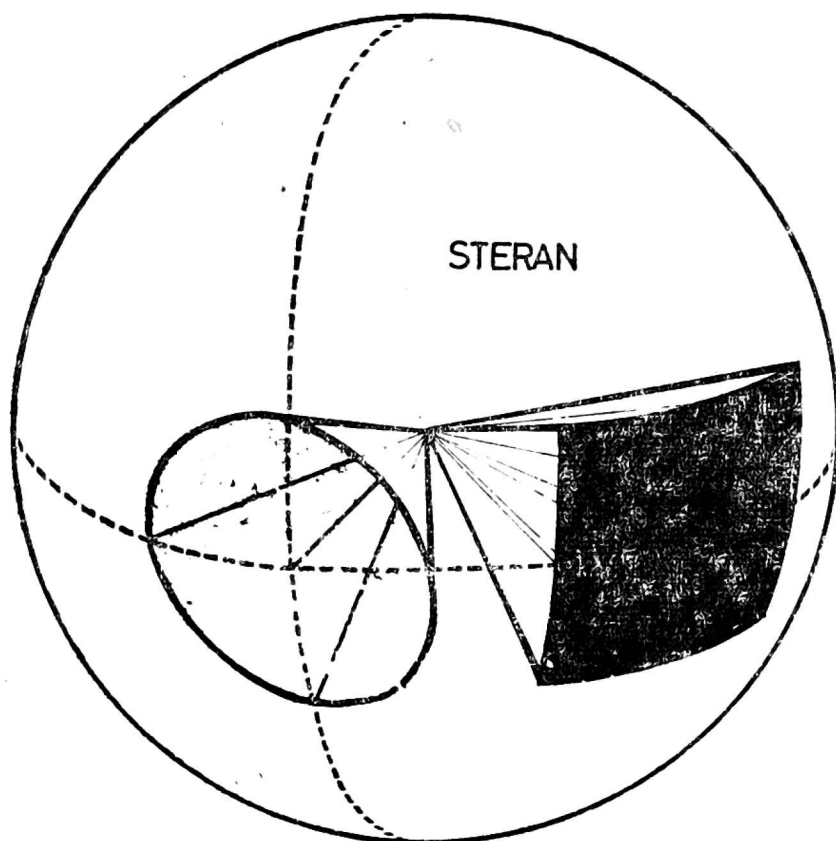
Inną jednostką świetlną jest lumen (lm). Wyobraźmy sobie, że źródło światła w postaci małej kuli jest zamknięte w dużej kuli i oświetla jej wewnętrzną powierzchnię. Pole tej powierzchni

$$S = 4\pi r^2 \simeq 12,56 r^2 \quad (5)$$

Kąt bryłowy, który na powierzchni kuli wycina pole równe kwadratowi promienia nazywamy steranem (sr); jest to w przybliżeniu $\frac{1}{12,56}$ część powierzchni i zarazem objętość kuli (rys. 3). W dowolnym kącie bryłowym liczba fotonów emitowanych w jednostce czasu z centralnie umieszczonego źródła światła jest stała. Powstaje więc pojęcie strumienia świetlnego, jako wielkości fizycznej. Jednostką strumienia jest lumen (lm), czyli światłość 1 cd emitowana w kącie bryłowym 1 sr.

Strumień daje określoną liczbę fotonów na sekundę w danym kącie bryłowym niezależnie od długości promienia, ale im dłuższy jest promień, tym większą powierzchnię oświetli dany strumień i tym mniejsze będzie natężenie oświetlenia, które maleje proporcjonalnie do kwadratu odległości. Wyobraźmy sobie źródło światła w formie małej kulki z dwutlenku toru o temperaturze krzepnącej platyny i powierzchni równej 21 mm², co odpowiada 12,56 cd; źródło to jest umieszczone w środku dużej kuli o promieniu 1 m. Strumień świetlny będzie miał wartość 1 lm (1 cd na 1 sr) i oświetli 1 m² pola, a natężenie oświetlenia na wewnętrznej powierzchni kuli będzie miało wartość jednego luksa (lx),

$$\text{możemy więc napisać, że } 1 \text{ lx} = \frac{1 \text{ lm}}{1 \text{ m}^2}$$



Rys. 3. Kąt bryłowy

Ciało rozgrzane emituje fale elektromagnetyczne różnej długości; jego widmo emisyjne składa się nie tylko ze światła widzialnego, ale również z nadfioletu i podczerwieni. Możemy więc mówić nie tylko o strumieniu świetlnym, mierzonym w lumenach, ale również — o strumieniu energetycznym mierzonym w watach. Stosunek wartości strumienia świetlnego (Φ) do wartości strumienia energetycznego (Φ_e) nazywamy skutecznością świetlną, albo wizualną wydajnością świetlną ($K = \Phi/\Phi_e$) i mierzymy w lumenach na wat. Jest to bardzo istotny wskaźnik przemiany np. energii cieplnej w światło. Dzięki bardzo wysokiej temperaturze chromosfery skuteczność świetlna promieniowania słonecznego sięga 90 lm/W. Skuteczność świetlna żarówek w zależności od ich mocy wynosi 6—30 lm/W, a świetlówek — około 60 lm/W (zjawisko luminescencji).

Kandela, lumen i luks są jednostkami wizualnymi związanymi z naszym zmysłem wzroku. Wprawdzie są one uzależnione od liczby fotonów emitowanych przez źródło światła, ale podstawa kandel jest umowna — światłość ciała czarnego przy określonej, wysokiej temperaturze. Od kandel zaś pochodzi lumen i luks. Pomiarów dokonuje się w kuli Ulbrichta za pomocą fotometrów, których działanie opiera się na zjawisku fotoelektrycznym. Nikt fotonów nie liczy.

Jednostki wizualne lumen i luks są bardzo użyteczne przy projektowaniu oświetlenia ulic, fabryk, biur, szkół, teatrów, szpitali, sklepów i mieszkań — wszędzie tam, gdzie chodzi o sprawne widzenie, uzależnione od wrażliwości naszego oka; jest ono najbardziej wrażliwe na światło niebieskozielone o długości fali około 500 nm.

Jednostki wizualne — luksy są również szeroko stosowane w fotografii, chociaż nie jest to całkowicie poprawne. Proces fotograficzny jako reakcja fotochemiczna zależy od liczby fotonów oraz ich energii i nie wiąże się z jednostkami wizualnymi, ale klisza fotograficzna znosi dość duże różnice naświetlania, jak wynika chociażby ze skali przesłony i migawki.

Natomiast jednostki wizualne zupełnie nie pasują do procesu fotosyntezy, dla którego światło jest źródłem energii. Istnieje oczywiście pewien związek między jednostkami wizualnymi i energetycznymi, bo im więcej fotonów pada na jednostkę pola w jednostce czasu, tym silniejszy jest strumień świetlny mierzony w lumenach i większe natężenie oświetlenia mierzone w luksach. Orientacyjnie można przyjąć, że 1 lx odpowiada $1,03 \cdot 10^{-5} \text{ cal} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{min}^{-1}$ lub $7,2 \cdot 10^{-7} \text{ W/cm}^2$.

Wykorzystanie światła przez rośliny w procesie fotosyntezy

Jeżeli światło jest pochłaniane, może ono wywoływać reakcje fotochemiczne. Wiele związków chemicznych pochłania promieniowanie nadfioletowe, a te które pochłaniają światło widzialne, mają charakterystyczne barwy. Takie też właściwości posiada zielony barwnik roślinny zwany chlorofilem. Znamy kilka rodzajów chlorofilu; najważniejszym z nich jest chlorofil *a* ($\text{C}_{55}\text{H}_{72}\text{O}_5\text{N}_4\text{Mg}$). Budową swą chlorofil przypomina czerwony barwnik krwi, a różni się od niego głównie tym, że zawiera w środku pierścienia porfirynowego magnez zamiast żelaza, co mu nadaje specyficzne właściwości optyczne.

Już w roku 1836 C.B.G. Daubeny profesor chemii z uniwersytetu w Oxfordzie opublikował wyniki swoich badań nad wpływem światła o różnej barwie na szybkość fotosyntezy i stwierdził, że wydalenie tlenu przez rośliny zależy od „siły światła” i jest najintensywniejsze w środkowej części widma słonecznego. Badał on fotosyntezę w świetle o różnej barwie, używając kolorowych szyb lub flaszek napełnionych barwnymi cieczami. Fotosyntezę mierzył ilością wydalonego tlenu, a intensywność światła — zaczerpniętym termometrem i wyrażał ją w kaloriach. Światło nie było monochromatyczne, co mogło powodować wiele nieporozumień.

Do podobnych wniosków doszedł chemik amerykański J.W. Draper (1844). Poglądy te przyjęli najwybitniejsi ówczesni fizjologowie niemieccy W. Pfeffer i J. Sachs. Przyczyną wielu nieporozumień były niedoskonałe metody badawcze.

Dopiero K. Timiriazew zakwestionował te poglądy, twierdząc, że tylko to światło może być wykorzystywane w procesie fotosyntezy, które jest pochłaniane przez chlorofil. Myśl tę jasno wyraził w pracy pt. „Ob usvo-

jenii sveta rasteniem” opublikowanej w Pracach Cesarskiego Petersburskiego Towarzystwa Przyrodników w 1875 r. i powtórzył w języku francuskim w *Annales de chimie et de physique* w 1877. Odrzucił on filtry, zastosował pryzmat i wąską szczelinę wlotową dla uzyskania światła jak najbardziej monochromatycznego. Mimo poprawnej metody w badaniach swoich Timiriazew mógł wykazać fotosyntezę tylko w czerwonej części widma słonecznego (rys. 4), natomiast nie był w stanie jej wykazać w świetle fioletowoniebieskim. Timiriazew nie rezygnował. Nadal krytykował poglądy Daubeny, Drapera, Pfeffera i Sachsa i dowodził słuszności swojej teorii, ale dopiero w roku 1903, gdy udało mu się zwiększyć natężenie światła heliostatem Foucaulta, wykazał fotosyntezę również w świetle niebieskim; była ona słabsza, niż w czerwonej części widma, ale dawała się mierzyć ilością wydalanego tlenu (rys. 5); otrzymał więc dwa maksima fotosyntezy — w niebieskiej i czerwonej części widma słonecznego.

Chlorofil *a* najsilniej pochłania światło fioletowe o długości fali 417 nm i światło czerwone o długości fali 657 nm; ponad to ma on kilka pasm absorpcyjnych o mniejszym znaczeniu.

Chlorofil *b* najsilniej pochłania światło niebieskie o długości fali 460 nm i czerwone o długości fali 650 nm.

Karoteny i ksantofile pochłaniają światło fioletowoniebieskie. Zarówno chlorofil *b*, jak też karotenoidy mogą przekazywać pochłoniętą energię chlorofilowi *a* i w ten sposób biorą udział w fotosyntezie.

Już z tego pobieżnego przeglądu zdolności pochłaniania światła przez główne barwniki roślinne wynika, że rośliny nie wykorzystują całego światła słonecznego, lecz pochłaniają tylko niektóre fotony o pewnej długości fali. Jeżeli chcemy uprawiać rośliny w świetle sztucznym, to wcale nie musimy imitować widma słonecznego; przeciwnie, ekonomiczniej będzie dać roślinom tylko takie światło, które rzeczywiście jest przez nie wykorzystywane, a więc — światło fioletowoniebieskie i czerwone.

Fotosyntetycznie czynna radiacja (FAR)

W związku ze specyficzną zdolnością roślin do wykorzystywania tylko niektórych wycinków widma słonecznego powstało pojęcie „fotosyntetycznie aktywnej radiacji”, w skrócie F.A.R. Jest to światło pochłanianie przez barwniki roślinne i wykorzystywane w procesie fotosyntezy. Istnieją nawet aparaty mierzące to promieniowanie. Działanie ich polega na eliminowaniu przy pomocy filtrów światła nieczynnego w procesie fotosyntezy, a rejestrowanie energii światła fioletowoniebieskiego i czerwonego. Aparatura pomiarowa nie jest jeszcze doskonała, ale idea pomiarów F.A.R. jest całkowicie uzasadniona.

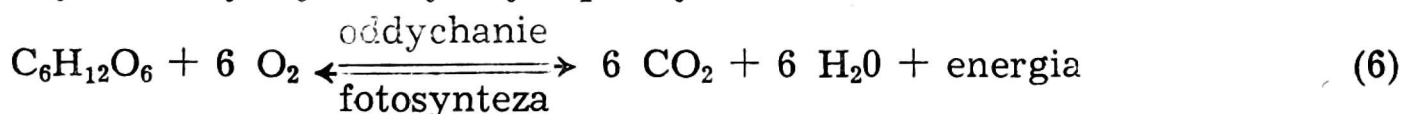
S.F. Vaszczenko opracował specjalne tablice dla F.A.R. światła naturalnego w różnych porach roku i w różnych strefach geograficznych Związku Radzieckiego. Tabele te mają stanowić podstawę obliczenia, ile energii świetlnej w zakresie F.A.R. trzeba dodać w okresie jesienno-zimowym, aby zaspokoić wymagania różnych gatunków roślin w uprawie szklarniowej.

M.T. Glikman i A.N. Kłaczkov (4) podali wzory matematyczne, które pozwalają obliczyć moc lamp i niezbędny czas doświetlania ogórków i pomidorów w jesienno-zimowej uprawie szklarniowej w zależności od F.A.R., co wynika z pory roku i szerokości geograficznej.

Problem światła w szklarniach, halach wegetacyjnych, komorach klimatyzowanych i fitotronach

Uprawa roślin ozdobnych na oknach w mieszkaniach była stosowana chyba od czasu wynalezienia szyb. Na oknie rośliny mają stosunkowo dużo światła i nawet w zimie nie giną, chociaż na pewno rosną wolniej. Również uprawa szklarniowa jest od dawna stosowana, ale do właściwej produkcji roślinnej wykorzystuje się głównie okres wiosenny, gdy insolacja się wzmacnia. W jesieni i zimie produkcja szklarniowa bez sztucznego światła jest prawie niemożliwa.

Rośliny, podobnie jak zwierzęta stale oddychają, czerpiąc z tego procesu energię niezbędną do życia i wzrostu. Szybkość oddychania jest wskaźnikiem intensywności przemian metabolicznych. Przy oddychaniu związki organiczne ulegają utlenieniu na dwutlenek węgla i wodę wydalane z organizmu. Poza tym jednak rośliny zielone mają zdolność asymilowania dwutlenku węgla i wytwarzania z powrotem związków organicznych w procesie fotosyntezy, ale proces ten wymaga dopływu energii w formie światła. Chociaż drogi przemian biochemicznych w oddychaniu i fotosyntezie nie są identyczne i nie można powiedzieć, że fotosynteza jest odwrotnością oddychania, to jednak bilansowo oba procesy możemy wyrazić jednym prostym równaniem:



Produkcja związków organicznych rozpoczyna się dopiero wówczas, gdy fotosynteza przeważa nad oddychaniem. Stan w którym fotosynteza ledwie równoważy oddychanie, nazywamy punktem kompensacyjnym. Punkt ten rośliny mogą osiągnąć przy różnym natężeniu oświetlenia w zależności od tego, jak szybko oddychają. Niektóre rośliny ceniolubne osiągają punkt kompensacyjny przy natężeniu oświetlenia zaledwie kilkudziesięciu luksów, inne wymagają kilkuset lub nawet kilku tysięcy luksów. Na ogół osiągnięcie punktu kompensacyjnego nie jest trudne,

lecz dopiero od tego momentu rozpoczyna się przyrost masy. Właściwa szybka produkcja roślinna wymaga znacznie silniejszego światła.

Różne gatunki roślin mają niejednakowe wymagania odnośnie natężenia oświetlenia. Niektóre z nich nawet nie znoszą światła silnego. Rozróżniamy gatunki ceniolubne i światłolubne, ale wszystkie one wymagają pewnego minimum energii świetlnej, aby mogły rosnąć i rozwijać się. Charakterystyczną formą przystosowania do wegetacji w warunkach słabego światła u roślin ceniolubnych jest wytwarzanie dużych i cienkich liści. Duża powierzchnia liścia ułatwia pochłanianie światła, a stosunkowo nieduża jego masa ogranicza oddychanie i umożliwia wegetację nawet przy słabym oświetleniu. Rośliny takie wystawione na działanie silnego promieniowania słonecznego zbyt łatwo tracą wodę i giną z powodu deficytu wodnego. Aparat fotosyntetyczny chloroplastów również może ulec uszkodzeniu pod wpływem zbyt silnego światła.

Chociaż istnieje wiele różnych sposobów przystosowania roślin do życia w warunkach słabego oświetlenia, to jednak zdajemy sobie sprawę z tego, że nie może to być szybka produkcja masy roślinnej, lecz tylko powolna wegetacja. Szybka produkcja roślinna musi być związana z szybkim metabolizmem, intensywnym oddychaniem i szybką fotosyntezą. Światło stanowi podstawowy czynnik produkcji roślinnej.

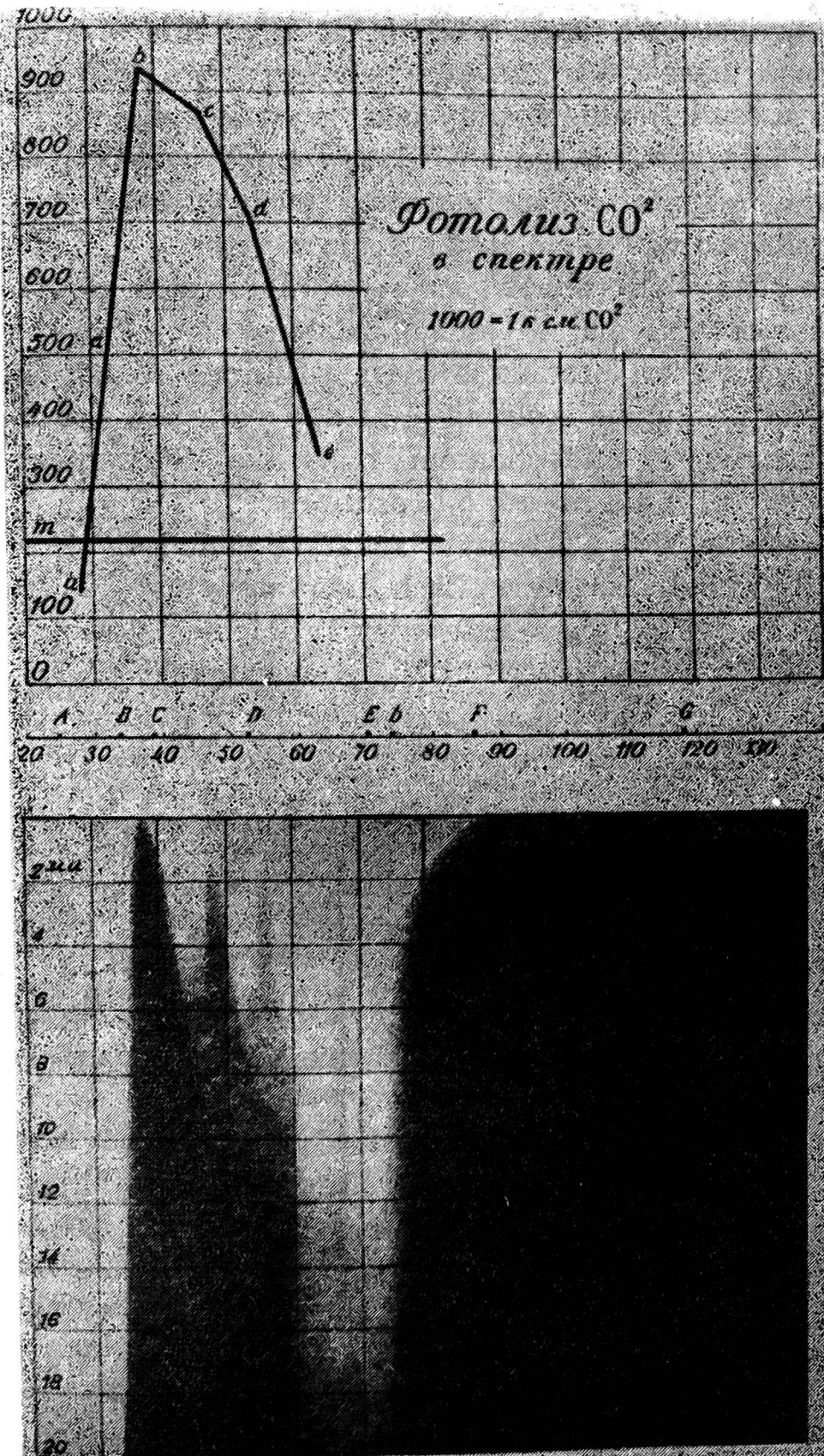
Poza produkcją szklarniową dosyć istotnym zagadnieniem jest uprawa roślin dla celów badawczych w warunkach laboratoryjnych. Tam koszt oświetlenia nie ma znaczenia. Najważniejszym problemem jest możliwość prowadzenia badań w ciągu całego roku, w warunkach zbliżonych do naturalnych, które by zapewniały uzyskiwanie prawidłowych wyników, nie zmienionych np. przez niedostatek światła. W tym celu zaczęto budować specjalne komory klimatyzowane lub nawet bardzo duże zespoły komór zwane fitotronami. Zarówno w fitotronach, jak i w komorach małych stosuje się oświetlenie bardzo silne, odpowiadające nawet światłu słonecznemu, a temperaturę i wilgotność powietrza reguluje się z dużą dokładnością.

Źródłem światła są zwykle lampy kseonowe o mocy od kilku do 20 kW; wymagają one odpowiednio sprawnego chłodzenia, gdyż wydzielają dużo ciepła.

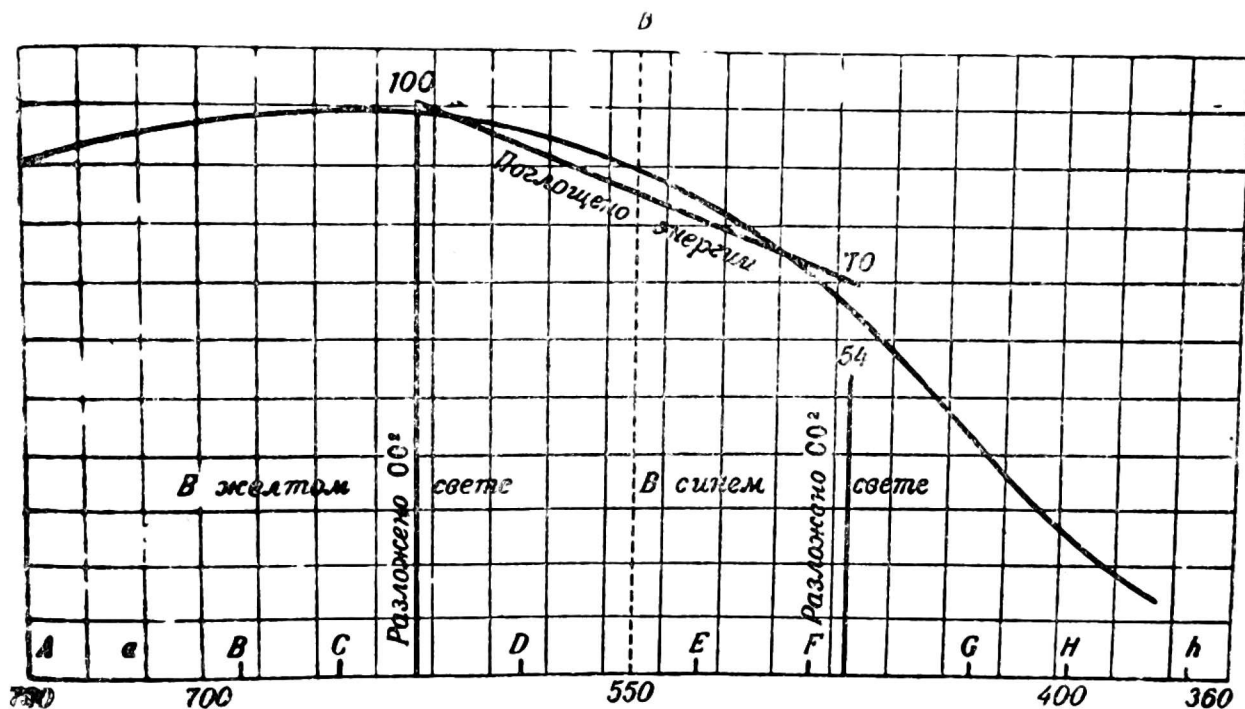
Nasuwa się pytanie, jak silne musi być natężenie oświetlenia, aby uzyskać maksymalną fotosyntezę — aby nasycić rośliny energią świetlną.

Zacznijmy od naturalnych warunków oświetlenia. Jeżeli 1 klx, odpowiada w przybliżeniu $0,01 \text{ cal} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{min}^{-1}$, to insolacja $0,7 \text{ cal} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{min}^{-1}$, jaką niekiedy notowano w Radzikowie, odpowiada 70 klx. W badaniach prowadzonych w Katedrze Fizjologii Roślin Uniwersytetu Warszawskiego w roku 1967 i 1968 nie notowano większego natężenia, niż 60 klx. Nie łatwo jest uzyskać podobne warunki przy pomocy światła

sztucznego, ale lampy ksecnowe dużej mocy z odpowiedniej odległości dają nawet do 100 klx. Tak duże natężenie oświetlenia wydaje się zbędne. Z. Baćławska-Krzemińska, M. Jarecka i H. Wróblewska (1) w badaniach prowadzonych na Uniwersytecie Warszawskim stwierdziły, że liście buraka cukrowego, machorki i siewek kapusty osiągały maksymalną fotosyntezę już przy 40 klx. Nawet natężenie oświetlenia 30 klx zapewnia roślinom dobre warunki wegetacji, natomiast 10 klx jest nie-



Rys. 4. Zależność fotosyntezy od barwy światła (wg K. Timiriazewa)

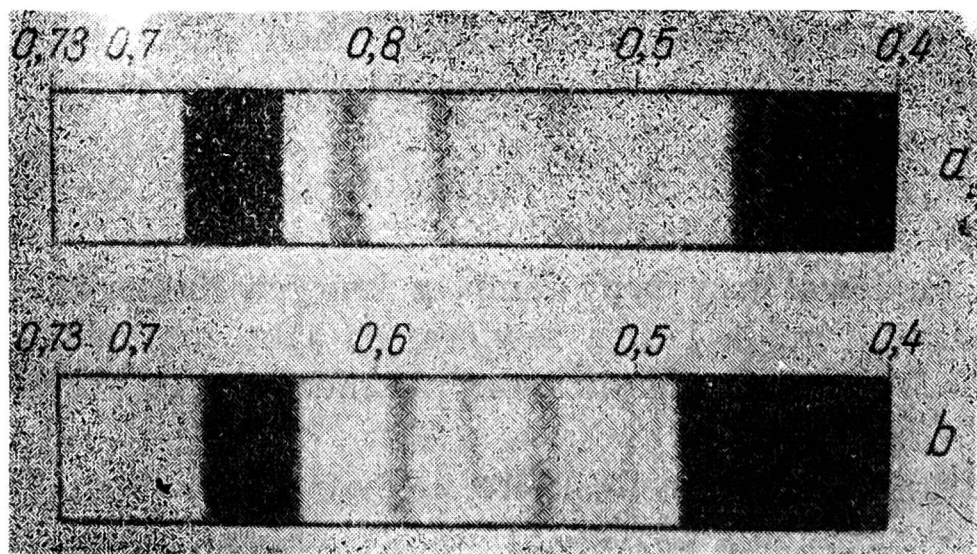


Rys. 5. Zależność fotosyntezy od barwy światła w późniejszych badaniach Timiriazewa

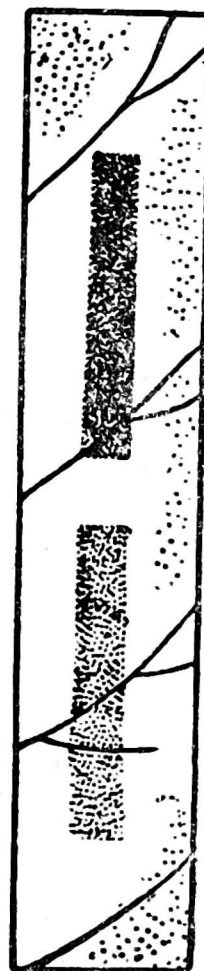
Желтый свет

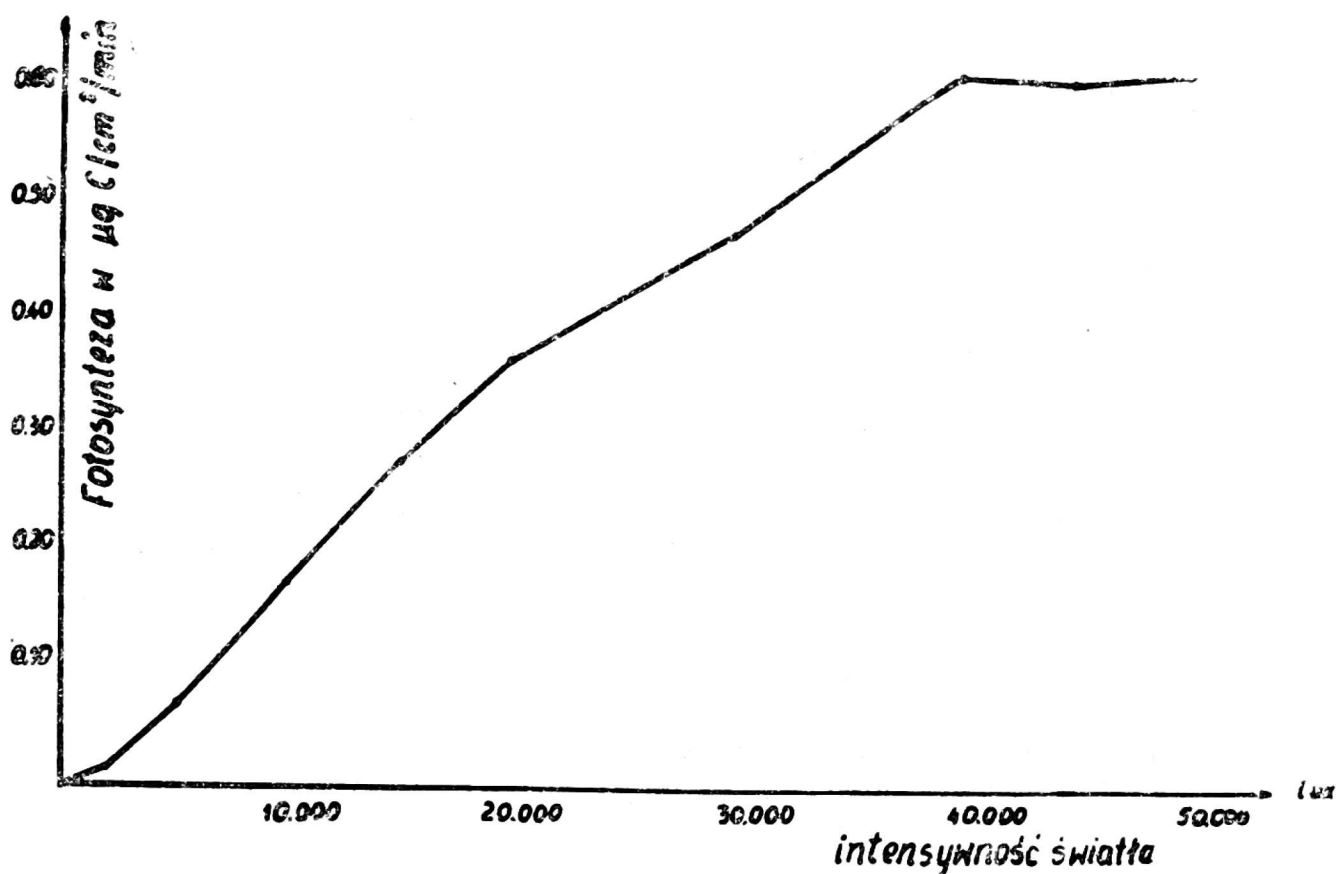
Rys. 6. Powstawanie skrobii w świetle czerwonym i niebieskim wg Timiriazewa

Синий свет



Rys. 7. Widmo absorpcyjne chlorofilu a i b





Rys. 8. Zależność fotosyntezy od natężenia oświetlenia wg Z. Baćlowskiej-Krzemińskiej

wątpliwie natężeniem zbyt słabym, opóźniającym wzrost i rozwój roślin. Niestety przy zwykłych żarówkach i świetlówkach trudno uzyskać większe natężenie oświetlenia, co jest powszechnym mankamentem naszych szklarni i komór klimatyzowanych. Najwłaściwszym rozwiązaniem tego problemu jest budowa lamp o widmie emisyjnym zbliżonym do widma absorpcyjnego chlorofilu (F.A.R.).

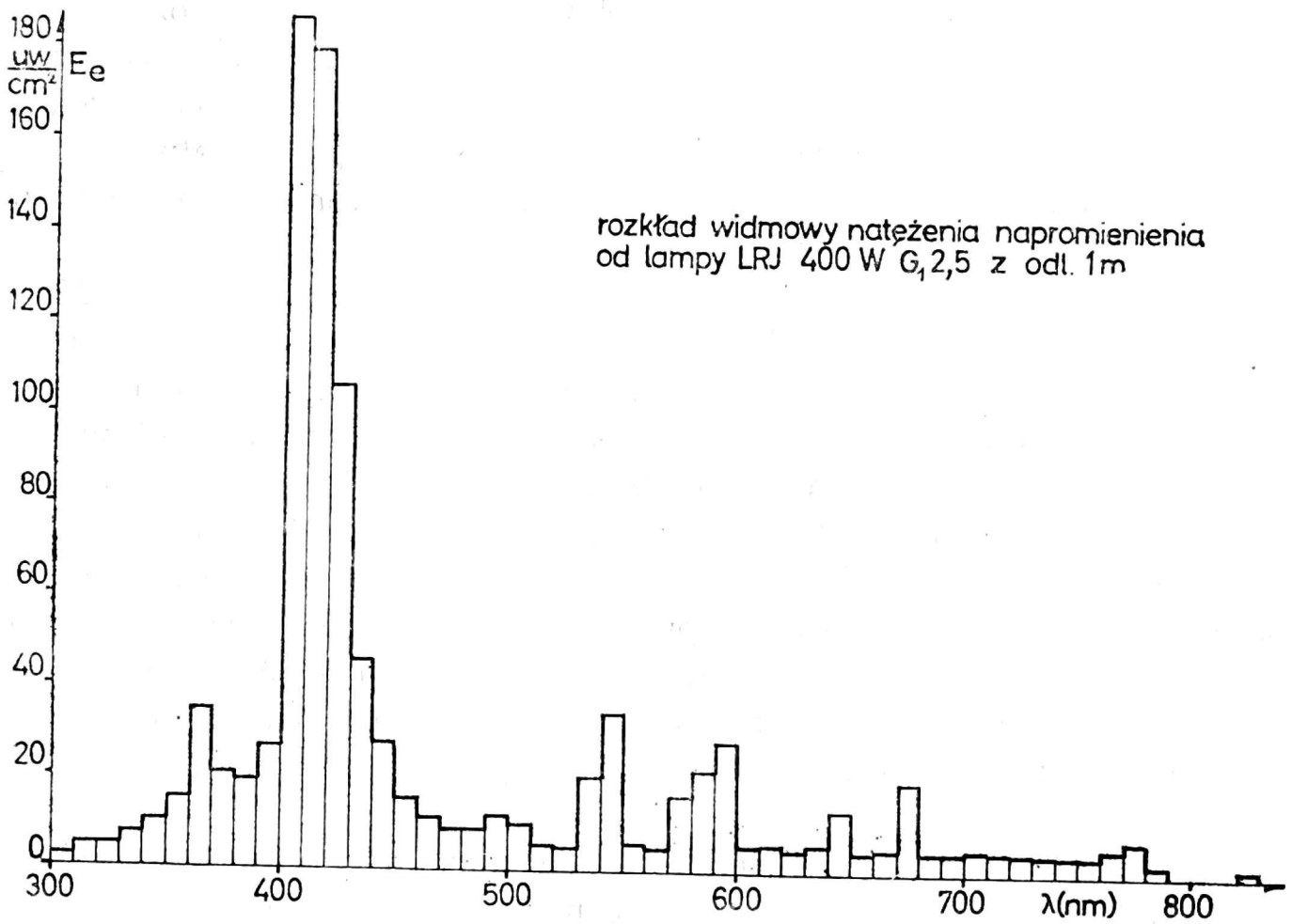
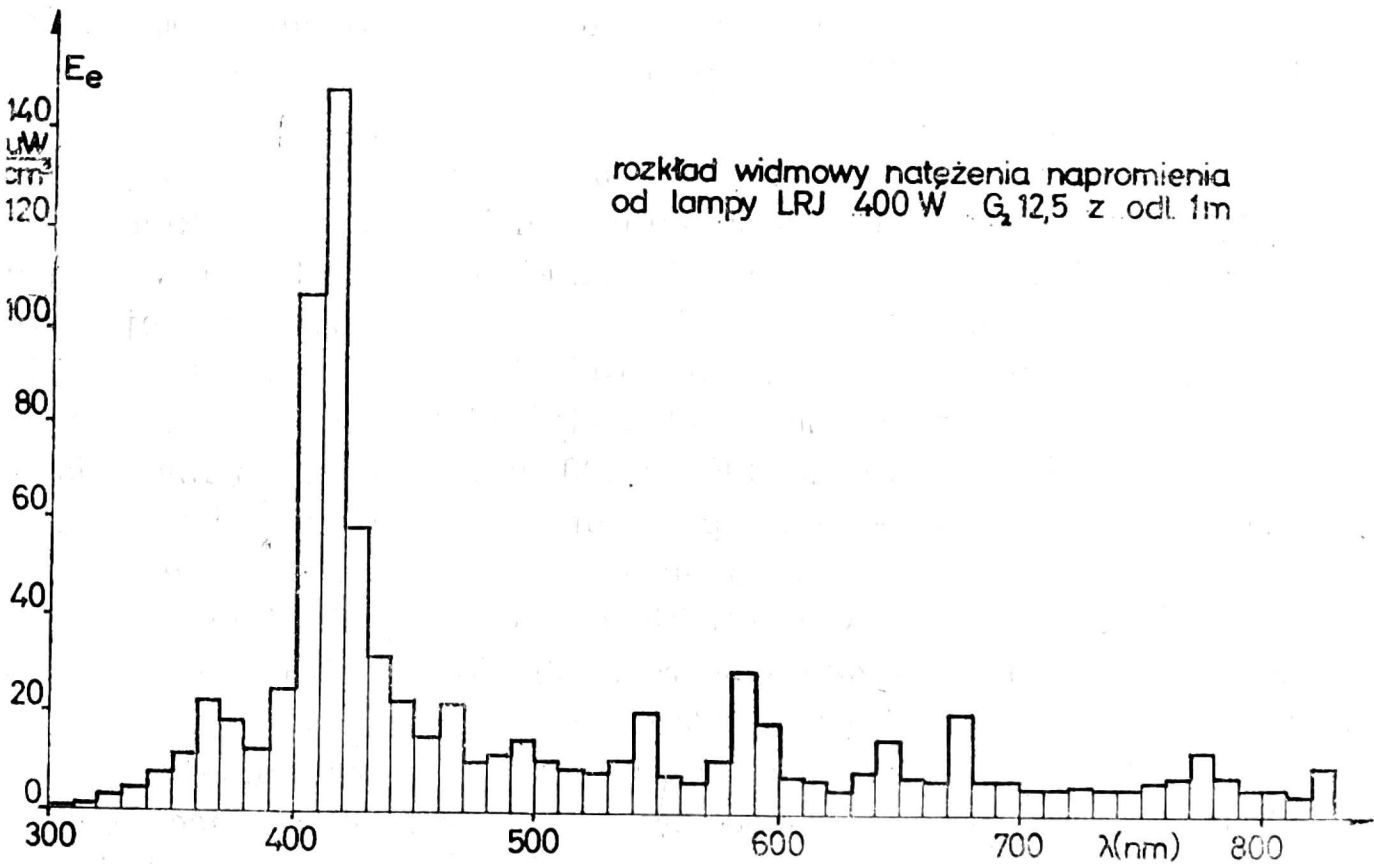
Nowe lampy

B. Kühl (6) zwrócił uwagę na właściwości jodków indu, sodu i talu, które jako luminofory w lampach rtęciowych powodują zamianę światła nadfioletowego na światło czerwone.

H. Sauer (10) opisał lampę „Fluora”, dającą dwukrotnie więcej światła w zakresie F.A.R., niż zwykłe lampy.

V.G. Sułackov (11) zbudował trzy typy lamp, z których najbardziej interesujące widmo emisyjne miała lampa zawierająca jako luminofory jodek indu (InJ_3) i litu (LiJ). Dawała ona dużo światła niebieskiego i czerwonego.

Przeglądając tablice linii spektralnych, które ułożyli A.N. Zaidel, V. K. Prokofiev i S.M. Raiskij (16), zwróciłem uwagę na gal; daje on bardzo silną emisję o długości fali 417,2 nm, odpowiadającą prawie dokładnie widmu absorpcyjnemu chlorofilu *a* w świetle fioletowym. Na

Rys. 9. Widmo emisyjne lampy G₁Rys. 10. Widmo emisyjne lampy G₂

zamówienie złożone przez IHAR w 1974 Ośrodek Badawczo-Rozwojowy Techniki Światlnej przy Zakładach Wytwórczych Lamp Elektrycznych im. Róży Luksemburg w Warszawie wykonał dwa prototypy lamp galowych o mocy 400 w pod symbolami G_1 i G_2 ; stężenie jodku galu w lampie G_2 było pięciokrotnie większe, niż w lampie G_1 . Konstrukctorem tych lamp był mgr W. Lesiuk.

Mgr E. Cichocka i mgr J. Sak w Instytucie Elektrotechniki w Międzyzlesiu wykonali pomiary rozkładu widmowego natężenia napromieniania, wyrażając je w mikrowatach na 1 cm^2 w przedziałach długości fali co 10 nm z odległości 1 metra . Uzyskano w ten sposób dosyć szczegółową charakterystykę widma emisyjnego obu lamp (rys. 9 i 10). Zwłaszcza lampa G_1 o mniejszym stężeniu jodku galu ma widmo bardzo skupione; w granicach długości fali od 400 do 430 nm koncentruje się ponad 52% energii świetlnej emitowanej przez tę lampę. Z odległości 1 m daje ona $0,9 \text{ mW/cm}^2$ w zakresie światła widzialnego ($300\text{—}740 \text{ nm}$), z czego $0,47 \text{ mW}$ czyli $52,5\%$ energii przypada na fale elektromagnetyczne o długości $400\text{—}430 \text{ nm}$ — w świetle fioletowym, pochłanianym przez chlorofil *a*.

Porównano to promieniowanie z widmem emisyjnym słońca. Posługując się równaniem Plancka (5) i tablicami P. Moona (8), ułatwiającymi te skomplikowane obliczenia, znaleziono, że słońce w tym wąskim zakresie fal elektromagnetycznych ($400\text{—}430 \text{ nm}$) daje ponad atmosferą ziemską około 6 mW/cm^2 . Atmosfera część promieniowania odbija (albedo), a część pochłania. Przeciętnie straty te wynoszą około 40% , a więc z 6 mW/cm^2 powierzchnia Ziemi przy bezchmurnym niebie odbiera przeciętnie $3,7 \text{ mW/cm}^2$.

Lampa G_1 daje z odległości 1 m tylko $0,47 \text{ mW/cm}^2$, lecz jeżeli ją otoczymy głębokim reflektorem o promieniu 1 m i całe światło skierujemy na pole o tym samym promieniu, to natężenie oświetlenia wzrośnie czterokrotnie — do $1,9 \text{ mW/cm}^2$. A jeżeli promień klosza zmniejszymy do $0,5 \text{ m}$, to natężenie oświetlenia wzrośnie jeszcze czterokrotnie — do $7,2 \text{ mW/cm}^2$ i znacznie przekroczy natężenie światła słonecznego w tym wąskim zakresie długości fali od 400 do 430 nm . Ponieważ pełne światło słoneczne nie jest, jak mówiliśmy, potrzebne roślinom, więc i w świetle fioletowym wystarczy połowa tego natężenia, jakie daje słońce. Wobec tego lampa G_1 o mocy 400 w z reflektorem o promieniu 1 m , oświetlająca $3,14 \text{ m}^2$ pola powinna zapewnić roślinom dosyć dobre warunki wegetacji w szklarni lub komorze klimatyzowanej.

L. Indeka przy pomocy aparatu URAS w Radzikowie zmierzył szybkość fotosyntezy pod lampą G_1 i pod lampą Philipsa HLRG o mocy 400 W . Ponieważ lampa G_1 nie była jeszcze całkowicie opracowana technicznie i nie posiadała żadnego reflektora, podczas gdy lampa HLRG jest zaopat-

Tabela 3

Szybkość fotosyntezy mierzona ilością węgla asymilowanego
1 dm² liści w ciągu minuty (wg badań L. Indeki)

	Pod lampą 400 w		
	G ₁	G ₁ z koszem	HIRG Philips
Kukurydza	119	170	180
Pszenica	85	123	137
Rzepak	113	153	182
Burak past.	110	144	161
energia promienio- wania lampy	4,87	6,49	7,74

rzona w wewnętrzny dobry reflektor, więc doświadczenie przeprowadzono w trzech wariantach: lampa G₁ bez reflektora, lampa G₁ z prowizorycznym kloszem i lampa Philipsa HLRG. Wyniki przedstawiono w tab. 3. Fotosynteza była najszybsza pod lampą HLRG, która miała dobry reflektor i dawała w strumieniu energetycznym 9,74 mw/cm². Pod lampą galową fotosynteza była znacznie słabsza, ale i oświetlenie było dokładnie o połowę słabsze, mianowicie 4,87 mw/cm². Klosz zwiększał zarówno natężenie oświetlenia, jak i fotosyntezę. Przeliczyłem więc szybkość fotosyntezy w stosunku do 1 mw/cm² (tab. 4). W tym ujęciu wyników

Tabela 4

Szybkość fotosyntezy w odniesieniu do mocy 1 mw/cm²

	Pod lampą		
	G ₁	G ₁ z koszem	HIRG Philips
Kukurydza	24,5	26	18,5
Pszenica	17,5	19	14
Rzepak	23	23,5	19
Burak past.	22,5	22	16,5

lampa galowa z kloszem i bez klosza dała wyniki zgodne i wyższe, niż lampa HLRG, co należy tłumaczyć dużą ilością światła fioletowego emitowanego przez lampę galową i dobrze wykorzystywanego przez rośliny. Należy dodać, że lampa G₁ prawie wcale nie emituje światła czerwonego bardzo czynnego w procesie fotosyntezy. Lampa galowa powinna współdziałać z innymi lampami, uzupełniając niedobór światła fioletowego często występujący w szklarniach i komorach klimatyzowanych.

Gdybyśmy potrafili zbudować dostatecznie silne lampy, których widma emisyjne ściśle odpowiadałyby widmom absorpcyjnym chlorofilów, karotenoidów i innych barwników roślinnych czynnych w metabolizmie roślin, otrzymalibyśmy idealne źródła światła dla roślin, może niepozorne przy ocenie wzrokowej, ale bardzo skuteczne w procesie fotosyntezy i produkcji masy roślinnej. Przyszłość produkcji szklarniowej, mającej ogromne znaczenie gospodarcze, zależy od postępu technicznego w zakresie budowy lamp o widmie emisyjnym zbliżonym do F.A.R.

LITERATURA

1. Baćławska-Krzemińska Z.: Influence of light, water deficit and age of plant on photosynthesis and air passage capacity in leaves of *Brassica oleracea* L. var. *Capitata alba* v. Ditmarska. Hod. Rośl. Aklimat. i Nasien. 17 303, 1973.
2. Daubeny C.: On the action of light upon plants and of plants upon the atmosphere, Phil. Trans. 126, 149, 1836.
3. Draper J.W.: Sur la decomposition du gaz acide carbonique et sur celle des carbonates alcalins par la lumiere du soleil. Annales de chimie et de physique III ser., vol., 11, 214, 1844.
4. Glikman M.T., Kłaczkov A.N.: K voprosu o rasczete udelnoj moszcznosti obłuczatelnych ustroistv v teplicach — Svetotechnika 2, 4, 1974.
5. Kopcewicz T.: Fizyka Atmosfery, Warszawa 1948.
6. Kuhl B.: Quecksilber-Hochdrucklampen mit Jodidzusätzen. Lichttechnik 2, 68, 1964.
7. Jarecka M.: Influence of light, water deficit and age of plant on the intensity of photosynthesis and air passage capacity in leaves of sugar beet (*Beta vulg. var. sccharfera*) Hod. Rośl. Aklimat. i Nasien. 17, 329, 1973.
8. Moon P.: A table of Planck's function from 3500 to 8000°K. J. of Matem. and Phys. 16:133, 1937.
9. Nowakowski W.: Natężenie promieniowania słonecznego w 1970 r. mierzone solarymetrem Kippa w Zakładzie Biofizyki Roślin Uprawnych IHAR w Radzikowie. Wiadomości Botaniczne 16, 115, 1972.
10. Sauer H.: Pflanzenbestrahlung. Techn.-wiss. Abh. Osram-Gesell. 10. 259, 1969
11. Sułackov V.G.: Charakteristiki metalłogaloidnych rastenievodczeskich łamp. Svetotechnika 1, 13, 1971.
12. Timiriazew K.: Ob usvojenii sveta rasteniem. Trudy Imp. S-Peterburskago obszcz. estestv.- VI, 1875.
13. Timiriazew C.: Recherches sur la decomposition de l'acide carbonique dans le spectre solaire par les parties vertes des vegetaux. Annales de chimie et de physique. V ser., vol. 12, 355, 1877.
14. Timiriazew C.: The cosmical function of the green plant. Proc. Roy. Soc. 72, 424, 1903.
15. Wróblewska H.: Influence of water deficit and age of plant on the intensity of photosynthesis and air passage capacity in leaves of *Nicotiana rustica* L. Hod. Rośl. Aklimat. i Nasien. 17: 387, 1973.
16. Zaidel A.N., Prokofiev V.K., Raiskij S.M.: Tablicy spektralnych linii. Moskva—Leningrad 1952.