

UNELE ASPECTE FIZICE ALE FOTOSINTEZEI

Ion ANDRONIC¹, Maria FRUNZĂ¹, Viorel DUȘCIAC²

¹INSTITUTUL DE ȘTIINȚE REALE

e-mail: iandronic@mail.md ; frunze@mail.md

²UNIVERSITATEA DE STAT DIN MOLDOVA

e-mail: vdusciac@mail.md

Unul din principiile de bază de care se ține cont la reformarea învățământului și elaborarea noilor programe și manuale școlare este principiul abordării interdisciplinare a obiectelor de studiu. Trimiterile interdisciplinare în predarea fizicii diminuează frontierele relative, arbitrare dintre fizică și biologie și pune accent pe conexiunile puternice existente între științele naturii, tratarea lumii reale ca un tot întreg.

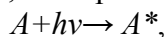
Abordarea interdisciplinară are drept scop formarea unor personalități moderne, cu gândire analitică, sistemică, cu capacități de înțelegere profundă și aptitudini de modelare a fenomenelor, proceselor din jur, fiind totodată un factor important de educare, orientare și formare profesională a elevilor - profesioniști ai viitorului.

În calitate de exemplu de realizare a acestui principiu, în articolul de față sunt prezentate aspectele fizice ale fotosintezei ca factor fundamental în alimentația autotrofă a plantelor. Sunt analizate fazele de lumină și de întuneric ale fotosintezei, dependența acestui proces complex de intensitatea energiei radiante, componența spectrală a luminii, fluxul luminos și direcția de incidență, influența altor factori fizici (umiditate, temperatură) etc. De asemenea, este arătat rolul fiecărui factor fizic în dezvoltarea plantelor, sunt analizate valorile optime ale factorilor fizici și posibilitatea programării roadei prin controlul procesului de creștere a culturilor agricole.

Se adresează profesorilor de fizică și, în egală măsură, celor de biologie și chimie.

REAȚII FOTOCHIMICE

Reacțiile care au loc sub acțiunea luminii se numesc reacții fotochimice. Acțiunea luminii se reduce la trecerea moleculelor în stare activă (stare energetică ridicată), după care acestea sunt capabile să intre în reacții chimice. Acest proces se numește de activare, iar moleculele (atomii) – activate. Convențional, acest proces poate fi prezentat prin relația:



unde A este molecula în stare fundamentală, iar A^* este molecula activată (excitată). Pentru transformările fotochimice ale unei molecule se cere o anumită energie de activare E_A . Nu orice cantă de lumină poate provoca activarea moleculei și declanșarea transformărilor fotochimice. Fotonul absorbit va produce activarea moleculei numai dacă $h\nu > E_A$. De aici reiese că transformările fotochimice poartă un caracter cuantic. Energia de activare este bariera energetică care trebuie depășită pentru a declanșa reacția fotochimică.

Transformările fotochimice primare, produse de lumină, sunt urmate de formarea a noi substanțe active din punct de vedere chimic, care declanșează, la rândul lor, procese secundare.

În toate cazurile, procesele decurg în corespundere totală cu legile fundamentale ale fizicii. Referitor la transformările fotochimice primare, experimental s-au stabilit următoarele legități:

1. Masa substanței care reacționează fotochimic este proporțională cu energia radiațiilor monocromatice absorbite (legea Bunzen-Rosco):

$$M=k\Phi t,$$

unde Φ este fluxul de energie, t – durata iluminării, k – un coeficient care depinde de natura reacției fotochimice.

2. Un foton absorbit provoacă transformarea numai a unei molecule (legea lui Einstein pentru reacțiile fotochimice).

Energia obținută la absorbția fotonului poate fi utilizată de moleculă în diferite moduri. În unele cazuri poate urma disocierea moleculei de apă (fotoliza). În urma fotolizei, de fiecare dată se formează atomi, radicali liberi sau ioni-radicali care declanșează procese secundare.

În moleculele compuse lumina poate provoca o regrupare, astfel că atomii sau grupuri de atomi își schimbă poziția în moleculă, cu păstrarea componenței ei.

În alte reacții fotochimice molecula activată adăunează o altă moleculă. O serie de substanțe se polimerizează sub acțiunea luminii.

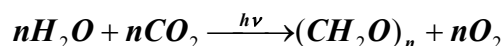
Acțiunea luminii poate contribui la transportul electronului (în cadrul unei molecule sau între molecule), ceea ce duce la formarea electronilor necuplați. Astfel de transport al electronului sub acțiunea fotonului are loc și în moleculele de clorofilă la plante în procesul fotosintezei.

Radiațiile din spectrul vizibil au o acțiune biologică pronunțată asupra organismelor vii. Soarele este o sursă puternică de radiații (inclusiv ultraviolete). Atmosfera Pământului reține partea ultravioletă cu $\lambda < 200$ nm. Ca urmare, la suprafața Terrei ajung fotonii cu energii de la 3 până la 7 eV, suficiente pentru ruperea legăturilor chimice ale multor compuși, fapt care și stă la baza fotosintezei.

Fotosinteza este procesul de conversie a energiei solare în cea chimică, care este acumulată de către plante sub formă de energie chimică a substanțelor organice sintetizate din compuși anorganici sub acțiunea luminii.

DOUĂ FAZE ALE FOTOSINTEZEI

Lumina, în fond, este absorbită de pigmentul aflat în plastidele plantelor verzi, numit clorofilă. În procesul fotosintezei substanțele organice se produc din CO_2 , apă, nitrați și alți compuși anorganici. Moleculele de clorofilă, activate de lumină, iau parte la procesul de transport intermolecular de electroni. Energia absorbită, redistribuită între molecule, și legăturile chimice declanșează un lanț de reacții chimice complicate, în urma cărora se formează hidrați de carbon și alți compuși organici. Acest proces poate fi prezentat schematic:



Această ecuație descrie doar procesul sumar al fotosintezei, fără a descrie esența ei de transformare a energiei solare în energia legăturilor chimice ale substanțelor organice în procesul reacțiilor de oxido-reducere cu participarea clorofilei și a unui șir de fermenți, care formează un acumulator universal de energie al nucleotidului ATP (adenozin-trifosfat).

În cele ce urmează nu vom expune procesul de fotosinteză care este mult prea complex, ci vom elucidă doar aspectele principale calitative ce permit înțelegerea rolului și acțiunii factorilor fizici asupra acestui proces unic compensator de energie dintre lumea vie și cea lipsită de viață.

FAZA LUMINOASĂ A FOTOSINTEZEI

La interacțiunea plantei cu cuanta de lumină, energia acesteia este absorbită de clorofilă. Această moleculă unică trece în stare excitată, iar electronul de pe orbita ei devine liber și în cele din urmă ia parte la o serie de reacții. Mai întâi de toate, are loc reacția fotochimică de fotoliză a apei, în urma căreia se formează radicali instabili (H^+ și OH^-) și oxigen în stare liberă O_2 . Protonul liber (H^+) interacționează cu cofermentul NADP (nicotinamin-difosfat), formând prima moleculă acumulator de energie chimică $\text{NADP}\cdot\text{H}$. În urma reacției de fosforilare are loc combinarea fosfatului anorganic cu adenzindifosfatul (ADP), formându-se astfel cel de-al doilea și cel mai important acumulator de energie: molecula de ATP (fig. 1).

Moleculele ATP și $\text{NADP}\cdot\text{H}$ servesc drept sursă de energie pentru formarea substanțelor complexe organice din dioxidul de carbon existent în aer. Schema procesului de fotosinteză cu participarea energiei radiante – a cuantelor de lumină absorbite de clorofilă – este prezentată în figura 1a. Acest proces ciclic se mai numește fotosinteză de tip F_1 .

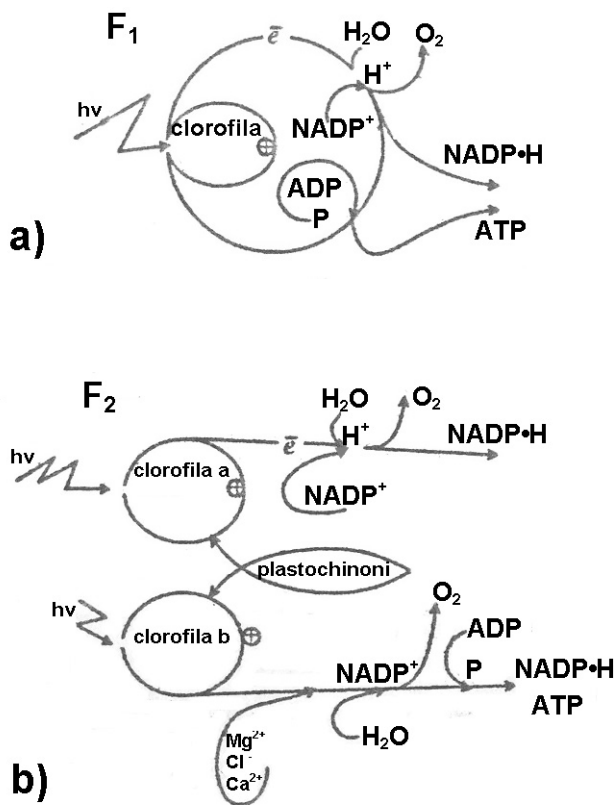


Fig. 1. Schema fazei de lumină a fotosintezei:
a) fotosistemele F₁; b) fotosistemele F₂.

Faza luminoasă a fotosintezei poate decurge și după o altă schemă, aciclică (fig. 1b). De data aceasta în procesul de fotosinteză (faza luminoasă) iau parte două tipuri de clorofilă: *a* și *b*. La fel ca și în ciclul descris mai sus, în urma fotosintezei se formează moleculele NADP·H și ATP acumulate de energie, cu eliberarea oxigenului. Însă în fotosinteza de tip F₂ procesele decurg numai cu participarea ionilor: magneziu, clor și calciu. O parte din rezervele de plastoquinoni au rolul de factor de legătură a clorofilor de tip *a* și *b*. Plastoquinonii cedează electroni care asigură realizarea reacțiilor fizico-chimice complexe din faza luminoasă a fotosintezei.

Așadar, la stadiul luminos al fotosintezei, cu aportul direct al cuantelor luminoase, are loc un proces constant și lent de formare a moleculelor macroergice de ATP și NADP·H, însoțit de degajarea oxigenului.

FAZA OBSCURĂ A FOTOSINTEZEI

Faza a doua a procesului de fotosinteză are loc în timpul nopții. În faza obscură, NADP·H și ATP, produși ziua în cursul reacțiilor fotochimice iau parte la reducerea CO₂. S-a calculat că pentru reducerea unei molecule de CO₂ se cer 3 molecule de ATP și 2 molecule de NADP·H. Conversia CO₂ în hidrați de carbon (conversia carbonului) se realizează pe contul energiei ATP și agentului de recuperare NADP·H. Conform ciclului Calvin (fig. 2), dioxidul de carbon se fixează pe ribulozo-1,5-difosfat (acceptor de CO₂),

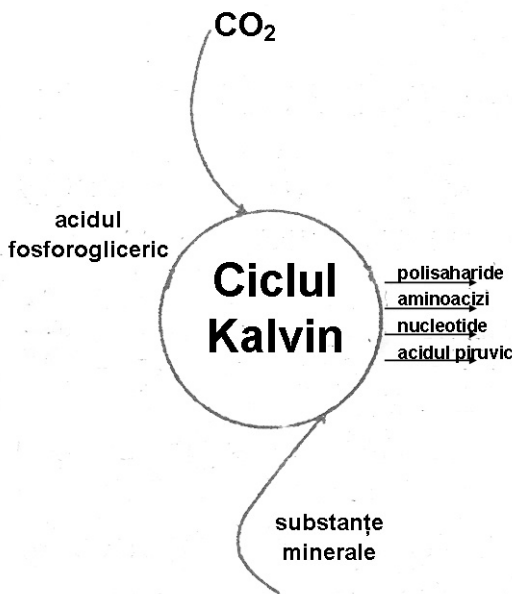


Fig. 2. Schema fazei obscure a fotosintezei.
Ciclul Calvin.

rezultând un compus cu șase atomi de carbon, care se descompune imediat în două molecule de acid 3-fosfoglicerice. S-a constatat că acidul fosfoglicerice este primul produs stabil care apare la câteva secunde după declanșarea fotosintezei în prezența CO₂. Pe durata fazei obscure, printr-o serie de reacții intermediare, din acidul 3-fosfoglicerice, substanțele minerale

din sol și CO₂ din atmosferă are loc sinteza substanțelor organice compuse (hidrați de carbon, albumine, acizi nucleici, polizaharide etc.). Acestea reprezintă produsul final al fotosintezei.

În procesele de fotosinteză și de producere a biomasei indicele principal luminos pentru plante este valoarea energiei radiațiilor active. Se consideră atât radiațiile luminoase directe, cât și cele difuzate. Pentru a caracteriza gradul de asigurare a plantelor cu energie luminoasă, se numără orele cu soare strălucitor. O altă caracteristică a procesului de fotosinteză este produsul sumelor temperaturilor la durata zilei lumină.

DEPENDENȚA FOTOSINTEZEI DE ACȚIUNEA UNOR FACTORI FIZICI

Asupra procesului de fotosinteză influențează o serie de factori fizici: intensitatea radiației active, componența spectrală a luminii, temperatura, conținutul și viteza de difuzie intercelulară a CO₂, umiditatea, presiunea osmotică etc.

Influența intensității luminii. Cercetările au demonstrat că dacă randamentul fotosintezei se măsoară în miligrame de CO₂ asimilat de un decimetru pătrat al suprafeței

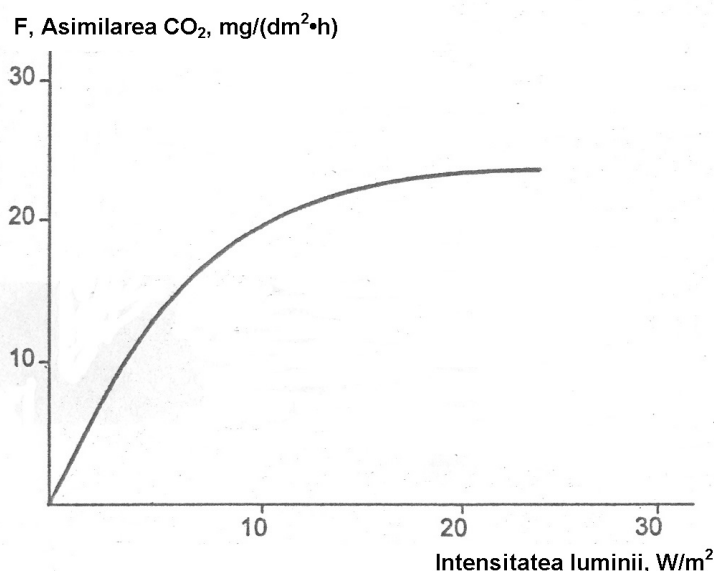


Fig. 3. Dependența fotosintezei de intensitatea energiei radiante.

frunzelor într-o oră (mg/dm²·h), iar intensitatea luminoasă în W/m², atunci dependența acestui proces de intensitatea luminii incidente are o formă grafică apropiată de cea logaritmică (fig. 3). Graficul $F=f(I)$ arată că fotosinteza crește foarte repede la intensități mici ale luminii și atinge saturația odată cu mărirea intensității. Cantitatea de energie luminoasă care corespunde saturației caracterizează fotosinteza la faza de asigurare completă a plantelor cu această energie.

O altă caracteristică este gradul de utilizare a energiei luminoase la valori mici ale acesteia. Dacă panta curbei este

mare, urmează că gradul de sensibilitate față de lumină este înalt, iar acest fel de plante sunt tolerante față de umbră. Din figura 3 reiese că la intensități mari ale luminii la plantele iubitoare de lumină fotosinteza decurge mai intens decât la plantele care suportă umbra. În schimb, ultimele sunt mai “economicoase”: la valori mici ale fluxului luminos fotosinteza decurge mai intens decât la plantele iubitoare de lumină. Fenomenul sensibilității față de lumină sau cel de rezistență la insuficiența ei se explică, probabil, nu prin deosebirile în funcționarea aparatelor de fotosinteză, cât prin condițiile diferite de transport (furnizare) a fotonilor spre granulele de clorofilă.

Fotosinteza depinde de iluminare, graficul acestei dependențe având forma de cupolă cu domeniul optim cuprins între 500÷800 W/m², ceea ce corespunde cu intensitatea fluxului luminos solar la amiază. Experimentele arată că la iluminare artificială, care ajunge la jumătate din puterea luminii solare, plantele se dezvoltă atingând biomasa maximă, iar mărirea acestei puteri la peste 800 W/m² are efect dăunător.

Dependența spectrală a procesului de fotosinteză. În spectrul de emisie al radiațiilor solare valorile maxime ale energiei radiațiilor totale (directe și difuze) în lipsa norilor revine domeniilor verde și verde-albastru. Cercetările experimentale au demonstrat că procesul de fotosinteză la majoritatea plantelor terestre are loc mai intens pentru domeniile roșu și indigo-violet ale spectrului solar.

În figura 4 este reprezentată curba spectrală a fotosintezei care demonstrează dependența spectrală a absorbției energiei de către pigmentii plastidelor (clorofila *a* și clorofila *b*). Așadar, cele două maxime de eficiență ridicată a fotosintezei corespund

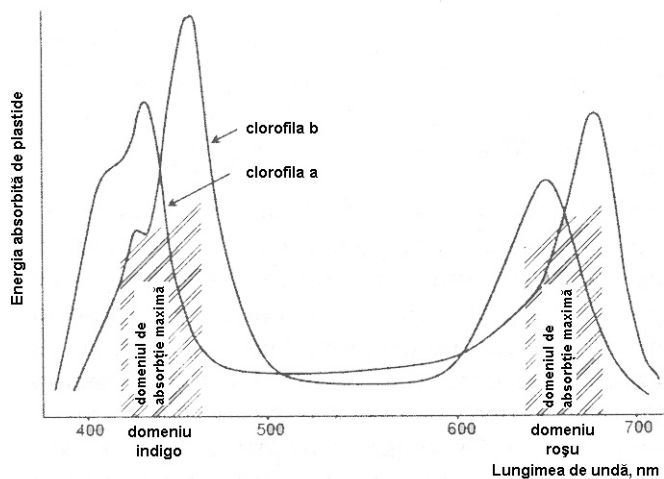


Fig. 4. Curba spectrală a fotosintezei.

lungimilor de undă cuprinse în intervalul de la 400 nm până la 700 nm. Probabil, pentru asigurarea ansamblului de reacții fotochimice domeniul violet-indigo de lungimi de undă este convenabil din punct de vedere energetic. Pe de altă parte, radiațiile oranj-roșii predomină în spectrul luminii solare în orele de seară înainte de apusul Soarelui. În schimb, în aceste ore aparatul de fotosinteză al plantelor funcționează din plin datorită acțiunii altor factori fizici. Astfel, în orele de seară, temperatura mediului înconjurător este înaltă, frunzele majorității plantelor sunt dispuse perpendicular în raport cu razele

solare incidente, acestea din urmă fiind mai eficiente pentru fotosinteză.

Desigur, influența energiei luminoase asupra creșterii și dezvoltării plantelor este însoțită și de alte procese fizice: reflexie, difuzie, transportul acestei energii în interiorul frunzei etc. Cu toate acestea, graficul dependenței roadei de lungimea de undă repetă, în fond, graficul activității fotosintetice a pigmentilor (fig. 4). Însă cum arată cercetările experimentale, fazele de dezvoltare și creștere a biomasei sunt stimulate și de radiațiile din domeniul galben-verde (500÷600 nm). Acest fapt este determinat de complexitatea procesului de fotosinteză, de particularitățile absorbției luminii la suprafața frunzelor etc.

S-a studiat acțiunea radiațiilor infraroșii și celor ultraviolete asupra fotosintezei. S-a stabilit că acțiunea radiațiilor infraroșii din domeniul 730÷1200 nm este determinată de absorbția slabă a acestora de către plante (doar câteva procente).

Este demonstrat că radiațiile ultraviolete micșorează transportul de electroni în ciclurile fotosintezei, inhibă reacțiile fotosintetice, chiar la stadiile incipiente ale fotosintezei. Pe lângă micșorarea intensității procesului de fotosinteză, au efect deprimant asupra creșterii, dezvoltării și înfloririi, iar la fluxuri mari de radiații ultraviolete plantele pier.

ASIMILAREA RADIAȚIILOR SOLARE DE CĂTRE PLANTE

La interacțiunea luminii cu plantele se respectă aceleași legități cunoscute din fizică. La atenuarea radiațiilor în tegumentul vegetal este valabilă legea similară cu legea Lambert-Bouguer-Berr:

$$I(L) = I_0 \exp(-kL),$$

unde $I(L)$ este intensitatea radiațiilor sub suprafața orizontală a frunzei, L – indicele caracteristic suprafeței frunzei, k – coeficientul de extincție, iar I_0 este intensitatea luminii incidente.

Din relația dată rezultă că cu cât sunt mai mari valorile k și L , cu atât mai bine frunzele (etajate similar) absorb energia luminoasă. Indicele L este proporțional cu aria suprafeței frunzelor. Valoarea coeficientului de absorbție k depinde de geometria, poziția spațială și proprietățile frunzelor. Astfel, pentru frunzele situate în poziție orizontală $k=0,9$, adică practic toată energia solară este asimilată (unghiul de incidență este egal cu zero și valoarea iluminării este maximă). Deoarece în acest caz este asigurat un înalt grad de absorbție a radiațiilor incidente, posibilitățile de reglare a productivității cu ajutorul creșterii factorului intensitate luminoasă, folosind geometria aranjării frunzelor, este epuizată.

Dacă frunzele sunt dispuse vertical, $k=0,3$, dependența $I(L)$ este mai pronunțată. Ca urmare, mărirea intensității energiei incidente va duce la creșterea absorbției ei. În acest caz plantele sunt sensibile la fluxul luminos și creșterea lor este foarte receptivă la variația intensității luminii incidente.

Un rol deosebit în viața plantelor îl are poziția sursei de lumină în raport cu suprafața frunzelor. De exemplu, plantele cu frunzele ce cresc aproape vertical, practic nu acumulează energia solară la amiază. Pentru astfel de plante cele mai eficiente sunt razele solare incidente oblic.

Din punct de vedere practic, este important ca semănăturile să fie etajate. Astfel, o plantație de porumb va utiliza în mod optim energia solară, dacă frunzele superioare vor fi orientate aproape vertical, iar cele de jos în poziție orizontală. O astfel de arhitectură a plantației este optimă atât pentru procesul de fotosinteză, cât și pentru schimbul de gaze. Este semnificativ faptul că în procesul de ontogeneză o parte din frunzele plantelor mature se mențin în poziție verticală, iar o altă parte iau poziția ce corespunde unghiului minim de incidență a razelor de lumină pe suprafața lor.

Direcția de incidență a razelor de lumină pe suprafața frunzelor este determinantă pentru procesul de fotosinteză. Astfel, plantele lipsite de lumina de la chindie dau o roadă de două ori mai mică. În perioada de dimineață-amiază mecanismele fotosintetice funcționează cu mult mai lent. Cu toate că razele albastre-violete sunt absorbite puternic, efectul lor este mult mai slab asupra fotosintezei, alcătuind doar 14% din randamentul fotosintezei menținut de radiațiile roșii, predominante în orele de seară. Acest fapt experimental trebuie să stea la baza iluminării plantelor crescute în spații închise. Sursele de iluminat se aranjează astfel ca fluxul de raze luminoase să cadă cât mai aproape de perpendiculara la suprafața frunzelor. La o alegere a iluminării optime se pot obține roade de câteva ori mai mari decât în condiții obișnuite.

INFLUENȚA ALTOR FACTORI ASUPRA FOTOSINTEZEI

Un alt factor fizic important, care influențează procesul de fotosinteză, este temperatura aerului. Intervalul de temperaturi, precum și valoarea concretă a temperaturii optime a aerului, la care fotosinteza atinge cel mai înalt nivel, depinde de tipul plantei, de particularitățile biologice ale ariei de răspândire.

O caracteristică importantă a plantelor este temperatura minimă la care se declanșează fotosinteza. Astfel, la plantele lemnoase de nord (bradul, pinul) procesul de fotosinteză începe la temperaturi de -15°C până la -10°C . La plantele tropicale procesul de fotosinteză se declanșează la $4-8^{\circ}\text{C}$. Temperatura de 20°C este optimă pentru desfășurarea fotosintezei. La

temperaturi de cca 40°C viteza fotosintezei se reduce de 6-7 ori (fig. 5).

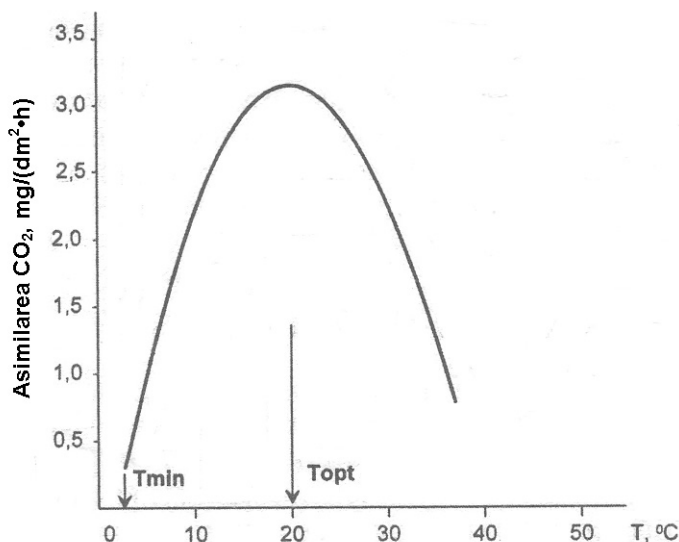


Fig. 5. Dependența fotosintezei de temperatură.

Temperatura determină procesele termodinamice care au loc în plante, dar și în sol. Temperatura influențează asupra proceselor de evaporare, vaporizare, de menținere a apei în sol și determină balanța termică a solului.

În procesul de fotosinteză produșii organici nu se pot forma în lipsa apei. De aceea umiditatea solului este încă un factor fizic vital pentru plante. Lipsa apei în frunze, la fel ca și surplusul ei, frânează procesul de fotosinteză. Umiditatea optimă la care fotosinteza are loc la

maximum variază de la o specie de plante la alta.

Procesul de fotosinteză este determinat și de alimentarea plantelor cu microelemente. Pentru funcționarea normală a aparatului fotosintetic se cer substanțe minerale care intră în componența plastidelor, fermenților etc. sau care participă direct la fotosinteză. Aceste elemente sunt: fosforul, ionii de clor, magneziu, calciu. Clorofilele *a* și *b* conțin mangan, iar transportul de electroni în cloroplaste este asigurat de atomii de fier. De asemenea, este necesară prezența azotului, calciului și desigur a dioxidului de carbon. Deficitul acestor elemente duce la dereglarea funcționării normale a sistemelor fotosintetice la plante.

Procesul de fotosinteză este determinat și de alte procese: de respirație, ontogeneză etc.

Cele expuse mai sus relevă complexitatea procesului de fotosinteză, care este determinat de acțiunea concomitentă și complexă a diferiților factori fizici. Totodată, acești factori nu se pot înlocui reciproc. Acest fapt reprezintă una din legile de bază ale ecologiei.

Plantele sunt principalul furnizor de oxigen și sursă de biomasă organică pe glob. Ele folosesc doar 2% din toată energia solară incidentă pe suprafața frunzelor lor. Iar fiecare decimetru pătrat de suprafață verde a frunzelor asimilează din atmosferă în medie 10 mg de dioxid de carbon timp de o oră. Datorită procesului de fotosinteză, consumul global al dioxidului de carbon pe parcursul unui an este de cca $4 \cdot 10^{10}$ tone (!). Procesul de fotosinteză stă la baza vieții plantelor, dar și a tuturor viețuitoarelor, inclusiv a omului. De aici și importanța cunoașterii naturii în ansamblu, nu pe părți, pe domenii.

BIBLIOGRAFIE

1. Anghel I. // Citologie vegetală. Editura Didactică și Pedagogică, București, 1979.
2. Bruce Alberts, Dennis Bray, Julian Lewis, Martin Raff, Keith Roberts, James D. Watson // Molecular Biology of the Cell. Garland Publishing, Inc., New York London, 1986, Vol. I, II.
3. Holl D., Rao K. // Fotosintez. Moskva, 1983 (rus).
4. Klein R. // Fotosintez. Fiziceskie mehanizmi i himiceskie modeli. Moskva, 1984 (rus).
5. Șein E.V., Goncharov V.M. // Agrofizica. Fenix, Rostov-na-Donu, 2006 (rus), 398 p.

Prezentat la redacție: 20 aprilie 2007