

# Augalų energinės apykaitos balansas ir jo vertinimas

## Povilas Algimantas Sirvydas

Aleksandro Stulginskio  
universitetas, Studentų g. 11,  
LT-53361 Akademija, Kauno r.  
El. paštas: algimantas.sirvydas@asu.lt

## Vidmantas Kučinskas

UAB „ARVI“ ir ko,  
V. Kudirkos g. 24  
LT-68305 Marijampolė  
El. paštas: vidmantas@arvi.lt

Augalų energinės apykaitos procesai tiesiogiai susieti su pasaulinio masto problemomis (maisto ir bioenergijos), kurias galima apibūdinti kaip Saulės energijos akumuliaciją ir jos koncentraciją biologine forma. Augalo energijų balanso nagrinėjimas ir vertinimas išryškina veiksnius, turinčius įtakos augalo energinės apykaitos vyksmui. Pagrindiniu augalo energinės apykaitos rodikliu yra transpiracijos skaičius  $S_p$ , kuris išreiškiamas energijos, sunaudotos transpiracijai ir konvekciniam šilumos mainams su aplinka, santykiu. Staigiausi transpiracijos ir šilumos mainų su aplinka pokyčiai stebimi prie mažų transpiracijos skaičiaus  $S_k$  (1–3) reikšmių. Augalų atiduota aplinkai šiluminė energija, vandens garo ir aplinkos temperatūros pavidalo šiluma dalyvauja sudarant lokalią mikroklimatą.

**Raktažodžiai:** augalo energijų balansas, biomasės energetika, transpiracijos energetika, augalo energinė apykaita

## ĮVADAS

Energiniai procesai, vykstantys augale, tiesiogiai susieti su pasaulinio masto problemomis (maisto ir energijos), kurias galima apibūdinti kaip Saulės energijos akumuliaciją ir jos koncentraciją biologinėje formoje. Tvermės dėsnis teigia – energija nesukurama ir nesunaikinama, galima tik energijos formos transformacija. Nepriklausomai nuo augalo sukurtos biomasės panaudojimo tikslo (maistui ar biomasės energetikai), naudojama biomasė negali išskirti daugiau energijos negu augale akumuliuota saulės energija. Vadinas, atsinaujinančios energijos panaudojimo plėtra tiesiogiai priklauso nuo asimiliacijos proceso, nuo žaliojo Žemės rūbo biologinių galimybių tenkinti biomasės poreikius.

Šiuolaikinių technologijų amžiuje žmogus bet kurios formos energiją sėkmingai gali panaudoti energetinėse technologijose tik tada, kai ji yra koncentruota (anglis, nafta, biomasė ir kt.). Saulės energijos, kaip atsinaujinančio

energijos šaltinio, kaupimas biologine forma (aliejai, organinis kuras ir kt.) vyksta asimiliacijos procese. Asimiliacijos procesas tiesiogiai priklauso nuo biologinių procesų augale, kuriuos veikia daugelis veiksnių, pvz., augalo energinė ir medžiaginė apykaita.

Dėmesys krypta į augalo lapo asimiliacinio aparato teorinį pajėgumą, kuris idealiu atveju didesnis nei 20 % [1, 2]. Faktinis saulės energijos panaudojimas organinės medžiagos kūrimui yra apie 2 %. Minimumo (limituojančio veiksnio) dėsnis, galiojantis augalų pasaulyje, nurodo, kad gyvybinius procesus (tarp jų ir derlių) esant kitoms vienodoms sąlygoms lemia veiksnys, esantis minimume. Vertinant aplinkos veiksnius būtina turėti augalo energinės apykaitos su aplinka teorinį vertinimą.

Termodinaminiu požiūriu augalas yra prastas saulės spindulinės energijos transformatorius. Organinių junginių sintezei panaudoja tik 1–2 % visos sugertos spindulinės energijos [3, 4]. Augalų derlius  $D$  yra dalis augalo sukurtos biomasės (produktyvumo), kuri turi praktinę vertę. Ji

įvertinama derliaus indeksu DI. Kuo šis indeksas yra didesnis, tuo didesnė sukurtos augale biomasės dalis, panaudojama praktiniams tikslams. Aukštą derliaus indeksą turi žemės ūkio augalai (DI = 0,81). Mediana sumedėjusiuose augaluose sudaro apie 60 % (DI = 0,6) sukurtos biomasės. Visos planetos metinis augalų produktyvumas siekia tik 0,336 kg/m<sup>2</sup>, žemės ūkio augalų – 0,6–0,7 kg/m<sup>2</sup>. Produktiviausi visžaliai miškai – 1,3–2,2 kg/m<sup>2</sup> biomasės [5]. Biomasės poreikio didėjimas Žemėje siejamas ne tik su maisto poreikių augimu, bet ir su biomasės panaudojimo energetikai plėtra. Šiuo metu Žemėje vienam gyventojui tenka apie 0,115 ha ariamos žemės ir tiek pat miško ploto. Europos Sąjungos valstybėse didėja susirūpinimas dėl pusiausvyros tarp medienos pasiūlos ir paklausos atsižvelgiant į planuojamą biomasės panaudojimą energetikoje. Šiuo metu miško metinis prieaugis yra apie 900, kirtimai – 500 mln. m<sup>3</sup>. Gerai, kad dabartinis bendras medienos derlius išlieka gerokai mažesnis už metinį prieaugį [6, 7].

Kita vertus, augalas yra unikali, pigi bet kartu ir labai sudėtinga laboratorija. Augalas sugeba panaudoti nekoncentruotą saulės spindulinę energiją ir sukurti didžiausią Žemės turtą – organinę medžiagą, sunaudoti didžiąją dalį šiuolaikinio technologinio žmogaus į aplinką išmetamų teršalų, tiesti deguonį aplinkai sukuriant gyvybei Žemėje sąlygas. Žemės rutulio augalija per metus asimiliuoja apie 640 mlrd. t anglies dioksido ir išskiria apie 500 mlrd. t laisvo deguonies, tuo mažindama aplinkos taršą [1, 2], transpiruoja (išgarina) apie 65 200 km<sup>3</sup> vandens [8].

Saulės energija, augale virtusi šiluma, naudojama ir augalo mineralinės (peleninės) mitybos elementams iš ekosferos pasisavinti. Augalų biomasėje peleniniai elementai (K, Na, Ca, Mg, Fe, S ir kt.) sudaro vidutiniškai 5 % sausosios masės. Šiluma taip pat naudojama asimiliacijos proceso metabolitų (O<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O garų) šalinimui. Sausos medžiagos 1 kg sukurti, skirtingi augalai išgarina nevienodą vandens kiekį. Miškuose taupiausiai organinės medžiagos kūrimui drėgmę naudoja eglė – apie 200 kg/kg, išlaidžiausiai – beržas – apie 350 kg/kg [9].

Natūraliomis aplinkos sąlygomis augalų energinė apykaita ir ją lydintys energiniai procesai tarp augalo ir jo apsupties vyksta nenutrūkstamai. Augalas su jo apsupties aplinka sudaro vientisą nedalomą sistemą, kurioje vyksta augalų energinė apykaita. Saulės spindulinė energija, augaluose transformuota į šilumą, sudaro 96–98 % bendro energijos kiekio, dalyvaujančio augalų energinėje apykaitoje. Augalų atiduota aplinkai menkavertė, žemo potencialo šilumos energija, vandens garų ir aplinkos temperatūros pavidalo šiluma, toliau dalyvauja vandens ir oro apytakos cikluose, formuoja Žemėje klimatinės sąlygas [2, 10]. Energinės apykaitos tarp augalo ↔ aplinkos prognozavimo ir vertinimo pagrindiniai veiksniai yra šviesa (spindulinė energija), temperatūra (šiluma) ir drėgmė (vanduo). Šiuos tris aplinkos veiksnius, sąlygojančius augalo produktyvu-

mo, minimalios egzistencijos ir žūties sąlygas (kaip termoenerginius procesus), galima nagrinėti panaudojant termodinamikos dėsnius (augalo energijų balanso metodu).

## AUGALO ENERGIJŲ BALANSAS

Augalo terminės problemos nuo seno domina tyrėjus [11–13]. Augalo lapo lokali temperatūra yra augalo lape vykstančių biologinių procesų ir energinės apykaitos su aplinka rezultatas, kurį lemia daugelis veiksnių [14]. Energijos balanso metodas teigia, kad bet kuriam augalo gyvavimo momentui galioja lygybė tarp gautos, sukauptos, sunaudotos biologiniams procesams ir atiduotos aplinkai (šilumos ir vandens garų pavidalu) energijos [2, 15–17].

Energijų balanso metodika, pritaikyta augalui ar jo daliai, padeda suprasti pagrindinius veiksnius, turinčius įtakos augalo energinės apykaitos proceso vyksmui, nurodo būdus ir veiksnius, kuriais galima pakreipti vykstantį procesą norima linkme. Pvz., siekiant reguliuoti augalo audinių temperatūrą, augale vykstančių procesų intensyvumą, siekti maksimalaus poveikio terminėse žemės ūkio technologijose [18, 19]. Išanalizavus augalo energijų balanso narius, paaiškėja augale vykstančių fiziologinių procesų kryptingo valdymo galimybės. Remiantis augalo energijų balansu, galima įvertinti visus energijų apykaitos pokyčius natūralioje ir žmogaus sukurtoje aplinkoje, nagrinėti augalo ↔ aplinkos energinius procesus, pvz., transpiracijos proceso, konvekcinių šilumos mainų, lapų vytimo, rasos iškritimo, radiacinės šalnos, augalo energinių mainų šiltnamio sąlygomis, energinius procesus piktžolių terminės kontrolės metu, augalo terminio žuvimo, iš dalies augalo terminio pažeidimo, apibūdinti optimalius terminės aplinkos veiksnius, augalo energinės apykaitos procesams.

Augalo lapo energinės apykaitos kitimą, kaip dinaminio energijų balanso išraišką, galime nagrinėti sprendžiant energinio balanso lygtį. Temperatūros kitimas augalo lape pasireiškia lapo audinių termoakumuliacijos procesu, kuris savo ruožtu iššaukia konvekcinių šilumos mainų su aplinka intensyvumo pokyčius. Saulėtu paros metu ore esančios drėgmės kondensacija lapo paviršiuje negalima, todėl energinio balanso narys, įvertinantis drėgmės kondensaciją, lygus nuliui ir nevertinamas. Šilumos srautas su augalo sulčių tekėjimu, kaip labai mažas dydis, taip pat atmestinas. Įvertinę paminėtas sąlygas, galime rašyti augalo energijų balanso lygtį:

$$\Sigma Q = \pm Q_1 \pm Q_2 - Q_3 \pm Q_4 \pm Q_5 \pm Q_6 = 0. \quad (1)$$

Augalo energijų balanso lygtį (1) galime išreikšti procentais arba dalimis:

$$\Sigma q = \pm q_1 \pm q_2 - q_3 \pm q_4 \pm q_5 \pm q_6 = 1 \text{ arba } 100 \% ; \quad (2)$$

čia:  $Q_1, q_1$  – bendras efektyvus augalo, jo aplinkos ir saulės energijos srautas. J/s arba šilumos srauto tankis J/(s · m<sup>2</sup>);

$Q_2, q_2$  – atitinkamai – šilumos srautas, atiduodamas arba gaunamas iš aplinkos konvekciniais šilumos mainais. J/s arba konvekciniis šilumos srauto tankis J/(s · m<sup>2</sup>);

$Q_3, q_3$  – atitinkamai – šilumos srautas, sunaudotas transpiracijai ir atiduodamas aplinkai vandens garo pavidalu. J/s arba srauto tankis J/(s · m<sup>2</sup>);

$Q_4, q_4$  – atitinkamai – šilumos srautas augalo audiniais per laidį, kurį sukelia temperatūrų skirtumas augalo audiniuose J/s, arba srauto tankis J/(s · m<sup>2</sup>);

$Q_5, q_5$  – atitinkamai – šilumos srautas, energijos pavidalo fotocheminėms reakcijoms ir kitiems augale vykstantiems egzo- ir endoterminiams procesams J/s, arba srauto tankis J/(s · m<sup>2</sup>);

$Q_6, q_6$  – atitinkamai – šilumos srautas, dalyvaujantis augalo audinių termoakumuliacijos procese J/s, arba srauto tankis J/(s · m<sup>2</sup>).

Analizuodami augalo energijų balanso atskirų narių įtaką, įvertinę energinės apykaitos sąlygas aplink augalą, kai kuriais atvejais galime supaprastinti augalo balanso lygtis (1) ir (2). Galime parinkti augalo energinės apykaitos laikotarpį, kai nėra šilumos mainų augalo audinių laidžiu ( $Q_4 = 0$ ), šiluma egzo- ir endoterminiams procesams ( $Q_5 = 0$ ), termoakumuliacijai ( $Q_6 = 0$ ). Tada augalo lapo (ar kitos dalies) energijų balanso lygtis (1) ir (2), įvertinančias pagrindinius energinės apykaitos balanso narius (absorbuojamą saulės energiją  $Q_1$ , konvekcinis šilumos mainus su aplinka  $Q_2$  ir transpiraciją  $Q_3$ ), bet kuriuo nagrinėjamu atveju galime išreikšti taip:

$$abq_{sp} = q_1 = \pm q_2 + q_3; \quad (3)$$

arba

$$abQ_{sp} = q_1 = \pm q_2 + q_3; \quad (4)$$

čia:  $a$  – koeficientas, kuriuo įvertinama absorbuotos saulės energijos dalis, augale virstanti šiluma % arba dalimis ( $a = 0,96-0,98$ );

$b$  – augalo absorbuojama saulės integralinės spinduliuotės dalis % arba dalimis ( $b = 0,34-0,37$ ) [2];

$Q_{sp}, q_{sp}$  – atitinkamai saulės integralinės spinduliuotės srautas J/s arba srauto tankis J/(s · m<sup>2</sup>).

Augalo lapo energinės apykaitos procese dalyvaujanti saulės energija  $Q_1$  ir šilumos energija, dalyvaujanti konvekcinuose šilumos mainuose su augalo aplinka  $Q_2$ , priklausomai nuo saulės energijos ir konvekcinų šilumos srautų krypties, gali būti teigiamos arba neigiamos. Nagrinėdami augalo energijų balansus laikomės tokių sutartinių ženklų: tiekiant augalui šilumą iš aplinkos (kai šilumos srautas iš aplinkos nukreiptas į augalą) energijų balanso narys yra teigiamas, ir atvirkščiai – kai augalas

šilumą atiduoda aplinkai (kai šilumos srautas nukreiptas iš augalo į aplinką), energijų balanso narys yra neigiamas. Tai priklauso nuo augalo ir jo aplinkos energinės apykaitos. Transpiracijos procese energijos srautas vandens garo pavidalu  $Q_3$  visais atvejais nukreiptas iš augalo į aplinką, todėl jis visuomet yra neigiamas. Priklausomai nuo augalo energinės apykaitos procese dalyvaujančių energijų  $Q_1, Q_2, Q_3$  srautų dydžio ir krypties, galimi 6 augalo ir jo aplinkos energijų balanso atvejai.

## AUGALŲ ENERGINĖS APYKAITOS BALANSO VERTINIMAS

Augalų energinės apykaitos procesų įvairovė yra labai didelė. Augalijoje energijų apykaitos procesų, vykstančių tarp augalo ir jo apsupties, įvairovė pasireiškia kaip augalo fiziologinis atsakas į energinės apykaitos pokyčius augalo apsuptyje. Augalo energijų apykaitos procesų nagrinėjimas išryškino, kad augalo fiziologinis-reguliacinis mechanizmas (augale vykstantys fiziologiniai procesai) reaguoja į termodinaminių parametrų kitimą apsuptyje ir pasireiškia pokyčiais augalo energinėje apykaitoje. Augalo biologinis atsakas į duoto momento energinės apykaitos atvejį augale pasireiškia energijų srautų paskirstymu tarp pagrindinių energijų balanso narių: spindulinės energijos, transpiracijos, konvekcinų šilumos mainų, atskirais atvejais (rūko aplinkoje atvejais) įjungiant bioenerginis procesus, iššaukiančius temperatūrų gradientą tarp augalo organo ir aplinkos.

Augalo lapo masė maža, todėl maži jo sukauptos šilumos kiekiai sukelia ryškius augalo audinių temperatūros pokyčius. Augalas, kovodamas su didėjančia audinių temperatūra, sukauptą saulės energiją, virtusią šiluma, tuoj pat atiduoda augalo aplinkai transpiracijos ir konvekcinų šilumos mainų būdu. Saulėtu paros metu augalo lapo temperatūra yra nuolat kintamos energijų balanso būsenos. Kuo lapas plonesnis, kuo mažesnės jo termoakumuliacinės galimybės, tuo lapo temperatūros kaita didesnė.

Augalo transpiracija – sudėtingas fiziologinis termofizikinis procesas. Jis susideda iš dviejų atskirų procesų. Pirmojo proceso metu augalo sultys kapiliarais juda iki garinančio paviršiaus (fiziologinis procesas), o antruoju – vanduo išgarinamas į aplinką (termofizikinis procesas). Transpiracijos procesas kartu yra ir augalo, ir aplinkos energinės  $Q_3$  apykaitos (energijos ir drėgmės mainų su aplinka termodinaminis) procesas, kuriam galioja termofizikos dėsniai. Transpiracijos procesas nevyks, jei augalas negaus energijos.

Augalas per ilgą vystymosi periodą prisitaikė prie augavietės fizikinės aplinkos (taip pat ir energinės) veiksnių, panaudodamas tam tikrus fiziologinius procesus. Todėl transpiracijos proceso energetikos pokyčiai neatskiriami nuo adekvataus augalo fiziologinių procesų atsako.

Augalo fiziologinė būsena adekvačiai įvertina esamą energinės apykaitos atvejį su aplinka ir optimaliai paskirsto energijų srautus tarp skirtingų energijos rūšių (saulės energijos, vandens garavimo, konvekcinų šilumos mainų ir kai kuriais atvejais – biologinės energijos).

Laikoma, kad pagrindinis drėgmės pašalinimo iš lapo būdas (80–98 %) yra žiotelinė transpiracija. Lapą dengia vaško sluoksniš ir kiti epidermio dariniai. Užsivėrus žiotelėms, lapas gali garinti vandenį pro kutikuloje esančius kanalėlius. Žiotelių varstymasis priklauso nuo saulės spinduliuotės intensyvumo, aplinkos temperatūros ir drėgno, augalo aprūpinimo drėgme ir kitų energinių, fiziologinių veiksnių.

Natūraliomis aplinkos sąlygomis apatinėje lapo pusėje vyksta transpiracija ir šilumos mainai su aplinka, o viršutinėje – konveciniai šilumos mainai. Kutikulinė transpiracija būna labai maža arba visiškai nevyksta. Esant tokioms sąlygoms augalo lapo energijos balanso lygtis (3) ir (4) galima sudaryti taip:

$$abQ_{sp} = aQ_1 = Q_2^{virš} + Q_2^{ap} + Q_3; \quad (5)$$

arba

$$abq_{sp} = aq_1 = q_2^{virš} + q_2^{ap} + q_3; \quad (6)$$

čia:  $Q_2^{virš}$ ,  $Q_2^{ap}$  – šilumos srautas, atiduodamas aplinkai konvekcinų mainų būdu, atitinkamai viršutinės arba apatinės lapo pusės J/s, arba šilumos srauto tankis  $q_2^{virš}$ ,  $q_2^{ap}$  J/(s · m<sup>2</sup>).

Nagrinėjamoju atveju abi lapo pusės (apatinė ir viršutinė) praktiškai turi vienodas aplinkos sąlygas vykdyti konvecinius šilumos mainus (saulės spindulius lapas sugeria visu storiu). Tokiu atveju galima teigti, kad tarp lapo viršutinės ir apatinės pusių didesnio temperatūrų skirtumo nebūna. Remdamiesi šiuo teiginiu galime sudaryti tokias lygtis:

$$Q_2^{virš} = Q_2^{ap}; \quad (7)$$

$$Q_2^{virš} + Q_2^{ap} = 2Q_{2min}; \quad (8)$$

čia:  $Q_{2min}$  – minimalus šilumos srautas  $Q_2$ , sunaudojamas transpiracijos proceso metu aplinkos orui šildyti, kai augalas išgarina 1 kg drėgmės J/s.

Šilumos srautų pasiskirstymą augalo lape nusako transpiracijos skaičius  $S_k$ . Jis rodo: kokia dalis gautos saulės energijos sunaudojama transpiracijai ir kokia aplinkos orui šildyti kiekvienu augalo energinės apykaitos atveju. Transpiracijos skaičius – tai bedimensinis dydis, išreiškiamas lygtimi:

$$S_k = \frac{Q_3}{Q_{2min}}. \quad (9)$$

Nustatyta, kad  $S_k$  priklauso nuo augalo lapo temperatūros ir aplinkos oro parametrų (aplinkos temperatūros  $t_0$  ir santykinio oro drėgno  $\varphi_0$ ) [10]. Transpiracijos skaičiaus  $S_k$  funkcinė priklausomybė nuo matavimo priemonėmis išmatuojamų parametrų bendru atveju išreiškiamą lygtimi:

$$S_k = f(t_0, t_1, \varphi_0); \quad (10)$$

čia:  $\varphi_0$  – santykinis aplinkos oro drėgnis %;

$t_1$  – augalo lapo temperatūra °C;

$t_0$  – aplinkos temperatūros °C.

Naudodamiesi (9) lygtimi transpiracijos skaičiui  $S_k$  apskaičiuoti, (5) lygtį galime perrašyti taip:

$$aQ_1 = \left( \frac{2}{S_k} + 1 \right) Q_3. \quad (11)$$

Irašę išraišką  $Q_3 = wr$ , gauname lygtį, transpiracijos intensyvumui apskaičiuoti:

čia:  $r$  – vandens garavimo šiluma kJ/kg ( $r = 2465$  kJ/kg esant 15 °C);

$w$  – transpiracijos intensyvumas kg/(m<sup>2</sup> · s);

$$w = \frac{aq_1}{\left( \frac{2}{S_k} + 1 \right) r} = \frac{abq_{sp}}{\left( \frac{2}{S_k} + 1 \right) r}. \quad (12)$$

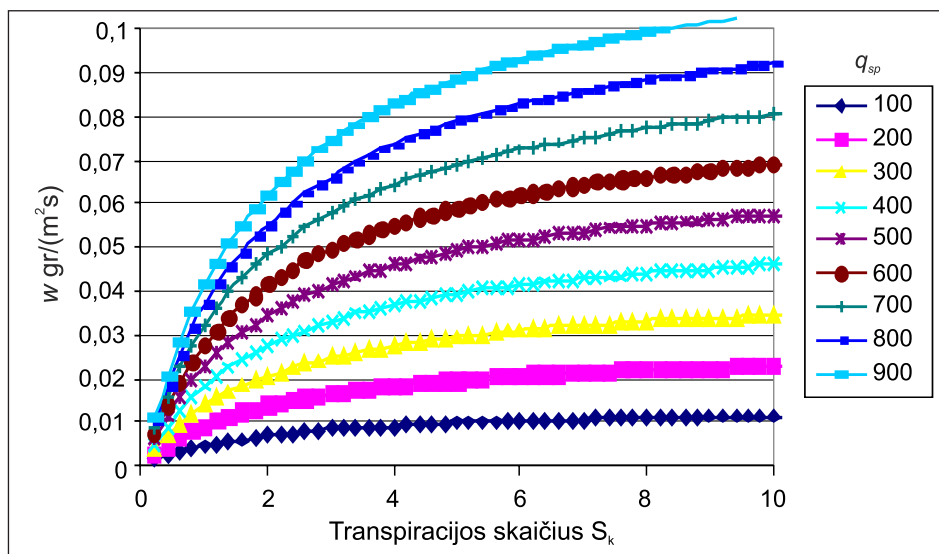
Transpiracijos intensyvumui nustatyti (12) lygtį naudojame tais atvejais, kai vandenį garina viena lapo pusė, kartu dalyvaudama konvekcinuose šilumos mainuose; kita lapo pusė dalyvauja tik konvekcinuose šilumos mainuose su aplinka. Šiam atvejui 1 pav. pateikiame transpiracijos  $w$  intensyvumo priklausomybę nuo transpiracijos skaičiaus  $S_k$  esant tam tikrai saulės integralinei spinduliuotei  $q_{sp}$ .

Transpiracijos intensyvumas ir konveciniai šilumos mainai su aplinka abiejose lapo pusėse būna vienodi termiškai naikinant piktžoles, tada aplinkos temperatūra būna 100–1000 °C. Apie transpiracijos intensyvumą šiuo atveju sprendžiame iš 2 pav. pateiktų duomenų arba lygties:

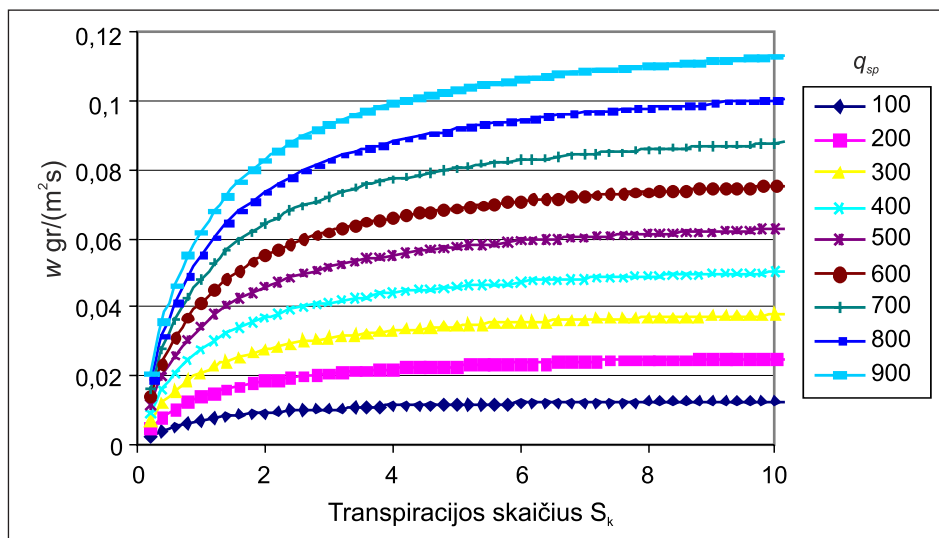
$$w = \frac{aq_1}{\left( \frac{1}{S_k} + 1 \right) r} = \frac{abq_{sp}}{\left( \frac{1}{S_k} + 1 \right) r}. \quad (13)$$

Lygčių (12) ir (13), taip pat 1 ir 2 pav. analizė rodo, kad transpiracijos intensyvumas priklauso nuo dviejų kintamųjų, t. y. lapo absorbuotos integralinės saulės spinduliuotės  $Q_{sp}$  ( $q_{sp}$ ) ir transpiracijos skaičiaus, kuriuo išreiškiamas energijos srautų pasiskirstymo santykis  $S_k = \frac{Q_3}{Q_{2min}}$ . Esant mažoms transpiracijos skaičiaus  $S_k$  reikšmėms (nuo 0 iki 3) nedidelis šio skaičiaus kitimas sukelia nemažus transpiracijos intensyvumo pokyčius.

Kintant skaičiaus  $S_k$  reikšmėms nuo 3 iki 10 ir esant mažiems saulės spinduliuotės srauto pokyčiams mažai keičiasi



1 pav. Transpiracijos intensyvumo  $w$  priklausomybė nuo transpiracijos skaičiaus  $S_k$  esant atitinkamam saulės integralinės spinduliuotės srautui  $q_{sp}$ . Vandenį garina viena lapo pusė



2 pav. Transpiracijos intensyvumo  $w$  priklausomybė nuo transpiracijos skaičiaus  $S_k$  esant tam tikram saulės integralinės spinduliuotės srautui  $q_{sp}$ . Vandenį garina abi lapo pusės

transpiracijos intensyvumas. Remdamiesi I. A. Šulgino duomenimis, apskaičiavę transpiracijos skaičiaus skaitinę vertę, matome, kad jis realiai kinta nuo 0,1 iki 10 [20].

Kaip matome iš balanso lygčių (5) ir (6), augalo energijų mainai su aplinka (transpiracija ir konvekciniai šilumos mainai) yra glaudžiai susiję. Naudodamiesi (9) ir (5) lygčių išraiškėmis, gauname (14) lygtį, nustatyti augalo konvekciniams šilumos mainams su aplinka:

$$Q_2 = \frac{Q_1}{S_k + 1} = \frac{abQ_{sp}}{S_k + 1}. \quad (14)$$

Lygtį (14) arba 3 pav. naudojame tais atvejais, kai abi lapo pusės vienodai garina vandenį ir yra vienodi konvekciniai šilumos mainai su aplinka. Jei transpiracija vyks-

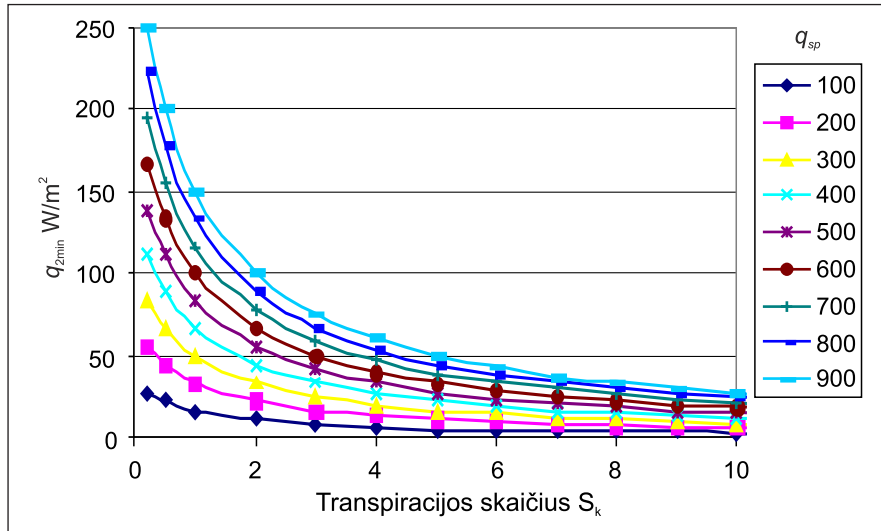
ta tik vienoje augalo lapo pusėje, o konvekciniai šilumos mainai – abiejose, tai šilumą, atiduotą aplinkai konvekcijos būdu, apskaičiuojame pagal lygtį:

$$Q_2 = \frac{Q_1}{S_k + 2} = \frac{abQ_{sp}}{S_k + 2}. \quad (15)$$

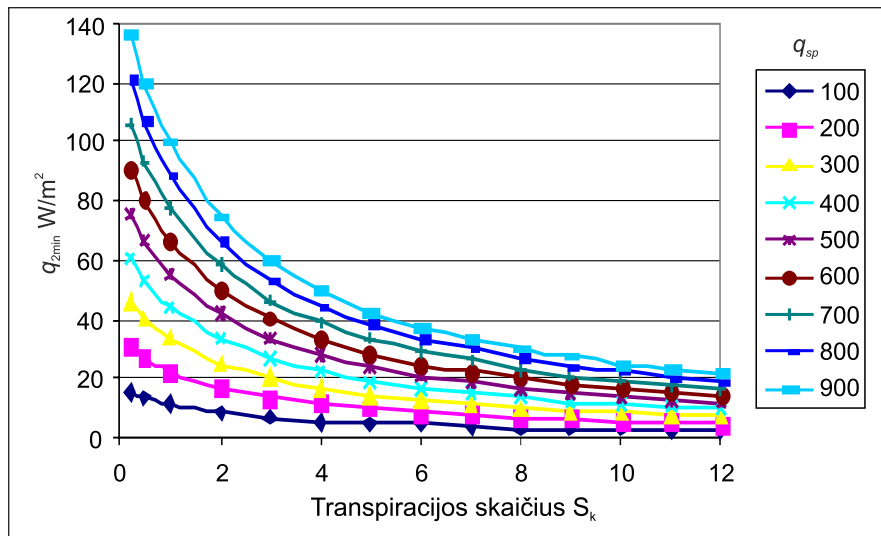
3 ir 4 pav. pateikiame augalo lapo konvekcinių šilumos mainų su aplinka priklausomybę nuo transpiracijos skaičiaus  $S_k$  ir saulės integralinės spinduliuotės srauto  $q_{sp}$ .

Pagal 1, 2, 3 ir 4 pav. pateiktus duomenis galima teigti, kad staigiausi transpiracijos ir šilumos mainų su aplinka pokyčiai pastebimi esant mažoms transpiracijos skaičiaus  $S_k$  reikšmėms. Aptariant šilumos mainų su aplinka duomenis (3, 4 pav.) matyti, kad mažėjant transpiracijos skaičiui





3 pav. Konvekcinų šilumos mainų su aplinka  $q_{2min}$  priklausomybė nuo transpiracijos skaičiaus  $S_k$  esant tam tikram saulės integralinės spinduliuotės srautui  $q_{sp}$ . Vandenį garina abi lapo pusės



4 pav. Konvekcinų šilumos mainų su aplinka  $q_{2min}$  priklausomybė nuo transpiracijos skaičiaus  $S_k$  esant tam tikram saulės integralinės spinduliuotės srautui  $q_{sp}$ . Vandenį garina viena lapo pusė

$S_k$  konvekciniai šilumos mainai su aplinka kinta staigiau. Lygindami transpiracijos intensyvumo (1, 2 pav.) ir konvekcinų šilumos mainų (3, 4 pav.) duomenis, akivaizdžiai matome tiesioginį šių procesų ryšį: vienam didėjant kitas atitinkamai mažėja.

Transpiracijos procesas minimalios energinės apykaitos sąlygomis esant neigiamam efektyviam šiluminiam spinduliavimui vyksta antroje dienos pusėje – mažėjant augalo ir oro temperatūrai. Tai laikotarpis, kai transpiruojančio augalo temperatūra  $t_1$  yra ( $t_{sl} < t_1 < t_0$ ) aukštesnė už šlapio termometro temperatūrą ir žemesnė už aplinkos temperatūrą. Kai augalo energinė apykaita minimali, esant neigiamai ( $-Q_1$ ) spinduliuotei energinio balanso lygtis būtų tokia:

$$Q_3 = Q_2^{virš} + Q_2^{ap} - Q_1. \tag{16}$$

Nagrinėjamoju atveju, kaip ir esant teigiamai efektyviajai spinduliuotei, abi augalo lapo pusės turi vienodas konvekcinų šilumos mainų sąlygas. Tarp lapo viršutinės ir apatinės pusių didesnio temperatūrų skirtumo nėra, todėl konvekcinams šilumos mainams įvertinti taikytinos (7) ir (8) lygtys. Augalo lapas gaunamą šilumą iš aplinkos sunaudoja transpiracijai ir neigiamam efektyviajam spinduliavimui į aplinką. Tokiu atveju balanso lygtį (16) galima sudaryti taip:

$$2Q_2 = Q_1 + Q_3; \tag{17}$$

arba

$$Q_3 = wr = 2Q_2 - Q_1, \quad (18)$$

Remdamiesi transpiracijos skaičiaus  $S_k = \frac{Q_3}{Q_2}$  išraiška, (18) lygtį galime perrašyti taip:

$$w = \frac{Q_1}{\left(\frac{2}{S_k} - 1\right)r}. \quad (19)$$

Transpiracijai nustatyti (19) lygtį naudojame tais atvejais, kai vandenį garina viena lapo pusė.

Tais atvejais, kai transpiracijos procese ir konvekciniuose šilumos mainuose vienodai dalyvauja abi lapo pusės, transpiracijos intensyvumas skaičiuojamas pagal lygtį:

$$w = \frac{Q_1}{\left(\frac{1}{S_k} - 1\right)r}. \quad (20)$$

Saulėtu paros metu augale intensyviausiai vyksta ne tik energinė apykaita, bet ir cikliški biologiniai procesai. Šiuo paros metu vykstančių energijos procesų termodinaminė analizė yra ypač aktuali, nes nagrinėjami veiksniai daro įtaką svarbiausiam Žemėje procesui – asimiliacijai.

Pateikti duomenys leidžia teigti, kad pagrindinis augalo energinės apykaitos rodiklis yra transpiracijos skaičius  $S_k$ , kuriuo nusakomas energijos, sunaudotos transpiracijai ir konvekciniams šilumos mainams su aplinka, santykį ir išreiškiamas (9) lygtimis. Kaip matome iš (10) lygties, transpiracijos skaičius  $S_k$  priklauso nuo augalo aplinkos oro ir lapo paviršiaus oro fizinių parametrų. Transpiracijos skaičius  $S_k$  priklauso nuo aplinkos oro temperatūros  $t_0$ , jos santykinio drėgnumo  $\phi_0$  ir vandenį garinančio lapo paviršiaus temperatūros  $t_1$ .

## IŠVADOS

1. Augalo energijų balanso nagrinėjimas ir vertinimas padeda išryškinti veiksnius, turinčius įtakos augalo energinės apykaitos vyksmui.

2. Pagrindiniu augalo energinės apykaitos rodikliu yra transpiracijos skaičius  $S_k$ , kuris išreiškiamas energijos, sunaudotos transpiracijai ir konvekciniams šilumos mainams su aplinka, santykiu.

3. Staigiausi transpiracijos ir šilumos mainų su aplinka pokyčiai pastebimi esant mažoms transpiracijos skaičiaus  $S_k$  (1–3) reikšmėms.

4. Augalų atiduota aplinkai šiluminė energija, vandens garų ir aplinkos temperatūros pavidalo šiluma, toliau dalyvauja lokalaus mikroklimato sudaryme.

## Literatūra

1. Šlapakauskas V. *Augalų ekofiziologija*. Kaunas: Lututė, 2006. 413 p.
2. Ilkun G. M. *Energetičnij balans roslin*. Kiev, 1967. 234 s.
3. Fitter A., Hay R. *Environmental Physiology of Plants*. Academic Press, 2002. 367 p.
4. Kleschnin A. F. *Die Pflanze und das Licht*. Berlin: Akademie Verlag, 1960. 620 p.
5. Šlapakauskas V., Duchovskis P. *Augalų produktyvumas*. IDP Solutions, 2008. 254 p.
6. Dzenajavičienė E., Pedišius N., Škėma R. *Darni bioenergetika*. Lietuvos energetikos institutas. Kaunas, 2011. 136 p.
7. *Europos aplinka – Būklė ir perspektyvos 2010 m. Apibendrinimas*. EEA, Copenhagen, 2011. 222 p.
8. Brazauskienė D. M. *Agroekologija ir chemija*. Kaunas, 2004. 207 p.
9. Ruseckas J. *Miško ir drėgmės sąveika*. Kaunas: Lututė, 2002. 200 p.
10. Sirvydas A., Kerpauskas P., Kučinskas V. *Augalų energinė apykaita*. Kaunas, Akademija, 2011. 224 p.
11. Brown H. T., Escombe F. Researches on some of the processes of green leaves. *Proceedings of the Royal Society*. 1905. Series B, 76. No. 507. P. 92–118.
12. Stern K. *Pflanzen thermodynamik*. Berlin: Springer, 1933. 412 s.
13. Radčenko S. I. *Temperaturnije gradienti sredi i rastenija*. Moskva: Nauka, 1966. 386 s.
14. Sirvydas A., Kučinskas V., Kerpauskas P., Nadzeikienė J. Theoretical modeling of temperature pulsations in plant leaf which are caused by leaf swing with respect to the sun. *Journal of Environmental Engineering and Landscape Management*. 2011. Vol. 19(3). P. 251–259.
15. Herve C., Lluís C., Xavier R., Thierry A. Unraveling the effects of plant hydraulics on stomatal closure during water stress in walnut. *Plant Physiology*. 2002. Vol. 128. P. 282–290.
16. Sirvydas A., Kučinskas V., Kerpauskas P., Nadzeikienė J., Kusta A. Solar radiation energy pulsations in a plant leaf. *Journal of Environmental Engineering and Landscape Management*. 2010. Vol. 18(3). P. 188–195.
17. Sirvydas A., Kerpauskas P. Energinių procesų agrofito aplinkoje aspektai. *Energetika*. 2006. Nr. 4. P. 9–15.
18. Sirvydas A., Kerpauskas P. *Terminis piktžolių naikinimas*. Kaunas, Akademija: Aleksandro Stulginskio universitetas, 2012. 328 p.
19. Petruševičius V., Raila A. *Augalininkystės produktų džiovinimas storame nejudančiame sluoksnyje*. Akademija, 2009. 262 p.
20. Shulgin I. A. *Solnechnaya radiacija i fotomorfogenez zelionovo rastenija*. Avtoreferat dis. dr. biol. nauk. Leningrad, 1970. 40 s.

Povilas Algimantas Sirvydas, Vidmantas Kučinskas

## BALANCE OF ENERGY TRANSFER IN PLANTS AND ITS ASSESSMENT

### *Summary*

The processes of plant energy transfer are directly related with worldwide scope issues (food and bioenergy), which may be called as solar energy accumulation and its concentration in biological forms. The analysis and assessment of plant energy balances highlight factors which have impact on the process of plant energy transfer. Transpiration No  $S_k$  is the main indicator of plant energy metabolism, which is reflected in the ratio of energy, consumed for transpiration and convection heat exchange with the environment. The most abrupt changes of transpiration and heat exchange with the environment are observed at small values (1–3) of the transpiration number  $S_k$ . Thermal energy released by plants to the environment in the form of water vapour and environment temperature heat participates in the formation of local microclimate.

**Key words:** energy balance of plants, biomass energy, transpiration energy, energy transfer in plants

Повилас Альгимантас Сирвидас, Видмантас Кучинскас

## ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ОБМЕН РАСТЕНИЙ, ЕГО БАЛАНС И ОЦЕНКА

### *Резюме*

Процессы энергетического обмена непосредственно связаны с проблемами мирового масштаба – биоэнергетики, ресурсы питания, которые могут быть обобщены в виде аккумуляций солнечной энергии и ее концентрации в биологической форме. Исследованиями баланса энергии растений выяснены причины влияния на энергетический обмен растений. Основным показателем энергетического обмена является число транспирации  $S_k$ , который определяется соотношением энергии использованной для транспирации и конвективного теплообмена с окружающей средой. Самые резкие изменения транспирации и теплообмена с окружающей средой наблюдается при малых числах транспирации ( $S_k = 1-3$ ). Растениям окружающей среде отдана тепловая энергия в виде водяного пара и тепло окружающей среды участвует в формировании локального микроклимата.

**Ключевые слова:** баланс энергии растения, энергетика биомассы, энергетика транспирации, энергетический обмен растения