

Acta fytotechnica et zootechnica 1
Nitra, Slovaca Universitas Agriculturae Nitriae, 2012, s. 23–28

VYUŽITIE INFRAČERVENEJ TERMOGRAFIE A INDEXOV REFLEKTANCIE LISTU V HODNOTENÍ ÚČINKU OŠETRENIA SLNEČNICE ROČNEJ (*HELIANTHUS ANNUUS* L.) BIOLOGICKY AKTÍVNÝMI LÁTKAMI

UTILIZATION OF INFRARED THERMOGRAPHY AND LEAF REFLECTANCE INDICES IN EVALUATION OF EFFECTS OF THE TREATMENT OF SUNFLOWER (*HELIANTHUS ANNUUS* L.) BY BIOLOGICALLY ACTIVE COMPOUNDS

Marek KOVÁR, Alexandra VEVERKOVÁ, Ivan ČERNÝ

Slovenská poľnohospodárska univerzita v Nitre

The effects of biologically active compounds (Route and Sunagreen) on physiological fitness of three sunflower hybrids (NK Kondi, NK Dolbi a NK Tristan) were carried out during the whole growing season in vegetation polyfactorial experiments. Evaluation of the sunflower physiological fitness was realized by non-destructive technique of measuring the temperature difference (ΔT) with an infrared thermography and simultaneous measurement of the leaf reflectance indices *NDVI* (normalized difference vegetation index) and *PRI* (photochemical reflectance index). In this paper we discuss the ontogenetic changes in the parameters ΔT , *NDVI* and *PRI* with emphasis on changes in weather conditions. We also investigated the potential effects of foliar applied biologically active compounds on plants and sensitivity of sunflower hybrids to their application. The results confirmed the typical ontogenetic changes of individual assessment parameters that reflect the physiological processes of plant during the growing season. In this vegetation period which was characterized by high precipitation in summer, the most sensitive measure parameter was ΔT . All sunflower hybrids significantly ($p < 0.05$) responded to the treatment by Route, particularly in the reproductive stage of ontogeny (in treatment by Route the average ΔT was -4.5 to -5.2 °C and in untreated plants -2.3 to -3.8 °C). This result indicates a greater cooling effect of transpiration and thus a higher stomatal conductivity induced by Route treatment. Sunflower plants treated by Sunagreen showed in ΔT statistically significant response only in hybrid NK Tristan at the last phase of ontogeny. Reflectance indices *NDVI* and *PRI*, which correlate with the photosynthetic efficiency of plants, were proved as the less sensitive parameters describing the effects of biologically active substances on sunflower hybrids. Results showed that the *PRI* index increased during plant ontogeny with a subsequent decrease in the maturing of achenes but we did not observe the statistically significant positive effects of biologically active substances on physiological fitness of sunflower hybrids.

Key words: sunflower, biologically active compounds, reflectance, *PRI*, *NDVI*, infrared thermography, temperature difference

Slnečnica ročná (*Helianthus annuus* L.) je z pestovateľského a spotrebiteľského hľadiska dôležitou olejnatou plodinou. Z fyziologického hľadiska sa vyznačuje toleranciou na sucho (Rachidi et al., 1995), ale vyžaduje optimálnu teplotu prostredia pre rast v prvých fázach ontogenézy a rovnomernú distribúciu zrážok počas celého vegetačného obdobia (Fábry, 1990; Agele, 2003; Černý et al., 2011). Sucho v rastovej perióde slnečnice ročnej a naopak nadbytok pôdnej vody v období dozrievania sa prejavujú na veľkosti úrody a kvality oleja v nažkách (Brandt et al., 2003; Černý et al., 2011).

Intenzifikácia pestovateľskej technológie slnečnice ročnej, rešpektujúca fyziologické potreby hybridov, s úspechom využíva foliárnu aplikáciu biologicky aktívnych látok (BAL) (Ghosh et al., 1991; Tahsin and Kolev, 2005). Biologicky aktívne látky sú substancie, ktoré ovplyvňujú fyziologické a morfogénne procesy rastlín. Väčšina komerčne dostupných BAL je chemicky priradená k rastlinným hormónom, resp. ich chemickým analógom, alebo sú to jednoduché metabolické regulátory (napr. zo skupiny mikrobiogénnych živín), ktoré ovplyvňujú priebeh biochemických reakcií (Arteca, 1995; Oosterhuis and Robertson, 2000). Výsledkom metabolického efektu BAL je ovplyvňovanie akumulácie organickej hmoty prostredníctvom zvyšovania efektívnosti využívania vody, žiarenia a minerálnych živín, cez reguláciu proteosyntézy, uhlíkového metabolizmu, metabolizmu hormonálnych látok, ako aj reguláciu energetických procesov rastliny, dusíkového meta-

bolizmu, syntézy sekundárnych metabolitov a pod. (Guo et al., 1994).

Trendy v manažmente agrotechnických zásahov v modernej rastlinnej produkcii a presnom poľnohospodárstve smerujú k využívaniu nedeštruktívnych metód hodnotenia fyziologického a zdravotného stavu rastlín v poraste. V tomto smere sa uplatňuje najmä technika infračervenej (*IR*) termografie listu a / alebo porastu (Jones et al., 2009; Qiu et al., 2009). Teplota listu sa mení s rýchlosťou transpirácie, ktorá je funkciou prieduchovej vodivosti (gS) (Bunce, 1997; Jones, 1998). Vo svojich predchádzajúcich prácach Jones (1999) ukázal, že meranie gS využitím *IR* termografie významne koreluje s gS meranou klasickou porometrickou technikou. Metóda *IR* termografie listu / porastu je tak vhodným nástrojom hodnotenia správania sa prieduchového aparátu, tiež pre detekciu vodného stresu rastliny, efektívnosti využitia vody, riadenia závlah a pod. (Cohen et al., 2005; Jones, 2004; Jones et al., 2009).

Významnú informáciu o stave fotosyntetického aparátu individuálnych listov alebo celých porastov poskytuje meranie spektrálnych vegetačných indexov (Price and Bausch, 1995; Peñuelas, 1998). Vegetačné indexy hodnotia fotosyntetickú výkonnosť na základe reflektancie žiarenia asimilačným aparátom rastlín v červenej a blízkej infračervenej spektrálnej oblasti. Najčastejšie využívanými reflektančnými indexmi sú parameter *NDVI* (normalized difference vegetation index) a *PRI* (photochemical reflectance index). Parametre sa používajú v rýchlosti

nedeštrukčnom meraní koncentrácie asimilačných pigmentov, obsahu vody v rastline, efektívnosti využitia žiarenia, dusíkatej výživy, stresového stavu rastlín, veľkosti listovej plochy, prípadne na globálnej úrovni pri hodnotení primárnej produkcie porastov diaľkovým prieskumom vegetačného krytu (Peñuelas et al., 1997; Gamon and Qiu, 1997; Gamon and Surfus, 1999; Suaréz et al., 2008).

Cieľom príspevku bolo prostredníctvom moderných nedeštrukčných metód hodnotiť efekty aplikácie biologicky aktívnych látok (Route a Sunagreen) na fyziologickú zdatnosť troch hybridov slnečnice ročnej. V piatich významných rastových etapách rastlín slnečnice ročnej sme kvantifikovali teplotnú diferenciu (ΔT) metódou IR termografie, ako aj dva reflektančné parametre (*NDVI* a *PRI*). V práci diskutujeme ontogenetické zmeny parametrov, ako aj potenciálny efekt BAL Route a Sunagreen na fyziologický stav rastlín a citlivosť jednotlivých hybridov slnečnice ročnej na ich aplikáciu.

Materiál a metódy

Biologický materiál a spôsob pestovania

Poľné polyfaktorové experimenty s dvojlíniovými hybridmi slnečnice ročnej (*Helianthus annuus* L.) NK Kondi, NK Dolbi a NK Tristan (všetky Syngenta) sa realizovali vo vegetačnom období roku 2011 na Experimentálnej báze Strediska biológie a ekológie rastlín FAPZ SPU v Nitre, Dolá Malanta (zemepisná šírka 48° 19' 00"; zemepisná dĺžka 18° 09' 00"; nadmorská výška 175 m n.m.). Experimentálna báza sa zaraďuje do kukuričnej výrobnnej oblasti a klimatologicky je charakterizovaná teplým a mierne suchým podnebíom počas vegetačného obdobia.

Hybridy slnečnice ročnej boli pestované konvenčným agro-technickým spôsobom. Predplodinou bola pšenica letná forma ozimná (*Triticum aestivum* L.). Základné hnojenie bolo uskutočnené na základe agrochemického rozboru pôdy bilančnou metódou na plánovanú úrodu nažiek 3 t.ha⁻¹. Pri základnom obrábaní pôdy bola uskutočnená stredne hlboká orba. V jarnom období bolo aplikované minerálne hnojivo NPK (15 : 15 : 15) v dávke korešpondujúcej 45,0 kg N.ha⁻¹, 19,6 kg P.ha⁻¹ a 37,3 kg K.ha⁻¹. Výsev sa realizoval v prvej dekáde apríla v spon 0,70 × 0,22 m spolu s aplikáciou herbicídu Wing P (BASF), v dávke zodpovedajúcej množstvu 4 l.ha⁻¹. Počas vegetačnej periódy bol dvakrát aplikovaný fungicíd Pictor (BASF) v aplikáčnej dávke 0,5 l.ha⁻¹. Pre charakterizovanie poveternostných podmienok vegetačnej periódy slnečnice ročnej boli analyzované základné meteorologické údaje (priemerná mesačná teplota v °C a mesačný úhrn zrážok v mm) (obr. 1).

Foliárne mikronutričné zinočnaté hnojivo Route (De Sen-gosse Ltd., Cambridge, Veľká Británia) bolo aplikované v rastovej fáze 4. až 6. pravých listov (BBCH 15) v aplikáčnej dávke 0,8 l.ha⁻¹. Foliárna aplikácia rastového biostimulátora Sunagreen (Biosfor, Pardubice, Česká republika) bola uskutočnená v dvoch termínoch v rastovej fáze vyvinutých 4. až 6. pravých listov (BBCH 15.) a vo fáze formovania kvetného puku (BBCH 51), v oboch prípadoch v aplikáčnej dávke 0,5 l.ha⁻¹.

Meranie teploty listu a parametrov reflektancie listu

Teplota listov (porastu) hybridov slnečnice ročnej bola v piatich rôznych rastových fázach (BBCH 14, 16, 53, 65 a 75) meraná za jasných slnečných a bezveterných dní metódou podľa Jones et al. (2009) infračervenou termokamerou EasIR-4 (Bibus AG, Fehrltorf, Švajčiarsko). Termokamera EasIR-4 sníma obraz v spektrálnom rozsahu 8 – 14 μm, s citlivosťou ≤ 0.1 °C a pres-

nosťou ± 2 °C, pričom využíva nechladený FPA mikrobolometer s detektorom v rozlíšení 160 × 120 pixelov. Meranie sa uskutočnilo v čase medzi 11.00 až 13.00 h. Termosnímkami sa snímali diagonálne na spon rastlín slnečnice ročnej zo vzdialenosti cca 2,0 m, z výšky cca 1,5 m, v zornom poli 20,6° × 15,5°, s režimom automatického zaostrovania. Z nameraných teplôt listu a atmosféry sa kalkulovala teplotná diferencia (ΔT v °C) podľa rovnice:

$$\Delta T = T_{leaf} - T_{air}$$

kde:

T_{leaf} – teplota listu

T_{air} – atmosférická teplota

Počas vegetačnej periódy v piatich rôznych rastových fázach (BBCH 14, 16, 53, 65 a 75) v tých istých dňoch, v ktorých sa uskutočnilo meranie teploty listu, boli v čase medzi 11.00 až 13.00 nedeštrukčným spôsobom na listoch rastlín slnečnice ročnej merané reflektančné indexy *NDVI* (normalized difference vegetation index) a *PRI* (photochemical reflectance index). Index *NDVI* sa kvantifikoval prenosným prístrojom PlantPen 300-U (Photon Systems Instruments, Brno, Česká republika), ktorý využíva detekciu odrazeného žiarenia z listu pri vlnových dĺžkach vo viditeľnej (660 nm) a blízkej infračervenej (740 nm) oblasti. *NDVI* sa automaticky vypočítal podľa rovnice:

$$NDVI = \frac{(R_{740} - R_{660})}{(R_{740} + R_{660})}$$

kde:

R_{740} a R_{660} – intenzita odrazeného žiarenia z listu pri vlnových dĺžkach 740 a 660 nm

Index *PRI* sa kvantifikoval prenosným prístrojom PlantPen 200-U (Photon Systems Instruments, Brno, Česká republika), ktorý využíva detekciu odrazeného žiarenia z listu pri vlnových dĺžkach 531 a 570 nm. *PRI* sa automaticky vypočítal podľa rovnice:

$$PRI = \frac{(R_{531} - R_{570})}{(R_{531} + R_{570})}$$

kde:

R_{531} a R_{570} – intenzita odrazeného žiarenia z listu pri vlnových dĺžkach 531 a 570 nm

Štatistické hodnotenie

Polyfaktorový experiment bol založený blokovou metódou s náhodným usporiadaním pokusných členov v troch opakovaniach (Ehrenbergová, 1995). Počas vegetačného obdobia bol v každom opakovaní hodnotený fyziologicky dospelý list (tretí list počítaný od apexu rastliny) desiatich rôznych rastlín slnečnice ročnej. Indexy reflektancie boli merané na liste na desiatich rôznych miestach listovej plochy, postihujúc tak heterogenitu listu. Hodnotenie T_{leaf} a T_{air} bolo uskutočnené spracovaním termosnímkov programom Guide IR Analyser (Bibus AG, Fehrltorf, Švajčiarsko) na desiatich rôznych rastlinách všetkých opakovaní a na desiatich rôznych miestach povrchu listu, resp. atmosféry. Získané experimentálne údaje boli graficky vyhodnotené ako priemer meraní pre každý experimentálny variant s príslušnou smerodajnou odchýlkou. Štatistickú analýzu sme uskutočnili neparametrickým testovaním experimentálnych dát s využitím Kruskal-Wallisovho testu v štatistickom programe Statistica verzia 7 (StatSoft, Inc., Tulsa, Oklahoma, Spojené Štáty Americké).

Výsledky a diskusia

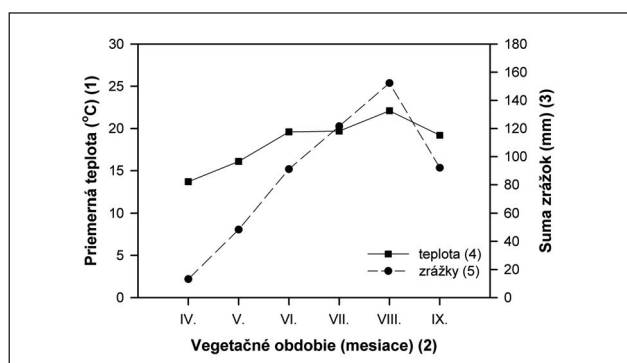
Predchádzajúce práce ukázali (Brandt et al., 2003; Černý et al., 2011), že úroda nažiek slnečnice ročnej, ako aj kvalita ich oleja je silne ovplyvnená faktormi vonkajšieho prostredia, najmä teplotou a dostupnosťou pôdnej vody. Z hľadiska poveternostných podmienok experimentálneho stanovišťa bol vegetačný rok (apríl až september) 2011 charakteristický vysokým úhrnom zrážok, najmä v reprodukčnom období slnečnice ročnej, t. j. v čase kvitnutia až dozrievania nažiek (obr. 1). Úhrn zrážok za vegetačné obdobie roka 2011 predstavoval 518,7 mm, pričom v mesiacoch jún, júl a august to bolo 365,0 mm, čo bolo 70,0 % celého vegetačného úhrnu. Priemerná teplota na stanovišti za vegetačné obdobie slnečnice ročnej bola 18,4 °C. Keďže slnečnica ročná predstavuje plodinu s vysokými nárokmi najmä na rovnomernosť distribúcie dostupnosti pôdnej vody (Fábry, 1990; Černý et al., 2011, tento environmentálny efekt sa prejavil na fyziologickom stave rastliny.

Je známe, že regulácia otvorenosti prieduchového aparátu (prieduchová vodivosť gS) dobre reflektuje environmentálne stresové situácie, najmä nedostatok vody, vysokú teplotu a chlad. Vodivosť prieduchového aparátu pre vodu a CO₂ je tiež ovplyvňovaná vlhkosťou atmosféry, rýchlosťou prúdenia vzduchu a intenzitou ožiarenia listu (Bunce, 1997). Regulácia prieduchovej vodivosti ovplyvňuje rýchlosť transpirácie rastlín (Jones, 1998). Je známe, že transpirácia svojím efektom evaporačného ochladzovania výrazne mení povrchovú teplotu listu (resp. porastu), čo vo svojej práci už začiatkom šesťdesiatych rokov diskutovali Monteith a i. (Monteith and Szeicz 1962). S rozvojom infračervenej termometrie sa diaľkové a nedeštrukčné meranie teploty listu / porastu stalo ľahkým nástrojom identifikácie fyziologického stavu rastliny (pre teoretický koncept a praktické aplikácie najmä Jones et al., 2009 alebo Qiu et al., 2009). Zatváranie prieduchov a teda zníženie rýchlosti transpirácie vedie k zvyšovaniu teploty povrchu listu. Tento efekt sa potenciálne prejavuje zvýšením teploty listu nad okolitú teplotu atmosféry. Na druhej strane, intenzívne transpirujúci povrch má nižšiu povrchovú teplotu ako okolité prostredie. Najjednoduchším a najrozšírenejším vyjadrením týchto rozdielov je kalkulácia teplotnej diferencie ΔT , ktorá predstavuje rozdiel

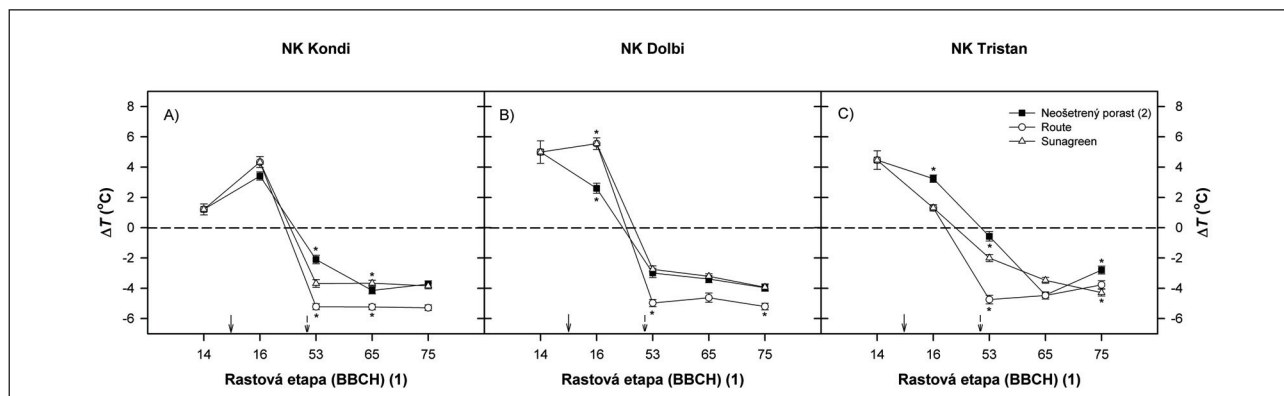
medzi teplotou listu a teplotou okolitého prostredia rastliny. Pretože ΔT je priamo ovplyvnená mnohými fyziologickými procesmi rastliny, je dobrým indikátorom biologickej zdatnosti genotypu v danom prostredí. Ako vo svojej práci zistili Reynolds et al. (1998), parameter teplotnej diferencie ukázal na vysokú genetickú koreláciu s úrodou, a preto je tento parameter možné využiť tiež ako nepriame selekčné kritérium.

Prístup hodnotenia fyziologického stavu rastlín slnečnice ročnej troch hybridov po aplikácii dvoch biologicky aktívnych látok (Route a Sunagreen) na základe ΔT sme využili aj v našich experimentoch a výsledky sú prezentované na obr. 2. V 14. rastovej etape (BBCH) sme pri všetkých troch hybridoch slnečnice ročnej zistili hodnoty ΔT vyššie ako 0,0 °C. Štatisticky preukazne ($p < 0,05$) najnižšiu ΔT v tejto rastovej fáze dosiahol hybrid NK Kondi na úrovni $1,21 \pm 0,36$ °C v porovnaní s hybridmi NK Tristan ($4,46 \pm 0,61$ °C) a NK Dolbi ($4,99 \pm 0,74$ °C). Z uvedeného je možné konštatovať, že juvenilné rastliny hybridu NK Kondi dosiahli vyššiu rýchlosť transpirácie (a potenciálne vyššiu gS) ako ďalšie dva hybridy. V 16. rastovej etape podľa BBCH (po aplikácii BAL) pri hybride NK Kondi sa zvýšila DT (na priemernú úroveň $4,02 \pm 0,33$ °C) v porovnaní s neošetrenými rastlinami; so štatisticky nepreukaznými rozdielmi (obr. 2A). V tejto rastovej fáze neošetrené hybridy NK Dolbi a NK Tristan znížili DT (štatisticky signifikantne pri NK Dolbi). Pri hybride NK Tristan aplikácia prípravkov Route a Sunagreen znížila ΔT v porovnaní s neošetrenými rastlinami, čo vedie k záveru, že hybrid v tejto rastovej etape pozitívne reagoval na aplikované BAL (obr. 2C). Úroveň ΔT v neskorších rastových etapách (BBCH 53. až 75.) bola ovplyvnená vysokým úhrnom zrážok, kedy sme vo všetkých variantoch zaznamenali pokles ΔT pod hodnotu 0,0. Tento výsledok poukazuje na výrazný ochladzovací efekt transpirácie a tak vysoký obsah vody v rastline (Jones et al., 2009). V týchto rastových štádiách sa pozitívne prejavila aplikácia prípravku Route s obsahom zinku, pretože sme vo všetkých troch hybridoch identifikovali štatisticky preukazne ($p < 0,05$) najnižšie hodnoty ΔT (v priemernom intervale okolo -4,5 až -5,2 °C). Aplikácia prípravku Sunagreen sa prejavila na ΔT pri hybride NK Tristan, a to najmä v posledných rastových etapách (obr. 2C).

Podobne ako teplota listu, aj kvalitatívne charakteristiky fotosyntetického aparátu (najmä koncentrácia asimilačných pigmentov a aktivita primárnych fotosyntetických reakcií) umožňujú popísať fyziologický stav rastliny. Pigmenty listu sa vyznačujú vysoko diferencovanou absorpciou v spektrálnej oblasti fotosynteticky aktívneho žiarenia (FAR) (chlorofyly, xantofyly a karotenoidy), ale nie v blízkej infračervenej oblasti (NIR). Z uvedeného je zřejmé, že list sa vyznačuje slabým odrazom (reflektanciou) v oblasti FAR, ale vysokým odrazom v oblasti NIR. Je dlhodobo známe, že kompozícia asimilačných pigmentov, fotosyntetická aktivita, ako aj veľkosť listovej plochy modulujú reflektanciu listu (porastu), čo umožňuje hodnotiť vegetačné indexy, ktoré sú pozitívne korelované s fyziologickou aktivitou rastliny (Price and Bausch, 1995; Peñuelas, 1998). Medzi najčastejšie, v praxi využívané vegetačné indexy sa zaraďuje parameter *NDVI* (Hilker et al., 2008), ktorý sa využíva na nedeštrukčné hodnotenie koncentrácie chlorofylov (Gamon a Surfus, 1999), obsahu vody v rastline (Peñuelas et al., 1997), prípadne na globálnej úrovni pri hodnotení primárnej produkcie porastov (Gamon and Qiu, 1997). Naše merania úrovne *NDVI* dospelého listu počas vegetačnej periódy hybridov slnečnice ročnej ukázali typickú sezónnu dynamiku bez štatisticky preukazných ($p < 0,05$) rozdielov medzi jednotlivými hybridmi slnečnice ročnej v intervale priemerných zmien (od $-0,044 \pm 0,006$ pri neošetrenom



Obrázok 1 Priebeh priemernej mesačnej teploty v °C a mesačný úhrn zrážok v mm počas vegetačnej periódy roku 2011 na Experimentálnej báze Strediska biológie a ekológie Nitra – Dolná Malanta
Figure 1 Development of the mean monthly air temperature in °C and the total monthly precipitation in mm during the vegetation period in 2011 on the Experimental base of the Centre of biology and ecology Nitra – Dolná Malanta
 (1) average temperature in °C, (2) vegetation period (month), (3) sum of precipitation in mm, (4) temperature, (5) precipitation

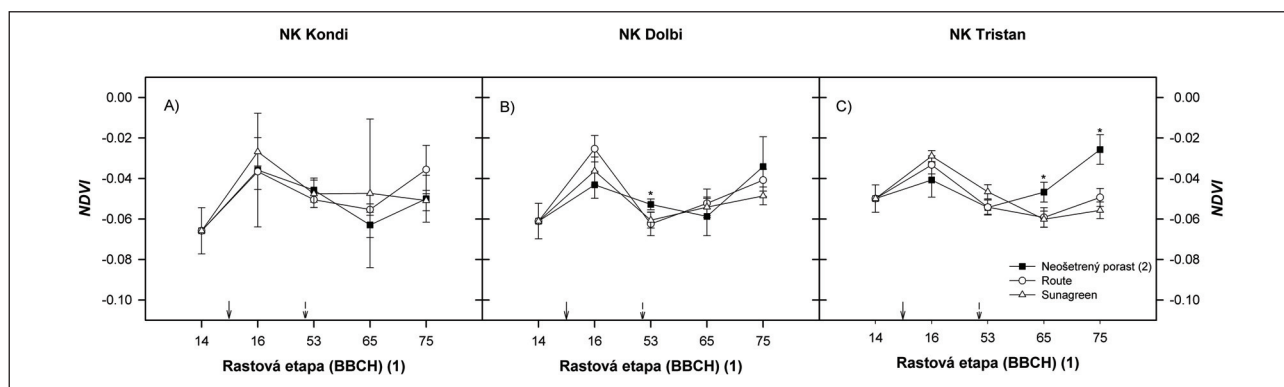


Obrázok 2 Vplyv aplikácie biologicky aktívnych látok na teplotnú diferenciu (ΔT) medzi teplotou listu (T_{leaf}) a teplotou atmosféry (T_{air}) počas vegetačného obdobia (BBCH) v hybridoch slnečnice ročnej NK Kondi A), NK Dolbi B) a NK Tristan C). T_{leaf} a T_{air} bola kvantifikovaná infračervenou termografiou

Figure 2

Effect of application of the biologically active compounds on temperature difference (ΔT) between leaf temperature (T_{leaf}) and air temperature (T_{air}) during vegetation period (BBCH) in sunflower hybrids NK Kondi A), NK Dolbi B) a NK Tristan C). T_{leaf} and T_{air} were measured by infrared thermography

■ – non-treated variant, ○ – Route, △ – Sunagreen. Solid arrow shows an application time of Route and Sunagreen and dash arrow shows a second application time of Sunagreen. Individual point means \pm SE ($n = 30$). * denotes statistically significant difference ($p < 0.05$) (1) growth stage (BBCH), (2) non-treated plant



Obrázok 3 Vplyv aplikácie biologicky aktívnych látok na $NDVI$ počas vegetačného obdobia (BBCH) v hybridoch slnečnice ročnej NK Kondi A), NK Dolbi B) a NK Tristan C)

Figure 3

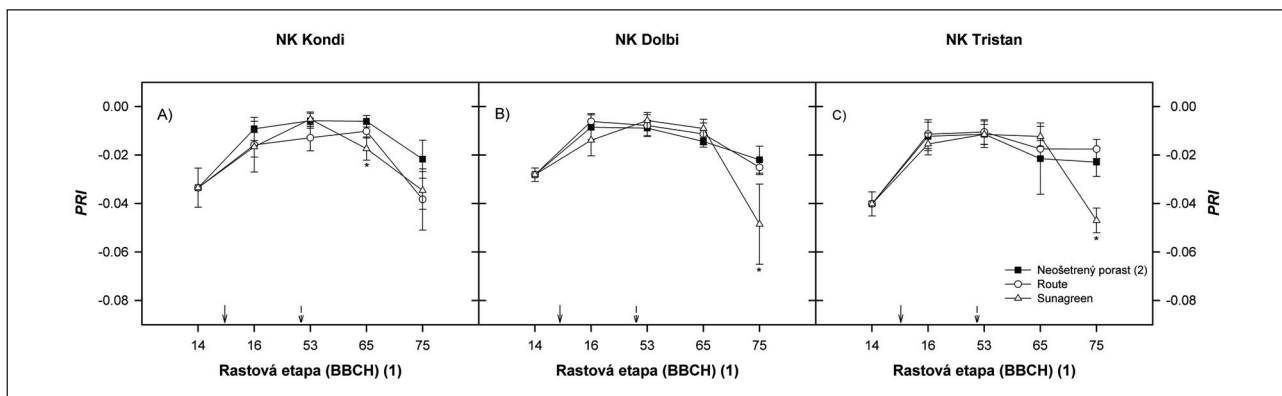
Effect of application of the biologically active compounds on $NDVI$ during vegetation period (BBCH) in sunflower hybrids NK Kondi A), NK Dolbi B) a NK Tristan C)

■ – non-treated variant, ○ – Route, △ – Sunagreen. Solid arrow shows an application time of Route and Sunagreen and dash arrow shows a second application time of Sunagreen. Individual point means \pm SE ($n = 30$). * denotes statistically significant difference ($p < 0.05$) (1) growth stage (BBCH), (2) non-treated plant

hybride biologicky aktívnymi látkami NK Tristan, cez $-0,050 \pm 0,008$ v hybride NK Dolbi až po $-0,052 \pm 0,013$ pri hybride NK Kondi) (obr. 3). Zvýšené hodnoty $NDVI$ a ich nárast počas vegetačného obdobia poukazujú na nárast fotosyntetickej výkonnosti listu (Gamon et al., 1997). Je pozoruhodné, že štatisticky preukazne ($p < 0,05$) sa pozitívne prejavila aplikácia prípravku Route, aj to len v prípade juvenilných rastlín hybridu NK Dolbi (obr. 3B) a potom počas dozrievania nažiek hybridu NK Kondi (obr. 3A). Pri hybride NK Tristan sme zaznamenali v reprodukčnej etape ontogenézy štatisticky významný ($p < 0,05$) pokles parametra $NDVI$ po aplikácii oboch prípravkov BAL (obr. 3C). Z týchto výsledkov je zrejmé, že počas druhej polovice vegetačného obdobia v dôsledku dostatočnej pôdnej vodnej zásobenosti sa biologicky aktívne látky fyziologicky neprejavili na úrovni aktívacie procesov podporujúcich koncentráciu a aktivitu fotosyntetických pigmentov, tak ako

to pozorovali počas stresových situácií Guo et al. (1994) alebo tiež Oosterhuis a Robertson (2000).

Rutinné hodnotenie celkovej fotosyntetickej výkonnosti rastlín a porastu slnečnice ročnej sa môže uskutočňovať tiež prostredníctvom merania reflektancie listu v okolí vlnových dĺžok 530 nm (Gamon et al., 1990). Fotochemický index reflektancie PRI , ktorý do ekofyziológie zaviedli Gamon et al. (1992), odráža zmeny v obsahu pigmentu zeaxantín a je korelovaný s efektívnosťou využitia žiarenia (Gamon et al., 1997), ale aj s aktivitou primárnych fotochemických reakcií, špeciálne v podmienkach sucha (Suaréz et al., 2008). Obr. 4 ukazuje priebeh zmien PRI dospelého listu počas vegetačnej periódy hybridov slnečnice. Rastliny neošetrené biologicky aktívnymi látkami Route a Sunagreen ukázali štatisticky nevýznamné ($p < 0,05$) rozdiely v PRI medzi jednotlivými hybridmi, s typickými zmenami počas ontogenézy (nárast v prostrednej časti vegetačného



Obrázok 4 Vplyv aplikácie biologicky aktívnych látok na *PRI* počas vegetačného obdobia (BBCH) v hybridoch slnečnice ročnej NK Kondi A), NK Dolbi B) a NK Tristan C)

■ – neošetrený variant, ○ – Route, △ – Sunagreen. Plná šípka ukazuje na termín aplikácie Route + Sunagreen, prerušovaná šípka ukazuje termín druhej aplikácie prípravku Sunagreen. Jednotlivé body predstavujú priemer \pm SE ($n = 30$) ($p < 0,05$)

Figure 4 Effect of application of the biologically active compounds on *PRI* during vegetation period (BBCH) in sunflower hybrids NK Kondi A), NK Dolbi B) a NK Tristan C)

■ – non-treated variant, ○ – Route, △ – Sunagreen. Solid arrow shows an application time of Route and Sunagreen and dash arrow shows a second application time of Sunagreen. Individual point means \pm SE ($n = 30$). * denotes statistically significant difference ($p < 0,05$)

obdobia s následným poklesom v dôsledku senescenčných zmien počas periódy dozrievania), s priemernou úrovňou $-0,015 \pm 0,005$ pri hybride NK Kondi, ďalej $-0,016 \pm 0,009$ pri hybride NK Dolbi a $-0,022 \pm 0,007$ pri hybride NK Tristan. Pri prechode z juvenilného štádia rastlín (BBCH 14.) do fázy dospelosti (BBCH 53.) sa index *PRI* zvýšil štatisticky vysoko preukazne ($p < 0,01$) v priemere od $-0,034 \pm 0,014$ na úroveň $-0,009 \pm 0,004$, čo poukazuje na nárast fotochemickej aktivity. V tomto období sme však nepozorovali štatisticky významné rozdiely v *PRI* po aplikácii biologicky aktívnych látok, okrem hybridu NK Dolbi, pri ktorom aplikácia prípravku Sunagreen negatívne ovplyvnila fotochemickú aktivitu (menší nárast *PRI* v porovnaní s aplikáciou prípravku Route a neošetrenými rastlinami) (obr. 4B). Štatisticky preukazný ($p < 0,05$) pokles parametra *PRI* sme pozorovali po aplikácii prípravku Sunagreen v terminálnej fáze vegetačného obdobia, najmä pri hybridoch NK Dolbi (obr. 4B) a NK Tristan (obr. 4C).

Na základe zistených výsledkov reflektancie listu (parametre *NDVI* a *PRI*) môžeme konštatovať, že v období dostatočnej zásoby pôdnej vody sa neprejavil deklarovaný efekt fenolických zlúčenín prípravku Sunagreen (kyselina 2-aminobenzoová a kyselina 2-hydroxybenzoová) na syntézu asimilačných pigmentov v listoch zvolených hybridov slnečnice ročnej. Naopak, v danom pestovateľskom ročníku sa na zvýšení biologickej zdatnosti rastlín slnečnice, detekovanej prostredníctvom reflektančných indexov, podieľal zinočnatý prípravok Route. Keďže sa predpokladá, že obe použité BAL sa prejavujú najmä v nepriaznivých pestovateľských ročníkoch, je nevyhnutné ďalej pokračovať v overovaní opodstatnenosti aplikácie prípravkov, aj prostredníctvom zvolených ekofyziologických prístupov (teplota listu, indexy *NDVI* a *PRI*) v ďalšom výskume.

Záver

V práci popisujeme efekty biologicky aktívnych látok obsiahnutých v prípravkoch Route a Sunagreen na hybridy rastliny slnečnice ročnej NK Kondi, NK Dolbi a NK Tristan. Fyziologickú zdatnosť hybridov hodnotíme využitím moderných nedeštruktívnych metód, ktoré majú tesný vzťah k základným fyziologickým procesom rastlín. Prvým prístupom je kvantifikácia parametra teplotnej diferencie ΔT (rozdiel medzi teplotou listu a teplotou okolia rastliny, oba parametre merané infračervenou termogra-

fiou). Efektivitu účinku použitých biologicky aktívnych látok sme kvantifikovali aj využitím reflektančných indexov *NDVI* a *PRI*. Na základe pozorovaných výsledkov zmien parametra ΔT v dôsledku aplikovaných biologicky aktívnych preparátov môžeme konštatovať, že neinvázna metóda infračervenej termografie poskytuje štatisticky preukazné informácie o efektívite použitého prípravku Route vo všetkých hybridoch slnečnice ročnej. Využitie reflektančných indexov *NDVI* a *PRI* sa napriek pozorovaným zmenám indukovaných prirodzenou ontogéznou hybridov slnečnice ročnej počas vegetačného obdobia, ukázalo ako štatisticky málo citlivé pre popisovanie efektivity použitých biologicky aktívnych látok pre zlepšenie fyziologickej zdatnosti.

Súhrn

V polyfaktorovom vegetačnom experimente uskutočnenom s dvojlíniovými hybridmi slnečnice ročnej (NK Kondi, NK Dolbi a NK Tristan) bol počas celého vegetačného obdobia hodnotený účinok dvoch prípravkov biologicky aktívnych látok (Route a Sunagreen) na fyziologickú zdatnosť rastlín. Hodnotenie sme uskutočňovali nedeštruktívnu technikou merania teplotnej diferencie (ΔT) s infračervenou termokamerou, spolu s meraním indexov reflektancie listu *NDVI* (normalized difference vegetation index) a *PRI* (photochemical reflectance index). V práci diskutujeme ontogenetické zmeny parametrov ΔT , *NDVI* a *PRI* s dôrazom na priebeh meteorologických činiteľov počas vegetačnej periódy (teplota, zrážky), ako aj potenciálny efekt biologicky aktívnych prípravkov a citlivosť jednotlivých hybridov slnečnice ročnej na ich aplikáciu. Počas vegetačného obdobia všetkých hybridov sme pozorovali typické ontogenetické zmeny jednotlivých parametrov, ktoré odrážajú fyziologické procesy plodiny. V danom vegetačnom roku, charakterizovanom vysokým úhrnom zrážok v letnom období, najcitlivejším parametrom bolo ΔT . Všetky tri hybridy štatisticky signifikantne ($p < 0,05$) reagovali na ošetrovanie prípravkom Route, najmä v reprodukčnej fáze po odkvitnutí (priemer po aplikácii Route na úrovni $-4,5$ až $-5,2$ °C a pri neošetrených rastlinách na úrovni $-2,3$ až $-3,8$ °C). Tento výsledok ukazuje na vyšší ochladzovací efekt transpirácie a teda vyššiu prieduchovú vodivosť indukovanú prípravkom Route. Prípravok Sunagreen sa na ΔT štatisticky preukazne prejavil len v poslednom štádiu ontogézy hybridu NK Tristan.

Reflektančné indexy *NDVI* a *PRI*, ktoré korelujú s fotosyntetickou výkonnosťou rastlín, sa ukázali ako menej citlivé parametre v charakterizácii efektov prípravkov biologicky aktívnych látok na hybridy slnečnice ročnej. Zaznamenali sme, že index *PRI* sa počas ontogenézy zvyšoval s následným poklesom počas dozrievacej fázy, ale nepozorovali sme štatisticky preukazné pozitívne účinky oboch biologicky aktívnych látok.

Kľúčové slová: slnečnica ročná, biologicky aktívne látky, reflektancia, *PRI*, *NDVI*, infračervená termografia, teplotná diferenciacia

Podakovanie

Práca bola finančne podporená projektom VEGA číslo 1/0388/09/8 s názvom „Racionalizácia pestovateľského systému slnečnice (*Helianthus annuus* L.) v podmienkach klimatickej zmeny“.

Literatúra

- AGELE, S.O. 2003. Response of sunflower to weather variations in a tropical rainforest zone. In: African Crop Science, vol. 6, 2003, p. 1 – 8.
- ARTECA, R.N. 1995. Plant growth substances: principles and applications. Springer, 1995, 332 p.
- BRANDT, S.A. – NIELSEN, D.C. – LAFOND, G.P. – RIVELAND, N.R., 2003. Oilseed crops for semiarid cropping systems in the northern great plains. In: Agronomy Journal, vol. 94, 2003, p. 231 – 240.
- BUNCE, J.A. 1997. Does transpiration control stomatal responses to water pressure deficit? In: Plant Cell Environment, vol. 20, 1997, p. 131 – 135.
- COHEN, Y. – ALCHANTIS, V. – MERON, M. – SARANGA, Y. – TSIPRIS, J. 2005. Estimation of water potential by thermal imagery and spatial analysis. In: Journal of Experimental Botany, vol. 56, 2005, p. 1843 – 1852.
- Černý, I. – Veverková, A. – Kovár, M. – Pačuta, V. – Molnárová, J. 2011. Influence of temperature and moisture conditions of locality on the yield formation of sunflower (*Helianthus annuus* L.). In: Acta Universitatis Agriculturae et Silviculturae Mendelianae Brunensis, vol. 59, no. 6, 2011, p. 99 – 104.
- Ehrenbergerová, J. 1995. Zakládání a hodnocení pokusu. Brno : MZLU, 1995, 109 s. ISBN 80-7157-153-9
- FÁBRY, A. 1990. Jarné olejniny. Praha : MZaV ČR, 240 s.
- GAMON, J.A. – FIELD, C.B. – BILGER, W. – BJÖRKMANN, O. – FREDEEN, A.L. – PEÑUELAS, J. 1990. Remote-sensing of the xanthophyll cycle and chlorophyll fluorescence in sunflower leaves and canopies. In: Oecologia, vol. 85, 1990, p. 1 – 7.
- GAMON, J.A. – QIU, H. L. 1997. Ecological applications of remote sensing at multiple scales. In: Pugnaire, F.I. – VALLADARES, F. (eds.) Handbook of functional plant ecology. New York, USA : Marcel Dekker, 1997, p. 805 – 846.
- GAMON, J.A. – PEÑUELAS, J. – FIELD, C.B. 1992. A narrow waveband spectral index that tracks diurnal changes in photosynthetic efficiency. In: Remote Sensing of Environment, vol. 41, 1992, p. 35 – 44.
- GAMON, J.A. – SERRANO, L. – SURFUS, J.S. 1997. The photochemical reflectance index: an optical indicator of photosynthetic radiation use across species, functional types and nutrient levels. In: Oecologia, vol. 112, 1997, p. 492 – 501.
- GAMON, J.A. – SURFUS, J.S. 1999. Assessing leaf pigment content and activity with a reflectometer. In: New Phytologist, vol. 143, 1999, p. 105 – 117.
- GHOSH, R.K. – MANDAL, B. – CHATTARJEE, B.N. 1991. Effect of growth regulators on the productivity of some oilseed crops. In: Journal of Agronomy and Crop Science, vol. 167, 1991, p. 221 – 228.
- GUO, C. – OOSTERHUIS, D.M. – ZHAO, D. 1994. Enhancing mineral nutrient uptake of cotton plants with plant growth regulators. In: Tworkoski, J.T. (Ed.) Proc. 21st Annual Meet. Plant Growth Regulator Society of America, Portland, Orlando. 3 – 6 Aug. 1994, p. 244 – 251.
- HILKER, T. – COOPS, N.C. – WULDER, M.A. – BLACK, T.A. – GUY, R.D. 2008. The use of remote sensing in light use efficiency based models of gross primary production: A review of current status and future requirements. In: Science of the Total Environment, vol. 404, 2008, p. 411 – 423.
- JONES, H.G. – SERRAJ, R. – LOVEYS, B.R. – XIONG, L. – WHEATON, A. – PRICE, A. 2009. Thermal infrared imaging of crop canopies for the remote diagnosis and quantification of plant responses to water stress in field. In: Functional Plant Biology, vol. 36, 2009, p. 978 – 989.
- JONES, H.G. 1998. Stomatal control of photosynthesis and transpiration. In: Journal of Experimental Botany, vol. 49, 1998, p. 387 – 398.
- JONES, H.G. 1999. Use of thermography for quantitative studies of spatial and temporal variation of stomatal conductance over leaf surfaces. In: Plant, Cell & Environment, vol. 22, 1999, p. 1043 – 1055.
- JONES, H.G. 2004. Application of thermal imaging and infrared sensing in plant physiology and ecophysiology. In: Advances in Botanical Research, vol. 41, 2004, p. 107 – 163.
- MONTEITH, J.L. – SZEICZ, G. 1962. Radiative temperature in the heat balance of natural surfaces. In: Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, vol. 88, 1962, p. 496 – 507.
- OOSTERHUIS, D. – ROBERTSON, W.C. 2000. The use of plant growth regulators and other additives in cotton production. In: AAES Special Report 198, Proceedings of the 2000 Cotton Research Meeting, 2000, p. 22 – 32.
- PEÑUELAS, J. – PIÑOL, J. – OGAYA, R. – FILELLA, I. 1997. Estimation of plant water concentration by the reflectance water index *Wi* (R900/R970). In: International Journal of Remote Sensing, vol. 18, 1997, p. 2869 – 2875.
- PEÑUELAS, J. 1998. Visible and near-infrared reflectance techniques for diagnosing plant physiological status. In: Trends in Plant Science, vol. 3, 1998, p. 151 – 156.
- PRICE, J.C. – BAUSCH, W.C. 1995. Leaf-area index estimation from visible and near-infrared reflectance data. In: Remote Sensing of Environment, vol. 52, 1995, p. 55 – 65.
- QIU, G.Y. – OMASA, K. – SASE, S. 2009. An infrared-based coefficient to screen plant environmental stress: concept, test and applications. In: Functional Plant Biology, vol. 36, 2009, p. 990 – 997.
- RACHIDI, F. – KIRKHAM, M.B. – STONE, L.R. – KANEMASU, E.T. 1993. Soil water depletion by sunflower and sorghum under rainfed conditions. In: Agricultural Water Management, vol. 24, 1993, p. 49 – 62.
- REYNOLDS, M.P. – SINGH, R.P. – IBRAHIM, A. – AGEEB, O.A.A. – LARQUÉ-SAAVEDRA, A. – QUICK, J.S. 1998. Evaluating physiological traits to complement empirical selection for wheat in warm environments. In: Euphytica, vol. 100, 1998, p. 84 – 95.
- SUARÉZ, L. – ZARCO-TEJADA, P.J. – SEPULCRE-CANTO, G. – PEREZ-PRIEGO, O. – MILLER, J.R. – JIMENEZ-MUNOZ, J.C. – SOBRINO, J. 2008. Assessing canopy PRI for water stress detection with diurnal airborne imagery. In: Remote Sensing of Environment, vol. 112, 2008, p. 560 – 575.
- TAHSIN, N. – KOLEV, T. 2005. Investigation on the effect of some plant growth regulators on sunflower. In: Journal of Central European Agriculture, vol. 6, 2005, p. 583 – 586.

Kontaktná adresa:

Ing. Marek Kovár, PhD., SPU v Nitre, Katedra fyziológie rastlín, Tr. A. Hlinku 2, 949 76 Nitra, e-mail: marek.kovar@uniag.sk; doc. Ing. Ivan Černý, PhD., SPU v Nitre, Katedra rastlinnej výroby, Tr. A. Hlinku 2, 949 76 Nitra, e-mail: ivan.cerny@uniag.sk