

METODIKA ANALÝZY VODNÍHO STRESU TRAVNÍHO POROSTU

Renata Duffková, Jiří Kučera

Abstract

METHOD OF THE ANALYSIS OF WATER STRESS IN GRASSLAND

The method of the analysis of water stress in grassland is described that uses water stress indicators based on atmospheric meteorological factors and vegetation characteristics. The proposed indicators are daily values of: relative evapotranspiration (ratio of actual evapotranspiration ETA to potential evapotranspiration according to Penman), Bowen ratio (β) and the difference between maximum temperatures of the ground and air at a height of 2 m. ETA was calculated by the method of energy balance and β was derived from the theory of turbulent diffusion, applying the height gradient of air temperature and water vapour pressure. The suitability of water stress indicators will be evaluated by comparison of their values with the values of soil water potential. The instruments providing all input data are described.

Keywords: method of energy balance, Bowen ratio, relative evapotranspiration, vegetation surface temperature, air temperature, water stress, grassland

1. Úvod

Vodní stres rostlin je stav, kdy rostliny redukují využití radiční energie na transpiraci následkem omezené zásoby půdní vody, která limituje hydraulickou vodivost pro transport vody z půdy do atmosféry. Rostliny z důvodu sníženého listového potenciálu přivírají průduchy, takže nemohou účinně ochlazovat svůj povrch a následně redukují fotosyntetickou produkci. Dopadající sluneční energie je spotřebována především na ohřev vzduchu a porostu a ochlazování povrchu rostlin probíhá převážně vyzařováním tepelné energie. Vedlejším projevem tohoto stavu je snížení schopnosti rostlinného pokryvu vyrovnávat teplotní rozdíly vzduchu mezi dnem a nocí (Procházka a kol. 2001).

Vodní stres je možné stanovit měřením půdního vodního potenciálu, které však patří k všeobecně nákladným a komplikovaným metodám zjišťování stavu vodního režimu půd. V případě hlubokořeňících rostlin a kamenitých půd je těžko použitelná. Proto byly navrženy indikátory vycházející z atmosférických meteorologických činitelů a charakteristik porostu, jejichž hodnoty jsou v období vodního stresu ovlivněny zvyšujícím se odporem vegetačního povrchu pro přenos vodní páry v důsledku uzavírání průduchů. Jedná se o hodnoty rozdílu maximální denní teploty vegetačního povrchu a vzduchu ve 2 m nad povrchem (rozdíl teplot), relativní evapotranspirace (ET_{rel}) a Bowenova poměru (β).

Zejména rozdíl teplot je dnes zavedením infračervených čidel snadno stanovitelnou charakteristikou a všeobecně uznávaným indikátorem dostupnosti vody pro porost (např. Olufayo et al., 1994, Jackson et al., 1977, 1981; Keener, Kircher, 1983 a Paw U, 1984). Důležitým hodnotícím kritériem, které přistupuje k vymezení vodního stresu pomocí rozdílu mezi teplotou povrchu a vzduchu v podmínkách humidního klimatu, je sytostní doplněk (Keener, Kircher, 1983), který je zde spolu s radiční bilancí velmi proměnlivý. I další autoři zmiňují vztahy mezi rozdílem teplot a sytostním doplňkem. Erhler (1973) a Idso et al. (1981) konstatovali negativní lineární korelaci mezi rozdílem teplot a sytostním doplňkem při dobrém zásobení vodou a bezoblačné obloze. Důležitým faktorem správného hodnocení vodního režimu pomocí navržených indikátorů je vhodný výběr denního období a také vhodného počasí, kdy indikátory poskytují maximální vypovídací schopnost. Jako ideální se jeví dny s pěkným slunečným počasím (např. Idso et al, 1981, Oliva et al. 1994), pro stanovení rozdílu teplot období okolo poledního či krátce po poledni (Jackson et al. 1977, 1981).

Cílem příspěvku je uvést podrobnou metodiku navrhovaných indikátorů vodního stresu travního porostu pomocí metody energetické bilance a Bowenova poměru a zmínit řešení problémů, které s sebou metoda přináší.

2. Materiál a metody

Metoda pro analýzu vodního stresu travního porostu vychází z ověření vhodnosti výše uvedených indikátorů (rozdíl teplot, ET_{rel} a β) na základě srovnání s půdními charakteristikami (půdní vlhkost, půdní vodní potenciál PVP). Rozdíl teplot je rozdíl mezi maximální denní teplotou povrchu a vzduchu, přičemž teplotní maximum vzduchu je opožděno za teplotním maximum povrchu asi o 3 hodiny (tj. nastává okolo 15 hodiny). Stanovení indikátorů vychází z výpočtu aktuální evapotranspirace ETA metodou energetické bilance a Bowenova poměru, která je odvozena z teorie turbulentní difúze.

2.1. Popis stanoviště

Pokusná plocha se nachází v katastru obce Klečaty v bývalém okrese Tábor, Česká republika, z geomorfologického hlediska v Třeboňské pánvi, v nadmořské výšce 423 m n.m., v klimatické oblasti mírně teplé. Srážkový a teplotní normál (1.1.1961 – 31.12.1990) Borkovice (ČHMÚ) je 596 mm a 7,2°C, ve vegetačním období (IV.-IX.) 388 mm a 13,3°C. Z hlediska pedologického se jedná o půdní typ: luvizem oglejená (BPEJ 7 43 00) a půdní druh písčitohlinitá půda. Plocha je odvodněná, hladina podzemní vody není ve vegetačním období dostupná. Travní porost je nehnojený, udržovaný v konstantní výšce cca 10 cm (potlačení měnicího se LAI na navržené indikátory), s výskytem trav méně náročných na živiny (např. *Festuca rubra*, *Agrostis capillaris*). V roce 2002 byla na plochu umístěna speciální meteorologická stanice pro stanovení aktuální evapotranspirace metodou energetické bilance a Bowenova poměru, jejíž vybavení bylo postupně rozšiřováno (kap. 2.5.).

2.2. Metoda stanovení aktuální evapotranspirace (ETA) pomocí energetické bilance a Bowenova poměru

2.2.1. Energetická bilance a Bowenův poměr

Výpočet ETA vychází z rovnice energetické bilance a stanovení Bowenova poměru (Monteith 1973):

Rovnice energetické bilance:

$$R_n = G + LE + H + P \quad [1],$$

kde R_n - radiční bilance [$W \cdot m^{-2}$], G - tok tepla do půdy [$W \cdot m^{-2}$], LE - tok tepla spotře-

bovaného na výpar [$W \cdot m^{-2}$] (L - skupenské teplo vypařování $2\,500 - 2\,400 \text{ KJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ vody v rozmezí teplot vzduchu $0 - 40^\circ\text{C}$, E - hustota toku vodní páry z vypařujícího povrchu do atmosféry, tj. intenzita ETA, [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$]), H - turbulentní tok tepla (pocitové teplo) [$W \cdot m^{-2}$], P - energetická hodnota fotosyntetické produkce [$W \cdot m^{-2}$], pro svoji malou hodnotu obvykle zanedbávána.

Pro výpočet LE upravíme rovnici (1) s vynecháním P na tvar:

$$LE = R_n - G - H \quad [2],$$

v němž R_n a G jsou relativně jednoduše měřitelné, problém zůstává s určením hodnoty toku tepla H , který lze zjistit z tzv. Bowenova poměru β . β vychází z teorie turbulentní difúze a při splnění určitých předpokladů jej lze vypočítat z vertikálního gradientu teploty a koncentrace vodní páry.

2.2.2. Teorie turbulentní difúze

Teorie turbulentní difúze vychází obecně (Woodward, Sheehy, 1983) z předpokladů, že 1/ vliv molekulární difúze na výměnu plynu nad porostem je zanedbatelný

2/ horizontální pohyb vzduchu nad aerodynamicky drsným porostem vyvolává v přízemní hraniční vrstvě turbulentní proudění

3/ střední vertikální rychlost vzduchu v této vrstvě je nulová

4/ k vertikálnímu transportu vzdušných komponent dochází následkem turbulentní výměny

Základním východiskem je, že pro průměrný vertikální pohyb vzdušné hmoty platí:

$$\overline{w \cdot \rho_a} = 0, \quad [3],$$

(kde w - vertikální složka rychlosti větru [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$]; ρ_a - hustota suchého vzduchu [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$]),

ale naopak pro tok vzdušných příměsí, že jeho vertikální složka je nenulová:

$$\overline{w \cdot \rho_c} = F_z, \quad [4],$$

kde ρ_c - hustota příměsí [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$];

F_z - vertikální hustota toku příměsí [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$]

Matematickým odvozením lze z takto postulovaných východisek dojít k obecnému vztahu pro tok vzdušných příměsí ve tvaru:

$$\overline{F_z} = \overline{\rho_a \cdot w' \cdot s'} \quad [5],$$

kde w' - okamžitá hodnota vertikální rychlosti větru [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$] a s' - okamžitý "směšovací poměr", definovaný jako poměr hus-

toty příměsi a hustoty vzduchu, tedy v podstatě koncentrace příměsi, vyjádřená v [kg.kg⁻¹]. Vertikální hustotu toku vzdušných příměsí (vodní páry, CO₂, prachové částice atp.) lze tedy vyjádřit jako součin střední hodnoty hustoty suchého vzduchu a střední hodnoty součinu vektoru okamžité vertikální rychlosti větru a okamžité hodnoty koncentrace sledované příměsi. Tato rovnice je základem metody přímého měření toků CO₂ a vodní páry, nepřesně nazývané „eddy covariance method“, kdy se v reálném čase současně měří jak koncentrace příměsí, tak vektor rychlosti větru.

Pro další úvahy se zavádí pojem směšovací délky l , která je v zásadě podobná termodynamickému termínu střední volné dráhy molekul, leč o několik řádů větší.

Tím, že se víry pohybují z úrovně z do $z+l$, kde se mísí s hlavním proudem, dochází ke změně horizontální rychlosti větru v dané hladině, kterou můžeme vyjádřit jednoduchou lineární diferenciální rovnicí ve tvaru:

$$u' = \bar{u}_{(z+l)} - \bar{u}_{(z)} = l \cdot \frac{d\bar{u}}{dz} \quad [6],$$

kde u' - derivace horizontální rychlosti větru [m.s⁻¹], tzn. rychlost turbulence, z - výška [m]

Směšovací délka je v lineárním vztahu k velikosti vírů a vzhledem k tomu, že ta se lineárně zvětšuje s výškou, platí:

$$l = k \cdot z \quad [7],$$

kde k - von Karmánova konstanta (0,41).

Vertikální hustotu toku příměsí je možno vyjádřit v termínu směšovací délky jako:

$$\bar{F}_z = \bar{\rho}_a \cdot \bar{w}' \cdot l \cdot \frac{d\bar{s}}{dz} \quad [8]$$

nebo

$$\bar{F}_z = \bar{\rho}_a \cdot K \cdot \frac{d\bar{s}}{dz} \quad [9],$$

kde s je koncentrace příměsí [kg.kg⁻¹] a K se nazývá přenosový koeficient [m².s⁻¹] definovaný dle předchozího jako:

$$K = \bar{w}' \cdot l = \bar{w}' \cdot l = \bar{w}' \cdot k \cdot z \quad [10].$$

Význam této rovnice je evidentní, neboť přináší možnost zavedením K obejít náročné měření okamžitých hodnot koncentrace příměsí a 3-D vektoru rychlosti větru měřením gradientu koncentrace příměsí.

Za podmínky neutrálního zvrstvení atmosféry, kdy dt/dz je rovno suchoadiabatickému

gradientu (teplota t s výškou klesá o 1 K na 100 m) lze u dostatečně rozsáhlého porostu (nejmenší vzdálenost od jiných povrchů je ve směru převládajícího větru nejméně 100 násobek horní výšky měření koncentrace příměsí) předpokládat rovnost přenosových koeficientů pro vertikální turbulentní přenos tepla a vodních par, která je základním východiskem pro výpočet aktuální evapotranspirace metodou Bowenova poměru.

2.2.3. Odvození metody Bowenova poměru

Základním východiskem metody je předpoklad rovnosti přenosových koeficientů, zmíněný v předchozí kapitole. Pak lze turbulentní tok tepla (Monteith, 1973) vyjádřit pomocí gradientu teploty vzduchu ve dvou různých výškách:

$$H = -c_p \cdot \rho_a \cdot K_H \cdot \frac{(T_2 - T_1)}{(z_2 - z_1)} \quad [11],$$

kde c_p - měrné teplo vzduchu [J.kg⁻¹.K⁻¹], K_H - přenosový koeficient pro turbulentní tok tepla [m².s⁻¹], $T_2 - T_1$ - rozdíl teplot vzduchu ve dvou různých výškách (0,5 a 2,0 m), $z_2 - z_1$ - rozdíl výšek

Podobně lze pro tok vodních par psát (Novák, 1995):

$$E = -\rho_a \cdot K_E \cdot \frac{(q_2 - q_1)}{(z_2 - z_1)} \quad [12],$$

kde K_E - přenosový koeficient pro tok vodních par [m².s⁻¹], $q_{1, 2}$ - měrná vlhkost vzduchu v dvou výškách [kg.kg⁻¹]. S přihlédnutím ke vztahu mezi měrnou vlhkostí a tlakem vodních par (Thom, 1975):

$$q = 0,622 \cdot \frac{e}{p - e} \cong 0,622 \cdot \frac{e}{p} \quad [13],$$

kde 0,622 - poměr molekulové hmotnosti vodní páry a suchého vzduchu, e - tlak vodní páry [Pa], p - atmosférický tlak [Pa], pak lze rovnici [12] upravit do tvaru

$$E = -\rho_a \cdot K_E \cdot \frac{0,622}{p} \cdot \frac{(e_2 - e_1)}{(z_2 - z_1)} \quad [14],$$

kde e_2, e_1 - tlak vodní páry ve dvou úrovních.

2.2.4. Výpočet Bowenova poměru a aktuální evapotranspirace

Bowenův poměr β je definovaný jako:

$$\beta = \frac{H}{LE} \quad [15]$$

a po dosazení z předchozích rovnic lze získat vztah:

$$\beta = \frac{c_p \cdot \rho_a \cdot K_H \cdot (T_2 - T_1)}{L \cdot \rho_a \cdot K_E \cdot \frac{0,622}{p} \cdot (e_2 - e_1)} \quad [16].$$

Zavedením pojmu psychrometrické konstanty [kPa.°C⁻¹]

$$\gamma = \frac{c_p P}{0,622 L} \quad [17]$$

a jejím dosazením do rovnice Bowenova poměru dostaneme za předpokladu platnosti rovnosti přenosových koeficientů výraz pro poměr pocitového a latentního tepla výparu v prakticky použitelném tvaru

$$\beta = \gamma \cdot \frac{(T_2 - T_1)}{(e_2 - e_1)}, \quad [18],$$

který znamená, že distribuci (poměr) hlavních složek energetické bilance můžeme určit prostým měřením rozdílu teplot a vlhkostí ve dvou výškách nad porostem.

Dále potom s pomocí rovnice [1] převedené do tvaru

$$Rn - G = H + LE \quad [19]$$

a dosazením za H z rovnice [15]

$$Rn - G = \beta \cdot LE + LE \quad [20]$$

a jednoduchou úpravou dostaneme rovnici pro výpočet ETA v konečném tvaru:

$$PET = \frac{\frac{\Delta}{\Delta + \gamma} (R_n - G) + \frac{\gamma}{\Delta + \gamma} 6,43(1 + 0,53u_2)(e_s - e_a)}{L} \quad [22],$$

kde Δ - směrnice závislosti tlaku nasycené vodní páry na teplotě, [kPa.K⁻¹], u_2 - rychlost větru ve 2 m [m.s⁻¹], e_s , e_a - nasycený tlak vodní páry a tlak vodní páry ve 2 m [kPa].

2.3.2. Relativní evapotranspirace

Pro výpočet relativní evapotranspirace ET_{rel} platí vztah:

$$ET_{rel} = \frac{ETA}{PET} [-] \quad [23].$$

Pro výpočet jsou použity denní sumární hodnoty ETA a PET.

$$E = \frac{(Rn - G)}{L \cdot (1 + \beta)} \quad [\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}] \quad [21].$$

Gradienty teploty vzduchu a vlhkosti vzduchu pro výpočet Bowenova poměru byly zjišťovány ve dvou úrovních nad povrchem půdy (0,5 a 2,0 m). Vypočtené hodnoty ETA byly přepočteny do hodinových hodnot spotřeby vody v mm.

Tok tepla do půdy G [W.m⁻²] byl stanoven nepřímo z vertikálního gradientu teploty v půdě a její tepelné vodivosti pomocí jednoduchého vztahu:

$$G = \frac{\alpha \cdot (T_2 - T_1)}{z_2 - z_1}, \quad [22],$$

kde α - tepelná vodivost půdy: 1,0 [W.m⁻¹.K⁻¹] (Baver, Gardner 1972), T_1 , T_2 = teplota půdy [°C] v hloubce 0,1 a 0,2 m, z_1 , z_2 - hloubka půdy 0,1 m a 0,2 m.

2.3. Metoda stanovení potenciální evapotranspirace (PET) podle Penmana, výpočet relativní evapotranspirace

2.3.1. Penmanova rovnice

Potenciální evapotranspirace (PET) podle Penmana pro travní porost dobře zásobený vodou [mm.den⁻¹] se vypočítala (Penman 1948):

2.4. Metody pro stanovení teploty vegetačního povrchu, půdní vlhkosti a půdního vodního potenciálu

2.4.1. Teplota vegetačního povrchu

Čidlo na měření teploty vegetačního povrchu bylo umístěno ve výšce 85 cm a snímaná plocha 0,57 m² vymezena kruhem o stejném průměru jako je výška umístění čidla. Teplota vzduchu byla stanovena pomocí čidla EMS-32A (přesnost 0,3 °C) umístěného 2 m nad zemí.

2.4.2. Půdní objemová vlhkost

Čidla na měření vlhkosti půdy založená na metodě Time Domain Reflectometry se skládají ze dvou ocelových nerezových prutů (vl-novodů) připojených k tělesu snímače. Zjiš-

řovaný obsah vody v prostředí je odvozen na základě rychlosti šíření elektromagnetických vln v prostoru s proměnnou dielektrickou konstantou danou v tomto případě prakticky pouze obsahem vody v půdě. Čidla byla uložena v hloubce 0,13 – 0,43 m (půdní vlhkost 1, čidlo uloženo až 13 cm pod povrchem, aby mohlo být skryto i těleso snímače), 0,3 – 0,6 m (půdní vlhkost 2) a 0,6 – 0,9 m (půdní vlhkost 3).

2.4.3. Půdní vodní potenciál

Půdní vodní potenciál PVP (sací tlak) popisuje energetické požadavky rostliny k odstranění jednotky vody z půdy při různé půdní vlhkosti v rámci využitelné vodní kapacity. PVP byl měřen pomocí sádrových bločků (rozsah 10 – 1500 kPa) v hloubkách 0,1, 0,2, 0,3, 0,4, 0,5 a 0,6 m. Použitá rovnice přepočtu hodnot PVP z odporu mezi elektrodami bločku ve tvaru polynomu čtvrtého stupně byla stanovena regresí z tabulkových hodnot udávaných výrobcem (Kučera, osobní sdělení).

2.5. Použitá přístrojová technika

Hodnoty indikátorů byly získány výpočtem z dat automatické meteorologické stanice pro měření potenciální evapotranspirace podle Penmana a aktuální evapotranspirace metodou energetické bilance a Bowenova poměru umístěné na travním porostu udržovaném v konstantní výšce (cca 10 cm). Čidla snímala měřené hodnoty každou minutu a datalogger ukládal jejich desetiminutové průměry.

Měřicí systém pro získání dat PET i ETA obsahuje datalogger MiniCube VV/VX (EMS Brno, CZ) registrující data: ze 2 čidel na měření teploty [°C] a relativní vlhkosti vzduchu [%] ve dvou různých úrovních (0,5 a 2,0 m, byla vybírána čidla se stejnou chybou, tzv. párování čidel), z pyranometru pro měření intenzity globálního slunečního záření [$W \cdot m^{-2}$], z bilancoměru [$W \cdot m^{-2}$], ze dvou čidel na měření teploty půdy [°C] ve dvou hloubkách (0,1 a 0,2 m), z anemometru na měření rychlosti větru (ve 2 m, [$m \cdot s^{-1}$]), z infračerveného čidla na měření teploty vegetačního povrchu [°C] a od října 2004 z čidla na měření toku tepla do půdy [$W \cdot m^{-2}$].

Vzhledem k tomu, že měřicí stanice byla bilancoměrem vybavena až v říjnu 2003, byla do té doby R_n stanovena na základě odhadu albeda travního porostu z literatury (20 %, Novák, 1995) a výpočtu dlouhovlnného vyzařování Země (Allen a kol. 1998). V roce 2004 byla R_n zjišťována již přímo pomocí bilancoměru (fy Schenk, typ 8110, roční stabilita 3 %).

Teplota vegetačního povrchu byla měřena pomocí infračerveného čidla (typ OS36-2, přesnost 2 %, OMEGA, USA) [°C] připojeného k dataloggeru měřicího systému PET, ETA a β . Systém byl dále doplněn druhým dataloggerem (MiniCube VF, EMS Brno, CZ), který snímal data půdních charakteristik. Skládal se ze tří čidel na měření půdní objemové vlhkosti (Water Content Reflectometer, Campbell Scientific, USA, typ CS 616, délka 30 cm, přesnost 2,5 %) [% obj.] pracujících na reflektometrickém principu a ze šesti sádrových bločků na měření půdního vodního potenciálu [bar] (typ GB 2, Delmhorst, USA).

3. Výsledky

Metoda energetické bilance a Bowenova poměru je jednoduchou metodou, založenou na gradientech teploty vzduchu a tlaku vodních par ve dvou úrovních, nezabývá se určováním ani aerodynamického a povrchového odporu, neboť tyto složky jsou přímo zahrnuty v měřených veličinách (např. v radiační bilanci, v gradientech teploty vzduchu a tlaku vodní páry). Úskalí této metody však spočívá v možné izotermii, tj. v případě, kdy rozdíly mezi teplotou i tlakem v obou sledovaných úrovních se blíží nule, resp. jsou menší než 0,1 °C a 0,1 hPa (Matejka, Hurtalová, ústní sdělení, Angus et al. 1984). V této situaci se zjištěné rozdíly obou úrovní blíží možné chybě měření přístrojů a celá metoda (hodnoty Bowenova poměru) je zatížena velkou chybou. Pro maximální přesnost metody jsou čidla tzv. párována, tzn. vybírána na základě stejných chyb. Tyto problémy nastávají hlavně ráno či večer a ve dnech s oblačností. Eliminace problémových situací byla řešena pomocí software Mini 32 a výpočtových programů pro aktuální evapotranspiraci užívaných v daném software.

Data stažená z počítače byla nejprve očištěna od tzv. napětových špiček (výrazně odlehle hodnoty), které mohou vznikat při stahování dat a při manipulaci s čidly. Dále byla data podrobena několika výpočtovým programům v software Mini 32: v 1. programu, který eliminoval případné chyby přístrojů

(pokud např. relativní vlhkost byla vyšší než 100, program nahradil hodnotu stovkou), byly získány hodnoty ETA v mm.hod⁻¹ vypočítané z Bowenova poměru pouze z rozmezí 0,1 – 4,0 s tím, že hodnoty ETA vyšší než 1 a menší než 0 byly vyloučeny. Z toho vyplývá, že výsledný soubor neobsahoval v desetiminutových intervalech všechny hodnoty β a ETA, některé řádky byly prázdné. Pro grafickou prezentaci byly dále vybrány hodnoty Bowenova poměru pouze z denního období 10 – 18 hodin a při intenzitě globálního záření větší než 200 W.m⁻². Pomocí programu byla dále vypočítána potenciální evapotranspirace podle Penmana. V dalších výpočtových postupech byla chybějící data ETA doplněna na základě korelace PET a ETA, neboť mezi hodnotami ETA a PET byla lineární korelace. Daný testovaný soubor se dá rozdělit na jednotlivé podsoubory podle vlhkosti půdy a půdního vodního potenciálu. Pro tyto jednotlivé soubory se stanoví regresní koeficient mezi PET a ETA a chybějící data ETA (včetně nulových nočních hodnot) se do souboru doplní hodnotami PET vynásobenými regresním koeficientem. Toto je důležité při výpočtu průměrů. Pokud chybí pět nulových hodnot, výsledný průměr je výrazně vyšší než má být! Pomocí dalšího programu se udělají denní průměry a vypočítají se denní sumy u veličin, kde to má smysl (např. suma ETA,

PET, globální a čisté radiace). Stanovení denních sumárních hodnot má význam především pro zjišťování celovegetačních (popř. za jiné časové období) sum, pro vymezení vhodnosti indikátorů bude pozornost zaměřena na hodnoty okolo poledne v období pěkného počasí, tzn. v období relativní přesnosti zmíněné metody.

4. Závěr a souhrn

Tento příspěvek uvádí podrobnou metodu výpočtu aktuální evapotranspirace metodou energetické bilance a Bowenova poměru a vybraných indikátorů vodního stresu (Bowenův poměr, rozdíl teplot mezi teplotou povrchu a vzduchu, relativní evapotranspirace) s naznačením řešení určitých problémů, které s sebou zmíněná metoda nese. Je chápán jako první – teoretická část – výzkumu, na kterou bude navazovat praktické posouzení a zhodnocení vhodnosti vybraných indikátorů vodního stresu včetně vymezení platnosti jejich užití pro podmínky ČR.

Poděkování

Tento příspěvek byl vytvořen za finanční podpory Ministerstva zemědělství ČR v rámci etapy výzkumného záměru MZE 0002704901-08 „Vliv rozmístění a využívání trvalých travních porostů na kvalitativní a kvantitativní parametry půdy a vody“

5. Literatura

- Allen, R. G., Pereira, L., S., Raes, D. & Smith, M. (1998) Crop evapotranspiration, FAO irrigation and drainage paper, 56, Rome, 300 s.
- Angus D.E. & Watts, P.J. (1984) Evapotranspiration - How good is the Bowen Ratio method?, Agric. Water. Management, 8, 133 –150.
- Baver, L.B., Gardner, W.H. & Gardner, W.R. (1972) Soil physics, 4th issue, John Wiley & Sons, Inc., New York. 498 s.
- Erhler, W.L.(1973) Cotton leaf temperatures as related to soil water depletion and meteorological factors. Agron. J. 65, 404 – 409.
- Idso, S.B., Jackson, R.D., Pinter, P.J., Jr., Reginato, R.J. & Hatfield, J.L.(1981) Normalizing the stress-degree-day parameter for environmental variability. Agric. Meteor. 24, 45 – 55.
- Jackson, R.D., Reginato, R.J. & Idso, S.B. (1977) Wheat canopy temperature: A practical tool for evaluating water requirements. Water Resources Res., 13(3), 651 - 656.
- Jackson, R.D., Idso, S.B., Reginato, R.J. & Pinter, P.J., Jr. (1981) Canopy temperature as a crop water stress indicator. Water Resources Res., 17(4), 1133 – 1138.
- Keener, M.E. & Kircher, P.L. (1983) The use of canopy temperature as an indicator of drought stress in humid regions. Agric. Meteor., 28, 339 – 349.
- Monteith, J.L.(1973) Principles of Environmental Physics. Edward Arnold (Publishers) Limited, London, 241 s.

- Novák V.(1995) Vyparovanie vody v prírode a metódy jeho určovania, VEDA, vydavateľstvo Slovenskej akadémie ved, Bratislava, 253 s.
- Oliva, R.N., Steiner, J.J. & Young, W.C., III (1994) Red Clover Seed Production: I. Crop Water Requirements and Irrigation Timing, *Crop Science*, 34, 184-192.
- Olufayo, A., Baldy, C., Ruelle, P. & Aidaoui, A.(1994) Relationships between water stress indicators and grain yield of irrigated sorghum (*Sorghum bicolor* (L) Moench), 17th ICID European Regional Conference on Irrigation and Drainage, Varna, Bulgaria, 69 – 75.
- Paw U, K.T.(1984) A theoretical basis for the leaf equivalence point temperature. *Agric. Meteor.*, 30, 247-256.
- Penman, H.L.(1948) Natural evaporation from open water, bare soil and grass. *Proc. Roy. Soc. London*, A193, 120 – 146.
- Procházka, J. et al. (2001) Vliv hospodaření na vegetaci a toky energie, vody a látek v malých povodích na Šumavě. *Silva Gabreta*, 6, 199-224.
- Thom A.S. (1975) Momentum, mass and heat exchange of plant communities. In: *Vegetation and the atmosphere*. Vol. 1. Red. J.L. Monteith, New York, Academic Press, 128 s.
- Woodward F.I., Sheehy J.E. (1983) *Principles and Measurements in Environmental Biology*, Butterworths, London.

Abstrakt

Je uvedena metodika analýzy vodního stresu travního porostu vycházející ze zavedení indikátorů vodního stresu založených na atmosférických meteorologických činitelích a charakteristikách porostu. Za navržené indikátory byly zvoleny denní hodnoty: relativní evapotranspirace (poměr aktuální evapotranspirace ETA a potenciální evapotranspirace podle Penmana), Bowenův poměr (β) a rozdíl mezi maximální teplotou povrchu a vzduchu ve 2 m. Výpočet ETA je odvozen na základě metody energetické bilance a β vycházející z teorie turbulentní difúze a využívající výškový gradient teploty vzduchu a tlaku vodní páry. Vhodnost indikátorů vodního stresu bude posuzována porovnáním jejich hodnot s hodnotami půdního vodního potenciálu. Je popsána přístrojová technika zabezpečující veškerá vstupní data.

Klíčová slova: metoda energetické bilance, Bowenův poměr, relativní evapotranspirace, teplota vegetačního povrchu, teplota vzduchu, vodní stres, travní porost