

MATEMATICKÝ MODEL CHARAKTERISTÍK VODNÉHO REŽIMU RASTLINNÝCH PORASTOV

František Matejka, Tatjana Hurtalová

Abstract

Matejka, F., Hurtalová, T. Mathematical modelling of the plant water regime characteristics.

A three-layer one dimensional steady state Soil-Vegetation-Atmosphere Transfer (SVAT) model has been extended for simulations of the stomatal resistances, leaf water potential, and transpiration in homogeneous plant canopies. The verification of the model was carried out through experimental data referring to various field crops. Tests of sensitivity of the model to changes in input data showed that main environmental factors affecting the most important characteristics of the plant water regime are soil moisture, net radiation and water vapour pressure deficit. The model provides an opportunity to quantify also the role of changes in the leaf area index, parameters of the root system, stomatal resistances and soil moisture in processes of heat and water vapour exchange between plant canopies and the atmosphere.

Keywords: leaf water potential, canopy resistance, transpiration, SVAT model, field crops.

Vodný režim rastlinných porastov a jeho matematické modelovanie

Vodný režim rastlinných porastov ovplyvňuje produkčné procesy, minerálnu výživu i mikroklimu porastu a je v našich podmienkach limitujúcim faktorom pre tvorbu úrod poľných plodín. Podľa Richtera [12] možno vodný režim rastlinných porastov kvantifikovať nasledujúcimi charakteristikami:

- a) obsahom vody v rastline
- b) energiou vody, vyjadrenou vodným potenciálom
- c) pohybom vody v rastline.

Obsah vody v rastline je síce najjednoduchšou, avšak nie vždy najvhodnejšou informáciou o jej vodnom režime. Jeho vyjadrenie vodným sýtoštným deficitom, relatívnym sýtoštným deficitom, alebo relatívnym obsahom vody vždy závisí aj od dĺžky sýtenia vzoriek a teplota vzduchu počas sýtenia ovplyvňuje nielen dýchanie vzorky, ale aj samotný príjem vody [4]. Okrem toho, hydratačnú úroveň pletív však jednoznačne neurčuje absolútny obsah vody, ale jej vodný potenciál [13]. Preto v posledných rokoch pri kvantifikácii vodného režimu rastlín obsah vody v rastline čiastočne ustupuje do pozadia a hlavný dôraz sa kladie na energiu vody vyjadrenú vodným potenciálom listov a na pohyb vody charakterizovaný transpiráciou.

Monteithov prínos k teórii prenosu vody v systéme „pôda–rastlina–atmosféra“, ktorý rešpektuje reakciu prieduchového aparátu rastlín na zmeny parametrov okolitého prostredia [9] spolu so zdokonalením metodiky a techniky porometrických meraní umožnili rozšíriť zoznam charakteristík vodného režimu rastlinných porastov o prieduchovú rezistenciu, ktorá sa v posledných desaťročiach veľmi často interpretuje ako faktor fyziologickej kontroly transpirácie. V súčasnosti je teda vodný režim rastlinných porastov obvykle charakterizovaný vodným potenciálom listov, prieduchovou rezistenciou a transpiráciou.

Spomedzi troch posledne menovaných charakteristík je veľmi často modelovo simulovaná transpirácia ako jedna zložka evapotranspirácie. Cieľom predloženého príspevku je navrhnuť a verifikovať matematický model interakčných vzťahov v systéme „pôda–porast–atmosféra“, umožňujúci simulovať súčasne s transpiráciou aj hodnoty prieduchových rezistencií a vodného potenciálu listov.

Doteraz bolo navrhnutých a experimentálne verifikovaných mnoho matematických modelov prenosu tepla a vodnej pary v systéme „pôda–rastlina–atmosféra“, ktoré sú v anglickej písanej literatúre označované skratkou SVAT (Soil–Vegetation–Atmosphere Transfer). Rastlinný porast je v týchto modeloch chápaný ako jedna homogénna vrstva, alebo ako viac vertikálne usporiadaných a navzájom sa ovplyvňujúcich vrstiev. Viac vrstvové modely poskytujú realističnejší popis procesov výmeny hmoty a energie medzi rastlinným porastom a okolitým prostredím, sú však zložitejšie a vyžadujú si viac detailnejších vstupných údajov, čo limituje ich praktické využitie [11]. Ďalšie zdokonaľovanie matematických modelov systému „pôda–porast–atmosféra“ si preto vyžaduje zjednodušenie doterajších zložitých modelových schém pri najvyššom možnom rešpektovaní ich podstatných črt [15]. Z takejto koncepcie vychádza aj matematický model vodného režimu rastlinných porastov prezentovaný v tomto príspevku, ktorý predstavuje rozšírenie doterajších SVAT modelov simulujúcich transpiráciu o možnosť získať na výstupe modelu aj hodnoty prieduchovej rezistencie a vodného potenciálu listov.

Matematický model vodného režimu homogénnych rastlinných porastov

Uvažujme homogénny rastlinný porast, ktorého plocha je dostatočne veľká na to, aby sme nemuseli uvažovať okrajové časti porastu, v ktorých sa prejavujú efekty, spôsobené skokovou zmenou charakteristík povrchu. V takomto prípade je opodstatnený predpoklad, podľa ktorého sú horizontálne gradienty meteorologických prvkov a pôdnej vlhkosti tak malé, že prenos hmoty a energie v horizontálnom smere možno zanedbať.

V schematizovanej predstave homogénneho rastlinného porastu chápaného ako jedna vrstva je potrebné zaviesť pojem efektívnej výšky porastu označovanej obvykle symbolom d a jeho dynamickej drsnosti z_0 . Význam týchto pojmov a spôsob ich určenia je podrobne popísaný v literatúre [2]. Ďalej zvolíme v prízemnej vrstve atmosféry ľubovoľne ale pevne určitú výšku z_* , ktorá spĺňa podmienku $z_* - d \gg z_0$. Takto stanovenú výšku z_* budeme volať referenčná hladina.

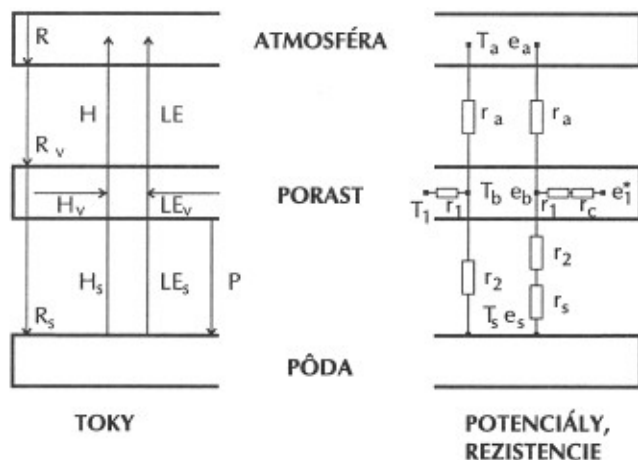
Toky tepla a vodnej pary v prízemnej vrstve atmosféry nad rastlinným porastom sú vyvolané gradientami teploty a vlhkosti vzduchu. Intenzita týchto tokov je limitovaná rezistenciami na prenosovej ceste. V analógii s elektrickým obvodom potom možno teplotu a vlhkosť vzduchu považovať za potenciály.

Evapotranspirácia E z pôdy pokrytej rastlinným porastom pozostáva z transpirácie E_v a výparu z pôdy E_s . Podľa toho pre celkový výpar existujú dva zdroje vody. Jeden z nich sa nachádza na úrovni povrchu pôdy a druhý v poraste. Formálne je v modelových schémach zdroj vody pre transpiráciu lokalizovaný v úrovni $d + z_p$. Podobne sa aj celkový turbulentný tok tepla H v prízemnej vrstve atmosféry nad uvažovaným rastlinným porastom skladá z dvoch zložiek. Pre prvú z nich H_s je zdrojom tepla povrch pôdy a pre druhú H_v rastlinný porast.

Rozdeľme systém „pôda–porast–atmosféra“ vo vertikálnom smere do troch vrstiev, ktorých hranice sú:

- referenčná hladina v prízemnej vrstve atmosféry
- efektívna výška porastu
- povrch pôdy.

Štruktúra takto zjednodušeného pohľadu na systém „pôda–porast–atmosféra“ s tokmi tepla a vodnej pary a s príslušnými potenciálmi a rezistenciami je schematicky znázornená na obr. 1. V tejto schéme znamená R radiačnú bilanciu, P tok tepla do pôdy, T teplotu vzduchu, e tlak vodnej pary, r_a je aerodynamická rezistencia, r_a , r_2 a r_s sú rezistencie pre prenos vodnej pary vo vrstvách vzduchu od d po z_w od povrchu pôdy po úroveň $d + z_w$ a v povrchovej vrstve pôdy. Indexy a , s , v , sa vzťahujú postupne k atmosfére, pôde a porastu. Konečne, T_b a e_s znamenajú teplotu a vlhkosť vzduchu na úrovni $d + z_w$ a symbol e^* označuje tlak nasýtenej vodnej pary na úrovni $d + z_w$.



Obr. 1: Schematické znázornenie tokov, potenciálov a rezistencií v trojvrstvovom modeli systému „pôda–porast–atmosféra“

Navrhnutý model predpokladá, že množstvo vody, ktoré porast za jednotku času prijme z pôdy sa rovná intenzite transpirácie celého porastu, teda vplyv zásob vody v rastline na jej vodný režim sa zanedbáva. V súvisе s tým sú základnými vzťahmi modelu rovnica kontinuity a Darcyho zákon. Vychádzajúc z týchto základných predstáv, odvodili Bichele et al. [1] nasledujúci vzťah medzi potenciálom vody v pôde ψ_v , vodným potenciálom listu ψ_L a transpiráciou E_v :

$$\frac{1}{-\psi_s} = \frac{1}{-gr_p E_v - \psi_L} + \beta E_v \quad (1)$$

kde symbol g označuje gravitačné zrýchlenie, r_p je vnútorný odpor rastliny pre prenos vody. Parameter β , ktorý charakterizuje stupeň rozvoja koreňového systému možno vyjadriť v tvare

$$\beta = \frac{gr_p \ln(q/r)}{aNS_R} \quad (2)$$

pričom q a r sú geometrické charakteristiky koreňovej sústavy, a je konštanta závislá od pôdneho typu, N je počet rastlín na štvorcovom metri a S_R je priemerná plocha koreňov jednej rastliny.

Na druhej strane, transpirácia E_v závisí od prieduchovej rezistencie a parametrov okoliťého prostredia podľa Penman-Monteithovej rovnice, ktorú možno na úrovni porastu vyjadriť vzťahom [5]

$$LE_v = \frac{\Delta r_1 R + \rho c_p D_b}{\Delta r_1 + \gamma (r_1 + r_c)} \quad (3)$$

V tomto vzťahu L znamená latentné teplo výparu, D označuje deriváciu tlaku nasýtenej vodnej pary podľa teploty v bode T_a , r je hustota vzduchu, c_p jeho memé teplo pri stálom tlaku a g je termodynamickú psychrometrickú konštantu. Význam ostatných symbolov bol už skôr vysvetlený.

Rezistenciu porastu r_c možno použitím postupu, ktorý publikovali Choudhury a Monteith [5] vyjadriť ako funkciu globálneho žiarenia a vodného potenciálu listov:

$$r_c = \exp(-m\psi_L) \left(LAI + \frac{1}{\tau} \ln \frac{1 + \frac{n}{Q\tau}}{1 + \frac{n}{Q\tau}} \exp(-\tau LAI) \right) \quad (4)$$

Symbol Q znamená globálne žiarenie, LAI je index listovej pokynosti, τ je extinkčný koeficient pre zoslabenie globálneho žiarenia pri prechode porastom a m , n sú koeficienty charak-

terizujúce reakciu prieduchového aparátu na zmeny vodného potenciálu listov a globálneho žiarenia.

Odpor povrchovej vrstvy pôdy pre prenos vody r_s je v prezentovanom modeli stanovený ako funkcia vlhkosti pôdy w a vodného potenciálu listov ψ_l v tvare

$$r_s = p w^q, \quad (5)$$

pričom koeficienty p, q závisia od pôdneho typu.

Vzťahy (1), (3) a (4) tvoria sústavu troch rovníc o troch neznámych ψ_l, r_s a E_w , ktorá môže byť považovaná za submodel simulujúci charakteristiky vodného režimu porastu. Na tomto mieste treba pripomenúť, že sýtosťný doplnok D_s nie je nezávislým vstupom, ale jeho hodnota je funkciou iných charakteristík systému „pôda–porast–atmosféra“. Spôsob určenia sýtosťného doplnku D_s spolu s teplotou T_b podrobne popísali Choudhury a Monteith [5].

Vstupné údaje modelu možno rozdeliť do troch skupín:

priamo merané veličiny ($Q, R, T_a, D_a, V_a, w, LAI$)

hodnoty stanovené z priamo meraných veličín ($R_p, R_g, r_a, r_s, r_v, r_w, z_p, \Delta$)

známe fyzikálne konštanty (ρ, c_p, g, γ).

Postupy a vzorce pre výpočet veličín uvedených v druhej skupine vstupných údajov možno nájsť v literatúre [2, 5].

V priebehu modelových simulácií charakteristík vodného režimu rastlinných porastov sa numericky rieši sústava rovníc (1), (3) a (4) pre neznáme veličiny, ktorými sú vodný potenciál listov, rezistencia porastu a transpirácia. Po dosadení hodnôt $R_s = P, r_s, r_s$ namiesto R_p, r_p, r_s do vzťahu (3) môžeme získať hodnotu výparu z pôdy E_s a konečne aj evapotranspiráciu ako súčet $E_v + E_s$.

Jednotlivé modifikácie prezentovaného modelu vodného režimu rastlinných porastov boli doteraz viackrát experimentálne verifikované pre rôzne druhy porastov poľných plodín [6, 7, 8]. Citované literárne zdroje obsahujú aj podrobný popis porastov a lokalít, v ktorých prebiehali overovacie experimenty. Dosiahnuté výsledky verifikácie svedčia o tom, že model poskytuje realistické výstupy a simuluje charakteristiky vodného režimu porastov poľných plodín s akceptovateľnou presnosťou.

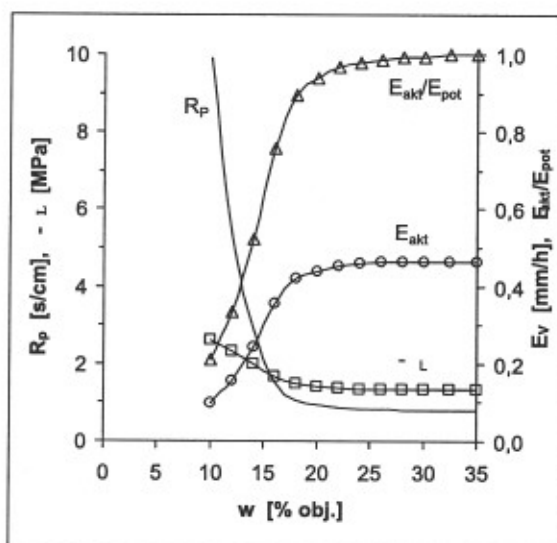
Citlivosť modelu ku zmenám vstupných údajov

Spomedzi modelovaných charakteristík vodného režimu porastov boli už skôr analyzované parciálne vplyvy atmosférických faktorov na hodnoty vodného potenciálu listov a evapotranspirácie. Pritom sa zistilo, že spomedzi všetkých meteorologických prvkov evapotranspiráciu najvýznamnejšie ovplyvňujú zmeny radiačnej bilancie a sýtosťného doplnku [6]. Podobne sa ukázalo, že hlavné atmosférické činitele ovplyvňujúce hodnoty vodného potenciálu listov sú globálne žiarenie a sýtosťný doplnok [8].

Okrem toho je známe, že všetky charakteristiky vodného režimu porastov veľmi citlivo reagujú na zmeny pôdnej vlhkosti, najmä v prípadoch, keď porasty trpia nedostatkom vody

v pôde. Pre názornejšiu predtavu bol popísaný matematický model vodného režimu porastov využitý na simuláciu parciálnych závislostí prieduchovej rezistencie, vodného potenciálu listov a intenzity transpirácie od zmien pôdnej vlhkosti v koreňovej zóne. Modelovým porastom bola ozimná pšenica s indexom listovej pokryvnosti LAI=3 a priemernou výškou porastu 0,9 m, pestovaná na černozi. Simulačné výpočty boli vykonané s meteorologickými vstupnými údajmi, ktorých hodnoty sú typické pre poludňajšie hodiny jasných letných dní ($R=500 \text{ W/m}^2$, $P=50 \text{ W/m}^2$, $T_a=25 \text{ }^\circ\text{C}$, $D_a=1500 \text{ Pa}$, $V_a=2,5 \text{ m/s}$). Výsledky modelových simulácií sú graficky znázornené na obr. 2.

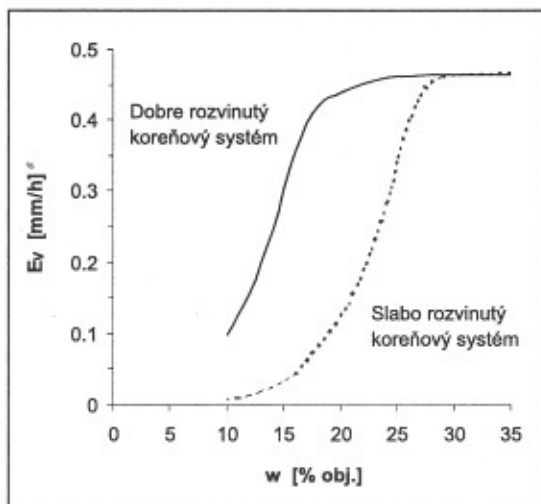
Obr. 2: Simulované závislosti vodného potenciálu listov y_L , prieduchovej rezistencie porastu r_c , transpirácie EV a pomeru aktuálnej a potenciálnej evapotranspirácie E_{akt}/E_{pot} od zmien priemernej vlhkosti pôdy v koreňovej zóne w .



Priebehy simulovaných závislostí na obr. 2 zreteľne poukazujú na skutočnosť, že pri dostatku vody v pôde charakteristiky vodného režimu porastu takmer nezávisia od zmien pôdnej vlhkosti. Naproti tomu, pri poklese obsahu vody v pôde pod bod zníženej dostupnosti, vodný režim porastu veľmi citlivo reaguje aj na malé zmeny vlhkosti pôdy.

V týchto súvislostiach je zaujímavá úloha, ktorú hrá koreňový systém rastlín pri zmenách ich vodného režimu. Rozvoj koreňového systému výrazne ovplyvňuje efektívnosť odberu vody koreňmi z pôdy [10]. Túto skutočnosť ilustruje na konkrétnom príklade obrázok č. 3. Pre simulačné výpočty boli opäť použité meteorologické vstupné údaje charakteristické pre poludňajšie hodiny jasných letných dní. Stupeň rozvoja koreňového systému modelového porastu ozimnej pšenice bol kvantifikovaný rôznymi hodnotami parametra β .

Obr. 3: Simulované závislosti intenzity transpirácie E_v od zmien pôdnej vlhkosti w pri rôznom stupni rozvoja koreňového systému.



Výsledky modelových simulácií znázornené na obr. 3 zreteľne poukazujú na skutočnosť, že pri rovnakej vlhkosti pôdy a tých istých evaporačných požiadavkách ovzdušia dokáže rastlinný porast s dobre rozvinutým koreňovým systémom vytranspirovať podstatne viac vody než porast so slabo rozvinutým koreňovým systémom.

Záver

Prezentovaný matematický model vodného režimu rastlinných porastov umožňuje kvantifikovať vplyv parametrov okolitého prostredia na dennú a sezónnu dynamiku vodného potenciálu listov, rezistencie listu, resp., rezistencie porastu, ako aj evapotranspirácie a jej zložiek. Pomocou modelu možno simulovať reakcie porastov poľných plodín na dynamiku vlhkosti pôdy v koreňovej zóne a na zmeny evaporačných požiadaviek ovzdušia v súčasných podmienkach, alebo analyzovať dôsledky predpokladanej zmeny klímy na vodný režim rastlinných porastov. Z hľadiska praktických aplikácií model predstavuje teoretický základ pre fyziologickú indikáciu vodného stresu porastov poľných a optimalizáciu ich vodného režimu.

PodĎakovanie

Autori ďakujú Vedeckej grantovej agentúre Ministerstva školstva SR a SAV (grant č. 2/6041/99) za čiastočné financovanie tejto práce.

Zoznam použitej literatúry

- 1) Bichele, Z., Moldau, H., Ross, J.: Matematickeho modelirovanie transpirácii i fotosinteza pri nedostatke počvennoj vlagi. Gidrometeoizdat, Leningrad 1980, 222 s.

- 2) Brutsaert, W.: *Evaporation into the Atmosphere*. London, D. Reidel Publishing Company 1982, 299 s.
- 3) Hortalová, T.: *Evapotranspiration of a maize in ontogenesis*. Contrib. Geophys. Inst. SAS., Ser. Meteorol., 10, 1990, s. 49–51.
- 4) Huzulák, J.: *Ekologicko-fyziologická štúdia vodného režimu lesných drevín*. Bratislava, VEDA 1981, 140 s.
- 5) Choudhury, B. J., Monteith, J. L.: *A four layer model for the heat budget of homogeneous land surfaces*. Q. J. R. Meteorol. Soc., 114, 1988, s. 373–398.
- 6) Matejka, F.: *Vplyv meteorologických činiteľov na evapotranspiráciu*. Met.zprávy, 48, 1995, s. 87–90.
- 7) Matejka, F.: *A three layer SVAT model for homogeneous land surfaces*. Contr.Geophys. Inst. SAS, Ser.Meteorol., 17, 1997, s. 44–53.
- 8) Matejka, F., HUZULÁK J.: *Analysis of relationships between winter wheat leaf water potential and atmospheric factors*. Biologia, 50, 1, 1995, s. 105–114.
- 9) Monteith, J. L.: *Principles of Environmental Physics*. New York, Elsevier 1973, 241 s.
- 10) Novák, V.: *Vyparovanie vody v prírode a metodiky jeho určovania*. Bratislava, VEDA 1995, 260 s.
- 11) Oltchev, A., Constantin, G., Gravenhorst A., Ibrom, A.: *A six-layer SVAT model for a simulation of water vapour and sensible heat fluxes in a spruce forest*. J. Hydrol. Hydromech., 45, 1997, s. 5–37.
- 12) Richter, H.: *The water status of the plant. Experimental evidence*. In: *Water and plant life* (eds.: O.L.Lange, L. Kappen, E.D. Schulze), Berlin.Heidelberg–New York, Springer-Verlag 1976, s. 42–58.
- 13) Slayter, R. C., Taylor, S. A.: *Terminology in plant-soil-water relations*. Nature, 187, s. 922–924.
- 14) Vidovič, J.: *Produkčné funkcie a evapotranspirácia porastu v ontogenéze*. Report. Trnava, Maize Research Institute 1984, 106 s.
- 15) Wallace, J. S.: *Calculating evaporation: resistance to factors*. Agric. and Forest Meteorol., 73, 1995, s. 353–366.

Adresa autorů

Geofyzikálny ústav SAV, Dúbravská cesta 9, 842 28 Bratislava, Slovenská republika.
Tel.: +421-07-5491-2663, e-mail: geofmate@savba.sk