

ODHAD PRŮBĚHU ENERGETICKÝCH TOKŮ VE SLEDOVANÝCH EKOSYSTÉMECH

Estimation of Energetic Fluxes and Evapotranspiration of Monitored Ecosystems

Růžena Petrová

Abstrakt: Článek popisuje analýzu metod výpočtů energetických toků a evapotranspirace, jež by umožnily na základě systematicky měřených dat posoudit podmínky dynamické rovnováhy ekosystémů. S rozvojem techniky a rostoucí energií dochází ke změnám v látkových tocích a přírodních energetických procesech. Cílem výzkumu je poukázat na meze, které mohou svědčit o dosažení kritických stavů a tím narušení přirozené rovnováhy v přírodě.

Klíčová slova ekosystém, přirozený energetický proces, energetický tok, evapotranspirace, Bowenův poměr, FAO

1. Úvod

Ústav přístrojové a řídicí techniky Fakulty strojní ČVUT v Praze, odbor automatického řízení a inženýrské informatiky se v těsné spolupráci s ENKI, v.p.s z Třeboně a specialisty z Jihočeské univerzity v Českých Budějovicích účastní v rámci národního programu rozvoje výzkumu zaměřeného na stanovení podmínek trvale udržitelné rovnováhy přírodních systémů. Přirozená rovnováha ekosystému a její obnovování je významně narušováno lidskou činností, jejíž vliv s technickým pokrokem a zvyšující se energetickou náročností roste. Vzniká nebezpečí nevratných dějů. Proto je nutné dopad těchto vlivů monitorovat a predikovat možné trvalé následky. Jednou z možností je odhad průběhu energetických dějů a stanovení mezí, jejichž překročení by způsobilo trvalé narušení přirozené rovnováhy.

1.1. Lokality reprezentující přírodní ekosystémy

Experti z ENKI a Jihočeské univerzity v Českých Budějovicích vytipovali v okolí Třeboně několik oblastí, které reprezentují různé přírodní ekosystémy. Jejich systematické monitorování umožňuje odhadnout probíhající energetické toky, které významně ovlivňují jejich přirozenou rovnováhu. Jedná se o tyto lokality:

- rybník Ruda – tři monitorovaná místa - hladina, rašeliniště, litorál

- pole s porostem jetele,
- stoka,
- město Domanín – čtyři monitorovaná místa,
- město Třeboň - tři monitorovaná místa,
- pastviny,
- louka.

V uvedených lokalitách jsou umístěny univerzální meteorologické měřicí stanice M4016-G3 (Obr. 1). Stanice jsou osazeny čidly, která v krátkých časových intervalech ($\delta t=10$ min.) zaznamenávají data potřebná pro výpočet odhadu probíhajících energetických toků a evapotranspirace (zahrnuje evaporaci (výpar z neživých povrchů), intercepci (výpar intercepční vody) a transpiraci (výpar z tkání živých rostlin)). Stanice jsou spojeny s datovým serverem, kde se údaje ukládají. Webový prohlížeč fy Fiedler – Mágr umožňuje všem řešitelům jejich zobrazení prostřednictvím přehledných tabulek a grafů a následné zpracování a analýzu.



Obr. 1 Měřicí místo s meteorologickou stanicí na poli s jetelem

Vypařování, jako součást koloběhu vody v přírodě, je proces spotřebovávající energii. Protože přímé využití kinetické teorie pro vypařování v přírodních podmínkách je velmi obtížné, byl pro analýzu využit přístup „makroskopický“, založený na měření vlastností

makrosvěta. Veličiny, které byly k dispozici pro energetickou a hmotnostní bilanci vztahující se k vypařování, jsou uvedeny v Tab.1.

Tab. 1 Tabulka veličin měřených ve stanicích

Veličina	Rozměr	Význam
u_z	$m.s^{-1}$	rychlost větru ve výšce z
Dir	deg	směr větru
$Prec$	mm	vodní srážky
Rh_z	%	relativní vlhkost ve výšce z
T_z	°C	teplota vzduchu ve výšce z
Rh_{zp}	%	relativní vlhkost ve výšce zp
T_{zp}	°C	teplota vzduchu ve výšce zp
$Rsdop\downarrow$	$W.m^{-2}$	dopadající záření
$Rsodr\uparrow$	$W.m^{-2}$	odražené záření
Θ	%	vlhkost půdy
Tp_0	°C	teplota půdy v hloubce 0 m
$Tp_{0.1}$	°C	teplota půdy v hloubce 0,1 m
$Tp_{0.2}$	°C	teplota půdy v hloubce 0,2 m

Sluneční energie dopadající na zemský povrch [$kWh/m^2/den$] je základem všech přírodních energetických dějů. Energetickou bilanci na úrovni aktivního povrchu [11] představuje Obr. 2. Tato metoda distribuce sluneční energie byla určující pro stanovení základních a podpůrných veličin, které jsou snímány v měřicích stanicích (Tab.1).

2. Výpočty energetických toků a evapotranspirace

Základním předpokladem výzkumu je pochopení a stanovení vlivu přímo či nepřímo měřených veličin na chování ekosystému. Tento vliv se pak jednoznačně projeví v parametrech, kterými je ekosystém charakterizován – vegetace, vodní režim, agrotechnické postupy, místní a časová lokalizace, kvalita půdy atd.

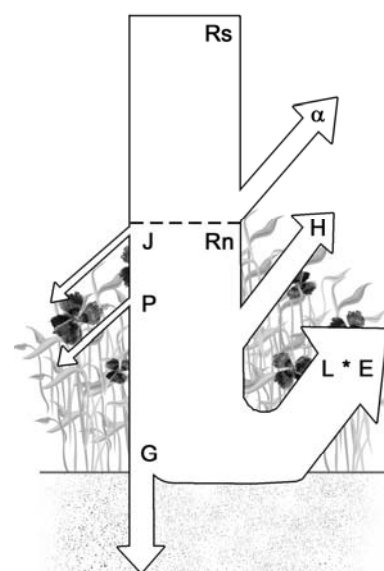
Vypařování je spojovacím procesem mezi procesy přenosu vody a energie. Základní energetickou bilanci na úrovni aktivního povrchu můžeme napsat ve tvaru

$$R = L \cdot E + H + G + A_f + A_r, \quad (2.1)$$

R - algebraický součet intenzit radiačních toků v referenční úrovni [$W.m^{-2}$], pro který platí

$$R = R_n(1 - \alpha) + R_{ld} - R_{lu} \quad (2.2)$$

R_n - čistá radiace [$W.m^{-2}$], α albedo [1], R_{ld} intenzita záření atmosférou [$W.m^{-2}$], R_{lu} intenzita záření povrchu země [$W.m^{-2}$],



Obr. 2 Distribuce slunečního záření

E - intenzita evapotranspirace [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$],
 H - intenzita konvektivního toku tepla z aktivního povrchu do atmosféry [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$],
 L - skupenské teplo vypařování [$\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$],
 G - intenzita toku tepla do půdy [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$],
 J - intenzita spotřeby tepla na fotosyntézu [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$],
 P - intenzita změny tepelné kapacity porostu [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$].

Jelikož člen J je zpravidla 2 % hodnoty R a P je ještě menší, byly členy J , P při výpočtech opírajících se o energetickou bilanci zanedbány.

Pro bilanci vody v polních podmínkách za předpokladu, že přenos probíhá jen ve vertikálním směru na jednotkové ploše, platí

$$m_f - m_i = S - I - O - ET \pm Q \quad (2.3)$$

m_f - hmotnost vody v půdě na konci časového intervalu [kg]
 m_i - hmotnost vody v půdě na začátku časového intervalu [kg]
 S - srážky za daný časový interval na jednotkové ploše [kg]
 ET - úhrn evapotranspirace za daný časový interval z jednotkové plochy [kg]
 I - intercepce ze srážek [kg]
 Q - hmotnost vody, která projde skrz dolní hranici bilancovaného objemu za daný časový interval [kg]
 O - hmotnost vody povrchovým odtokem za daný časový interval [kg].

Pro výpočet evapotranspirace byly testovány následující metody:

- metoda Bowenova poměru
- metoda Penman-Monteith (pro suchý porost)
- metoda Penman-Monteith-FAO56 ((Food and Agriculture Organisation, pro referenční porost), [9])
- metoda Penman-Monteith-ASCE (American Society of Civil Engineers, pro referenční porost)

Následně jsou uvedeny základní vztahy využívané uvedenými metodami. Podrobnější popis jednotlivých uvedených metod lze nalézt v [4], resp. v odkazech, které jsou výše uvedeny. Při aplikaci uvedených metod výpočtu energetických toků a evapotranspirace byly používány nejen standardní fyzikální konstanty, ale byly zohledněny i zcela specifické podmínky související se sledovanou lokalitou (např. výška porostu, jeho dynamická drsnost, nadmožská výška lokality, chemické složení půdy atd.)

3. Metody výpočtu latentního tepla a evapotranspirace

- metoda s použitím Bowenova poměru β [1]

$$LE_{BP} = \frac{R_n - G}{1 + \beta} \quad (3.1)$$

LE_{BP} – latentní teplo [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$]

R_n – čistá radiace [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$], vypočítáno na základě měření T_z

G – tok tepla do půdy [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$], vypočítáno na základě měření T_{p0} , T_{p01} , T_{p02}

β - Bowenův poměr [1], vypočítáno na základě měření T_z , T_{zp} , Rh_{zp} , Rh_z ,

$$E_{BP} = \frac{LE_{BP}}{L} \quad (3.2)$$

E_{BP} – evapotranspirace [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$]
 L – skupenské teplo vypařování [$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$]

- metoda Penman-Monteith (pro suchý porost)

$$LE_{PM} = \frac{\Delta(Rn - G) + \frac{\rho_a c_p (e_{zp} - e_z)}{r_a}}{\Delta + \gamma \left[1 + \left(\frac{r_s}{r_a} \right) \right]} \quad (3.3)$$

ρ_a – hustota vzduchu [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$], vypočítáno na základě měření T_z
 γ – psychometrická konstanta vypočítáno na základě měření T_z
 e_{zp} e_z – tlak vodní páry [kPa], vypočítáno na základě měřených Rh_{zp} , Rh_z ,
 c_p [$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$] – měrná tepelná kapacita vzduchu

$$E_{PM} = \frac{LE_{PM}}{L} \quad (3.4)$$

E_{PM} – evapotranspirace [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$]

- metoda Penman-Monteith- FAO56 (pro referenční porost)

$$LE_0 = \frac{\Delta(Rn_0 - G) + \gamma \frac{900}{T_z + 273,16} u_z (e_{zp} - e_z)}{\Delta + \gamma(1 + 0,34u_z)} \quad (3.5)$$

Rn_0 – radiace pro referenční porost ve výšce 20 cm, [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$],
 u_z – rychlost větru ve výšce z , ostatní veličiny jsou popsány u vztahu (2.3)

$$E_0 = \frac{LE_0}{L} \quad (3.6)$$

E_0 – evapotranspirace [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$]

- metoda Penman-Monteith-ASCE (pro referenční porost)

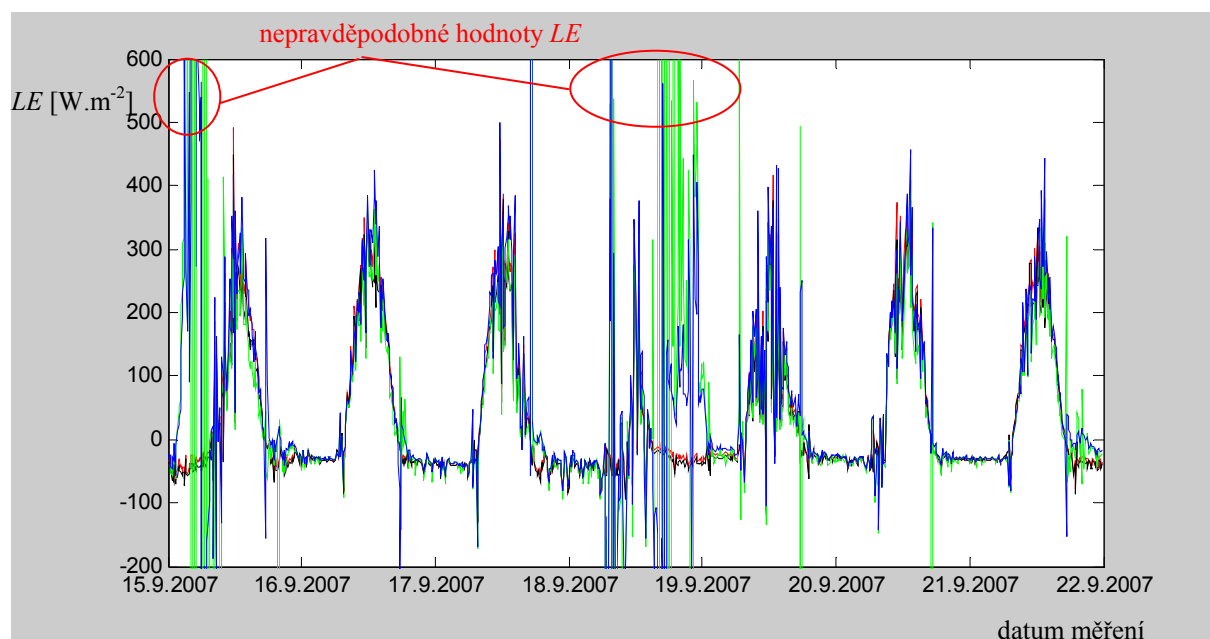
$$LE_{0_II} = \frac{\Delta(Rn_0 - G) + \frac{\rho_a c_p (e_{zp} - e_z)}{r_{aref}}}{\Delta + \gamma \left[1 + \left(\frac{r_{sPM}}{r_{aref}} \right) \right]} \quad (3.7)$$

r_{Pef} , r_{sPM} – odpor porostu pro přenos vodní páry [$\text{s} \cdot \text{m}^{-1}$], ostatní veličiny viz výše

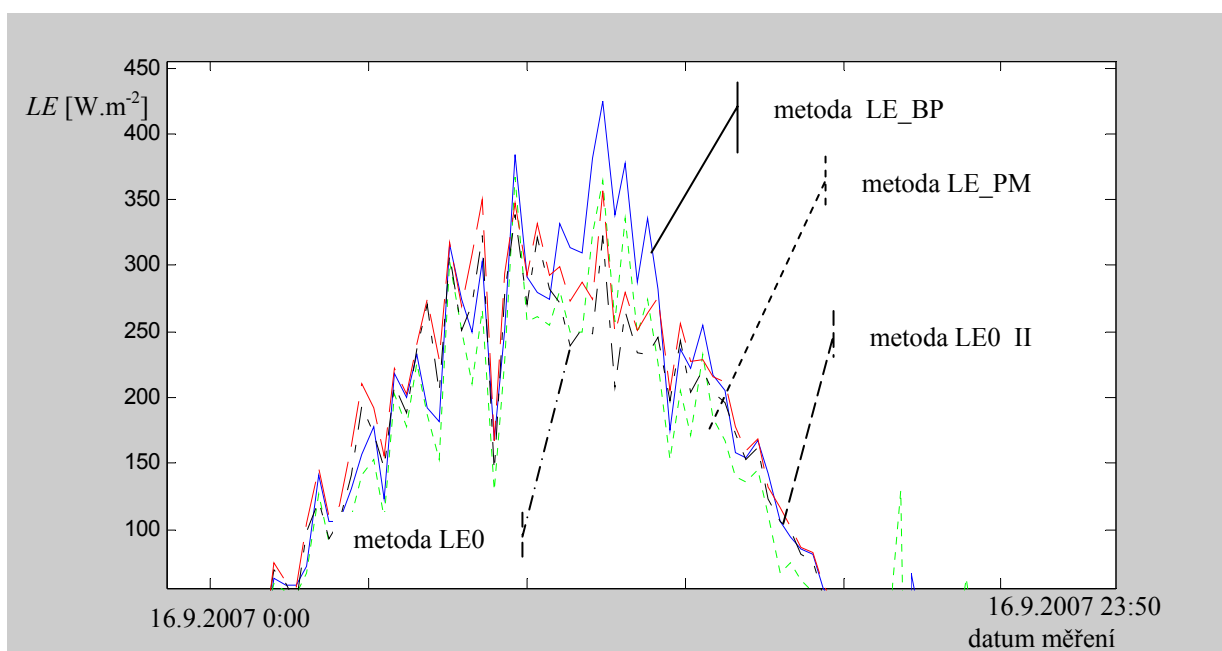
$$E_{0_II} = \frac{LE_{0_II}}{L} \quad (3.8)$$

E_{0_II} – evapotranspiration [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$]

Výše uvedené metody byly aplikovány na data z měřicí stanice umístěné na louce v období září 2007. Vykreslené průběhy (Obr. 4) vykazují místa, ve kterých dochází k velmi nepravděpodobným hodnotám vypočítaných veličin LE . Takovéto úrovně nejsou reálně dosažitelné (latentní teplo LE se pohybuje v intervalu $<-300, 700>[W.m^{-2}]$).



Obr. 3 Záznam průběhu latentního tepla výparu LE metodami ASCE, FAO 56, PM pro suchý porost a s pomocí Bowenova poměru



Obr. 4 Detail průběhů latentního tepla LE dne 16.9. 2007 (0:00, 23:50)

4. Závěr

Z průběhů (Obr. 3, Obr. 4) je patrné, že některé naměřené hodnoty sledovaných veličin (Tab. 1) použité ve výpočtech vyvolávají numerickou nestabilitu, která se projeví nepravděpodobnými hodnotami LE (Obr. 3). Je způsobena hodnotami čitatele i jmenovatele (rovn. (3.1), (3.3), (3.5), a (3.7)) blízkými nule a tím limitního růstu podílu. Použité metody jsou různě citlivé na pracovní hodnoty sledovaných veličin a kombinací takto získaných výsledků lze zpřesnit odhad energetických toků a evapotranspirace v monitorovaných oblastech. Měřená data budou doplněna informacemi o rozložení teplot využitím termovizní kamery a ta budou začleněna do metodiky výpočtů energetických toků a evapotranspirace.

V živé přírodě existuje obrovské množství vzájemných vazeb a vztahů, z nichž některé jsou okrajové, další jsou pro stabilitu systému rozhodující, fundamentální. Soustavné vyhodnocování latentního tepla a evapotranspirace pomůže přispět k jejich vyjasnění.

Literatura

- [1] Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., Smith, M., 1998. *Crop Evapotranspiration - Guidelines for Computing Crop Water Requirements*, Roma, FAO Irrigation and drainage paper 56, Food and Agriculture Organization of the United Nations,
- [2] Anonymus, 2002. *Calculation of Derived Variables*, Hayward, CA Davis Instruments, Diablo Ave, p. 37.
- [3] Pya, S. P., 2001. *Introduction to Micrometeorology*, London, International Geophysics Series, Vol. 79, Academic Press.
- [4] Brom, J., 2007. *Výpočty energetických toků a evapotranspirace*, příloha periodické zprávy projektu.
- [5] Eagleson, P. S., 2002. Darwinian expression of vegetation form and function, *Ecohydrology*, Cambridge, University Press.
- [6] Gates, D. M., 1980. *Biophysical ecology*, Dover, Dover Publications, INC.
- [7] Gavilán, P., Berengena, J., Allen G., 2007. Measuring versus Estimating Net Radiation and Soil Heat Flux. Impact on Penman–Monteith reference ET estimates in semiarid regions. *Agricultural Water Management* 89 (3): 275-286.
- [8] Jirka, V., 2007. *Vývoj metody stanovení toků energie a látek ve vybraných ekosystémech, návrh a ověření principů hodnocení hospodářských zásahů pro zajištění podmínek autoregulace a rozvoje biodiverzity*, Praha, prezentace na semináři.
- [9] Jones, H. G., 1992. *Plants and Microclimate*, Cambridge, Cambridge University Press. Monteith, J. L., Unsworth, M., 1990. *Principles of Environmental Physics*, Oxford, Butterworth-Heinemann.
- [10] Novák V., 1995. Vyparovanie vody v prírode a metódy jeho určovania. *Veda*, Bratislava, SAV.
- [11] Pokorný, J., 2007. *Vývoj metody stanovení toků energie a látek ve vybraných ekosystémech, návrh a ověření principů hodnocení hospodářských zásahů pro zajištění podmínek autoregulace a rozvoje biodiverzity*, Praha, prezentace na semináři.
- [12] Příbáň, K., Jeník, J., Ondok, J. P., Popela, P., 1992. *Analysis and Modeling of Wetland Microclimate*, Praha, Academia, ČSAV 2-92.

Poděkování

Tento text vznikl za podpory grantu MŠMT grant Nr. 5606001.