

ENERGETICKÁ BILANCIA PORASTOV A ICH MIKROKLÍMA

Tatjana Hurtalová, František Matejka

Abstract

Hurtalová, T., Matejka, F. Energy balance of the canopies and their microclimate.

The major portion of the incoming total radiation is absorbed near the surface of the earth, and it is transformed into internal energy. The subsequent partition of this internal energy into long wave back radiation, upward thermal conduction and convection of sensible heat, evaporation of water, and downward conduction of heat into the soil, is one of the main processes driving the atmosphere. The interaction between earth surface and atmosphere is very important in the case of the surface formed by forest canopy. On the base of micro-meteorological measurements, the energy balance of the spruce forest and the microclimatic aspects of its components were analysed. Experimental data were obtained by measurements in the spruce forest in the locality of Bílý Kříž in the framework of the European Community project ECOCRAFT thanks the Institute for Landscape Ecology AS CR.

Keywords: microclimate, zero-plane displacement, roughness length, global radiation, sensible and latent heat flux

Úvod

Energia, ako základná kvantita vo vesmíre, je prezentovaná na zemskom povrchu v rôznych formách. Jednou z nich je absorpcia slnečnej energie povrchom a ekosystémami. Zemský povrch si neustále vymieňa hmotu a energiu s najnižšími vrstvami ovzdušia. Vzájomné vzťahy zemského povrchu a atmosféry sa najintenzívnejšie prejavujú v prízemnej vrstve atmosféry (PVA), majú interakčný charakter a sú zvlášť výrazné, keď je povrch vytvorený rastlinným porastom. PVA, definovaná ako najspodnejšia časť hraničnej vrstvy atmosféry, má hrúbku niekoľko desiatok metrov a táto sa mení v závislosti od charakteru zemského povrchu a od meteorologických podmienok. Stav prízemnej vrstvy atmosféry je dôležitým faktorom, ktorý ovplyvňuje produkčný proces ekosystémov. Komplex meteorologických a klimatických činiteľov spolu s hydrologickými a pôdnymi faktormi bezprostredne pôsobí na rast a vývoj porastov. Naopak, rastlinné porasty modifikujú radiačné, teplotné, vlhkosťné a ventilačné pomery v PVA a vytvárajú si tak svoju vlastnú mikroklímu. Rastlinné spoločenstvo a jeho okolité prostredie tvoria zložité dynamické systémy. Treba zdôrazniť, že klímotvorné účinky rastlinných porastov sa obvykle prejavujú len v mikroklimatickom meradle a závisia od vlastností daného porastu [Matejka, Huzulák 1987].

V posledných rokoch sa výskumu interakcie medzi zemským povrchom a PVA venuje v zahraničí značná pozornosť. Pri štúdiu vzájomného pôsobenia jednotlivých zložiek systému pôda-porast-atmosféra sa často používa metóda matematického modelovania, alebo sa

hľadajú komplexné charakteristiky, ktoré v sebe integrujú vplyv počasia na porasty a súčasne rešpektujú spätné väzby. S týmto zameraním sa uskutočnili viaceré medzinárodné výskumné programy a spoločné experimenty. V Európe sú to napr. HAPEX (1986), CRAU (1987), KUREX (1988, 1991), TARTEX (1990), EFEDA (1991), NOPEX (1994) a ďalšie.

Lesné ekosystémy, vzhľadom na svoju rozlohu, vlastnosti a štruktúru porastu, hrajú v tejto interakcii zvlášť významnú úlohu. Problematiku globálnej klimatickej zmeny vo vzťahu k lesným porastom zastrešuje národný projekt ČR „Atmosféra 2045“, ktorý riešia pracovníci Laboratória ekologickej fyziológie lesných drevín Ústavu ekológie krajiny AV ČR v Brne.

Energetická bilancia rastlinného porastu

Energetickú bilanciu porastu možno popísať jednoduchou rovnicou

$$R = H + LE + P,$$

kde R je radiačná bilancia, H je turbulentný tok tepla, LE je tok tepla potrebného na výpar (L je skupenské teplo výparu, E je evapotranspirácia) a P je tok tepla do pôdy. Radiačná bilancia predstavuje energetické saldo, ktoré vznikne ako algebraická suma príjmu a strát žiarivej energie, ktorú porast prijíma zo Slnka a z atmosféry, resp. ktorú povrch odráža alebo vyžaruje. Tok tepla do pôdy predstavuje tepelnú výmenu aktívnej vrstvy pôdy s nižšie ležiacimi vrstvami. Turbulentný tok tepla charakterizuje intenzívnu výmenu tepelnej energie medzi porastom a okolitým ovzduším a tok tepla potrebného na výpar kvantitatívne charakterizuje energiu, ktorá je potrebná na zabezpečenie transpirácie resp. evapotranspirácie. Pomer jednotlivých členov rovnice energetickej bilancie k hodnote radiačnej bilancie porastu sa výrazne mení v závislosti od druhu, štruktúry a vývojovej fázy sledovaného porastu.

Ako vidieť, energetická bilancia porastu obsahuje informáciu o radiačných pomeroch na jeho povrchu, o teplote porastu, jeho prieduchovej rezistencii, o transpirácii a ďalších charakteristikách porastu, povrchových vrstiev pôdy a okolitého ovzdušia. Preto má sledovanie energetickej bilancie význam aj pri štúdiu mikroklímy porastov.

Cieľom predloženého príspevku je sledovanie bioklimatických aspektov vybraných zložiek energetickej bilancie smrekového porastu. Ďalej bol sledovaný vplyv štruktúry porastu na vertikálny profil meteorologických charakteristík a jeho energetickú bilanciu. Potrebné merania boli realizované v rámci medzinárodných projektov ECO-CRAFT a EUROFLUX v spolupráci s Ústavom ekológie krajiny AV ČR a Ústavom krajiny ekológie MZLU v Brne.

Metódy a experimentálne údaje

Jednou z charakteristík, ktorými možno vyjadriť intenzitu klímotvorných účinkov porastov, je evapotranspirácia. Evapotranspirácia, resp. tok tepla potrebného na výpar, patrí spolu s turbulentným tokom tepla medzi najdôležitejšie zložky energetickej bilancie porastov.

Energetickú bilanciu smrekového porastu sme sledovali na základe profilových meraní teploty, vlhkosti a prúdenia vzduchu nad porastom na experimentálnom pracovisku Ústavu ekológie krajiny AV ČR. Sledovaný smrekový porast sa nachádza v lokalite Bílý Kříž, ČR,

($\varphi = 49^{\circ} 30' 17''$, $\chi = 18^{\circ} 32' 28''$) vo vrcholovej časti Moravskosliezskych Beskýd v nadmorskej výške 920 m n.m, pod hrebeňom, na juhozápadne orientovanom svahu. Priemerná ročná teplota vzduchu sledovanej oblasti je $4,9^{\circ}\text{C}$, ročný zrážkový úhrn 1100 mm a priemerná ročná relatívna vlkosť je 80% [Rožnovský, Tomášková 1997]. Sledovaný smrekový porast je výsadbou založená homogenná monokultúra smreku ztepilého (*Picea abies* [L] Karst.). Analyzovali sme vybrané jasné a zamračené dni vegetačného obdobia 1998, kedy bol porast 20-ročný. Experimentálna plocha je rozdelená na dve časti: plocha Fd (Forest density) s hustotou 2600 stromov/ha a plocha Fs (Forest space) s hustotou 2100 stromov/ha. Každá z nich má rozlohu 2500 m² [Janouš et al. 1998].

Pri analýze profilových meraní je dôležité poznať tzv. výšku aktívneho povrchu, ktorým sa pohlcuje a transformuje slnečná energia. Pre povrch, ktorý je pokrytý trávnatým porastom o výške 0,2–0,3 m, môžeme za aktívny povrch považovať povrch pôdy. Postupne, ako sa mení výška a hustota rastlinného porastu, mení sa aj aktívny povrch. Povrch pôdy postupne stráca tieto vlastnosti a nadobúda ich samotný porast, pričom výška aktívneho povrchu je určená štruktúrou a architektonikou sledovaného porastu. V prípade zapojeného rastlinného porastu možno za výšku aktívneho povrchu s dostatočnou presnosťou považovať hodnotu $2/3 h$, kde h je priemerná výška porastu.

Získané výsledky a ich interpretácia

Dynamiccká drsnosť povrchu z_0 a výška aktívneho povrchu porastu d sú dôležité charakteristiky povrchu a zároveň charakteristiky turbulencie v PVA. Podvrstva drsnosti a aktívny povrch sa nachádzajú vo vnútri lesného porastu. Hodnoty z_0 a d sme určovali z analýzy vertikálnych profilov rýchlosti vetra [Hurtalová et al. 1987]. Ako sme už uviedli, merali sme rýchlosť vetra, teplotu a vlhkosť vzduchu na hladinách 2, 5, 6, 7, 8 a 11 m (hladiny merané od povrchu zeme) na oboch experimentálnych plochách s porastami Fd a Fs. Globálne žiarenie bolo merané na hladine 11 m nad porastom. Merania sa uskutočňovali nepretržite 24 hodín počas celej vegetačnej sezóny 1998 pomocou automatickej meracej ústredne firmy Delta-T Devices LTD s 10-minútovým zápisom priemerných meraných hodnôt v stredo-európskom čase. V tabuľke 1 sú uvedené priemerné hodnoty charakteristík porastu v sezóne 1998.

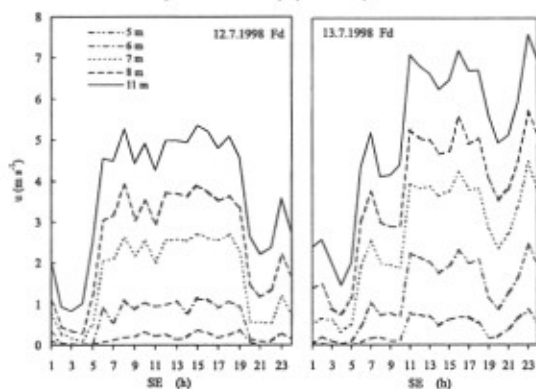
Tab. 1: Priemerné hodnoty indexu listovej pokrývnosti LAI_p (leaf area index – projected), výšky porastu h , výšky aktívneho povrchu d a dynamickej drsnosti povrchu z_0

	plocha Fd	plocha Fs	
LAI_p	$8,09 \pm 0,18$	$5,93 \pm 0,10$	[Janouš et al. 1998]
h [m]	$6,14 \pm 0,11$	$6,13 \pm 0,05$	[Janouš et al. 1998]
d [m]	4,5	3,8	
z_0 [m]	0,82	0,73	

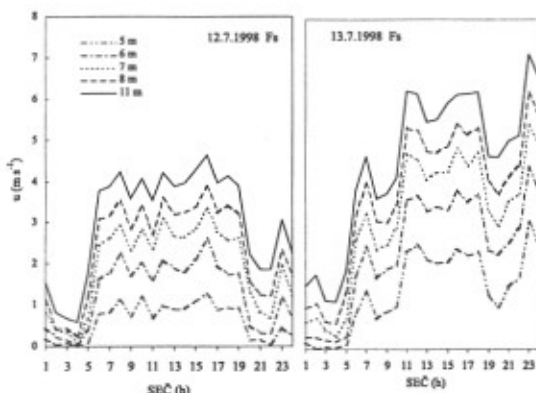
Z experimentu vyplynulo, že porasty Fd a Fs sa líšia nielen hustotou jedincov, ale aj architektikou porastu. Pod architektikou rozumieme súhrn charakteristík opisujúcich tvar, rozmery, geometrickú stavbu a vonkajšiu štruktúru rastlinného objektu [Matejka, Huzulák 1987]. Hodnota výšky aktívneho povrchu predstavovala na ploche Fd: $0,7h$ a na ploche Fs: $0,67h$.

Ako príklad analýzy energetickej bilancie aktívneho povrchu sledovaného porastu sme vybrali dni 12. a 13. 7. 1998. Júl je jeden z mesiacov najintenzívnejšieho rastu smrekového porastu v sezóne. 12. júl 1998 bol oblačný deň s dennou sumou globálneho žiarenia $G = 1,5 \text{ kWh m}^{-2}$, maximálna hodnota $G = 362,8 \text{ W m}^{-2}$ bola nameraná o 10 hodine. Maximálna hodnota teploty vzduchu nameraná na hladine, rovnajúcej sa priemernej výške porastu, bola na ploche Fd: $12,1 \text{ }^{\circ}\text{C}$ a na ploche Fs: $12,3 \text{ }^{\circ}\text{C}$. 13. júl 1998 bol jasný deň s dennou sumou globálneho žiarenia $G = 6,4 \text{ kWh m}^{-2}$ a maximálnou hodnotou $G = 852,5 \text{ W m}^{-2}$ o 12 hodine napoludnie. Maximálna hodnota teploty vzduchu na hladine 6 m bola na ploche Fd: $23,9 \text{ }^{\circ}\text{C}$ a na ploche Fs: $23,8 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Ako vidieť, štruktúra porastu hodnotu teploty vzduchu, na úrovni povrchu porastu, výrazne neovplyvnila.

Na obr. 1 a 2 je vertikálny profil rýchlosti vetra v sledovaných dňoch na ploche Fd a Fs.



Obr. 1: Vertikálny profil rýchlosti vetra nad smrekovým porastom na ploche Fd.



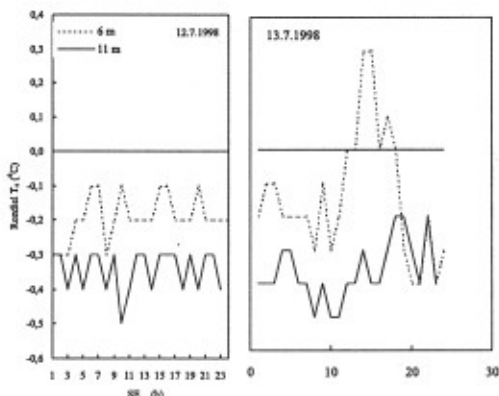
Obr. 2: Vertikálny profil rýchlosti vetra nad smrekovým porastom na ploche Fs.

Z nameraných profilov vyplýva, že rýchlosť prúdenia bola vyššia počas jasného dňa na všetkých hladinách merania a na oboch sledovaných plochách. Štruktúra porastu rýchlosť prúdenia neovplyvnila, výrazne však ovplyvnila vertikálny profil rýchlosti vetra, čomu zodpovedá rozdielna hodnota dynamickej drsnosti povrchu. Interval maximálnych hodnôt rýchlosti vetra nameraných na hladinách 5, 6, 7, 8 a 11 m bol:

na ploche Fd ($0,4, 5,4$) m s^{-1}
12.7. o 15 hod a ($0,8, 7,1$) m s^{-1}
13.7. o 11 hod

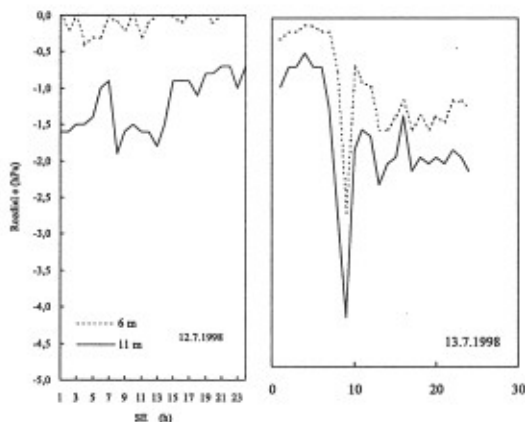
na ploche Fs ($1,2, 4,6$) m s^{-1}
12.7. o 16 hod a ($3,1, 7,2$) m s^{-1}
13.7. o 23 hod.

Drsnější povrch porastu na ploche Fd spôsobil výrazne nižšie hodnoty rýchlosti vetra na hladine 5 m ako na ploche Fs.



Obr. 3: Rozdiel teploty vzduchu na hladinách 6 m a 11 m medzi plochou Fd a Fs.

cez deň (12–18 hod), kedy bol teplejší, alebo mal rovnakú teplotu, vzduch na úrovni výšky porastu na ploche Fd. Denná variabilita hodnôt rozdielu teplôt medzi sledovanými plochami nad porastom, na hladine 11 m, oblačnosťou výrazne ovplyvnená nebola. Oblačnosť však ovplyvnila variabilitu denného chodu rozdielu tlaku pár medzi jednotlivými plochami, **obr. 4**. Vyššou vlhkosťou sa vyznačoval vzduch ovplyvnený smrekovým porastom na ploche Fs v oboch sledovaných dňoch. Pričom hodnota rozdielu vlhkosti vzduchu na hladine 6 m medzi plochou Fd a Fs počas zamračeného dňa bola nízka alebo sa rovnala nule.



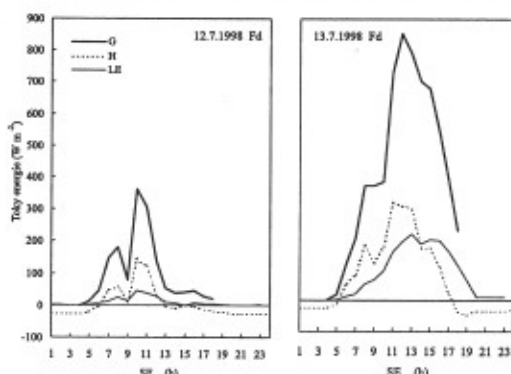
Obr. 4: Rozdiel tlaku pár na hladinách 6 m a 11 m medzi plochou Fd a Fs.

ciálom vody v pôde, priechovou rezistenciou a transpiráciou, a rovnica energetickej bilancie porastu. Jednotlivé modifikácie tohto modelu boli už skôr experimentálne overené pre rôzne druhy pôd a v rôznych klimatických podmienkach [Matejka 1994, 1995]. Ako ukazujú obrázky, sledované plochy sa výrazne od seba nelíšili a toky energie v PVA nadobúdali takmer rovnaké hodnoty nad porastom plochy Fd aj Fs. Na denný chod tokov energie ale výrazne pôsobí oblačnosť. Hodnoty G, H a LE počas zamračeného dňa sa vyznačujú nevýrazným

Na **obr. 3** a **4** je rozdiel teploty vzduchu a tlaku pár medzi plochou Fd a Fs na hladine rovnajúcej sa priemernej výške porastu (6 m) a nad porastom (11 m) vo vybraných dňoch. Počas zamračeného dňa bola na oboch hladinách teplota vzduchu vyššia na ploche Fs ako na ploche Fd pri nestabilnom teplotnom zvrstvení atmosféry. V jasnom dni má krivka rozdielu teplôt na hladine 6 m výrazné maximum

Denný chod globálneho žiarenia, turbulentného toku tepla a toku tepla potrebného na výpar je na **obr. 5** a **6**. Pre výpočet tokov energie bol použitý trojvrstvový stacionárny a jednodimenzionálny matematický model popisujúci vzájomné vzťahy v systéme pôda–rastlinný porast–atmosféra [Matejka 1994]. Dôležitými modelovými vzťahmi sú Penman–Monteithova rovnica, vzťah medzi poten-

denným chodom s nízkymi maximálnymi hodnotami. Denná amplitúda hodnôt G , H a LE v jasnom dni je vysoká. Ďalej sa ukázalo, že turbulentná výmena tepla nad porastom bola na oboch plochách významnejšia ako evapotranspirácia a to dokonca aj počas jasného dňa, kedy len po 14 hod na F_d , resp. 15 hod na F_s nadobúdala evapotranspirácia vyššie hodnoty ako turbulentný tok tepla.

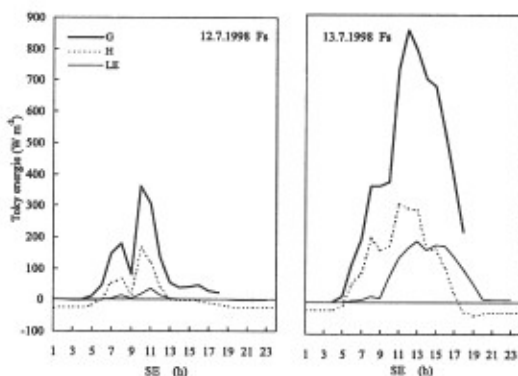


Obr. 5: Denný chod globálneho žiarenia G , turbulentného toku tepla H a toku tepla potrebného na výpar LE na ploche F_d .

Dôležité je tiež sledovanie Bowenovho pomeru, ktorý je definovaný vzťahom $Bo = \frac{H}{LE}$. Ukázalo sa, že najvýznamnejšie charakteristiky mikroklímy rastlinných porastov veľmi citlivo reagujú na zmeny Bowenovho pomeru, najmä keď jeho hodnoty sú nízke.

Záver

Z viacerých doteraz publikovaných prác zahraničných autorov vyplýva, že pri postupnom vysychaní pôdy na väčších územiach rastie hodnota Bowenovho pomeru a pri dosiahnutí určitej kritickej hranice dochádza k významným zmenám klímy, pričom sa zvlášť výrazne zmení časové a priestorové rozloženie zrážok. To potvrdzuje skutočnosť, že štruktúra energetickej bilancie aktívneho povrchu tesne súvisí s klímou.



Obr. 6: Denný chod globálneho žiarenia G , turbulentného toku tepla H a toku tepla potrebného na výpar LE na ploche F_s .

Vzťah medzi štruktúrou energetickej bilancie rastlinných porastov a ich mikroklímou je teda len jeden z mnohých zaujímavých aspektov interakčných vzťahov medzi rastlinným porastom a PVA. Prehĺbenie poznatkov z tejto oblasti môže prispieť k presnejšej formulácii okrajových podmienok pre matematické modelovanie vývoja a zmien klímy a k lepšiemu poznaniu procesu transformácie vzduchových hmôt.

Pod'akovanie

Autori ďakujú Grantovej agentúre ČR (grant č. 205/99/1561) a Vedeckej grantovej agentúre Ministerstva školstva SR a SAV (grant č. 2/6041/99) za čiastočné financovanie tejto práce.

Literatúra

Hurtalová, T., Janičkovičová, L., Matejka, F. Dynamic roughness–aerodynamic characteristic of the active surface. *Contr. Geophys. Inst. SAS, Ser. Meteorol.*, 1987, Vol. 7, s. 38–46.

Janouš, D. et al. EUROFLUX–CZ: Long term carbon dioxide and water vapour fluxes of European forest and interaction with the Climat System. In: *Proceedings of the 6th Poster Day on Transport of water, chemicals and energy in the soil–plant–atmosphere system*. Inst. of Hydrol. and Geophys. Inst. SAS, Bratislava, 1998, s. 39–40.

Matejka, F. Interrelations between plant canopy and atmosphere. *Contr. Geophys. Inst., Ser. Meteorol.*, 1994, Vol. 14, s. 21–30.

Matejka, F. Vplyv meteorologických činiteľov na evapotranspiráciu. *Met. Zpr.*, 1995, roč. 48, č. 3, s. 87–90.

Matejka, F., Huzulák, J. *Analýza mikroklimy porastu*. 1.vyd. Bratislava: Veda, 1987, 232 s.

Rožnovský, J., Tomášková, K. Vertikální rozložení vzdušné vlhkosti ve smrkovém porostu. *Zpravodaj Beskydy „Vliv imisí na lesy a lesní hospodářství“*, 1997, č. 9, s. 151–154.

Adresa autorů

Geofyzikálny ústav SAV, Dúbravská cesta 9, 842 28 Bratislava, Slovenská republika, tel.: 00421 7 5941 2663, e-mail: geoftahu@savba.sk