

CHARAKTERISTIKY TURBULENCIE VZDUCHU NAD MLADÝM SMREKOVÝM PORASTOM

CHARACTERISTICS OF AIR TURBULENCE ABOVE A YOUNG SPRUCE FOREST

Hurtalová¹, T., Matejka¹, F., Rožnovský², J., Janouš³, D., Havránková³, K.

¹ Geofyzikálny ústav SAV, Dúbravská cesta 9, 942 28 Bratislava, Slovenská republika

² Ústav krajinné ekológie MZLU v Brně, Zemědělská 1, 613 00 Brno, Česká republika

³ Ústav ekológie krajiny Akademie věd ČR, Na sádkách 7, 370 05 České Budějovice, Česká republika

Abstract

The air turbulence characteristics were studied on the basis of analysis of vertical wind speed profiles measured in and above a young spruce forest. The zero plane displacement d , dynamic roughness length z_0 , drag coefficient of the forest stand C_D , values of aerodynamic resistance r_a , and their seasonal variations were investigated during two vegetation seasons of 1997 and 1999. The measurements were conducted on an experimental site of Norway spruce forest situated in the location of Bílý Kříž, the Czech Republic ($\varphi = 49^\circ 30'17''$, $\lambda = 18^\circ 32'28''$, 898 – 908 m a.s.l.). The investigated young spruce forest was in an aerodynamically unsteady state and the roughness length values changed systematically with the wind speed.

Úvod

Rastlinné porasty všeobecne a lesné ekosystémy zvlášť, majú dôležitú schopnosť intenzívne vytvárať, modifikovať a chrániť mikroklimu (Intribus, 1977). S klimatickou funkciou lesov úzko súvisí aj fyziologická regulácia turbulentnej výmeny hmoty a energie medzi lesným porastom a okolitým ovzduším, ktorá podstatným spôsobom ovplyvňuje energetickú bilanciu lesa a rovnako charakteristiky prízemnej vrstvy atmosféry.

V predložennom príspevku sú sledované vybrané charakteristiky turbulencie vrstvy vzduchu ovplyvnenej mladým smrekovým porastom. Boli určené hodnoty efektívnej výšky porastu d , dynamickej drsnosti povrchu z_0 , koeficientu trenia povrchu vytvoreného porastom C_D , aerodynamickej rezistencie r_a a sledované ich sezónne zmeny. S týmto cieľom boli analyzované vertikálne profily rýchlosti vetra merané v mladom smrekovom poraste a tesne nad ním počas dvoch vegetačných období v roku 1997 a 1999.

Experimentálne údaje a metódy

Profilové merania boli získané na experimentálnom ekologickom pracovisku Ústavu ekológie krajiny AV ČR, ktoré sa nachádza v lokalite Bílý Kříž vo vrcholovej časti Moravsko-

sliezských Beskýd ($\varphi = 49^\circ 30'17''$, $\lambda = 18^\circ 32'28''$, 898 – 908 m n.m.). Porast smreku obyčajného (*Picea abies* (l) Karst) bol založený v roku 1981 výsadbou štvorročných sadenic v severo-južne orientovaných radoch so sponom 2x1 m. Ide teda o mladý smrekový porast. Hustota porastu bola niekoľkokrát redukovaná pestovateľskými zásahmi, až vo vegetačnom období r. 1997 dosiahla hodnotu 2600 stromov na hektár.

Lokalita Bílý Kříž patrí do mierne chladnej, vlhkej a zrážkovo bohatej oblasti s priemerným ročným úhrnom zrážok 1400 mm. Priemerná ročná teplota vzduchu je 4,9 °C a priemerná ročná relatívna vlhkosť vzduchu 80%. V tejto oblasti Beskýd celkove prevláda severné a západné prúdenie vzduchu, avšak početnosť prípadov južného vetra je tiež pomerne vysoká. Priamo nad experimentálnou plochou so sledovaným smrekovým porastom, vplyvom miestnej morfológie terénu, sa často vyskytuje južný smer vetra, ktorý najmä počas vegetačného obdobia mierne prevláda nad severným prúdením.

Analyzovaný výber zo súboru vertikálnych profilov rýchlosti vetra meraných v roku 1997 od 21. mája do 24. októbra obsahoval 151 profilov, ktoré spĺňali podmienku: $\bar{u}(5m) \geq 1,0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. V roku 1999 sa meralo od 6. mája do 31. októbra a analyzovaný súbor obsahoval 229 profilov, ktoré spĺňali nerovnosť: $\bar{u}(6m) \geq 1,0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Hodnoty rýchlosti vetra boli merané v r. 1997 v hladinách 2, 5, 6, 7, 8 a 11 m (výšky merané od povrchu zeme), v roku 1999 sa meralo v rovnakých výškach od hladiny 5 m. Ukázalo sa totiž, že rýchlosť vetra meraná v hladine 2 m (táto výška reprezentuje hladinu v spodnej časti korún stromov) bola prakticky rovná nule počas celého sledovaného obdobia.

Profily rýchlosti vetra namerané v podmienkach neutrálneho teplotného zvrstvenia boli použité na určenie hodnoty efektívnej výšky porastu d (Brutsaert, 1982; Hayashi, 1983). Dynamická drsnosť povrchu bola vypočítaná podľa vzťahu (Hurtalová et al., 1987)

$$z_0 = 10^{-\gamma}, \quad (1)$$

kde γ je konštanta, ktorej hodnota je určená z analýzy profilov rýchlosti vetra meraných v podmienkach rôzneho teplotného zvrstvenia atmosféry.

Na základe analýzy vertikálnych profilov rýchlosti vetra môže byť vypočítaná aj aerodynamická rezistencia r_a . Vychádzajúc z definície integrálneho koeficientu turbulentnej difúzie (Hurtalová, Szabó, 1985) a z teórie Monina-Obuchova pri zohľadnení teplotného zvrstvenia atmosféry, možno odvodiť pre aerodynamickú rezistenciu r_a vzťah (Hurtalová, 1995):

$$r_a = \frac{\ln\left(\frac{z}{z_0}\right) + \frac{\beta}{L}(z - z_0)}{\kappa u_*}, \quad (2)$$

kde β/L je parameter stability (β je Moninova-Obuchova konštanta a L výška podvrstvy dynamickej turbulencie), u_* je dynamická rýchlosť a κ je Kármánova konštanta. V podmienkach neutrálneho teplotného zvrstvenia atmosféry hodnotu u_* vypočítame podľa vzťahu

$$u_* = \frac{\kappa \bar{u}(z)}{\ln\left(\frac{z-d}{z_0}\right)}. \quad (3)$$

Podmienka neutrálneho teplotného zvrstvenia atmosféry je približne splnená pri rýchlosti vetra väčšej ako $5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (Richter, Skeib, 1991).

Koeficient trenia povrchu vytvoreného porastom C_D , definovaný dotykovým napätím, ktoré je ekvivalentné dynamickej tretej sile pôsobiacej na vrstvu vzduchu nad porastom, môže byť vyjadrený vzťahom $C_D = (u_*/\bar{u}(h))^2$, (Hayashi, 1983).

Získané výsledky a diskusia

Pre veľmi drsné povrchy, špeciálne, ak je povrch vytvorený rastlinným porastom, je potrebné poznať hodnotu efektívnej výšky porastu. V literatúre (Brutsaert, 1982; Mölder et al., 1999) sa často uvádza vzťah s priemernou hodnotou $d/h = 0,68$ a s extrémnymi hodnotami 0,53 a 0,86. Pre sledovaný porast z profilov rýchlosti vetra meraných v podmienkach neutrálneho teplotného zvrstvenia atmosféry bola určená priemerná hodnota $\bar{d} \approx 4,0 \text{ m}$ v roku 1997, kedy priemerná výška porastu bola $\bar{h} = 6,44 \text{ m}$. Odtiaľ vyplýva pre pomer $d/h \approx 0,62$. V roku 1999 $\bar{h} = 7,73 \text{ m}$ a $\bar{d} \approx 5,0 \text{ m}$. Teda pomer $d/h \approx 0,65$.

S cieľom určiť hodnotu koeficienta dynamickej drsnosti povrchu z_0 bol analyzovaný súbor profilov rýchlosti vetra meraných v rôznych podmienkach teplotného zvrstvenia atmosféry. Priemerné hodnoty z_0 v jednotlivých mesiacoch sledovaného obdobia sú v tabuľke 1.

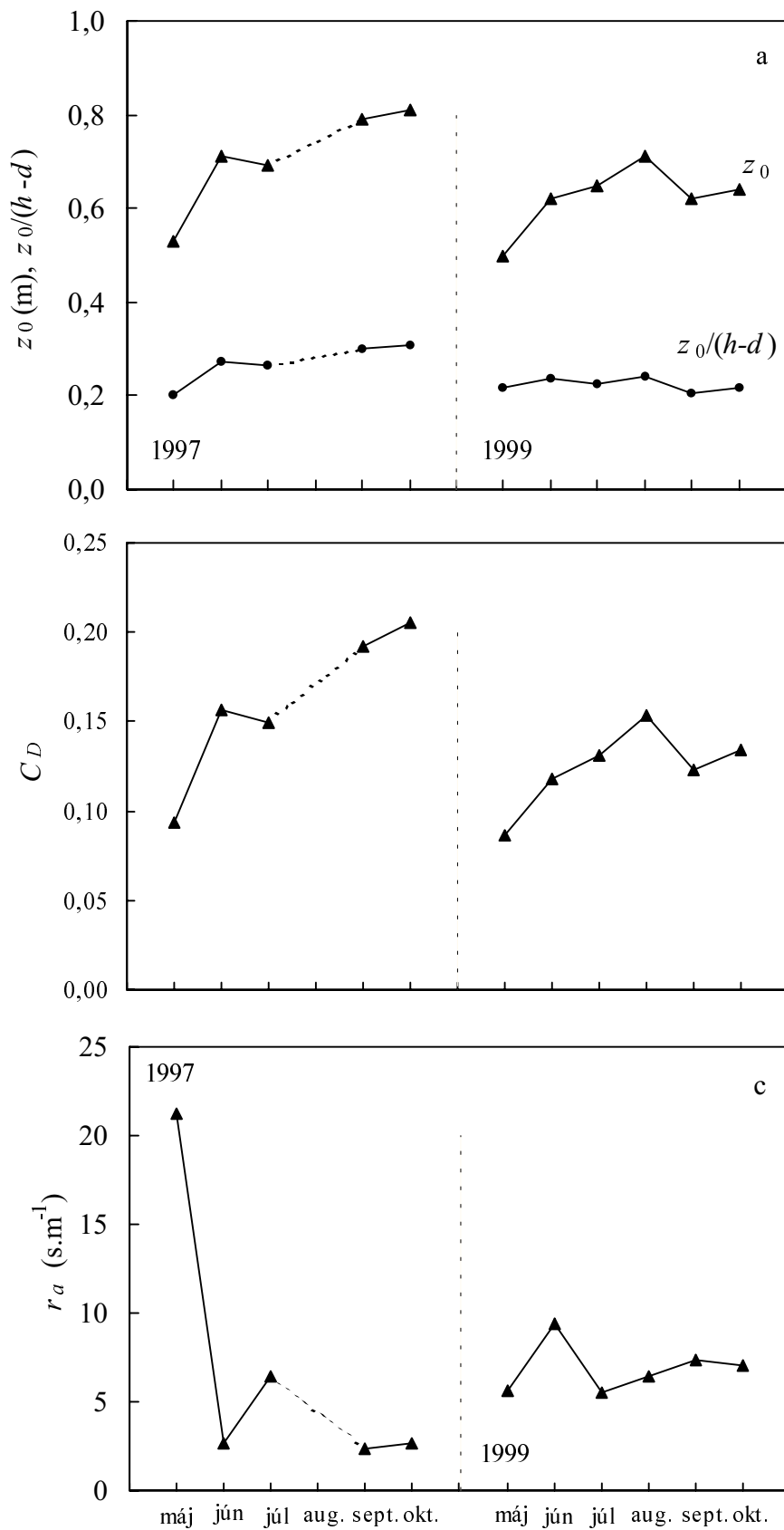
Koeficient dynamickej drsnosti povrchu sa často charakterizuje výškou elementov drsnosti nad aktívnym povrchom porastu, t.j. pomerom $z_0/(h-d)$, ktorého hodnoty uvádzané v literatúre sú od 0,2 do 0,4 (Mölder et al., 1999; Brutsaert, 1982). Je to v dobrej zhode s hodnotami tohto pomeru pre sledovaný mladý smrekový porast, tabuľka 1 (obr. 1a), keď sa

Tabuľka 1. Priemerné mesačné hodnoty z_0 , smerodajná odchýlka s , priemerná hodnota pomeru $z_0/(h-d)$, aerodynamická rezistencia r_a , koeficient trenia povrchu C_D a počet analyzovaných profilov i v jednotlivých mesiacoch sledovaného obdobia mladého smrekového porastu v roku 1997 a 1999 v lokalite Bílý Kříž.

	z_0 [m]	s [m]	$z_0/(h-d)$	r_a [s.m ⁻¹]	C_D	i
1997						
máj	0,53	0,098	0,218	21,182	0,094	3
jún	0,71	0,108	0,293	2,610	0,157	64
júl	0,69	0,123	0,283	6,462	0,149	9
august	–	–	–	–	–	0
september	0,79	0,108	0,323	2,378	0,192	46
október	0,81	0,224	0,331	2,667	0,205	29
1999						
máj	0,50	0,105	0,216	5,608	0,086	57
jún	0,62	0,086	0,238	9,371	0,118	14
júl	0,65	0,109	0,225	50553	0,131	21
august	0,71	0,073	0,243	6,378	0,153	4
september	0,62	0,128	0,205	7,372	0,123	43
október	0,64	0,151	0,219	7,063	0,134	90

hodnoty $z_0/(h-d)$ pohybovali od 0,218 do 0,331 v r. 1997 a od 0,205 do 0,238 v r. 1999. Ako vidieť z tabuľky 1, v auguste 1997 nebol nameraný žiadny profil rýchlosti vetra s požadovanou hodnotou \bar{u} (5m) a v r. 1999 boli analyzované v auguste len 4 vertikálne profily, pre ktoré platila nerovnosť: $\bar{u}(6m) \geq 1,0 \text{ m.s}^{-1}$. To znamená, že tento mesiac sa vyznačoval v oboch sledovaných vegetačných obdobiach slabým prúdením vzduchu. Nízky počet analyzovaných profilov v máji 1997 je daný tým, že merania začali len od 21. mája. Najveternejší bol jún 1997 a október 1999. Priemerné hodnoty z_0 majú teda rôzny interval spoľahlivosti. Napriek tomu možno konštatovať, že hodnota z_0 bola najnižšia v máji a potom pomaly rastie, obr. 1a. Priemerná hodnota z_0 počas vegetačného obdobia v r. 1997 bola 0,71m a v r. 1999 klesla na hodnotu 0,62 m. Možno to vysvetliť vyššou hodnotou LAI = 7,9 porastu v roku 1999 oproti r. 1997, kedy LAI = 5,6. Vyšší a hustejší porast v r. 1999 je teda charakterizovaný nižšou priemernou hodnotou dynamickej drsnosti povrchu a tiež nižšou variabilitou jej hodnôt počas sledovaného obdobia.

Za predpokladu, že hodnoty z_0 a d sa nemenia s rýchlosťou vetra, potom z logaritmického zákona vyplýva medzi u_* a $\bar{u}(h)$ lineárny vzťah: $u_* = a\bar{u}(h)$, kde a je konštanta. V takomto



Obr. 1. Sezónne zmeny vybraných charakteristík turbulencie počas vegetačného obdobia mladého smrekového porastu v r. 1997 a 1999 v lokalite Bílý Kříž.

prípade má rastlinný porast aerodynamicky stály tvar (Hayashi, 1983). V reálnych podmienkach sa často tento vzťah odlišuje od lineárneho a platí $u_* = b(\bar{u}(h))^c$, kde b a c sú konštanty. Takéto porasty majú aerodynamicky nestály tvar a potom dynamická drsnosť ich povrchu a efektívna výška porastu môžu závisieť aj od rýchlosti a smeru prúdenia vzduchu (Hayashi, 1983). Z nášho experimentu vyplynul pre závislosť medzi u_* a $\bar{u}(h)$ analytický vzťah: $u_* = 0,72 (\bar{u}(h))^{0,53}$ v r. 1997 a $u_* = 0,50 (\bar{u}(h))^{0,63}$ v r. 1999. To znamená, že sledovaný lesný porast mal aerodynamicky nestály tvar. Dalo sa teda očakávať, že hodnoty z_0 budú závisieť na smere a rýchlosti prúdenia vzduchu. Analyzované profily rýchlosti vetra, vzhľadom na orografické členenie terénu a požadovanú podmienku hodnoty rýchlosti vetra v hladine 5 resp. 6 m, boli všetky namerané zo smerov S a SSW. Pre ostatné smery vetra je sledovaný svah záveterný. Preto sme závislosť hodnoty z_0 od smeru vetra nemohli sledovať. Závislosť z_0 od rýchlosti vetra sme sledovali vychádzajúc z Hayashiho modelu (Hayashi, 1983) a analyzovali sme závislosť koeficienta relatívnej drsnosti povrchu od bezrozmernej rýchlosti: $z_0/h = f(\bar{u}(h)/u_*)$. Pre mladý smrekový porast bola nájdená závislosť, ktorú možno popísať analyticky vzťahom (Hurtalová, Janouš, 2000; Hurtalová et al., 2000):

$$1997: \frac{z_0}{h} = 0,311 \exp\left(-0,4 \frac{\bar{u}(h)}{u_*}\right), \quad 1999: \frac{z_0}{h} = 0,244 \exp\left(-0,38 \frac{\bar{u}(h)}{u_*}\right) \quad (4)$$

Sledovaná závislosť je klesajúca v celom intervale hodnôt $\bar{u}(h)/u_*$. Z rovnakej analýzy ďalej vyplynulo, že hodnota efektívnej výšky sledovaného smrekového porastu d nezávisela od rýchlosti prúdenia vzduchu a bola funkciou len výšky porastu. Pre hodnotu d platil vzťah $d = 0,69h$ v r. 1997 resp. $d = 0,76h$ v r. 1999. Táto hodnota je o málo vyššia ako hodnota tohto pomeru určená z profilov rýchlosti vetra v podmienkach neutrálneho teplotného zvrstvenia atmosféry. Mölder et al. (1999) pre ihličnatý les priemernej výšky 24,5 m uvádzajú hodnotu $d = 0,86 h$.

Na obr. 1b, c je sezónny chod koeficientu trenia povrchu vytvoreného porastom a aerodynamickej rezistencie v sledovanom rastovom období smrekového porastu v r. 1997 a 1999. Ako vidieť, koeficient trenia povrchu sleduje zmeny dynamickej drsnosti povrchu. Pri hodnotení výsledkov treba mať na zreteli, že priemerné hodnoty charakteristík majú rôzne intervaly spoľahlivosti, napr. v máji 1997 sú hodnoty určené z analýzy len troch profilov rýchlosti vetra, pretože merania sa začali až 21. mája.

Záver

Pri rozvoji turbulencie vo vrstve vzduchu ovplyvnenej porastom hrajú významnú úlohu charakteristiky a vlastnosti porastu. Lesné porasty, charakteristické svojím značným vertikálnym rozmerom, členením do jednotlivých vegetačných vrstiev a mohutnou biomasou výrazne modifikujú pole prúdenia vzduchu v poraste a vo vrstve vzduchu nad ním.

V príspevku sú len veľmi stručne uvedené výsledky analýzy profilových meraní rýchlosti vetra v mladom smrekovom poraste a tesne nad ním v rastovom období 1997 a 1999 s cieľom sledovať vplyv tohto porastu na charakteristiky turbulencie. Z experimentu vyplynulo, že sledovaný lesný porast mal aerodynamicky nestály tvar a hodnota dynamickej drsnosti povrchu závisela od rýchlosti prúdenia vzduchu, vzťah (4). Priemerná hodnota z_0 v roku 1997 bola 0,71 m a 0,62 m v roku 1999. Naproti tomu efektívna výška porastu bola závislá len od jeho výšky a nezávisela na rýchlosti vetra, $d = 0,69h$ (1997) resp. $d = 0,76h$ (1999). Vegetačné obdobie 1997, kedy bol porast nižší a mal nižšiu hodnotu LAI, sa vyznačovalo väčšou variabilitou hodnôt sledovaných charakteristík ako obdobie 1999, obr. 1.

Súhrn

Na základe analýzy profilových meraní rýchlosti vetra v mladom smrekovom poraste a tesne nad ním v rastovom období 1997 a 1999 boli sledované charakteristiky, ktoré ovplyvňujú turbulentnú výmenu medzi porastom a priľahlou vrstvou vzduchu. Boli určené hodnoty efektívnej výšky porastu d , dynamickej drsnosti povrchu z_0 , koeficientu trenia povrchu vytvoreného porastom C_D , aerodynamickej rezistencie r_a a sledované ich sezónne zmeny pre porast smreku obyčajného, ktorý mal v r. 1997 16 rokov a hustotu 2600 stromov na hektár. Analyzovaný výber zo súboru vertikálnych profilov rýchlosti vetra meraných v roku 1997 (od 21. mája do 24. októbra) obsahoval 151 profilov, ktoré spĺňali podmienku: $\bar{u}(5m) \geq 1,0 \text{ m.s}^{-1}$. V roku 1999 (6. mája do 31. októbra) analyzovaný súbor obsahoval 229 profilov, ktoré spĺňali nerovnosť: $\bar{u}(6m) \geq 1,0 \text{ m.s}^{-1}$. Hodnoty rýchlosti vetra boli merané v r. 1997 v hladinách 2, 5, 6, 7, 8 a 11 m (výšky merané od povrchu zeme), v roku 1999 sa meralo v rovnakých výškach od hladiny 5 m.

Sledovaný lesný porast mal aerodynamicky nestály tvar a hodnota dynamickej drsnosti povrchu závisela od rýchlosti prúdenia vzduchu, čo možno analyticky vyjadriť vzťahom (4). Priemerná hodnota z_0 v roku 1997 bola 0,71 m a 0,62 m v roku 1999. Naproti tomu efektívna výška porastu bola závislá len od jeho výšky a nezávisela na rýchlosti vetra, $d = 0,69h$ (1997)

resp. $d = 0,76h$ (1999). Rastové obdobie 1997 sa vyznačovalo väčšou variabilitou hodnôt sledovaných charakteristík ako obdobie 1999, kedy bol porast vyšší a hustejší.

Pod'akovanie: Prezentované výsledky boli získané vďaka čiastočnej podpore projektov VE-GA č. 2/7064/20 a GA ČR č. 526/00/0485.

Kľúčové slová: smrekový porast, efektívna výška povrchu, dynamická drsnosť povrchu, koeficient trenia, aerodynamická rezistencia

Literatúra

- Brutsaert, W.H. 1982: Evaporation into the Atmosphere. London, D. Reidel Publishing Company, 299 s.
- Hayashi, Y. 1983: Aerodynamical properties of air layer affected by vegetation. Environ. Res. Center Papers, 3, Ibaraki (Japan), ERC the University of Tsukuba, 54 s.
- Hurtalová, T. 1995: Aerodynamic resistance role in plants-atmosphere system. Contr. Geophys. Inst. SAS, Ser. Meteorol., Vol.15, 52–61.
- Hurtalová, T., Janičkovičová, L., Matejka, F. 1987: Dynamic roughness – an aerodynamic characteristics of the active surface. Contr. Geophys. Inst. SAS, Ser. Meteorol., Vol. 7, 38–46.
- Hurtalová, T., Janouš, D. 2000: Dynamic roughness parameter for young spruce forest during one vegetation season. Contr. to Geophys. and Geodesy, Vol. 30, no. 1, 1–14.
- Hurtalová, T., Janouš, D., Marková, I. 2000: Aerodynamic properties of young spruce stand. Ecology (v tlači).
- Intribus, R. 1997: Význam klimateckej funkcie lesa v ochrane životného prostredia. In: les ako súčasť životného prostredia. Ed. D. Zachar. Bratislava, Veda, 63–70.
- Mölder, M., Grelle, A., Lindroth, A., Halldin, S. 1999: Flux-profile relationship over a boreal forest – roughness sublayer corrections. Agric. and Forest Meteorol. (98-99), no. 1-4, 645–658.
- Richter, H., Skeib, G. 1991: Ein Verfahren zur Parametrisierung von Austauschprozessen in der bodennahen Luftschicht. Abh. Meteorol. Dienstes DDR, 146, 12–22.