

MIKROKLIMATICKÉ ÚČINKY SMREKOVÉHO PRALESA

*František Matejka, Katarína Štřelcová, Tatjana Hurtalová,
Erika Gömöryová, Jaroslav Škvarenina*

Abstract:

The results of the microclimatic measurements carried out at the interface between the spruce primeval forest and atmosphere were analyzed with aim to identify and quantify the characteristic features of the virgin forest microclimate with a special attention to description of air temperature and humidity in the surface layer of the atmosphere above the forest. Besides the traditional statistical methods, also an approach based on mathematical modeling of microclimate was used. Changes in the forest microclimate was simulated using an experimentally verified mathematical model which provides a possibility to calculate daily courses of air temperature and humidity vertical profiles in the surface layer of the atmosphere and simultaneously to quantitatively express the response of the forest microclimate to changes in trees characteristics and soil moisture. Based on the model simulations, the surface and atmospheric effects on air temperature and humidity were separated that enabled to express the partial dependences of individual trees characteristics and soil moisture in the root zone on temperature and humidity conditions above the forest stand. It followed from performed analysis that changes in stand characteristics as the leaf area index, root system development, roughness parameter and canopy conductance strongly affect the air temperature and humidity in the surface layer of the atmosphere above the primeval forest. It was shown that soil moisture in the root zone had a potential to make a critical impact on the mass and energy exchange between the forest and the atmosphere and consequently on the air temperature and humidity in the surface layer of the atmosphere near the forest canopy. The microclimate of the analyzed virgin forest is compared with typical microclimatic feature of a young spruce monoculture growing in similar soil and climatic conditions.

Keywords: microclimate, transpiration, canopy conductance, air temperature, air humidity

1. Úvod

Jednou z charakteristických črt interakcie medzi lesným porastom a atmosférou je intenzívna výmena hmoty a energie medzi klimaticky aktívnym povrchom porastu a najnižšími vrstvami ovzdušia. V procese tejto výmeny sa do atmosféry dostáva značné množstvo tepla a vodnej pary, čo má za následok zmeny teploty a vlhkosti vzduchu vo vnútri porastu a tesne nad ním. Takýmto spôsobom lesné môžu porasty významne ovplyvňovať klimatické pomery v rôznom časovom a priestorovom meradle. V rámci výskumu mikroklimy lesných porastov bola doteraz venovaná pozornosť hlavne priestoru v korunách stromov a lesnej pôde pod nimi, kde sú mikroklimatické po-

mery najzreteľnejšie ovplyvňované. Z metodického hľadiska boli pritom najčastejšie používané štandardné postupy štatistickej analýzy výsledkov mikroklimatických meraní vykonávaných v lesnom poraste a tesne nad ním. V oblasti strednej Európy významným spôsobom prispeli k výskumu mikroklimy lesa výsledky prác Baumgartnera (1956), Intribusa (1977), Krečmera (1989) a mnohých ďalších. V súčasnosti sa silným stimulom pre rozvoj výskumu mikroklimy lesa a lesníckej bioklimatológie stávajú niektoré globálne problémy, v ochrane a využívaní lesov ako napr. stanovenie kritickej úrovne vo vzťahu k depozičným procesom a polutantom, vodná bilancia lesných porastov, vplyv zmeny klímy na lesné ekosystémy, atď. (Tužinský et al., 1999). Popri

tom sa v posledných dvoch desaťročiach začínajú akcentovať globálne ekologické aspekty klimatickej funkcie lesov, ktorá môže pôsobiť ako homeostatický faktor, dôležitý pre stabilitu celého klimatického systému (Hutjes a Kabát, 1998). Z tohto hľadiska je dôležitejšie detailné poznanie vplyvu lesných porastov na fyzikálne charakteristiky prízemnej vrstvy atmosféry nad porastom než samotné mikroklimatické pomery vo vnútri porastu a pod ním. Pri takejto orientácii mikroklimatického výskumu samotné štatistické metódy nepostačujú pre kvantitatívny popis mikroklimatických účinkov lesných porastov, najmä pokiaľ ide interakčné vzťahy, ktoré sú dôležité pre pochopenie klímových účinkov lesných porastov. Preto je nevyhnutné doplniť používaný štatistický aparát použitím matematických modelov umožňujúcich simulovať základy procesu vytvárania mikroklimy lesa (Ziemann, 1996). Výsledky snáh o rozšírenie lokálnych mikroklimatických modelov do regionálneho meradla zosumarizovali Goudriaan, (1989) a McNaughton (1989). Holtslag, Boville and Moeng (1991) posúdili možnosti využitia parametrizácie hraničnej vrstvy atmosféry pri navrhovaní globálnych klimatických modelov.

Mnohé z existujúcich matematických modelov genézy a dynamiky fytoklimy však boli navrhnuté a experimentálne verifikované pre porasty poľných plodín a lesným porastom bola z tohto hľadiska venovaná menšia pozornosť. V snahe rozšíriť súčasný stav poznania v tejto oblasti, je cieľom tohto príspevku navrhnuť a experimentálne verifikovať matematický model simulujúci dennú a sezónnu dynamiku teplotných a vlhkosťných pomerov v prízemnej vrstve atmosféry nad smrekovým pralesom a následne ho využiť pre identifikáciu charakteristických črt procesu vytvárania mikroklimy tohto lesného porastu.

2. Materiál a metódy

Experimentálne podklady potrebné pre nevyhnutnú štatistickú analýzu a pre vytvorenie súboru vstupných údajov pre navrhnutý mikroklimatický model boli získané počas vegetačného obdobia roku 2002 v hrebeňovej časti prírodnej rezervácie Zadná Poľana so sklonom 5 – 25% a s nadmorskou výškou 1347 m n. m ($\phi = 19^{\circ} 28'$, $\lambda = 48^{\circ} 37'$). Z klimatického hľadiska možno túto oblasť charakterizovať ako horskú, chladnú, pričom priemerné ročné teploty sa v poslednom desaťročí pohybovali v rozmedzí 3,5 – 4,0 °C a ročné úhrny zrážok dosahovali 900 – 1100 mm. Pôdny substrát tvoria andozeme na geologickom podklade vulkanitov.

Skúmaný porast patrí do siedmeho lesného vegetačného stupňa a skupiny lesných typov *Sorbeto – Piceetum*, *Acereto – Piceetum*. Vek porastu je 190 rokov jeho dominantnú zložku (93%) tvorí smrek (*Picea abies* [L.] Karst). Počas sledovaného obdobia priemerná výška porastu dosahovala 25 m a jeho hustota sa menila v závislosti od jeho štruktúry a veku stromov.

Nad skúmaným porastom boli na meteorologickej veži vo výške 25 m nad zemou, teda približne na úrovni hornej hranice korún stromov, merané hodnoty teploty a vlhkosti vzduchu, intenzity globálneho žiarenia, rýchlosti vetra a denných úhrnov zrážok. Teplota pôdy bola meraná v hĺbke 0,1 m. Obsah pôdnej vody bol stanovený gravimetricky v hĺbkach 0-10 cm, 10-20 cm, 20-30 cm, 30-40 cm, 40-50 cm.

Transpiračný prúd bol sledovaný na troch modelových vzorníkoch smreka priamym nedeštruktúrnym kontinuálnym meraním metódou tepelnej bilancie s vnútorným ohrevom pletív a snímaním teploty (Ecological Measuring Systems, Brno, Česká republika). Metodika merania a inštalácia meracích miest bola už skôr popísaná (Čermák a kol.,

1976, 1982, Kučera a kol., 1977). Výsledky meraní transpiračného prúdu boli nakoniec prepočítané na transpiráciu celého porastu metódou „scaling up“ (Infante a kol., 1997). Pre simuláciu denných chodov teploty a vlhkosti vzduchu and smrekovým pralesom bol navrhnutý trojvrstvový SVAT (Soil-Vegetation-Atmosphere-Transfer) model rozšírený o mikroklimatický blok (Matejka, 1998), vychádzajúci z predpokladu homogénneho porastu rastúceho na tak veľkej ploche, aby bolo možné zanedbať okrajové mikroklimatické efekty. Model kombinuje a rozvíja metodické prístupy, ktoré v modelovaní prenosu hmoty a energie medzi vegetáciou a atmosférou použili Bichele a kol., (1980), Choudhury a Monteith (1988), McNaughton (1989) a Wallace (1995). Fyzikálna koncepcia modelu je založená na základných vzťahoch platných pre konvektívnu hraničnú vrstvu atmosféry, na van Honertovom vzťahu popisujúcom dynamiku vody v rastline a na Darcyho rovnici prenosu vody v pôde. Matematická formalizácia modelových predpokladov vedie k sústave siedmich algebraických rovníc, ktorej riešením je parametre vodného režimu porastu, transpirácia a výpar z lesnej pôdy, teplota a vlhkosť na úrovni vyparujúceho povrchu a konečne teplota a vlhkosť vzduchu v prízemnej vrstve atmosféry nad lesným porastom. Vstupnými údajmi do modelu sú biometrické charakteristiky porastu, hydrofyzikálne charakteristiky pôdy, pôdna vlhkosť v koreňovej zóne a z meteorologických prvkov je to globálne žiarenie a rýchlosť vetra v referenčnej hladine nad porastom.

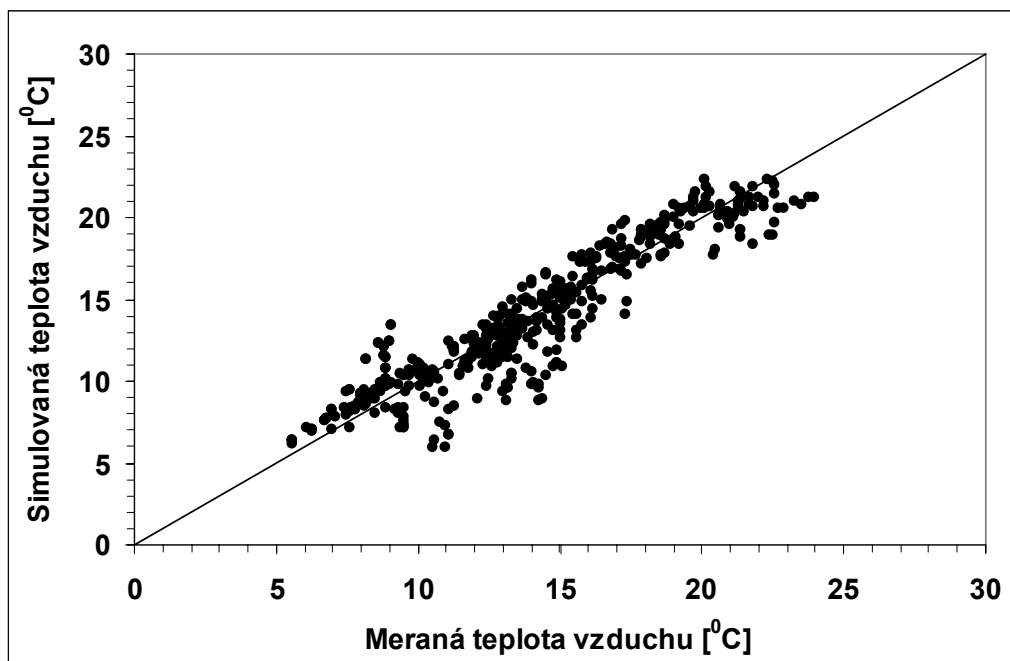
3. Výsledky a diskusia

V rámci kompletizácie vstupných údajov do navrhnutého simulačného modelu boli hodinové sumy transpirácie porastu, stanovené

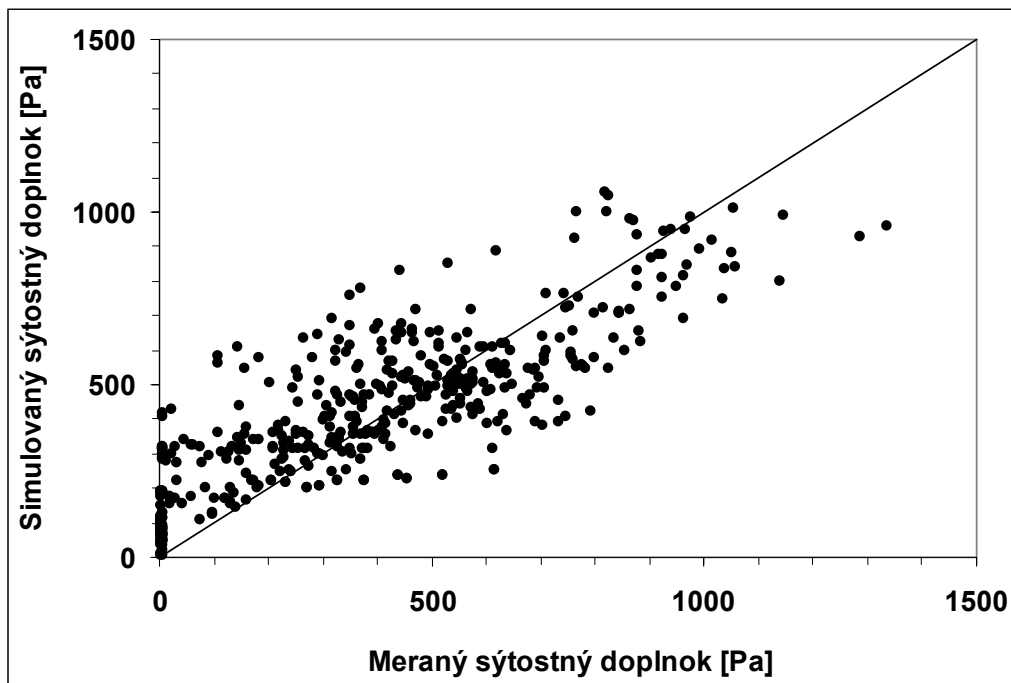
na základe výsledkov merania transpiračného prúdu, použité na výpočet rezistencie porastu pre prenos vodnej pary riešením invertovanej Penman-Monteithovej rovnice (Granier a Loustau, 1994, Martin a kol., 1977). Z takto stanovených hodnôt rezistencie porastu bola parametrizovaná reakcia prieduchového aparátu sledovaného porastu na zmeny parametrov okolitého prostredia pomocou „response functions“ (Jarvis, 1976, Stewart, 1988). Charakteristiky pôdy a porastu, tvoriace ďalšiu časť vstupov modelu boli získané v procese kalibrácie modelu, ktorá bola vykonaná na základe experimentálnych údajov získaných počas mesiaca mája 2002 v daných konkrétnych podmienkach.

V nasledujúcom kroku bol kalibrovaný model verifikovaný na základe štatisticky nezávislého súboru výsledkov meraní teploty a vlhkosti vzduchu získaných v mesiaci júni 2002. Verifikácia modelu spočívala v porovnaní simulovaných hodinových priemerov teploty vzduchu a sýtosťného doplnku na úrovni hornej hranice korún stromov smrekového pralesa so zodpovedajúcimi výsledkami meraní.

Experimentálna verifikácia navrhnutého modelu bola vykonaná na základe štatisticky nezávislého súboru výsledkov meraní teploty a vlhkosti vzduchu získaných počas mesiaca mája roku 2002 na úrovni hornej hranice korún stromov. Za charakteristiku vlhkosti vzduchu bol v týchto prípadoch považovaný sýtosťný doplnok, vzhľadom na jeho veľký význam pri analýze mikroklimy porastu. Simulačné výpočty prebiehali v každom dni verifikačného obdobia v čase od 6. do 21. hodiny s hodinovým krokom. V procese verifikácie modelu boli porovnané simulované hodinové priemery teploty a sýtosťného doplnku na úrovni hornej hranice korún stromov smrekového pralesa so zodpovedajúcimi výsledkami meraní (obr. 1, obr. 2).



Obr. 1. Porovnanie výsledkov modelovej simulácie teploty vzduchu na hornej hranici korún stromov smrekového pralesa so zodpovedajúcimi výsledkami meraní.



Obr. 2. Porovnanie výsledkov modelovej simulácie sýtočného doplnku na hornej hranici korún stromov smrekového pralesa so zodpovedajúcimi výsledkami meraní.

Ukázalo sa, že porovnané hodnoty simulovaných a meraných hodnôt sú tesne korelované, s korelačným koeficientom $r_t = 0,93$ pre teplotu vzduchu a $r_{sd} = 0,84$ pre sýtostný doplnok, čomu zodpovedajú koeficienty determinácie $r_t^2 = 0,86$ a $r_{sd}^2 = 0,704$. Teda, navrhnutý model vysvetľuje viac než 86% z dennej variability teploty vzduchu a viac než 70% z dennej variability sýtostného doplnku meraného na úrovni hornej hranice korún stromov. Aritmetický priemer rozdielov medzi zodpovedajúcimi simulovanými a meranými hodnotami za cele porovnané obdobie predstavuje $0,3\text{ }^{\circ}\text{C}$ pre teplotu vzduchu a $0,35\text{ hPa}$ pre sýtostný doplnok. Z toho zistenia, ako aj zo smernice regresných priamok štatistických závislostí prezentovaných na grafoch vyplýva, že systematické chyby modelu sú pri simulácii teploty vzduchu zanedbateľné.

Smerodajná odchýlka rozdielov medzi meranými a simulovanými hodnotami teploty vzduchu $\sigma_t = 2,8\text{ }^{\circ}\text{C}$ určuje pravdepodobnú chybu modelu pri simulácii teploty vzduchu s hodnotou $v_t = 1,9\text{ }^{\circ}\text{C}$. Analogicky, smerodajnej odchýlke rozdielov medzi meranými a simulovanými hodnotami hodinových priemerov sýtostného doplnku $\sigma_{sd} = 1,58\text{ hPa}$ zodpovedá pravdepodobná chyba modelu pri simulácii hodinových priemerov sýtostného doplnku $v_{sd} = 1,06\text{ hPa}$.

Na základe výsledkov štatistickej analýzy vzájomného vzťahu simulovaných a meraných hodnôt teploty vzduchu a sýtostného doplnku možno konštatovať, že navrhnutý matematický model poskytuje realistické výsledky vyznačujúce sa uspokojivou presnosťou a môže byť preto využitý na simuláciu a predikciu teploty a vlhkosti vzduchu na úrovni hornej hranice korún smrekového pralesa.

Vo všeobecnosti však matematické modely môžu slúžiť aj ako formalizované zhrnutie súčasných poznatkov o simulovanom jave (Bichele a kol., 1980). Táto vlastnosť mate-

matických modelov sa dá využiť aj v danom konkrétnom prípade kvantitatívnej analýzy mikroklimatických účinkov smrekového pralesa na najnižšie vrstvy ovzdušia nad korunami stromov. Navrhnutý model vo svojej konštrukcii obsahuje, ako vstupné údaje, pôdne, vegetačné a atmosferické faktory determinujúce svojím vzájomným pôsobením výsledné teplotné a vlhkosťné pomery nad sledovaným lesným porastom. Analýza citlivosti navrhnutého experimentálne verifikovaného modelu k zmenám hodnôt jednotlivých vstupných dát je teda vhodným prostriedkom pre identifikáciu najvýznamnejších charakteristík porastu a okolitého prostredia, ktoré sa rozhodujúcim spôsobom podieľajú na vytváraní a dynamike mikroklimy sledovaného smrekového pralesa.

Za predpokladu, že vplyv lokálnej advekcie na mikroklimatické pomery možno zanedbať, teplota a vlhkosť vzduchu nad lesným porastom závisí od charakteristík pôdy, porastu a okolitého prostredia. Z odvodených základných modelových rovníc a zo samotnej konštrukcie modelu vyplýva, že dynamiku teploty a vlhkosti vzduchu nad smrekovým pralesom ovplyvňujú hlavne zmeny nasledujúcich parametrov systému pôda-porast-atmosféra:

Pôda - hydraulická vodivosť

- vlhkosť pôdy v koreňovej zóne

Porast - rezistencia porastu pre prenos vodnej pary

- index listovej pokrývnosti

- stupeň rozvoja koreňového systému

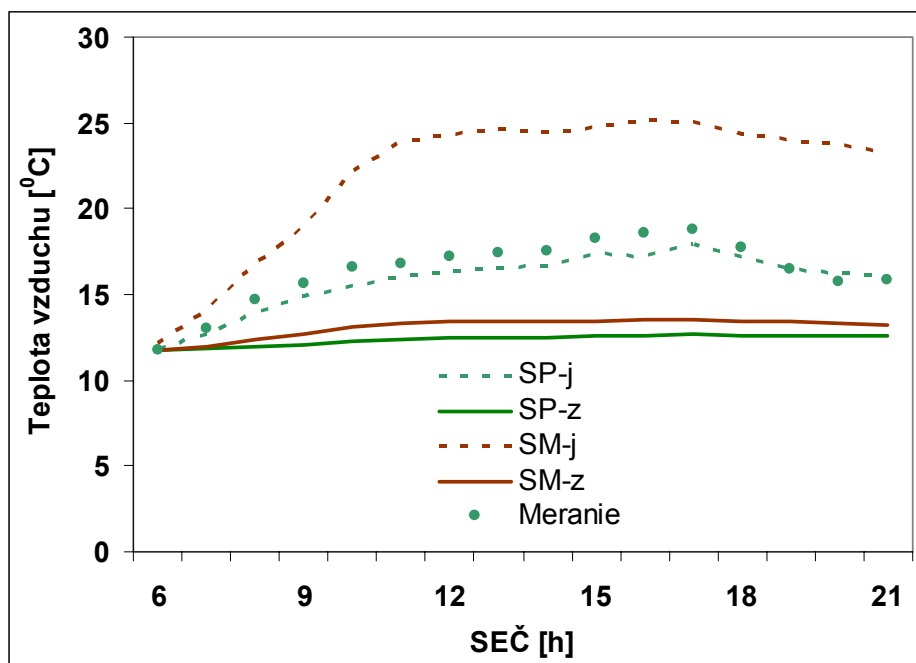
Atmosféra - príkon slnečného žiarenia do systému.

V danom prípade konkrétnom prípade, hydraulickú vodivosť pôdy a stupeň rozvoja koreňového systému možno pokladať v priebehu hodnoteného vegetačného obdobia za stále veličiny. Dynamiku teploty a vlhkosti vzduchu nad korunami smrekového pralesa teda najvýznamnejšie ovplyv-

ňujú zmeny vlhkosti pôdy v koreňovej zóne, sezónna dynamika indexu listovej pokrývnosti a príkon slnečného žiarenia do systému. Posledne menovaný faktor, je spomedzi všetkých ostatných najpremenlivejší, preto môže najvýraznejšie ovplyvňovať mikroklimu sledovaného porastu. Pre kvantitatívne vyjadrenie vplyvu zmien slnečného žiarenia na dynamiku teploty a vlhkosti vzduchu nad smrekovým pralesom použijeme navrhnutý a experimentálne verifikovaný model. S jeho pomocou budeme simulovať denný chod teploty vzduchu a sýtošného doplnku na úrovni hornej hranice korún smrekového pralesa pre prípad jasného a zamračeného dňa.

Ako modelový jasný deň bol vybraný 15. jún 2002. Denná suma globálneho žiarenia dosiahla v tento deň 29,05 MJ.m⁻² pri dennom

maxime 896 W.m⁻². Vstupnými meteorologickými údajmi do modelu boli teda hodinové priemery globálneho žiarenia z tohto modelového dňa doplnené hodinovými priemermi rýchlosti vetra meraného na úrovni hornej hranice korún stromov. Vstupné údaje charakterizujúce pôdne prostredie a porast zodpovedali aktuálnym hodnotám pre tento deň. Následne bol vybraný typický zamračený deň s dátumom 10.6.2002, počas ktorého denná suma globálneho žiarenia predstavovala 5,65 MJ.m⁻² a jeho denné maximum dosiahlo 233 W.m⁻². Pre aktuálne vstupné modelové hodnoty boli simulačné výpočty zopakované aj pre vybraný modelový zamračený deň. Výsledky modelových simulácií sú graficky znázornené na obr. 3.



Obr. 3. Výsledky modelových simulácií teploty vzduchu nad smrekovým pralesom počas jasného dňa 16.6.2002 (krivka SP-j) a zamračeného dňa 10.6.2002 (krivka SP-z) porovnané s analogickými výsledkami pre smrekovú monokultúru rastúcu v rovnakých pôdných a klimatických podmienkach (krivky SM-j a SM-z). Body predstavujú výsledky meraní teploty vzduchu nad smrekovým pralesom počas jasného dňa.

Z grafu prezentovaného na obr. 3 je v prvom rade zrejmý značný vplyv variability globálneho žiarenia na dynamiku teploty vzduchu nad sledovaným lesným porastom. Z obrázku vidieť, že rozdiely v teplote vzduchu nad analyzovaným smrekovým pralesom medzi jasným a zamračeným dňom presahujú v mesiaci júni 5 °C. Podľa očakávania, rozdiely v teplote vzduchu medzi jasným a zamračeným dňom môžu byť markantné najmä v poludňajších hodinách, keď sú aj rozdiely v príkone slnečného žiarenia najväčšie.

Pre posúdenie špecifických črt pôsobenia smrekového pralesa na teplotné pomery tesne nad korunami stromov boli výsledky modelových simulácií pre smrekový prales porovnané so simuláciami denného chodu teploty vzduchu, ktoré boli už skôr publikované (Matejka a kol., 2001) pre smrekovú monokultúru rastúcu v podobných pôdnych, geografických a klimatických podmienkach na Experimentálnom pracovisku Ústavu systémovej biológie a ekológie AV ČR, ktoré sa nachádza v lokalite Bílý Kříž ($\phi = 49^\circ 30' 17''$, $\lambda = 18^\circ 32' 28''$, $H = 943$ m n.m.).

Pre porovnanie bol zo súboru dostupných údajov nameraných v tejto lokalite tiež vybraný jeden jasný a jeden zamračený deň, pričom v oboch prípadoch bol výber vykonaný tak, aby sa denné chody globálneho žiarenia a rýchlosti vetra, ako aj hodnoty vlhkosti pôdy a teploty vzduchu na začiatku simulácie vo vybraných dňoch v lokalite Bílý Kříž čo najviac podobali zodpovedajúcim hodnotám z vybraných dní zo súboru údajov získaných v hrebeňovej časti prírodnej rezervácie Zadná Poľana. Takýto výber umožnil eliminovať vo výsledkoch modelových simulácií vplyv faktorov okolitého prostredia na teplotné pomery nad porastom a následne identifikovať medzi lokalitami rozdiely v denných chodoch teploty vzdu-

chu, ktoré sú vyvolané len rozdielnymi mikroklimatickými účinkami porastov.

Pri vzájomnom porovnaní teplotných pomerov nad smrekovým pralesom a smrekovou monokultúrou je na prvý pohľad nápadný veľký rozdiel medzi teplotou vzduchu v oboch lokalitách počas modelového jasného dňa. Kým v prípade zamračeného dňa sú rozdiely v teplote vzduchu v oboch lokalitách minimálne, teplota vzduchu nad smrekovou monokultúrou je pri porovnateľných hodnotách parametrov okolitého prostredia značne vyššia než teplota vzduchu nad smrekovým pralesom (obr. 3). Zdá sa teda, že smrekový prales znižuje denné amplitúdy teplôt vzduchu nad porastom oveľa viac než smreková monokultúra. Toto zistenie plne korešponduje aj s výsledkami štatistickej analýzy výsledkov hodnôt teploty vzduchu nameraných počas jasných dní nad porovnávanými porastami. Pritom je treba zdôrazniť, že zistené všeobecne nižšie teploty vzduchu nad smrekovým pralesom nemôžu byť v žiadnom prípade zapríčinené rozdielmi v nadmorskej výške oboch lokalít. V prípade porovnania nameraných údajov totiž samotný rozdiel v nadmorskej výške oboch lokalít, predstavujúci asi 350 m nemôže zapríčiniť rozdiely v teplotách vzduchu presahujúce 10 °C. Okrem toho, pre simuláciu denných chodov teploty vzduchu boli vybrané také jasné dni, pri ktorých bola teplota vzduchu o 6. hodine ráno, teda na začiatku simulačných výpočtov, približne rovnaká, čo vplyv rozdielnej nadmorskej výšky eliminuje.

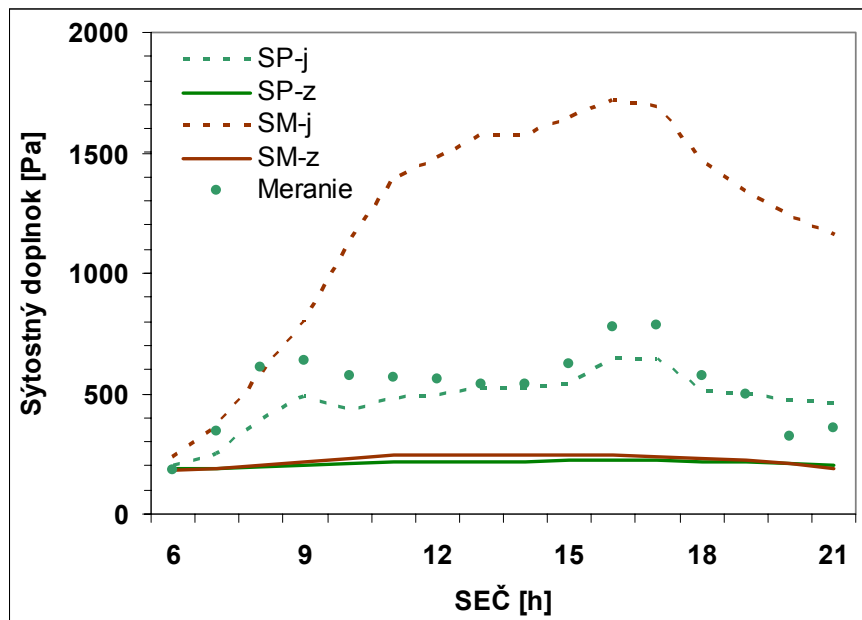
Ponúka sa teda len jedno vysvetlenie všeobecne nižších teplôt nad smrekovým pralesom, ktoré súvisí so štruktúrou jeho energetickej bilancie. Možno totiž predpokladať, že smrekový porast využíva viac tepla na energetické zabezpečenie transpirácie než smreková monokultúra. Túto hypotézu potvrdzujú výsledky meraní transpiračného prúdu v oboch lokalitách. Kým priemerná denná

suma transpirácie smrekovej monokultúry, vypočítaná na základe výsledkov meraní transpiračného prúdu, v hodnotenom období roku 2002 predstavovala 3,26 mm za deň, smrekový prales vytranspiroval v porovnateľnom období v priemere až 4,18 mm za deň. Následkom intenzívnejšej transpirácie sa vyparujúci povrch smrekového pralesa viac ochladzoval a súčasne, pri približne rovnakých hodnotách radiačnej bilancie porastov, zostávalo menej tepelnej energie, ktorá bola využitá na zohrievanie najnižších vrstiev ovzdušia nad porastom turbulentným prenosom tepla.

Interpretáciu výsledkov simulačných výpočtov teploty vzduchu nad porovnávanými porastami možno teda zhrnúť v tom zmysle, že jedným z charakteristických prejavov mikroklimatických účinkov smrekového pralesa pri jeho dostatočnom zásobení pôdnou vodou je intenzívne evaporačné ochla-

dzovanie vyparujúceho povrchu korún stromov, čo redukuje teplotu vzduchu v prízemnej vrstve atmosféry nad porastom a tlmí jej denné amplitúdy.

Možno oprávnene predpokladať, že rozdiely v štruktúre energetickej bilancie medzi smrekovým pralesom a mladým smrekovým porastom sa prejavujú aj v režime vlhkosti vzduchu nad porovnávanými porastami. Vzhľadom na to, že navrhnutý matematický model poskytuje na výstupe popri teplote vzduchu aj hodnoty sýtostného doplnku, správnosť tohto predpokladu bola overená grafickým znázornením denných priebehov simulovaných hodnôt sýtostného doplnku nad smrekovým pralesom počas vybraných jasných a zamračených dní a porovnaním výsledkov modelových simulácií so zodpovedajúcimi údajmi pre mladý smrekový porast (obr. 4).

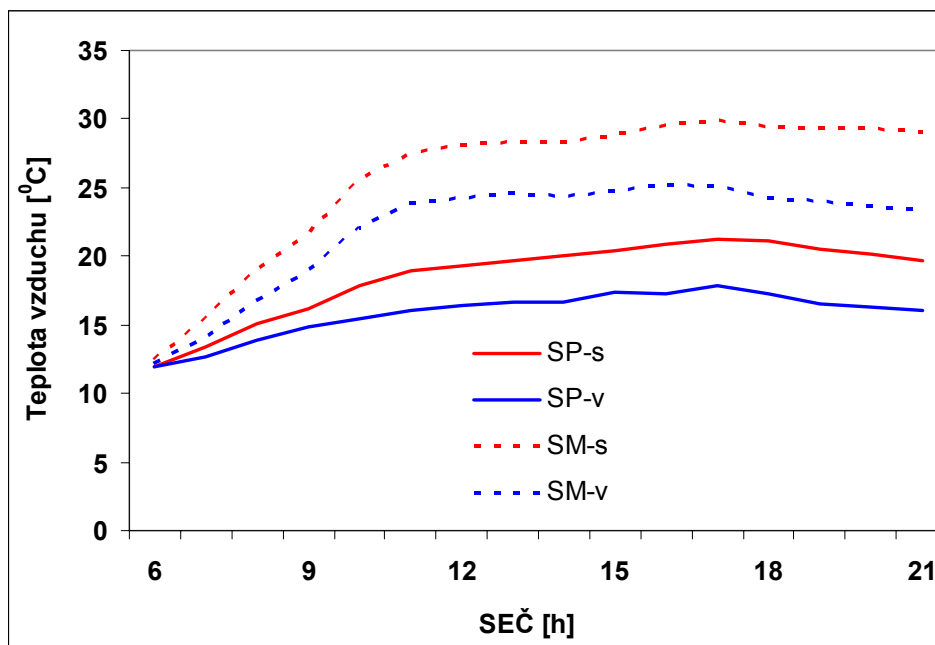


Obr. 4. Výsledky modelových simulácií sýtostného doplnku nad smrekovým pralesom počas jasného dňa 16.6.2002 (krivka SP-j) a zamračeného dňa 10.6.2002 (krivka SP-z) porovnané s analogickými výsledkami pre smrekovú monokultúru rastúcu v rovnakých pôdných a klimatických podmienkach (krivky SM-j a SM-z). Body predstavujú výsledky stanovenia sýtostného doplnku z nameraných hodnôt teploty vzduchu a relatívnej vlhkosti nad smrekovým pralesom počas jasného dňa.

Výsledky prezentované na obr. 4 naznačujú, že rozdiely medzi dennými chodmi sýtostného doplnku nad smrekovým pralesom a mladým smrekovým porastom sú ešte výraznejšie než pri porovnaní denných chodov teploty vzduchu. Kým denné maximá sýtostného doplnku nad smrekovým pralesom nedosahujú za typického jasného dňa 1000 Pa, nad mladým smrekovým porastom denné maximá sýtostného doplnku v rovnakých podmienkach prekračujú 1500 Pa. Toto zistenie sa dá očakávať a zrejme opäť súvisí so intenzívnou transpiráciou smrekového pralesa dostatočne zásobeného pôdnou vodou.

S cieľom ozrejmiť mechanizmus mikroklimatických účinkov smrekového pralesa v prípade, keď porast trpí vodným stresom a pôdna vlhkosť je limitujúcim faktorom pre transpiráciu, boli zopakované predchádzajúce

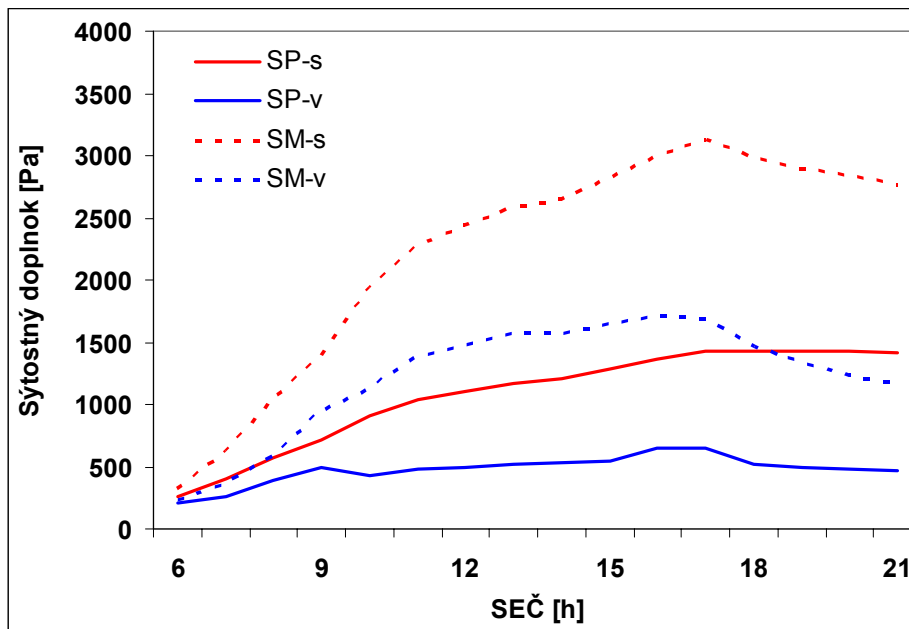
simulačné výpočty teploty vzduchu a sýtostného doplnku nad smrekovým pralesom pre vybraný jasný a zamračený deň pričom zostali zachované všetky vstupné parametre modelu s výnimkou priemernej vlhkosti v koreňovej zóne, ktorá bola volená alternatívne na úrovni 90% využiteľnej vodnej kapacity, čo charakterizovalo porast dostatočne zásobený pôdnou vodou, alebo na úrovni 50% využiteľnej vodnej kapacity, čo reprezentovalo situáciu, v ktorej porast trpí vodným stresom a nedostatok vody v pôde limituje transpiráciu. Získané výsledky boli následne porovnané so zodpovedajúcimi hodnotami simulovanými pre mladý smrekový porast rastúci v podobných pôdnych, geografických a klimatických podmienkach a pri pôdnej vlhkosti zodpovedajúcej alternatívne 50% alebo 90% využiteľnej vodnej kapacity (obr. 5).



Obr. 5. Výsledky modelových simulácií teploty vzduchu nad smrekovým pralesom počas jasného dňa 16.6.2002 pre pôdnu vlhkosť 50% alebo 90% využiteľnej vodnej kapacity (krivky SP-s, resp. SP-v) porovnané s analogickými výsledkami pre smrekovú monokultúru rastúcu v rovnakých pôdnych a klimatických podmienkach (krivky SM-s a SM-v).

Výsledky simulačných výpočtov graficky znázornené na obr. 5 poukazujú na skutočnosť, že zmeny vlhkosti pôdy v koreňovej zóne, priamo ovplyvňujúce rezistenciu porastu pre prenos vodnej pary a tým aj intenzitu transpirácie, sú aj významným faktorom vplyvujúcim sekundárne na teplotný režim v najnižších vrstvách ovzdušia nad porastom. Toto zistenie dobre korešponduje so závermi, podľa ktorých môže dynamika vlhkosti pôdy ovplyvňovať variabilitu niektorých meteorologických prvkov v hraničnej vrstve atmosféry (Delworth a Manabe, 1989). Ako indikujú výsledky modelových simulácií prezentované na obr. 5, v prípade smrekového pralesa môže byť za jasných letných dní teplota vzduchu tesne nad porastom dobre zásobeným pôdnou vodou o 3 až 4 stupne Celsia vyššia, než nad tým istým porastom trpiacim vodným stresom.

Aj v tomto prípade je zaujímavé porovnanie reakcie teploty vzduchu na zmeny pôdnej vlhkosti pre prípad smrekového pralesa a mladého smrekového porastu. Ako vidieť z grafu na obr. 5, teplota vzduchu nad mladým smrekovým porastom reaguje oveľa citlivejšie na zmeny pôdnej vlhkosti, než teplota vzduchu nad smrekovým pralesom. Podobný obraz poskytujú aj priebehy denných chodov sýtostného doplnku simulované pre vybraný modelový jasný deň, vzťahujúce sa k oboj porovnávaným porastom (obr. 6). Zreteľne vidieť, že pokles pôdnej vlhkosti výrazne zvyšuje hodnoty sýtostného doplnku nad obidvoma porovnávanými porastami, pričom sýtostný doplnok nad mladým smrekovým porastom reaguje na pokles pôdnej vlhkosti oveľa citlivejšie než smrekový prales.



Obr. 6. Výsledky modelových simulácií sýtostného doplnku nad smrekovým pralesom počas jasného dňa 16.6.2002 pre pôdnu vlhkosť 50% alebo 90% využiteľnej vodnej kapacity (krivky SP-s, resp. SP-v) porovnané s analogickými výsledkami pre smrekovú monokultúru rastúcu v rovnakých pôdnych a klimatických podmienkach (krivky SM-s a SM-v).

Podobne, ako pri interpretácii modelových simulácií teploty vzduchu, kľúčom k vysvetleniu reakcie sýtostného doplnku na zmeny vlhkosti pôdy v koreňovej zóne je opäť intenzita transpirácie. Z prepočtu výsledkov meraní transpiračného prúdu na transpiráciu celého porastu totiž vyplynulo, že aj v podmienkach vodného stresu smrekový prales transpiruje intenzívnejšie, než mladý smrekový porast. Test citlivosti používaného modelu ku zmenám jednotlivých vstupných veličín ďalej ukázal, že intenzívnejšiu transpiráciu smrekového pralesa umožňujú vysoké hodnoty indexu listovej pokryvnosti a súčasne dobre rozvinutý koreňový systém, čo sú parametre, ktoré v použítom modeli znižujú rezistenciu porastu pre prenos vodnej pary a v konečnom dôsledku majú za následok zvýšenie transpirácie. Okrem toho, k dlhodobému udržaniu intenzívnej transpirácie smrekového pralesa významne prispieva aj dostatok zrážok, kompenzujúci odber vody koreňmi stromov.

4. Záver

Výsledky verifikácie navrhnutého matematického modelu dennej dynamiky teploty

PodĎakovanie: Táto práca bola podporovaná Vedeckou grantovou agentúrou MŠ SR a SAV VEGA, projekty č. 2/5006/26 a 1/2357/05 a Agentúrou na podporu výskumu a vývoja na základe zmluvy č. APVV-51-030205.

Zoznam použitej literatúry

- [1] Baumgartner, A., 1956: Untersuchungen über den Wärme und Wasserhaushalt eines jungen Wakdes. Ber. deut. Wetterdienstes, 5, 1-53.
- [2] Bichele Z., Moldau H., Ross J., 1980: Matematické modelovanie transpirácie i fotosyntéza rastení pri nedostatke počvennoy vlagi. Leningrad, Gidrometeoizdat, 222 s.
- [3] Choudhury, B. J., Monteith, J. L.: A four-layer model for the heat budget of homogeneous land surface. J. R. Meteorol. Soc., 114, 1988, 373-398.
- [4] Čermák, J., Palát, M., Penka, M., 1976: Transpiration flow rate in a full grown tree of *Prunus avium* L. estimated by the method of heat balance in connection with some meteorological factors. Biologia Plantarum, 18, 111-118.

a vlhkosti vzduchu potvrdili, že navrhnutý model simuluje hodinové priemery teploty vzduchu a sýtostného doplnku nad smrekovým pralesom uspokojujú presnosťou a umožňuje kvantitatívne vyjadriť parciálne vplyvy jednotlivých parametrov systému pôda–rastlina–atmosféra na teplotné a vlhkostné pomery v najnižších vrstvách ovzdušia nad porastom.

Z interpretácie výsledkov vykonaných modelových simulácií vyplynulo, že teplotné a vlhkostné pomery nad smrekovým pralesom sú v porovnaní so situáciou nad mladým smrekovým porastom podstatne konzervatívnejšie, pričom sa mikroklimatické účinky smrekového pralesa zreteľne prejavujú výraznejším tlmením denných amplitúd a celkovým poklesom hodnôt teploty vzduchu aj sýtostného doplnku v prízemnej vrstve atmosféry.

Zistené charakteristické črty mikroklimatických účinkov smrekového pralesa sú primárne podmienené vysokým indexom listovej pokryvnosti, dobre rozvinutým koreňovým systémom a dostatkom využiteľnej vody v pôde.

- [5] Delworth, T.L., Manabe, S., 1989: The influence of soil wetness on near surface atmospheric variability. *J. Clim.*, 2, 1447-1462.
- [6] Goudriaan, J., 1989: Simulation of micrometeorology of crops, some methods, their problems and a few results. *Agric. For. Meteorol.*, 47, 239-258.
- [7] Granier, A., Loustau, D., 1994: Measuring and modeling the transpiration of a maritime pine canopy from sap-flow data. *Agric. For. Meteorol.* 71: 61-81.
- [8] Holstag, A. A. M., Boville, B. A., Moeng, C. H., 1991: A parameterisation of the convective atmospheric boundary layer and its application into a global climate model.[Scientific report WR-91-01], De Bilt, Royal Netherlands Meteorological Institute, 25 s.
- [9] Hutjes, R. W. A., Kabat, P., 1998: BAHC Revised Science Agenda for 1998 – 2001. *BAHC News*, No. 6, 3-7.
- [10] Infante, J.M., Rambal, S., Joffre, R., 1997: Modelling transpiration in holm-oak savannah: scaling up from the leaf to the tree scale. *Agric. and Forest Meteorol.*, Vol. 87, No 4, 273-289.
- [11] Intribus, R., 1977: Význam klimatickej funkcie lesa v ochrane životného prostredia. In: D. Zachar, Ed. Bratislava, VEDA, 63-70.
- [12] Jarvis, P.G., 1976: The interpretation of the variations in leaf water potential and stomatal conductance found in canopies in the field. *Phil. Trans. R. Soc. Lond. Ser. B Biol. Sci.* 273, 593–610.
- [13] Krečmer, V., 1989: K otázkám národohospodárskej efektívnosti mimoprodukčných funkcií lesov. *Lesnícká práca*, No. 12, 541 - 548.
- [14] Kučera, J., Čermák, J., Penka, M., 1977: Improved thermal method of continual recording the transpiration flow rate dynamics. *Biologia Plantarum*, 19, 413-420.
- [15] Martin, T.A., Brown, K.J., Čermák, J., Ceulemans, R., Kučera, J., Meinzer, F.C., Rombold, J.S., Sprugel, D.G., Hinckley, T.M., 1977: Crown conductance and tree and stand transpiration in a second-growth *Abies amabilis*. *Forest. Can. J. For. Res.* Vol. 27, 797-808.
- [16] Matejka, F., 1998: Vplyv porastov na teplotné zvrstvenie prízemnej vrstvy atmosféry. *Meteorologický časopis*, roč. 1, č. 1, 23-28.
- [17] Matejka, F., Rožnovský, J., Janouš, D., 2001: Mathematical modelling of air temperature and humidity above a young spruce forest. *The Beskids Bulletin*, 14, 89-94.
- [18] McNaughton, K. G., 1989: Regional interactions between canopies and the atmosphere. In: *Plant canopies, their growth, form and function*, eds. G.Russel, B.Marshall, P. G.Jarvis, Cambridge, University Press, 64-81.
- [19] Stewart, J.B., 1988: Modelling surface conductance of pine forest. *Agric. For. Meteorol.*, 43, 19–35.
- [20] Tužinský, L., Mindřáš, J., Škvarenina, J., Střelcová, K., 1999: Lesnícka bioklimatológia na prelome 21. storočia. In: *Atmosféra 21. storočia, organizmy a ekosystémy*. TU Zvolen, 7-10.
- [21] Wallace, J. S., 1995: Calculating evaporation: resistance to factors. *Agric. For. Meteorol.*, 73, 353-366.
- [22] Ziemann, A., 1996: Numerical simulation of meteorological parameters in and above forest canopies. *Wiss. Mitteilungen, Inst für Meteorologie, Inst. für Troposphäreforschung, Leipzig*, 4, 100-112.

Adresy autorov:

František Matejka, Tatjana Hurtalová: Geofyzikálny ústav SAV, Bratislava
Katarína Štrelcová, Erika Gömöryová, Jaroslav Škvarenina: Lesnícka fakulta Technickej univerzity vo Zvolene