

MĚŘENÍ RADIAČNÍHO REŽIMU KORUNOVÉ VRSTVY POMOCÍ MIKROČIDEL S VLÁKNOVOU OPTIKOU

Radek Czerný, Karel Bartoň, Marián Pavelka, Radek Pokorný, Dalibor Janouš

Úvod

Sledování fotosynteticky aktivní radiace (FAR) v korunové vrstvě je jedním ze základních měření pro zkoumání a vyhodnocování mikroklimatických podmínek lesního porostu. Důvodem je významný vliv FAR na fyziologii stromu a fakt, že dopadající sluneční radiace je řídicím faktorem dalších charakteristik mikroklimatu korunové vrstvy a lesního porostu vůbec (ovlivňuje teplotu, vlhkost, proudění vzduchu atd.). Zejména produkce a udržování biomasy těsně souvisí s fotosyntetickou aktivitou, která závisí na příkonu energie ve formě FAR (McCree 1972). Mnoho modelů pro výpočet produkce biomasy, fotosyntézy korunové vrstvy nebo cyklu uhlíku je založeno na modelech transformace radiace, pro které je vstupní informací dopadající solární radiace. Proto je užitečné vyhodnotit, jaká je skutečná radiační expozice listoví, měřená tedy pro jehličnany na hlavní ose letorostů. Tato otázka se zdá být velice důležitou s ohledem na různý tvar a orientaci jednotlivých letorostů v korunové vrstvě smrku ztepilého, kde se projevují různé hodnoty indexu STAR (shoot silhouette to total needle area ratio) a sklonů letorostů (Pokorný et al. 2004). Sledováním distribuce FAR v korunové vrstvě tedy můžeme určit i potenciál jednotlivých částí korunové vrstvy podílet se na celkové produkční aktivitě stromu nebo porostu.

K přímému měření FAR se využívají různé typy radiometrů, které jsou schopny měřit FAR v příslušném rozsahu spektra a s přijatelnou citlivostí v cílových vlnových délkách (380-720 nm). Mluvíme-li o měření FAR, myslíme přesněji měření hustoty toku fotosynteticky aktivních fotonů. Většina měření FAR je založena (v souladu s metodologií standardních klimatologických pozorování) na použití horizontálně umís-

těných senzorů. Často se pro popis radiačního režimu korunové vrstvy porostu využívá měření FAR dopadající na porost, odražené porostem a pronikající do různých úrovní korunové vrstvy. Pro měření v korunové vrstvě porostu je naprosto nezbytné použití integrálních senzorů (vzhledem k prostorové a časové heterogenitě FAR v korunové vrstvě). Dosáhnout přesných měření FAR v korunové vrstvě je obtížné, je třeba použít vhodné senzory s ohledem na jejich velikost a tvar (Reitmayer et al. 2002).

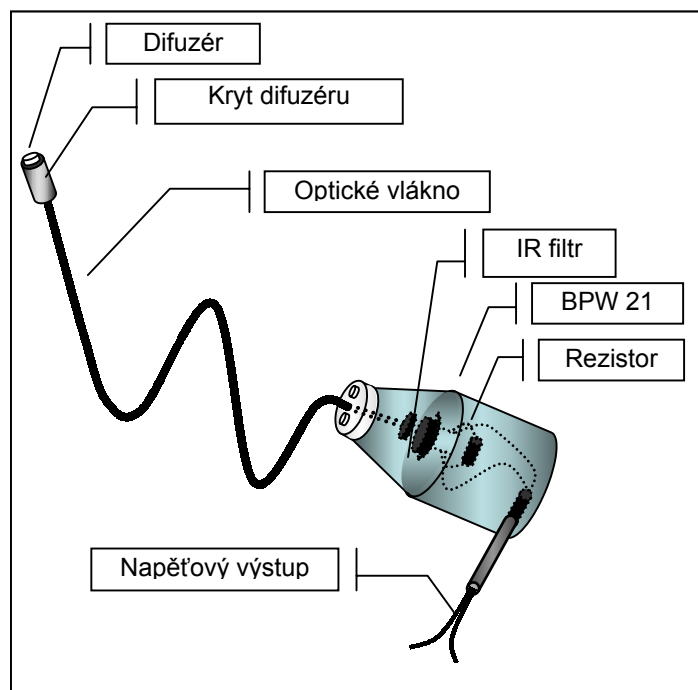
Míra absorpce FAR ve složité struktuře korunové vrstvy lesního porostu silně závisí na prostorovém rozložení listů (jehlic), letorostů, větví a celých přeslenů. Navíc FAR může být ve formě přímého i difusního záření, které proniká do korunové vrstvy ze všech směrů (Oker-Blom et al. 1989). Radiační podmínky korunové vrstvy se také mění v čase (během dne i vegetační sezóny) v závislosti na výšce Slunce nad obzorem. Světelný požitek jednotlivých částí korunové vrstvy (větví, letorostů) tedy závisí na jejich umístění a náklonu. Proto je otázkou, zda je vhodné použít k vyhodnocení režimu FAR na úrovni letorostů v korunové vrstvě horizontálně umístěné senzory. Speciální radiační čidla pro měření toku FAR již byla použita (Gutschick et al. (1985), Palva et al. (1998), Ogren and Sjöstrom (1990)), šlo o malé horizontální senzory umístěné na úrovni listů. Tento příspěvek představí mikročidla CANFIB (CANopy FIBre), vyvinutá v Laboratoři ekologické fyziologie rostlin, Ústavu systémové biologie a ekologie AV ČR, která jsou zkonstruována pro měření FAR na úrovni letorostů. Využitím systému těchto senzorů byl měřen radiační režim korunové vrstvy smrku ztepilého v zapojeném porostu. Byla sledována transmitance FAR

v různých částech korunové vrstvy a stanoveny denní chody ozáření jednotlivých měřených větví.

Technický popis mikročidla CANFIB

Mikročidlo CANFIB bylo vyvinuto za účelem měření FAR na úrovni letorostů. Je koncepčně řešeno tak, aby svou konstrukcí co nejméně ovlivňovalo měření, zejména zastíněním níže umístěných čidel a zatížením větví. Proto bylo zvoleno řešení odlišné od tradičních horizontálních čidel určených pro měření FAR. Při návrhu mikročidla byl kladen důraz především na minimalizaci rozměrů a volbu materiálů odolných náročným povětrnostním a klimatickým podmínkám. CANFIB je tvořen dvěma základními částmi: tělem čidla a z něj vybíhajícím optickým vláknem (Obr. 1). Tělo kónického tvaru je vyrobeno z odolného plastu s UV stabilizací. V užší části do něj ústí optické vlákno, které je k tělu pevně zafixováno. Vláknem je vsunuto

až k infračervenému (IR) filtru, který upravuje spektrální charakteristiku procházejícího záření. Za IR filtrem již následuje samotný senzor. Dále je z těla vyveden napěťový výstup, sloužící pro připojení k měřicímu a záznamovému zařízení. Optické vlákno (OPTOVIT s.r.o., ČR) slouží jako světlovod pro přenos záření z místa měření do vlastního senzoru – fotodiody. Optické vlákno má délku 200 cm, vnější průměr i s pláštěm 2 mm, průměr samotného vlákna je 1 mm. Konec optického vlákna je opatřen teflonovým difuzérem válcového tvaru o délce 13 mm a vnějším průměru 4 mm. Do difuzéru je vyvrtán otvor o průměru 2 mm a hloubce 12,5 mm tak, aby bylo možné difuzér upevnit na konec optického vlákna. Difuzér je částečně zasazen do plastového krytu tvaru trubičky s délkou 13 mm, vnějším průměrem 6 mm a vnitřním průměrem 4,1 mm.

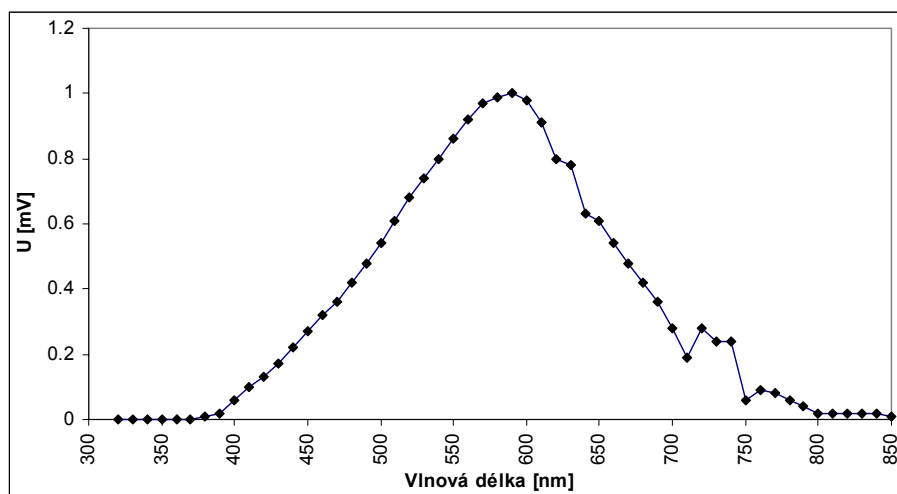


Obr. 1: Schéma mikročidla CANFIB.

Vlastní senzor mikročidla CANFIB je tvořen křemíkovou fotodiodou BPW 21 (Siemens). Spektrální citlivost této fotodiody je v rozmezí 350-820 nm a zasahuje tak až do oblasti blízkého infračerveného záření. Pro omezení horní hranice rozsahu je proto před fotodiodu předřazen IR filtr (Meopta Přerov, ČR) (Obr. 2). Pro linearizaci závislosti výstupního napětí na dopadajícím záření byl k fotodiodě paralelně připojen

přesný miniaturní rezistor o impedanci 24 k Ω .

Kalibrace mikročidel se provádí jedenkrát ročně, před začátkem růstové sezóny porovnáním s čidlem Li-Cor QUANTUM (Li-Cor, USA) kalibrovaným v autorizovaném servisu. Výsledkem je kalibrační rovnice pro každé mikročidlo, pomocí které jsou hodnoty napětí snímané na výstupu mikročidla přepočteny na fyzikální jednotky ($\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$).



Obr. 2: Spektrální citlivost mikročidla CANFIB (U – výstupní napětí).

Popis experimentu

Senzory byly využity pro měření a stanovení distribuce pronikající FAR v různých vrstvách korunové vrstvy smrku ztepilého (*Picea abies* [L.] Karst.) na výzkumné ploše experimentálního ekologického pracoviště Bílý Kříž v Moravskoslezských Beskydech, v nadmořské výšce cca 900 m.n.m., na svahu o sklonu 14° s JJZ orientací. Výzkumný porost byl založen v roce 1981 čtyřletými sazenicemi smrku ztepilého v hustotě 2040 ks.ha⁻¹. Průměrná výška porostu dosáhla v roce 2005 hodnoty 12,2 m, průměrná výčetní tloušťka kmene 13,6 cm, index listové plochy (sezónní maximum) 11,82 m².m⁻², mocnost korunové vrstvy 10 m a celková nadzemní biomasa 103,82 t.ha⁻¹. Roční přírůst celkové nadzemní biomasy byl 7,81 t.ha⁻¹.

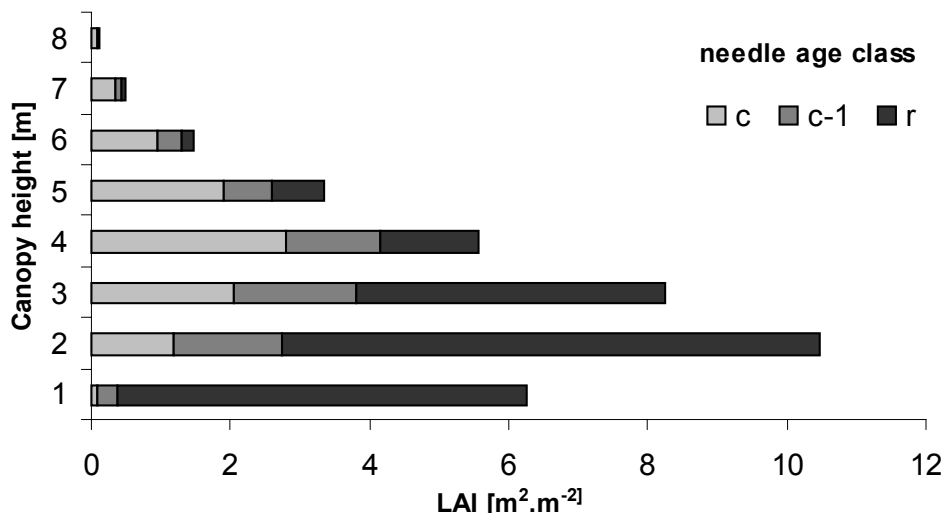
Samotné instalaci systému čidel CANFIB předcházelo měření a vytvoření modelu

primární struktury nadzemní části porostu a stanovení průměrného inklinčního úhlu letorostů a kvantifikace zápoje v několika výškových úrovních přístrojem LAI-2000 Plant Canopy Analyzer (Li-Cor, USA) (Obr. 3). Systém byl instalován tak, aby byl ve vertikálním profilu podchycen radiační režim v osluněné, přechodové a zastíněné části koruny, v horizontálním profilu pak maximální distribuce různých ročníků jehlic, důraz byl kladen na poslední a předposlední ročník.

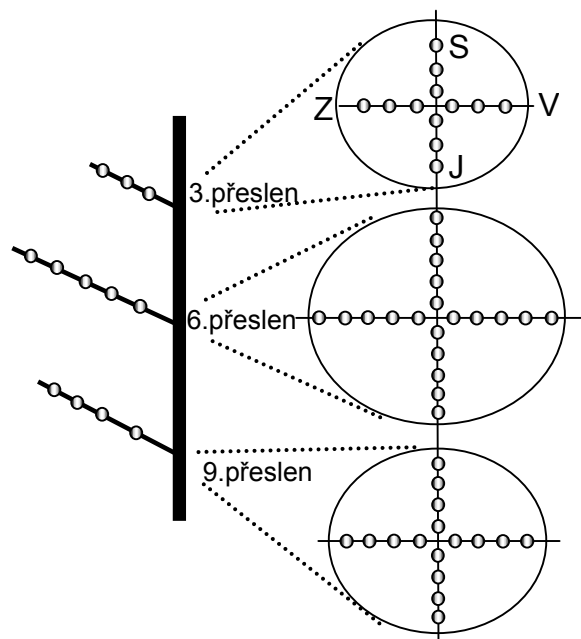
K měření byl vybrán jedinec s ohledem na jeho sociální postavení (úrovňový jedinec) a základní dendrometrické parametry tak, aby reprezentoval danou porostní plochu. Celkem 48 snímačů bylo umístěno ve třech výškových úrovních – na 3., 6. a 9. přeslenu. Z hlediska půdorysu byly zvoleny 4 linie orientované vždy přibližně na jednu hlavní světovou stranu, tedy sever, jih,

východ a západ. Počet snímačů byl na každém z přeslenů odlišný, závisí na délce větví v daném přeslenu. Na 3. přeslenu byla vždy umístěna 3 čidla na každou světovou stranu, dohromady tedy 12 čidel. Na 6.

přeslenu bylo umístěno celkem 20 čidel a na 9. přeslenu 16 čidel (Obr. 4). Inklinační úhel u větví 3. přeslenu byl 48°, v 6. přeslenu 70° a v 9. přeslenu 75°.



Obr. 3: Index listové plochy ve vertikálním profilu korunové vrstvy, c – letošní letorosty, c-1 – jeden rok staré letorosty, r – ostatní letorosty.



Obr. 4: Rozmístění čidel CANFIB na jednotlivých přeslenech (S – sever, J – jih, V – východ, Z – západ).

Tělo mikročidla CANFIB bylo vzhledem ke své hmotnosti a rozměrům fixováno přímo ke kmeni. Konec optického vlákna s difuzérem byl přichycen na stanovené

místo na letorostu. Směr snímání byl vždy směrem nahoru, kolmo na hlavní osu letorostu. Toto umístění nám umožnilo měřit

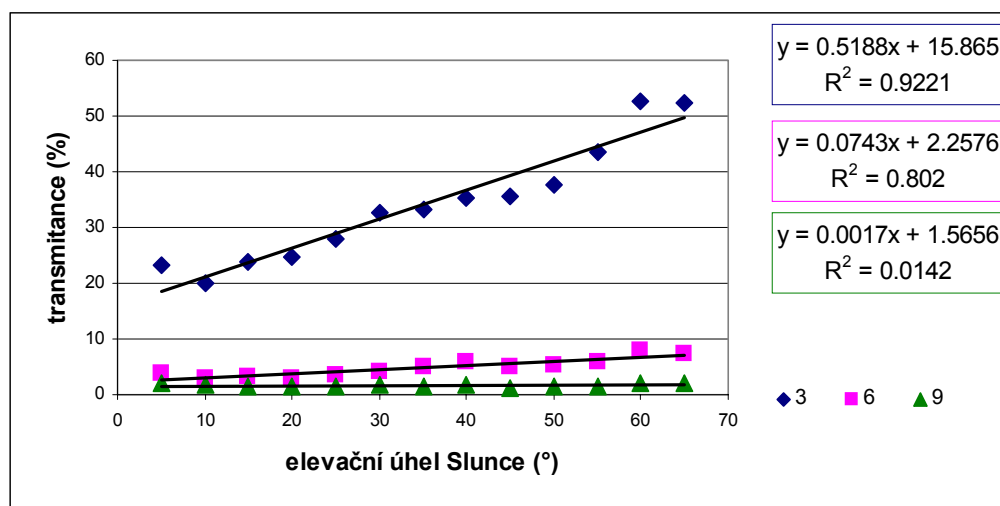
FAR, které dopadá na asimilační aparát daného letorostu.

Všech 48 napěťových výstupů z jednotlivých mikročidel bylo zapojeno do měřicí ústředny typu 21x Campbell Scientific datalogger (Campbell Scientific, Inc., USA). Tato ústředna každých 30 vteřin změřila hodnotu napětí na všech mikročidlech a z těchto měření vypočítala a zapsala každých 30 minut průměr pro každé mikročidlo do výstupního datového souboru. Pro výpočet transmitance byly použity hodnoty FAR dopadající na porost měřené rovněž senzorem BPW 21 se stejným režimem čtení a zápisu průměrných hodnot. Datové soubory byly přenášeny každý týden do počítače a dále zpracovávány v tabulkovém procesoru Excel. Měření probíhalo

v průběhu celé vegetační sezóny, od 1.5. do 31.10.2005.

Výsledky a diskuse

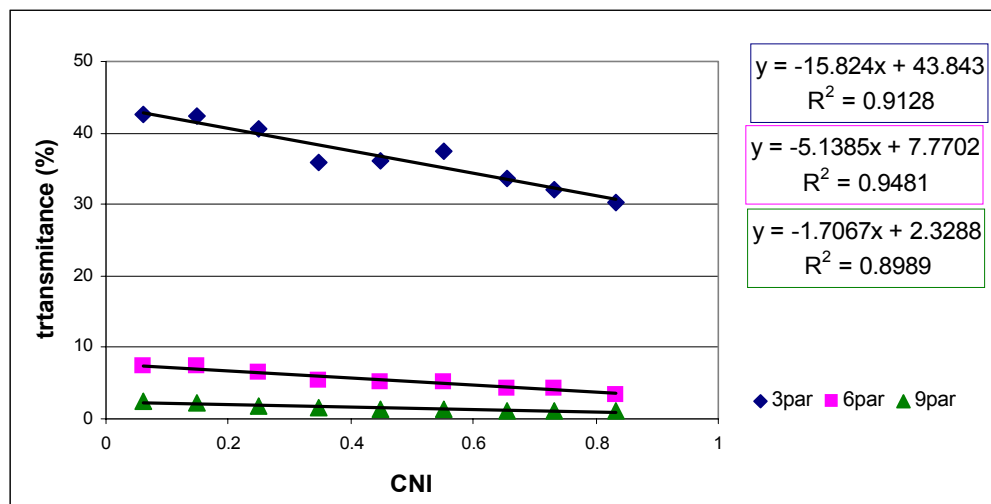
Z naměřených hodnot byla provedena podrobná prostorová analýza dopadu fotosynteticky aktivní radiace na asimilační aparát koruny vybraného stromu v zapojeném porostu horské smrčiny. Transmitance radiace do porostu byla závislá především na elevačním úhlu Slunce, tedy na úhlu průniku přímé radiace do porostu. Na této proměnné závisí především ozáření svrchní (rozvolněné) a střední (zapojující se) korunové zóny v rámci korunové vrstvy. Transmitance spodní korunové zóny elevačním úhlem příliš ovlivněna nebyla (Obr. 5).



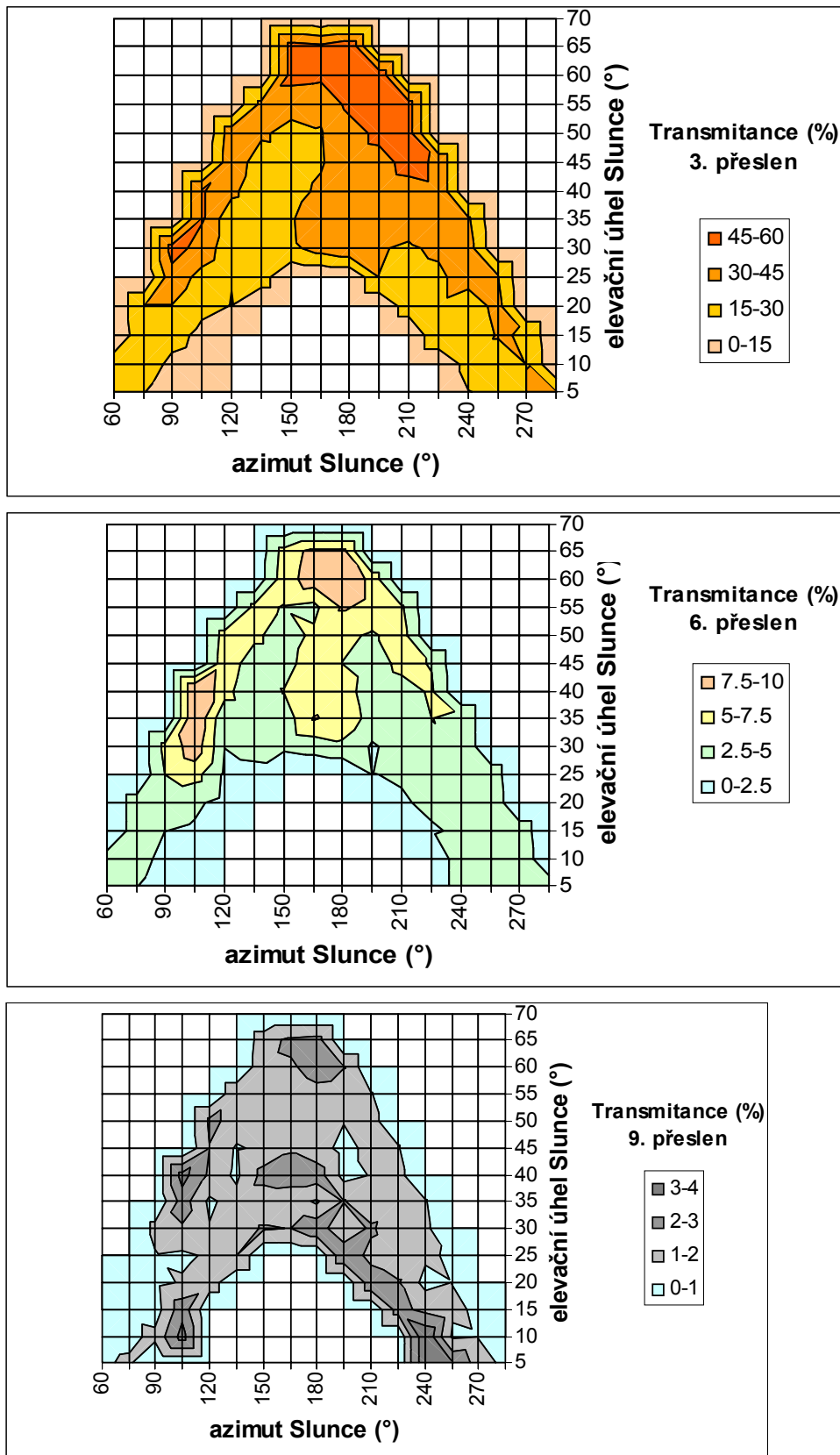
Obr. 5: Závislost transmitance FAR do 3., 6. a 9. přeslenu na elevačním úhlu Slunce.

Transmitance také významně klesá se zvyšujícím se clearness indexem (CNI), čili je vyšší v zatažených dnech. To se opět projevuje zejména ve vrchní části koruny, sklon závislostní přímky narůstá směrem k vyš-

ším přeslenům. Transmitance v 9. přeslenu klesá z průměrných 2 % při zataženém dni k 1 % v jasném dni, v 6. přeslenu ze 7 % na 3 % a ve třetím přeslenu ze 42 % na 30 % (Obr. 6).



Obr. 6: Závislost transmittance FAR do 3., 6. a 9. přeslehu na clearness indexu.

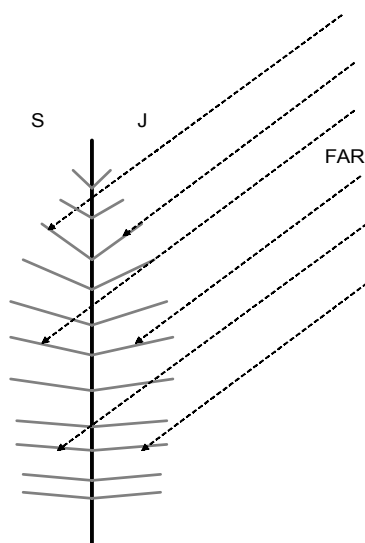


Obr 7: Transmittance FAR do 3., 6. a 9. přeslenu v závislosti na poloze Slunce na obloze (azimutálním a elevačním úhlu Slunce).

Zásadní vliv postavení Slunce na obloze (dané azimutálním úhlem a výškou Slunce) na transmitanci radiace do porostu v jednotlivých přeslenech ilustruje Obr. 7, kde je vidět při jakých pozicích Slunce mají jednotlivé přesleny největší světelný požitek. Transmitance radiace do porostu je tedy významně časově závislá. V určitých pozicích Slunce docházelo k průniku přímé FAR při velice nízkém elevačním úhlu Slunce děrami v korunové vrstvě porostu (pod větvemi). Dále je také vidět, že od úrovně zápoje porostu níže transmitance

výrazně klesá a na 9. přeslen dopadá v průměru již jen malá část z celkové FAR dopadající na porost.

Horní části korun mají největší světelný požitek, jelikož mají charakter nezapoje-ného porostu a inklinací úhel větví zde odpovídá potřebě maximálního využití dopadající radiace. Proto zde má na ozáře-nost významný vliv azimutální úhel Slunce: mění se expoziční postavení asimilačního aparátu jednotlivých přeslenových větví a také stínění větve ostatní částí koruny (Obr. 8).

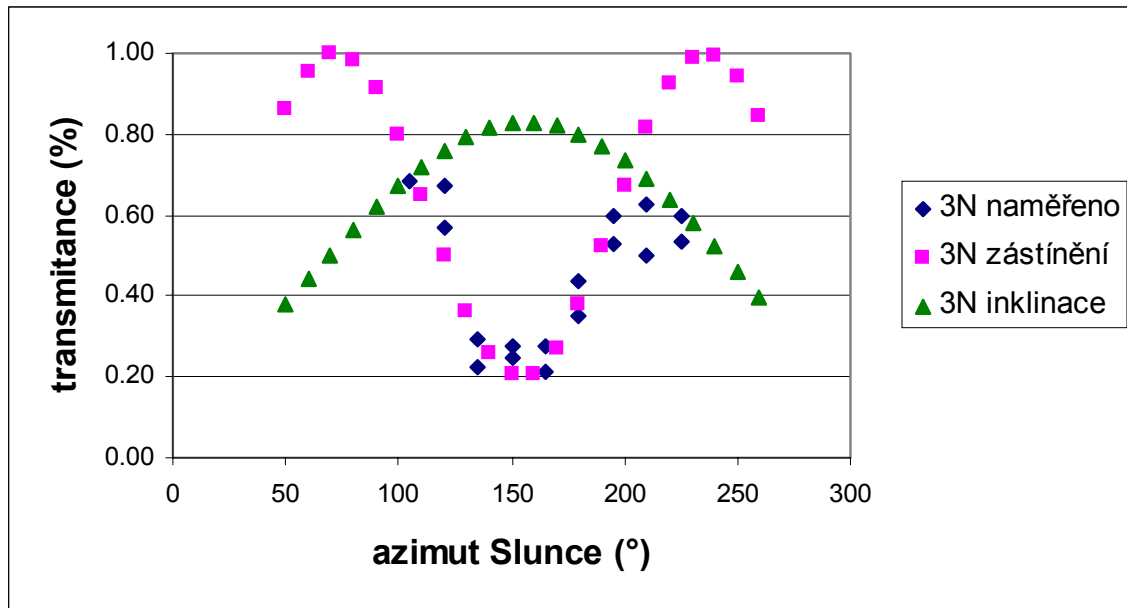


Obr. 8: Schématické znázornění vlivu inklinacího úhlu a orientace větví na úhel dopadu přímé FAR na tyto větve. S - větve se severní, J – větve s jižní orientací.

Pro další analýzy, aby byl eliminován současný vliv výškového úhlu Slunce, byl vliv azimutálního úhlu Slunce analyzován v podmínkách výškového úhlu v rozmezí 40 až 50 stupňů. Výzkumný porost se nachází na svahu s JJV orientací a čidla CANFIB byla na třetím přeslenu umístěna na větvích přibližně orientovaných do všech čtyř hlavních světových stran. Proto jsme byli schopni sledovat ozářenost jednotlivých větví v závislosti na azimutálním úhlu Slunce. Transmitance dané přeslenové

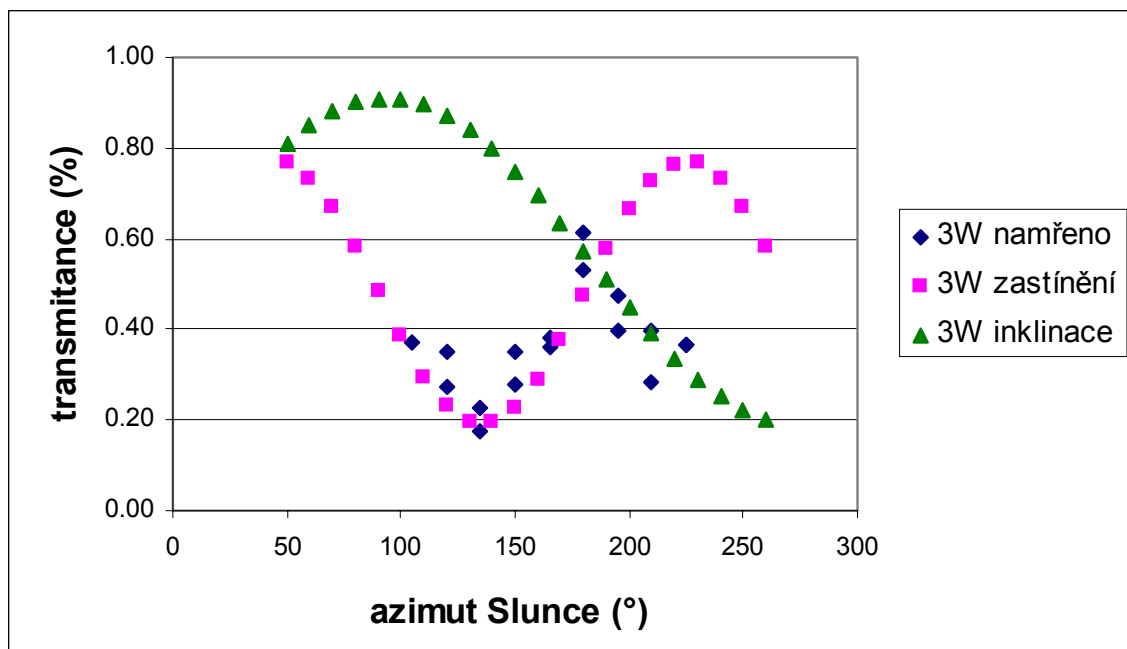
větve byla v těchto podmínkách ovlivněna náklonem větve vzhledem k Slunci podle modelové sinusoidy s periodou 360° a stíněním koruny ve směru slunečního záření, kterou jsme také popsali sinusoidou, tentokrát však s periodou 180°.

Obr. 9 znázorňuje situaci na severní větvi. Naměřená ozářenost severní větve (modré body) je pozitivně ovlivněna náklonem větve směrem ke slunci (zelená křivka), z jižní strany je však stíněna vyššími přesleny (fialová křivka).



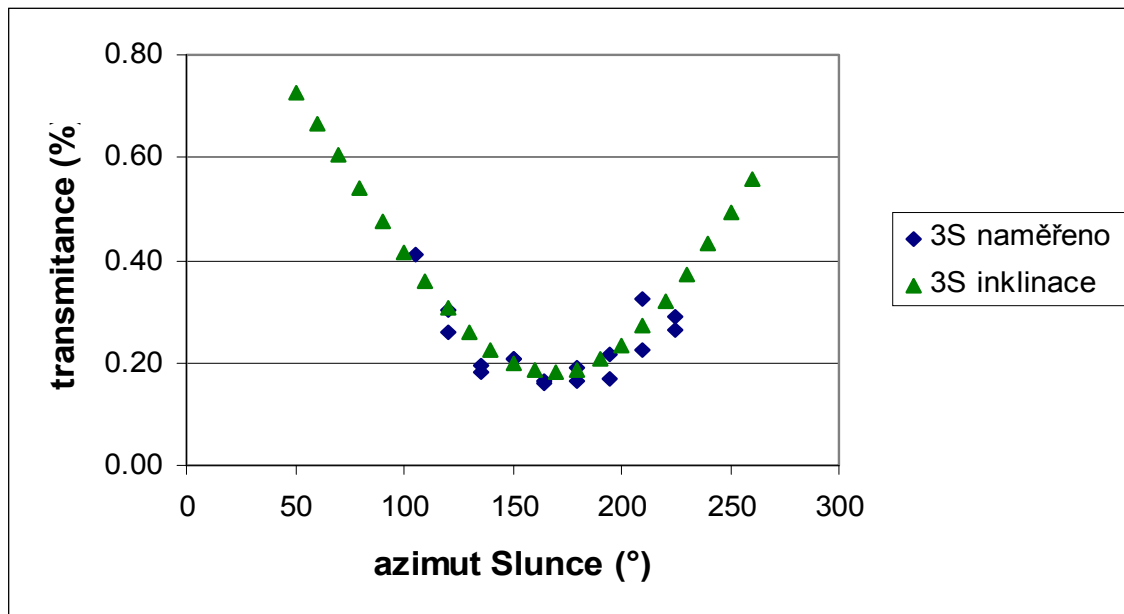
Obr. 9: Ozáření severní větve 3. přeslenu při měnícím se azimutálním úhlu Slunce.

Ozáření západní větve 3. přeslenu (Obr. 10) je limitována stíněním vyšších přeslenu z východní strany a ze západu nevýhodnou orientací větve.



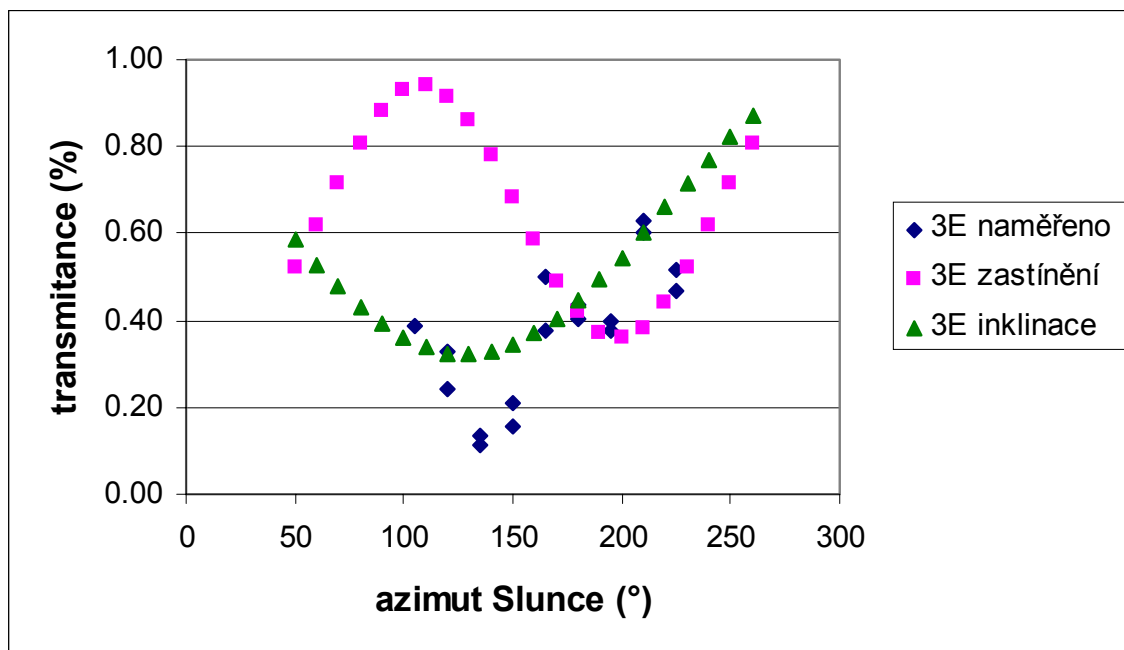
Obr. 10: Ozáření západní větve 3. přeslenu při měnícím se azimutálním úhlu Slunce.

Jižní větev (Obr. 11) sice není korunou vlastního stromu zastíněna při žádné poloze Slunce v průběhu dne, její ozáření je však limitována nevýhodnou orientací, asimilační aparát je vystaven k severu.



Obr. 11: Ozářenost jižní větve při měnícím se azimutálním úhlu Slunce.

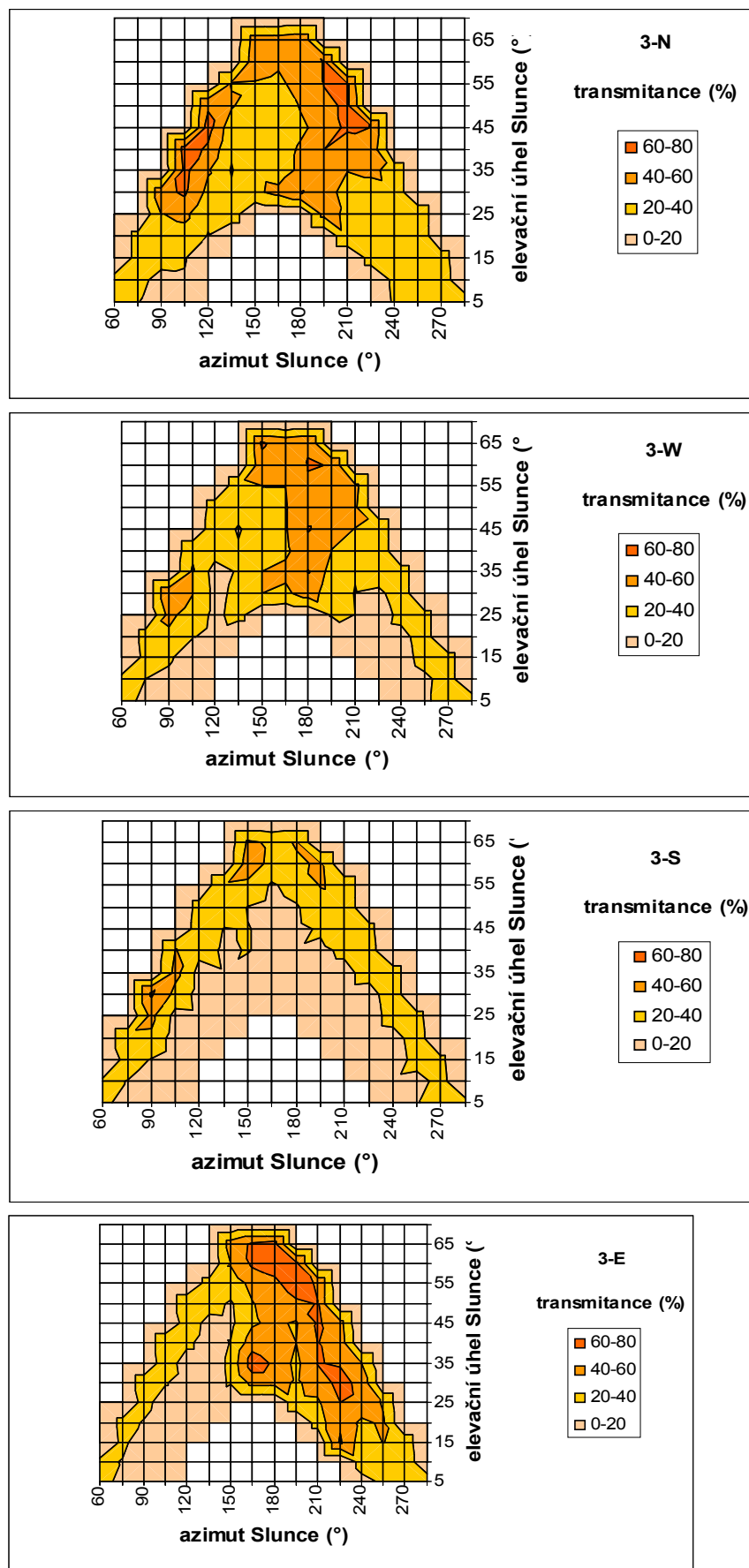
Ozářenost východní větve (Obr. 12) je z východu negativně ovlivněna náklonem větve, ze západu zase zastíněním, navíc je ozářenost při tomto elevačním úhlu snížena náhodným stínem sousedního stromu.



Obr. 12: Ozářenost východní větve 3. přeslenu při měnícím se azimutálním úhlu Slunce.

Výše uvedené rozdíly v ozářenosti větví 3. přeslenu orientovaných do různých světových stran jsou patrné i z Obr. 13, kdy jsme brali v úvahu transmittanci ovlivněnou azimutálním i elevačním úhlem Slunce. Je patrné, že nejvíce ozářené jsou větve se-

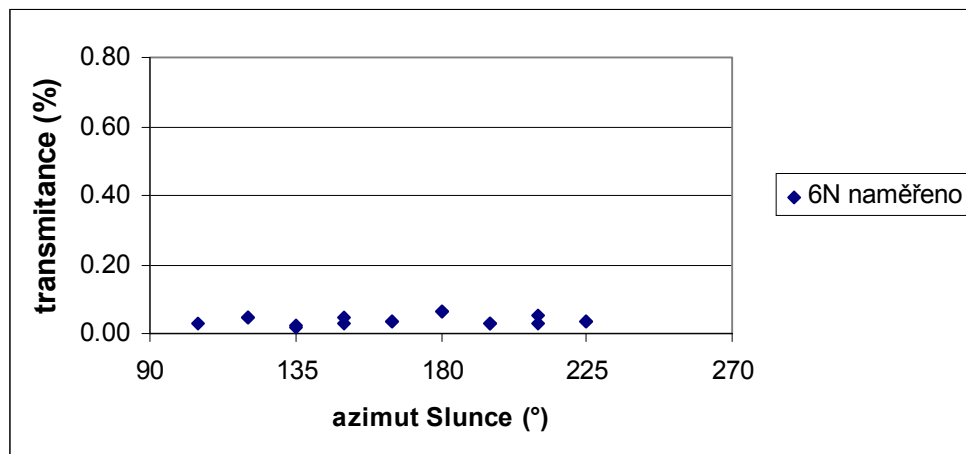
verní (ta v průběhu dne nejvyváženěji) a východní (kromě dopoledních hodin, kdy je asimilační aparát nevhodně orientován vzhledem ke Slunci). Nejmenší světelný požitek má jižní větev, jejíž asimilační aparát je nevhodně orientován celodenně.



Obr 13: Transmittance na různých větvích 3. přeslenu v závislosti na poloze Slunce na obloze.

Na výškové úrovni zapojeného porostu azimutální úhel přestává být faktorem systémově ovlivňujícím transmitanci, což je vidět na transmitanci naměřené na severní větvi 6. přeslenu (Obr. 14). Na úrovni 6. a 9. přeslenu již také nebyl zjištěn tak výrazný rozdíl světelného požitku mezi větvemi s různou orientací, což je dáno jejich

většími inklinacími úhly (70°, 75°), díky kterým je rozdíl v úhlu dopadu přímé sluneční radiace na tyto větve menší než v případě větví 3. přeslenu. Zjištěné rozdíly na těchto níže položených úrovních jsou způsobeny spíše heterogenitou korunové vrstvy.



Obr. 14: Ozáření severní větve 6. přeslenu při měnícím se azimutálním úhlu slunce.

Závěr

Byla vyvinuta radiační mikročidla CAN-FIB, která jsou konstrukčně vhodná k měření dopadající FAR přímo na úrovni letorostu. Systémem těchto mikročidel jsme schopni změřit distribuci radiace do různých částí korunové vrstvy a sledovat změny v pronikání FAR při měnící se poloze Slunce na obloze v průběhu dne i celé vegetační sezóny. Ukázalo se, že při dané struktuře nadzemní části porostu má poloha Slunce na transmitanci radiace do porostu zásadní vliv. Transmitance radiace do porostu byla závislá především na elevačním úhlu Slunce, tedy na úhlu průniku přímé radiace do porostu. Na této proměnné závisí zejména ozáření rozvolněné a zapojující se korunové zóny v rámci korunové vrstvy. Transmitance spodní korunové zóny elevačním úhlem příliš ovlivněna nebyla, i když v určitých pozicích Slunce docházelo k průniku přímé FAR při velice nízkém elevačním úhlu Slunce děrami v korunové vrstvě porostu. Azimu-

tální úhel Slunce měl vliv především na ozáření částí asimilačního aparátu ve svrchní části koruny. To je dáno rozvolněností této části korunové vrstvy, měnícím se zastíněním větví vlastní korunou a většimu inklinacímu úhlu větví. Ten odpovídá potřebě maximálního využití dopadající radiace, zejména při větším elevačním úhlu Slunce, kdy paprsky dopadají na osu letorostu téměř pod ideálním úhlem 90°. Z toho profitují díky své orientaci zejména severní a východní větve. Naproti tomu, na jižně orientované větve 3. přeslenu dopadá přímá sluneční radiace pod ostrým úhlem a dochází k většímu vzájemnému zastínění jehlic v rámci jednoho letorostu.

Měřením systémem mikročidel CANFIB jsme byli schopni určit denní chody ozáření jednotlivých větví i letorostů. Tuto informaci můžeme využít pro určení, které části korunové vrstvy mají nejlepší světelný požitek, což je dále využito např. při modelování asimilační aktivity jednotlivých částí korunové vrstvy a stanovení po-

dílu asimilace těchto částí na celkové produkční aktivitě stromu potažmo celého porostu.

Poděkování:

Výzkum byl prováděn za podpory grantu MŠMT 2B06068 v rámci výzkumného záměru ÚSBE AV0Z60870520.

Literatura

- McCree, K.J. (1972): The action spectrum, absorptance and quantum yield of photosynthesis in crop plants. *Agric. Meteorol.* 9: 191-216.
- Reitmayer, H., Werner, H., and Fabian P. (2002): A novel system for spectral analysis of solar radiation within a mixed beech-spruce stand. *Plan Biology* 4: 228-233.
- Oker-Blom, P., Pukkala, T., and Kuuluvainen T. (1989): Relationship between radiation interception and photosynthesis in forest canopies: effect of stand structure and latitude. *Ecol. Modelling* 49:73-87
- Gutschick, V.P., Barron M.H., Waechter, D.A. and Wolf, M.A. (1985): Portable monitor for solar radiation that accumulates irradiance histograms for 32-leaf mounted sensors. *Agric. For. Meteorol.* 33:281-290
- Palva, L., Garam, E., Manoochehri, F., Sepponen, R., Hari, P., Rajala, K., Ruotoistenmaki, H., and Seppala, I. (1998): A novel multipoint measuring system of photosynthetically active radiation. *Agric. For. Meteorol.* 89: 141-147.
- Ogren, E., and Sjostrom, M. (1990): Estimation of the effect of photoinhibition on the carbon gain in leaves of willow canopy. *Planta* 181:560-567
- Katochvilová I., Janouš D., Marek M., Barták M., and Řiha L. (1989): Production activity of mountain cultivated Norway spruce stands under the impact of air pollution. I. General description of problems. *Ecology (CSSR)*, 8(4): 407-419
- Pokorný, R., O. Urban, and Marek, M.V. (2004): Effect of Norway spruce planting density on shoot morphological parameters. *Biologia Plantarum* 48 : 137-139.
- Čermák, J. (1998). "Leaf distribution in large trees and stands of the floodplain forest in southern Moravia." *Tree Physiology* 18(11): 727-737.
- Pokorný, R. and M. V. Marek 2000. Test of accuracy of LAI estimation by LAI-2000 under artificially changed leaf to wood area proportions. *Biologia Plantarum* 43(4): 537-544.
- Pokorný, R. 2002. Leaf area index in forest tree stands. Doctoral Thesis. Mendel University of Agriculture and Forestry, Brno, 136p (In Czech).

Adresa autorů:

Radek Czerný, Karel Bartoň, Marián Pavelka, Radek Pokorný, Dalibor Janouš:
Laboratoř ekologické fyziologie rostlin, Ústav systémové biologie a ekologie AV ČR, v.v.i.
Poříčí 3b, 603 00 Brno, Česká Republika. Tel: 00420 543 21 1560
E-mail: czerny@brno.cas.cz