

SPEKTRÁLNÍ CHARAKTERISTIKY DOPADAJÍCÍ SLUNEČNÍ RADIACE NA LOKALITĚ BÍLÝ KŘÍŽ

Martin Navrátil¹, Vladimír Špunda²

¹Katedra fyziky, Ostravská univerzita, 30.dubna 22, 701 03 Ostrava, Česká Republika, e-mail: martin.navratil@osu.cz

²Ústav fyzikální biologie, Jihočeská univerzita, 370 05 České Budějovice, Česká Republika

ÚVOD

Měření sluneční radiace v porostech lesních dřevin patří mezi významné charakteristiky mikroklimatu (Campbell 1986, Petřík et al. 1986, Dykyjová et al. 1989). Fotosynteticky aktivní radiace (FAR) dopadající na fotosyntetický aparát je hlavní veličinou řídící aktivitu reakcí fotosyntézy (Larcher 1988). Informace o změnách intenzity FAR během dne, vegetačního období a ve vertikálním profilu korunové vrstvy jsou tedy základem pro charakterizaci funkční diferenciaci fotosyntetického aparátu v jednotlivých vrstvách koruny, jednak klíčovým parametrem pro stanovení účinnosti transformace sluneční energie na úrovni porostu. Poměrně malá pozornost je věnována spektrálnímu složení sluneční radiace dopadající na porost a porostem procházející. V některých případech jsou současně prováděna měření FAR i globální radiace (GR). Změny spektrálního složení sluneční radiace v oblasti FAR a částečně i mimo tuto oblast mohou být podstatné pro spolehlivé použití radiačních měření z několika důvodů. Rozdílné spektrum dopadající sluneční radiace může být dalším faktorem, který ovlivňuje funkční diferenciaci fotosyntetického aparátu (Petřík et al. 1986, Thiel et al. 1996). Účinnost absorpce FAR a jeho využití ve fotosyntéze může záviset na spektru dopadající sluneční radiace (Petřík et al. 1986, Larcher 1988, Dykyjová et al. 1989). Vzhledem ke skutečnosti, že klasická čidla na bázi fotodiod, která jsou používána pro standardní měření FAR respektive radiace v rozsahu 400 – 1100 nm (pro nás GR)

nemají ideálně stejnou citlivost detekce v celém spektrálním rozsahu lze očekávat, že hodnoty ozáření získané těmito čidly mohou být částečně zkresleny různým spektrálním složením dopadající radiace (Reitmayer et al. 2002).

Ověřovací měření spekter dopadající sluneční radiace pro porost smrku ztepilého [*Picea abies* (L.) Karst.] na lokalitě Bílý Kříž (experimentální ekologické pracoviště ÚEK AVČR Bílý Kříž, Moravskoslezské Beskydy, Česká republika, 943 m. n. m, 18°32'E, 49°30'N) bylo provedeno v sezóně 2002 v období léto (12.–24. července 2002) a podzim (16. září–3. října 2002). Cílem experimentu bylo:

- 1) Zvládnout a standardizovat metodiku měření spekter sluneční radiace pomocí přenosného spektrometru LI-1800
- 2) Získat dostatečně statisticky průkazné informace o základních zdrojích variability spektrálního složení FAR a GR. Pozornost byla zaměřena na následující charakterizaci zdrojů variability spektrálního složení FAR a GR:
 - 1) spektrální složení dopadající radiace během jasného a oblačného dne
 - 2) vliv krátkodobých změn ozáření na spektrum
 - 3) hrubé stanovení vlivu elevačního úhlu na spektrum radiace
 - 4) základní rozdíly ve spektrech dopadající radiace během letního a podzimního období
 - 5) vliv absorpce radiace na spektrum pronikající radiace pod porostem

MATERIÁL A METODY

Popis přístroje

Přenosný spektrometr LI – 1800 (LI – COR, Nebraska, USA) dovoluje zjišťovat kvalitativní a kvantitativní charakteristiky světelného zdroje, v našem případě slunečního záření. Je určen k měření spektrometrických, radiometrických a fotometrických veličin. Optický receptorem je kosinový senzor s PTFE (teflon) kopulí, úhlový rozsah je 2π steradiánů (180°), což umožňuje vztahovat při měření hustotu zářivého toku na jednotkovou plochu (m^2). Před vstupem do monochromátoru prochází dopadající záření přes filtry. Filtry jsou umístěny v kole filtrů, spolu s nepropustným terčem a mají za úkol eliminovat záření z okolních oblastí spektra. Filtrů je celkem 7 pro následující intervaly vlnových délek: 299-348, 349-418, 419-558, 559-678, 679-775, 776-938, 939-2598 nm. Nepropustný terč slouží k získání temnostního signálu před a po skončení každého „scanu“. Monochromátor tvoří holografická mřížka, rychlost záznamu spektra je $20 - 40 \text{ nm}\cdot\text{s}^{-1}$ v závislosti na intervalu detekovaných vlnových délek, který je volitelný (1, 2, 5 a 10 nm). Vstupní a výstupní štěrbina monochromátoru mají šířku 0,5 mm. Detektorem je silikonová fotodioda, pracující ve fotovoltaickém modu. Měřicí rozsah přístroje je 300 – 1100 nm.

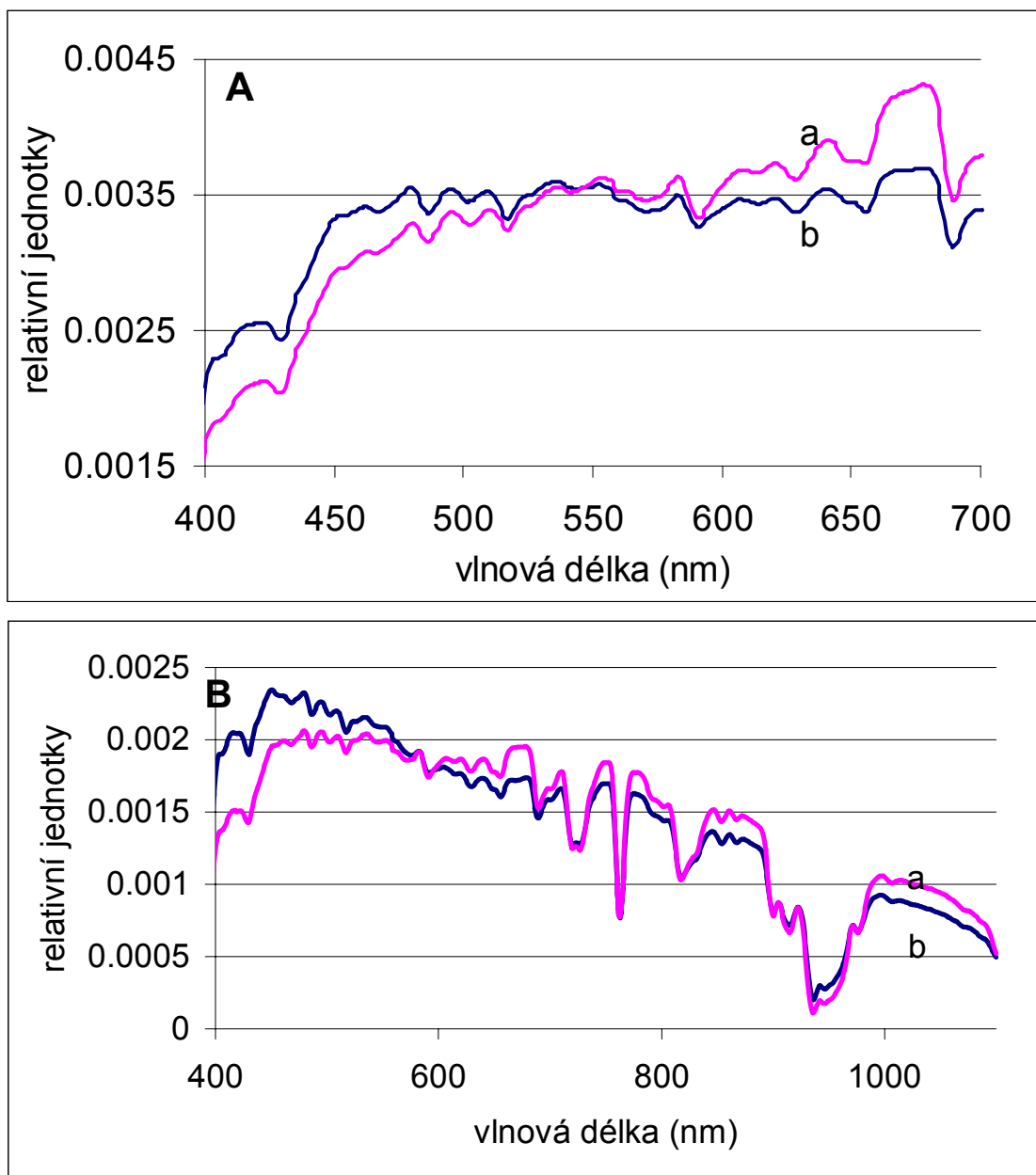
Metodika měření v polních podmínkách

Základní metodický problém spočíval v odstranění vlivu fluktuace ozáření během měření jednotlivých spekter a v nalezení způsobu vhodné prezentace spekter umožňující jejich kvalitativní porovnání. Měření jednotlivých spekter s krokem 1 nm trvalo cca 40

sekund. Během této doby byla současně v 5 sekundových intervalech vyhodnocována aktuální intenzita dopadající sluneční radiace pomocí dvou čidel s vlnovými rozsahy 400 – 700 nm (FAR) a 400 – 1100 nm (GR) s využitím přístroje Plant Canopy Analyzer LAI – 2000 (LI – COR, Nebraska, USA). Výsledkem jsou relativní spektra tj. podíl spektrální ozáření a intenzity dopadající radiace. V případě spekter v rozsahu FAR, kdy jsou výsledné spektrum i odpovídající ozáření v kvantových jednotkách, získáme takto normované spektrum, které vypovídá o relativním zastoupení fotonů při dané vlnové délce v rámci zvoleného rozsahu spektra. Pro rozsah GR, kdy jsou výsledné spektrum i odpovídající ozáření v energetických jednotkách, takto získané normované spektrum vypovídá o relativním energetickém zastoupení při dané vlnové délce.

Popis experimentu

Měření byla provedena v letním období (12.–24. července 2002, max. úhel elevace $60 - 62^\circ$) a v podzimním období (16. září–3. října 2002, max. úhel elevace $36 - 43^\circ$). V jednotlivém období bylo snahou zachytit alespoň 3 slunné dny a 3 stinné dny. Během každého dne se měřilo ráno, v poledne a večer a to vždy nad porostem (střecha - kontrola) a pod porostem (hustý porost). Pro každou z variant bylo provedeno deset opakování. Výsledkem celého experimentu bylo tedy cca 900 spekter. Při následném vyhodnocování byly pro jednotlivé skupiny spekter (tj. například ta spektra, která byla měřena během letního období, ráno při jasné obloze, byla zahrnuta do jedné skupiny) spočítány mediány, minima a maxima s využitím programu MS Excel.

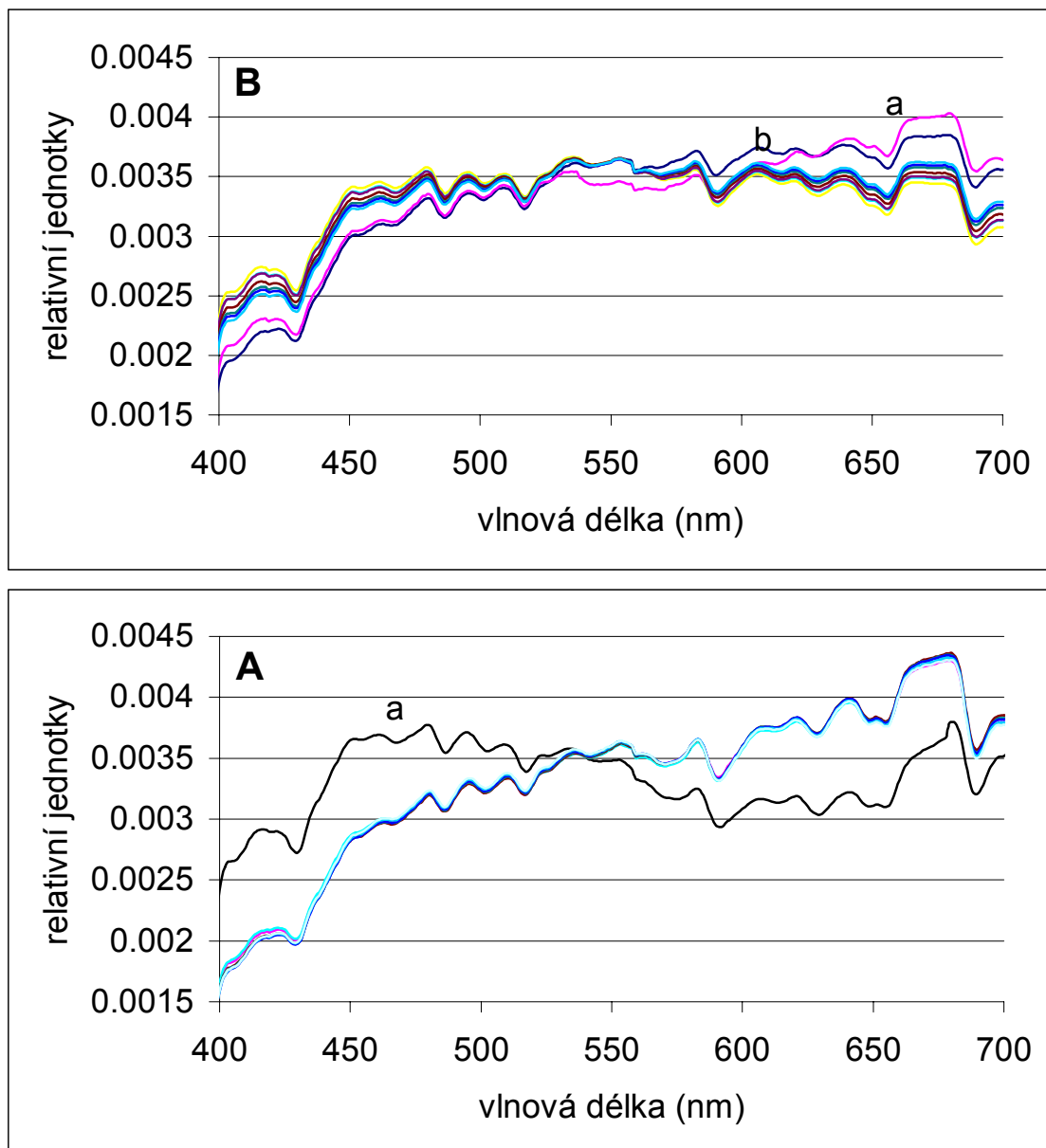


Obr. 1.: Srovnání spektrálního složení sluneční radiace dopadající na porost smrku ztepilého (a) během jasného a (b) během oblačného dne v období červenec 2002. Prezentovány jsou výsledky večerních měření (úhel elevace 10 – 20°). (A) relativním zastoupením fotonů při dané vlnové délce ve spektrálním rozsahu 400 – 700 nm. (B) relativní energetické zastoupení při dané vlnové délce ve spektrálním rozsahu 400 – 1100 nm. Jednotlivá normovaná spektra představují celkový medián z dané varianty (viz. Materiál a metody).

VÝSLEDKY A DISKUZE

Spektrální složení dopadající radiace během jasného a oblačného dne (Obr. 1)

Při oblačné obloze je spektrální distribuce sluneční radiace mezi VIS a NIR téměř stejná jako pro jasnou oblohu. Výrazně jsou ovšem potlačena ultrafialová a infračervená



Obr. 2.: Vliv krátkodobých změn ozáření na spektrum sluneční radiace dopadající na porost smrku ztepilého. (A) jasná obloha. Datum 17. 7. 2002, večerní měření (kvantová ozáření = cca $430 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) (a) zastíněné spektrum – pokles ozáření o 25%. (B) oblačná obloha. Datum 17. 7. 2002, polední měření (kvantová ozáření = $450 - 700 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$). (a, b) krátkodobé protržení oblačnosti (kvantová ozáření = 1480 a $2080 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$). Spektra představují relativní zastoupení fotonů při dané vlnové délce ve spektrálním rozsahu $400 - 700 \text{ nm}$.

oblast spektra (Campbell 1986, Petřík et al. 1986), tj. oblasti mimo rozsah našeho měření. Bez ohledu na denní dobu a roční období byl při zatažené obloze pozorován nárůst zastoupení fotonů v modrozelené oblasti spektra ($400 - 540 \text{ nm}$) ve srovnání se spektry získanými při jasné obloze a stejné době experimentu. Na obr. 1 je

tato skutečnost dokumentována pro večerní měření během letního období. Rozdíl mezi spektry získanými při jasné a zatažené obloze se ovšem lišil, jak v závislosti na denní době, tak na ročním období. Naše výsledky kvalitativně souhlasí s prací Petřík et al. (1986).

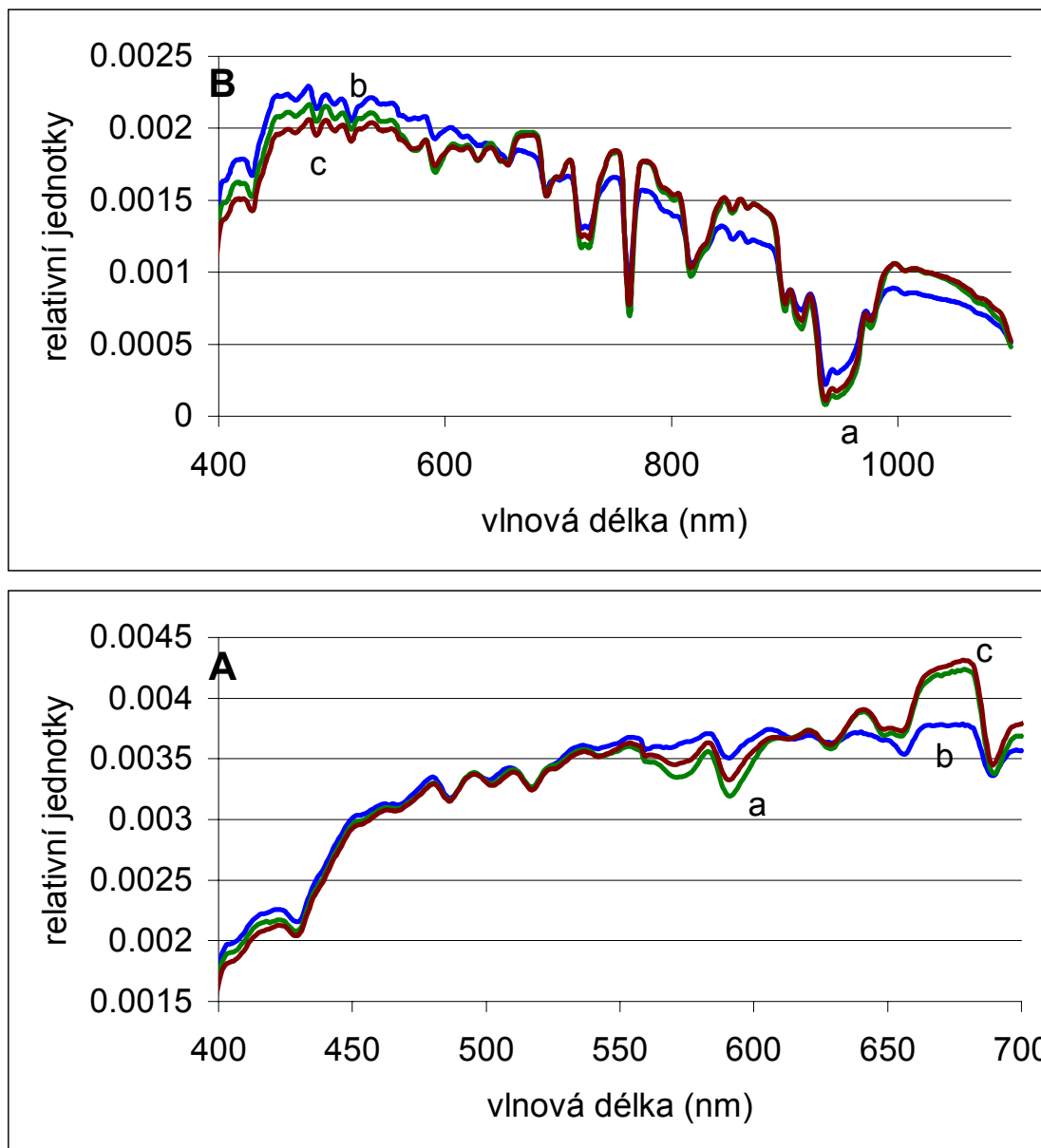
Vliv krátkodobých změn ozáření na spektrum (Obr. 2)

Na obrázku *A* jsou znázorněna relativní spektra dopadající FAR nad porostem získaná v rozmezí cca 20 minut během večerního měření 17. 7. 2002 (kvantová ozáření = cca $430 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$). Devět z deseti spekter má téměř totožný průběh. V jednom okamžiku slunce zastínil mrak (kvantová ozáření poklesla o cca 25%). Je patrný výrazný relativní nárůst zastoupení fotonů v oblasti 400 – 540 nm a současně pokles v dlouhovlnné oblasti FAR.

Na obrázku *B* je zachycen průběh poledního měření dne 17. 7. 2002 nad porostem při oblačné obloze (kvantová ozáření = $450 - 700 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$). Dvě z deseti spekter byla změřena při krátkodobém protržení oblačnosti (kvantová ozáření = (a) 1480 a (b) 2080 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$). Při vyjasnění je patrný výrazný relativní pokles v modré oblasti spektra a naopak nárůst v dlouhovlnné oblasti.

Hrubé stanovení vlivu elevačního úhlu na spektrum radiace (Obr. 3)

Na obrázku je srovnání relativních spekter přímé sluneční radiace měřené za jasné oblohy během letního období pro jednotlivé denní intervaly tj. ráno, poledne a večer. Ranní a večerní měření probíhala shodně při elevačním úhlu slunce $10 - 20^\circ$, polední měření při maximálním elevačním úhlu (cca 60°). Jak je z obrázku *3A* patrné, není mezi spektry v rozmezí 430 – 520 nm prakticky žádný rozdíl, výraznější rozdíly jsou vidět pro oblast 550 – 700 nm. Při maximálním elevačním úhlu je patrný relativní nárůst v oblasti 550 – 620 nm a výrazný pokles především v oblasti 660 – 685 nm. Z obr. *3B* je patrné, že spektrální složení GR při maximálním elevačním úhlu je výrazně odlišné ve srovnání se spektry získanými ráno a večer při úhlu elevace $10 - 20^\circ$. Průkazný je především pokles záření v intervalech vlnových délek odpovídajících maximům záření v IČ oblasti spekter a celkově zvýšení podílu FAR : NIR. Zajímavé je, že v IČ oblasti (obr. *3B*) v intervalech chybějících spektrálních pásů (selektivní absorpce atmosférou např. Dykyjová et al. 1989, Thiel et al 1996) je tomu právě naopak (Obr. *3B*).

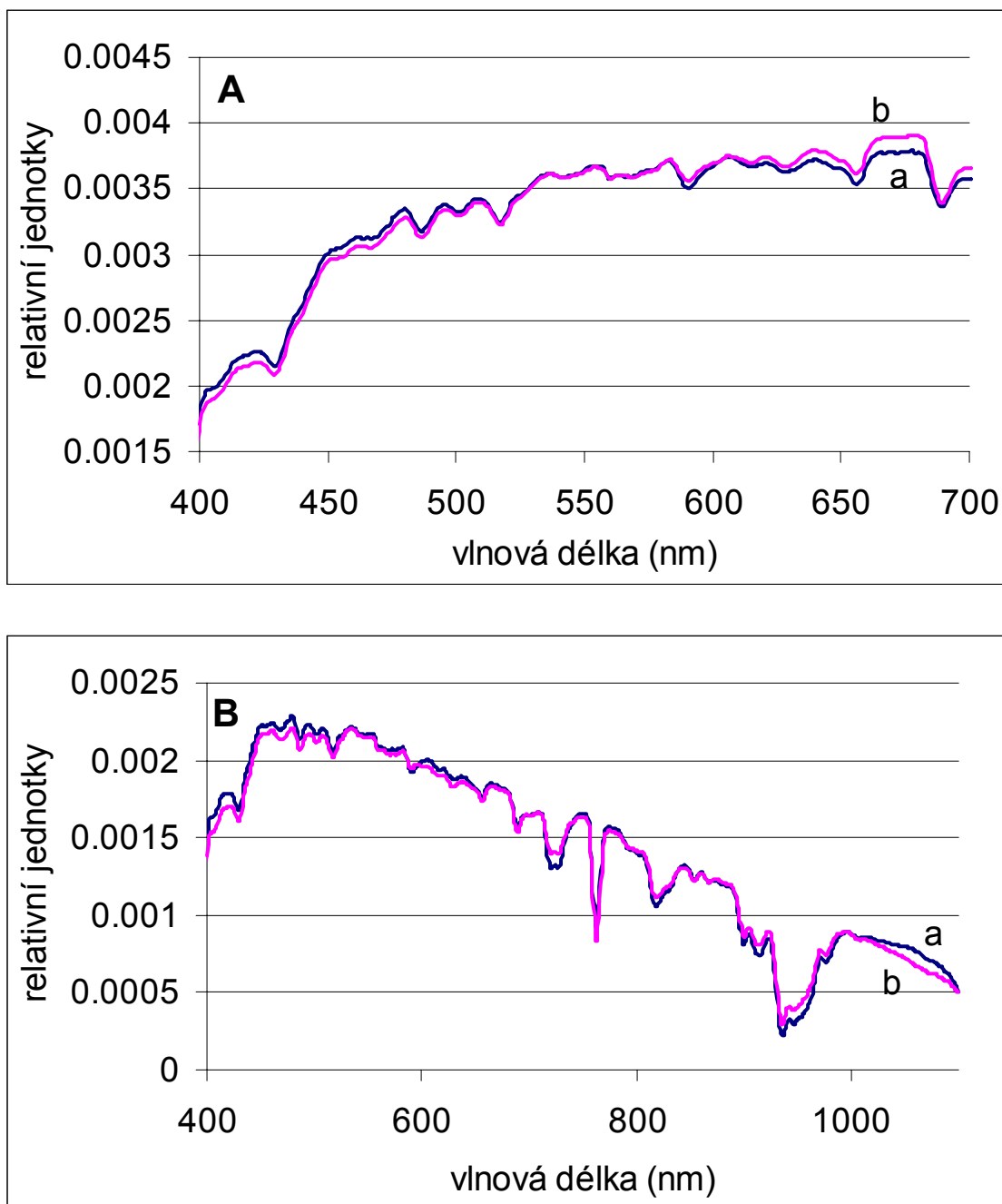


Obr. 3.: Hrubé stanovení vlivu elevačního úhlu na spektrum sluneční radiace dopadající na porost smrku ztepilého během letního období za jasné oblohy. (A) relativní zastoupení fotonů při dané vlnové délce ve spektrálním rozsahu 400 – 700 nm. (B) relativní energetické zastoupení při dané vlnové délce ve spektrálním rozsahu 400 – 1100 nm. (a) ranní měření (elevační úhel 10 – 20°), (b) polední měření (elevační úhel cca 60°), (c) večerní měření (elevační úhel 10 – 20°). Jednotlivá normovaná spektra představují celkový medián z dané varianty (viz. Materiál a metody).

Základní rozdíly spekter dopadající radiace během letního a podzimního období (Obr.4)

Na obrázku 4.1 je pro oblast FAR i GR porovnání poledních měření přímé sluneční radiace nad porostem během letního a podzimního období. Přestože byl

rozdíl v elevačních úhlech při těchto měřeních cca 20° je vidět, že ve spektrech se to příliš neprojeví. Je vidět pouze nepatrně (řádově jednotky %) vyšší relativní spektrální zastoupení v krátkovlnné



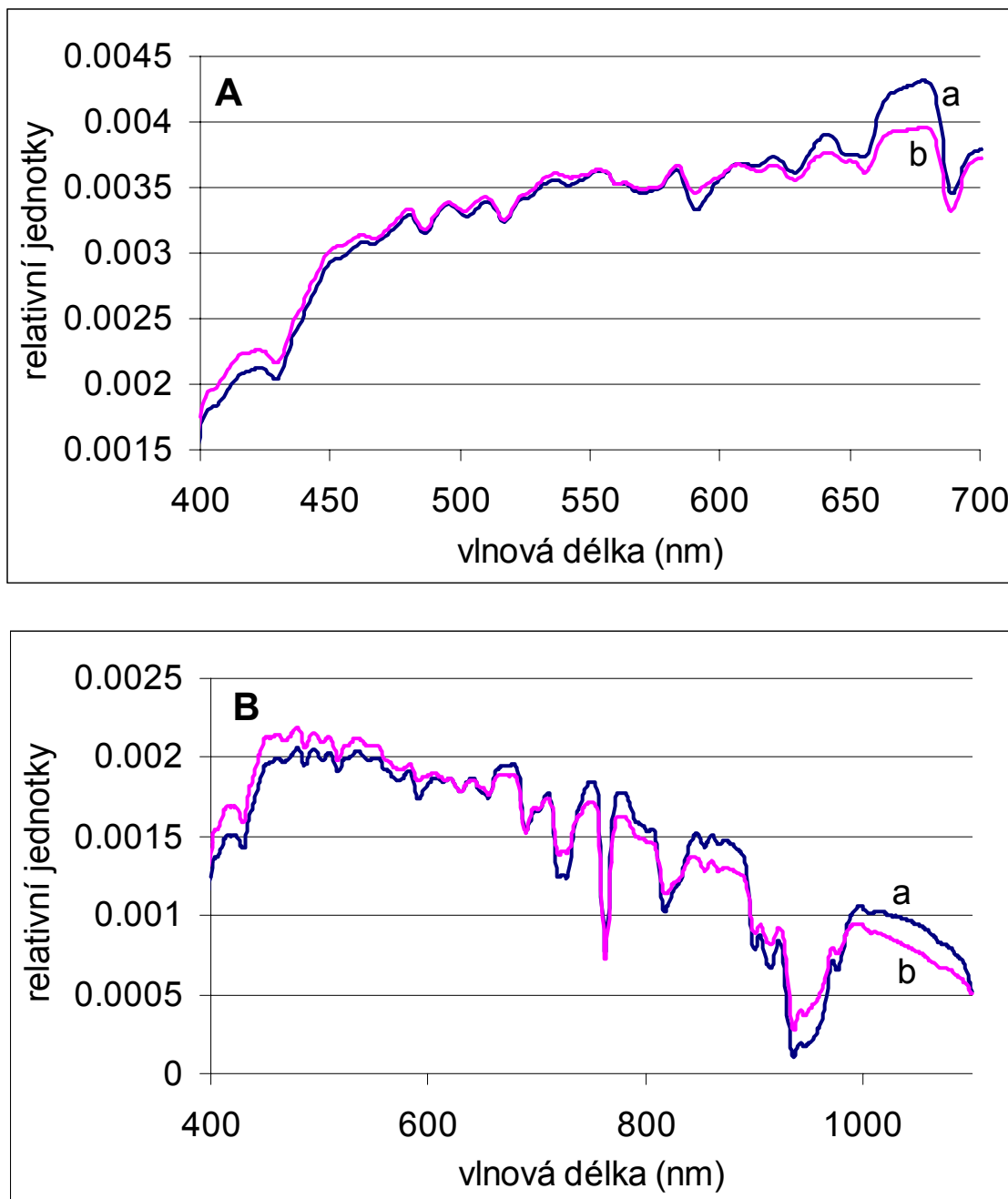
Obr. 4.1.: Základní rozdíly ve spektrech přímé radiace dopadající na porost smrku ztepilého během letního a podzimního období (A) relativní zastoupení fotonů při dané vlnové délce ve spektrálním rozsahu 400 – 700 nm. (B) relativní energetické zastoupení při dané vlnové délce ve spektrálním rozsahu 400 – 1100 nm. Prezentovány jsou výsledky poledních měření. (a) léto (elevační úhel cca 60°), (b) podzim (elevační úhel cca 40°). Jednotlivá normovaná spektra představují celkový medián z dané varianty (viz. Materiál a metody).

oblasti pro letní období ve srovnání s podzimem, shodně pro FAR i GR. Celková ozáření byla při letním měření cca 1800 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, při podzimním měření cca 1100 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (výsledek ze

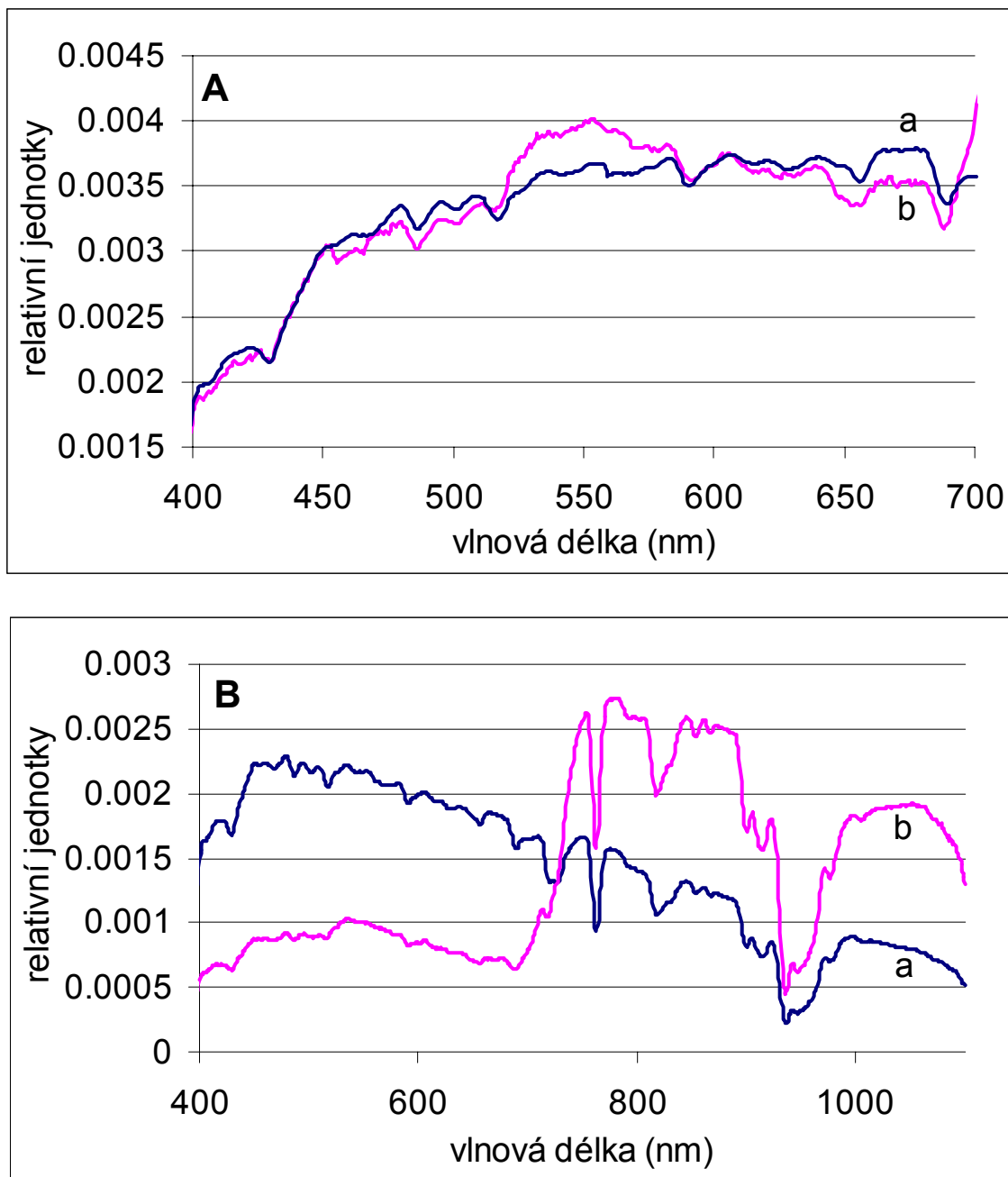
3 měřících dnů 1350, 1000 a 800 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$). Na obr. 4.2 jsou znázorněna spektra přímé radiace změřená v létě a na podzim nad porostem večer, tj. při stejném elevačním úhlu (10 – 20°). Zde je

překvapivě vidět mnohem výraznější rozdíl mezi letním a podzimním spektrem uvážíme – li, že byl elevační úhel stejný. Navíc ve srovnání s poledním měřením (Obr 4.1) zde dochází k opačnému efektu,

tedy u podzimních měření je v modré oblasti relativně větší spektrální zastoupení ve srovnání s létem, v červené oblasti je tomu opět naopak, shodně pro rozsah FAR i GR.



Obr. 4.2.: Základní rozdíly ve spektrech přímé radiace dopadající na porost smrku ztepilého během letního a podzimního období (A) relativní zastoupení fotonů při dané vlnové délce ve spektrálním rozsahu 400 – 700 nm. (B) relativní energetické zastoupení při dané vlnové délce ve spektrálním rozsahu 400 – 1100 nm. Prezentovány jsou výsledky večerní měření (elevační úhel 10 – 20°) (a) léto, (b) podzim. Jednotlivá normovaná spektra představují celkový medián z dané varianty (viz. Materiál a metody).



Obr. 5.: Vliv absorpce radiace na spektrum pronikající radiace pod porostem. (A) relativní zastoupení fotonů při dané vlnové délce ve spektrálním rozsahu 400 – 700 nm. (B) relativní energetické zastoupení při dané vlnové délce ve spektrálním rozsahu 400 – 1100 nm. Prezentovány jsou výsledky poledních měření v letním období (elevační úhel cca 60°) (a) nad porostem (b) pod hustým porostem. Jednotlivá normovaná spektra představují celkový medián z dané varianty (viz. Materiál a metody).

Vliv absorpce radiace na spektrum pronikající radiace pod porostem (Obr. 5)

Na obrázku je srovnání spekter přímé sluneční radiace pro oblast FAR i GR změřených nad porostem (kontrola) a

pod porostem (hustý porost). V oblasti FAR, jak je z obrázku 5A patrné, je spektrum pod porostem ve srovnání s kontrolou, relativně potlačeno v oblasti cca 400 – 435 nm a v oblasti cca 460 – 510

nm a podobně v oblasti nad 600 nm, což jsou spektrální intervaly, kde absorbují fotosynteticky aktivní pigmenty. Naopak záření v oblasti 510 – 580 nm je nejvíce odraženo (viz. zelená barva listů) (Petřík et al. 1986), což se projevuje relativně zvýšeným spektrálním zastoupením v této oblasti (*Obr. 5A*).

Na obrázku *5B* je pro rozsah GR vidět stejný efekt. Výrazný relativní nárůst v blízké infračervené spektrální oblasti (a s tím související pokles v modré oblasti) dokazuje, že záření těchto vlnových délek je rostlinami velmi málo absorbováno, čímž se rostliny chrání před nadměrným zahříváním listů (Campbell 1986, Larcher 1988)

ZÁVĚR

Hlavním cílem experimentu bylo dostatečně průkazně analyzovat zdroje variability spektrálního složení dopadající sluneční radiace v oblasti fotosynteticky aktivní radiace (FAR, 400 – 700 nm) a globální radiace (GR, 400 – 1100 nm). Z dosavadního zpracování výsledků vyplývá, že pro oblast FAR jsou nejvýznamnější rozdíly ve spektrální hustotě toku fotonů v kratkovlnnější (400 – 540 nm) a dlouhovlnnější (540 – 700 nm) oblasti spektra pozorovány při zatažené a jasné obloze (*Obr. 1A*). Průkazné změny ve spektru FAR se neprojevují pouze při stabilně nízké nebo vysoké oblačnosti, ale v maximálním rozsahu se mohou projevit při krátkodobém vyjasnění nebo zastínění slunce (*Obr. 2*). Vliv rozdílného elevačního úhlu při jasné (resp. zatažené obloze – data nepublikována) obloze na relativní spektrum FAR je obecně menší a projevuje

se pouze v dlouhovlnnější oblasti spektra (je tedy specifitější, *Obr. 3A*). Relativní energetické spektrum GR je ovšem výrazně citlivé jak vůči oblačné, nebo jasné obloze (*Obr. 1B*), tak vůči změnám elevačního úhlu slunce (*Obr. 3B*). Je tedy zřejmé, že právě elevační úhel výrazně ovlivňuje zastoupení radiace v červené a blízké infračervené oblasti spektra. Minimální rozdíly mezi testovanými variantami byly zjištěny při porovnání relativních spekter FAR i GR získaných během letního a podzimního období (při stejném zastoupení oblačnosti a denní době, *obr. 4.1 a 4.2*).

Za podstatný výsledek experimentu lze považovat fakt, že relativní spektrum dopadající sluneční radiace je citlivé na několik klimatických faktorů, jejichž vzájemné působení může zvýrazňovat, nebo naopak potlačovat prezentované rozdíly spektrálního složení FAR a GR. Jedním ze základních faktorů je rozdílný vliv tzv. molekulárního rozptylu (Rayleighova rozptylu) na molekulách plynů tvořících vzduch, prachových částicích, vodních kapičkách a ledových krystalech a rozptylu na větších částicích v ovzduší (Mieův rozptyl) (Campbell 1986, Petřík et al. 1986). Je tedy zřejmé, že pro detailnější pochopení rozsahu změn ve spektrech dopadající radiace a pro možnost jejich přesnější kvantifikace a predikce je nutno alespoň částečně eliminovat kombinované působení výše zmíněných faktorů. V letošním roce se proto zaměříme na studium vlivu difúzního koeficientu při konstantním elevačním úhlu a vice versa na ozářenosti a tvar spektra.

LITERATURA:

- Campbell, G.S (1986) An Introduction to Environmental Biophysics, pp 46 - 60. Springer – Verlag, New York
- Dykyjová, D. a kolektiv (1989) Metody studia ekosystémů, pp. 53 – 66. Academia, Praha
- Larcher, W. (1988) Fyziologická ekologie rostlin, pp. 32 – 46. Academia, Praha
- Petrík, M., Havlíček, V. and Uhrecký, I. (1986) Lesnícka bioklimatológia, pp. 31 – 64. Príroda, Bratislava
- Reitmayer, H., Werner, H. and Fabian, P. (2002) A Novel System for Spectral Analysis of Solar Radiation within a Mixed Beech-Spruce Stand. Plant biol. Vol. 4. pp. 228 – 233
- Thiel, S., Dohring, T., Kofferlein, M., Kosak, A., Martin, P. and Seidlitz, H.K. (1996) A Phytotron for Plant Stress Research: How Far Can Artificial Lighting Compare to Natural Sunlight? J. Plant. Physiol. Vol. 148. pp. 456 – 463

Výzkum byl podporován z programu Výzkumná centra MŠMT (LN00A141)

Mgr. Martin Navrátil; Doc.RNDr. Vladimír Špunda, CSc
Katedra fyziky, Ostravská univerzita, 30.dubna 22, 701 03 Ostrava, e-mail:
martin.navratil@osu.cz; vladimir.spunda@osu.cz