

DOPAD EXTRÉMŮ POČASÍ NA TOK UHLÍKU VE SMRKOVÉM POROSTU

Dalibor Janouš, Otmar Urban, Marian Pavelka, Manuel Acosta, Kateřina Havránková, Radek Pokorný, Zuzana Zvěřinová, Zdeňka Klimánková

Summary

Impact of weather extremes on carbon flux in spruce stand

Net carbon exchange in terrestrial ecosystems results from a balance between assimilative processes of autotrophic organisms and dissimilative carbon losses of autotrophic and heterotrophic respiration. Short-term changes in carbon flux balance on the ecosystem level are dependent on the weather conditions. Weather impact on the ecosystem production is fundamental and year-round ecosystem carbon balance could be significantly influenced by episodic occurrence of extreme weather.

Impacts of the extreme weather on physiological processes of the spruce stand are investigated on the Experimental study site Bílý Kříž in Moravian-Silesian Beskids.

In this contribution the assimilation, autotrophic and heterotrophic respiration, instantaneous carbon and energetic balance, sap flow, evapotranspiration and radiation balance of the study spruce site during the „summer days“ and „extreme days“ of the vegetation season 2003 are compared. „Summer days“ were defined as days with sufficient incoming radiation and available water. „Extreme days“ were hot summer days with sufficient incoming radiation and water deficit.

Assimilation of spruce stand is mainly dependent on the incoming solar radiation. However, during extreme warm and dry days, especially in midday hours, the important limitation caused by the stomata closing was found out.

Therefore, water regime of trees became driving force. Respiration is mainly dependent on temperature. The result of water deficit in humus layer however caused significant decrease of heterotrophic respiration measured in extreme days. The water deficit of such importance that would affect autotrophic respiration was not found in Bílý Kříž mountain conditions in 2003.

The main impact on total carbon balance of the ecosystem in extreme days had a significant depression of photosynthesis, high autotrophic respiration but restrained heterotrophic respiration. This resulted in a daily carbon balance losses during the vegetation season in days, when the dissimilative processes prevailed in spite of sufficient incoming energy to the ecosystem.

Research was done within the frame program of Research Intention of ILE ASCR No. AVOZ6087904 and was supported by the grants GACR No.526/03/1104 (Ministry of Education CR), Research center No.LN00A141 and GA ASCR No. S6087005.

Úvod

Množství uhlíku zachyceného terestrickými ekosystémy je výslednou bilancí asimilačních procesů autotrofních organismů a disimilačních ztrát uhlíku v dů-

sledku autotrofní a heterotrofní respirace. Krátkodobé změny v čisté uhlíkové výměně ekosystémů jsou závislé na počasí. Vliv počasí na celkovou produkci ekosystému je zcela zásadní. Celoroční uhlíková bilance ekosystému může být vý-

Kontakt:

Laboratoř ekologické fyziologie lesních dřevin, Ústav ekologie krajiny AV ČR v Českých Budějovicích, 603 00 Brno, Poříčí 3 b, ejanous@brno.cas.cz

znamně ovlivněna epizodními výskyty extrémů počasí.

Proces asimilace je výsledkem souhrnu mnoha faktorů vnějšího prostředí, z nichž vždy jeden proces asimilace v dané chvíli limituje. Ve středních zeměpisných šířkách je limitujícím faktorem nejčastěji intenzita dopadající sluneční radiace (Larcher, 1988). Dochází-li však v rostlinných pletivech k přílišným ztrátám vody, ztrácí světlo úlohu limitujícího faktoru a příjem CO₂ rostlinou klesá (Turner a Begg, 1981). Tento pokles rychlosti asimilace je dán sníženou vodivostí průduchů, jakožto ochranným mechanismem před nadměrnou ztrátou vody transpirací. Pokles rychlosti asimilace CO₂ při optimálním osvětlení v poledních hodinách bývá označován jako tzv. polední deprese fotosyntézy (Turner a Begg, 1981).

Respiraci ovlivňuje z vnějších faktorů především teplota. Biochemické reakce probíhají pouze za vhodných teplotních podmínek a jejich rychlost je závislá na teplotě. Tuto závislost dobře popisuje sigmoida (Janssens et al., 2001). V podmínkách lesních porostů horských ekosystémů není nutno předpokládat limitaci půdní respirace teplotou shora, už tomu tak nemusí být u respirace nadzemní biomasy. Rychlost respirace půdy může také být významně limitována při příliš nízké nebo příliš vysoké půdní vlhkosti.

Mezi nejdůležitější složky rovnice energetické bilance aktivního povrchu porostů patří turbulentní tok tepla a tok tepla potřebného na výpar, resp. evapotranspirace. Evapotranspiraci nejvýznamněji ovlivňují změny radiační bilance aktivního povrchu a variabilita hodnot sytostního doplnku (Matejka, 1995).

Na Experimentálním ekologickém pracovišti Bílý Kříž v Moravskoslezských Beskydech sledujeme vliv extrémního počasí na fyziologické procesy horského smrkového porostu. V tomto příspěvku porovnááme asimilaci, autotrofní a heterotrofní respiraci, transpiraci, uhlíkovou, energetickou a radiační bilanci výzkum-

ného smrkového porostu ve dvou typech dnů růstové sezóny 2003. Prvním typem jsou „typické letní dny“, které si pro potřeby příspěvku definujeme jako dny s dostatkem dopadající radiace a se sníženou, ne však limitující dostupností vody. Druhým typem jsou „extrémní letní dny“, jako teplé letní dny s dostatkem dopadající radiace, ale s výrazným vláhovým deficitem.

Metody

Výzkum vlivu extrémního počasí na fyziologické procesy horského smrkového porostu probíhal na Experimentálním ekologickém pracovišti Bílý Kříž v Moravskoslezských Beskydech během vegetačního období 2003. Lokalita je charakterizovaná (pro období uplynulých 10 let) průměrnou roční teplotou ve výšce 5.5°C, ročním úhrnem srážek 1300mm, průměrným počtem dnů se srážkami nad 1mm 140-160. Délka vegetační sezóny je 120-140 dnů. Sněhová pokrývka setrvává přes zimní období 120-140 dnů. V průběhu roku je průměrně 150-160 zatažených dnů a 40-50 jasných. Smrkový porost byl v daném roce 22-letou monokulturou smrku ztepilého (*Picea abies* [L.] Karst.) s hustotou 2440 ks.ha⁻¹. Průměrná výška porostu dosahovala 9.6 m, průměrná výčetní tloušťka kmene 11.7 cm, index listové plochy (hemi-surface) byl 12,34 +0,16. Geologické podloží porostu je tvořeno flyšovými vrstvami s převahou sedimentů pískovce. Půda je klasifikována jako humusoželezitý podzol (klasifikace FAO) s podílem jílovitých částic od 15 do 38% (písčitohlinitá až hlinitopísčítá hnědá lesní půda). Dostupnost vody pro rostliny (hydrolimity) pro daný půdní typ jsou tak následující (v objemových % vody): 1) 0-12% nedostupná voda, 2a) 12-18% těžce dostupná voda, 2b) 18-32% voda se sníženou dostupností, 2c) 32-44% lehce přístupná voda a 3) 44-58% nadbytečná voda (odvozeno dle Tlapák et al., 1992).

Na základě kontinuálního měření množství dopadajících srážek nad porostem (AMET, ČR), vlhkosti půdy (TRIME, IMKO, Německo) a dopadající globální radiace (Kipp-Zonen CNR 1, Delft, Holandsko) v průběhu vegetační sezóny byly vybrány dva výše uvedené typy dnů. Stanovení denních chodů výměny oxidu uhličitého a vodní páry mezi letorostem smrku ztepilého a okolní atmosférou bylo uskutečněno pomocí otevřeného gazometrického systému CIRAS-1 (PP Systems, Anglie). Měření byla provedena na intaktních jednoletých letorostech situovaných v horní třetině jižní strany koronové vrstvy. V průběhu dne byla rychlost asimilace (A_N) a vodivost průduchů (G_S) měřena při aktuálních mikroklimatických podmínkách. Denní chody uvedených fyziologických parametrů proto odrážejí aktuální odezvu asimilačního aparátu na intenzitu ozáření, teplotu, vlhkost vzduchu, případně vodní sytostní deficit atd. Měření toku CO_2 z půdy a dřevních částí nadzemní biomasy porostu (kmene) bylo realizováno pomocí automatického systému SAMTOC (ÚEK AV ČR). Jedná se o modifikovaný uzavřený gazometrický systém, jehož základními součástmi je 8 půdních a 8 kmenových respiračních komor, dva infračervené analyzátoři koncentrace CO_2 typu WMA-3 (PP Systems, Anglie), počítač s řídicím programem (Pavelka et al., 2004). V každé půdní respirační komoře je v půdě v hloubce 3 cm umístěno teploměrné čidlo PT100 (HIT, ČR). Teplota kmene (kambia) je měřena stejným typem čidla umístěným 5 cm pod každou kmenovou respirační komorou. Tok CO_2 z půdy je měřen v cyklech postupného měření v osmi půdních komorách (celkem 18 hodnot toku CO_2 z každé komory za 24 hod). Podobně, avšak v kratších cyklech probíhá měření toku CO_2 z kmene (36 hodnot toku CO_2 z každé komory za 24 hod). Měření toku CO_2 (respiračních ztrát) větví a listoví probíhalo kampaňovitě pomocí analyzátoru LI-6200 (LICOR,

USA), resp. CIRAS-1 (PP Systems, Anglie).

Celkové toky oxidu uhličitého, vodní páry, zjevného a latentního tepla mezi ekosystémem smrkového porostu a atmosférou byly stanoveny eddy-kovariančním systémem InSituFlux (InSituFlux, Švédsko). Základem metody je výpočet kovariance ze souběžného měření rychlosti a směru jednotlivých turbulencí vzduchu a s nimi spojených skalárních veličin, jako jsou koncentrace oxidu uhličitého, vodní páry a teplota vzduchu (Moncrieff et al., 1997). Ultrasonický anemometr systému byl umístěn 13 m nad povrchem půdy a frekvencí 21 Hz měří složky vektoru rychlosti, směr větru a ultrasonickou virtuální teplotu. Vzorky proudícího vzduchu jsou kontinuálně odebírány v oblasti anemometru a transportovány do infračerveného analyzátoru plynů, kde je měřena koncentrace oxidu uhličitého a vodní páry. Údaje jsou synchronizovány s měřením ultrasonického anemometru, zpracovávány a ukládány v osobním počítači. K datové analýze byly použity průměrné půlhodinové hodnoty toků uvedeného vysokofrekvenčního měření.

Měření rychlosti transpiračního proudu v kmenech stromů bylo prováděno pomocí přístroje SF 300 (Greenspan Technology, Austrálie). Pod bázi živé koruny každého stromu byly protilehle umístěny vždy dvě sondy v hloubce 20 a 60% vodivé části běle. Pro možnost srovnání rychlosti transpirace mezi jednotlivými stromy byly vypočteny hodnoty specifické rychlosti transpiračního proudu [$l \cdot hod^{-1} \cdot cm^{-2}$ příčného průřezu vodivé části běle]. Vodivá plocha běle stromu byla odvozena z výčetní tloušťky kmene pomocí alometrického vztahu (Pokorný, 2002).

Měření rychlosti transpirace na vybraných jedincích smrku (*Picea abies* [L.] Karst.) probíhalo ve 20-denních kampaňích (květen, červenec a září). Vybraní jedinci smrku reprezentovali následující sociální skupiny stromů: i) podúrovňové

(strom S257), ii) úrovňové (S68) a iii) nadúrovňové (S132). Dendrometrické pa-

rametry jednotlivých stromů jsou uvedeny v tabulce (Tab. 1).

Tab. 1. : Dendrometrické parametry stromů reprezentujících podúrovňové (S257), úrovňové (S068) a nadúrovňové (S132) sociální postavení. *H* – výška stromu, *DBH* – výčetní tloušťka kmene, *SA* – vodivá plocha běle ve výčetní výšce (1.3 m), *Ic* – index kompetice (dle Avery a Burkhardt, 1983), kdy při výpočtu byly brány v úvahu čtyři nejbližší stromy.

	H (m)	DBH (cm)	SA (cm ²)	Ic
S_257	7.2	6.8	28.9	3.7
S_068	10.9	10.8	75.6	2.0
S_132	12.3	15.9	169.0	1.2

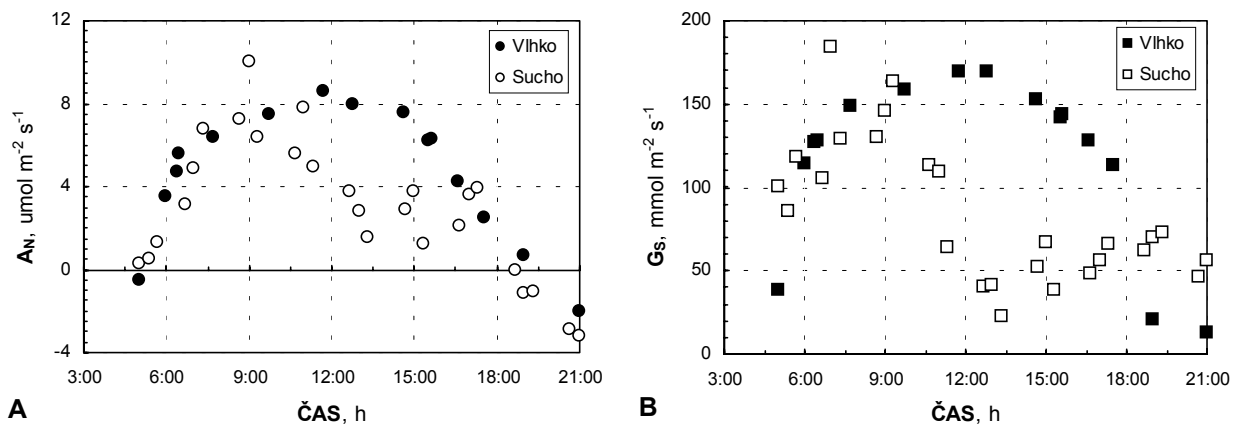
Měření radiační bilance bylo uskutečněno bilancoměrem Kipp-Zonen CNR 1 (Delft, Holandsko) umístěným na meteorologické věži nad porostem ve výšce 15 m nad zemí. Každých 30 sekund byla zaznamenávána krátkovlnná (globální) radiace dopadající na porost a odražená porostem, dlouhovlnná radiace dopadající na porost a vyzářená porostem. Z těchto záznamů byly každých 30 minut ukládány aritmetické průměry do datové ústředny DL 3000 (Delta-T, Anglie). Pro oba uvedené typy dní byly vytvořeny modely denních chodů radiační a energetické bilance.

Výsledky

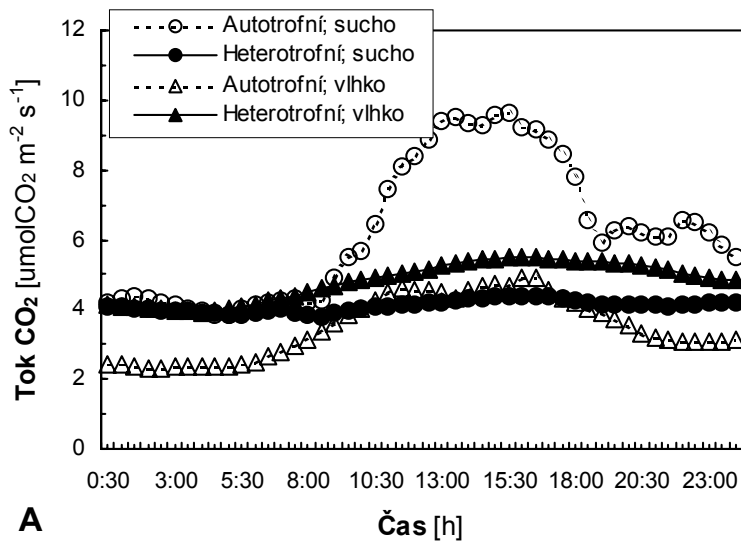
Typický letní den charakterizuje denní chod rychlosti asimilace (A_N), kdy rychlost asimilace není limitována žádným stresovým faktorem a je odpovědí na aktuální intenzitu dopadající sluneční radiace. Extrémní letní dny naopak charakterizuje situace, ke které dochází při nedostatku půdní vláhy, tzv. stresu suchem. Ten vyvolává výrazné snížení rychlosti asimilace smrku ztepilého v poledních hodinách, v našem konkrétním případě ca o 50% (Obr. 1A). Tento pokles fotosyntetické fixace CO_2 bývá

označován jako tzv. polední deprese fotosyntézy.

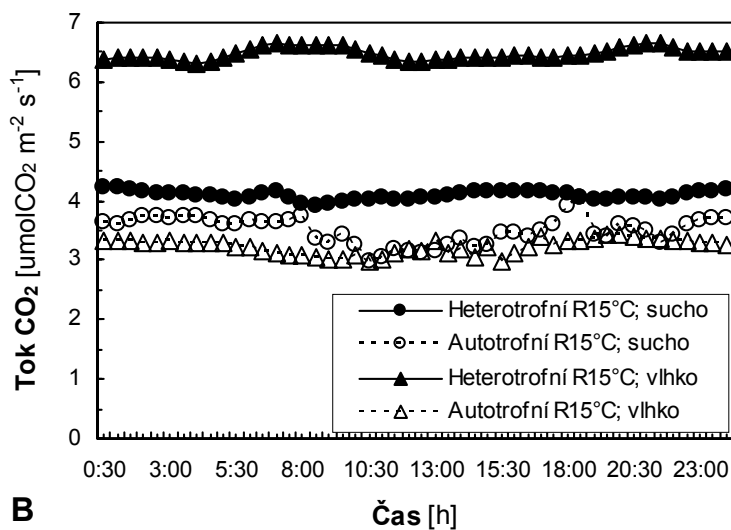
Uvedená deprese je způsobena uzavíráním průduchové štěrbin v poledních hodinách, což se projeví výrazným snížením (až o 70%) průduchové vodivosti (G_S) (Obr.1B). Tento obranný mechanismus, jehož cílem je zabránění nadměrnému výdeji vody dřevinou, má za následek rovněž omezení difúze CO_2 do vnitřního, intercelulárního, prostoru listu a následný pokles rychlosti jeho asimilace. Tokem CO_2 z nadzemní biomasy během extrémního dne pro průměrnou teplotu biomasy 21,9 °C bylo vydáno 201,0 kg C .ha⁻¹ (průměrná rychlost respirace kmene byla 3.2 $\mu molCO_2m^{-2}s^{-1}$, u biomasy větví tato rychlost byla 1.92 $\mu molCO_2m^{-2}s^{-1}$) a během typického letního dne při průměrné teplotě biomasy 14,6 °C bylo vydáno 117,3 kg C .ha⁻¹ (průměrná rychlost respirace kmene byla 2.19 $\mu molCO_2m^{-2}s^{-1}$, u biomasy větví tato rychlost byla 0.94 $\mu molCO_2m^{-2}s^{-1}$) Rozdíly v celkové ztrátě uhlíku jsou u autotrofní respirace dány především rozdílnými teplotami mezi oběma typy dnů. Významnější limitace autotrofní respirace při deficitu vody v daných podmínkách nalezena nebyla (Obr. 2B).



Obr. 1AB: Denní chod rychlosti asimilace CO_2 (A_N ; panel A) letorostu smrku v průběhu ja sného dne s dostatečnou (●) a nedostatečnou (○) dostupností vody a denní chod vodivosti průduchů (G_s ; panel B) za stejných podmínek.



Obr. 2AB: A: Denní chod autotrofní respirace (nadzemní biomasy, *prázdný znak*) a heterotrofní respirace (půdy, *plný znak*) pro typický letní den (*vlhko*) a extrémní den (*sucho*).

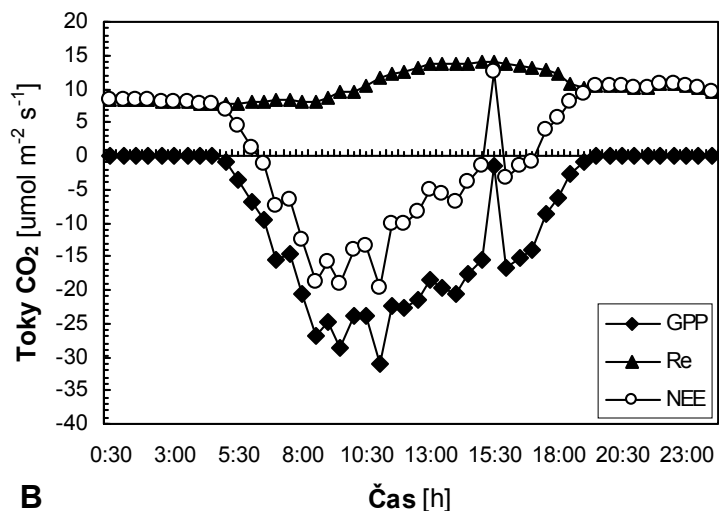
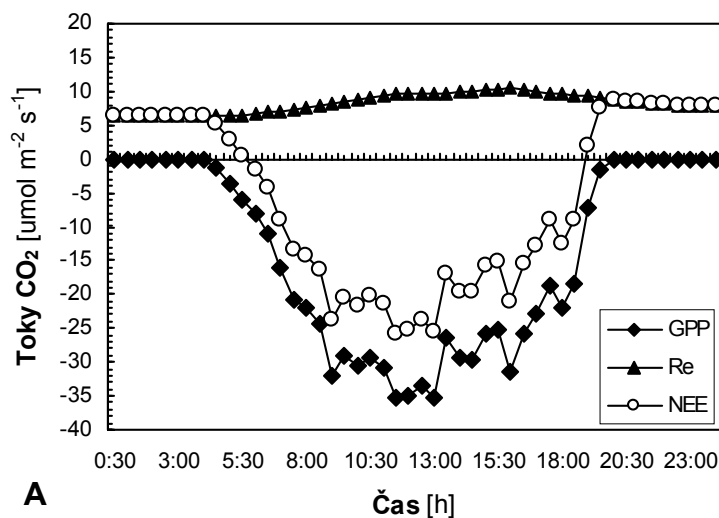


B: Výše uvedené denní chody respirace normalizované pro 15°C z důvodu možnosti porovnání za stejných teplotních podmínek.

Z měřených denních chodů toku CO_2 v průběhu vybraných dnů reprezentující oba specifikované typy letních dnů (Obr. 2) bylo vypočítáno množství respiračních ztrát uhlíku za jeden den. Během extrémního letního dne bylo z půdy vydáno $42.5 \text{ kg C} \cdot \text{ha}^{-1}$ při průměrné teplotě půdy 15.1°C , během typického letního dne bylo vydáno $49.7 \text{ kg C} \cdot \text{ha}^{-1}$ při průměrné teplotě půdy 1.7°C . Nižší hodnoty toku CO_2 během suchého dne lze přičítat limitaci půdní respirace suchem zejména horizontu nadložního humusu. Hodnota koeficientu Q_{10} (vyjadřuje změnu rychlosti respirace na změně teploty) činila pro extrémní den 1.24 a pro typický den 2.52. Průměrná hodnota koeficientu Q_{10} vypočtená pro celé vegetační období 2003 činila 2.17. Hodnota koeficientu Q_{10} extrémního dne se nachází pod spodní hranicí hodnot uváděných pro půdu, které se pohybují v rozsahu od 1.3 do 3.3 (Reich a Schlesinger, 1992).

Typický letní den vykazoval také typický chod čisté uhlíkové výměny ekosystému (Obr. 3A). V denní periodě s dostatečným příkonem sluneční radiace do porostu převažovala asimilace. V této části dne porost fixoval $95.6 \text{ kg C ha}^{-1}$, což odpovídá vytvoření 233 kg suché biomasy na hektar.

V extrémním dni (Obr. 3B) se maximální tok uhlíku do porostu vyskytoval mezi 9:00 a 12:00, v odpoledních hodinách docházelo v souladu s výše uvedenými výsledky měření rychlosti asimilace k jeho výraznému snížení. V pozdější části odpoledne, ještě za dostatečného světelného požitku dokonce převažoval tok CO_2 ven z porostu. Za celou denní periodu s dostatečným příkonem sluneční radiace porost fixoval pouze $31.4 \text{ kg C ha}^{-1}$, což odpovídá vytvoření 76.6 kg suché biomasy na hektar, což je pouze 33 % produkce typického letního dne.



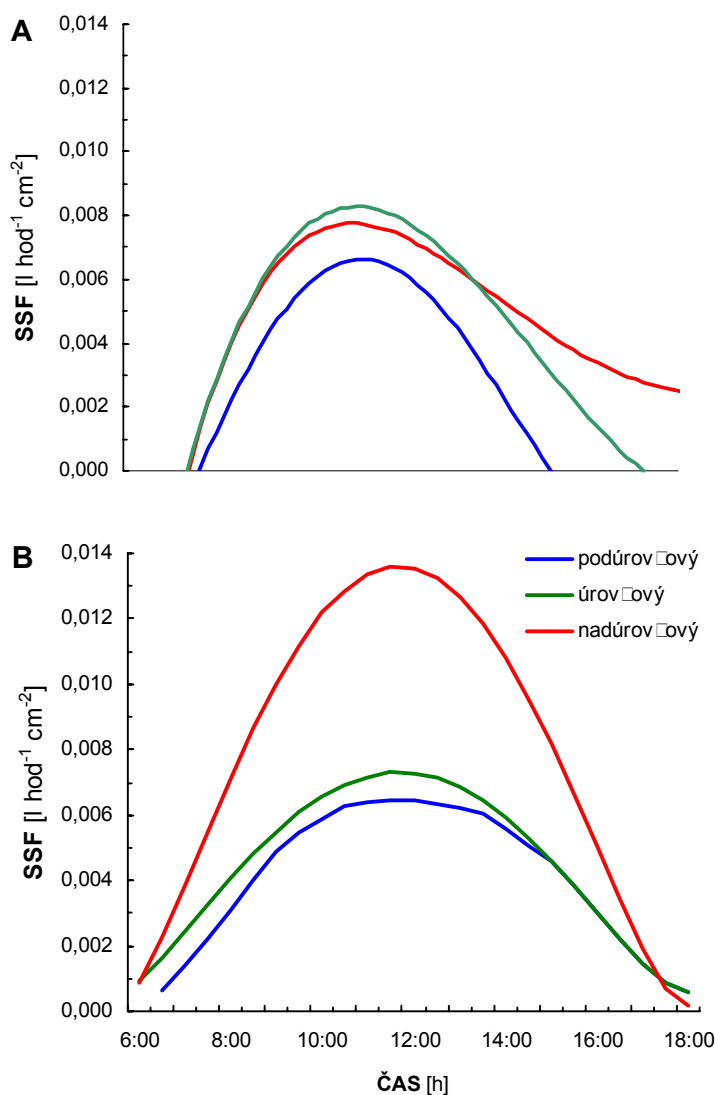
Obr. 3AB: Denní toky CO_2 vyjadřující na úrovni ekosystém-atmosféra čistou výměnu uhlíku, respiraci a hrubou primární produkci ekosystému v typickém letním dni (A) a v extrémním letním dni (B).

V typickém letním dni byla zjištěna účinnost asimilace na úrovni $1.60 \text{ MJ.kg}^{-1}\text{C}$ a za polojasného dne byla účinnost vyšší, $1.35 \text{ MJ.kg}^{-1}\text{C}$. V extrémním letním dni účinnost asimilace klesla v dopoledních hodinách na $2.00 \text{ MJ.kg}^{-1}\text{C}$, odpoledne až na úroveň $28.79 \text{ MJ.kg}^{-1}\text{C}$. V extrémním letním dni respirační ztráty v součtu za celý den převyšovaly hrubou primární produkci ekosystému, výsledná denní výměna uhlíku znamenala výdej uhlíku ekosystémem.

Typický letní den charakterizovala průměrná půdní vlhkost (obj. % vody) v horizontech 1-17cm (I) pod povrchem, 16-31 cm (II) a 27-43 cm (III) následně:

$19.7 \pm 3.1 \%$, $22.2 \pm 4.9 \%$ a $21.8 \pm 2.2 \%$. Vybraný extrémní letní den charakterizovala půdní vlhkost v uvedených horizontech následně: $15.4 \pm 4.6 \%$, $18.5 \pm 6.2 \%$ a $18.4 \pm 5.5 \%$. Z hlediska hydrolimit se tedy v typickém letním dnu jednalo o vodu se sníženou dostupností pro rostliny a v extrémním dni o vodu těžce přístupnou.

Specifická rychlost transpiračního proudu v kmeni stromu závisí na jeho sociálním postavení v porostu, avšak v období přísušky jsou tyto rozdíly zanedbatelné (Obr. 4.).



Obr. 4 AB: Specifická rychlost transpiračního proudu v průběhu extrémního (A) a typického

(B) letního dne u vybraných jedinců smrku s různým sociálním postavením v porostu.

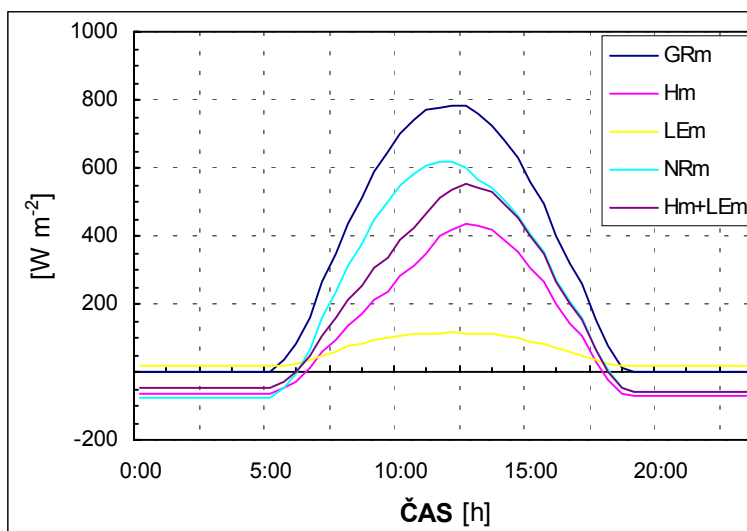
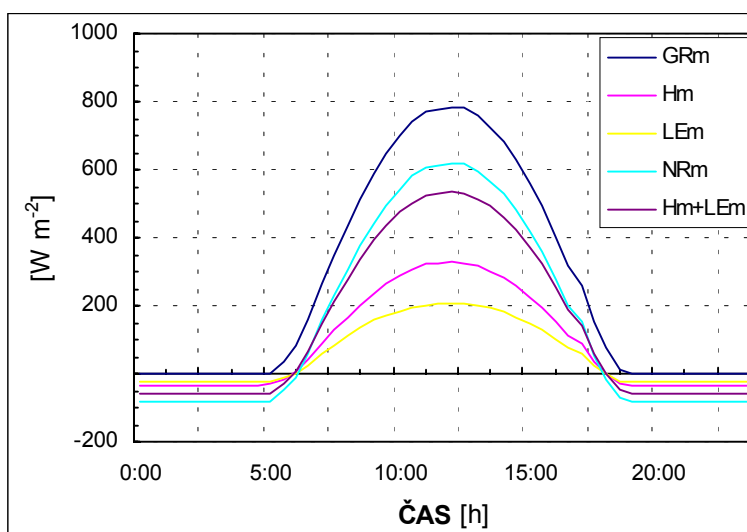
V průběhu typického letního dne vydal podúrovňový smrk 2.90 l.den^{-1} , úrovňový

$6,13 \text{ l.den}^{-1}$ a nadúrovňový $50,53 \text{ l.den}^{-1}$. V průběhu extrémního letního dne s těžce

dostupnou vodou v půdě vydal podúrovňový smrk 0.89 l.den^{-1} , úrovňový 3.66 l.den^{-1} a nadúrovňový 17.84 l.den^{-1} . Celkový denní výdej vody tak v extrémním dni poklesl u podúrovňového stromu o 60 %, u úrovňového stromu o 40 % a u nadúrovňového o 65 %.

Míra lineární závislosti mezi SSF a dopadající GR byla velmi rozdílná v průběhu obou vybraných dnů. V průběhu dne s nedostatečnou půdní vlhkostí byly nalezeny nejvyšší míry závislosti u podúrov-

ňového ($r^2=0.22$) i úrovňového ($r^2=0.87$) stromu bez časového zpoždění (resp. do 1/2 hod. – interval měření), u nadúrovňového stromu ($r^2=0.70$) se zpožděním 1/2 hod. V průběhu dne s vyšší dostupností vody v půdním profilu byla nejsilnější míra závislosti nalezena u všech vybraných stromů v případě 1 hod. posunu. Nejvyšší míru závislosti prokazoval opět úrovňový jedinec ($r^2=0.70$) a nejnižší jedinec podúrovňový ($r^2=0.47$).



Obr. 5AB: Modelovaný chod dopadající globální radiace (GRm), radiační bilance (NRm), turbulentního toku tepla (Hm), tepla potřebného na výpar (LEm) a jejich součtu (Hm+LEm) v průběhu typického letního dne (A) a průběhu extrémního dne (B).

Analýzou regresní závislosti turbulentního toku tepla (H) a toku tepla potřebného na výpar (LE) na dopadající globální radiaci (GR) byl zjištěn významně odlišný lineární vztah H a GR v dopoledních a odpoledních hodinách extrémního letního dne. Závislost H na GR je v odpoledních hodinách výrazně strmější jak ve srovnání s dopoledními hodinami, tak i ve srovnání s typickým letním dnem. V typickém letním dni tento rozdíl mezi dopoledními a odpoledními hodinami nebyl významný.

Evapotranspirace v extrémním letním dni dosahovala úrovně asi 55 % typického dne (Obr. 5), překvapivě však oproti výsledkům měření transpiračního proudu nebyl nalezen významný rozdíl mezi dopoledními a odpoledními hodinami.

Bowenův poměr v extrémním dnu vzrůstal z hodnoty ca 2.0 v dopoledních hodinách na 3.6 v odpoledních hodinách. V typickém letním dni k tomuto nárůstu nedocházelo, hodnota Bowenova poměru se držela na úrovni 1.6.

Podíl čisté radiační bilance na dopadající globální radiaci byl v extrémním dni nižší ve srovnání s typickým dnem a v popoledních hodinách klesal.

Závěr

Asimilace smrkového porostu je závislá především na dopadající sluneční radiaci. V extrémně teplých a suchých dnech, zejména v poledních hodinách, jsme však zjistili významnou limitaci v důsledku přivírání průduchů. Řídicím procesem se stal vodní režim dřeviny. Respirace je závislá především na teplotě. Jako důsledek deficitu vody v humusové vrstvě jsme však v extrémních dnech naměřili výrazný pokles heterotrofní respirace. V horských podmínkách Bílého Kříže jsme v sezóně 2003 nezjistili natolik výrazný deficit vody, že by se významně projevil na procesu autotrofní respirace.

V celkové uhlíkové bilanci ekosystému se tedy v extrémních dnech uplatnila významná deprese fotosyntézy, vysoká autotrofní respirace, ale utlumená heterotrofní respirace. Výsledkem byla ztrátová celodenní bilance uhlíku v produkční periodě sezóny v důsledku převládajícího disimilačního procesu i za dostatečného příkonu zářivé energie do ekosystému.

Výzkum prováděný v rámci výzkumného záměru ÚEK AV ČR AV0Z6087904 byl podporován z grantů GAČR 526/03/1104, MŠMT, výzkumné centrum LN00A141 a GA AV ČR, cílový projekt S6087005.

Použitá literatura:

- Avery, T.E., Burkhardt, H.E., 1983. Forest measurements. 3rd Edition. McGraw-Hill, New York, USA.
- Janssens I A, Meiresonne L, Ceulemans R, 2001. Mean Soil Efflux from Mixed Forest: Temporal and Spatial Integration. In: Coulemans R, Veroustraete F, Gond V, Van Rensbergen J (eds) Forest Ecosystem Modelling, Upscaling and Remote Sensing. SPB Academic Publishing, The Hague: 19-33.
- Larcher, W., 1988. Fyziologická ekologie rostlin. Academia Praha.
- Matejka, F., 1995. Vplyv meteorologických činiteľov na evapotranspiráciu. Met. správy, 48 (3): 87-90.
- Moncrieff, J.B., Massheder, J.M., de Bruin, H., Elbers, J., Friborg, T., Heusinkveld, B., Kabat, P., Scott, S., Soegaard, H., Verhoef, A., 1997. A system to measure surface fluxes of momentum, sensible heat, water vapour and carbon dioxide. Journal of Hydrology, Vol.188-189, 589-611.

- Pavelka, M., Acosta, M., Janouš, D., 2004. A new device for continuous CO₂ flux measurement in Forest stan. Ekologie (Bratislava), accepted.
- Pokorný, R., 2002. Index listové plochy v porostech lesních dřevin. Disertační práce. MZLU Brno.
- Reich J W a Schlesinger W H, 1992 The global carbon dioxide flux in soil respiration and its relationship to climate. Tellus Series B-Chemical and Physical Meteorology 44(2): 81-99.
- Tlapák, V., Šálek, J., Legát, V., 1992. Voda v zemědělské krajině. Zemědělské nakladatelství Brázda ve spolupráci s MŽP ČR.
- Turner, N.C., Begg, J.E., 1981. Plant-water relations and adaptation to stress. – Plant and Soil 58 (1-3): 97-131.