

# BILANCIA UHLÍKA V SMREKOVÝCH PORASTOCH POŠKODENÝCH VETROVOU A LYKOŽRÚTOVOU KALAMITOU VO VYSOKÝCH TATRÁCH: METODICKÝ PRÍSTUP A PRIEBEŽNÉ VÝSLEDKY

Peter Fleischer • Peter Fleischer, ml. • Slavomír Celer

## Úvod

Jedným zo sprievodných znakov a zároveň akcelerátorom klimatických zmien je rastúca koncentrácia uhlíka vo forme CO<sub>2</sub> v atmosfére. V roku 2008 sa len z fosílnych palív uvolnilo rekordných 7,7.10<sup>9</sup> tC a ďalších 1,2.10<sup>9</sup> tC v dôsledku zmien využívania krajiny (HASENAUER *et al.*, 2012). CO<sub>2</sub> patrí medzi najvýznamnejšie antropogénne skleníkové plyny a preto sa hľadajú spôsoby na zamedzenie jeho ďalšieho rastu. Riešením je efektívnejšie využívanie energie, zavádzanie obnoviteľných a alternatívnych zdrojov. Ďalšou možnosťou je sekvestrácia CO<sub>2</sub> v rastlinnej biomase. Suchozemské ekosystémy sekvestrujú ročne (2008) 2,7.10<sup>9</sup> t antropogénneho C (t. j. asi 30 %). Lesné porasty spolu s lesnou pôdou sú všeobecne považované za veľké, dlhodobé a vzhľadom aj na globálnu plochu lesov aj veľmi významné depónium uhlíka. Bez lesov by súčasná koncentrácia CO<sub>2</sub> (385 ppm) dosahovala hodnotu okolo 510 ppm (HASENAUER *et al.*, 2012). Keďže aj malé zmeny plochy lesov výrazne ovplyvňujú **mitigačný potenciál lesných ekosytémov, venuje sa manažmentu lesov pre zvyšovanie sekvestrácie uhlíka mimoriadna pozornosť.** Prioritným záujmom ekologického výskumu je aj kvantifikácia zásob uhlíka v lesoch na regionálnej, miestnej a až na úrovni lesného porastu (PERCEY *et al.*, 2003; KONÔPKA, 2007).

Rastliny viažu atmosférický C (CO<sub>2</sub>) v procese fotosyntézy. Asi polovicu takto fixovaného C (hrubá primárna produkcia GPP) použije rastlina na energetické zabezpečenie životných funkcií (autotrofná respirácia Ra), a len časť sa použije na tvorbu biomasy (čistá primárna produkcia NPP). NPP ako čistá imobilizácia atmosférického CO<sub>2</sub> v rastlinnej biomase je rozhodujúca pre hodnotenie vplyvu a dôsledkov klimatických zmien (YUSTE *et al.*, 2005; MAREK *a kol.*, 2011). Produktivita terestrických ekosystémov sa tradične meria biometrickými metódami, založenými na inventarizácii zmien biomasy za časové obdobie. Pri hodnotení produkcie jednotlivých stromov i celých porastov sa využívajú alometrické vzťahy a expanzné faktory na prepočet objemu nadzemnej hrubiny na obsah C v celkovej rastlinnej biomase (LEHTONEN *et al.*, 2004; IPCC, 2003; AMIRO *et al.*, 2010). Napriek dlhodobému a intenzívnemu štúdiu je hodnotenie primárnej produkcie stále zaťažené značnými neurčitostami, vyplývajúcimi zo sústavnej transformácie asimilátov (spotreba, rozklad, mortalita, presun). Na hodnotenie jednotlivých, aj to len niektorých komponentov lesného porastu (hrubina, vetvy, korene, listy) sa používajú nepriame metódy, pre niektoré (reprodukčné orgány, prchavé látky, mykoríza) stále chýbajú terénne metódy (CLARK *et al.*, 2001). Posledných 10 rokov sa NPP stanovuje aj z toku CO<sub>2</sub> medzi atmosférou a lesnými ekosystémami mikrometeorologickou metódou vírvej (eddy) kovariancie (BALDOCCHI, 2008). Na ekosystémovej úrovni je pri analýze tokov C nutné zohľadniť aj straty C spôsobené opadom, mŕtvym drevom, dýchaním pôdnej fauny a flóry, rozkladom ich tiel a výlučkov (heterotrofná respirácia Rh). Bilancia medzi NPP a Rh sa označuje ako čistá ekosystémová výmena (NEE), alebo čistá ekosystémová produkcia (NEP). Podľa toho, či prevláda fotosyntéza, alebo respirácia hovoríme o kladnej alebo zápornej bilancii.

Predpokladané klimatické zmeny by podľa modelových odhadov mohli zvýšiť intenzitu rastu a **teda aj sekvestračnú kapacitu horských lesov** (HLÁSNY *et al.*, 2011). Výsledky štúdia tokov uhlíka potvrdzujú, že po disturbanciách sa uhlík akumulovaný v lesných ekosystémoch môže ľahko a rýchlo uvoľniť do atmosféry (AMIRO *et al.*, 2010). Súčasná, ale najmä očakávaná zvýšená frekvencia prírodných katastrof spojená s globálnymi zmenami môže znamenať vážny zásah do krehkej rovnováhy medzi príjmom a výdajom uhlíka (LINDROTH *et al.*, 2009). Priame merania dynamiky uhlíka bolo doteraz prevažne **orientované do boreálnych a nížinných lesoch mierneho pásma**, veľmi málo prác sa venovalo horským lesoch (ETZOLD *et al.*, 2011).

Cieľom tejto práce je posúdiť uhlíkovú zásobu, jednotlivé toky a celkovú uhlíkovú bilanciu v smrekových porastoch, ktoré boli postihnuté vetrovou kalamitou (2004) a následne masívnym šírením podkôrneho hmyzu, na príklade vybraného modelového územia vo Vysokých Tatrách.

## Materiál a metodika

### Výber lokality

Pre porovnávanie hodnotenia aktuálneho stavu lesných porastov vo Vysokých Tatrách je v súčasnosti takmer nemožné nájsť referenčné, nepoškodené porasty. Preto sme výber modelového územia orientovali do spoločenstva v ktorom boli dendrometrické, fytoocenologické, produkčné, klimatické a pedologické údaje sledované ešte pred kalamitným poškodením. Vzhľadom na prebiehajúci program dlhodobého ekologického monitoringu v smrekovcových smrečinách, vybrali sme porasty v tomto spoločenstve. Ďalším kritériom bol vek, ktorý by korešpondoval s vekom ešte stojacich porastov na južných svahoch Vysokých Tatier. Vybrané územie s výmerou 471 ha je na území TANAP, v správe ŠL TANAP, o. o. Tatranské Matliare, nachádza sa na JV svahu Lomnického hrebeňa so sklonom 70 – 80 % v hornej časti a miernym 5 – 20 % v spodnej tretine. Rozpätie nadmorskej výšky je 1 200 – 1 500 m n. m., priemerné ročné zrážky sú 900 – 1 300 mm, priemerná ročná teplota 4,7 až 2,0 °C (KONČEK *a kol.*, 1974). Porasty majú prirodzený, človekom málo narušený vzhľad. Vek porastov je vyše 120 rokov (LHP). Už v 90. rokoch sa tu realizoval podrobný prieskum na zistenie druhovej, vekovej, hrúbkovej a výškovvej štruktúry lesných porastov (FLEISCHER, 1999). Priamo na lokalite sa nachádza plocha národného monitoringu lesov II. úrovne (NLC Zvolen). Od r. 2010 sa na lokalite systematicky sleduje pôdna respirácia (FLEISCHER *a kol.*, 2011). Lokalita bola čiastočne zasiahnutá vetrovou kalamitou v r. 2004. Na časti územia boli vývraty a zlomy spracované, drevo vyvezené, prevažná časť vývratov ostala bez spracovania. Od r. 2007 sa do okolitých, vtedy ešte nepoškodených, porastov začal šíriť podkôrný hmyz a spôsobil intenzívny, veľkoplošný úhyn stromov. Modelové územie prírodnými pomermi, postupom a rozsahom podkôrníkovej kalamity a následným vývojom vegetácie zodpovedá stavu vo väčšine porastov nad oblasťou postihnutou vetrovou kalamitou v r. 2004 vo Vysokých Tatrách.

### Vegetačné a pôdne pomery

Pred poškodením v r. 2004 pokrývali lesné porasty celé modelové územie. Podľa lesníckej typologickej klasifikácie patria porasty do spoločenstva smrekovcových smrečín (*Lariceto-Piceetum*). Pôdy sú prevažne podzolové kambizeme, miestami až rankrové podzoly s 8 – 10 cm vrstvou nadložného humusu. Vzhľadom na prevažujúci *neextrémny* charakter pôdneho prostredia a polohu mimo opakujúcich sa vetrových kalamít, dominoval v porastoch smrek, zastúpenie smrekovca bolo priemerne do 10 %, ojedinele sa vyskytovali jedle a borovice. Vertikálna výstavba bola jednoduchá, prevažovali jednovrstvové porasty (FLEISCHER, 1999). Priemerný vek porastov pred vetrovou kalamitou (v r. 2004) bol 133 rokov. Zakmenenie bolo 7 (podľa LHP).

Priemerná zásoba dreva podľa LHP bola 273 m<sup>3</sup>/ha a na celom území 130 830 m<sup>3</sup>. Podľa výsledkov z trvalých výskumných plôch (TVP) založených v identických alebo podobných pomeroch vyplýva, že zásoby boli pravdepodobne vyššie (TUROK, 1991; KORPEL, 1992; FLEISCHER, 1999) uvádzajú 280 – 673 m<sup>3</sup>/ha a bežný prírastok od 2,9 do 6,4 m<sup>3</sup>/ha. Z podkladov NLC (opakované meranie obvodov a výšok jednotlivých stromov na TVP Štart v centrálnej polohe modelového územia od r. 1999, výmera 0,25 ha) sme odvodili bežný objemový prírastok (1,5 m<sup>3</sup>/ha) s použitím regresného modelu pre horské smrečiny (MORAVČÍK *a kol.*, 2005).

Prízemná vegetácia bola nesúvislá a druhovo chudobná, tvorená typickými druhmi spoločenstva *Vacciniomyrtilli-Piceetum* (dominancia machy a *V. myrtillus*). Biomasu v tomto spoločenstve hodnotili KUBÍČEK (1992) stanovil ju 1,7 t/ha, ŠIMONOVICOVÁ *a kol.* (2011) na 0,6 až 1,1 t/ha, KRÍŽOVÁ *a kol.* (2011) na 0,5 – 2,1 t/ha. Mŕtve drevo sa priemerne v celom spoločenstve nachádzalo v objeme 20 m<sup>3</sup>/ha (FLEISCHER, 1999). Obsah uhlíka v pôdach spoločenstva LP stanovil DON *et al.* (2011). Priemernú zásobu určil na 80 – 100 t/ha a na ploche vetrovej kalamity po 3 rokoch od poškodenia nezistil významnú zmenu. V nepoškodených porastoch sme v r. 2005 – 2011 zistili priemerný opad 1,3 t/ha (ihličie, vetvičky, kôra, šišky a pod.). Rýchlosť rozkladu opadu sme otestovali pomocou plátených sáčkov s 5 g opadu, ktoré sme nechali vložené v nadložnom humuse počas vegetačného obdobia.

Zásobu a prírastok hrubiny v porastoch sme prepočítali na hmotnosť C v celkovej biomase (B) podľa vzťahu

$$B = V \cdot D \cdot BEF \cdot k_{BG} \cdot c \quad [1]$$

*V* – objem hrubiny,

*D* – hustota dreva, ihličnany 0,4 t/m<sup>3</sup> (IPCC, 2003),

*BEF* – expanzný faktor pre prepočet objemu hrubiny na nadzemnú biomasu, pre smrek a smrekovec 1,3 (IPCC, 2003),

*k<sub>BG</sub>* – koeficient pre započítanie podzemnej biomasy, pre SM a SC 1,2 (ZATLOUKAL *a kol.*, 2006 ex MAREK *et al.*, 2011),

*c* – koeficient prepočtu biomasy na uhlík, 0,5 pre SM a SC (IPCC, 2003).

Biomasu na vetrovej kalamitnej ploche sme prevzali z publikovaných prác (ŠIMONVIČOVÁ *a kol.*, 2011; KRÍŽOVÁ *a kol.*, 2011) a z vlastných odberov z plôšok 40 × 40 cm, na miestach kde sme merali NEE a ekosystémovú respiráciu Re v r. 2012. Vzorku sme sušili pri 60 °C 48 hod. Podiel C v sušine sme stanovili z hmotnosti s prepočtovým koeficientom  $k = 0,5$ . Meraním dĺžky a šírky stebiel sme stanovili asimilačnú plochu a index LAI (SANO *et al.*, 2010) pre dominantný druh *Calamagrostis villosa*.

## Toky uhlíka

Pre posúdenie bilancie C (čistej ekosystémovej výmeny NEE) v lesnom ekosystéme je potrebné poznať rozdiel medzi primárnou produkciou (NPP) a heterotrofnou respiráciou (Rh). NPP je rozdiel medzi celkovým rastlinou fixovaným C (GPP) a autotrofnou respiráciou Ra.

$$NEE = NPP - Rh = (GPP - Ra) - Rh \quad [2]$$

Priame meranie bilancie uhlíka (NEE) na úrovni dospelého porastu umožňuje len metóda eddy kovariancie. V r. 2007 – 2008 sa toto meranie pokusne realizovalo na kalamitných plochách aj v nepoškodenom poraste v spoločenstve LP pri V. Hágoch. Na úrovni nízkej vegetácie (kalamitná plocha, lesný podrast) sme meranie NEE uskutočnili v r. 2012 v transparentnej komore (plexisklo, rôzna veľkosť, najčastejšie 40 × 40 × 40 cm) s IRGA snímačom koncentrácie CO<sub>2</sub> (EGM4, PP Systems, USA) podľa všeobecne zaužívanej metodiky (napr. TAGESSON, 2006). Pokles CO<sub>2</sub> pri meraní v komore bol odrazom prevahy asimilácie uhlíka (fotosyntézy), nárast CO<sub>2</sub> indikoval prevahu celkovej ekosystémovej respirácie Re (Rh+Ra). Pre kvantifikovanie celkovej respirácie sme na identickom mieste okamžite zopakovali meranie NEE bez prístupu svetla tak, že sme zakryli komoru nepriesvitnou látkou.

Čistú primárnu produkciu (NPP) sme v lesných porastoch stanovili biometrickou metódou. Ročný objemový prírastok sme previedli na prírastok biomasy a prepočítali na zásobu uhlíka (LEHTONEN *et al.*, 2004; MAREK *a kol.*, 2011). NPP na ploche vetrovej kalamity a v podraze lesného porastu sme odvodili z hodnotenia biomasy. Na prepočet biomasy na C sme použili koeficient  $k = 0,5$  (IPCC, 2003).

Respirácii, ako kľúčovému procesu pri výmene C medzi atmosférou a biosférou (VALENTINI *et al.*, 2000) sme venovali zvýšenú pozornosť. Technické možnosti nám umožňovali priamo merať ekosystémovú respiráciu Re len na prízemnej vegetácii v podraze na kalamitných plochách. Heterotrofnú (mikrobiálnu) sme sledovali od r. 2008 na fixovaných bodoch (N = 60, n = 6 000) na ktorých sme vegetáciu pravidelne vystrihávali a tak eliminovali nielen nadzemnú, ale i podzemnú časť rastlín a teda aj autotrofnú zložku respirácie. Podrobnosti o výberom dizajne, metodike merania a výpočte pozri FLEISCHER *a kol.* (2011). Osobitne sme začali sledovať autotrofnú respiráciu (Ra) od r. 2011. V tesnej blízkosti (do 2 m) dovedy sledovaných bodov sme založili meracie plôšky kde sme do rastu vegetácie nezasahovali. Autotrofnú respiráciu nadzemnej časti stromov sme pre potreby tejto štúdie odhadli podľa publikovaných pomerov jednotlivých komponentov celkovej respirácie (BUCHMANN, 2000; MAREK *a kol.*, 2011).

Hrubá primárna produkcia (GPP) vysokých lesných porastov sa v lesnom poraste z dôvodu technického obmedzenia (potreba eddy veže s meraním tokov CO<sub>2</sub> nad úrovňou porastu) priamo nemerala. Jej veľkosť sme určili z hodnôt primárnej produkcie (NPP) pomocou koeficientu CUE, keď  $GPP = NPP/CUE$  (GIFFORD, 2003). V nízkej vegetácii podraza a na vetrovej kalamitnej ploche sme GPP odvodili z priameho merania NEE a celkovej respirácie Re podľa vzťahu [2]. Výsledky slúžili na verifikáciu, resp. doplnenie údajov v bilančnej rovnici. Podľa AMIRA *et al.* (2010) je podiel GPP/Re ukazovateľom miery narušenia ekosystému disturbanciou.

Až z takto odvodených a overených hodnôt primárnej produkcie NPP a heterotrofnej respirácie Rh je možné posúdiť celkovú bilanciu, teda či ekosystém je zdrojom, alebo depóniom uhlíka.

## Mikroklimatické merania

Fotosyntéza aj respirácia závisia od mnohých faktorov. Za najvýznamnejšie sa v lesných ekosystémoch mierneho pásma považuje teplota a vlhkosť vzduchu, pôdy, slnečné žiarenie, PAR, druh, biomasa a listová plocha vegetácie. Uvedené údaje (okrem biomasy a LAI) boli zaznamenané pri každom meraní tokov C - CO<sub>2</sub>. Na sledovaných plochách (zelený les, suchý les, kalamitná plocha) boli všetky mikrometeorologické údaje zaznamenávané automatickými stanicami ako 60 min. priemery (podrobnejšie FLEISCHER, 2011). Z nameraných hodnôt GPP a Re a vybraných faktorov (teplota vzduchu, teplota a vlhkosť pôdy, PAR žiarenie, LAI) sme odvodili regresné

rovnice a výslednú asimiláciu a respiráciu sme extrapolovali a spočítali na celé vegetačné obdobie (TAGESSON, 2006).

## Výsledky a diskusia

### Zásoby uhlíka a čistá primárna produkcia NEP

Z leteckých ortofotomáp sme stanovili jednotlivé kategórie stavu lesa v modelovom území. Z pôvodne 471 ha živého lesa bolo v r. 2012 len 83 ha (18 %). Vetrová kalamita postihla 112 ha (23 %) a hmyz poškodil 276 ha (59 %).

Biomasa C v stromovej vegetácii pred r. 2004 sme v modelovom území stanovili na 67 353 tC (143 tC/ha). Na základe bežného prírastku na trvalých výskumných plochách (rozpätie 1,5–5,7 m<sup>3</sup>/ha) sme stanovili priemer pre modelové porasty 5,4 m<sup>3</sup>/ha. NPP sme pre stromovú vegetáciu odvodili pre „normálne“ a „extrémne“ stanovišťa s hodnotou 1,4 a 1,8 tC/ha, priemerne 1,7 tC/ha, keď sme podiel extrémnych stanovišť odhadli na 20 %. Oproti údajom zo smrekových lesov mierneho pásma ide o veľmi nízke hodnoty. Napr. pre európske lesy uvádza NABUURUS & SCHELHAAS (2002) 4,4 tC, vo Švajčiarsku ETZOLD *et al.* (2011) uvádza 4,5 až 7,6. V ČR MAREK *a kol.* (2001) až 7,8 tC/ha. Podobné hodnoty NPP zodpovedajú smrekovým boreálnym lesom. OWEN *et al.* (2007) uvádza 2,8 tC/ha, HERMLE *et al.* (2010) 3 t/ha a SANO *et al.* (2010) v smrekovcových lesoch na Hokkaide 1,6 tC/ha. Dôvodom pre tak nízky NPP v modelovom území bude pravdepodobne pôdne prostredie (podzolový ranker), vek porastov (>130 rokov) a vysoká defoliácia ako odraz dlhodobého pôsobenia imisii na tatranské lesy.

NPP stromovej zložky v hmyzom zničených porastoch sa logicky netvorí. Podiel podrastu na tvorbe celkovej primárnej produkcie (NPP) je v prvých fázach náhleho rozpadu hlavnej úrovne porastu nevýznamný. Na miestach kde bol pred poškodením menší zápoj, prízemná vegetácia zvyšuje prírastok. Ale v porastoch kde pred poškodením bol zápoj súvislý, reaguje prízemná vegetácia (machy, *Vaccinium myrtillus*) na náhle odclonenie opačne, znížením pokrývnosti a vitality. Potvrdzujú to napr. aj výsledky autorov ŠOLTĚS *a kol.* (2006), ŠIMONVIČOVÁ *a kol.* (2011). Podľa výsledkov primárnej produkcie v tomto spoločenstve (ŠIMONVIČOVÁ *a kol.*, 2011; KRÍŽOVÁ *a kol.*, 2011) odvodzujeme NPP prízemnej vegetácie na 0,6 tC/ha, čo pri 50 % pokrývnosti zodpovedá 0,3 tC/ha. Do kalkulácie akceptujeme 0,6 t vzhľadom na chýbajúce odhady biomasy a zásob C v machoch, lišajníkoch a mykoríznych hubách.

Biomasa sušiny sa na vetrovej kalamitnej ploche pohybuje od 3,4 t na plytkých a skeletnatých lokalitách, až do 10 t/ha na vlhších, hlinitých a hlbších pôdach. Biomasa v tomto prípade zodpovedá NPP a mala hodnotu od 1,7 po 5 tC, priemerne 3,4 tC/ha.

Priemernú zásobu C v mŕtvom dreve sme pred kalamitami v porastoch LP stanovili na 6 t/ha a v modelovom území predpokladáme pred poškodením zásobu 2 826 tC nekromasy.

Uhlíkové zásoby v pôde stanovil DON *et al.* (2012), priemerná zásoba v nadložnom humuse a v A horizonte bola 80 – 100 tC/ha. Je to o 25 % viac ako je priemer v európskych lesoch (BRUNNER & GEDBOLD ex KONÓPKA, 2007). V čase hodnotenia (2007 – 2008) autor nezistil rozdiel medzi nepoškodeným porastom a kalamitnou plochou. Ročný nárast obsahu C v minerálnej vrstve pôdy stanovil na 2 t/ha. Pomocou opadomerov ( $r = 0,4$  m,  $n = 14$ ) sme v r. 2006 – 2011 zistili, že do pôdy nepoškodeného porastu s 20 % zastúpením smrekovca ročne vstupuje 0,6 tC vo forme opadu. Intenzitu rozkladu sme stanovili na 0,5 keď sa počas vegetačnej sezóny (máj – september) rozložila priemerne polovica 5 g vzorky ihličia uloženej v nadložnom humuse. Predpokladáme, že rovnaké množstvo C vstupuje do pôdy aj z odumretých koreňov (YUROVA & LANKREIJER, 2007).

Spolu bolo v modelovom území pred kalamitami 108 800 tC vo vegetácii a 231 tC v pôde. Zásoba v dreve sa znížila o uhlík vo vyvezenom dreve zo 75 ha vetrovej kalamity vo východnej časti modelového územia. Vo vyvezenej hrubine predpokladáme obsah C 1,1 t/ha, spolu 83 tC. Strata C vyplavovaním vo forme rozpustného uhlíka (DOC) sa nepotvrdila (DON *et al.*, 2012).

### Respirácia

Celkovú respiráciu sme merali len na prízemnej vegetácii. Približne na polovici meraných bodov sme vegetáciu pravidelne odstraňovali s cieľom oddeliť autotrofnú Ra a heterotrofnú Rh zložku respirácie. Rozdiely boli minimálne, čo potvrdzuje zanedbateľný podiel autotrofnej zložky prízemnej vegetácie na celkovej respirácii na hodnotených lokalitách. V živom lese sme merali len pôdnu respiráciu (SR, ako sumu heterotrofnej a koreňovej zložky autotrofnej respirácie) a tú sme použili aj pre odhad respirácie kmeňov a korún stromov podľa publiko-

vaných vzťahov (REICH & SCHLESINGER, 1992; BUCHMANN, 2000). Extrapoláciu na vegetačné obdobie sme urobili z regresnej rovnice pre pôdnu respiráciu, teplotu a vlhkosť pôdy:

$$SR = (a \cdot s_m) e^{bT} \quad [3]$$

$SR$  – pôdna respirácia,  
 $a, b$  – parametre,  
 $s_m$  – pôdna vlhkosť,  
 $T$  – teplota pôdy.

Za vegetačné obdobie pôdna respirácia v nepoškodenom lese mala hodnotu 6 tC/ha.

Na ploche vetrovej kalamity sme merali pôdnu respiráciu ( $SR$ ) od r. 2008 a v r. 2012 aj celkovú ( $Re$ ). Extrapoláciou hodnôt z regresnej rovnice pre konkrétne teploty a vlhkosť pôdy sme odvodili celkovú respiráciu  $Re$  vo vegetačnom období na 5,4 tC/ha.

V suchých, hmyzom poškodených porastoch bola priemerná respirácia (2011 – 2012) 0,4 gC/m<sup>2</sup>/hod. Z regresnej rovnice pre pôdnu respiráciu a pôdnu teplotu [4] (FANG & MONCRIEF, 2001) sme pre vegetačné obdobie odvodili emisiu 10tC/ha. Determinácia ( $R^2=0,7, p<0,05$ ) bola oveľa vyššia ako pri použití rovnice s pôdnou teplotou a vlhkosťou [3].

$$SR = ae^{b \cdot T} \quad [4]$$

$SR$  – pôdna respirácia,  
 $a, b$  – parametre,  
 $T$  – teplota pôdy.

## Hrubá primárna produkcia GPP a čistá ekosystémová výmena NEE

V živých lesných porastoch sme GPP odvodili z NPP podľa kvocientu CUE, ktorý pre smrekové lesy mierneho pásma má hodnotu 0,47 (tab. 1).

V podraсте živého lesa, v suchom lese a na kalamitných plochách sme GPP získali súčtom z priamo nameraných hodnôt NEE a  $Re$ . Extrapoláciu na vegetačné obdobie sme urobili na základe riešenia regresných rovníc GPP - teplota vzduchu (Arrheniusova rovnica, TAGESSON, 2006), GPP - PAR (Michalies-Mentenova rovnica, BYRNE *et al.*, 2005). LAI mal priemernú hodnotu 1,17 m<sup>2</sup>/m<sup>2</sup>. Regresné rovnice mali tvar:

$$GPP = GPP_0 + b_1 AT + b_2 AT^2 + b_3 AT^3 \quad [5]$$

$GPP_0$  – GPP pri teplote 0 °C,  
 $ATa$  – okamžitá teplota vzduchu,

$$GPP = a_1 \left( \frac{PAR}{a_2 + PAR} \right) \left( \frac{LAI}{a_3 + LAI} \right) \quad [6]$$

$b_1 - b_3$  – parametre.  
 $PAR$  – fotosynteticky aktívne žiarenie,  
 $LAI$  – index listovej plochy,  
 $a_1 - a_3$  – parametre.

Výsledná hodnota GPP 3,0 až 7,0 tC/ha podľa [5], resp. [6], priemerne 5,0 tC/ha (tab. 1) je v zhode s hodnotou odvodenou s kvocientom CUE (3,6 – 10,6 tC/ha).

Pomer GPP/ $Re$  je považovaný za indikátor narušenia ekosystému disturbanciami (AMIRO *et al.*, 2010). Na ploche vetrovej kalamity nadobúdal hodnotu 0,9; v suchom, lykožrútvou zničenom poraste 0,1 a v lesnom poraste 0,7. Hodnota v poraste je len odhadnutá,  $Re$  sa z dôvodu technického vybavenia zatiaľ priamo nemerala. Za prejav disturbancie sa považujú hodnoty pod 1,2. Hodnoty nad 1,2 sú indikátorom regenerácie poškodeného ekosystému.

## Heterotrofná respirácia Rh

Pre odvodenie C bilancie (NEE) je okrem NPP potrebné poznať heterotrofnú zložku Re (2). V živom lese sme ju odhadli na 70 % z pôdnej respirácie (BUCHMANN, 2000). Výsledné hodnoty (tab. 1) zodpovedajú publikovaným údajom pre lesy mierneho pásma (MAREK *a kol.*, 2011). Na kalamitnej ploche, na základe minimálnych rozdielov pri meraní respirácie celých rastlín a holých plôch, predpokladáme 90 % podiel Rh z Re. V suchých porastoch Rh zodpovedá Re.

Tabuľka 1. Charakteristika zásob a tokov uhlíka v modelovom území: a) zelený porast, b) s kalamitami

Kategória	a)						b)					
	Plocha [ha]	Zásoba tC/ha spolu	GPP tC/ha spolu	NPP tC/ha spolu	Rh tC/ha	NEE tC/ha spolu	Plocha [ha]	Zásoba tC/ha spolu	GPP t/Cha spolu	NPP tC/ha spolu	Rh tC/ha spolu	NEE tC/ha spolu
Porast nepoškodený („zelený“ les)	471	150 70 650	4,4 2 063	2,1 989	4,2 1978	-2,1 -989	83	150 12 450	4,4 365	2,1 174	4,2 349	-2,1 -175
Vetrová kalamita	—	—	—	—	—	—	112	143 16 016	5 560	3,4 381	4,9 549	-1,5 -168
Hmyzia kalamita	—	—	—	—	—	—	276	143 39 468	1,3 359	0,6 166	10,0 2 760	-9,4 -2 594
Pôda	471	81 38 151	—	—	—	—	471	81 38 151	—	—	—	—
Ťažba	—	—	—	—	—	—	75	-83	—	—	—	—
Spolu	471	231 108 801	—	—	—	-2,1 -989	471	—	—	—	—	-6,2 -2 937

Z výsledkov bilancie C v modelovom území vyplýva, že tieto lesné ekosystémy boli zdrojom uhlíka ešte pred kalamitným poškodením, keď priemerne emitovali 2,1 tC/ha za vegetačné obdobie (tab. 1). Výsledky výskumov zo stredo európskych smrekových lesov väčšinou potvrdzujú kladnú bilanciu (NABUURUS *et* SCHELHAAS, 2002, MAREK *a kol.* 2011). Podobnú hodnotu (-2,4 tC/ha) zo smrekových lesov v Kanade uvádza HERMLE *et al.* (2010). V našom prípade bola dôvodom zápornej bilancie nízka produktivita smrekovcových smrečín (bežný prírastok priemerne 5 m<sup>3</sup>/ha) na chudobných, kyslých a plytkých pôdach. Okrem toho relatívne vysoký vek, jednovrstvová výstavba porastov, vysoká defoliácia spôsobená dlhodobým vplyvom imisíi spôsobili ďalšie obmedzenie primárnej produkcie.

Po poškodení kalamitami sa emisia uhlíka zvýšila a záporná bilancia stúpla z 989 na 2 937 tC, priemerne z 2,1 na 6,2 tC/ha. Najmä v porastoch napadnutých podkôrnym hmyzom sa v dôsledku opadu ihličia a kôry zvýšil podiel rýchlo rozložiteľného zdroja C, čo sa odrazilo na vysokej mikrobiálnej (heterotrofnej) respirácii Rh. Vysokú emisiu uhlíka z pôdy podmienil aj prirodzene vysoký obsah C v hrubej vrstve nadložného humusu, ktorý po náhlom otvorení porastového zápoja začal mineralizovať. Vysoké teploty a dostatočné zrážky v posledných vegetačných obdobiach tento proces ešte zintenzívnili.

Nárast pôdnej respirácie, pokles sekvestračnej funkcie lesov a zhoršovanie uhlíkovej bilancie je považovaný za jeden z kľúčových ekologických problémov v chladnejších oblastiach mierneho, ale najmä boreálneho pásma (GRACE & RAYMENT, 2000) s nejasnou dĺžkou trvania.

## Záver

Nato, aby sa hodnotené, v súčasnosti ešte zelené porasty (za predpokladu nemennej heterotrofnej respirácie) stali depóniou uhlíka, je potrebný nárast NPP o 2,1 tC, t. j. na 4,2 tC ročne. Tomu zodpovedá ročný prírastok hrubiny asi 12 m<sup>3</sup>/ha. V horských smrečínach môžeme takýto prírastok očakávať len na najlepších bonitách, aj to len v čase jeho kulminácie (30 – 50 r). To ale neznamená, že by zdravé, alebo aspoň zelené, porasty na nízko produktívnych stanovištiach a vo vyššom veku nemali význam pri sekvestracii uhlíka. Emisiu uhlíka z pôdy stimuluje teplota a tá je pod korunami porastu podstatne nižšia ako na otvorených plochách. Vysoký obsah C v nadložnom humuse i minerálnych pôdnych horizontoch je potenciálnym zdrojom ďalšieho zvyšovania emisie C z týchto spoločenstiev za podmienok zvýšenej mineralizácie pri rozpade korunového zápoja.

Na plochách s vetrovou kalamitou, najmä na živnejších a produkčnejších podsvahových lokalitách, je predpoklad dosiahnutia kladnej bilancie uhlíka vyšší. Už dnes je sukcesná vegetácia pomerne mohutná a s rozvojom

stromovej vegetácie tzv. prípravných i cieľových drevín je „prelomová“ produkciu 12 m<sup>3</sup>/ha reálna v priebehu 15 rokov.

Pri interpretácii výsledkov bilancie uhlíka získaných v modelom území je nutné zohľadniť ich väzbu na konkrétne lokality, najmä veľkú časovú a priestorovú variabilitu tokov C, najmä respirácie. Ďalší výskum sekvestrácie uhlíka v lesných ekosystémoch by sa mal o.i. venovať aj interakciám rastúcej teploty a respirácie, fyziologického stavu porastov a procesom v pôde. **Efektívnosť výskumu by zvýšilo uplatnenie metód prinášajúcich informácie z väčšieho územia, rýchlejšie a presnejšie (eddy kovariancia, distančné metódy, laserové skenovanie terénu, skenovanie biomasy a listovej plochy vegetácie a pod).**

## Literatúra

- AMIRO, B.D. *et al.*, 2010: Ecosystem CO<sub>2</sub> fluxes after disturbances in forests of North America. *Journal of Geophysical Research*, vol. 115, p. 1-13.
- BALDOCCHI, D., 2008: Breathing of the terrestrial biosphere: lessons learned from a global network of CO<sub>2</sub> flux measurement systems. *Australian Journal of Botany*, 56: 1-26.
- BUCHMANN, N., 2000: Biotic and abiotic factors controlling soil respiration rates in *Picea abies* stands. *Soil Biology and Biochemistry*, 32: 1625-1635.
- BYRNE, K.A. *et al.*, 2005: CO<sub>2</sub> fluxes in adjacent new and permanent temperate grasslands. *Agri. and Forest Met.*, 135, 82-92.
- CLARK, D. *et al.*, 2001: Measuring net primary production in forests: Concepts and field methods. *Aceological Applications*, 1, p. 356-370.
- ETZOLD, S., *et al.*, 2011: The Carbon balance of two contrasting mountain forest ecosystems in Switzerland: Similar annual trends but seasonal differences. *Ecosystems*, 14: 1289-1309.
- FANG, C., MONCRIEF, J.B., 2001: The dependence of soil CO<sub>2</sub> efflux on temperature. *Soil Biology and Biochemistry*, 33: 155-165.
- FLEISCHER, P., 1999: Súčasný stav lesa v TANAP-e ako východisko pre hodnotenie ekologickej stability na príklade spoločenstva smrekovcových smrečín. Dizertačná práca. TU Zvolen, VSaM TANAP, Tatranská Lomnica, 105 s.
- FLEISCHER, P., 2011: Pokalamitný výskum vo Vysokých Tatrách: ciele, metódy a charakteristika lokalít. *Štúdie o TANAP*, 10(43): 7-12.
- FLEISCHER, P., HOMOLOVÁ, Z., 2011: Dlhodobý výskum ekologických pomerov v spoločenstve smrekovcových smrečín vo Vysokých Tatrách po prírodných disturbanciách. *Lesnícky časopis - Forestry Journal*, 57(4): 237-250.
- FLEISCHER, P., FLEISCHER, P. ml., MEZEIOVÁ, N., 2011: Pôdna respirácia lesných ekosystémov po vetrovej kalamite vo Vysokých Tatrách. *Štúdie o TANAP*, 10(43): 61-75.
- GRACE, J., RAYMENT, M., 2000: Respiration in balance. *Nature*, 404, 819-820.
- HASENAUER, H. *et al.*, 2012: Reconciling satellite with ground data to estimate forest productivity at national scales. *Forest Ecology and Management*, 276: 196-208.
- HERMLE, S. *et al.*, 2010: Component respiration, ecosystem respiration and net primary production of a mature black spruce forest in northern Quebec. *Tree Physiology*, 30: 527-540.
- HLÁSNY, T. *et al.*, 2011: Climate change impacts on growth and carbon balance of forests in Central Europe. *Climate Research*, vol. 47: 219-236.
- KONČEK, M. *a kol.*, 1974: Klíma Tatier. Bratislava: Veda.
- KONÓPKA, B., 2007: Význam lesných ekosystémov pre fixáciu a obeh uhlíka. *Lesnícky časopis-Forestry Journal*, 53(4): 347-355.
- KORPEL, Š., 1992: Dynamické zmeny štruktúry, vývoj a produkčné pomery prírodných lesov pri hornej hranici lesa vo V. Tatrách. *Osveta. Zborník prác o TANAP*, š. 32, s. 245-272.
- KRIŽOVÁ, E., CHOVANOVÁ, G., HOMOLOVÁ, Z., 2011: Produkcia biomasy a konkurenčné vzťahy vybraných druhov na kalamitných plochách vo Vysokých Tatrách. *Štúdie o TANAP*, 10(43): 157-168.
- KUBÍČEK, F. *et al.*, 1992: Produkčno-ekologická a fytoecologická charakteristika bylinnej vrstvy lesných ekosystémov troch tatranských dolín. *Osveta. Zborník prác o TANAP*, č. 32, s. 245-305.

- KURZ, W. A. *et al.*, 2008: Mountain pine beetle and forest carbon feedback to climate change. *Nature*, 452, p. 987-990.
- LEHTONEN, A. *et al.*, 2004: Biomass expansion factors for scots pine, Norway spruce and birch according to stand age for boreal forest. *Forest Ecology and Management*, 188: 211-224.
- LINDROTH, A. *et al.*, 2009: Storms can cause Europe-wide reduction in forest carbon sink. *Global Change Biology*, 15: 346-355.
- MAREK, M. *a kol.*, 2011: Uhlík v ekosystémech ČR v měnícím se klimatu. Praha: Academia, 253 s.
- MORAVČÍK, M. *a kol.*, 2005: Zásady a postupy hospodárskej úpravy a obhospodarovania horských lesov smrekového vegetačného stupňa. Zvolen: NLC, Lesnícke štúdie, č. 58, 143 s.
- NABUURUS, G.J. & SCHELHAAS, M.J., 2002: Carbon profiles of typical forest types across Europe assessed with CO2FIX. *Ecological Indicators* 1, 213-223.
- OWEN, K. *et al.*, 2007: Linking flux network measurements to continental scale simulations. *Global change Biology*, 13: 734-760.
- PERCEY, K.E. *et al.*, 2003: The role of forest in carbon cycles, sequestration and storage. IUFRO Newsletter, no. 1 pp.
- REICH, J.W. & SCHLESINGER, W.H., 1992: The global CO<sub>2</sub> flux in soil respiration and its relationship to vegetation and climate. *Tellus* 44B, 81-99.
- SANO, T. *et al.*, 2010: CO<sub>2</sub> exchange of a larch forest after a typhoon disturbance. *Forest Ecology and Management*, 260: 2214-2223.
- ŠIMONVIČOVÁ, A., HANAJÍK, P., VYKOUKALOVÁ, I., 2011: Zmeny pôdnych vlastností vo vzťahu ku pôdnej mikrobiote a rastlinnému spoločenstvu na kalamitných plochách vo Vysokých Tatrách. Štúdie o TANAP, 10(43): 51-59.
- ŠOLTÉS, R. *et al.*, 2006: Pokalamitný vývoj vegetácie. CD zborník zo seminára 1. Pokalamitný výskum. Tatranská Lomnica, PP prezentácia.
- TAGESSON, T., 2006: Calibration and analysis of soil C efflux estimates with closed chambers at Forsmark and Laxemar. Lund University, 36 pp.
- TUROK, J., 1991: Vývoj, štruktúra a regenerácia prírodných lesov jarabinových smrečín. Osveta. Zborník prác o TANAP, č. 31, s. 119-159.
- VALENTINI, R. *et al.*, 2000: Respiration as the main determinant of carbon balance in European forest. *Nature*, 404, p. 861-865.
- YUROVA, A., & LANKREIJER, H., 2007: Carbon storage in organic layers of boreal forest soils under various moisture conditions: A model study for Northern Sweden. *Ecological modeling*, 204: 475-484.
- YUSTE, J.C. *et al.*, 2005: Contrasting net primary productivity and carbon distribution between neighboring stands of *Q. rubur* and *P. sylvestris*. *Tree Physiology* 25, 701-712.

---

**Ing. Peter Fleischer, PhD.**

Štátne lesy TANAP-u, Tatranská Lomnica, SK – 059 60 Vysoké Tatry, e-mail: [pfleischer@lesytanap.sk](mailto:pfleischer@lesytanap.sk)