



SEKVESTRÁCIA UHLÍKA V DIFERENCOVANE MANAŽOVANÝCH SMREKOVÝCH PORASTOCH 20 ROKOV PO VÍCHRICI ALŽBETA VO VYSOKÝCH TATRÁCH

Peter Fleischer ml. ▪ Peter Fleischer st.

Fleischer, P. ml., Fleischer, P. st.: Carbon sequestration in differently managed spruce forests 20 years after the Alžbeta windstorm in the High Tatras. APOL, 2024, vol. 5, no. 1, p. 49–53.

Abstract: Carbon sequestration in vegetation and soil is becoming one of the key ecosystem services of forests under the onset of climate change. However, the increasing frequency, intensity, and consequences of natural disturbances are altering the carbon income and expenditure balance in forest ecosystems such that many are shifting from being carbon sinks to carbon sources. The return to pre-disturbance conditions depends on the type of ecosystem, the nature and intensity of damage, as well as subsequent forestry management. We have been monitoring the carbon balance in spruce ecosystems in the High Tatras since their extensive damage by the windstorm Alžbeta in 2004. Results confirm that after 20 years, the damaged ecosystems have become carbon depositories. Currently, the differences in carbon balance between stands with differentiated post-disturbance management are minimal. This is due to the very similar nature of site conditions, as well as the nature-close management of the managed stands.

Key words: gross primary production; ecosystem respiration; carbon balance; eddy covariance; spruce forests; High Tatras; no-intervention regime

Sekvestrácia uhlíka ako bilancia medzi jeho príjmom a výdajom ekosystémom

Na globálnej úrovni je bilancia príjmu a výdaja uhlíka (C) z prírodných procesov dlhodobo vyrovnaná. Antropogénne emisie C, najmä vo forme oxidu uhličitého (CO₂) túto prirodzenú rovnováhu narušujú a sú považované za rozhodujúcu príčinu súčasnej klimateckej zmeny. Jedným z najefektívnejších spôsobov na redukcii atmosférického CO₂ je fixovanie uhlíka v biosfére, pričom mimoriadny význam majú lesné ekosystémy, keď v súčasnosti je v nich uložená takmer polovica terestrického uhlíka. Lesné ekosystémy majú vzhľadom na dlhovekosť lesnej vegetácie potenciál viazať uhlík v biomase desiatky až stovky rokov a v pôde ešte dlhšie. Na vyjadrenie schopnosti ekosystémov viazať uhlík sa používa pojem sekvestrácia. Jeho obsah je však v populárnej, ale aj odbornej literatúre, často rozdielne interpretovaný. V našom príspevku týmto termínom označujeme reálne fixovaný C v lesnom ekosystéme, teda rozdiel v jeho príjme a výdaji za časové obdobie jedného roka. Takto interpretovaná bilancia príjmu (fotosyntéza alebo hrubá primárna produkcia, angl. skratka GPP) a výdaja (ekosystémová respirácia, ang. skratka ER) sa v literatúre používa termín čistá ekosystémová produkcia (ang. skratka NEP). Ak lesný ekosystém viac uhlíka viaže (GPP > RE), potom prispieva ku mitigácii klimateckej zmeny.

Schopnosť lesných ekosystémov viazať C závisí nielen od typu biómu, ale aj od konkrétnych stanovištných, najmä klimateckých a pôdnych podmienok, druhového zloženia vegetácie, jej veku, pokrývnosti, prirodzenosti, ale aj zdravotného stavu a spôsobu manažmentu. Lesy mierneho pásma sú v súčasnosti považované za významné depónium uhlíka. To znamená, že viac C prijímajú v procese fotosyntézy, ako emitujú v procese respirácie.

Toky uhlíka v lesnom ekosystéme po kalamitnom poškodení

Poškodenie lesných porastov takmer okamžite mení lesy na zdroj uhlíka. Redukcia asimilačného aparátu v dôsledku účinku abiotických alebo biotických faktorov vedie ku poklesu príjmu C fotosyntézou. Naopak, v odkrytej pôde, zvýšená teplota a vlhkosť podporuje rozvoj mikrobiálnych procesov a nárast emisie C z pôdy. Dôsledkom je nepriaznivá bilancia poškodeného ekosystému. Post-disturbančný vývoj v priaznivých klimatických podmienkach a pri úspešnej obnove môže zabezpečiť, že sukcesná vegetácia dokáže sekvestrovať porovnateľné množstvo C ako lesy pred poškodením už za 20 rokov od poškodenia. Klimatickou zmenou intenzifikovaný rozsah poškodenia lesov víchricami, požiarimi, suchom alebo hmyzom, môže procesy obnovy spomaľovať a akcelerovať rast koncentrácie skleníkových plynov v atmosfére.

Medzi lesy najviac ohrozené klimatickou zmenou patria smrekové porasty. Tatranské horské lesy sú v prevažnej miere tvorené smrekovými porastami, ktoré v posledných dekádach boli silne poškodené prírodnými disturbanciami (víchrice, podkórny hmyz, požiare). Na rozdiel od tradičného postupu spracovania kalamít v hospodárskych lesoch s nižšími stupňami ochrany prírody (SOP), boli postihnuté porasty v TANAP-e manažované prírodou blízokým spôsobom. Okrem iného, bolo značná časť poškodenej drevnej hmoty (10 – 30 %) ponechaná v porastoch, pri zakladaní nových porastov sa uprednostnilo alebo minimálne kombinovalo, prirodzené zmladenie, vrátane tzv. pionierskych drevín s dlhovekými drevinami. V porastoch s najvyšším stupňom ochrany neboli vykonávané žiadne lesnícke činnosti a bolo ponechané 100 % kalamitnej drevnej hmoty.

Cieľom nášho príspevku je zhrnúť doterajšie poznatky zo sledovania sekvestrácie uhlíka v smrekových lesoch TANAP-u po veľkoplošnom rozvrate vetrovou disturbanciou a vplyve lesníckeho manažmentu počas 20 rokov od ich poškodenia.

Kvantifikácia príjmu a výdaja uhlíka

Dôsledky vetrovej kalamity z roku 2004 na bilanciu uhlíka sme sledovali na trvalých výskumných plochách, založených Výskumnou stanicou TANAP-u na sledovanie vplyvu rozdielneho spôsobu pokalamitného manažmentu (tradičný versus bezzásahový prístup). Referenciou pre hodnotenie zmien bol stav v relatívne nepoškodených porastoch.

Na hodnotenie bilancie uhlíka sme použili mikroklimatickú metódu vírivej kovariancie, (angl. eddy covariance, EC). základom je stanovenie koncentrácie CO₂, smeru a rýchlosti prúdenia vzduchu nad lesným porastom. Hodnota koncentrácia CO₂ vyjadruje okamžitý rozdiel medzi príjmom z atmosféry (GPP) a výdajom (RE) zo sledovaného ekosystému. Prúdenie vzduchu zas indikuje či pokles koncentrácie CO₂ je zhodný s prúdením do ekosystému (fotosyntéza) a nárast koncentrácie CO₂ s prúdením do atmosféry (respirácia). Nutnou podmienkou je synchrónne, vysokorýchlostné meranie (10 až 20× za sekundu) koncentrácie CO₂ a rýchlosti/smeru prúdenia vzduchu. Pre hodnotene bilancie na ploche s výmerou desiatok až stoviek árov je potrebné, aby snímače boli minimálne 5 m nad povrchom vegetácie.

Prvé meranie bilancie CO₂ sa uskutočnili vo víchricou rozvrátených i nepoškodených porastoch v r. 2006 – 2008. Od roku 2018 pokračujeme s meraním bilancie na identických plochách v manažovaných (EXT) a na samovývoj (NEX) ponechaných porastoch. Používame komerčný systém na eddy kovarianciu Licor 7500 DS s diferenciálnym analyzátorom CO₂/H₂O a ultrazvukovým 3D snímačom rýchlosti a smeru prúdenia vzduchu. Súčasne s meraním tokov CO₂ sme zaznamenávali 30 min priemerné hodnoty mikroklimatických podmienok (globálne a fotosynteticky aktívne žiarenie, NET bilanciu žiarenia, teplotu a vlhkosť vzduchu v 2 a 4 m, teplotu a vlhkosť pôdy v 8, 16 a 32 cm, tok tepla do pôdy, zrážky).

Sekvestrácia C v nepoškodených dospelých smrekových porastoch vo Vysokých Tatrách

Pre posúdenie bilancie uhlíka v referenčných, v tom čase nepoškodených porastoch, ktoré do istej miery reprezentujú stav smrekových lesov pred veľkoplošným rozvratom, bola na jeseň 2005 postavená 35 m veža s meraním tokov metódou EC na lokalite Smrekovec pri Vyšných Hágoch. Priemerné hodnoty bilancie uhlíka (NEP) a jednotlivých tokov (GPP a ER) v rokoch 2005 – 2007 uvádzame v tab. 1.

Bilancia v referenčných, nepoškodených porastoch, bola na úrovni $-6,2 \text{ t C ha}^{-1} \text{ rok}^{-1}$. Záporná hodnota NEP indikuje, že hodnotené porasty boli v tom čase významným depóniom uhlíka. Nepochybne k tomu prispievala aj výrazná veková a priestorová rozrôznosť, typická pre porasty v spoločenstve *Lariceto-Piceetum*.

Tabuľka 1. Bilancia C (NEP), príjem fotosyntézou (GPP) a celková respirácia (ER) v r. 2006–2008 na nepoškodenej, referenčnej lokalite REF, v $\text{t C ha}^{-1} \text{ rok}^{-1}$

Table 1. C balance (NEP), photosynthesis intake (GPP), and total respiration (ER) in 2006–2008 at the undamaged, reference site REF, in $\text{t C ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$

lokality	NEP	GPP	ER
REF	-6,20	10,89	4,69

Sekvestrácia C v poškodených diferencovane manažovaných porastoch bezprostredne po víchrici Alžbeta

Bilanciu príjmu a výdaja C sme sledovali v r. 2006–2008 s identickými zariadeniami pre EC v spracovaných porastoch (EXT, pri Vyšných Hágoch) a v bezzásahových, na prirodzený vývoj ponechaných porastoch (NEX, pri Tatranskej Lomnici). Merania na 5–7 m vysokých stožiaroch reprezentovali bilanciu CO_2 na výmere desiatok ha. Výsledky potvrdili predpokladanú negatívnu bilanciu, teda porasty viac C emitovali ako prijímali. Príčinou nepriaznivej bilancie CO_2 ($\text{GPP} < \text{ER}$) na kalamitných plochách 2 až 4 roky po disturbancii bol jednak pokles GPP v dôsledku poškodenia asimilačných orgánov a súčasne nárast heterotrofnej zložky pôdnej respirácie. V odkrytej pôde stúpila teplota aj vlhkosť, čo stimulovalo mikrobiálnu aktivitu a emisiu CO_2 . Mierne priaznivejšia bola bilancia na ploche EXT, ktorá bola v minulosti obhospodarovaná tak, aby sa zvýšilo zastúpenie drevín v spodnej vrstve. Napriek totálnemu vyvráteniu a polámaniu porastov ostala časť nižších a mladších stromov životaschopná a do istej miery spolu s trávno-bylinným podrastom kompenzovala asimiláciu pôvodného dospelého lesa. Na lokalite NEX sa výchova porastov v minulosti realizovala v oveľa menšej miere a dôsledkom boli druho-, výškovo a vekovo rovnorodé porasty s minimálnym trávno-bylinným podrastom, čo sa odrazilo v nízkej fotosyntéze. Zvýšenú respiráciu sme zaznamenali na ploche EXT, kde v dôsledku spracovania dreva bol povrch viac narušený, čo zrýchliло dekompozičné procesy a emisiu CO_2 .

Bilanciu C sme po ukončení EC meraní sledovali komorovými metódami, ktoré sú mimoriadne náročné na techniku a rozsah manuálnych meraní jednotlivých tokov. Rozdiely v bilancii oboch lokalít sa postupne vyrovnávali, k čomu výrazne prispieval intenzívny rozvoj sukcesnej, najmä trávovitej vegetácie. Po prvých prerezávkach a vyžínaní konkurenčnej vegetácie, sme mierne priaznivejšiu bilanciu začali zaznamenávať na ploche NEX s vyššou listovou plochou a vyššou fotosyntézou. Napríklad, desať rokov po poškodení, bol index listovej plochy (LAI) na lokalite NEX 4,4 a na lokalite EXT 3,8. O bilancii CO_2 takmer po celý čas sledovania tokov s komorovými metódami rozhodovala príjmová časť, fotosyntéza, nakoľko výdajová zložka, najmä jej hlavná časť – pôdna respirácia, bola na sledovaných lokalitách takmer identická. V zásade, po 10 rokoch od poškodenia, sa sledované ekosystémy EXT a NEX, počas vegetačného obdobia stali depóniom uhlíka, ale pri extrapolácii na celý rok, fungovali ešte ako jeho zdroj.

Tabuľka 2. Bilancia C (NEP), príjem fotosyntézou (GPP) a celková respirácia (ER) v r. 2006–2008 na sledovaných kalamitných lokalitách EXT a NEX, v $\text{t C ha}^{-1} \text{ rok}^{-1}$

Table 2. C balance (NEP), photosynthesis intake (GPP), and total respiration (ER) in 2006–2008 at the monitored disaster sites EXT and NEX, in $\text{t C ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$

lokality	NEP	GPP	ER
EXT	3,06	6,31	9,37
NEX	4,22	2,56	6,78

Sekvestrácia uhlíka 20 rokov od poškodenia

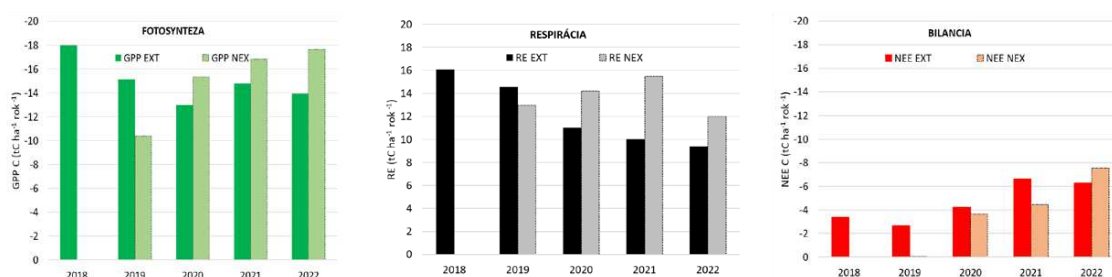
Sledovanie bilancie CO_2 metódou EC sa vo vetrom poškodených porastoch obnovilo v roku 2018 (EXT) a 2019 (NEX). Meracie zariadenia boli umiestnené na rovnakom mieste ako to bolo v r. 2006–2008. Vzhľadom na výšku vegetácie, ktorá v tom čase už dosahovala v priemere 5 m, boli snímače umiestnené na 12 m stožiaroch. Plocha reálne meranej bilancie (footprint EC) sa znížila na približne 1 ha. Priemerné hodnoty bilancie a jednotlivých tokov C za sledované obdobie 2018–2022 sú v tab. 3.

Záporné čísla pri bilancii (NEP) indikujú, že na oboch sledovaných lokalitách lesné ekosystémy viac uhlíka ukladajú, ako emitujú. Oba toky (GPP aj ER) sú vyššie na nemanážovanej ploche NEX. Aj keď sú rozdiely takmer zanedbateľné, môžeme sa domnievať, že mierne vyššiu respiráciu na nespracovanej kalamitnej ploche stále spôsobuje ponechané mŕtve drevo. Priemerne sa na lokalite NEX nachádza 270 m³ ha⁻¹ mŕtveho dreva (priemer nad 7 cm) v rôznom stupni rozkladu. Na druhej strane, vyššia štrukturálna diverzita nespracovanej plochy, podmieňuje aj vyššiu GPP. Rozdiely medzi diferencovane post-disturbančne manažovanými lokalitami sú v jednotlivých rokoch značne variabilné. Jednotlivé toky a bilanciu C na sledovaných lokalitách s diferencovaným manažmentom EXT a NEX podľa jednotlivých rokov uvádzame na obr. 1.

Tabuľka 3. Bilancia C (NEP), príjem fotosyntézou (GPP) a celková respirácia (ER) v r. 2019 – 2022 na sledovaných kalamitných lokalitách EXT a NEX, v t C ha⁻¹ rok⁻¹

Table 3. C balance (NEP), photosynthesis intake (GPP), and total respiration (ER) in 2019–2022 at the monitored disaster sites EXT and NEX, in t C ha⁻¹ year⁻¹

lokality	NEP	GPP	ER
EXT	-4,62	-14,88	12,12
NEX	-5,31	-15,05	13,66



Obrázok 1. Ročné toky (fotosyntéza, respirácia) a bilancia C (v t C ha⁻¹) na sledovaných diferencovane manažovaných lokalitách (EXT – spracovania vetrová kalamita, NEX – nespracovaná vetrová kalamita) v r. 2018 – 2022

Figure 1. Annual flows (photosynthesis, respiration) and C balance (in t C ha⁻¹) at the monitored differently managed sites (EXT – processed wind disaster, NEX – unprocessed wind disaster) in 2018–2022

Záver

Bilancia C sa po takmer dvadsiatich rokoch od poškodenia dostáva na úroveň pred poškodením. To znamená, že súčasné mladiny sekvestrujú porovnateľné množstvo C ako približne 90 – 150 ročné smrekovo-smrekové porasty. Či aj dnešné dospelé porasty fungujú ako depónium uhlíka na rovnakej úrovni ako v rokoch 2006 – 2008 je však neisté. Okrem toho, že chýbajú priame merania tokov a bilancie CO₂ v takýchto porastoch, mieru neistoty zvyšujú predbežné poznatky o poklese prírastkov v smrekových horských lesoch.

Podľa literatúry (napr. Amiro et al. 2010), je návrat bilancie uhlíka na úroveň pred poškodením reálny už po desiatich rokoch v mnohých a po dvadsiatich takmer vo všetkých ekosystémoch. Výskum a monitoring bilancie C v Tatrách to potvrdzuje. Zároveň ale treba dodať, že klimatické podmienky pre rýchlu a úspešnú obnovu poškodenej vegetácie boli na sledovanom území po roku 2004 prevažne veľmi priaznivé. Vegetačné obdobia boli takmer výlučne teplotne nadnormálne a zrážkovo deficitné boli len niektoré roky.

Vplyv rozdielneho post-disturbančného lesníckeho manažmentu sa na veľkosť jednotlivých tokov a bilanciu C prejavil najmä v počiatočných štádiách. Spracovaná kalamita spočiatku profitovala z vyššieho pokrytia vegetáciou podporovanou zalesnením, čo sa prejavilo na vyšších hodnotách asimilovaného C. Naopak, pomalší rast vegetácie na nespracovanej lokalite a do istej miery aj vplyv mŕtveho dreva na celkovú emisiu CO₂, spôsobovali mierne horšiu bilanciu. V súčasnosti diferencovane manažované kalamitné plochy sekvestrujú takmer identické množstvo C.

Podakovanie

Príspevok vznikol s podporou grantov Agentúry pre podporu vedy a výskumu č. APVV 17-064 a APVV 21-0412 a projektu FOMON (ITMS 313011V465).

Literatúra

Amiro, B. D., Barr, A. G., Barr, J. G., Black, T. A., Bracho, R., Brown M. et al., 2010: Ecosystem carbon dioxide fluxes after disturbance in forests of North America. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 115: G00K02.

ADRESA

Ing. Peter Fleischer, PhD.
Katedra integrovanej ochrany lesa a krajiny
Lesnícka fakulta
Technická univerzita vo Zvolene
Masarykova 23
SK-960 01 Zvolen
e-mail: xfleischer@tuzvo.sk

doc. Ing. Peter Fleischer, PhD.
Správa Tatranského národného parku so sídlom v Tatranskej Lomnici
Tatranská Lomnica 14 069
SK-059 60 Vysoké Tatry
e-mail: peter.fleischer.st@tanap.sk