

ZMĚNY POVRCHOVÉ TEPLoty LESA JAKO NÁSLEDEK ZTRÁTY VODY A POKLESU EVAPOTRANSPIRACE

Jan Pokorný, Petra Hesslerová, Vladimír Jirka

Článek se zabývá srovnáním povrchových teplot lesa různého stupně poškození v oblasti Národního parku Šumava. Smyslem článku je popsat, jak se změni distribuce slunečního záření a teplot, když uschne 20–30 metrů vysoký porost živých stromů a s postupným odumřením kořenové zóny dochází k zásadnímu narušení transpiračního toku porostem.

V článku předkládáme následující výsledky:

- shrnutí výsledků přímého celosezónního měření teplot v živých lesních porostech, odumřelých porostech, holinách a rašeliništi na Šumavě (Hojdová et al. 2005),

- povrchové teploty měřené termovizní kamerou na české a bavorské straně Třístoličnicku v srpnu 2011,

- povrchové teploty uschlých vzrostlých porostů, neodklizených polomů po orkánu Kyrill a živých vzrostlých stromů, pořízené v květnu 2011 termovizní kamerou z letadla.

Dále podáváme stručný výklad funkce vzrostlých živých transpirujících stromů pro zadržení vody v porostu a odhad zvýšení toku zjevného tepla do atmosféry po uschnutí lesa.

Za jasného dne dosahuje příkon slunečního záření až 1 000 W.m⁻². Na plochu 100 hektarů (1 km²) přichází tedy za jasného dne množství energie srovnatelné s výkonem jednoho bloku jaderné elektrárny Temelín (1 000 MW). Vegetace dostatečně zásobená vodou se při tak vysokém příkonu sluneční energie ochlazuje výparem. Rychlost transpirace je určována též pokrývností listoví (povrch listů v m² nad m² půdy), která ve vzrostlých a zdravých smrkových porostech dosahuje hodnot až 10. Na každém milimetru čtverečním listu nebo jehlice jsou desítky až stovky průduchů, které kontrolují výdej vody a příjem oxidu uhličitého. Na každou přijatou molekulu oxidu uhličitého se z průduchů transpirací vypařuje několik set molekul vody. Transpirace je podmíněna funkcí kořenové zóny. Čermák uvádí délku kořenů na m² řádově ve stovkách metrů a délku mycelií několik km.

Zvýšenou teplotu po odumření vzrostlého lesa lze očekávat. Proces evapotranspirace je exaktně popsán ve fyzikálních termínech již od poloviny 20. století. Stanovení evapotranspirace je založeno právě na měření gradientu teplot, vlhkosti vzduchu, toku energie slunečního záření a k převodu na výdej vody se vyu-

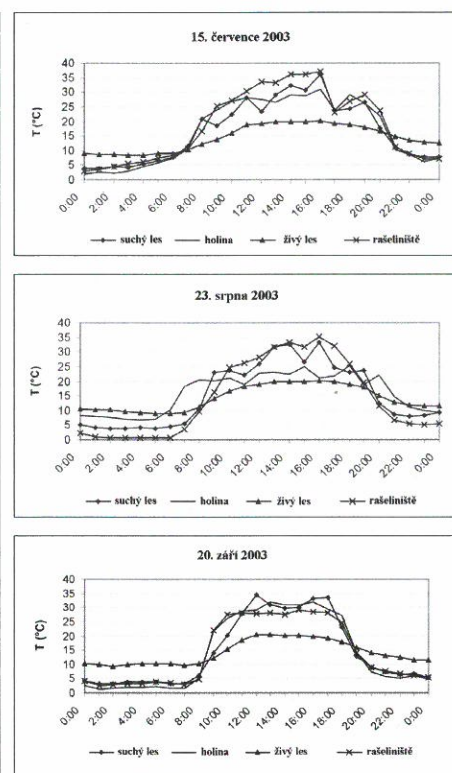
žívá známé hodnoty skupenského (latentního) tepla výparu vody. Měření rychlosti transpirace stromů vypracoval Čermák et al. 2004.

Plošné vyhodnocení teplot krajinného pokryvu umožňují od poloviny 80. let metody dálkového průzkumu Země, tj. satelitní a letecké snímky, s využitím termovizních metod. V literatuře najdeme příklady zvýšení povrchových teplot jako následek poškození nebo úhynu lesních porostů. Jako příklad z našeho území může sloužit zvýšení povrchové teploty lesa v Krušných horách, ke kterému došlo v důsledku rozsáhlého poškození imisemi. Toto je patrné na satelitních snímcích od konce 80. let. Následná obnova lesa od konce 90. let vedla k opětovnému poklesu povrchové teploty.

V NP Šumava došlo v posledních letech k plošnému odumírání smrkových porostů. Položili jsme si otázku, jaké jsou důsledky rozpadu vzrostlého lesa na rozložení teplot a následně na hydrologii v této oblasti. K sepsání toho článku nás vede i kniha vydaná NP Šumava a Jihočeskou univerzitou (Šantůčková, Vrba et al. 2010), ze které si běžný čtenář utvoří názor, že denní průběh teplot v živém a mrtvém lese se významně neliší (str. 100 a dále) a že „odlesnění rozhodně nezpůsobilo zvýšení průtoku a změny vodního režimu v letních měsících“. Vzhledem k tomu, že naše zkušenosti s těmito závěry nekorespondují, položili jsme si otázku, jestli je možné, že se uhynutí 20–30 metrů vysoké vrstvy biosféry, která rostla a vyvíjela se desítky, a někdy i stovky let, nijak zásadně neodrazí v rozložení teplot?

Způsoby měření povrchové teploty

Před rozvojem termografie byly teploty v porostech a vlhkosti vzduchu měřeny bodově, dlouhodobě instalovanými čidly (práce Hojdová et al. 2005). Plošná teplotní měření umožnil až



Obr.: 1a,b,c Ukázka denního průběhu teplot na povrchu bylinné vegetace v suchém lese, holině, mezi živými stromy a na rašeliništi ve dnech 15. června, 23. srpna a 20. září 2003 (Hojdová et al. 2005).

rozvoj termografických systémů. Termovizní kamerou FLIR FPA ThermoCAMTM jsme ze země zaznamenali povrchové teploty uschlého vzrostlého porostu, uschlého porostu s popadanými kmeny, živých stromů a vertikální profil teplot v živém vzrostlém lese. Monitorované plochy byly od sebe vzdáleny nanejvýš několik set metrů, jejich výškový rozdíl byl nejvýše několik desítek metrů a měly podobnou expozici vůči slunci. Měření proběhla 26. 8. 2011, za jasného a slunného dne mezi 12. a 14. hodinou SEČ v okolí Třístoličnicku. Jeden snímek má 320x240 teplotních bodů (pixelů), které lze vynést graficky na libovolném

transektu, a teploty lze vyhodnotit statisticky na libovolně vymezené ploše snímku.

Dále uvádíme termovizní snímky pořízené dne 26. 5. 2011 po poledni termovizní kamerou FLIR FPA nesenou letadlem společností ArgusGeo. Velikost pixelu snímku z letadla (z výšky cca 300 m) je řádově v decimetrech.

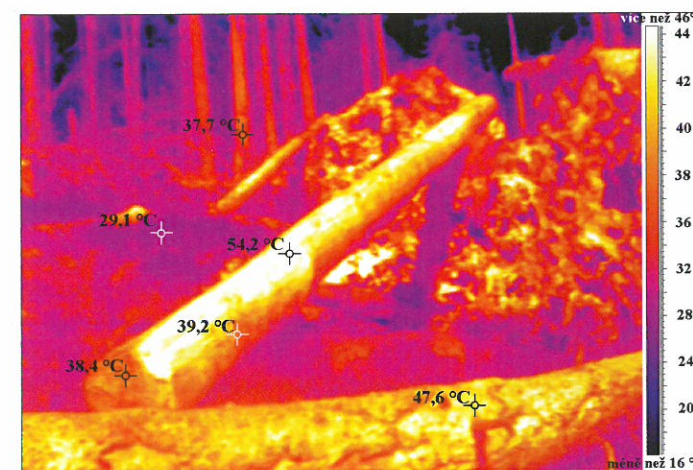
Denní průběhy teplot v lese různého stupně rozpadu

Monitoring mikroklimatu živého lesa (skupin živých stromů), uschlých vzrostlých stromů, paseky (holiny) a rašeliniště v průběhu dvou vegetačních sezón 2002 a 2003, pomocí bodově rozmístěných čidel, přinesl následující výsledky: rozdíl mezi maximální a minimální teplotou počítané pro 169 dnů (2002) a 139 dnů (2003) vegetační sezóny na úrovni povrchu bylinného porostu byly nejnižší v živém lese. Ve srovnání s živým lesem byly teplotní amplitudy na povrchu půdy v uschlém lese průměrně o 14,5 °C vyšší, na holině o 16,7 °C a na rašeliništi o 11,5 °C vyšší. Ve vegetační sezóně byly denní teploty na úrovni povrchu bylinného patra za jasných slunných dnů v živém lese o 10–15 °C nižší než na ostatních měřených lokalitách (suchý les, holina, rašeliniště). Příklad denního průběhu teplot na povrchu bylinné vegetace pod živými stromy, v rozpadajícím se lese, na holině a na rašeliništi je na obr. 1a, b, c.

Povrchové teploty – Třístoličnick

Povrchové teploty byly měřeny ze země termovizní kamerou na české a bavorské straně Třístoličnicku dne 26. 8. 2011 mezi 12. a 14. h.

Termovizní snímky pořízené z hřebenové cesty na hranici mezi ČR a Bavorskem ukazují rozložení teplot v rozpadlém vzrostlém lese. Les v této části uschl následkem gradace kůrovce po roce 2007.



Obr. 2: Termovizní snímek uschlého lesa na české straně Třístoličnicku pořízený z hraniční cesty dne 26. 8. 2011. Snímek: P. Hesslerová

Na obr. 2 jsou na první pohled zřejmé vysoké rozdíly teplot na poměrně malé ploše. Povrchová teplota suchých padlých kmenů dosahuje na slunci místy hodnot až okolo 50 °C. Povrchová teplota sousedních transpirujících travinných porostů je cca o 20 °C nižší. Povrch suchých kmenů má ovšem nápadně vyšší teplotu, protože pro teplotu povrchu je rozhodující transpirace, povrch se ochlazuje vypařováním vody. Povrchové teploty osluněných stojících kmenů v pozadí se pohybují mezi 30–40 °C. Na úrovni povrchu bylinného porostu suchého lesa s padlými kmeny se povrchové teploty pohybují v rozsahu 27 až 54 °C. Vysoké teploty mají suché větve, kmeny a uvaldlé rostliny, protože se neochlazují transpirací.

Na obr. 3 je názorně pohled do živého vzrostlého lesa, na bavorské straně Třístoličnicku v nadmořské výšce cca 1250 m. Teplota bylinného patra je nižší než teplota korun stromů. Osluněné suché keřky a traviny mohou mít výjimečně teplotu vyšší (35,7 °C). Teplota stromového patra nepřesahuje 30 °C. Teploty jak bylinného patra, tak stromů v živém vzrostlém lese jsou zřetelně nižší než v lese rozpadlém díky stínu korun stromů chlazených transpirací.

Povrchové teploty – Luzenské údolí a Prameny Vltavy

Povrchové teploty v oblasti Luzenského údolí a Pramenů Vltavy byly měřeny termovizní kamerou z letadla dne 26. 5. 2011.

Na termovizních snímcích jsou zachyceny rozdíly mezi různými typy lesních porostů – v živém lese, uschlém lese, podmáčeném lese. Ze snímků jsou patrné signifikantní teplotní rozdíly dané stavem porostu.

Oblast Březnicku

Na obrázku 5c je termovizní snímek lokality s vymezeným porostem živého vzrostlého lesa a uschlého porostu. Průměrná povrchová

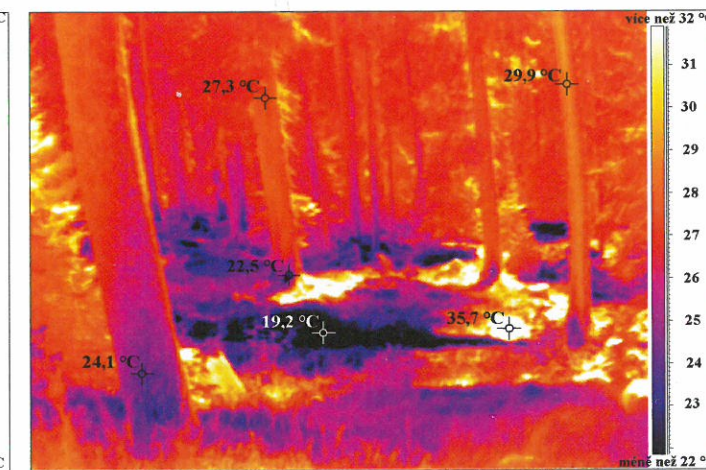
teplota živého lesního porostu je 18 °C, průměrná povrchová teplota uschlého lesního porostu je 29,7 °C.

Oblast Pramenů Vltavy

Lesy kolem Pramenů Vltavy uschly po roce 2007. Na obrázku 5a je mapa oblasti Pramenů Vltavy včetně vrcholu Černé hory a na obrázku 5b je ortofotomapa s vyznačeným polem po orkánu Kyrill (leden 2007), rašeliništěm, uschlým lesem a uschlým podmáčeným lesem. Průměrná povrchová teplota polomu je 27,7 °C, uschlého lesa 19,3 °C, rašeliniště 21,5 °C a průměrná teplota uschlého podmáčeného lesa je poměrně nízká, 16,4 °C. Nízkou teplotu uschlého lesa v údolí si vysvětlujeme činností podrostu, který se rozvíjel již před uschnutím vzrostlého lesa a zvýšením hladiny podzemní vody po snížení odparu v důsledku zastavení transpirace (paludifikace).

Vzrostlý živý les zadržuje vodu v porostu

Vzrostlý živý les má v letních slunných dnech inverzní rozložení teplot ve vertikálním profilu: při zemi v bylinném patře jsou teploty nižší než v korunách stromů, chladnější vzduch o vysoké relativní vlhkosti proto nestoupá vzhůru. Koruny stromů se ochlazují transpirací. Rychlost transpirace jehličnatých stromů je omezena vysokým odporem na úrovni průduchů. Vzrostlý les díky inverznímu rozložení teplot ztrácí méně vody než mladé porosty. V noci se koruny stromů rychle ochlazují vypařováním dlouhovlnného záření vůči chladné obloze a na chladných jehlicích kondenzuje vodní pára. V důsledku přeměny plynné fáze vody na fázi kapalnou mírně klesá tlak vzduchu a následkem poklesu tlaku „les nasává“ vzduch z okolí. Horizontální pohyb vzduchu vyvolaný lesními porosty popisují fyzici atmosféry z Petrohradu Makarieva a Gorškov jako „biologickou pumpu“. Se vzduchem při-



Obr. 3: Termovizní snímek živého lesa na bavorské straně Třístoličnicku pořízený dne 26. 5. 2011. Snímek: P. Hesslerová

cháží nad les další vzdušná vlhkost. Makarieva a Gorškov rozlišují v krajině donory vody (oblasti, odkud vodní pára odchází) a akceptory vody (oblasti, nad nimiž se vodní pára sráží). Lesy fungují podle této teorie jako akceptory vody.

Obáváme se, že uschnutí rozsáhlých ploch vzrostlého lesa může vést v horkých letních dnech k nadměrným ztrátám vody, a to zejména na hřebenech. Travní porosty mezi suchými stromy jsou totiž vystavené vysokým teplotám a větru, což výrazně zvyšuje rychlost transpirace. Obáváme se, že travní porosty i nízké zmlazené porosty nedrží vodu na principu inverzního gradientu teplot a nefungují na principu biologické pumpy jako vzrostlý les. Tyto oblasti se mohou změnit z akceptorů vody na donory.

Odhad změn toku energie v uschlém lese a na holinách

V roce 2001 bylo na území Bavorského národního parku 3 700 ha lesa a na území NPŠ 1 600 ha v rozpadu po kůrovcové kalamitě (NPŠ 2001) a předpokládalo se snížení kůrov-

cové gradace s tím, že se jeho potravní nabídka škůdce vyčerpala. V rozporu s tímto předpokladem kůrovcová kalamita nadále pokračuje. Oficiální údaje o současné celkové ploše uschlých smrkových vyspělých porostů a holin nejsou k dispozici. Odhaduje se (osobní sdělení NPŠ a J. Vovesný), že celková plocha vytěžených holin a suchých souvislých vyspělých porostů na území NPŠ je cca 12 000 ha a na bavorské straně 6 000 ha.

Jak ovlivňuje rozpad vzrostlého smrkového lesa na ploše 100 km² toky energie? Pozorovaný a výše dokumentovaný nárůst teplot v důsledku poklesu evapotranspirace je provázený uvolněním zjevného tepla. Pokles evapotranspirace o 2 mm za den (2 litry.m⁻²) představuje nárůst toku zjevného tepla o 1,4 kWh.m⁻² (5 MJ). Na 100 km² se tedy za jediný slunný den uvolní teplo 140 000 MWh, což je obrovské množství energie, srovnatelné s množstvím energie vyrobeném jadernou elektrárnou Temelín za 70 hodin.

Evapotranspirace porostů dobře zásobených vodou dosahuje hodnot stovek W.m⁻². V poledních hodinách jsme naměřili často hodnoty 500 W.m⁻² a vyšší (Pokorný et al.



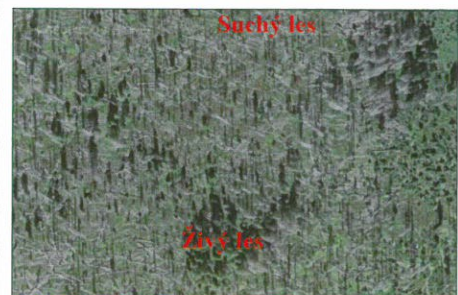
Obr. 4d: Detailní fotografie uschlého porostu v pozadí s Lužným.

Foto: P. Jackov



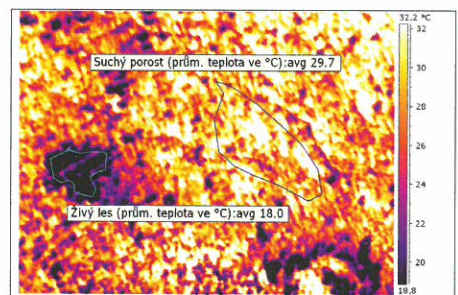
Obr. 4a: Mapa okolí Březnického potoka a Luzenského údolí s vyznačenou lokalitou (A) snímanou termovizní kamerou.

Zdroj: www.mapy.cz



Obr. 4b: Ortofotomapa snímané lokality s vyznačenými místy živým a mrtvým lesem.

Zdroj: www.mapy.cz

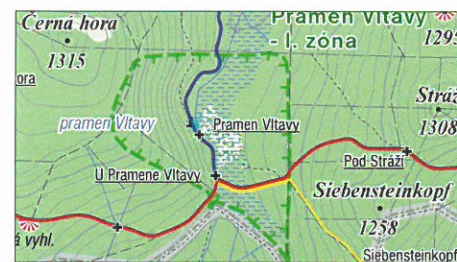


Obr. 4c: Termovizní snímek lokality s vymezeným porostem živého vzrostlého lesa a uschlého porostu

Snímek: V. Jirka

2010), což odpovídá rychlosti výparu vody 200 mg.m⁻².s⁻¹. Výrazné zvýšení teploty o 10 °C, které jsme zaznamenali na holinách a suchých porostech, je projevem zvýšeného uvolňování zjevného tepla následkem poklesu evapotranspirace. Od ohřátého povrchu se ohřívá vzduch, který stoupá vzhůru. Předpokládáme, že vzestup teploty o 10 °C je způsoben poklesem evapotranspirace o 200 W.m⁻². Na ploše 100 km² je takový pokles evapotranspirace provázen uvolňováním zjevného tepla 20 000 MW. Instalovaný výkon tepelných a jaderných elektráren v ČR je cca 12 000 MW.

Vzestupný proud teplého vzduchu má schopnost pojmout a odnést z porostů velké množství vodní páry, porosty se tak vysušují.



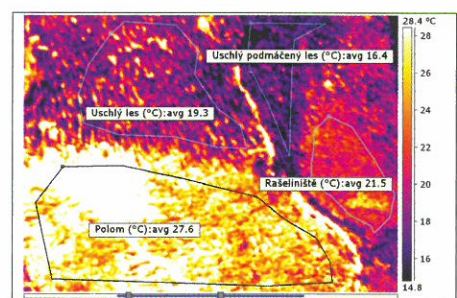
Obr. 5a: Mapa oblasti Pramenů Vltavy včetně vrcholu Černé hory.

Zdroj: www.mapy.cz



Obr. 5b: Ortofotomapa s vyznačeným polomem po orkánu Kyrill (leden 2007), rašeliništěm, uschlým lesem a uschlým podmáčeným lesem.

Zdroj: www.mapy.cz



Obr. 5c: Termovizní snímek oblasti Pramenů Vltavy odpovídající obr. 5a,b.

Snímek: V. Jirka

Vzduch nasycený vodní párou při teplotě 25 °C obsahuje přibližně 22 gramů vodní páry v m³. Vzduch o teplotě 40 °C pojme více než dvojnásobek vodní páry (50 g.m⁻³). Mlha a mraky nad živým lesem ukazují, jak živý les udržuje vodní páru, která se v noci vrací jako rosa nebo drobná dešťová srážka. Takový projev krátkého vodního cyklu je typický též pro deštné lesy. Vědecká literatura vysvětluje úlohu lesa ve vodním režimu krajiny často rozporuplně. Hydrologie i rostlinná fyziologie pracují s pojmem „ztráta vody evapotranspirací“. Praktici velmi dobře vědí, že z polí a luk odeče do vodoteče větší podíl srážek než



Obr. 5d: Fotografie polomu v oblasti Pramenů Vltavy po orkánu Kyrill pořízená 15. září 2011.

Foto: P. Hesslerová

z lesních porostů. Odlesnění rozsáhlejších ploch ovšem vede dlouhodobě k poklesu srážek a nedostatku vody. Varovným příkladem může být odlesnění a následná přeměna na zemědělskou půdu více než 1 000 km² tropického lesa Mau Forest v Keni (více např. v časopise Vesmír 2011 (90), č. 10).

Prezentované výsledky získané jak přímým měřením teploměry umístěnými v porostech, tak hodnoty povrchových teplot získané pomocí termovizní kamery, prokazují zřetelný nárůst teplot v uschlých smrkových porostech, polomech a holinách ve srovnání s živým lesem. V odpoledních hodinách, za jasného slunného dne, jsou povrchové teploty uschlého lesa a holin o 10–20 °C vyšší než teploty živého lesa. Uhynutí 20–30 metrů vysoké vrstvy biosféry (vzrostlého živého lesa) má za následek podstatné zvýšení teplot při vysokém příkonu slunečního záření. Pokud k takovému úhynu lesa dochází na velkých plochách, hrozí změny regionálního klimatu, zejména vysoušení krajiny a transport teplého vzduchu s vysokým obsahem vody do atmosféry.

Využito přístrojové techniky a poznatků z projektu MSMT NPV 2B06023 „Vývoj metody stanovení toku energie a látek

z ekosystémů“, řešitelé ENKI, o.p.s., ČVUT Praha, Fakulta strojní. V plném znění uveřejněno ve sborníku referátů celostátní konference Šumava 2011 – bod zlomu (Modravě 26.–27. října 2011).

Autoři:

doc. RNDr. Jan Pokorný, CSc.

E-mail: pokorny@enki.cz

Ing. Vladimír Jirka, CSc.

ENKI, o.p.s.

RNDr. Petra Hesslerová

Fakulta životního prostředí, ČZU Praha