

Aktivní úloha vzrostlého lesa v klimatu, oběhu vody a zadržování živin

Jan Pokorný, Petra Hesslerová

Článek vychází z prezentace na konferenci SOVAK ČR Provoz vodovodů a kanalizací 2021. Cílem je ukázat, jak člověk odvodněním krajiny, odlesněním a urbanizací (tj. rozsáhlými odvodněnými plochami) mění toky sluneční energie a ovlivňuje klima.

Upínáme se na zvýšenou koncentraci oxidu uhličitého a obáváme se růstu průměrné teploty, opomíjíme přitom zřetelný a měřitelný efekt lidské činnosti na oběh vody a klima. Touto činností je změna krajinného pokryvu, tedy odlesnění, odvodnění, urbanizace. Takové plochy se sluneční energií přehřívají.

Historie lidských civilizací a chápání funkce lesa

Dne 22. července 1494 odplouval Kolumbus z Jamajky a do deníku napsal: každé odpoledne přišla dešťová přeháňka trvající přibližně hodinu. Admirál si pravidelný odpolední déšť vysvětloval vzrostlým lesem na ostrově. Věděl z vlastní zkušenosti, že odpolední déšť byl obvyklý na Kanárských ostrovech, Madeiře a Azorských ostrovech. Pravidelné odpolední deště ustaly a srážek celkově ubylo po odlesnění těchto ostrovů (z deníku zapsal syn Ferdinand). Funkci lesa v oběhu vody, vodním režimu krajiny a regionů se věnoval Alexander von Humboldt v první polovině 19. století. Jeho rozsáhlé dílo Kosmos dnes prostuduje málokdo. Dílo holistického vědce A. Humboldta přehledně s odstupem 150 let popsala A. Wulf a kniha je přeložena do češtiny [Wulf, 2016]. Podobně jako Humboldt, varoval před ná-

sledky rozsáhlého odlesňování v Severní Americe G. P. Marsh [1864, 2015]. Pro naši dobu je stále aktuální kniha V. Úlehly [1947] s výstižným názvem „Napojme prameny: o utrpení našich lesů“. Úlehla se též zamýšlí nad příčinou vysychání historických civilizací, bylo to odlesňování? Ve druhé polovině 20. století se archeologům podařilo shromáždit nálezy a popsat vývoj i pád civilizací na několika kontinentech. Anglický archeolog Clive Ponting [1991] vysvětluje pád známých civilizací v Mezopotámii, severní Africe, údolí Indu a dalších odvodněním, odlesněním, degradací a zasolením půdy, změnou regionálního klimatu. Kniha vyšla v českém překladu. V této souvislosti se často cituje Platon [Ponting, 1991, 2018]: „To, co zde nyní zůstalo, je ve srovnání s tím, co zde bylo dříve, jako kostra nemocného člověka; tuk a měkká zem odplaveny (promrhány) a zůstala holá kostra země ... některé hory poskytují potravu pouze včelám, a přitom nedávno na nich rostly stromy“. Dále popisuje, jak „voda po dešti rychle odtéká, zatímco dříve dešťovou vodu využívaly četné lesy a pastviny a bohatá jílovitá půda uchovávala a napájela četné prameny“. Jsou výjimky, například jihovýchodní Asie, kde civilizace existuje několik tisíců roků. Profesor Mooyoung Han z Univerzity v Soulu přezdívaný Dr. Rain mi to vysvětlil:



Obr. 1: Na 1 m² chodníku dopadá 877 W sluneční energie a povrchová teplota je 51 °C. Ve stínu stromu je povrchová teplota 26,9 °C a na 1 m² dopadá 82 W sluneční energie. Strom vypaří 20 litrů vody za hodinu a chladí výkonem cca 14 kW, fotosyntézou strom do biomasy váže přibližně 0,02 kW

„Pěstujeme rýži a ta roste ve vodě a víme, že voda přitahuje vodu“. V Keni, Ugandě hovoří místní obyvatelé o lesích na horách jako vodárnách (water tower); v průběhu několika desítek let se přesvědčili, že vykácení horských lesů vede k poklesu srážek a nepravidelnému odtoku vody [Pokorný a Hesslerová, 2011; Hesslerová a Pokorný, 2010]. Vykácej les a změní se klima, to je název článku v Scientific American od J. Schwarz [2013] napsaný na základě rozhovoru s autorem tohoto textu; dále R. G. Pielke Sr z Colorado Uni ukazuje, jak odvodnění na Floridě vedlo ke zvýšení počtu horkých dnů v létě a zvýšenému počtu mrazivých nocí v zimě a zejména poškození úrody mrazem. Ruští fyzici Gorškov a Makarieva vysvětlují, jakým mechanismem lesy přitahují vodu od moře. Vědecký pohled na lesy s příběhy obětavých lesních hospodářů spojil uznávaný vědecký žurnalista, konzultant New Scientist, Fred Pearce [2021] v knize Trillion Trees: How We Can Reforest Our World.

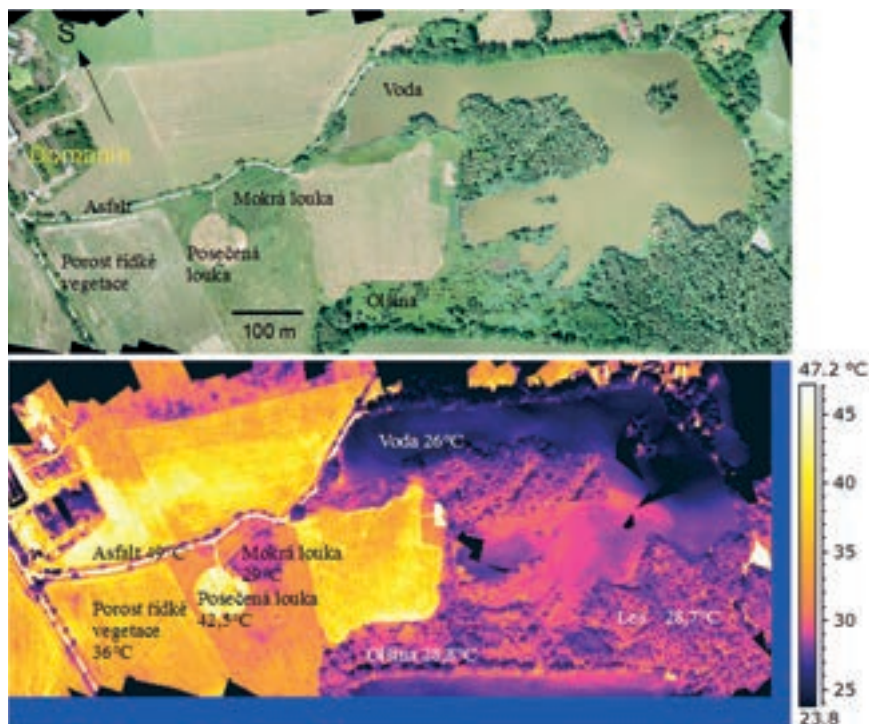
Po tomto úvodu bychom mohli výklad o funkci lesa v oběhu vody a klimatu skončit a odvolat se na zkušenosti generací, vlastivědu ze základní školy, vzpomenout na „Malované počasí“ Ondřeje Sekory a zopakovat si, že lesy zadržují vodu, odlesnění vede k vysoušení krajiny.

Klimatologové a zejména interpreti objemných zpráv Mezivládního panelu pro klimatickou změnu (IPCC Intergovernmental Panel on Climate Change) takový závěr zpochybňují. V uznávaných vědeckých časopisech se dočteme, že les je tmavý, má nízké albedo, pohlcuje více sluneční energie a přispívá k oteplení planety [Bonan, 2008]. Odlesnění údajně brzdí růst průměrné globální teploty, protože odlesněná krajina je světlejší (má vyšší albedo), uvolněný oxid uhličitý sice nepatrně zvýší skleníkový efekt, odraz slunečního záření ovšem ochlazuje více. Některá média a vědecké autority opakovaně tvrdí: „Ušchlý les na Šumavě nemá údajně vliv na vodní bilanci. Pří-

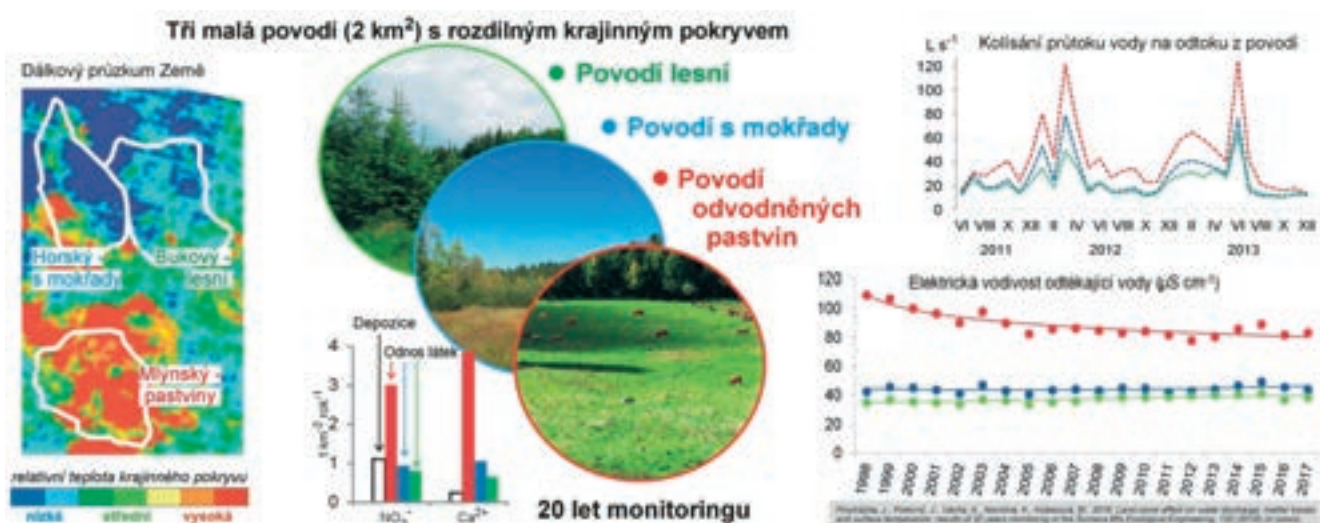
zemní vegetace prý vzrostlý les nahradí. Pokles srážek je způsoben globální klimatickou změnou. Úhyn vzrostlého lesa u pramenů Vltavy nemůže být příčinou poklesu vodnosti pramenů, vždyť uschlé stromy vypaří méně vody nežli stromy živé. Není prokázáno, že v uschlém lese je vyšší teplota“ (ředitel NP Šumava).

Při odborných debatách poradních orgánů vládní koncepce Voda, sucho atp., zaznívalo:

- Rybníky mají otevřenou hladinu vody, vypařují mnoho vody, nebudeme je stavět.
- Mokřady nemohou zadržovat vodu, jsou jí plné. Vypařují mnoho vody. Nepodporovat.



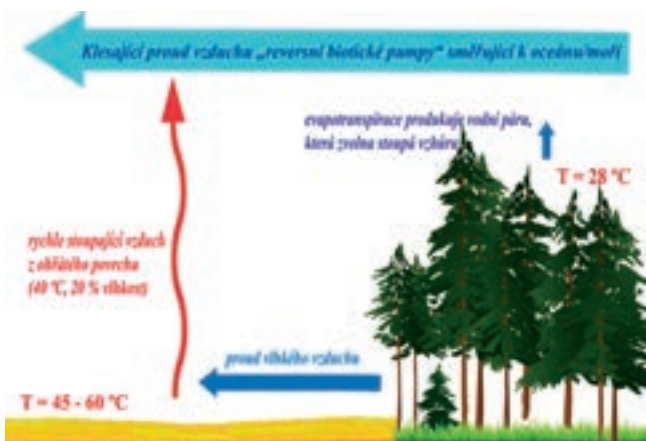
Obr. 2: Povrchové teploty kulturní krajiny za slunného dne odpoledne. Les, olšina, hladina vody se chladí výparem vody a povrchové teploty nepřesahují 30 °C. Posečená louka, asfalt mají povrchovou teplotu nad 40 °C



Obr. 3: Funkce lesa, odvodněné pastviny a mokřadů v regulaci odtoku vody, kvality vody, ztrát látek a povrchových teplot. Výsledky 20 let monitoringu tří malých (cca 200 ha) povodí na pravém břehu Lipna [Procházka, et al., 2017]



Obr. 4: Na každý čtvereční metr porostu připadá cca 7 metrů skeletových kořenů, 1 km absorpčních kořenů a tisíce kilometrů hyf mykorrhizyckých hub – prof. Jan Čermák říkával: „Pod zemí je ještě jeden strom“



Obr. 5: Odvodněný povrch se sluneční energií ohřívá na teplotu 45–60 °C. Ohřátý vzduch stoupá rychle vzhůru, ze strany je nasáván vlhký vzduch, okraj lesa vysychá, stromy ztrácejí odolnost vůči kůrovci. Podobně se urychluje výpar z malé vodní nádrže

- Stromy vypařují mnoho vody, kazí hydrologickou bilanci, mají vysokou vodní stopu.
- Teplota se zvyšuje, protože je vyšší koncentrace oxidu uhličitého a atmosféra sálá vůči zemi.

Rostliny a stromy zejména vypařují vodu. Na každou molekulu přijatého oxidu uhličitého vyloučí rostlina jednu molekulu kyslíku a vypaří (transpiruje) několik set molekul vody. Na vytvoření 1 kg biomasy (sušiny) vypaří rostlina několik set litrů vody. Rostliny přijímají vodu kořeny, vedou cévami, stonkem/kmenem až do listů a voda se odpařuje průduchy. Když je vody málo, rostlina průduchy zavře, zastaví se ovšem také fotosyntéza. Porost vypařuje vodu přes rostliny transpirací a též z povrchu půdy, stonků, kmenů. Výpar vody porostů se proto nazývá evapotranspirace. Je evapotranspirace ztrátou vody výparem a daní za příjem oxidu uhličitého, kdy voda uniká z rostliny nedopatřením, protože průduchy jsou otevřeny? Je známo, že lesy zadržují až 50 % srážek, zatímco louky podstatně méně, 20–30 %. Správce přehrady na pitnou vodu, zápolící s nedostatkem vody, dá tedy logicky přednost travnatému porostu v povodí.

Zopakujme základní pojmy a fakta

Tok sluneční energie měříme a vyjadřujeme ve $W \cdot m^{-2}$. Za plného slunečního svitu přichází na $1 m^2$ až $1\,000 W$. Při zataženém obloze je to $100 W \cdot m^{-2}$ i méně. V místnosti je intenzita světelného záření nejvýše několik $W \cdot m^{-2}$. Na vypaření 1 litru vody se spotřebuje (při 20 °C) $2\,440 kJ = 0,68 kWh$, tato energie skupenského tepla výparu je ve formě skupenského (latentního) tepla výparu ve vodní páře a při kondenzaci/srážení vodní páry zpět na kapalnou vodu se skupenské teplo uvolňuje. Vodní pára z 1 litru vody má objem přibližně 1 200 litrů (18 ml vody kapalně vytvoří 22 400 ml vodní páry). Pro srovnání: na výpar 1 litru vody se spotřebuje množství energie, které odpovídá kapacitě akumulátoru osobního auta. Z $1 m^2$ vegetace zásobené vodou se vypaří za slunného dne několik litrů vody. Výpar vody (evapotranspirace) a srážení vodní páry (kondenzace) představuje obrovské toky přeměn sluneční energie.

Na obrázku 1 uvádíme příklad chladicího výkonu jednoho většího stromu za letního dne. Na osluněném chodníku měříme intenzitu slunečního záření $877 W \cdot m^{-2}$ a povrchovou teplotu 51 °C . Ve stínu stromu je povrchová teplota 26 °C a intenzita slunečního záření $82 W \cdot m^{-2}$. Pod stromem je intenzita slunečního záření $10\times$ nižší a teplota o 24 °C nižší nežli na osluněném chodníku. Sluneční energie se váže do vodní páry. Na základě četných měření transpiračního proudu ve kmeni stromu i měření transpirace listů lze odhadnout, že strom odpaří 20 litrů za hodinu. Tomu odpovídá rychlost výparu $14 kW$ a rychlost (transpirace) na $1 m^2$ plošného průmětu koruny na $280 W$ při poloměru koruny 4 m. Rychlost transpirace závisí na příkonu sluneční energie, dostupnosti vody a fyziologickému stavu stromu.

Les se chladí výparem vody

Za slunného počasí se ve vegetační sezóně vytvářejí výrazné rozdíly povrchových teplot. Na obrázku 2 jsou povrchové teploty v kulturní krajině na Třeboňsku v okolí obce Domanín. Letní povrchové teploty kulturní krajiny jsou v rozsahu $26\text{--}42\text{ °C}$ (snímáno termovizní kamerou nesenou vzducholodí). Les má nízkou povrchovou teplotu. Tento obrázek byl publikován například ve Vládní koncepci na ochranu před následky sucha pro území ČR (24. července 2017, usnesení č. 528), dále v často citované vědecké publikaci Ellison, et al., 2017.

Pro Světovou konferenci o klimatu v Paříži v prosinci 2015 (COP21) připravil mezinárodní tým vědců Policy Brief Managing Forests for Water and for Climate Cooling|WeForest (Management lesů a jeho význam pro vodu a ochlazování klimatu).

Je dobře známo, že lesy čistí vodu a na úrovni povodí, regionů i kontinentů zásadně ovlivňují dostupnost vody a regulaci teploty v krajině. Nové vědecké závěry ukázaly, že lesy mají větší funkční význam, než se dříve myslelo, a že jejich fungování lze ovlivnit způsobem hospodaření a dosáhnout tak krátkodobých i dlouhodobých zlepšení z hlediska dostatku vody v krajině i fungování klimatu v měřítku od jednotlivých povodí po celé kontinenty. Lesy jsou zásadně významné v pěti procesech:

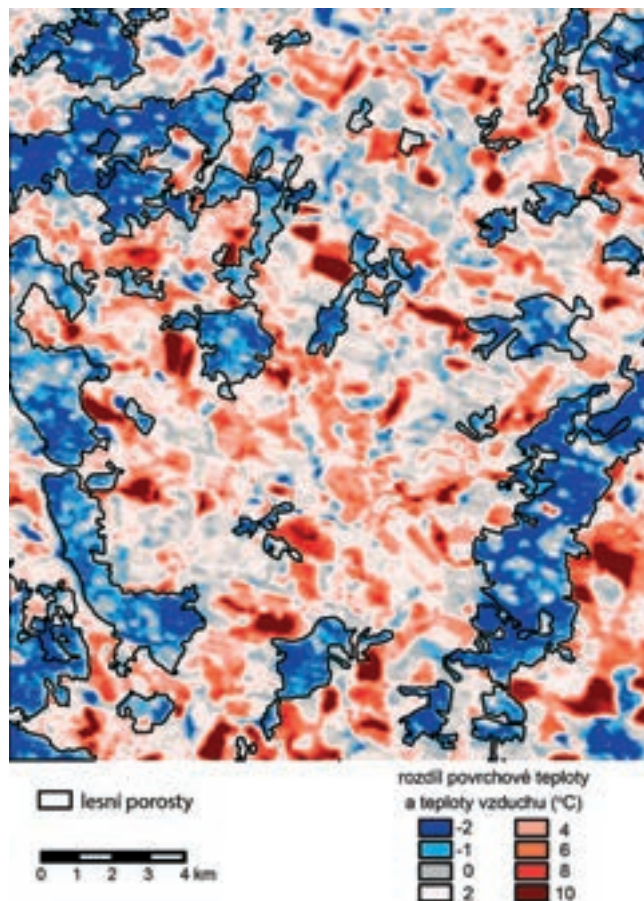
- **Lesy podporují vznik srážek.**
- **Stromy a lesy jsou přirozené chladicí systémy.**
- **Lesy generují toky vzduchu a vlhkosti.**
- **Stromy a lesy přispívají k zásobování podzemních vod, zadržují živiny.**
- **Lesy zmírňují dopady záplav.**

Prohlášení mezinárodního týmu 30 vědců o zásadní úloze lesů v utváření klimatu zůstalo Pařížskou konferencí o klimatu nepovšimnuto. Zásadní kapitola Summary for politicians je totiž připravena předem a je zaměřena jenom na efekt zvýšené koncentrace CO_2 . Sdělení o významu lesů vypracované mezinárodním týmem vědců publikujících v předních vědeckých časopisech bylo s ostatními prezentováno v tzv. „side events“, bez

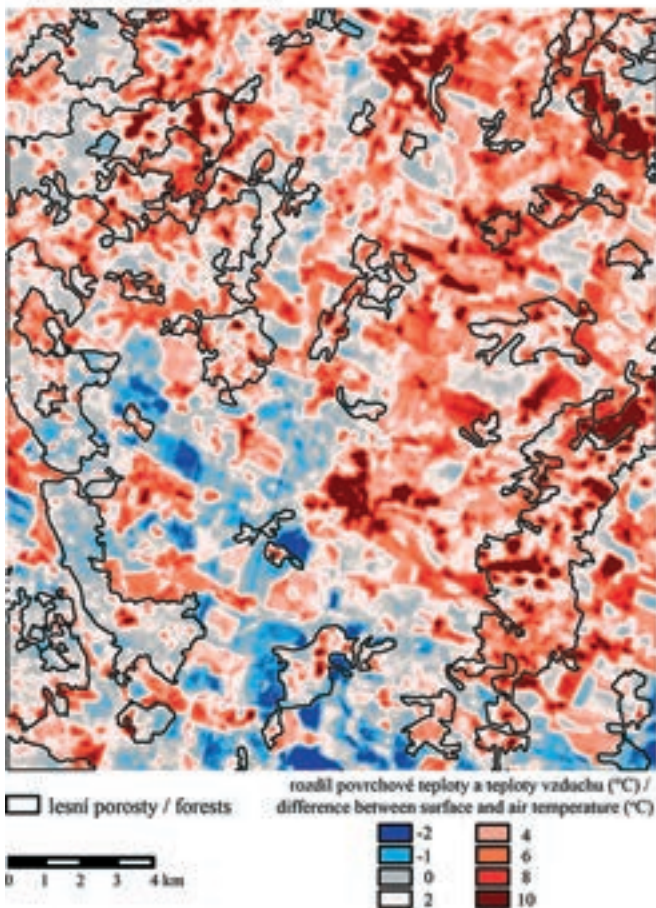
odezvy. Vzpomínám na incidenty v pražských ulicích při jednání Mezinárodního měnového fondu v roce 2000. Uklidit nositele jiných názorů do „side events“ s tím, že jsou aktivními účastníky prezentujícími své výsledky a doporučení, je efektivní taktika, zachovávající skleněné výlohy obchodů, čisté ulice a nechávající v klidu policii a hasiče.

Funkce lesa ve srovnání s odvodněnou pastvinou a mokřady je znázorněna na obrázku 3. Nejvíce rozpuštěných látek odtéká z pastviny, voda má nejvyšší elektrickou vodivost, nejvyšší koncentraci vápníku, dusičnanů a dalších živin. Odtok vody z pastviny je nevyrovnaný. Pastvina má nejvyšší povrchovou teplotu za slunného dne ve vegetační sezóně, nechladí se výparem. Z pastviny odtéká nejvyšší podíl srážek. Les a mokřad zadrží větší podíl srážek. To svádí k odlesňování. Pokud se odlesní velké plochy, krajina se přehřívá, vysychá a srážky klesají (narušený krátký/uzavřený oběh vody).

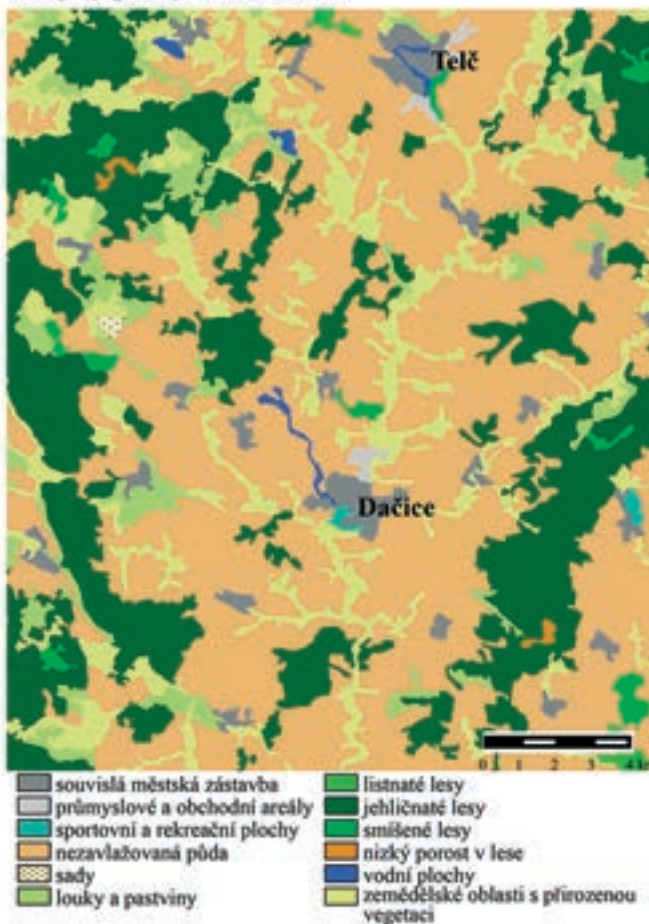
Obr. 6: Rozdíly povrchové teploty a modelované teploty vzduchu v zájmovém území na Dačicku. Tento rozdíl ukazuje na schopnost vegetace chladit. Vegetace se aktivně chladí, pokud je její povrchová teplota nižší než okolní teplota vzduchu. V závorce je uvedena teplota vzduchu měřená na stanici ČHMU Kostelní Myslová. V roce 1990 byly nejchladnější lesní porosty. V roce 2019 po kůrovcové kalamitě mají uschlé lesní porosty podobnou teplotu jako zemědělská krajina, zvláště lesy ve východní části modelového území. Povrchová teplota lesních porostů se zvýšila (i o více než 10 °C), uschlý les se nechladí výparem vody



27.06.2019 (28,7 °C)



Krajinový pokryv / land cover



Ohřátý vzduch vysušuje

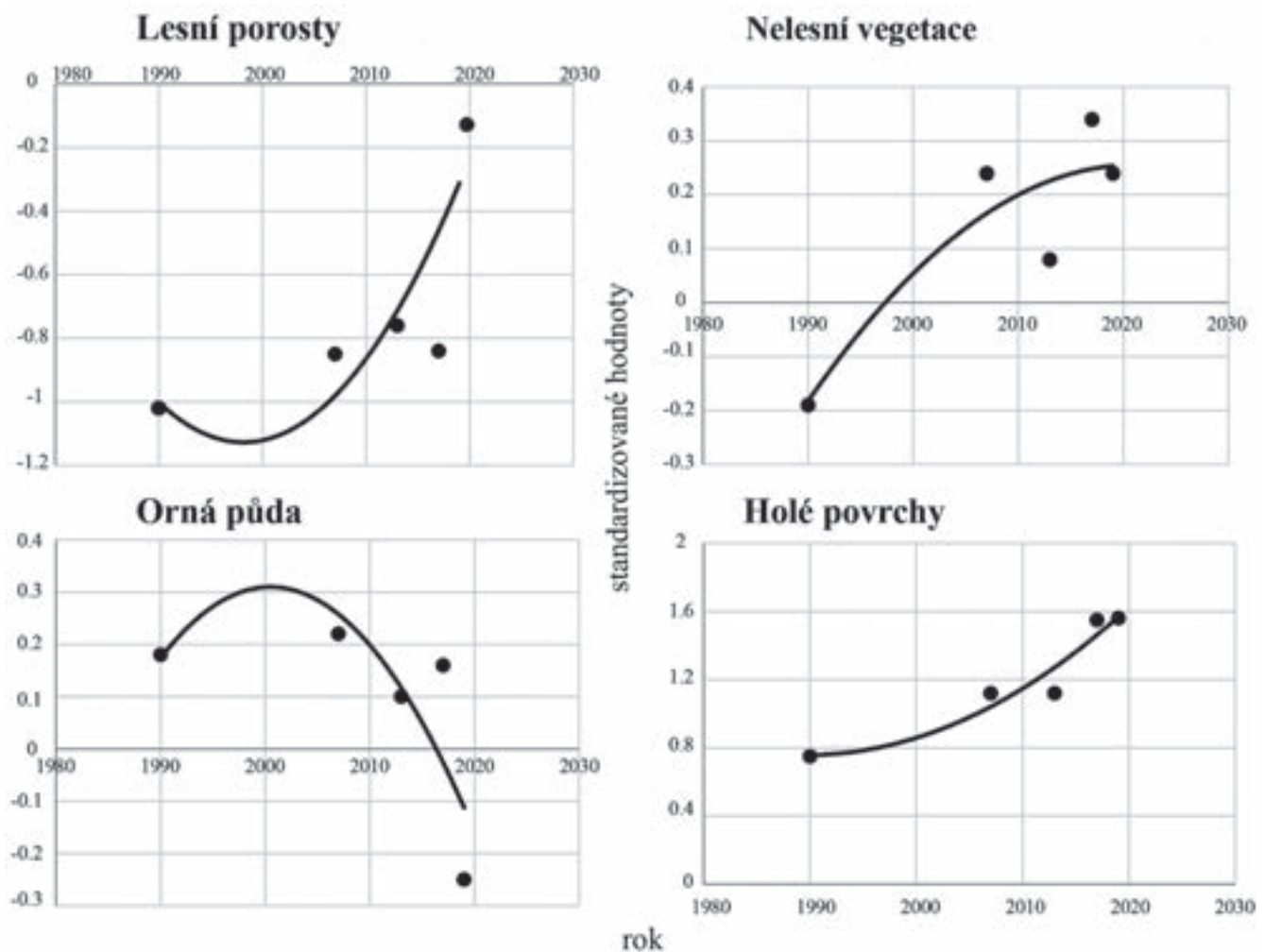
Mokřady a lesy se chladí výparem vody, vodní pára pomalu stoupá vzhůru, relativní vlhkost vzduchu je vysoká (aktuální evapotranspirace (ET) je blízká potenciální ET). ET = několik mm za den. Odvodněné plochy se ohřívají, ohřátý vzduch stoupá vzhůru a nedosahuje rosného bodu. Vzduch o teplotě 40 °C při 100% vlhkosti obsahuje 50 g vody v 1 m³ (při 20% vlhkosti obsahuje 10 g). Při vzestupné rychlosti 1,0 m · s⁻¹ se „z 1 m²“ za 1 hodinu transportuje vzhůru 36 000 g vody (36 litrů). To je mechanismus vysychání krajiny, a to do atmosféry. S teplým vzduchem se přenáší desítky až stovky litrů vody za den. **Toto vysychání se neprojeví v měřených srážko-odtokových poměrech.**

Odvodněná plocha logicky nemůže ztrácet vodu, protože je suchá. Odvodněná plocha se zahřívá sluneční energií na povrchovou teplotu 45–60 °C. Od ohřátého povrchu se ohřívá vzduch, který stoupá vzhůru rychlostí několik metrů za sekundu. Letci a rogalisté znají tento vzestupný proud vzduchu pod pojmem termika. Vzestupný proud nasává z okolí vzduch, odebírá tak vlhkost ze sousedního lesa a zrychluje výpar z nedaleké vodní hladiny. Ohřátý vzduch má nízkou relativní vlhkost a vystoupá příliš vysoko, než vodní pára kondenzuje, dosáhne rosného bodu a vytvoří se mraky. Vlhkost je tak odnášena prouděním vzduchu k moři. Les, mokřady, vegetace zásobená vodou se chladí výparem vody, vzduch nad lesem má vysokou relativní vlhkost, stoupá zvolna vzhůru a po několika stovkách metrů dosáhne rosného bodu, vodní pára kondenzuje zpět na vodu, tvoří se

mraky. Kondenzace je urychlena volatilními organickými látkami, které působí jako kondenzační jádra. Voda se vrací zpět jako drobný odpolední déšť.

Změny povrchových teplot a toků energie po úhynu lesa

Na jihovýchodě Českomoravské vysočiny uhynuly po roce 2016 smrkové lesy následkem kůrovcové kalamity. Vyhodnotili jsme změnu povrchových teplot krajiny a změny rychlosti evapotranspirace (výpar vody porostem) a toku zjevného tepla (termika, turbulentní proudění) s využitím satelitních snímků Landsat [Hesslerová, et al., 2022]. V roce 1990 byly nejchladnější lesní porosty. Evapotranspirací se ochlazovaly, jejich povrchová teplota byla nižší než teplota vzduchu. V roce 2019 po kůrovcové kalamitě mají plochy po odumřelých lesních porostech podobnou teplotu jako zemědělská krajina. Povrchová teplota uschlých lesů se zvýšila (i o 10 °C) a byla vyšší nežli teplota vzduchu měřená standardně ve výšce 2 m (obr. 6). Lesy ztratily svou schopnost chladit. Družice Landsat snímá povrchovou teplotu kolem 10:30 SEČ, odpolední povrchové teploty jsou tedy ještě vyšší. Podobně jsou odpoledne větší rozdíly teplot mezi suchými porosty, vzrostlým živým lesem, vodní hladinou a vegetací dobře zásobenou vodou. Evapotranspirace uschlých lesních porostů se snížila, uschlý les se nechladí výparem vody a zvyšuje se jeho teplota.



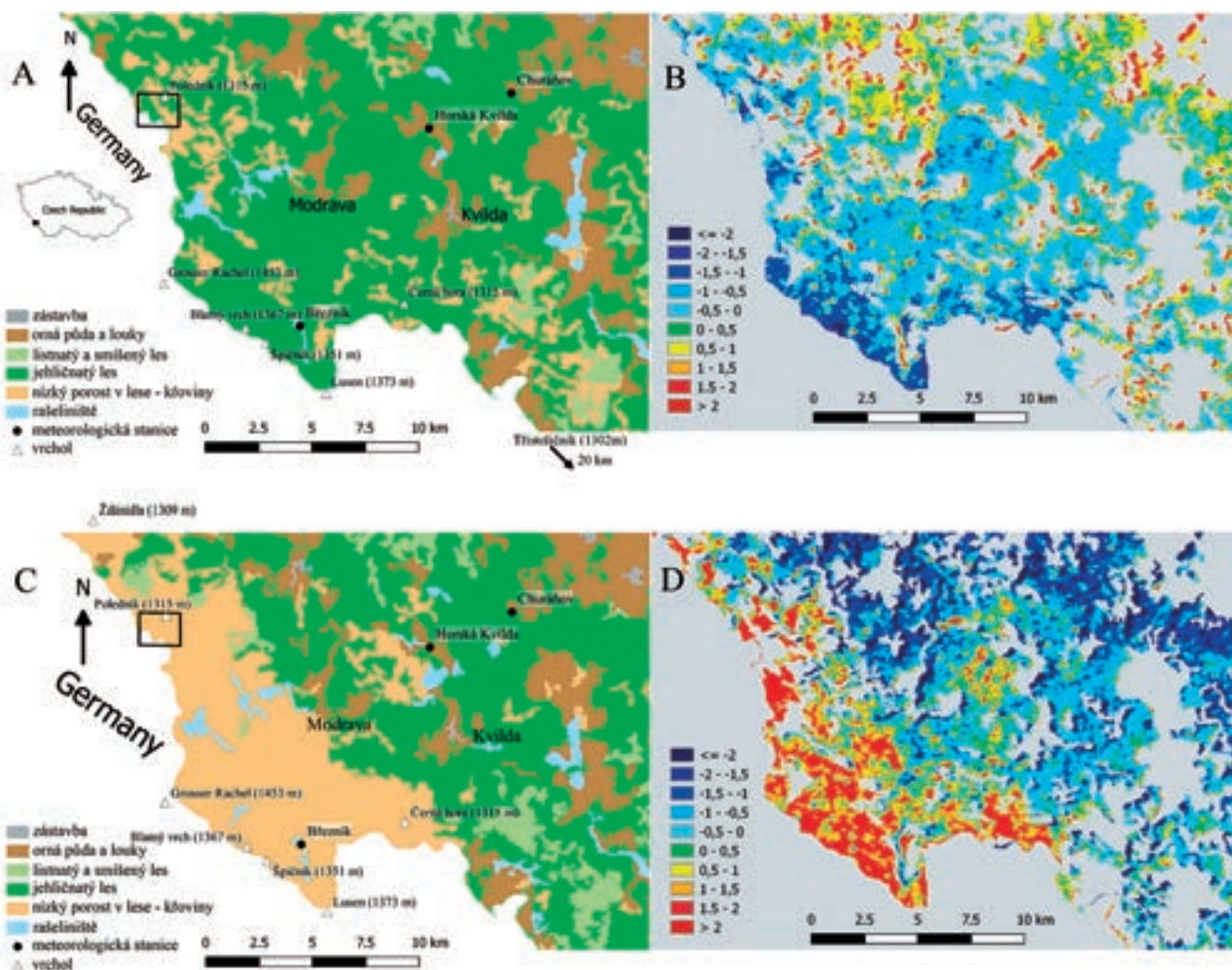
Obr. 7: Zjevné teplo (termika, turbulentní vzestupné proudění) v letech 1990, 2006, 2012, 2019 na Dačicku. Nápadný je nárůst u lesních porostů v roce 2019

Zvýšení povrchových teplot lesa po odtěžení vzrostlých porostů, zvýšení extrémních průtoků a pokles průtoků v období bez srážek jsme popsali pro případ rozsáhlého odlesnění Mau Forest v Keni [Hesslerová, et al., 2010]. Zřetelné je též zvýšení povrchových teplot hřebenu Šumavy následkem úhynu horských smrčků po orkánu Kyril v lednu 2007 a gradaci kůrovce. Mapování Corine ukazuje vzrostlý stále zelený les na hřebenech Šumavy v roce 1990 a křoviny/les v roce 2012 (obr. 8). Povrchová teplota uschlých porostů zaznamenaná satelitem Landsat stoupla vůči okolí o několik °C [Hesslerová, et al., 2018]. Na obrázku 9 jsou povrchové teploty snímány termovizní kamerou za slunného dne na Hraničním hřebenu u Trojmezí. Povrchové teploty ležících kmenů přesahují 50 °C, patrně jsou vysoké rozdíly teplot mezi místy v uschlém horském smrkovém lese. Naproti tomu v blízkém živém vzrostlém lese jižní expozice (též osluněném) jsou teploty vyrovnané a nepřesahují hodnotu 30 °C; vzrostlý živý les se chladí výparem vody. Navíc vzrostlý živý les má tzv. inverzní rozložení teploty: v korunách je teplota vyšší než při zemi, kde se udržuje vysoká relativní vlhkost. Vzrostlý les komunikuje s atmosférou pouze prostřednictvím korun stromů. Vysoké povrchové teploty uschlého horského lesa na hřebenech

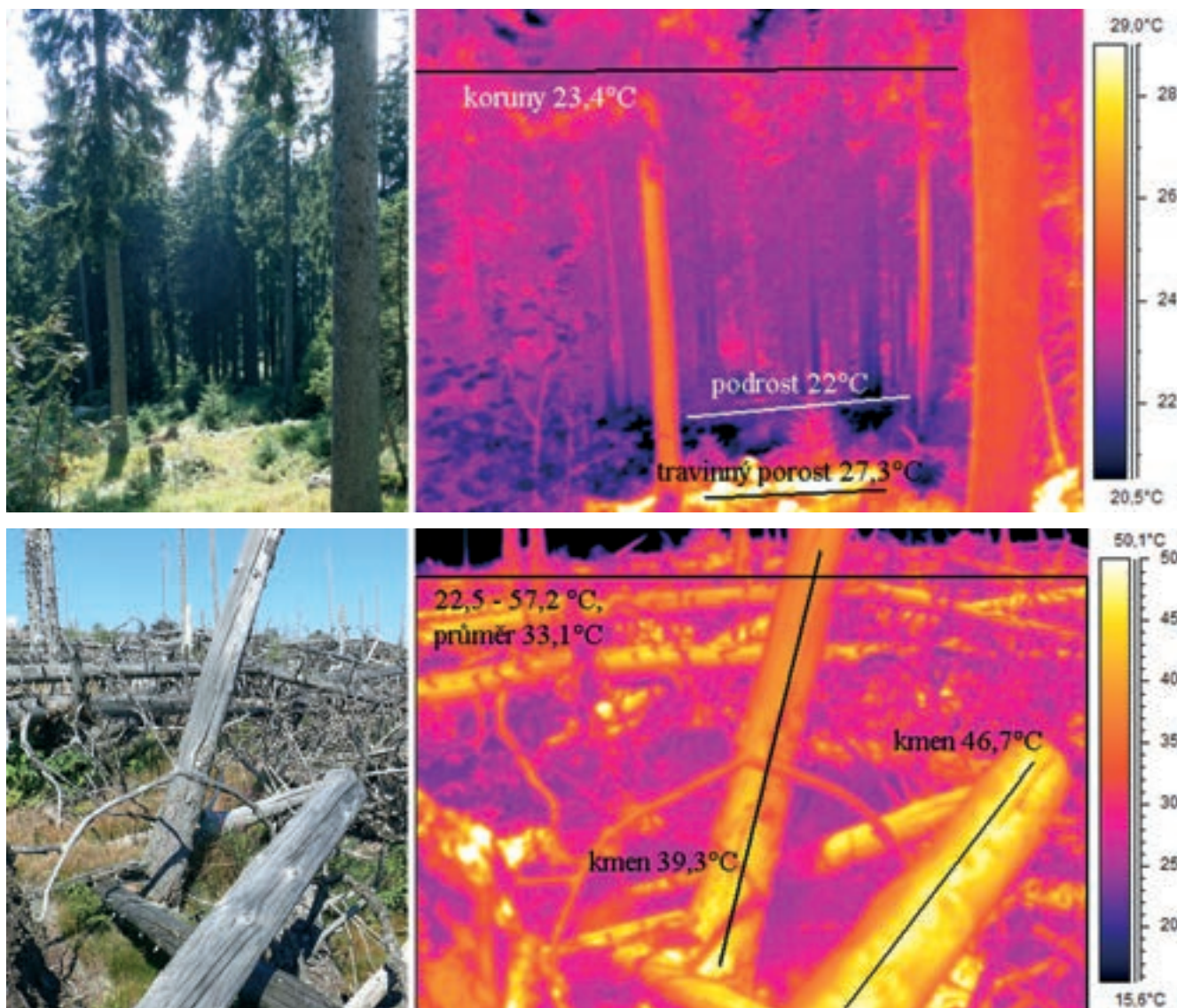
Šumavy lze naměřit za slunných dnů ve vegetační sezóně i v roce 2021, patnáctý rok po orkánu Kyril.

Produkce zjevného tepla v uschlých lesních porostech

Na výpar 100 mg · s⁻¹ se spotřebuje 240 W. Za slunného počasí vypařují zdravé lesní porosty běžně 100 mg vody za sekundu z jednoho metru čtverečního. Pokud les vykáčeme nebo uschne, zvýší se za slunného počasí povrchová teplota lesa, protože se porost nechladí výparem. Sluneční energie se neváže do skupenského (latentního) tepla vodní páry, ale uvolňuje se jako tzv. zjevné teplo, které se projevuje vzestupným turbulentním prouděním vzduchu. Při poklesu výparu (evapotranspirace) o 150 W · m⁻² se na ploše 100 ha (1 km²) uvolňuje teplo 150 MW; těžko si představit, co znamená uschnutí 10 000 ha vzrostlého lesa na Šumavě, když se navíc uvolňuje 15 000 MW tepla. Extrémní změny, tedy posun od výparu ke zjevnému teplu, jsou v řádu stovek wattů na metr čtverečný. K takovému poklesu výparu a extrémnímu ohřevu dochází s urbanizací, budováním obrovských hal a ponecháním sklizených polí bez meziplodiny. Lze se o tom přesvědčit měřeními povrchové teploty. Pokles výparu na velkých plochách vede k narušení oběhu vody, vzniku vysokých



Obr. 8: Krajinový pokryv v zájmovém území Šumavy (A) a relativní teplota jehličnatých porostů v roce 1991 (B). Porosty v hraniční oblasti náležejí k nejchladnějším. V roce 2012 již došlo k výrazné změně krajinového pokryvu (C). Jehličnaté lesy hraničního hřebenu byly nahrazeny kategorií nízký porost, která reprezentuje rozpadlé smrčiny, případně lokality s pionýrskými dřevinami a bylinami. Změně krajinového pokryvu odpovídá i změna povrchové teploty (D), a to o více než 2 °C



Obr. 9: Povrchové teploty v živém vzrostlém lese na Šumavě na svahu Třístoličníku (rozsah 22–28 °C) a v nedalekém uschlém lese, kde povrchové teploty přesahují 50 °C

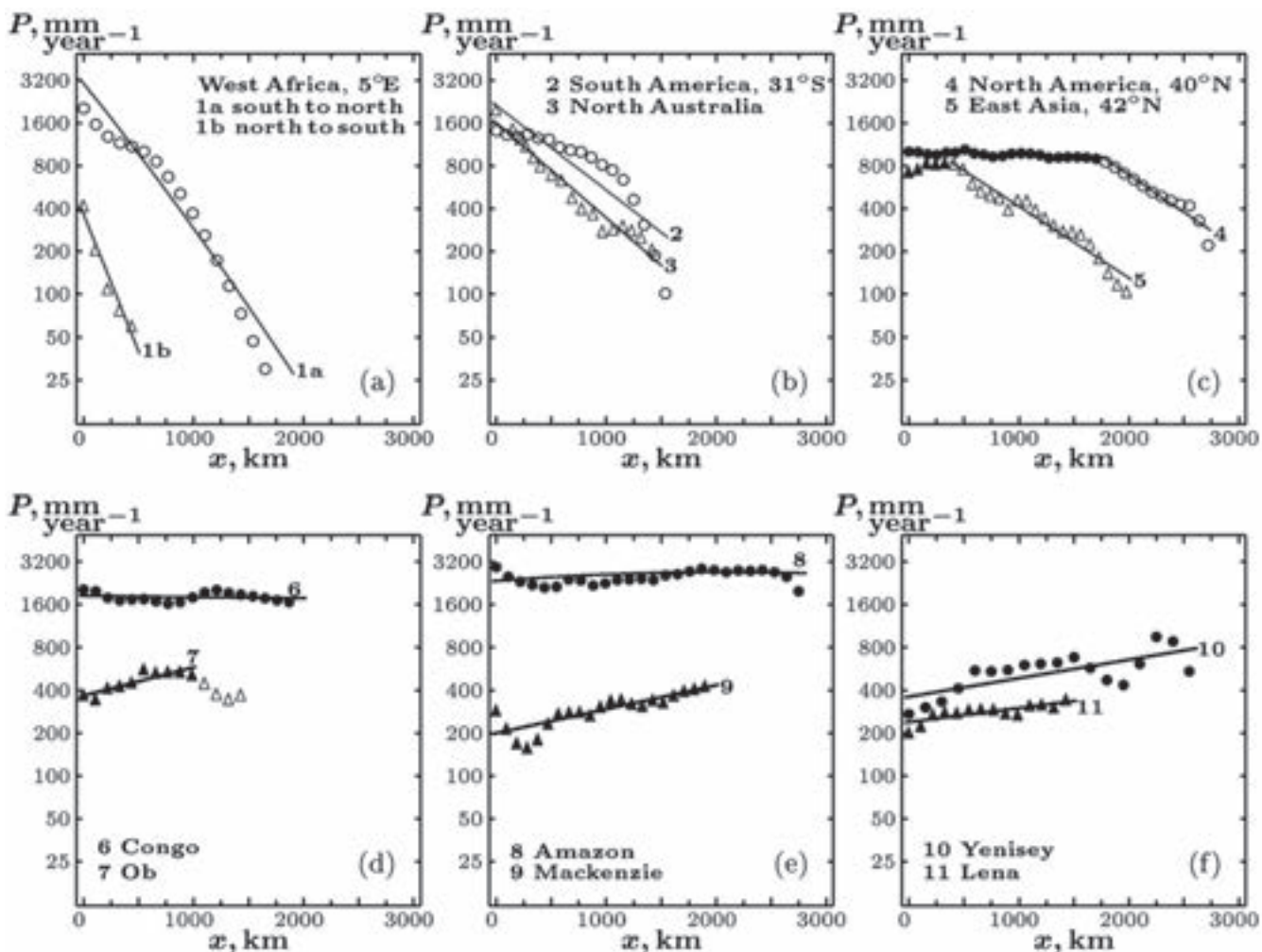
rozdílů teplot a tlaku, které se vyrovnávají prudkým větrem a přivalovými srážkami. Krajina postupně ztrácí vodu.

Úloha lesů v oběhu vody a tvorbě dešťových srážek

Světové společenství úmluvami opakovaně deklaruje, že lesy jsou světové přírodní bohatství a mají být spravovány pro zachování ekosystémových funkcí (Rio de Janeiro, 1992). V preambuli Lesního zákona je psáno: „Účelem tohoto zákona je stanovit předpoklady pro zachování lesa, péči o les a obnovu lesa jako národního bohatství, tvořícího nenahraditelnou složku životního prostředí, pro plnění všech jeho funkcí a pro podporu trvale udržitelného hospodaření v něm.“ Lesů na planetě ovšem ubývá. V letech 2003–2018 byly celosvětové roční průměrné ztráty lesa 239 000 km², z toho 38 % připadá na lesní požáry [Wees, et al., 2020]. Jsou obavy, že odlesnění může způsobit vyschnutí dalších oblastí, například severní části deštného amazonského lesa se mohou přeměnit na savanu. Stejně tak jsou ohroženy i zemědělské oblasti Číny, afrického Sahelu a argentinské Pam-py. Četné velké městské aglomerace jsou závislé na dešťových srážkách, pocházejících ze vzdálených lesů, například Karáči

v Pákistánu, Wuhan a Šanghai v Číně, New Delhi a Kalkata v Indii. **I malý pokles srážek, způsobený změnou krajinného pokryvu na návětrné straně, může mít negativní dopad na dodávky vody do zalidněných oblastí dále ve směru větru [Keys, et al., 2018].**

Je historickou zkušeností, že v lesnatých oblastech prší a odlesnění vede k poklesu srážek a vysychání. O tom, jak funguje les v oběhu vody, se vedou ovšem debaty. Proč prší na kontinentech daleko od oceánů, proč vzdálené oblasti uvnitř zalesněných kontinentů dostávají tolik srážek jako pobřeží a proč nezalesněná území uvnitř kontinentů vysychají? Traduje se, že většina atmosférické vlhkosti, která kondenzuje v mracích a padá jako déšť, pochází z oceánů. Brazilští meteorologové uveřejnili studii o izotopovém složení dešťové vody v Amazonské nížině a ukázali, že polovina dešťových srážek v Amazonii pochází z transpirace lesa. Voda recyklovaná transpirací rostlin totiž obsahuje více molekul s těžkým izotopem kyslíku (¹⁸O) nežli voda vypařená z oceánu [Salati, et al., 1979]. Fred Pearce [2021] popisuje, jak meteorologové sledovali atmosférické tryskové proudění směřující z východu na západ přes lesy Amazonie ve výšce okolo 1,5 km



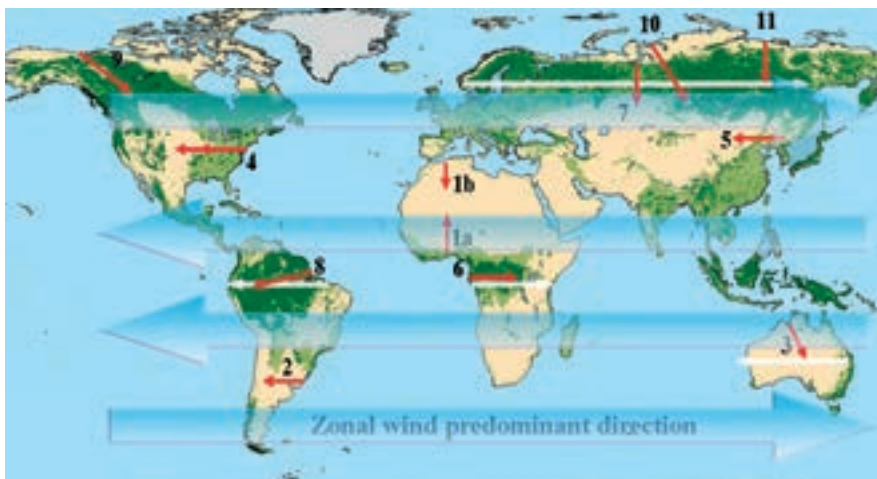
Obr. 10: Průměrné množství dešťových srážek na transektech od oceánu směrem do pevniny. Symboly s výplní: zalesněná území. Symboly bez výplně: nezalesněná území. V nezalesněných oblastech dešťové srážky se vzdáleností od oceánu exponenciálně klesají, a to $3\times$ na každých 600 km. V zalesněných oblastech jsou srážky v prostoru směrem do kontinentu rovnoměrné [Makarjeva, et al., 2013]

(South American Low-Level Jet), které se v oblasti And stáčí k jihu. Salati, Nobre a další ukázali, že tato trysková proudění přenáší množství vlhkosti, která pochází z transpirace lesů, a nazvali ho létající řekou, protože podle odhadu nese tolik vlhkosti jako ohromná řeka na kontinentu pod ním. Savenije [1995] ukázal, že směrem od pobřeží do vnitrozemí stoupá podíl dešťové vody, která pochází z lesů, a ve vnitrozemí dosahuje 90 %. Toto zjištění pomohlo vysvětlit, proč se za posledních šedesát let vnitrozemí Sahelu vysušilo poté, co byly vykáceny lesy na pobřeží.

Van der Ent et al. [2010] ukázali, že globálně 40 % veškerých srážek pochází spíše z pevnin nežli z oceánů. Často to bývá i více. Amazonská létající řeka dodává 70 % dešťových srážek Laplatské nížině. Van der Ent byl nejvíce překvapen zjištěním, že 80 % srážek v Číně pochází z Atlantiku, voda je recyklována boreálními lesy Skandinávie a Ruska. Tento koloběh, trvající půl roku i déle, zahrnuje několik fází – cykly transpirace následované deštěm postupujícím po směru větru a opětovnou transpirací. Čína sousedí s Tichým oceánem, přesto většina jejich srážek je vlhkost recyklovaná z pevniny daleko na západě. To je v rozporu s dřívějšími znalostmi a dlouho uznávaným principem meteorologie: větry jsou poháněny z velké části různým ohřevem atmosféry. Když teplý vzduch stoupá, snižuje tlak vzduchu pod sebou a při zemi vytváří prostor, do kterého přichází vzduch z okolí. Například v létě se povrch země ohřívá rychleji a při-

tahuje vlhkou brízu (vánek) z chladnějšího oceánu. Tomu ostatně odpovídá střídání směru větru v létě na břehu větší vodní plochy: za slunného dne vane vítr (breeze) od vody k pevnině. V noci země rychleji chladne a směr větru se obrátí, vane od pevniny k moři. V roce 2007 časopis Hydrology and Earth System Sciences publikoval vizi biotické pumpy [Makarjeva a Gorshkov, 2007]. Bylo to provokativní, protože teorie byla v rozporu s tímto dlouho uznávaným principem meteorologie.

Autoři ukázali zásadní úlohu vodní páry uvolňované evapotranspirací: vodní pára nad lesem kondenzuje a tvoří se mraky, plyn (vodní pára) se sráží na kapalinu, která má mnohem menší objem. Nad lesy v atmosféře se snižuje tlak vzduchu a dochází k horizontálnímu vtahování vzduchu z území, kde je kondenzace nižší. Prakticky to znamená, že kondenzace nad pobřežním lesem zrychluje brízu od moře a nasává vlhký vzduch na pevninu, kde případně vodní pára z kondenzuje a spadne jako déšť. Jestliže les v dostatečném poměru pokrývá pevninu dále do vnitrozemí, cyklus může pokračovat a udržuje proudění vlhkého vzduchu i několik tisíc kilometrů. Tato teorie do jisté míry obrací tradiční myšlení: není to atmosférická cirkulace, která pohání hydrologický cyklus (oběh vody), ale hydrologický cyklus pohání cirkulaci vzdušných mas. Přičemž hnací silou je sluneční energie působící přes výparné teplo vody. Zopakujme si: výparné teplo vody při 25 °C je 2,4 MJ/litr (0,68 kW), což je ekvivalent



Obr. 11: Transekty od pobřeží do vnitrozemí, pro které byly vyhodnoceny roční sumy srážek znázorněné na obr. 10 [Makarjeva, et al., 2013]



Obr. 12: Schéma funkce biotické pumpy. Les vypařuje vodu a ochlazuje se. Vzduch nad lesem má vysokou relativní vlhkost, zvolna stoupá vzhůru, dosahuje rosného bodu, vodní pára kondenzuje, tvoří se mraky a drobný déšť. Kondenzací vodní páry klesá tlak vzduchu a horizontálně se přitahuje vlhký vzduch od moře. Napravo je znázorněna situace odlesněného regionu, který se nechladí výparem vody, přehřívá se, vzduch je přitahován mořem [Makarjeva, et al., 2013]



Obr. 13: Les přitahuje vlhký vzduch od moře, protože má vysoký výpar, nad lesem se vodní pára sráží a mechanismem „condensation induced air motion“ (kondenzací indukovaný pohyb vzdušných mas) je nasáván vlhký vzduch od moře. Lesnatá krajina je akceptorem vlhkosti, moře je donorem vlhkosti. Po odlesnění a odvodnění se pevnina stává donorem vlhkosti (vysychá) a příjemcem je moře o vyšším výparu, než má odvodněná pevnina [Makarjeva, et al., 2013]

kapacity jedné autobaterie. Z litru vody vznikne 1 200 litrů vodní páry.

Biotická pumpa vysvětluje tzv. paradox chladné Amazonie [Sheil, 2018]. Od ledna do června, kdy je Amazonská nížina chladnější nežli oceán, vane silný vítr od Atlantiku směrem do Amazonie, tzn. opačným směrem, než bychom očekávali v případě závislosti směru větru na rozdílu teplot. Jinými slovy vítr by vál od chladnějšího kontinentu do teplejšího oceánu, jako je tomu v případě brízy. Autoři teorie biotické pumpy argumentují, že ten samý mechanismus ovlivňuje i tropické cyklony, které jsou poháněny uvolňovaným skupenským teplem, kdy vodní pára kondenzuje nad oceánem [Makarjeva, et al., 2013, 2017]. Pokud pevninské lesy přitahují vlhký vzduch z míst, kde cyklony vznikají, tak brání vzniku hurikánů. To může být vysvětlením, proč se cyklony zřídka tvoří v jižní části Atlantského oceánu. Deštné lesy Amazonie a Konga přitahují z oceánu tolik vlhkosti,

že je jí málo na to, aby byla dostatečným zdrojem energie pro vznik hurikánů.

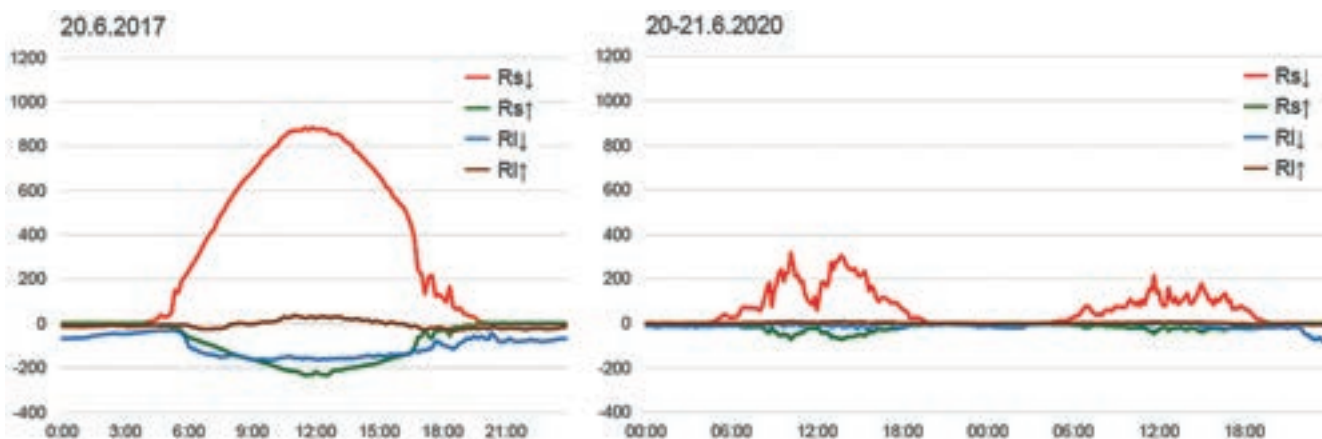
Současné odstraňování velkých ploch přirozeného lesa na území Ruska, včetně Sibíře, má za následek nepravdělné proudění západního větru. Bezpříkladná vlna horka na jihozápadě Ruska v létě 2010 i suché roky s vysokými teplotami ve střední Evropě v letech 2015–2019 jsou ukázkou extrémů klimatu způsobených zhroutilým oběhu vody. V pojmech teorie biotické pumpy: postižené oblasti s teplotami často převyšujícími dlouhodobý průměr o několik stupňů C, se změnily z akceptora na oblast donora, tj. místně vypařovaná voda byla odnášena do sousedních oblastí a působila povodně v jiných částech Evropy i Asie. Vzduch klesal v odlesněném suchém vnitrozemí a stoupal v oblastech blízkých oceánu. Donorské oblasti měly teplotu vzduchu v přízemní vrstvě o přibližně 10 °C vyšší nežli oblast příjemce/akceptoru. Toto pozorování ilustruje větší důležitost kondenzačně indukované dynamiky pro pohon vzduchových mas ve srovnání s konvenční teorií rozdílu povrchových teplot působených sluneční energií.

Z uvedeného plyne, že prevenci sucha nepomůže pouhé ochlazení povrchu krajiny, střech, případně odrazení sluneční energie. Nutné je chlazení výparem vody, protože vodní pára se sráží v atmosféře, a tím přitahuje vlhký vzduch. Otázkou úlohy člověka v utváření klimatu se budeme vážně zabývat, až začneme studovat efekt změny krajinného pokryvu na distribuci slunečního záření, povrchovou teplotu a oběh vody. Zatím se na základní škole neucí o výparu vody rostlinami, chladič efekt rostlin není znám většině studentů středních škol ani začínajícím studentům oboru učitelství biologie. Kolektiv autorů z Pedagogické fakulty Jihočeské univerzity v Českých Budějovicích a ENKI, o. p. s., v rámci projektu TAČR ETA (TLO1000294) vypracovali

Metodiky výuky pro školy, Metodiku pro státní správu a knihu na téma Slunce – voda – rostliny – klima. Materiály jsou volně ke stažení na www.pf.jcu.cz/projekty/svv/ (případně přes www.enki.cz).

Klimatická změna, tedy extrémní teplot, delší období bez srážek přerušované přivalovým deštěm a postupné vysychání krajiny, je vysvětlována zvýšenou koncentrací CO₂ a západní svět se vydal cestou ke „klimatické neutralitě“ dekarbonizací s cílem snížit emise skleníkových plynů a tím zpomalit oteplování planety. Oteplování se monitoruje jako globální průměrná teplota s přesností na desetinu stupně, data nejsou přístupná.

Za příčinu klimatické změny a oteplování je považována zvýšená koncentrace oxidu uhličitého z 270 ppm na konci 18. století na dnešních 410 ppm. Kvantifikací zvýšeného skleníkového efektu je tzv. radiative forcing (radiční zesílení), které podle IPCC je rovno 1–3 W · m⁻². Jinými slovy atmosféra následkem



Obr. 14: Denní chod přicházejícího ($R_s \downarrow$) a odraženého ($R_s \uparrow$) slunečního záření ($W \cdot m^{-2}$) a dlouhovlnného/tepelného záření mezi čidlem a oblohou ($RI \downarrow$) a dále mezi čidlem a povrchem země ($RI \uparrow$) v letním slunovratu při jasné obloze 19.–20. 6. 2017 (vlevo) a v letním slunovratu při zatažené obloze 20.–21. 6. 2020 (vpravo) [Jirka, et al., 2021]

zvýšené koncentrace skleníkových plynů propouští do vesmíru o $1-3 W \cdot m^{-2}$ tepla méně a na Zemi se utváří nová tepelná bilance, díky níž se Země přehřívá. Hodnoty radiative forcing jsou vypočítané, měřením neověřené. Tok tepla do atmosféry se přitom měří na mnoha místech po světě.

Na obrázku 14 jsou netradiometrem změřené denní průběhy přicházejícího a odraženého slunečního záření a tok tepla do atmosféry za letního slunovratu při jasné obloze (2017) a při zatažené obloze (2020). Při zatažené obloze dopadalo nejvýše kolem $200 W \cdot m^{-2}$ sluneční energie a do atmosféry se vyzařovaly nejvýše desítky $W \cdot m^{-2}$. Při jasné obloze dopadalo na kolmou plochu až $900 W \cdot m^{-2}$ a do oblohy se vyzařovalo až $150 W \cdot m^{-2}$. Množství přicházející sluneční energie a množství vyzařovaného tepla do atmosféry se v daném období (při určité poloze Slunce) řídí zejména oblačností, která rozhoduje o desítkách/stovkách wattů. Ukázali jsme, že člověk svým hospodařením v krajině (změnou krajinného pokryvu) ovlivňuje množství vodní páry v atmosféře, a tím i oblačnost. V 5. Zprávě IPCC se na straně 666 píše [Myhre, et al., 2013]: „Vodní pára je hlavním skleníkovým plynem, který se do atmosféry dostává přirozeným způsobem a má zásadní vliv na tvorbu klimatu na Zemi. Její množství v atmosféře je závislé spíše na teplotě vzduchu než na emisích. Z těchto důvodů je považována spíše za ‚zpětnovazebný faktor‘, než za faktor, který by mohl mít vliv na klimatickou změnu. Antropogenním způsobem (ve formě emisí) se do atmosféry dostá-

vá vodní pára ze zavlažovacích systémů, či z elektrárenských chladicích věží. Toto množství je v souvislosti s globální změnou klimatu zanedbatelné.“

Text byl psán v době zimní olympiády v Číně (Peking). Závodí se na umělém sněhu v mrazové stepi, teploty vzduchu jsou přes den $-15^\circ C$ a pocitová teplota ve větru kolem $-30^\circ C$. Vzduch je vymrzlý, suchý a zvýšená koncentrace oxidu uhličitého nebrání toku tepla do atmosféry. Je to příklad regionu, který člověk připravil o vodu a trvalou funkční vegetaci, a rozpadl se tak krátký oběh vody.

Poděkování

Autoři děkují organizátorovi konference Provoz vodovodů a kanalizací SOVAK ČR (2.–5. 11. 2021) za pozvání, za vzorné uspořádání a péči, moderátorovi Mgr. Jiřímu Paulovi za věcný přístup, opírající se o poznatky z jeho diplomové práce o transpiraci rostlin.

Literatura dostupná u autorů.

doc. RNDr. Jan Pokorný, CSc., RNDr. Petra Hesslerová, Ph.D.
ENKI, o. p. s., Třeboň