

ZMĚNY KLIMATIZAČNÍ FUNKCE LESNÍCH POROSTŮ JAKO NÁSLEDEK JEJICH PLOŠNÉHO ODUMŘENÍ PO GRADACI LÝKOŽROUTA SMRKOVÉHO

CHANGES IN THE AIR-CONDITIONING FUNCTION OF FOREST STANDS AS A RESULT OF THEIR DECAY AFTER THE GRADATION OF *IPS TYPOGRAPHUS*

PETRA HESSLEROVÁ¹✉ - HANNA HURYNA¹ - JAN POKORNÝ¹ - ALICE KOZUMPLÍKOVÁ² - ILJA VYSKOT²

¹ENKI, o.p.s., Dukelská 145, 379 01 Třeboň, Czech Republic

²Mendelova univerzita v Brně, Ústav environmentalistiky a přírodních zdrojů,

Fakulta regionálního rozvoje a mezinárodních studií, Zemědělská 1, 613 00 Brno - Černá Pole, Czech Republic

✉ e-mail: m42barta@seznam.cz

ABSTRACT

The aim of the study was to evaluate the change in the air-conditioning function of forest stands and agricultural landscape in the wider vicinity of Dačice town (328 km²) in the period 1990–2019. The air-conditioning function is manifested by the values of the surface temperature on sunny days in the growing season, with high amount of incoming solar radiation (up to 900 W.m⁻²). The surface temperature of the land cover is given mainly by the ratio between the evapotranspiration (latent heat of vaporization) and heating (sensible heat flux). The cooling ability of forest stands is evaluated by the difference between the surface and air temperature above the stand. In the case study we verify the thesis of the gradual loss of water and vegetation cover in the hills of the Bohemian-Moravian Highlands leading to an increase in surface temperatures, increasing difference between surface and air temperature, higher release of sensible heat at the expense of evapotranspiration (latent heat of vaporization). We then pay special attention to the effect of extensive decay of spruce stands after the gradation of the bark beetle (*Ips typographus*) on the distribution of solar energy and temperature. Landsat satellite images were used for the assessment, in combination with meteorological data. Energy fluxes were spatially quantified using a gradient approach implemented in the QGIS module SEBCS (Module for spatial computing of energy balance, intensity of evapotranspiration and crop water stress using satellite data). We discuss the importance of dry superheated surfaces for landscape drying, when moisture is carried away by the rising flow of heated air.

[For more information see Summary at the end of the article.](#)

Klíčová slova: energetická bilance; evapotranspirace; zemědělská krajina; družice Landsat; teplota vzduchu a povrchu

Key words: energy balance; evapotranspiration; agriculture landscape; Landsat satellite; surface and air temperature

ÚVOD

Lesy plní řadu funkcí či ekosystémových služeb (KRIEGER 2001; PILLI, PASE 2018; AZNAR-SANCHEZ et al. 2018; BONČINA et al. 2019; MAKARIEVA et al. 2020a; PECHANEC et al. 2021). Světové společenství úmluvami opakovaně deklaruje, že lesy jsou světové přírodní bohatství a mají být spravovány pro zachování ekosystémových funkcí. Z vědeckého pohledu se funkcí lesa v širokém holistickém pojetí zabýval již Alexander Humboldt v první polovině 19. století, později MARSH (1864). Jednou z potenciálně nejdůležitějších, avšak stále nedocenených funkcí, které lesní porosty poskytují, je jejich úloha při tvorbě klimatu a v tocích sluneční energie. Procesy evapotranspirace se dostávají do popředí zájmu ve 20. století (BOWEN 1926; PENMAN 1948; BUDYKO 1974; RIPL 1995). Význam evapotranspirace ve spojitosti s chladicí funkcí vegetace se objevuje v literatuře v souvislosti s významem lesních ekosystémů (ELLISON et al. 2017; SHEIL 2018), případně

i změnou krajinného pokryvu (RYSZKOWSKI, KĘDZIORA 1987; PIELKE Sr. 2005; DUVEILLER et al. 2020). Ve všeobecném vzdělání je tato základní vlastnost vegetace opomíjena a hovoříme o tzv. „plant blindness“, kdy jsme zapomněli, jaký význam mají rostliny v distribuci slunečního záření a oběhu vody díky procesu evapotranspirace. Přeměna energie rostlinami je spojována zejména s fotosyntézou, kterou se však do biomasy váže necelé jedno procento sluneční energie a opomíjí se výdej vody rostlinou (transpirace) spojený s ochlazováním a vyrovnáváním teplot. Transpirací rostlina přeměňuje desítky procent sluneční energie (RIPL 2003; SCHNEIDER, SAGAN 2005; POKORNÝ et al. 2010). Funkce rostlin v klimatu je tak často redukována na produkci/vázání skleníkových plynů (PAN et al. 2011; MYHRE et al. 2013; LE QUÉRÉ et al. 2013; IPCC 2019; EC 2019). Zejména o jehličnatých boreálních lesích někteří autoři tvrdí, že oteplují planetu, protože jsou tmavé a pohlcují mnoho sluneční energie (BETTS, BALL 1997; BALA et al. 2007). Neznalost základních fyziologických principů fungování vegetace (EC

2013) vede k zavádějící interpretaci výsledků modelů, které se zabývají tzv. biofyzikálním vlivem vegetace na klima (GOVINDASAMY et al. 2001; BONAN 2008; ZHAO, JACKSON 2014; ALKAMA, CESCATI 2016; WILLIAMS et al. 2021). V rámci těchto teorií je současně posuzováno albedo lesních porostů a evapotranspirace a jejich „chladicí účinek“ na okolí. Studie se často opírají o zprůměrovaná globální data (např. satelitní), z nichž se snaží odvodit principy fungování vegetace na úrovni lokální. Podle těchto modelů mají „chladicí schopnost“ pouze tropické lesy, u lesů mírného a boreálního pásma je tato schopnost považována za nejednoznačnou (BOUNOUA et al. 2002; LI et al. 2009; TANG et al. 2017). Výše zmíněné studie však nezohledňují lesní porost jako aktivní komplexní systém schopný vyrovnávat gradienty ve svém okolí (GORSHKOV 1995; MAKARIEVA et al. 2020b) a zároveň přecenují vliv albeda jako faktoru, který má vliv na klima (CARRER et al. 2018; SIEBER et al. 2019). Historie opakovaně zaznamenala pokles srážek a vysoušení celých oblastí po odlesnění. Recentní studie potvrzují, že v oblastech se zachovalými lesními porosty jsou vysoké dešťové srážky i hluboko ve vnitrozemí. Vědecký výklad tohoto jevu podává teorie biotické pumpy, která je vědeckou komunitou však přijímána pomalu (PEARCE 2020).

Voda a rostliny jsou hlavními regulátory toku sluneční energie, mají významnou úlohu při tvorbě klimatu a přímo ovlivňují radiční bilanci (DUVEILLER et al. 2018). Hovoříme o přímé funkci vegetace a klimatickému efektu evapotranspirace (HURYNA et al. 2014; HURYNA, POKORNÝ 2016; ELLISON et al. 2017; POKORNÝ et al. 2017). Změny krajinného pokryvu mají vliv na změnu energetické bilance území (NEDBAL, BROM 2018), což se projeví změnami povrchové teploty a poměrem latentního a zjevného tepla. Snížení evapotranspirace především v důsledku odlesnění, zhoršení zdravotního stavu porostu, odvodnění, zástavby území či obecně zbravení krajiny trvalé vegetace vede k poklesu latentního tepla výparu, růstu zjevného tepla, povrchové teploty i ohřívání přízemní atmosféry. Pokud se tak děje na velkých plochách, výsledkem je vysušená krajina a změna klimatu (NOBRE et al. 1991). Lesní porosty mají vysokou schopnost vyrovnávat teploty (snižovat i zvyšovat) ve svém okolí, a to v závislosti na aktuálních meteorologických podmínkách, sezonalitě, dostupnosti vody a zdravotním stavu porostu. Jejich chladicí účinek se projevuje zejména v teplých bezoblačných dnech. Vertikální patrovitost lesních porostů je příčinou inverze teploty a souvisí se schopností udržovat vlhkost (MAKARIEVA, GORSHKOV 2007).

Význam lesních porostů pro lokální klima lze vyjádřit prostřednictvím energetické bilance. Zdravé lesní porosty spotřebují velkou část dopadajícího slunečního záření pro výpar vody v procesu evapotranspirace. Dochází k vyššímu toku sluneční energie do latentního tepla, čímž se snižuje oteplování povrchu a přilehlé vrstvy atmosféry. Zdravé lesní porosty mají oproti okolní zemědělské krajině vysoký latentní tok tepla a povrchovou teplotu nižší, než je okolní teplota vzduchu (WICKHAM et al. 2012; MA et al. 2017). Teplota povrchu (T_s) je odvozena na základě termodynamických zákonů z detekovaného množství emitovaného tepelného záření ve vlnových délkách 4–50 μm (s hlavní emisí mezi 8–14 μm). Tato teplota odráží výměnu povrchové energie a toku vlhkosti mezi atmosférou a zemí (ANDERSON et al. 2007). Hodnoty T_s jsou získávány z termálních snímků pořízených bezpilotními, leteckými či satelitními nosiči. Teplota vzduchu (T_a) je termodynamická teplota (určená vnitřním pohybem molekul) měřená ve 2 m meteorologickými stanicemi. Je to důležitá proměnná používaná standardně ve vědě o počasí a klimatu a umožňuje dlouhodobé srovnávání. Rozdíl teploty povrchu (T_s) a teploty vzduchu (T_a) může být použit jako indikátor stavu vegetace, tzn. i lesních porostů. Teplotu vzduchu měřenou bodově na meteorologických stanicích lze pomocí různých metod (DOBESCH et al. 2007) vyjádřit i prostorově (viz výpočet rastrové teploty vzduchu T_{ar}). V případě, že je vegetace dobře zásobena vodou a v dobrém zdravotním stavu, díky procesu evapotranspirace funguje její klimatizační funkce (MILDREXLER et al. 2011). Povrchová teplota

je i za slunného počasí buď stejná, či o několik stupňů nižší. Mokřady, zdravé lesní porosty, olšiny, vrbiny, apod. za horkého letního dne vykazují povrchovou teplotu o 1–3 $^{\circ}\text{C}$ nižší, než je teplota vzduchu (v poledních hodinách), v odpoledních hodinách tento rozdíl může nabývat i 5 $^{\circ}\text{C}$. V případě nelesní vegetace je naopak povrchová teplota vyšší nežli teplota vzduchu; u holých povrchů či suché vegetace (posečená louka) může rozdíl dosahovat 10–20 $^{\circ}\text{C}$ (HESSLEROVÁ et al. 2013, 2019). Rozdíl závisí i na typu krajinného pokryvu i sezonalitě (ZHANG et al. 2015; SIMÓ et al. 2018).

Cílem studie je zhodnotit změnu klimatizační funkce lesních porostů a zemědělské krajiny v širším okolí města Dačice (328 km^2) za období 1990–2019. Klimatizační funkce se projevuje rozdíly povrchové teploty za slunných dnů ve vegetační sezóně, kdy přichází vysoké množství sluneční energie. Povrchová teplota krajinného pokryvu je dána zejména poměrem mezi evapotranspirací (tok latentního tepla výparu) a ohřevem (tok zjevného tepla). Chladicí schopnost lesních porostů hodnotíme pomocí rozdílu povrchové teploty a teploty vzduchu nad daným porostem. Na modelové studii ověřujeme tezi, jak postupná ztráta vody a změna vegetačního pokryvu vede k nárůstu povrchových teplot, zvyšujícímu se rozdílu mezi teplotou povrchovou a teplotou vzduchu, vyššímu uvolňování zjevného tepla na úkor evapotranspirace (latentního tepla výparu). Zvláštní pozornost věnujeme vlivu rozsáhlého úhynu smrkových porostů po gradaci lýkožrouta smrkového na distribuci sluneční energie a teploty. Diskutujeme význam suchých přehřátých ploch ve vysychání krajiny, kdy je vlhkost odnášena vzestupným proudem ohřátého vzduchu. Pro hodnocení byly využity družicové snímky Landsat, v kombinaci s meteorologickými daty. Energetické toky byly prostorově kvantifikovány pomocí gradientového přístupu QGIS modulu SEBCS (modul pro prostorový výpočet energetické bilance, intenzity evapotranspirace a vodního stresu porostu z družicových dat; BROM 2014). Výsledky byly součástí studie VYSKOT et al. (2018).

MATERIÁL A METODIKA

Modelové území

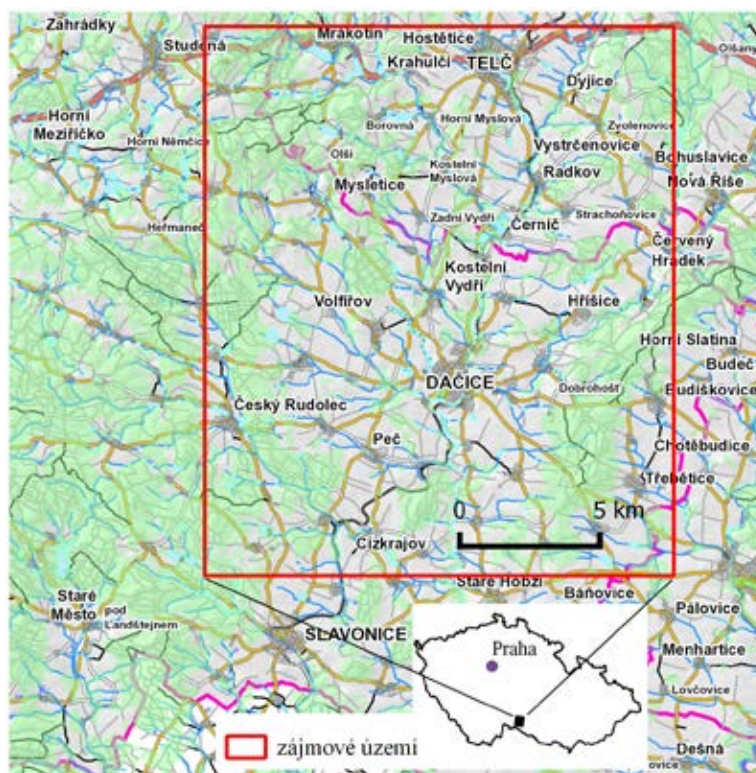
Modelové území širšího okolí města Dačice (obr. 1) je definováno souřadnicemi: 49°11'42" N, 15°18'43" E a 49°01'4" N, 15°32'23" E a velikostí území 16,74 × 19,59 km (328 km^2). Zájmová oblast s nadmořskými výškami 440–760 m n. m je tvořena pahorkatinou na mírně zdviženém zarovnaném povrchu, která v západní části území přechází do vrchoviny. Klimaticky se jedná převážně o mírně teplou oblast, v jižní části zasahující do oblasti teplé. Severovýchodní a severozápadní okraje území spadají do oblasti chladné. Téměř polovina území je zemědělsky obdělávaná, na louky a pastviny připadá cca 20 %, lesy cca 26 %, sídla necelá 4 %, vodní plochy necelé 1 % (tab. 1). Lesy Dačicka jsou součástí přírodních lesních oblastí (PLO) 16 (Českomoravská vrchovina) a 33 (Předhoří Českomoravské vrchoviny). V zastoupení lesních společenstev převažují kyselé ekologické řady, jedlobukový vegetační stupeň s adicí stupně smrkobukového. Ze souborů lesních typů jsou nejvíce zastoupeny 4S (svěží bučina), 5S (svěží jedlová bučina) a 5K (kyselá jedlová bučina). V letech 1998–2005 byly některé zemědělské plochy zalesněny. Od roku 2015 čelí Česká republika rozsáhlé kalamitě, která zasáhla ve velké míře i lesy v okolí města Dačice, s eskalací v období od roku 2018 až do současnosti. Nejdříve byly postiženy porosty ve stáří nad 100 let a stanoviště charakterizované soubory lesních typů 4S. Dále došlo k rychlému rozpadu porostů v samostatných lesích v polních enklávách a na stráních podél řeky Moravské Dyje. Vrchol kalamity v roce 2018 vedl k rozpadu téměř všech smrkových porostů od stáří 20 let. V zájmovém území 368 ha náleží městu Dačice. V těchto lesích byla v roce 2015 zásoba smrkových porostů 47 398 m^3 , do roku 2018 bylo vytěženo 38 961 m^3 (obr. 2). Podrobná data o postupu

kalamity a vývoji těžeb v modelovém území mezi lety 2003–2019 jsou dostupná ve formě mapových služeb na geoportálu ÚHÚL (2021).

Data

Pro prostorové hodnocení energetické bilance (modelového latentního tepla výparu, zjevného tepla) území a povrchové teploty byla využita data z družic Landsat 5 a 8 (Copyright ESA, distributed by the Eurimage; tab. 2). Data jsou pořizována cca 9:30 UTC pro stejné místo každých 16 dní. Pro hodnocení byly primárně vybírány scény z měsí-

ců červenec a srpen, které bývají v rámci roku nejteplejšími. V důsledku výskytu oblačnosti nad modelovým územím, musely být do hodnocení zahrnuty i červnové termíny. Ze stejného důvodu nebylo možné zachovat rovnoměrný časový interval mezi hodnocenými snímky. Doplňkovým zdrojem informací o krajinném pokryvu byla evropská databáze Corine Land Cover z let 1990, 2006, 2012 a 2018. Pro výpočet a správnou interpretaci energetické bilance území z družicových dat jsou nezbytná další doplňková data – meteorologická data a digitální model terénu. Meteorologická data byla zakoupena ze stanice Kostelní Myslová (poskytovatel dat ČHMÚ, pobočka Brno). Data o přícháze-



Obr. 1. Přehledová mapa zájmového území. Základní topografický podklad DMÚ25 (Zdroj: Národní geoportál INSPIRE)

Fig. 1. Overview map of the area of interest (zájmové území). Topographic basis of DMÚ25 (Source: National INSPIRE geo-portal)

Tab. 1.

Zastoupení kategorií krajinného pokryvu v zájmovém území; podklad Corine Land Cover a multispektrální řízená klasifikace družicových dat
Land cover in the area of interest; data sources: Corine Land Cover and multispectral supervised classification of satellite data

Krajinný pokryv/Land cover	1990 (ha)	2019 (ha)
Holé povrchy (zástavba, průmyslové areály, orná půda bez vegetace)/ Bare grounds (built-up and industrial areas, arable land without crops)	7 574 (23,1 %)	1 457 (4,4 %)
Orná půda/Arable land	10 510 (32 %)	15 945 (48,6 %)
Nelesní vegetace (louky, pastviny, nízký porost v lese, zemědělské oblasti s přirozenou vegetací)/ Non-forest vegetation (meadows, pastures, transitional woodland-shrubs, agriculture land, with significant areas of natural vegetation)	5 770 (17,6 %)	6 682 (20,4 %)
Lesy/Forests	8 703 (26,5 %)	8 468 (25,8 %)
Vodní plochy/Body of water	238 (0,7 %)	276 (0,8 %)

jícím slunečním záření byla získána z meteorologické stanice ENKI, o.p.s., v Třeboni, neboť stanice ČHMÚ tato data neměří. Digitální model terénu modelu SRTM1_V3 (Shuttle Radar Topography Mission) je volně dostupný např. z portálu Earth Explorer. Prostorové rozlišení dat je cca 30 metrů (1 arc sekunda), polohová přesnost 20 metrů, výšková 16 metrů; data pro model byla pořízena v roce 2014.

Metody

Existuje řada přístupů pro výpočet energetických toků v krajině na základě kombinace meteorologických data a dat dálkového průzkumu Země (DPZ). Přehled podávají např. KALMA et al. (2008), LI et al. (2009).

Výpočet jednotlivých složek energetické bilance vychází ze vztahu

$$R_n = G + H + \lambda E \quad (1)$$

kde R_n je celková čistá radiace, G je tok tepla do půdy, H tok zjevného tepla a λE tok latentního tepla výparu (vše $W \cdot m^{-2}$).

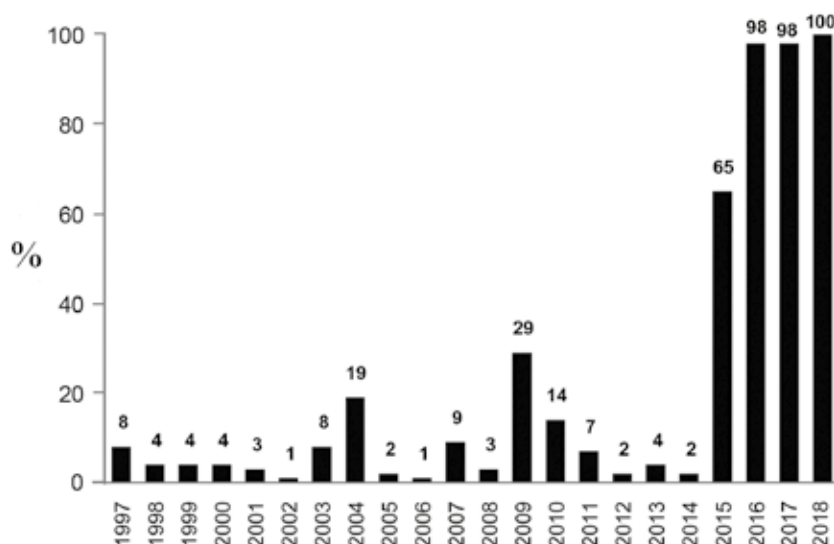
Pro samotný výpočet energetických toků byl využit modul pro prostorový výpočet energetické bilance a vodního stresu vegetace SEBCS (BROM 2014).

Vstupní data do modulu jsou následující:

- Digitální model povrchu
- Rastrová hodnota teploty vzduchu vypočtená na základě předpokladu adiabatické změny teploty vzduchu s nadmořskou výškou

$$T_{ar} = T_{st} + \frac{\Gamma}{100}(Z_{st} - DEM) \quad (2)$$

kde T_{ar} je prostorová (rastrová) vrstva teploty vzduchu ($^{\circ}C$), T_{st} teplota vzduchu naměřená na meteorologické stanici ($^{\circ}C$), Γ je adiabatický gradient změny teploty vzduchu s výškou ($0,0065^{\circ}C \cdot m^{-1}$), Z_{st} nad-



Obr. 2.

Podíl kůrovcové těžby dřeva v LHC „Městské lesy Dačice“ (zdroj: ing. Kamil Kupec, Městské lesy Dačice)

Fig. 2.

Share of bark beetle logging in the forests owned by the Dačice town (source: ing. Kamil Kupec, Dačice Municipal Forests)

Tab. 2.

Přehled zpracovaných dat a termínů jejich pořízení

Overview of processed data and terms of their acquisition

Datum/Date	Satelit/Senzor Satellite/Scanner	Prostorové rozlišení/Spatial resolution
28. 7. 1990	Landsat 5/TM	30 m optická pásma/optical bands, 120 m termální pásmo/thermal band
25. 6. 2007	Landsat 5 /TM	30 m optická pásma/optical bands, 120 m termální pásmo/thermal band
25. 7. 2013	Landsat 8/ OLI_TIRS	30 m optická pásma/optical bands, 100 m termální pásmo/thermal band
20. 6. 2017	Landsat 8/ OLI_TIRS	30 m optická pásma/optical bands, 100 m termální pásmo/thermal band
26. 6. 2019	Landsat 8/ OLI_TIRS	30 m optická pásma/optical bands, 100 m termální pásmo/thermal band

mořská výška meteorologické stanice (Kostelní Myslová 569 m n. m.) a DEM digitální model terénu (m).

- Optická data – optické spektrální kanály družic Landsat, v červené a blízké infračervené oblasti spektra s centrem kolem 680 nm a 900 nm ve formě spektrální reflektance (tj. rozsah 0–1)
- Termální data – atmosféricky korigovaná hodnota povrchové teploty (°C), vypočtená z termálních pásem Landsat dle SOBRINO et al. 2004; JIMÉNEZ-MUÑOZ et al. 2014
- Albedo vypočtené z družicových dat dle LIANG 2000; DA SILVA et al. 2016
- Meteorologická data ze stanice Kostelní Myslová – teplota vzduchu (ve 2 m), relativní vlhkost vzduchu
- Data pro výpočet geometrie záření (zeměpisná délka a šířka, čas pořízení snímku v GMT, datum pořízení snímku)

Družicové snímky jsou pořizovány za různých meteorologických podmínek a použití absolutních hodnot (ve °C, či $W.m^{-2}$) by nebylo objektivní. Proto je nezbytné pro účely mezitermínového hodnocení data standardizovat. Standardizací jsou hodnoty převedeny na jednotné měřítko, proto lze porovnávat jednotlivé roky mezi sebou, stejně tak i jednotlivé typy krajinného pokryvu. Ve studii byla použita metoda standardizace směrodatnou odchylkou. Průměr sledovaného parametru pro celé hodnocené území je roven nule. Záporné hodnoty indikují nižší hodnoty daného parametru, než je průměr modelového

území, kladné naopak vyšší hodnoty, než je průměr území. Výsledná veličina je bezrozměrná. Příklad standardizace dat pro povrchovou teplotu T_s :

$$T_s = \frac{T_i - \bar{T}}{SD} \quad (3)$$

kde T_i je povrchová teplota pixelu i , \bar{T} průměrná teplota v zájmovém území, SD směrodatná odchylka. Obdobně byl standardizován latentní tok tepla a zjevné teplo.

Krajinný pokryv v modelovém území byl rozčleněn na pět základních tříd: vodní plochy – holé povrchy – orná půda – nelesní vegetace – les. Informace o krajinném pokryvu pro každý hodnocený termín vychází ze dvou datových zdrojů. Prvním zdrojem je databáze Corine Land Cover a druhým zdrojem řízená klasifikace družicových snímků, která složila pro aktualizaci vybraných tříd CORINE. Způsob využití datových zdrojů je obsahem tab. 3. Pro řízenou klasifikaci, klasifikátor maximum likelihood, bylo využito softwarové prostředí ENVI. Pro vodní plochy bylo vybráno 13 trénovacích ploch, pro holé povrchy 17. V obou případech byly trénovací plochy rovnoměrně rozloženy po celém území. Data Corine vymezují lesní porosty, s ohledem na mapovací jednotku, jako poměrně homogenní celky. Nezobrazují drobné změny v jejich rozloze. Tato skutečnost však umožnila zhodnocení změny jejich klimatizační funkce. Vrstva lesů převzatá z CORINE (2018) tedy obsahovala původní rozlohu lesů před

Tab. 3.

Postup získání informací o krajinném pokryvu na základě kombinace dat z Corine Land Cover a výsledků řízené klasifikace

Procedure showing sources of land cover information, based on a combination of Corine Land Cover database and the results of supervised classification

Třída krajinného pokryvu/Land cover class	Využití Corine LC – sloučení tříd Corine/ Use of Corine LC – merging LC classes	Klasifikace družicových dat/Satellite data classification	
Vodní plochy/ Body of water	Ne/No	Ano/Yes	Využití spektrálních pásem Landsatu 4, 5, 2; use of Landsat channels 4, 5, 2
Holé povrchy/ Bare grounds	Ne/No	Ano/Yes	Třída reprezentuje ornou půdu bez vegetace / téměř bez vegetace a městskou zástavbu; využití spektrálních pásem Landsatu 4, 3 a 2, spektrální indexy Normalized Difference Vegetation / Water Index The class represents arable land with no vegetation / almost no vegetation and urban development; use of Landsat spectral bands 4, 3 and 2, spectral indices Normalized Difference Vegetation / Water Index
Orná půda/ Arable land	211 – nezavlažovaná orná půda 211 – non-irrigated arable land	Ne/No	Pro každý rok byla informace o orné půdě korigována informací o rozloze holé půdy v daném roce, tzn. orná půda (z Corine v daném roce) bez rozlohy holých povrchů (z klasifikovaných družicových dat v daném roce)/ For each year, the information on arable land from Corine was corrected by information on the area of bare ground and water (from classified satellite data)
Nelesní vegetace/ Non-forest vegetation	231 – pastviny 243 – zemědělské oblasti s přirozenou vegetací 324 – křoviny 231 – pastures 243 – land principally occupied by agriculture, with significant areas of natural vegetation 324 – transitional woodland shrubs	Ne/No	Pro každý rok byla informace o nelesní vegetaci korigována informací o rozloze holé půdy v daném roce, tzn. nelesní vegetace (z Corine v daném roce) bez rozlohy holých povrchů a vodních ploch (z klasifikovaných družicových dat v daném roce)/ For each year, the information on non-forest vegetation from Corine was corrected by information on the area of bare ground and water (from classified satellite data)
Les/ Forest	311 – listnaté lesy/ broad-leaved 312 – jehličnaté lesy/ coniferous 313 – smíšené lesy/ mixed	Ne/No	

kalamitní těžbou. Použití této vrstvy jako masky pro hodnocení změn energetických toků umožnilo postihnout změny způsobené změnou zdravotního stavu a následnou těžbou.

Pro všechny pixely každé kategorie krajinného pokryvu (bez vodních ploch) byly vypočteny hodnoty latentního tepla výparu, zjevného tepla, toku tepla do půdy a povrchové teploty. Tyto hodnoty byly následně standardizovány a trend vývoje byl vyjádřen regresní funkcí.

Pro hodnocení chladicí schopnosti lesních porostů byl jako další indikátor využit vztah

$$dT = T_s - T_{ar} \quad (4)$$

kde T_s je povrchová teplota vypočtená z termálních dat Landsat a T_{ar} rastrová (modelová) hodnota teploty vzduchu vypočtená na základě předpokladu adiabatické změny teploty vzduchu pro nadmořskou výšku stanice Kostelní Myslová 569 m n. m. (viz vstupní data do modulu SEBCS). Negativní (pozitivní) hodnoty dT znamenají dobrou (zhoršenou) chladicí schopnost lesních porostů.

VÝSLEDKY

Hodnocení energetické bilance lesních porostů, nelesní vegetace, orné půdy a holých povrchů je založeno na interpretaci standardizovaných hodnot latentního tepla výparu, zjevného tepla, toku tepla do půdy a povrchové teploty (obr. 3a, 3b, 3c). Průměr sledovaného parametru pro celé hodnocené území je roven nule. Záporné hodnoty indikují nižší hodnoty daného parametru než je průměr modelového území, kladné naopak vyšší hodnoty než je průměr území. Pro zhod-

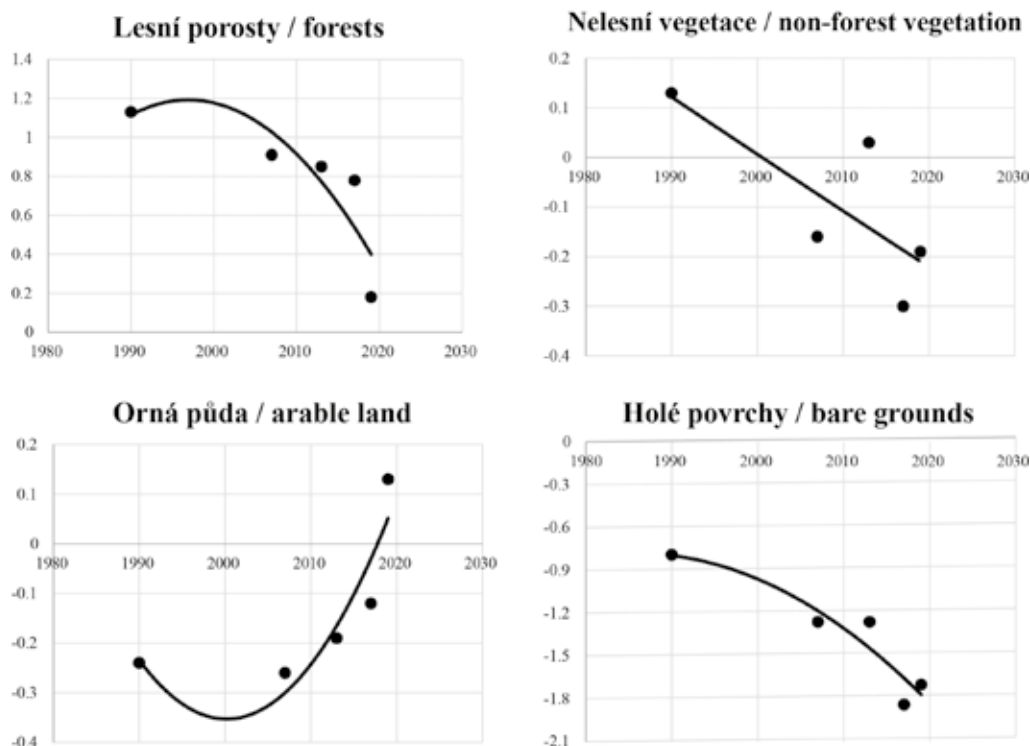
nocení trendu vývoje sledovaných parametrů byla použita spojnice s polynomickým typem trendu a hodnota spolehlivosti R (tab. 4). Na tok tepla do půdy připadá cca 10 % dopadajícího slunečního záření (méně u povrchů s vegetací, vyšší hodnoty u holých povrchů). Zároveň nebyl zjištěn významný vývojový trend, proto ve výsledných grafech tento tok neuvádíme.

Lesní porosty

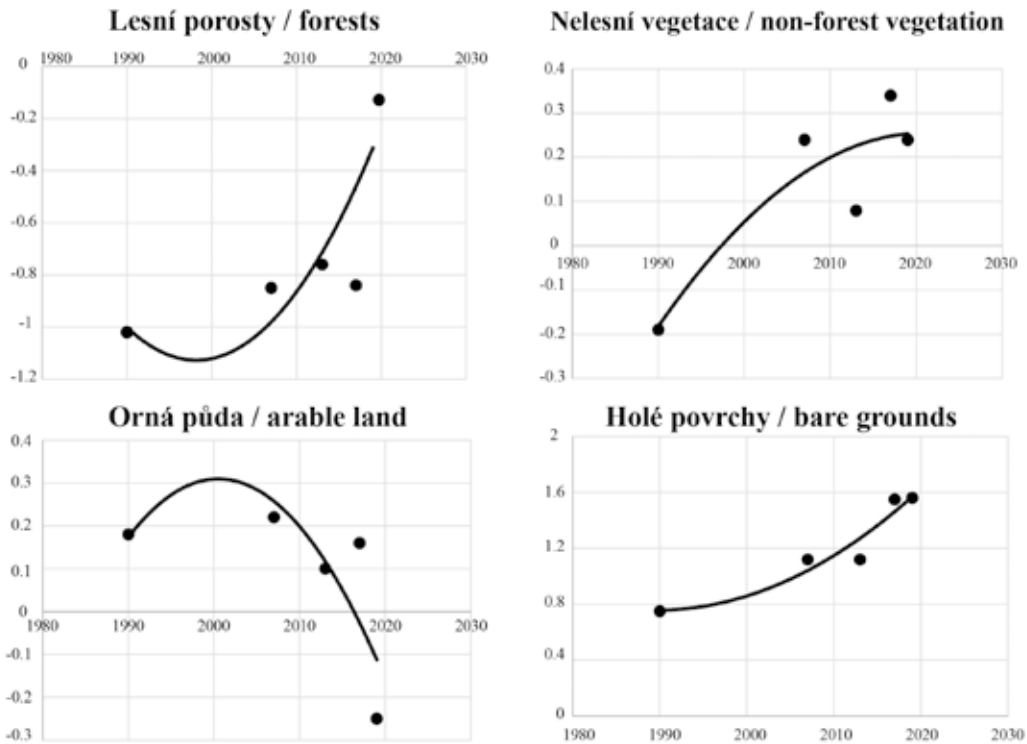
Lesní porosty jsou v porovnání s ostatními typy krajinného pokryvu charakterizovány nejvyššími hodnotami latentního tepla výparu (λE), nejnižšími hodnotami toku tepla do půdy (G) a toku zjevného tepla (H), a to ve všech hodnocených termínech. Z hlediska časových změn však dochází v celém hodnoceném období k výrazným změnám obou hlavních toků – k výraznému poklesu hodnot λE z 1,13 (rok 1990) k 0,18 v roce 2019 (obr. 3a). Naopak tok H výrazně roste z hodnoty -1 (rok 1990) k hodnotě 0 v roce 2019 (obr. 3b). Obě hodnoty se v roce 2019 již téměř shodují s průměrem modelového území. Lesní porosty jsou nejchladnějším typem krajinného pokryvu, a to ve všech hodnocených termínech (obr. 3c). V letech 1990–2017 byl rozdíl povrchové teploty T_s oproti ostatním typům krajinného pokryvu o 2–3 °C nižší oproti nelesní vegetaci a orné půdě, v případě holých povrchů nižší o 5,5–8,6 °C. V roce 2019 se teplota prudce zvyšuje a je téměř stejná s ostatními typy krajinného pokryvu, kromě holých povrchů (cca o 2 °C nižší).

Nelesní vegetace

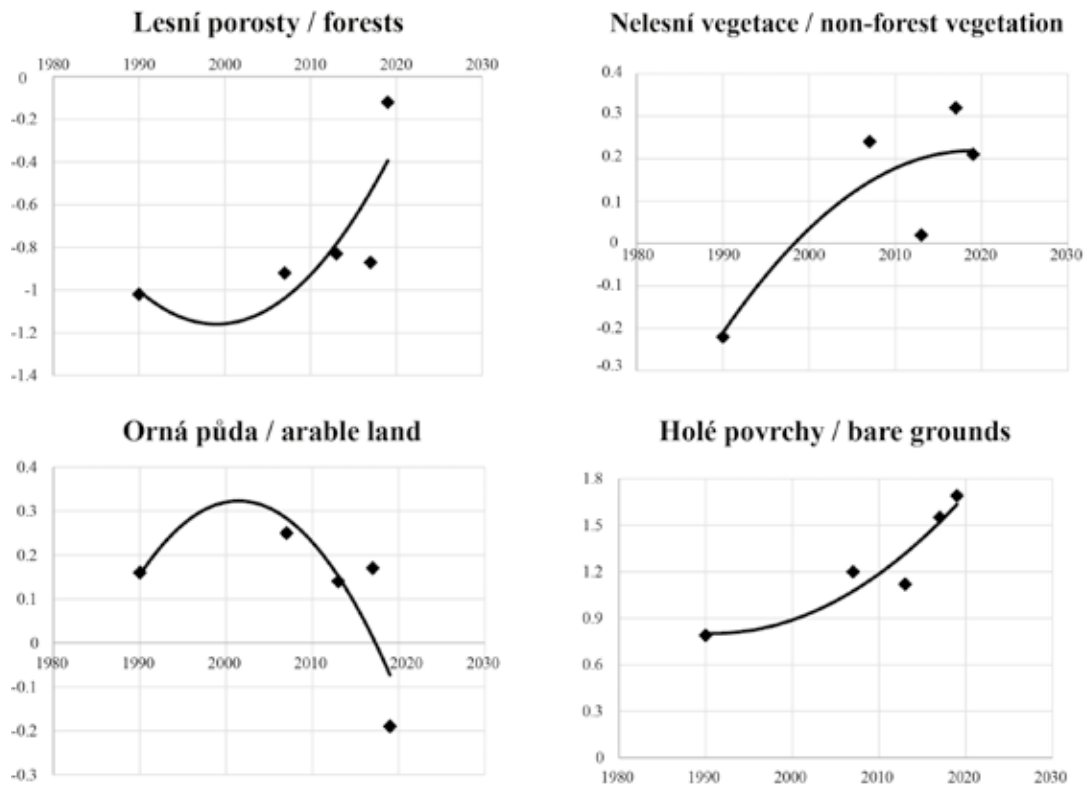
Nelesní vegetace je charakterizována nižšími standardizovanými hodnotami povrchové teploty v termínu 1990 (-0,22), v ostatních ter-



Obr. 3a.
Standardizované toky latentního tepla výparu
Fig. 3a.
Standardized values of latent heat fluxes



Obr. 3b.
Standardizované toky zjevného tepla
Fig. 3b.
Standardized values of sensible heat flux



Obr. 3c.
Standardizované hodnoty povrchové teploty
Fig. 3c.
Standardized values of surface temperature

mínech se hodnoty pohybují již nad průměrem modelového území (0,04–0,32) a mají mírně stoupající trend. Povrchová teplota je o 2–4 °C vyšší než teplota lesních porostů, přibližně stejná jako teplota orné půdy a o 3–5 °C nižší než v případě holých povrchů (obr. 3c). Vývoj λE (obr. 3a) vykazuje klesající trend (v roce 1990 0,13; až -0,19 v roce 2019); tok H (obr. 3b) mírně narůstá (rok 1990 -0,19; v roce 2019 0,24), stejně tak jako hodnota toku tepla do půdy, která je ve všech termínech nižší (kromě roku 2017) než průměr hodnoceného území.

Orná půda

Hodnoty povrchové teploty i energetických toků jsou ovlivněny typem plodin, které se v hodnoceném termínu v modelovém území pěstovaly. Je rozdílné, zda se jedná o pšenici či řepku, která je např. v červnovém termínu ještě charakterizována vyšší vlhkostí, a zelenou biomasou. V červencovém termínu jsou obě plodiny již zralé, bez zelené biomasy a s nízkou vlhkostí. Tyto parametry ovlivňují hodnocené parametry. Informace o typu plodin pěstovaných v modelovém území nebyla dostupná. V letech 1990–2017 byla povrchová teplota orné půdy téměř shodná s teplotou nelesní vegetace; o 3–4 °C vyšší než teplota lesních porostů a o 2–5 °C nižší než teplota holých povrchů (obr. 3c). Standardizované hodnoty povrchové teploty, H i λE (obr. 3a, 3b) se pohybovaly nad průměrem modelového území, v závislosti na skladbě plodin v území. Výjimkou je rok 2019, kdy hodnoty T_s byly nejnižší ze všech sledovaných kategorií krajinného pokryvu (-0,19) a zároveň λE se zvýšil na 0,13. Tato skutečnost se odrazila v poklesu H na -0,25. Orná půda je jedinou kategorií, kde byl zaznamenán pomalý kontinuální růst latentního tepla λE výparu (z hodnoty -0,24 v roce 1990 k 0,13 v roce 2019).

Holé povrchy

Holé povrchy jsou kategorií, jejíž rozloha se mění v závislosti na sklizni plodin. Jsou charakterizovány nejvyššími hodnotami všech posuzovaných parametrů (kromě latentního tepla výparu). Povrchové teploty jsou oproti povrchům s nelesní vegetací či plodinami o 2–3 °C vyšší než v letech 1990 a 2007, v roce 2013 a 2017 se rozdíl zvyšuje cca na 5 °C. Oproti lesním porostům jsou rozdíly cca +5 °C v roce 1990 a 2007, v roce 2013 + 6 °C a v roce 2017 necelých +9 °C. Tuto skutečnost potvrzuje i graf standardizované teploty, jejíž trend je mírně rostoucí (obr. 3c). Standardizované hodnoty toků G a H jsou, v porovnání s ostatními typy krajinného pokryvu, výrazně vyšší. Rostoucí trend vykazuje tok zjevného tepla (obr. 3b) (0,75 až 1,56), naopak tok latentního tepla výparu (obr. 3a) klesá (-0,89 až -1,84). Změny toku tepla do půdy nejsou příliš významné, nicméně vykazují rostoucí trend.

Chladicí schopnost krajinného pokryvu

Chladicí schopnost krajinného pokryvu lze vyjádřit pomocí rozdílu teploty povrchu a vzduchu. Vegetace dostatečně zásobená vodou je schopna prostřednictvím evapotranspirace snižovat povrchovou teplotu, která je o několik stupňů nižší, či stejná, jako teplota vzduchu. U lesních porostů modelového území pozorujeme výrazné změny v rozdílu dT (obr. 4). V roce 1990 se průměrný rozdíl pohybuje okolo -1 °C, v následujících letech dochází k jeho růstu (tab. 5), s maximem v roce 2017 (téměř 4 °C). Až do roku 2017 jsou v porovnání s okolní krajinou lesní porosty chladnější. V roce 2019 je patrná výrazná změna. Ačkoliv průměrný rozdíl dT dosahuje 3 °C, je zároveň patrná výrazná územní diference. Poškozené, či již vytěžené porosty ve východní a centrální části území vykazují povrchovou teplotu až o 10 °C vyšší než je teplota vzduchu, v západní části je rozdíl pouze 0–1 °C. Nelesní vegetace i orná půda vykazují podobné hodnoty rozdílu dT , a to 4–7 °C v letech 2007–2017. V roce 2019 vykazuje orná půda lepší chladicí schopnost než lesní porosty s rozdílem 2,5 °C. V roce 1990 byla u orné půdy průměrná hodnota rozdílu 1,1 °C a 2,2 °C. Rozdíl

povrchové teploty a teploty vzduchu je v případě holých povrchů 4 °C v roce 1990, v následujících letech roste na 6,3 °C v roce 2007; 9,1 °C v roce 2013, 8 °C v roce 2019, s maximem 12 °C v roce 2017.

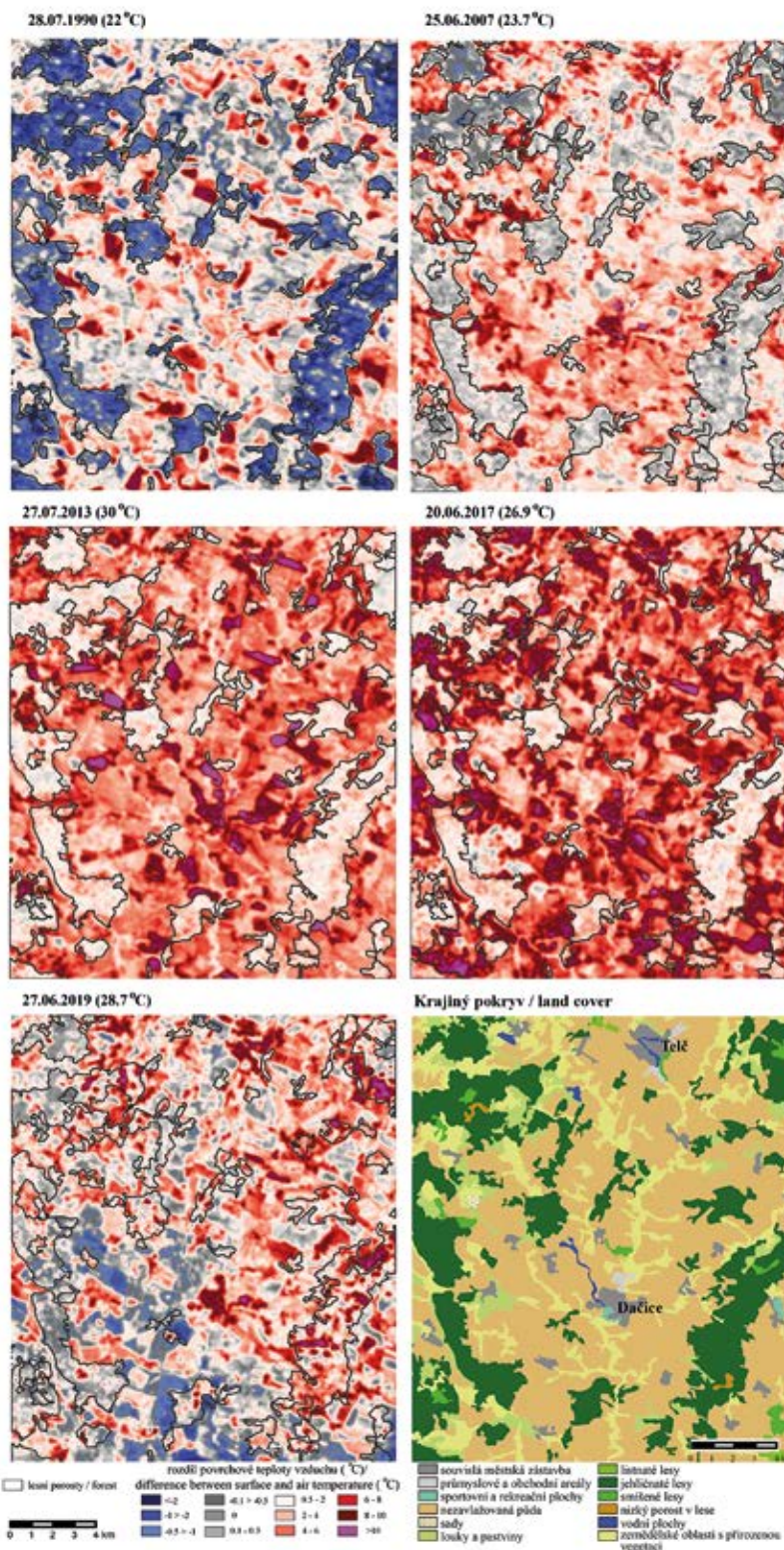
DISKUSE A ZÁVĚR

V lesních porostech v modelovém území dochází cca od roku 2015 k rychlejšímu zhoršování zdravotního stavu v důsledku působení biotických i abiotických činitelů. Nejvýznamnějším faktorem je srážkový deficit, který za období 2015–2019 dosáhl na stanici Kostelní Myslová téměř 390 mm (oproti průměrnému ročnímu úhrnu srážek 1961–2013; ČHMÚ), s maximem v roce 2016 (153 mm) a nárůst teplot zejména ve vegetačním období (cca o 2 °C). Vlivem těchto faktorů dochází k expanzi lýkožrouta smrkového a dalších škůdců. Podle dat ÚHÚL (2021) byly v roce 2017 lesní porosty v zájmovém území z hlediska poškození a mortality řazeny do kategorie 0–I (tzn. porosty zdravé až s mírnými příznaky), se sporadickým výskytem kategorií II–IV (střední až velmi silné ohrožení). Porosty s mírnými příznaky se vyskytovaly především v západní a jižní části modelového území. Kůrovcová kalamita se rozbíhala v letech 2016 a 2017. Během následujících dvou let (2018, 2019) lesní hospodáři čelili masovému úhynu dospělých smrkových porostů i porostů mladších kolem 40 let věku. V detailu je dynamika kůrovcových těžeb zpracována pro Městské lesy Dačice (cca 400 ha), viz Vyskoř et al. 2018. Ve východní části Českomoravské vrchoviny uschly v letech 2017–2019 rozsáhlé porosty, přičemž často nešlo o postupné šíření z malých zanedbaných ohnišek, ale o synchronní velkoplošný úhyn, který proběhl během jediné sezóny. Situace se zhoršila zejména v roce 2019. Postiženy byly především porosty ve východní části zájmového území, tj. mezi obcemi Staré Hobzí – Nová Říše a enklávy v okolí Dačic. Postup těžby v roce 2020, který (dosud) nebyl hodnocen, lze získat z leteckých snímků. Pokračuje těžba ve východní části modelového území a přidává se i do roku 2019 méně zasažená západní část, tzn. území mezi obcemi Dolní Bolíkov – Český Rudolec – Heřmaněč. Podrobné údaje poskytuje tzv. kůrovcová mapa průběžně zpracovávaná pracovníky ÚHÚL (2021) na základě dat z družicových a leteckých snímků. K dispozici jsou však údaje pouze do roku 2017(19). Dle údajů Lesní ochranné služby bylo v oblasti okresů Jindřichův Hradec a Dačice v letech 2017–2019 odhadem vytěženo na 2 miliony m³ kůrovcového dřeva, což při průměrné zásobě 350 m³/ha představuje plochu 6000 ha. Nutno přičíst plochu dosud nevytěžených porostů 1–2 tisíce ha, především mladších 40 let, které následkem masivního rozvoje kůrovce též uhynuly. Na základě leteckých snímků (2020) lze odhadnout, že v modelovém území bylo v letech 2017–2020 vytěženo až 50 % lesních, převážně smrkových porostů, tj. více než 4000 ha (z cca 8800 ha v roce 1990).

Studie je zaměřena na změnu poměru mezi uvolňovaným zjevným teplem a sluneční energií vázanou do vodní páry (latentní teplo výparu). Tento tzv. Bowenův poměr byl definován v roce 1926. Snížená evapotranspirace porostů se projeví zvýšenou teplotou porostů ve srovnání s ostatním krajinným pokryvem ve studované oblasti. Strom napadený lýkožroutem ztrácí zelené jehličí a postupně uschává. Předpokládáme, že ke snížení evapotranspirace (i Bowenova poměru), a tím i zvýšení teploty, dochází již před těžbou evidovanou v podkladech ÚHÚL (2021). Náhlý nárůst teploty lesních porostů vůči okolní krajinné odpovídá ve vybraných termínech téměř třicetileté řady rychlému úhynu smrkových porostů, způsobeném gradací lýkožrouta, která probíhá od roku 2017 až dosud a byla pravděpodobně podpořena srážkovým deficitem od roku 2015. Zhoršování stavu lesních porostů se projevilo kontinuálním snižováním latentního tepla výparu, růstem zjevného tepla i povrchové teploty, zejména v roce 2019. Takové výrazné změny ve sledovaných parametrech nebyly zaznamenány u žádného ze sledovaných typů krajinného pokryvu (obr. 3a, 3b, 3c). Poměrně jednoduché, avšak dostatečně vypovídající hodnocení chladicí schop-

Tab. 4. Regresní funkce charakterizující trend vývoje sledovaných parametrů
Regression functions characterizing the trend of assessed parameters

	ΔE	H	G	T _s
Lesní porosty/ Forests	$y = -0,0016x^2 + 6,4948x - 6483,6$ R ² = 0,75	$y = 0,0019x^2 - 7,5211x + 7513,2$ R ² = 0,59	$y = 0,0024x^2 - 9,5819x + 9589,8$ R ² = 0,69	$y = 0,0019x^2 - 7,6759x + 7671$ R ² = 0,61
Nelesní vegetace/ Non-forest vegetation	$y = 7E-06x^2 - 0,0378x + 49,323$ R ² = 0,59	$y = -0,0005x^2 + 1,8381x - 1857,2$ R ² = 0,79	$y = 0,0003x^2 - 1,3883x + 1378,1$ R ² = 0,55	$y = -0,0005x^2 + 2,0677x - 2087,1$ R ² = 0,72
Orná půda/ Arable land	$y = 0,0011x^2 - 4,5669x + 4567$ R ² = 0,84	$y = -0,0012x^2 + 4,9371x - 4938$ R ² = 0,62	$y = -0,0022x^2 + 8,8305x - 8854,6$ R ² = 0,91	$y = -0,0013x^2 + 5,1462x - 5149,6$ R ² = 0,66
Holé povrchy/ Bare grounds	$y = -0,0009x^2 + 3,5673x - 3542,7$ R ² = 0,89	$y = 0,0009x^2 - 3,7398x + 3721,1$ R ² = 0,92	$y = 0,0001x^2 - 0,4886x + 469,66$ R ² = 0,61	$y = 0,0011x^2 - 4,2163x + 4198,1$ R ² = 0,89



Obr. 4. Rozdíly povrchové teploty T_s a modelované teploty vzduchu T_{air} v zájmovém území. V závorce je uvedena teplota vzduchu na stanici Kostelní Myslová. Pro lepší interpretaci je připojena mapa krajinného pokryvu vycházející z databáze Corine Land Cover 2018

Fig. 4. Differences in surface T_s and modeled air temperature T_{air} in the area of interest. The air temperature at the Kostelní Myslová station is given in brackets. For better interpretation, a map of the land cover (LC) based on the Corine LC 2018 database is attached. The LC legend (according columns): 1st continuous urban fabric; industrial or commercial units; sport and leisure facilities; non-irrigated arable land; orchards; pastures; 2nd broad-leaved; coniferous; mixed forest; transitional woodland shrub; water bodies; land principally occupied by agriculture, with significant areas of natural vegetation

nosti lesních porostů je založeno na rozdílu povrchové teploty porostu a teplotě vzduchu. Tento indikátor vypovídá o schopnosti porostu transpirovat, a tím se ochlazovat. V případě dostatku vody v porostu a jeho dobrého ekofyziologického stavu je povrchová teplota o 1–2 °C nižší než teplota vzduchu (rok 1990), v případě nedostatku vody se tento rozdíl zvyšuje (povrchová teplota je vyšší než teplota vzduchu), jako např. ve velmi suchém roce 2017 (4 °C). Zhoršování chladicí schopnosti porostů se v roce 2019 projevilo především ve východní, jižní a střední části zájmového území, kde zároveň došlo k rozsáhlé těžbě (ÚHÚL 2021). V extrémních případech rozdíl teplot na holi- nách dosahuje více než 10 °C.

Předpokládáme, že zhoršení chladicí schopnosti lesů a zhoršení jejich zdravotního stavu může být následkem přehřívání okolní zemědělské krajiny. Výsledky ukazují, že okolní krajina se postupně ohřívá, klesá výpar luk a pastvin a stoupá jejich teplota a roste zjevné teplo. Stejný trend kontinuálního růstu zjevného tepla a povrchové teploty se projevuje u holých povrchů, což je nejen zástavba, ale i zemědělská půda bez plodin. U orné půdy byl výraznější trend změny teploty zjevného tepla a latentního tepla prokázán, neboť tyto toky jsou ovlivněny typem plodin, které jsou v daném termínu na sledovaném území pěstovány. V případě, že plodiny mají dostatek vody, dokáží se krátkodobě transpirací ochlazovat. Tato skutečnost je patrná z termínu 2019. Kromě zadržení vody v krajině je doplňkovým řešením pro její ochlazování kontinuální vegetační pokryv, např. pěstování meziplodin. Po sklizni je zemědělská půda holá, což přispívá k přehřívání krajiny v období červenec – srpen. Zelená vegetace by dokázala ochladit okolní krajinu alespoň o 2–4 °C. Princip kontinuálního pokryvu půdy by měl být aplikován i v rámci lesních porostů, u kterých by měl být eliminován systém holosečného hospodaření. Teplota na pasekách bez vegetačního pokryvu dosahuje v horkých letních dnech 40–50 °C. Vysoká povrchová teplota těchto ploch je příčinou rychlejšího odvodnění a vysoušení, zrychlených mineralizačních procesů v půdě. Na těchto plochách jsou vysoké denní teplotní amplitudy. V případě nové výsadby jsou semenáčky vystaveny teplotám, kterým nejsou schopny čelit a usychají. Pionýrská vegetace na odlesněných plochách dokáže vytvořit příznivější klima pro novou výsadbu, udržet nižší povrchovou teplotu i vlhkost. Vzrostlý les o několika patrech vegetace komunikuje s atmosférou hlavně korunami stromů. V takovém porostu je inverzní teplota, tzn. nižší teplota v podrostu nežli v korunách stromů. Vzduch, a tedy i vlhkost se udržují v porostu, protože chladnější vzduch je těžší a nestoupá vzhůru (МАКАРИЕВА, ГОРШКОВ 2007). Přestože je teplota na pasekách s travním porostem v porovnání s teplotou holin nižší o několik stupňů, tato vegetace svojí funkcí nedokáže nahradit klimatizační funkci vzrostlého lesa.

Pokles evapotranspirace, a tím i latentního tepla je příčinou růstu teploty povrchu (průměrně u všech povrchů o 1 °C) i zjevného tepla. Nelze předpokládat, že nižší výpar kompenzuje vláhový deficit území. Naopak vede k intenzivnímu přehřívání krajiny. Poklesem výparu o 100 mg.s⁻¹.m⁻² se uvolní 240 W.m⁻². Ke zhoršení chladicí schopnosti lesních porostů došlo zejména u drobných lesních celků (s rozlohou desítek hektarů) a u lesů, které jsou vystaveny vlivu teplejšího klimatu zasahujícího do východní části zájmového území. Přehřáté a odvodněné zemědělské oblasti sousedního regionu jižní Moravy za horkých letních dnů mohou mít povrchovou teplotu 40 °C (i více). Od přehřáté plochy se ohřívá vzduch a stoupá vzhůru. Vzduch o teplotě 40 °C a relativní vlhkosti 20 % obsahuje 10 g vody (ve formě vodní páry) v m³. I při velmi pomalém vzestupném proudění 0,1 m/s vystoupá za jednu hodinu nad 1 m² do atmosféry 360 m³ ohřátého vzduchu, který odnesl 3,6 kg vody, za deset hodin 36 kg vody. Ohřáté plochy „nasávají“ vzduch z okolních vlhčích ploch, tedy ze sousedního lesa. Krajina je intenzivněji vysušována a postupně je příčinou vysychání oblastí, které nedostatkem vody dosud netrpěly. Tato skutečnost je pravděpodobně jednou z příčin změny ekofyziologického stavu lesních porostů.

VYSKOT et al. (2018) kvantifikovali ekosystémovou újmu na funkcích lesa v modelovém území pro Městské lesy Dačice (tj. 369 ha). Ve sledovaném období 2015–2018 došlo ke změnám zdravotního stavu lesů v důsledku synergie ekosystémových disturbancí. Zásadní negativní vlivy měl zvýšený teplotní režim, hydrický deficit, sucho a sekundární adice destrukcí biotickými a abiotickými činiteli. Do stupňů poškození a degradace (II, IIIa, IIIb) přešlo téměř 30 % porostů, destruováno bylo 10 % porostů (stupeň IV). Nejvíce byly postiženy smrkové porosty středních a vyšších poloh, ale i porosty borové a jasanové. Degradaci lesa došlo k přímé ztrátě jejich ekosystémových funkčních účinků nejen v porostním prostředí, ale i s následnými vlivy na okolí. Celková finanční výše ekosystémové újmy na funkci lesa vzniklá za období 2015–2018 byla vyčíslena na 90 995,6 tis. Kč (v roce 2015 finanční hodnota činila 498 013,6 tis. Kč, v roce 2018 pak 457 402,5 tis. Kč).

Výsledky ukazují, že okolní krajina se postupně ohřívá, klesá výpar luk a pastvin a stoupá jejich teplota (roste zjevné teplo). Především drobné lesní celky s rozlohou desítek hektarů nemohou udržet vlastní klima ve vysychající krajině. Jsou náchylné na působení abiotických i biotických činitelů, jejichž následkem se, v porovnání s nelesní vegetací či plodinami, výrazně mění jejich energetická bilance, a tím i klimatizační funkce. Lesy vysychají následkem přehřáté a vysušené okolní zemědělské krajiny. Náprava je možná kombinací opatření zahrnující a) novou strategii hospodaření ovlivňující především druhovou, věkovou a prostorovou strukturu porostů a b) systémová opatření na zadržení vody v zemědělské krajině mimo les s cílem postupného snižování její povrchové teploty (VYSKOT et al. 2018).

Tab. 5.

Průměrné hodnoty rozdílu povrchové teploty a rastrové teploty vzduchu (°C) pro čtyři typy krajinného pokryvu v době přeletu družice Landsat

Average values of the difference between surface and raster air temperature (°C) for four land cover types at the time of the Landsat satellite passing

	28. 7. 1990 10:10 SEČ/CET	25. 6. 2007 10:45 SEČ/CET	27. 7. 2013 10:50 SEČ/CET	20. 6. 2017 10:50 SEČ/CET	26. 6. 2019 10:50 SEČ/CET
Lesní porosty/Forests	-1	1,3	3,2	3,9	3,1
Nelesní vegetace/Non-forest vegetation	1,1	3,9	5,6	7,5	3,8
Orná půda/Arable land	2,2	3,9	5,8	6,8	2,5
Holé povrchy/Bare grounds	4	6,3	9,1	12	7,9

Poděkování:

Príspevek byl zpracován v rámci institucionální podpory MŠMT pro rozvoj výzkumné organizace. Děkujeme ing. Janu Liškovi z VÚLHM, v. v. i., za odborné konzultace a ing. Kamilu Kupcovi z Městských lesů Dačice za odborné konzultace a poskytnutá data.

LITERATURA

- ALKAMA R., CESCATTI A. 2016. Biophysical climate impacts of recent changes in global forest cover. *Science*, 351: 600–604. DOI: 10.1126/science.aac8083
- ANDERSON M.C., NORMAN J.M., MECIKALSKI J.R., OTKIN J.A., KUSTAS W.P. 2007. A climatological study of evapotranspiration and moisture stress across the continental United States based on thermal remote sensing: 1 Model formulation. *Journal of Geophysical Research*, 112: D10117. DOI: 10.1029/2006JD007506
- AZNAR-SANCHEZ J.A., BELMONTE-UREÑA L.J., LÓPEZ-SERRANO M.J., VELASCO-MUÑOZ J.F. 2018. Forest ecosystem services: an analysis of worldwide research. *Forests*, 9 (8): 453. DOI: 10.3390/f9080453
- BALA G., CALDEIRA K., WICKETT M., PHILLIPS T.J., LOBELL D.B., DELIRE C., MIRIN A. 2007. Combined climate and carbon-cycle effects of large-scale deforestation, *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA*, 104: 6550–6555. DOI: 10.1073/pnas.0608998104
- BETTS A.K., BALL J.H. 1997. Albedo over the boreal forest. *Journal of Geophysical Research*, 102: 28901–28909. DOI: 10.1029/96JD03876
- BONAN G.B. 2008. Forests and climate change: forcings, feedbacks, and the climate benefits of forests. *Science*, 320: 1444–1449. DOI: 10.1126/science.1155121
- BONČINA A., SIMONČIČ T., ROSSET C. 2019. Assessment of the concept of forest functions in Central European forestry. *Environmental Science and Policy*, 99: 123–135. DOI: 10.1016/j.envsci.2019.05.009
- BOUNOUA L., DEFRIES R., COLLATZ G.J., SELLERS P., KHAN H. 2002. Effects of land cover conversion on surface climate. *Climate Change*, 52: 29–64.
- BOWEN I.S. 1926. The ratio of heat losses by conduction and by evaporation from any water surface. *Physical Review*, 27 (6): 779–787.
- BROM J. 2014. Module for spatial computing of surface energy balance and crop water stress “SEBCS 0.1”. České Budějovice, University of South Bohemia. + manuál. Dostupné na/Available on: http://www.jbrom.smoothcollie.eu/?page_id=147
- BUDYKO M.I. 1974. *Climate and life*. New York, Academic Press: 507s.
- CARRER D., PIQUE G., FERLIQ M., CEAMANOS X., CESCHIA E. 2018. What is the potential of cropland albedo management in the fight against global warming? A case study based on the use of cover crops. *Environmental Research Letters*, 13: 044030. DOI: 10.1088/1748-9326/aab650
- DA SILVA B.B., BRAGA A.C., BRAGA C.C. 2016. Procedures for calculation of the albedo with OLI-Landsat 8 images: Application to the Brazilian semi-arid. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 20 (1): 3–8.
- DOBESCH H., DUMOLARD P., DYRAS I. (eds.) 2007. *Spatial interpolation for climate data: the use of GIS in climatology and meteorology*. London, ISTE: 284 s. Geographical Information Systems Series.
- DUVEILLER G., HOOKER J., CESCATTI A. 2018. The mark of vegetation change on Earth's surface energy balance. *Nature Communications*, 9: 679. DOI: 10.1038/s41467-017-02810-8
- DUVEILLER G., CAPORASO L., ABAD-VIÑASA R., PERUGINI L., GRASSIA G., ARNETH A., CESCATTI A. 2020. Local biophysical effects of land use and land cover change: towards an assessment tool for policy makers. *Land Use Policy*, 91: 104382. DOI: 10.1016/j.landusepol.2019.104382
- EC. 2013. Sdělení komise evropskému parlamentu, radě, evropskému hospodářskému a sociálnímu výboru a výboru regionů. *Zelená infrastruktura – zlepšování přírodního kapitálu Evropy*. COM(2013) 249 final. [on-line]. EUR-Lex [cit. 2021-03-05]. Dostupné na/Available on: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/CS/TXT/?uri=CELEX%3A52013DC0249>
- EC. 2019. Communication from the commission. COM(2019) 640 final. *The European Green Deal* [on-line] EUR-Lex [cit. 2021-03-05]. Dostupné na/Available on: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?qid=1588580774040&uri=CELEX:52019DC0640>
- ELLISON D., MORRIS CE., LOCATELLI B., SHEIL D., COHEN J., MURDIYARSO D., GUTIERREZ V., VAN NOORDWIJK M., CREED I.F., POKORNÝ J., GAVEAU D., SPRACKLEN D.V., TOBELLA A.B., ILSTEDT U., TEULING A.J., GEBREHIWOT S.G., SANDS D.C., MUYS B., VERBIST B., SPRINGAY E., SUGANDI Y., SULLIVAN C.A. 2017. Trees, forests and water: cool insights for a hot world. *Global Environmental Change*, 43: 51 – 61. DOI: 10.1016/j.gloenvcha.2017.01.002
- GORSHKOV V.G. 1995. *Physical and biological bases of life stability. Man, biota, environment*. Berlin, Springer: 340 s.
- GOVINDASAMY B., DUFFY P.B., CALDEIRA K. 2001. Land use changes and Northern Hemisphere cooling. *Geophysical Research Letters*, 28: 291–294. DOI: 10.1029/2000GL006121
- HESSLEROVÁ P., POKORNÝ J., BROM J., REJŠKOVÁ – PROCHÁZKOVÁ A. 2013. Daily dynamics of radiation surface temperature of different land cover types in a temperate cultural landscape: Consequences for the local climate. *Ecological Engineering*, 54: 145–154. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2013.01.036
- HESSLEROVÁ P., POKORNÝ J., HURYNA H., HARPER D. 2019. Wetlands and forests regulate climate via evapotranspiration. In: An, S. and Verhoeven J. T.A. (eds): *Wetlands: functions, restoration and wise use*. Cham, Springer: 63–93. *Ecological Studies, Analysis and Synthesis* 238
- HURYNA H., BROM J., POKORNÝ J. 2014. The importance of wetlands in the energy balance of an agricultural landscape. *Wetlands Ecology and Management*, 22 (4): 363–381. DOI: 10.1007/s11273-013-9334-2
- HURYNA H., POKORNÝ J. 2016. The role of water and vegetation in the distribution of solar energy and local climate: a review. *Folia Geobotanica*, 51: 191–208. DOI: 10.1007/s12224-016-9261-0
- IPCC. 2019. *Climate change and land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems*. Intergovernmental Panel on Climate Change: 896 s. [cit. 2018-01-31]. Dostupné na/Available on: <https://www.ipcc.ch/srcc/>
- JIMÉNEZ-MUÑOZ J.C., SOBRINO J.A., SKOKOVIC D., MATTAR C., CRISTÓBAL J. 2014. Land surface temperature retrieval methods from Landsat-8 thermal infrared sensor data. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 11 (10): 1840–1843. DOI: 10.1109/LGRS.2014.2312032

- KALMA J.D., McVICAR T.R., McCABE M.F. 2008. Estimating land surface evaporation: a review of methods using remotely sensed surface temperature data. *Surveys in Geophysics*, 29: 421–469. DOI: 10.1007/s10712-008-9037-z
- KRIEGER D.J. 2001. The economic value of forest ecosystem services: a review. New York, The Wilderness Society: 31 s. Dostupné na/Available on: <https://www.sierraforestlegacy.org/Resources/Conservation/FireForestEcology/ForestEconomics/EcosystemServices.pdf>
- LE QUÉRÉ C., PETERS G.P., ANDRES R.J., ANDREW R.M., BODEN T.A., CIAIS P., FRIEDLINGSTEIN P., HOUGHTON R.A., MARLAND G., MORIARTY R., SITCH S., TANS P., ARNETH A., ARVANITIS A., BAKKER D.C.E., BOPP L., CANADELL J.G., CHINI L.P., DONEY S.C., HARPER A., HARRIS I., HOUSE J.I., JAIN A.K., JONES S.D., KATO E., KEELING R.F., KLEIN GOLDEWIJK K., KÖRTZINGER A., KOVEN C., LEFÈVRE N., MAIGNAN F., OMAR A., ONO T., PARK G.-H., PFEIL B., POULTER B., RAUPACH M.R., REGNIER P., RÖDENBECK C., SAITO S., SCHWINGER J., SEGSCHNEIDER J., STOCKER B.D., TAKAHASHI T., TILBROOK B., VAN HEUVEN S., VIOVY N., WANNINKHOF R., WILTSHIRE A., ZAEHLE S. 2013. Global carbon budget. *Earth System Science Data*, 6: 235–263. DOI: 10.5194/essd-6-235-2014
- LI Z.L., TANG R., WAN Z., BI Y., ZHOU C., TANG B., YAN G., ZHANG X. 2009. A review of current methodologies for regional evapotranspiration estimation from remotely sensed data. *Sensors*, 9: 3801–3853. DOI: 10.3390/s90503801
- LIANG S. 2000. Narrowband to broadband conversions of land surface albedo I: Algorithms. *Remote Sensing of Environment*, 76: 213–238. DOI: 10.1016/S0034-4257(00)00205-4
- MA W., JIA G., ZHANG A. 2017. Multiple satellite-based analysis reveals complex climate effects of temperate forests and related energy budget. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 122: 3806–3820. DOI: 10.1002/2016JD026278
- MAKARIEVA A.M., GORSHKOV V. 2007. Biotic pump of atmospheric moisture as driver of the hydrological cycle on land. *Hydrology and Earth System Sciences*, 11: 1013–1033. DOI: 10.5194/hessd-3-2621-2006
- MAKARIEVA A.M., NEFIODOV A.V., MOROZOV V.E., ALEJNIKOV A.A., VASILOV R.G. 2020a. Science in the vanguard of rethinking the role of forests in the third millennium: comments on the draft concept of the federal law “forest code of the Russian Federation”. *Forest Science Issues*, 3 (3): 1–25. DOI: 10.31509/2658-607x-2020-3-3-1-25
- MAKARIEVA A.M., NEFIODOV A.V., LI B.-L. 2020b. Life’s energy and information: contrasting evolution of volume- versus surface-specific rates of energy consumption. *Entropy*, 22 (9): 1025. DOI: 10.3390/E22091025
- MARSH G.P. 1864. *Man and nature, or physical geography as modified by human action*. London, Low, Marston: 560 s.
- MILDREXLER D.J., ZHAO M., RUNNING S.W. 2011. A global comparison between station air temperatures and MODIS land surface temperatures reveals the cooling role of forests. *Journal of Geophysical Research*, 116: G03025. DOI: 10.1029/2010JG001486
- MYHRE G., SHINDELL D., BRÉON F.-M., COLLINS W., FUGLESTVEDT J., HUANG J., KOCH D., LAMARQUE J.-F., LEE D., MENDOZA B., NAKAJIMA T., ROBOCK A., STEPHENS G., TAKEMURA T., ZHANG H. 2013. Anthropogenic and natural radiative forcing. In: Stocker T.F. et al. (eds.): *Climate change 2013. The physical science basis*. Cambridge, Cambridge University Press: 659–740.
- NEDBAL V., BROM J. 2018. Impact of highway construction on land surface energy balance and local climate derived from LANDSAT satellite data. *Science of the Total Environment*, 633: 658–677. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.03.220
- NOBRE C.A., SELLERS P.J., SHUKLA J. 1991. Amazonian deforestation and regional climate change. *Journal of Climate*, 4: 957–988.
- PAN Y., BIRDSEY R.A., FANG J., HOUGHTON R., KAUPPI P.E., KURZ W.A., PHILLIPS O.L., SHVIDENKO A., LEWIS S.L., CANADELL J.G., CIAIS P., JACKSON R.B., PACALA S.W., MCGUIRE A.D., PIAO S., RAUTIAINEN A., SITCH S., HAYES D. 2011. A large and persistent carbon sink in the world’s forests. *Science*, 333: 988–993. DOI: 10.1126/science.1201609
- PEARCE F. 2020. Weather makers. Forests supply the world with rain. A controversial Russian theory claims they also make wind. *Science*, 368 (6497): 1302–1305. DOI: 10.1126/science.368.6497.1302
- PECHANEC V., MACHAR I., KILIÁNOVÁ H., VYVLEČKA P., SEJÁK J., POKORNÝ J., ŠTĚRBOVÁ L., PROKOPOVÁ M., CUDLÍN P. 2021. Ranking the key forest habitats in ecosystem function provision: case study from Morava River Basin. *Forests*, 12 (2): 138. DOI: 10.3390/f12020138
- PENMAN H.L. 1948. Natural evaporation from open water, bare soil, and grass. *Proceedings of the Royal Society of London, Series A*, 193: 120–146. DOI: 10.1098/RSPA.1948.0037
- PIELKE Sr R.A. 2005. Land use and climate change. *Science*, 309 (5754): 1625–1626. DOI: 10.1126/science.1120529
- PILLI R., PASE A. 2018. Forest functions and space: a geohistorical perspective of European forests. *iForest*, 11: 79–89. DOI: 10.3832/ifer2316-010
- POKORNÝ J., BROM J., ČERMÁK J., HESSLEROVÁ P., HURYNA H., NADYEZHINA N., REJŠKOVÁ A. 2010. Solar energy dissipation and temperature control by water and plants. *International Journal of Water*, 5 (4): 311–336. DOI: 10.1504/IJW.2010.038726
- POKORNÝ J., HESSLEROVÁ P., HURYNA H. 2017. Mokřady a klima. In: Pithart D. et al. (eds.): *Ekologický stav mokřadů v České republice a trendy jejich vývoje*. Praha, Belec: 199–212.
- RIPL W. 1995. Management of water cycle and energy flow for ecosystem control: the energy-transport-reaction (ETR) model. *Ecological Modeling*, 78: 61–76. DOI: 10.1016/0304-3800(94)00118-2
- RIPL W. 2003. Water: the bloodstream of the biosphere. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 358(1440): 1921–1934. DOI: 10.1098/rstb.2003.1378
- RYSZKOWSKI L., KĘDZIORA A. 1987. Impact of agricultural landscape structure on energy flow and water cycling. *Landscape Ecology*, 1 (2): 85–94. DOI: 10.1007/BF00156230
- SHEIL D.F. 2018. Forests, atmospheric water and an uncertain future: the new biology of the global water cycle. *Forest Ecosystems*, 5: 19. DOI: 10.1186/s40663-018-0138-y
- SCHNEIDER E.D., SAGAN D. 2005. *Into the cool: energy flow, thermodynamics and life*. Chicago, University of Chicago Press, Chicago: 362 s.
- SIEBER P., ERICSSON N., HANSON P.-A. 2019. Climate impact of surface albedo change in life cycle assessment: implications of site and time dependence. *Environmental Impact Assessment Review*, 77: 191–200. DOI: 10.1016/j.eiar.2019.04.003

- SIMÓ G., MARTÍNEZ-VILLAGRASA D., JIMÉNEZ M.A., CASELLES V., CUXART J. 2018. Impact of the surface-atmosphere variables on the relation between air and land surface temperatures. *Pure and Applied Geophysics*, 175: 3939–3953. DOI: 10.1007/s00024-018-1930-x
- SOBRINO J.A., JIMÉNEZ-MUÑOZ J.C., PAOLINI L. 2004. Land surface temperature retrieval from LANDSAT TM 5. *Remote Sensing Environment*, 90: 434–440. DOI: 10.1016/j.rse.2004.02.003
- TANG B., ZHAO X., ZHAO W. 2017. Local effects of forests on temperatures across Europe. *Remote Sensing*, 10 (4): 529. DOI: 10.3390/rs10040529
- ÚHÚL. 2021. Ústav pro hospodářskou úpravu lesů Brandýs nad Labem. Mapový geoportal. [cit. 2021-06-01]. Dostupné na/ Available on: <http://geoportal.uhul.cz/mapy/MapyDpz.html>
- VYSKOT I., POKORNÝ J., KOZUMPLÍKOVÁ A., HESSLEROVÁ P., HURÝNA H. 2018. Posouzení stavu a funkcí lesů na vybraném lesním majetku v měnicích se ekosystémových podmínkách. Výzkumná zpráva pro MŽP. Brno, MENDELU: 249 s.
- WICKHAM J.D., WADE T.G., RIITERS K.H. 2012. Comparison of cropland and forest surface temperatures across the conterminous United States. *Agricultural and Forest Meteorology*, 166–167: 137–143. DOI: 10.1016/j.agrformet.2012.07.002
- WILLIAMS C.A., GU H., JIAO T. 2021. Climate impacts of U.S. forest loss span net warming to net cooling. *Science Advances*, 7: eaax8859. DOI: 10.1126/sciadv.aax8859
- ZHANG P., BOUNOUA L., IMHOFF M.L., WOLFE R.E., THOME K. 2015. Comparison of MODIS land surface temperature and air temperature over the Continental USA meteorological stations. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 40 (2): 110–122. DOI: 10.1080/07038992.2014.935934
- ZHAO K., JACKSON R.B. 2014. Biophysical forcings of land-use changes from potential forestry activities in North America. *Ecological Monograph*, 84: 329–353. DOI: 0.1890/12-1705.1

CHANGES IN THE AIR-CONDITIONING FUNCTION OF FOREST STANDS AS A RESULT OF THEIR DECAY AFTER THE GRADATION OF *IPS TYPOGRAPHUS*

SUMMARY

The aim of the study was to evaluate the change in the air-conditioning function of forest stands and agricultural landscape in the wider vicinity of Dačice town (328 km²; Fig. 1) in 1990, 2007, 2013, 2017 and 2019 in connection with the gradation of *Ips typographus* (Fig. 2). The importance of forest stands for local climate can be expressed through the energy balance. Healthy and well-watered forests transform a large part of the incident solar radiation in the process of evapotranspiration. When compared with drained agriculture landscape, there is a higher flow of solar energy into the latent heat, which reduces warming the surface and the adjacent atmosphere; forest surface temperature is lower than the air temperature. This difference can be used as an indicator of their health and functioning.

Landsat satellite images (Tab. 2) were used for the assessment, in combination with meteorological data from the Kostelní Myslová station. Energy fluxes were spatially quantified using the gradient approach implemented in QGIS module SEBCS (BROM 2014). Information on land cover for each year is based on two data sources. Corine Land Cover database and the results of image supervised classification (Tab. 3). The classification scheme of 5 land cover classes was chosen (Tab. 1): water bodies – bare ground (buildings, arable land without crops) – arable land (only with crops) – non-forest vegetation (meadows, pastures, low vegetation in the forest, agricultural areas with natural vegetation) – forest. For each land cover category (excluding water bodies) the values of latent heat, sensible heat flux and surface temperature were calculated. For the purposes of interannual comparison, the values were standardized and the trend was expressed by a regression function. The average of the flux/temperature for the whole area is equal to zero. Negative values indicate lower values of the given parameter than the average of the model area, positive values higher values than the model area average. By standardization, the values are converted to a uniform scale, so it is possible to compare individual years with each other, as well as individual types of land cover. The relationship was further used to evaluate the cooling ability of forest stands

$$dT = T_s - T_{ar}$$

where T_s is the surface temperature calculated from Landsat thermal band and T_{ar} is the raster value (modeled) of air temperature calculated on the basis of the assumption of adiabatic change of air temperature ($\Gamma = 0.0065 \text{ } ^\circ\text{C}\cdot\text{m}^{-1}$) for the altitude of the Kostelní Myslová station 569 m. Negative dT values mean good cooling ability of forest stands, positive indicate worsen ability.

In the forest stands, there has been a faster deterioration of health status since 2015 due to the action of biotic and abiotic factors. One factor is the precipitation deficit, which reached almost 390 mm at the Kostelní Myslová station in the period 2015–2019 (compared to the annual average 1961–2013) and an increase in temperatures, especially in the growing season (approx. 2°C). Deterioration of the forest health confirms decrease of latent heat, increase of sensible heat and surface temperature, especially in 2019. Such significant changes in the monitored parameters were not recorded in any of the monitored types of land cover (Fig. 3a, 3b, 3c). The dT indicates the ability of the stand to transpire and thus cool down. In case of sufficient water in the stand and its good ecophysiological condition, the surface temperature is 1–2°C lower than the air temperature (1990), in case of water shortage this difference increases (surface temperature is higher than air temperature), such as in a very dry year 2017 (4°C) (Fig. 4; Tab. 5). We assume that the deterioration of the cooling ability of forests may also be caused by overheating the agricultural landscape. The results (Fig. 3a, 3b, 3c) show that landscape gradually warms up, the evaporation of meadows and pastures decreases, their temperature and sensible heat increases. The same trend is evident in bare surfaces. In the case of arable land, no significant trend of changes in the temperature, sensible and latent heat was detected, as these flows are influenced by the crops that are grown in the area. If the crops have enough water, they cool down by transpiration for a short time. This fact is evident in 2019 (Fig. 3a, 3b, 3c). In addition to water retention in the landscape, a complementary solution for its cooling is a continuous vegetation cover, such as the cultivation of catch crops. After the harvest, the agricultural land is bare, which contributes to the overheating of the landscape in the period July – August. Green vegetation could cool the surrounding landscape by at least 2–4°C. The principle of continuous land cover should also be applied in forest stands, in which the clear-cutting system should be eliminated. The temperature on the clearings reaches 40–50°C on hot summer days. In case of new planting, seedlings are exposed to temperatures they are unable to cope with and dry out. Pioneer vegetation can create a more favorable climate for new planting, maintaining a lower surface temperature and humidity. A mature forest with vertical layers of vegetation communicates with the atmosphere mainly through the canopy; in such a stand there is an inverse temperature, i.e. lower temperature in the undergrowth than in the canopy. The air and humidity are kept in the vegetation, because the colder air is heavier and does not rise. Lower evaporation does not compensate for the moisture deficit of the area and leads to intense overheating of the landscape. The cooling ability of forest stands deteriorated mainly in small forest patches (with an area of tens of hectares) and in forests that are exposed to the warmer climate extending into the eastern part of the area of interest. Overheated and drained agricultural areas of the neighboring region of South Moravia on hot summer days can have a surface temperature of 40°C (or more). From the superheated surface, the air heats up and rises. Air with a temperature of 40°C and a relative humidity of 20% contains 10 g of water in m³. Even with a very slow upward flow of 0.1 m·s⁻¹, 360 m³ of heated air, which carried 3.6 kg of water, rises into the atmosphere in 1 hour over 1 m². The heated surfaces „suck“ air from the surrounding wetter surfaces, i.e. from the neighboring forest. This fact is probably one of the reasons for the change in the ecophysiological state of forest stands assessed in this study.

Zasláno/Received: 08. 06. 2021

Přijato do tisku/Accepted: 05. 08. 2021