

VÝZNAM ZELENĚ PRO KLIMA MĚSTA A MOŽNOSTI VYUŽITÍ TERMÁLNÍCH DAT V MĚSTSKÉM PROSTŘEDÍ

Jan Pokorný, Petra Hesslerová, Vladimír Jirka, Hanna Huryna, Josef Seják

Městská zeleň má nezastupitelnou úlohu v tvorbě místního klimatu. Představujeme principy fungování vegetace ve městech coby dokonalého klimatizačního zařízení, které prostřednictvím evapotranspirace účinně ochlazuje okolí a vyrovnává teploty. Ukazujeme možnosti kvantifikace klimatizační úlohy vegetace, včetně hodnocení ekosystémových služeb a příklady využití různých typů termálních dat pro hodnocení městského prostředí a klimatu.

1. Úvod

Městská zeleň je poměrně široký, mnohdy nespecifikovaný termín. Všeobecně je chápána jako zelená prostranství ve městech, tzn. parky, lesoparky, městské a příměstské lesy, aleje, stromy a keře v ulicích, zahrádky a zahrady, trávníky, rumišťe apod. Nejdůležitějším prvkem jsou stromy. Plní nejen estetickou funkci, ale produkují kyslík, uvolňují různé silice prospěšné i příjemné lidskému organismu, zachycují prachové i jiné škodlivé částice, zvlhčují vzduch, ovlivňují hydrologii, tlumí hluk, jsou biotopem pro řadu organismů, a fungují především jako regulátory městského klimatu, které účinně zmírňují teplotní extrémy městského prostředí. V článku představujeme význam vegetace a vody v distribuci slunečního záření, jejich přímou roli v tvorbě klimatu a význam vegetace v městském prostředí. Klimatizační efekt vegetace vyjadřujeme v energetických jednotkách. Snímky pořizované v tepelné části elektromagnetického spektra (družicové, letecké, pozemní měření) slouží jako nástroj pro detekci tepelných center ve městech a rovněž pomáhají při monitoringu chladící schopnosti vegetace.

2. Městský tepelný ostrov

Městské prostředí tvořené převážně nepropustnými povrchy má za následek tvorbu specifického klimatu, které se projevuje změnami v hydrologii, a vzniku tzv. městského tepelného ostrova (UHI – Urban Heat Island). Ten je definován jako oblast zvýšené teploty vzduchu v mezní a přizem-

ní vrstvě atmosféry nad městem nebo průmyslovou aglomerací v porovnání s venkovským okolím [Meteorologický slovník 1993; Streutker 2002]. Jeho vznik je spojen s převahou umělých povrchů s velkou tepelnou kapacitou (asfalt, beton), jež zároveň nepropouštějí vodu (rychlý odtok, nízká vlhkost vzduchu, nedostatek vody pro výpar) a zvýšeným množstvím aerosolů v atmosféře. Efekt začíná působit v případech, kdy je velká část vegetací pokrytých povrchů nahrazena nepropustnými povrchy, na nichž se sluneční energie mění na již dále nevyužitelné teplo [Rosenweig et al., 2006]. Velikost UHI se během roku mění, a to díky změnám intenzity slunečního záření, změnám vlastností povrchu, i v důsledku proměnlivosti povětrnostních charakteristik [Imhoff et al., 2010].

Problematika městského klimatu se dostává do popředí s častým výskytem extrémně vysokých teplot. Ve Strategii přizpůsobení se změně klimatu v ČR je uvedeno, že bude nezbytné vytvářet plány prevence ostrovů tepla ve velkých aglomeracích, stanovit urbanistické požadavky ochrany před tepelným ostrovem města, a to prostřednictvím vhodně zvolené architektury, územním plánováním a příměstskou zelení. Základním předpokladem je vytváření funkčně propojeného systému sídelní zeleně, který bude propojen na příměstskou krajinu. Problémem jsou však minimální plošné rezervy pro novou zeleň. Pro zajištění funkčního systému sídelní zeleně jsou navrhována tato opatření:

- Upřesnit požadavky na vymezení a ochranu systému sídelní zeleně vyplývající z právních předpi-

sů a zajistit navazující metodickou a odbornou podporu.

- Zvýšit podíl a funkční kvalitu dostupných ploch zeleně a vodních ploch ve vztahu k počtu a hustotě obyvatel.
- Revitalizovat stávající a realizovat nová funkční propojení existujících ploch zeleně, zvýšit podíl přírodně blízkých postupů a metod při revitalizaci a zakládání ploch zeleně s ohledem na jejich udržitelnost, pro výsadby v městském prostředí volit vhodný sortiment rostlin.
- Zvýšit počet realizovaných ploch a prvků zeleně na vodorovných i svislých konstrukcích (střešní zahrady, zelené fasády), přičemž za přínosné lze považovat takové prvky zeleně, které mohou být odkázány výhradně na atmosférické srážky (např. extenzivní zelené střechy), případně u kterých jsou při významném adaptačním efektu minimalizovány nároky na umělé zavlažování.

Ve Strategii se dále uvádí: „...vodní a vegetační plochy a prvky MOHOU významně ovlivňovat sídelní mikroklima a snižovat teplotu ve městech. Základním mechanismem je odpařování vody z vodních ploch i z vegetace (evapotranspirace), což snižuje teplotu okolního prostředí, vegetace dále akumuluje (zadržuje a následně vyzářuje) méně tepla než antropogenní povrchy, zachycuje nebo odráží část slunečního záření (v závislosti na listové ploše a druhu stromu obvykle cca 75 % v létě a 25 % v zimě), stín snižuje teplotu povrchu aj. Ve výsledku MOHOU mít vodní a vegetační plochy tzv. „klimatizační efekt“. Sídelní zeleň (stromy, travnaté plochy, parky) a vodní plochy (vodní toky, nádrže) společně se zelený-

mi střechami a udržitelným odvodňovacím systémem nabízí potenciál k adaptaci měst na klimatickou změnu“.

Z výše uvedeného odstavce je patrná určitá skepse k chladícím a klimatizačním schopnostem vegetace. Z termodynamického hlediska se rostliny chladí z principu – „*Strom uprostřed pole je gigantickou disipativní strukturou pohlcující sluneční záření vysoké exergy a degradující většinu této energie do „low-grade“ latentního tepla transpirací. Je to jako obrovská vodní fontána, ze které prýští voda ve formě skupenského tepla*“ [Schneider, Sagan 2005].

3. Distribuce slunečního záření na zemském povrchu

Při jasné obloze se na povrch zemský v našich podmínkách dostává až $1\ 000\ \text{W}\cdot\text{m}^{-2}$, při husté oblačnosti prochází pouze několik desítek $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$. Za jasného letního dne přichází na $1\ \text{km}^2$ až $1\ 000\ \text{MW}$, na $2\ \text{km}^2$ tedy přichází energie srovnatelná s výkonem jaderné elektrárny Temelín. Distribuce tohoto množství energie je závislá na vlastnostech zemského povrchu (obr. 1). Sluneční záření, které přichází na zemský povrch, se částečně odráží, částečně ohřívá povrch země, a od ní se ohřívá vzduch. Ten proudí vzhůru (zjevné teplo), část energie se spotřebuje na výpar vody (latentní, skryté teplo evapotranspirace) a část přechází do země (tok tepla do půdy), část se vyzářuje ve formě dlouhovlnného záření. Toky energie spotřebované na fotosyntézu a ohřev porostu jsou v celkové bilanci zanedbatelné. V prostředí s nedostatkem/absencí vegetace a vody, s převahou zpevněných povrchů, je dopadající záření přeměněno především na zjevné teplo, které zvyšuje teplotu prostředí. V případě povrchu s vegetací dostatečně zásobené vodou je napopak sluneční záření transformováno evapotranspirací do latentní složky tepla. Sluneční energie se váže ve vegetaci zásobené vodou prostřednictvím rostlin a vody do vodní páry. Během dne své okolí chladí výparem vody (evapotranspirací) a v noci se skupenské teplo vodní páry uvolňuje. Tím se vyrovná-

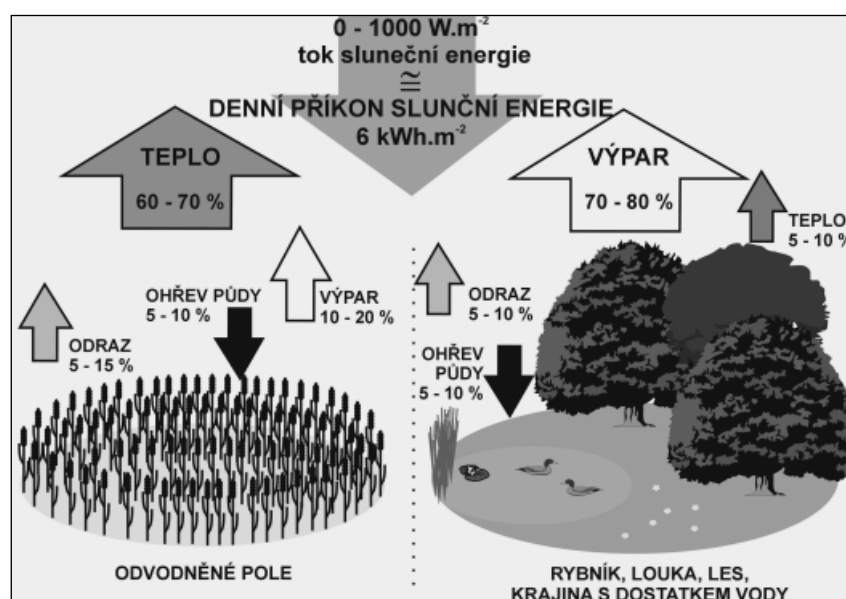
vají v čase i mezi místy teplotní rozdíly i rozdíly tlaků, čímž se zmírňuje i rychlost proudění vzduchu. Evapotranspirací se přeměňuje mnohonásobně více energie, než při fotosyntéze. Voda a rostliny jsou hlavními regulátory toku sluneční energie, mají významnou úlohu při tvorbě klimatu a hovoříme tak o přímé funkci vegetace a klimatizačním efektu evapotranspirace. V případě městského prostředí může být, díky absenci vody a vegetace, tok latentního tepla výparu téměř nulový.

4. Jak rostliny chladí

Rostlinami a půdou se z metru čtverečního za den odpaří několik litrů vody. Na výpar jednoho litru vody o teplotě $20\ ^\circ\text{C}$ se spotřebuje $2,45\ \text{MJ} \approx 0,68\ \text{kWh}$ sluneční energie. Při odpaření například 5 litrů z metru čtverečního se do vodní páry váže $3,4\ \text{kWh}$, více než polovina dopadající sluneční energie. Sluneční energie vázaná ve vodní páře ve formě skupenského tepla se potom opět uvolní při kondenzaci vodní páry zpět na vodu, uvolní se tedy na chladných místech, na kterých se vodní pára sráží. Vázání sluneční energie výparem vody (chlazení) na místech s nadbytkem energie a uvolňování sluneční energie na místech chladných při kondenzaci vody je podstatou dokonalé přirozené klimatizace pomocí vody a rostlin. Na pouhém jednom met-

ru čtverečním může činit v létě rozdíl mezi energií vázanou ve vodní páře a energií uvolněnou jako teplo i několik kWh za den. Toky sluneční energie vázané při evapotranspiraci dosahují tedy až několika set wattů na m^2 . Skupenské teplo výparu vody je pozoruhodně vysoké: na výpar jednoho litru vody se spotřebuje $2,45\ \text{MJ}$ ($0,68\ \text{kWh}$). Na ohřev jednoho litru vody o $30\ ^\circ\text{C}$ se spotřebuje ca $125\ \text{kJ}$, tedy 20x méně než na výpar jednoho litru vody.

Na evapotranspiraci se spotřebovává $400\ \text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ i více, zatímco na suché ploše se sluneční energie uvolňuje hlavně jako zjevné teplo. Rozdíl v distribuci sluneční energie na odvodněné ploše a ve vegetaci dobře zásobené vodou je ve slunném dnu v rozsahu několika set $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$. Evapotranspirace má dvojnásobný klimatizační efekt – ochlazuje výparem a ohřívá kondenzací (obzvláště v noci). Ochlazují se místa s nadbytkem energie a ohřívají se jen místa chladná, kde dochází ke kondenzaci. Tok tepla do půdy může dosahovat hodnot několika $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ až desítek $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$. Tok tepla do půdy se snižuje s vysycháním půdy. Ve slunných dnech odráží betonová plocha až $200\ \text{W}\cdot\text{m}^{-2}$, zatímco hladina rybníka odráží nanejvýš $50\ \text{W}\cdot\text{m}^{-2}$. Odraz různých typů vegetace se příliš neliší a dosahuje hodnot okolo $150\ \text{W}\cdot\text{m}^{-2}$, relativně méně odráží po většinu roku vegetace dobře zásobená vodou.



Zdroj: Pokorný, 2001

Obr. 1: Rozdíl v distribuci sluneční energie na suchém povrchu a v porostech dobře zásobených vodou

Toky sluneční energie, vody a činnost rostlin jsou vzájemně propojeny v perfektní, nedostížitelný klimatizační systém. Čím více sluneční energie, tím vyšší výpar (v případě dostatku vody), tím účinnější chlazení. Vodní pára se potom sráží na chladných místech v kvalitě destilované vody a vyrovnává tak teploty mezi místy i v čase (ranní rosa). Rostliny tedy ochlazují místa s přebytkem energie, přitom rostou (vytvářejí potravu), čistí vodu na kvalitu vody destilované a ohřívají pomocí vodní páry místa chladná a přenášejí energii z teplého dne do chladné noci. Klimatizační zařízení vyrobené člověkem spotřebovává elektrickou energii, ochlazuje místnost a v těsném sousedství ohřívá prostředí odpadním teplem. Navíc jako média nepoužívá vodu, ale toxické látky. Větší strom vydá transpiraci (odebere z půdy a vypaří) v teplém dni i několik stovek litrů vody. Transpirace 100 litrů vody je spojena s vázáním 69 kWh energie – takové množství energie se neprojeví zvýšením teploty (ochladí prostředí) a naopak ohřeje místa chladná při kondenzaci vodní páry. Člověk ovlivňováním (cíleným i nechtěným) rostlinného pokryvu a vodního režimu v krajině zásadním způsobem ovlivňuje místní klima, kvalitu i množství odtékající vody.

Strom jako klimatizační zařízení

Chodník v Klatovech na plném slunečním svitu má povrchovou teplotu 51 °C (obr. 2a). Na metr čtvereční přichází 877 wattů. Ve stínu stromu je povrchová teplota 26,9 °C a prochází tam pouze desetina plného slunečního svitu 82 W.m⁻² (obr. 2b). Sluneční energie se při průchodu olistěnou korunou stromu spotřebovuje na výpar vody a další životní pochody. Energie „uschovaná“ ve vodní páře se uvolní při kondenzaci vodní páry ve vyšší vrstvě atmosféry i v noci a ráno ve formě mlhy a rosy. Koruna stromu má poloměr 4 m, povrch koruny je přibližně 100 m², z jednoho m² se vypaří nejméně 2 litry vody za den. Strom vypaří za den 200 litrů vody a na výpar spotřebovuje 140 kWh sluneční energie. Toto množství energie se nepřemění na zjevné teplo. K uskladnění této energie bychom potřebovali 117 dvanáctivoltových auto-



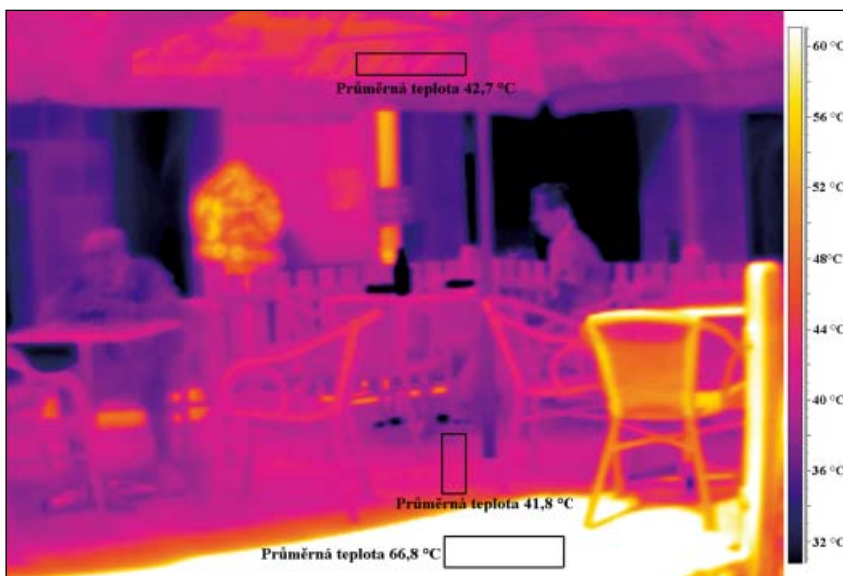
Obr. 2 a,b: Pomocí jednoduchých přístrojů na měření dopadajícího slunečního záření (přístroje vlevo) a povrchové teploty lze rychle kvantifikovat teplotní rozdíl mezi osluněným chodníkem (51 °C) a stínem stromu (26,9 °C).

baterií o kapacitě 100 Ah (uvažujeme 100% účinnost). Strom vypařuje vodu podle množství přicházející sluneční energie, na výpar vody se reálně může spotřebovávat až 250 W.m⁻², což představuje momentální chladicí výkon 25 kW, ekvivalent 8 klimatizačních jednotek, každá o chladicím výkonu 3 kW. Technologická klimatizace ovšem na jedné straně chladí a na druhé vypouští teplo, v součtu takové zařízení svoje okolí otepluje. Strom „uschovává“ energii slunce do vodní páry a ve formě vodní páry přenáší tuto energii na chladná místa.

Na základě této malé připomínky základů fyziky lépe pochopíme rozdíl

mezi stínem stromu a stínem slunečnicku či přístřešku (obr. 3). Je podstatný. Zatímco slunečnick záření pouze pasivně odráží (podle barvy povrchu), strom jej aktivně přetváří v chlad a vlhko. Ani věrná kopie stromu z plastu neudělá tak chladný stín jako živý strom zásobený vodou.

Zacházením s vodou a rostlinami ovlivňujeme klima města. Odvodněním a odstraněním zeleně na velkých plochách navozujeme zvláště ve městech či na polích pouštní klima, které nevyváží žádné technické zařízení. Je to proto, že na plochách bez vegetace se většina dopadajícího slunečního záření přeměňuje na teplo, okolí se přehřívá a vysychá.



Obr. 3: Termovizní snímek ukazuje teplotu ve stínu slunečnicku (40 °C). Slunečnick, i když poskytuje stín, nedokáže, na rozdíl od stromu (obr. 2b), transpirovat a chladit své okolí.

5. Snímkování v tepelné části elektromagnetického spektra jako nástroj pro analýzu městského klimatu a tepelného ostrova

5.1. Co měříme?

Teplotní projev povrchu lze chápat nejenom jako termodynamický stav daného tělesa, respektive jeho povrchu, ale též jako důsledek energetických přeměn, které na povrchu probíhají. V důsledku radiační výměny mezi povrchem a okolím a díky vedení tepla dochází ke změnám teploty povrchu. Teplotě krajiny (povrchu) odpovídá tzv. teplota radiační (jasová). Každé těleso, jehož teplota je vyšší než absolutní nula ($-273,15\text{ }^{\circ}\text{C}$) emituje záření, jehož intenzita a spektrální složení jsou funkcí jeho kinetické teploty (tato teplota je interním projevem energie molekul tvořících těleso) a materiálu, z něhož se těleso skládá. V tepelné části elektromagnetického záření převažuje vlastní vyzařování objektů nad odraženým slunečním zářením. Intenzita tohoto dlouhovlnného vyzařování je vnějším projevem teploty tělesa a řídí se základními zákony termodynamiky. Za teplotu krajiny je většinou považována termodynamická (kinetická) teplota vzduchu, měřená teploměrem ve stínu standardizované meteorologické budky ve 2 metrech nad zemí a následně interpolovaná na větší území. Jedná se o teplotu vzduchu, který „ohřívá teploměr“. Mezi kinetickou a radiační teplotou existuje pozitivní korelace. Proč se tedy zaměřit na teplotu povrchu a nikoli teplotu vzduchu? Teplota povrchu je indikátorem, který vypovídá o transformaci sluneční energie na zemském povrchu a lze z ní odvodit, která složka tepla bude převažovat – zda zjevné (pocitové) teplo, které je zodpovědné za ohřívání prostředí (projevuje se vysokou teplotou na snímcích) či latentní teplo, které se spotřebovává na výpar vody a tudíž prostředí ochlazuje (projevuje se nízkou teplotou). Teplota povrchu je výsledkem energetických přeměn, již můžeme ovlivnit prostřednictvím krajinného pokryvu a vodním režimem.

5.2. Jak měříme?

V řadě případů jsou pro vymezení tepelného ostrova města a hodnocení městské zeleně používána data z meteorologických stanic, poskytující bodová (in-situ) data, která nedokážou postihnout skutečné plošné rozložení teploty. Navíc se teplota vzduchu a povrchu může (v extrémních případech) lišit řádově i o desítky stupňů [Hesslerová et al. 2013].

Na rozdíl od kinetické teploty, kterou měříme kontaktním způsobem (teploměrem) a jedná se o teplotu vzduchu, radiační teplotu měříme bezkontaktně. Pro bodová (pozemní) měření jsou užívány pyrometry (infračervené teploměry), pro zachycení prostorové informace jsou využívány systémy infračerveného zobrazování v termální části spektra dvojího typu:

- Maticové zobrazovací systémy (termovizní kamery)
- Skenovací systémy (na leteckých i družicových nosičích)

Informace o teplotě povrchu je založena na snímání elektromagnetického záření objektu ve vlnových délkách $3\text{--}5\text{ }\mu\text{m}$, nejčastěji však $7,5\text{--}14\text{ }\mu\text{m}$. V prvním jmenovaném intervalu je zaznamenána jak složka emitovaná zemským povrchem, tak i část odraženého slunečního záření. Z tohoto důvodu jsou data zpravidla získávána v nočních hodinách, kdy je vliv odraženého slunečního záření minimalizován. Tato data jsou vhodná pro vymezení tepelného ostrova města, neboť jeho tepelný projev je signifikantní právě v nočních hodinách.

Druhý interval je vhodnější pro získávání denních teplotních dat s ohledem na to, že maximum emitované energie zemským povrchem je situováno do této části elektromagnetického spektra. V denních hodinách se naopak projevuje chladící schopnost vegetace. Měřit je ovšem nutné za jasného dne při plném slunečním svitu, kdy přichází na povrch země několikanásobně více sluneční energie, nežli při zataženém obloze.

Snímek získaný v tepelné části elektromagnetického spektra je v případě družicových dat a dat pořízených širokospektrální termovizní kamerou představován maticí hodnot, ve které každý bod (pixel) zaznamenává pouze jednu

hodnotu intenzity toku tepelné radiace v daném místě. Tuto informaci lze převést pomocí různých algoritmů na absolutní hodnotu teploty povrchu. Je-li provedena řádná korekce dat, mohou být termální data využita pro vytvoření teplotní mapy povrchu. Oproti konvenčním pozemním meteorologickým měřením, která poskytují zpravidla bodovou teplotní informaci, jsou termovizní data prostorově spojitá, nevyžadují použití interpolačních metod. Tato informace může být kvalitativního (pro porovnání) i kvantitativního charakteru (získání absolutních hodnot). Důležitou charakteristikou termálních snímků je i jejich prostorové rozlišení, tzn., jak velké území reprezentuje jeden pixel nesoucí informaci o průměrné hodnotě teploty na daném snímku, což determinuje možnosti jejich využití v hodnocení městského klimatu i městského tepelného ostrova.

Teplotní data mohou být analyzována a interpretována ve dvou různých rovinách. V prvním případě může být analyzována pouze vizuální informace (např. detekce specifických objektů, jevů a procesů – tj. odlišení tepelného ostrova města od okolí). V druhém případě je použita radiometrická informace, která dovoluje kvantitativní analýzu teplotních a spektrálních vlastností povrchu. Data je v tomto případě nezbytné korigovat a kalibrovat, a to radiometricky, atmosféricky, geometricky. Volba vhodných metod závisí na typu dat a senzoru, a také na účelu pořízení [Brom et al. 2014].

5.2.1. Družicová data

Pro vymezení tepelného ostrova měst jsou vhodná prostorově spojitá data z družicových systémů, která lze získat v denním i nočním módu. Termální družicová data jsou založena na základě snímání intenzity elektromagnetického záření ve vlnových délkách nejčastěji $7,5\text{--}14\text{ }\mu\text{m}$, případně $3\text{--}5\text{ }\mu\text{m}$, a to pomocí různých skenovacích zařízení. Termální snímky jsou pořizovány v jednom či více širokospektrálních kanálech, z nichž jde po radiometrických a atmosférických korekcích odvodit absolutní hodnota povrchové teploty. Prostorové rozlišení těchto snímků je v řádu kilometrů až po desítky me-

trů. Termální snímky poskytuje většina meteorologických družic. Jejich prostorové rozlišení v řádu stovek metrů až kilometrů není vhodné pro detailní monitoring měst.

Družicové systémy (např. Landsat, Terra Aster, CBERS IRMSS, NPP VIIRS) pořízují termální data v prostorovém rozlišení řádu desítek metrů. Tato data jsou vhodná pro základní náhled rozložení teploty ve městech, bez možnosti hodnocení detailů. Kromě informace o povrchové teplotě snímají tyto družicové systémy území i ve viditelné a infračervené části elektromagnetického spektra. Z těchto dat je možné získat další informace pro hodnocení městské zeleně, jako je např. krajinný pokryv, množství biomasy, vlhkost povrchu.

K nejpoužívanějším družicovým systémům pro hodnocení klimatu měst se používají data z několika generací družic Landsat, která umožňují i retrospektivní hodnocení. V závislosti na generaci družice lze získat informaci o teplotě povrchu s prostorovým rozlišením 120, 60, 100 metrů. (Landsat 5, Landsat 7, Landsat 8). Data jsou poskytována prostřednictvím United States Geological Survey (USGS) zdarma; družice má téměř globální pokrytí a na stejné místo se vrací jednou za šestnáct dní, snímování probíhá v 9:40 UTC (Coordinated Universal Time). Landsat poskytuje data zároveň ve viditelné části spektra, dále pak i v blízkém a středním infrapásmu. Proto lze kombinovat teplotní data s informacemi o krajinném pokryvu, vlhkosti, vlastnostech vegetace atp. Při získávání termálních dat pomocí dálkového průzkumu Země je potřeba zhodnotit aktuální stav počasí a sezónní a denní vlivy, které mohou významně ovlivňovat tepelnou výměnu na povrchu tělesa (na zemském povrchu), a to nejen v době snímání, ale i před ním (např. srážky). Vedle emisivity mohou tepelnou výměnu těles ovlivnit tepelné vlastnosti tělesa samotného (tepelná vodivost a kapacita, termální inercie). Další systémy (Terra MODIS, Sentinel 3A), poskytují termální data rovněž zdarma, jejich prostorové rozlišení termálního kanálu je 500 m, resp. 1 km. Výhodou je sice možnost opakovaného snímování v řádu dnů, ale prostorové rozlišení není dostačující. Družice Terra se senzorem Aster

poskytuje termální data v prostorovém rozlišení 90 metrů. Data jsou však na objednávku a jsou zpoplatněna. Pro výpočet teploty je používána řada algoritmů – mono-window [Qin et al. 2001], multi-window a split-window [Sobrino et al. 1996], single-channel [Jimenez-Munoz a Sobrino 2003], temperature/emisivity separation [Gillespie et al. 1998]

5.2.2. Letecká a pozemní data z termovizních kamer

Termální data s vysokým prostorovým rozlišením lze pořídit pomocí systémů umístěných na leteckých nosičích či bezpilotních leteckých prostředcích (UAS, UAV, tzn. drony, vzducholodě, bezpilotní kluzáky). Na těchto nosičích většinou bývají umístěny termální širokopásmové kamery. Tyto termokamery snímají zájmovou oblast v jeden časový okamžik na maticový detektor, pouze v jediném spektrálním kanálu (cca ve vlnových délkách 7,5–14 μm). Kamery jsou často doplněny o možnost snímkovat i ve viditelné části spektra. V závislosti na výšce letu a použité optice se prostorové rozlišení termálních snímků pohybuje v řádu metrů až centimetrů. K používaným systémům náleží FLIR, Digi THERM, VarioCCAM, Thermalimager TI, Fluke, Optris, Infra Tec. Tyto termovizní kamery jsou využívány především na bezpilotních leteckých prostředcích, a s tím, jak jejich využitelnost a především dostupnost stoupá, je v současnosti pro ně vyvíjena softwarová podpora, která usnadňuje a rozšiřuje oblasti jejich využití. Vývojem a výrobou specializovaného technického zabezpečení pro profesionální letecké termovizní snímování a následně vytvoření mapových podkladů se zabývá společnost IGI (Integrated Geospatial Innovations) z Kreuztalu v Německu. Systém DigiCAM je umístěn v letadle na gyroskopické plošině a obsahuje kromě termokamery od InfraTECu také GNSS/IMU (GPS, GLONASS, BeiDou, Galileo ready/Inertial Measurement Unit) jednotku pro přesné okamžité určení polohy kamery, které je nezbytné pro následně automatizované vytváření mapových podkladů. Společnost IGI dodává profesionální kamery pro letecké snímko-

vání s napojením na avioniku v různých oblastech spektra.

Současné pořízení dat v jiných částech elektromagnetického spektra (především v oblasti blízkého infrapásma), které by rozšířilo možnosti hodnocení městské zeleně, tj. informace o typu krajinného pokryvu, biomase i vlhkosti, je většinou omezeno dostupným přístrojovým vybavením. Nosiče mohou být doplněny o další přístrojové vybavení, např. měřickou kameru (např. UltraCam, TetraCam), která snímá viditelnou i blízkou infračervenou část spektra. Jejich kompatibilita s termovizními systémy, která by umožňovala jednoduchou fúzi a zpracování odlišných typů dat při hodnocení městské zeleně, je omezená. Data umožňují hodnocení biomasy podle vegetačních indexů.

Výhodou těchto dat je možnost operativního a opakovaného snímání zájmového území. Nevýhodou představuje vyšší finanční náročnost, nároky na technické vybavení i komplikovanější předzpracování těchto dat. U systémů UAS/UAV jejich využití omezuje i legislativa.

V případě, že cílem analýzy dat je co nejpřesnější stanovení povrchové teploty, je nezbytné mít k dispozici kalibrační údaje o aktuálním stavu atmosféry v době snímání, včetně dalších doplňkových meteorologických dat. Termovizní kameru lze kalibrovat v době pořizování snímků, či v rámci jejich dalšího zpracování, v době vyhodnocení dat.

Systémy používané na leteckých nosičích lze použít i po pozemní měření teploty.

Relativně nové možnosti hodnocení poskytují data pořízená hyperspektrálními termálními skenery (např. systémy TASI, AHS 80, AISA Owl, SEBASS) umístěnými na leteckých nosičích. Tyto systémy pořízují data v několika desítkách – stovkách spektrálních kanálů s vysokým prostorovým rozlišením řádu metrů – centimetrů. Jedná se o technologie, jejichž pořízení je však zatím finančně náročné, stejně jako technika jejich zpracování. Doplnění informacemi o typu krajinného pokryvu, o jednotlivých druzích vegetace, hodnocení biomasy, vlhkosti by bylo možné za současného použití dal-

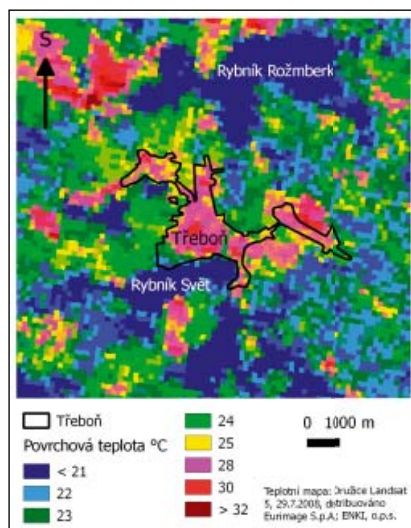
ších hyperspektrálních senzorů (např. CASI, SASI) umístěných na stejném nosiči. Pro hodnocení městské zeleně kombinace těchto typů dat představuje vysoký potenciál do budoucna. Jak však bylo uvedeno, jejich použití brání nejen vysoké finanční náklady na jejich pořízení, ale i poměrně složité techniky zpracování a kalibrace termálních hyperspektrálních dat.

5.3. Příklady termálních dat

Pro modelové území okolí Třeboně se unikátně podařilo pořídit v jediný den tři druhy termovizních snímků – družicové (Landsat 5), letecké termovizní a pozemní. Charakterizujeme možnosti hodnocení městské zeleně z těchto třech typů dat.

5.3.1. Družicové snímky

Výřez z družicového snímku zachycuje okolí Třeboně 29. 7. 2008, v 9:40 UTC. Prostorové rozlišení termálního pásma je 120 metrů, teplota byla vypočtena na základě algoritmu Sobrino et al. [2004]. Velikost zájmového území je 9 x 10 km.



Obr. 4: Teplota města Třeboně a okolní krajiny vypočtená z termálního pásma družice Landsat 5, 29.7.2008 v 9:40 UTC.

Ze snímku (obr. 4) lze dobře vymežit rozsah tepelného ostrova města Třeboně. Průměrná teplota území je 28 °C.

K nejteplejším částem patří obě náměstí a oblast okolo kruhového objezdu (30 °C), k nejhladnějším zámecký park (24 °C) a park okolo lázni Aurora (22 °C). Pro porovnání s ostatními typy krajinného pokryvu se průměrná teplota sklizených polí pohybuje okolo 32 °C, posečených luk 27 °C, naopak lesní porosty mají teplotu 22 °C, vodní plochy 19 °C. Teplota vzduchu naměřená meteorologickou stanicí umístěnou na betonové ploše v areálu čistírny odpadních vod byla 30 °C, intenzita dopadajícího slunečního záření 900 W.m⁻², jasno.

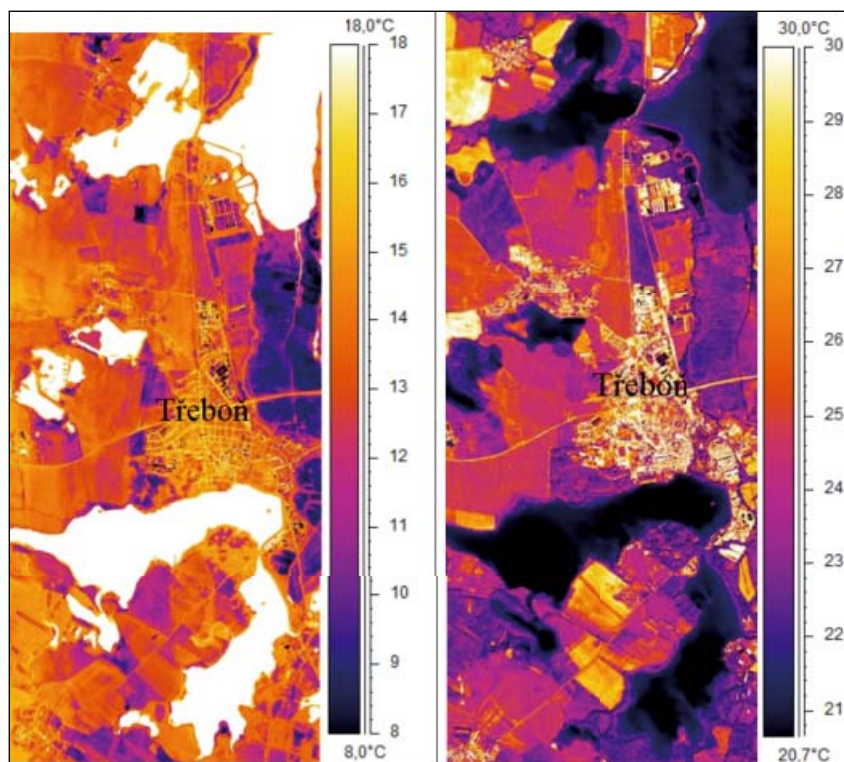
USGS zpřístupnilo zdarma celý datový archiv družice Landsat. Tato data nejsou vhodná pro přesná hodnocení teploty. Důvodem je použitá metoda převzorkování, kterou je kubická konvoluce. Ta způsobuje mírné zkreslení původní radiometrické informace, avšak zachovává polohovou přesnost. V případech, kdy je nezbytné zachovat původní radiometrickou informaci, je nezbytné získat data převzorkovaná metodou nejbližšího souseda. Hodnoty zůstanou zachovány, avšak mění se polohová přesnost snímku v řádu 0,5–1,5 pixelu (60–180 metrů). Tato data lze získat na základě osobního

jednání u poskytovatele dat (USGS), případně u distribučních společností (zpoplatněno). Snímek okolí Třeboně byl převzorkován metodou nejbližšího souseda, proto jsou teplotní hodnoty nezkreslené, avšak je patrný prostorový posun hodnot.

Snímky jsou pořizovány pro stejné území každých šestnáct dní. Jejich kvalitu však ovlivňuje častá oblačnost, reálně jsou k dispozici 3–4 kvalitní snímky za rok.

5.3.2. Letecké termovizní snímkování

Letecké snímkování okolí Třeboně bylo uskutečněno ve spolupráci s firmou Argus Geo Systém dne 29. 7. 2008, tedy ve stejný den přeletu družice Landsat 5. Snímkování proběhlo za jasného dne, kdy denní maxima teploty vzduchu dosahovala 30 °C. Byla použita kamera FLIR ThermoCAM PM 695 s rozlišením 320 x 240 pixelů. Při letové výšce 2 km bylo dosaženo prostorového rozlišení 2 metry, velikost snímkaného území byla cca 50 km². Letecké termovizní snímky (obr. 5 a,b) zobrazují okolí Třeboně v ranním a odpoledním termi-



Obr. 5: Letecké termovizní snímky okolí Třeboně pořízené 29. 8. 2008 a) ráno (5:30–7:00) a b) odpoledne (12:00–13:30) zachycují rozdíly teploty krajiny a městského prostředí.

	Průměrná povrchová teplota /rozpětí
Solitérní stromy, skupiny stromů	22–24° C
Udržované sečené trávníky	29–35° C
Trvalé travní porosty – neposečené podmáčené louky v lázeňském parku	23–26° C
Rodinné domy se zahradou	27–30° C
Parkoviště	40–55° C
Střechy	40–55° C
Silnice	35–38° C
Náměstí	33–37° C
Zástavba s malými zahrádkami	35–38° C

Tab. 1.: Rozmezí povrchové teploty pro vybrané typy městského prostředí získané z leteckého termovizního snímku – odpolední nálet (12:00–13:30, obr. 5b).

nu, tj. v 5:30–7:00 a 12:00–13:30. Informace pro interpretaci snímku vycházejí ze znalosti zájmového území, popřípadě byly použity volně dostupné ortofotosnímky na www.mapy.cz.

Situace ranního náletu (5:30–7:00) ukazuje poměrně homogenní rozložení teplot na snímku. Prostředí města (12–16 °C) se teplotně příliš neliší od okolních polí (10–13 °C) a stromové vegetace (10–12 °C). Litorál, vrbiny, mokré louky a posečené louky jsou charakterizovány teplotním rozmezím 6–10 °C a patří k nejchladnějším plochám na snímku. K nejteplejším plochám náleží vodní plochy (16–18 °C). Teplotní diference je významná v odpoledních hodinách (12:00–13:30), kdy dochází k nárůstu teplot (v případech zastavěných povrchů bez vegetace až o 30 °C). Nejchladnější lokality jsou vodní plochy s teplotami 18–22 °C, dále pak les, solitérní stromy, vrbina, litorál, mokré louky, s teplotním rozmezím 18–26 °C. K nejvyššímu nárůstu teploty došlo v prostředí města, kde se teploty povrchů bez vegetace pohybují v rozmezí 30–55 °C. Vysoké teploty jsou charakteristické pro sečené trvalé travní porosty (29–35 °C).

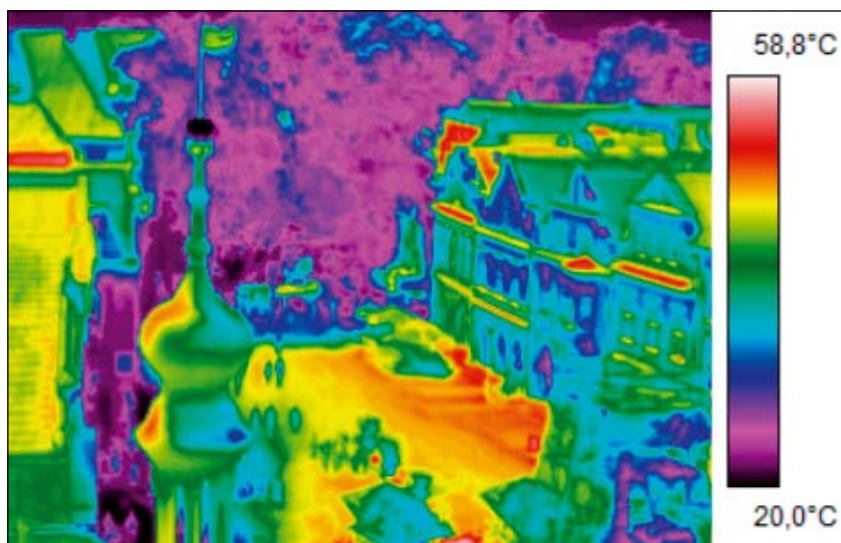
V ranních hodinách, kdy na zemský povrch dopadá nižší množství slunečního záření (cca 300 W/m² v 7:00), jsou teploty poměrně vyrovnané. Se zvyšujícím se příkonem sluneční energie (cca 900 W/m² ve 13:00) povrchová teplota roste, a to především na lokalitách bez vody a vegetace. Ráno se teplota zvyšuje pomaleji na mokřadních stanovištích, kde průniku slunečního záření brání mlha. Termovizní snímky ukazují, že

lokality se stromovou vegetací, případně nesečenými podmáčenými trvalými travními porosty, jsou schopny v průběhu horkého letního dne evapotranspirací účinně snižovat a vyrovnávat teploty. Plochy se suchou vegetací či bez ní jsou v porovnání s předchozími případy charakterizovány teplotami vyššími o 10 i více stupňů. Ve městě na malé ploše vznikají vysoké gradienty teplot.

Díky poměrně vysokému prostorovému rozlišení termovizního snímku (2 metry), lze detailněji analyzovat teplotu různých typů povrchů městského prostředí, tj. jednotlivých budov i solitérních stromů, stromořadí, zatravněných ploch i umělých povrchů. V tabulce 1 je uveden přehled povrchové teploty pro vybrané typy povrchů v městském prostředí.

5.3.3. Pozemní snímkování

Pozemní snímkování poskytuje detailní a doplňující data teploty povrchu. Lze ho využít v případech, kdy je pořízení kolmých snímků (z leteckých či UAV nosičů) z hlediska technických či finančních podmínek nemožné. Na rozdíl od metod DPZ umožňuje pozemní měření rychle a operativně pořízení datových podkladů. Nevýhodou tohoto snímkování je šikmé snímání. V tomto případě do objektivu termovizní kamery dopadá pouze určitá část tepelného záření, v porovnání s kolmým snímáním různými prostředky DPZ. Informace o teplotě snímávaných objektů je tedy v případě snímání horizontálních ploch, mírně podhodnocena.



Obr. 6.: Snímek z třebovské radniční věže pořízený 29. 7. 2008 zobrazuje rozdíl mezi teplotou náměstí (35 °C) a stromy v areálu zámku (24 °C). Snímek byl pořízen ve stejnou dobu jako družicová data (obr. 4) a letecký snímek (obr. 5a,b). Naměřené hodnoty ze všech tří zdrojů jsou porovnatelné.

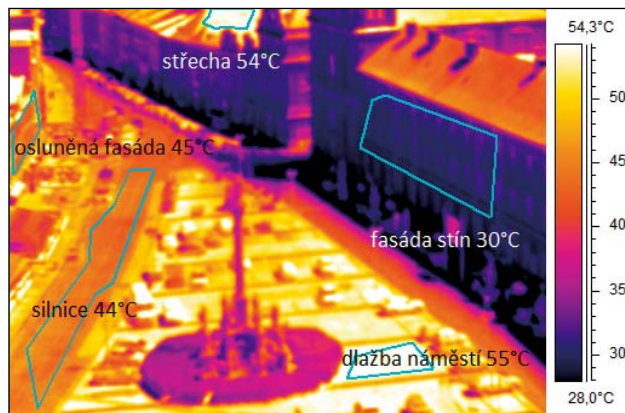
Další příklady pozemního snímkování byly pořízeny 22. 7. 2015 v Hradci Králové mezi 12–16 hod., kdy vrcholila vlna veder a teploty vzduchu dosahovaly 36 °C. Účelem pozemního snímko-

vání byla kvantifikace ekosystémových služeb městské zeleně a zhodnocení její klimatizační funkce. Monitorovány byly lokality Žižkových sadů, Severních teras, Gočárovu třídy a třídy Karla IV.

Obrázky 7.1.a,b–7.6.a,b zobrazují povrchovou teplotu různých typů povrchů v městském prostředí. Jedná se o dvojice snímků pořízených fotoaparátem a termovizní kamerou.



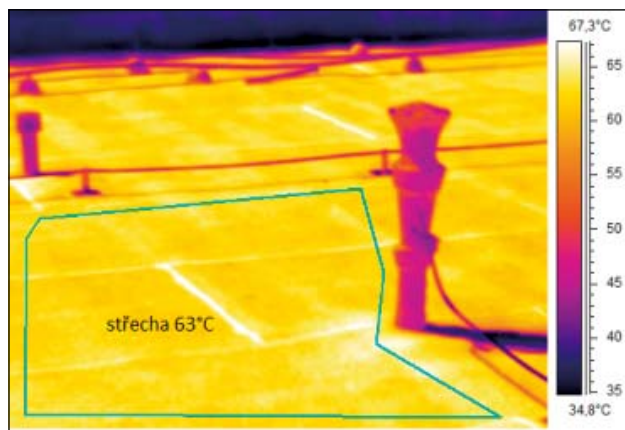
Obr. 7.1.a: Pohled z Bílé věže na Velké náměstí



Obr. 7.1.b: Osluněné střechy mají teplotu až 54 °C, dlažba náměstí až 55 °C, osluněné fasády domů 45 °C a fasády ve stínu 30 °C



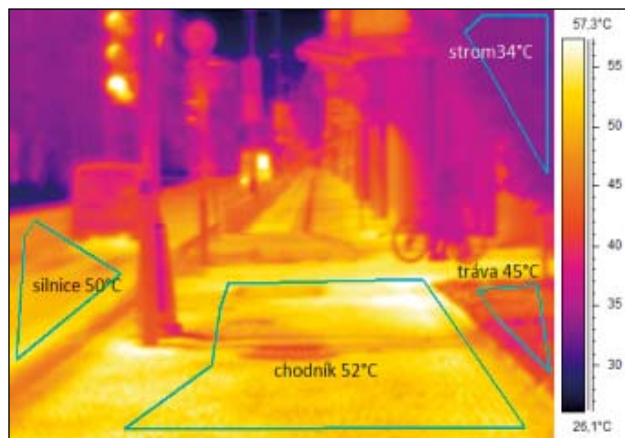
Obr. 7.2.a: Pohled na střechu Magistrátu Hradce Králové, která je pokryta asfaltem



Obr. 7.2.b: Asfaltový povrch střechy má v poledne teplotu 63 °C



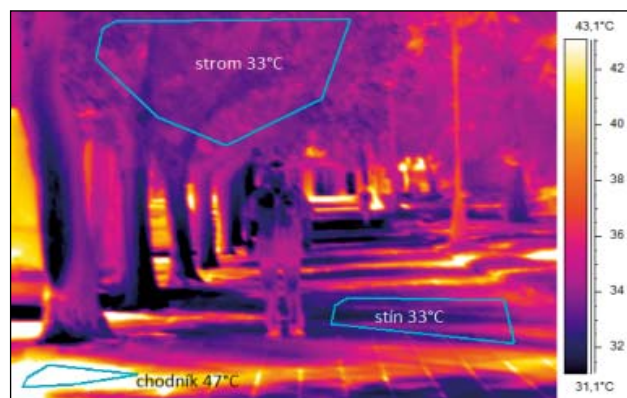
Obr. 7.3.a: Pohled na Gočárovu třídu bez aleje stromů



Obr. 7.3.b: Teplota povrchu silnice 50 °C, teplota chodníku 52 °C, strom na okraji má 34 °C



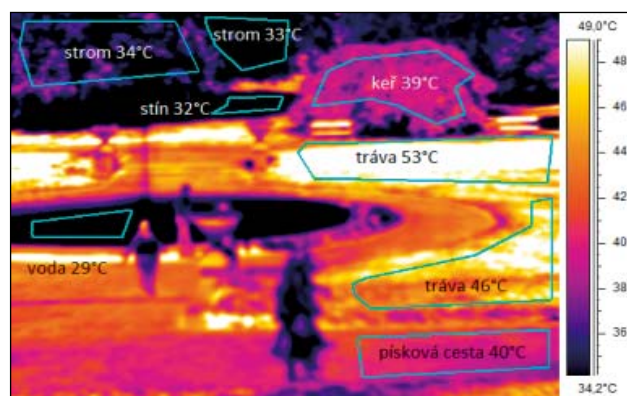
Obr. 7.4.a: Třída Karla IV. s alejí stromů



Obr. 7.4.b: Teplota chodníku ve stínu stromů 33 °C, teplota osluněného povrchu chodníku 47 °C, teplota povrchu stromu 33 °C



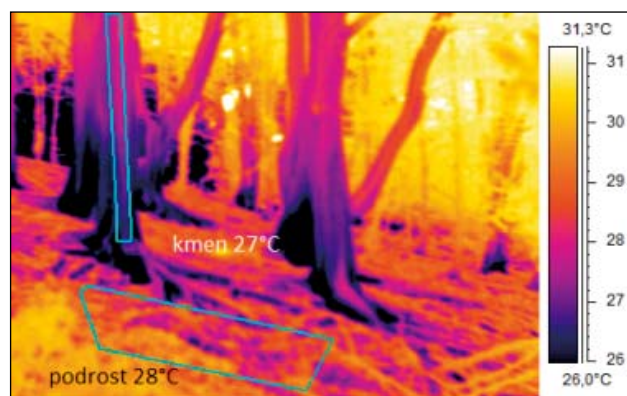
Obr. 7.5.a: Pohled ze Severních teras na trávník a fontánu v Žižkových sadech



Obr. 7.5.b: Posečený trávník 53 °C, tráva 46 °C, písková cesta 40 °C. Voda 29 °C, stín pod stromy 32–34 °C, keř 39 °C



Obr. 7.6.a: Porost habrů, javorů, lip na svahu Severních teras



Obr. 7.6.b: Teplota v podrostu 28 °C, teplota kmenů 27 °C

6. Ekosystémové služby městské zeleně

Všechny uvedené termovizní snímky číselně dokreslují známou skutečnost, že vegetace chladí. Stromy vypařují vodu a jejich chladicí výkon dosahuje hodnot několika set wattů na m².

K vysvětlení chladicího efektu stačí základní znalosti fyziky: na přeměnu jednoho litru vody v tekutém stavu na vodní páru je potřeba přibližně 2,5 MJ, což je 0,69 kWh. Vhodně zvolenou skladbou stromů ve městech můžeme utvářet příjemné klima bez velkých nákladů. Jeden vzrostlý strom dobře zásobený vodou chladí

v horkém počasí výkonem srovnatelným s několika klimatizačními jednotkami. Tato klimatizační technologie ovšem spotřebovává elektřinu a fakticky ohřívá své okolí (podobně jako lednice). Strom své okolí chladí a skupenské teplo se z vodní páry uvolní na chladných místech a svaží je rosou.

V posledních letech je častým trendem nahrazování vzrostlé a zapojené stromové zeleně parků úpravami s převahou keřových a trvalých travních porostů. Termovizní snímek (obr. 7.5.b – Žižkovy sady) ukazuje rozdílnou chladicí schopnost trávníku, keřů a stromů.

Teplota povrchu vegetace závisí hlavně na množství vypařované vody (evapotranspirace) a patrovitosti porostu. Odraz slunečního záření z povrchu vegetace se pro různé druhy porostů pohybuje okolo 20 % (beton 25 %, vodní hladina 10 %). Tok tepla do půdy v zapojených porostech je poměrně nízký (okolo 10 %) a tepelná bilance se vyrovnává se střídáním dne a noci. Porosty s nejnižší povrchovou teplotou mají tedy nejvyšší evapotranspiraci. Stromové porosty vypařují vodu hlavně korunami. Zápoj stromů vypaří za slunného dne přibližně 3 litry vody/m², za vegetační sezónu vypaří listnaté stromy Severních teras 400–500 litrů vody na m². 5 000 m² stromového porostu vypaří za jediný slunný letní den 15 000 litrů vody. Jak ukazují termovizní snímky chladných kmenů (obr. 7.6.b), stromy Severních teras přijímaly aktivně vodu kořeny i na vrcholu léta (22. 7. 2015).

Stromový porost na rozdíl od trávníku

- Má hlubší kořenový systém a tudíž má i větší schopnosti zadržení a zásoby vody
- Je chladnější, vodní pára uvolňovaná korunami stromů zůstává v blízkosti korun a zvyšuje zde vlhkost vzduchu (snižuje se potenciální evapotranspirace), a v noci se může srážet zpět na rychle chladnoucích listech, které vylučují látky urychlující kondenzaci; evapotranspiraci stromových porostů se voda neztrácí, ale recykluje.
- Půda ve stromových porostech má vysokou jímavost vody, drobné kořínky a zejména vlákna mykorhiz zaujímají délku mnoha kilometrů pod plochou 1 m², jsou to živé organismy, které rychle absorbují a zadržují vodu. Půda má i vysoký obsah dalších organických látek, které podporují zadržení vody.

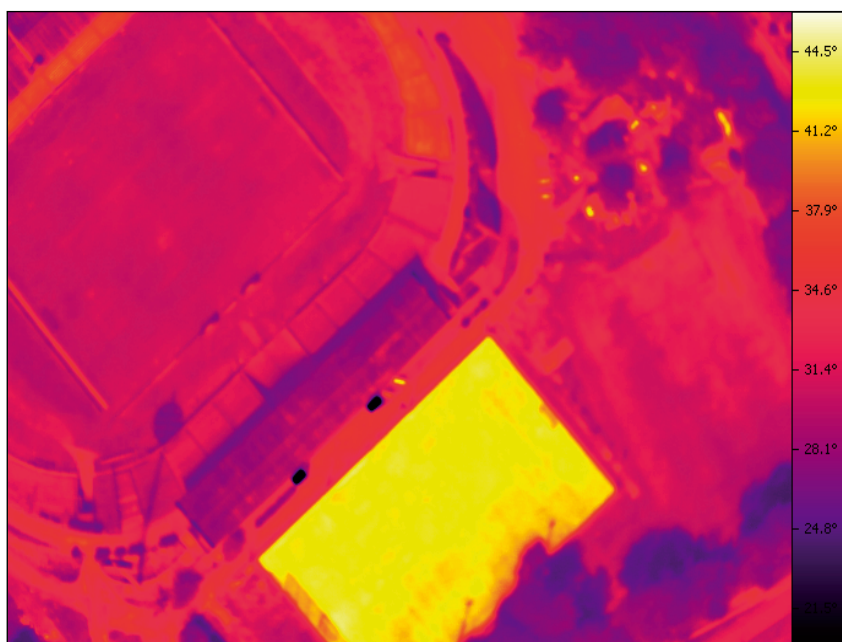
Travní porost vypařuje vodu z počátku sezóny podobnou rychlostí jako olistěný les. Travní porost během krátké doby tuto schopnost ztrácí, pokud není zaléván, protože má krátké kořeny.

Z ohřátého trávníku je vodní pára unášena teplým vzduchem vzhůru do atmosféry a nevrací se ráno zpět ve formě rosy. Trávník vodu ztrácí. Přesto je velký rozdíl mezi trávníkem setým a trávníkem umělým, který se používá na sportovištích ve městech i na vesnicích z důvodu „bezúdržbovosti“ i možnosti zimního provozu. Při náletu Hradce Králové 3. 8. 2017 v 11:00 za slunečného počasí jsme tento jev zdokumentovali na travnatých hřištích Všesportovního stadiónu (obr. 8), kde při okolní teplotě vzduchu 30 °C byla radiační teplota trávy na fotbalovém stadiónu okolo 33 °C, zatímco teplota umělého trávníku zelené barvy, který neodpařuje vodu, činila okolo 45 °C.

Chladicího efektu stromů nemůže trávník dosáhnout ani v případě, že bude zaléván. Proto náhrada vzrostlých stromů keři a sečenými trávníky nemůže být v žádném případě považována za vhodnou úpravu městské zeleně, která by měla přispět k výraznému zmírnění tepelného ostrova města. Kulisa stromů ochlazuje totiž i vzdálené okolí, protože absorbuje tepelné záření. Je rozdíl stát před domem, jehož fasáda je ohřátá na 50 °C, nebo před stromem o povrchové teplotě 25 °C. Dům exponovaný teplotě odvodněného parkoviště o teplotě 50 °C bude vyžadovat vyšší spotřebu energie na chlazení nežli dům exponovaný živým stromům.

V Hradci Králové se uvažuje (informace ze srpna 2017) o pokácení 83 vzrostlých stromů (z cca 100 stromů), 12 velkých soliterních keřů a 4 491 m² menších keřů v lokalitě Severních teras. Celková plocha Severní terasy je 5 000 m². Přibližně 75 % plochy vzrostlé zeleně bude tedy odstraněno. Je zřejmé, že Severní terasa bude zbavena stínu a teploty budou za jasných letních dnů stoupat nad 40 °C.

Zápoj stromů se chladí transpirací korun a udržuje za slunného letního dne inverzní teplotu v porostu: v podrostu je teplota nižší (například 27 °C) nežli na povrchu osluněných korun stromů (například 32 °C). Chladnější vzduch v podrostu je těžší nežli vzduch u povrchu korun stromů. V horkém letním dni se udržuje vzduch v zápoji stromů, nestoupá vzhůru. Navíc kořeny stromů sahají v období sucha hluboko pro vodu. Naopak nízké porosty trávníků, záhonů, stejně jako porosty zemědělských plodin, mají za slunného dne vyšší teplotu při zemi nežli na povrchu porostu. Ohřátý vzduch s vodní párou stoupá z takového porostu rychle vzhůru a porost se vysušuje. V noci se koruny stromů ochlazují vyzařováním vůči chladné obloze. Listy a jehličí mají totiž nízkou hmotnost, vysoký povrch a nejsou ohřívány půdou. Na hranách listů a jehlic se v noci sráží rosa více nežli na nízkém trávníku nebo ojedinělých nízkých keřích.



Obr. 8: Termovizní snímek z 3. 8. 2017 ukazuje teplotní rozdíl umělého (45 °C) a přirozeného trávníku (33 °C) v Hradci Králové.

Zapojené porosty Severní terasy o ploše cca 5 000 m² chladí výkonem nejméně 1 500 kW (na metr čtvereční se spotřebovává 300 W na evapotranspiraci). Je to ekvivalent 500 klimatizačních zařízení umístěných na budově královéhradeckého Magistrátu. Pokud strom vypařil za den 3 litry vody na m² plošného průmětu, přeměnilo se do skupenského tepla 2,1 kWh denně na m². Na ploše 5 000 m² to představuje 10 500 kWh skupenského tepla výparu, o toto množství energie se neohřál povrch Severních teras. Kdybychom nahradili stromy technologickým klimatizačním zařízením, spotřebovala by za den na chlazení 10 500 kWh, což představuje cenu elektrické energie cca 31 500 Kč za den. Klimatizační zařízení je ovšem ve srovnání se stromy nedokonalé, protože chladí a současně na druhé straně vzduch ohřívá. Vodní pára uvolněná při transpiraci stromů částečně unikla do atmosféry, částečně se srazí v noci na listech zpět a teplo se uvolní v noci.

V souhrnu pro 5 000 m² zapojeného lesního porostu lze odhadnout roční klimatizační službu (ochlazování přes den, oteplování v noci) následujícím způsobem [Seják a kol. 2010]:

5 000 m² ploch korun x 300 litrů/m² x 1,4 kWh x 3 Kč/kWh = 6 300 000 Kč (pravidla pro provádění netržních ocenění ES požadují používat relativně nejnižší ceny alternativ).

Vodoretenci a vodočisticí služba dotčených stromů:

5 000 m² ploch korun x 300 litrů/m² x 2,85 Kč/litr destilované vody = 4 275 000 Kč

Jeden hektar listnatého opadavého lesa v podmínkách mírného pásma vyprodukuje za rok průměrně 10 tun čisté produkce kyslíku. Pro přepočítání mezi kilogramy a litry O₂ platí vztah 1,429 kg/m³ neboli 1 kg O₂ představuje 700 litrů O₂ (32 gramů O₂ má za normálního tlaku objem 22,4 litru). Roční služba produkce kyslíku dotčených stromů je tudíž odhadnutelná následujícím způsobem:

0,5 ha x 10 000 kg kyslíku x 700 litrů/kg x 0,50 Kč/litr = 1 750 000 Kč

Porosty habrů, javorů a lip jsou i specifickým prostředím pro udržování biodiverzity. Hodnotu ztráty této ekosystémové funkce můžeme odhadnout pomocí každoroční služby biotopy diverzité:

XL1 nepřirodní les 20 bodů/m² x 5 000 m² x 28,70/bod (hodnota bodu 2017) x 0,05 = 143 500 Kč

Pro tvorbu 10 tun rostlinné biomasy se spotřebovává 13,75 tun oxidu uhličitého, takže pro odhad ekosystémové služby roční sekvestrace CO₂ to znamená:

0,5 ha x 12,8 t/ha x 1,375 x 7,25 eur/t (akt. cena povolenky) x 25,61 (směnný kurz Kč/euro) = 1 634 Kč

Celkem každoroční hodnota ekosystémových služeb lesního parku činí asi 12 470 000 Kč.

Mýcením dotčené městské stromové vegetace na ploše 5 000 m² by občané Hradce Králové dlouhodobě přicházeli každý rok o přibližně 12,5 mil. Kč základních klimatizačních, vodozádržných, kyslíkotvorných, sekvestračních a biodiverzitních služeb. Hluboko kořenící stromy mají i důležitou roli zpevnování půdy svahu. A k tomu si každý občan Hradce Králové dotčený mýcením může ještě připočítat každoroční ztráty rekreačních, estetických, terapeutických a socializačních funkcí z odstraněných stromů.

7. Závěr

Měření povrchových teplot kvantitativně dokládají známou skutečnost o vlhkém stínu stromu. K měření povrchové teploty lze využít různých typů dat. Z družicových snímků lze získat informace o vymezení tepelného ostrova města. Na snímku nemohou být rozlišitelné drobné vegetační prvky (stromořadí, aleje, zahrádky, solitérní stromy atp.). Chladicí schopnost vegetace je patrná u plošně rozsáhlejších prvků (parky, lesíky). Velikost družicové scény (např. u družic Landsat je cca 189 x 189 km) umožňuje hodnocení teploty města v prostorovém kontextu. K nejčastěji používaným patří data ze třech generací družic Landsat, která jsou zdarma. Pro detailní monitoring rozložení teploty v městském prostředí lze použít data z leteckých či bezpilotních (UAV) systémů, které jsou vybaveny termovizními kamerami. Výhodou je vysoká prostorová rozlišovací schopnost dat a možnost operativního snímkování. Nevýhodou je finanční náročnost a legislativní omezení provozu těchto zařízení.

Na příkladu dat z Hradce Králové ukážeme, že ve městech ve slunných dnech rozhodujeme o teplotě v rozsahu vyšším nežli 30 °C. Teplota střech nezřídka přesahuje 60 °C, ve stínu stromů byla teplota pod 30 °C. Stromy chladí sebe a své okolí výparem vody. Chladicí efekt stromů a obecně vegetace zásobené vodou dosahuje několika stovek Wm⁻². Pro zmírnění nepříznivých účinků městského tepelného ostrova je klíčovým faktorem uchování a obnova stromové zeleně. Jako doprovodná opatření lze doporučit budování zelených střech a fasád, zadržování srážkových vod. Neuváženým kácením stromů se zbavujeme klimatizačních, vodozádržných, kyslíkotvorných a dalších služeb, které se bekrásnější parkové úpravy nemohou nahradit. Teplota posečeného trávníku v parku se nezřídka blíží teplotám asfaltových ploch. Odstranění stromů z 1 hektaru (či jeho odvodnění) je provázáno uvolňováním zjevného tepla v rozsahu tisíců kW. V České republice se odvodnilo více než 10 000 km² zemědělské půdy [Vašků 2011], což představuje denní uvolňování zjevného tepla (ohřev vzduchu) srovnatelné s výkonem tisíce (i násobku tisíce) bloků jaderné elektrárny Temelín. Pokud chceme zmírňovat důsledky stále častěji se vyskytujících extrémních teplot, jejichž účinky zesiluje městské prostředí, měly by být tyto skutečnosti zohledněny při územním plánování a architektonických úpravách městského prostředí. Ve školách je nutné učit o schopnosti stromů tlumit extrémní teplot. Přístroje na měření slunečního záření (ve wattch.m⁻²) se dají pořídit za necelé 2 000 Kč a infračervené teploměry vhodné pro výuku stojí též nejvýše několik tisíc Kč.

Použité zdroje:

BROM, Jakub – PIVOVARNÍK, Marek – HESSLEROVÁ, Petra, et al. Termální data. In: ZEMEK, F. a kol. *Letecký dálkový průzkum země teorie a příklady hodnocení terestrických ekosystémů*. 2014. Centrum výzkumu globální změny AV ČR, v.v.i 155 s.

GILLESPIE, A.R. – ROKUGAWA, S. – MATSUNAGA, T. et al. A temperature and emissivity separation algorithm for advanced spaceborne thermal emission and reflection radiometer (ASTER) images. In: *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 1998, č. 36, s. 1113–1126.

- HESSLEROVÁ, Petra – POKORNÝ, Jan – BROM, Jakub et al. Daily dynamics of radiation surface temperature of different land cover types in a temperate cultural landscape: Consequences for the local climate. In: *Ecological Engineering*. 2013, č. 54, s. 145–154.
- IMHOFF, Marc L. – ZHANG, Ping – WOLFE, Robert E. – BOUNOUA Lahouari. Remote sensing of the urban heat island effect across biomes in the continental USA. In: *Remote Sensing of Environment*. 2010, č. 114, s. 504–513.
- JIMENEZ-MUNOZ J. C. – SOBRINO J. A. A generalized single-channel method for retrieving land surface temperature from remote sensing data. In: *Journal of Geophysical Research*. 2003, č. 108, s. 4688–4694.
- POKORNÝ, Jan. Dissipation of solar energy in landscape – controlled by management of water and vegetation. In: *Renewable Energy*. 2001, č. 24, s. 641–645.
- POKORNÝ, Jan. Co umí strom aneb O zahradě s trochou fyziky. In: *Domov*. 1999, roč. 39, č. 7, s. 50–51.
- POKORNÝ, Jan – REJŠKOVÁ, Alžběta – BROM, Jakub. Úloha makrofyt v energetické bilanci mokřadů. In: *Zprávy České botanické společnosti, Praha, 42 Mater*. 2007, č. 22, s. 47–60.
- QIN, Z. – ZHANG, M. – AMON, K. et al. Mono-window Algorithm for retrieving land surface temperature from Landsat TM 6 data. In: *Acta Geographica Sinica*. 2001, č. 56, s. 456–466.
- Kolektiv autorů. *Meteorologický slovník výkladový a terminologický* (1993), Academia, Ministerstvo životního prostředí. 594 s.
- SEJÁK, Josef – CUDLÍN, Pavel – POKORNÝ, Jan et al. *Hodnocení funkcí a služeb ekosystémů České republiky*. FŽP UJEP. 2010, 197 s.
- SCHNEIDER, E. D. – SAGAN, D. *Into the cool*. (Energy Flow, Thermodynamics and Life). 2005. The University of Chicago Press, 362 s.
- SOBRINO, J. A. – LI, Z.-L. – STOLL, M. P. – BECKER, F. Multi-channel and multi-angle algorithms for estimating sea and land surface temperature with ATSR data. In: *International Journal of Remote Sensing*. 1996, č. 17, s. 2089–2114.
- SOBRINO, J. A. – JIMENEZ-MUNOZ, J. C. – PAOLINI, L. Land surface temperature retrieval from LANDSAT TM 5. In: *Remote Sensing of Environment*. 2004, č. 90, s. 434–440.
- Strategie přizpůsobení se změně klimatu v podmínkách ČR (2015). Ministerstvo životního prostředí, 130 s.
- STREUTKER, D. R. A remote sensing study of the urban heat island of Houston, Texas. In: *International Journal of Remote Sensing*. 2002, č. 23, s. 2595–2608.
- VAŠKŮ, Zdeněk. Zlo zvané meliorace. In: *Vesmír*. 2011, č. 90, s. 440–444.

Poděkování

Autoři děkují Ing. Ivě Šedivé, vedoucí Odboru životního prostředí a Ing. Liboru Rakovi, vedoucímu Oddělení ochrany životního prostředí Magistrátu města Hradce Králové za spolupráci na studii „Úloha vegetace v lokálním klimatu“ na příkladu města Hradec Králové, která byla použita pro zpracování kapitol 5 a 6.

Práce byla podpořena z projektů TAČR TE 0200077, TD 03000093

doc.RNDr. Jan Pokorný, CSc.
RNDr. Petra Hesslerová, Ph.D.
Ing. Vladimír Jirka, CSc.
Mgr. Hanna Huryna, Ph.D.
ENKI, o.p.s. Třeboň

doc. Ing. Josef Seják, CSc.
Fakulta životního prostředí
Univerzita Jana Evangelisty Purkyně
v Ústí nad Labem

ENGLISH ABSTRACT

Xxx

Xxx