

TEPLOTNÍ REŽIM MĚSTSKÉHO PROSTŘEDÍ

Temperature Regime of the Urban Environment

Středa T., Středová H., Rožnovský J.

Český hydrometeorologický ústav, pobočka Brno

Abstrakt

Městská zástavba vykazuje znatelně vyšší teploty než okolí. Měření teplot povrchů různých materiálů zastoupených v městské zástavbě a jejich srovnání s teplotou na klimatologických stanicích umožňuje odhadnout mikroklima dané lokality během různých meteorologických situací (pomocí regresních vztahů). Práce hodnotí vliv solární radiace, albeda, emisivity a teplotní (ne)regulace asfaltového povrchu na jeho teplotu a teplotu přilehlé vzduchové vrstvy. Hodnoceny jsou výsledky měření z nejteplejších měsíců (července, srpen) let 2009 a 2010. Měřena byla teplota vzduchu ve vertikálním profilu nad asfaltovým povrchem a ve vybraných dnech také teplota asfaltového povrchu bezdotykovým infračerveným teploměrem. Naměřené hodnoty byly srovnávány s teplotou vzduchu na klimatologické stanici a na speciálních účelových stanicích umístěných v centru města Brna. Zejména během výrazně radiačních dnů dosahovaly teploty asfaltu i více než 70 °C. Byly tak o cca 40 °C vyšší než teplota nad travním porostem, naměřená na standardní klimatologické stanici. Rozdíl mezi teplotou vzduchu nad asfaltem a teplotou ve 2 m nad travním porostem činil až 7 °C (v závislosti na výšce čidla nad povrchem a umístění srovnávací stanice). Pro podrobnější vyjádření stratifikace teplot byla naměřená data byla interpolována a graficky znázorněna pomocí programu Surfer.

Klíčová slova: teplota povrchu, městské klima, mikroklima

Abstract

Urban build up area shows a significantly higher temperature than its surroundings. Comparison of surface temperatures of materials represent urban area with temperatures measured at climatological stations allows estimation of microclimate of given locality during different weather situations (using regression relationships). The paper assesses the influence of solar radiation, albedo, emissivity and temperature (ir)regulation of asphalt surface on its temperature and the temperature of adjacent air layer. Measurement of the warmest months (July, August) of 2009 and 2010 were evaluated. Air temperature in the vertical profile above asphalt surface and asphalt surface temperature measured by contactless infrared thermometer were evaluated. Measured values were compared with air temperature at climatological stations and special stations located in the city center. Asphalt temperatures reaching over 70°C especially during the days of significantly radiation. They were thus about 40°C higher than the temperature above grassland (measured at standard climatological station). Maximum difference between air temperature above asphalt and grass surface was 7°C (depending on a height of sensor and the location of comparative station). Measured data were interpolated graphically by Surfer software for more detailed observations of temperature stratification.

Key words: surface temperature, urban climate, microclimate

Úvod

Jako tepelný ostrov města je zjednodušeně popisován jev, kdy jsou ve městech zaznamenávány vyšší teploty vzduchu než v okolních venkovských oblastech (Goward 1981). V porovnání s venkovskou krajinou mohou být ve městech v nočních hodinách teploty vzduchu o 3 – 10 °C vyšší (Oke 1997). První vědecká srovnání teplotního režimu města a

přílehlých venkovských oblastí provedl Howard ve studii *Climate of London* z roku 1833. Tepelný ostrov města je utvářen meteorologickými faktory a charakterem samotného města. Spolupůsobí tak celý komplex vlivů, přičemž zmiňovány jsou: teplota vzduchu, srážky, sluneční radiace, oblačnost, proudění vzduchu, omezená evapotranspirace, počet a hustota obyvatel, topografie terénu, nadmořská výška, zastoupení vodních ploch, pokryv povrchu – podíl zastavěného území, barva povrchu..., vzdálenost mezi budovami, výška budov, rezistence povrchu, geometrie povrchu města, tzv. „antropogenní teplo“ z vytápění, průmyslu..., retence povrchu, znečištění ovzduší (Oke 1981, Givoni 1998). Voogt (2002) shrnuje hlavní faktory vzniku tepelného ostrova měst: změna geometrie aktivního povrchu – zvětšení jeho velikosti a převaha vertikálních povrchů vede k zvýšení množství pohlceného slunečního záření a k jeho četným odrazům, uzavřené prostory mezi budovami vedou k omezení dlouhověnného vyzařování v nočních hodinách a tím i ke snížení ztrát tepla; změna tepelných vlastností aktivního povrchu – budovy mají poměrně značnou tepelnou kapacitu, což umožňuje zvýšené pohlcování tepla v období pozitivní energetické bilance a jeho uvolňování během negativní energetické bilance; změna v hydrologické bilanci – převaha nepropustných povrchů vede k snížení dostupného množství vody k evapotranspiraci a tím současně i k snížení latentního toku tepla a k zvýšení turbulentního toku.

Klasickou metodou pro sledování a kvantifikaci tepelného ostrova města je srovnání průběhu meteorologických prvků z městských stanic a mimoměstských stanic. Studium tepelného ostrova Brna uvedenou metodou se v posledním desetiletí zabývali například Litschmann a Rožnovský (2005), kteří porovnávali teplotní poměry „městské“ stanice na Mendlově náměstí a stanice Brno – Tuřany. V maximálních denních teplotách zjistili rozdíly přesahující 4 °C. Obdobně pro Brno – Žabovřesky a Brno – Tuřany vyhodnocovala Pokladníková et al. (2010) rozdíl ve výskytu horkých vln a tropických dnů v městském a příměstském prostředí. Výsledky ukázaly, že sledované charakteristiky dosahovaly na stanici Brno – Žabovřesky (zástupce městského prostředí) výrazně vyšších hodnot než na stanici Brno – Tuřany (příměstské prostředí).

Podle plošného rozsahu je monitoring městského klimatu dělen na mikro-monitoring (např. interiér budov, exteriér budov), lokální monitoring (na úrovni městských čtvrtí), meso-monitoring (více čtvrtí, celé město) a regionální monitoring (Grimmond 2006). Zvláště teplé body s charakteristickými znaky (parkoviště, průmyslová zařízení, ploché střechy, asfaltové komunikace apod.) jsou definovány jako „micro urban heat islands - MUHI“ (Aniello et al. 1995, Stathopoulou et al. 2004). Hlavními faktory, vyvolávajícími MUHI jsou účinky geometrie ulic ohraničených budovami na záření, vliv tepelných vlastností městských materiálů na akumulaci a výdej tepla (Oke et al. 1991) a odpadní teplo z obytných a jiných budov (Matson et al. 1978). Efekt je zesilován během teplých, bezvětrných, bezoblačných dnů v létě a na podzim (Oke 1982). Intenzita MUHI je definována jako rozdíl mezi nejteplejší městskou plochou a pozadřovou teplotou mimo město. Smargiassi et al. (2009) hodnotili účinky MUHI na člověka – kvantifikovali úmrtnost během výskytu horkých dnů v souvislosti s MUHI. Vyhodnocením čtrnáctileté řady teplot, satelitních termosnímků a údajů o úmrtnosti v Montrealu (Kanada) zjistili zvýšené riziko úmrtí v oblastech s vyšší teplotou povrchu během teplých dnů.

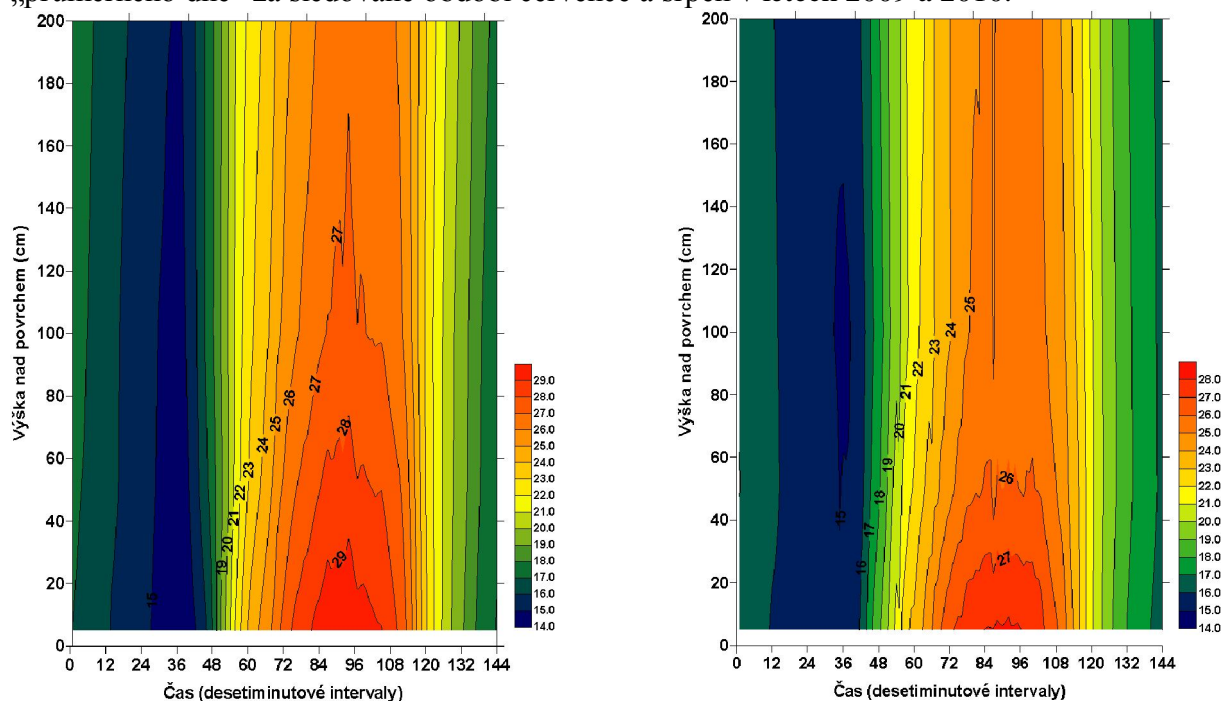
Materiál a metody

V práci jsou vyhodnocena mikroklimatická měření teplot povrchu asfaltové plochy (střecha budovy) a přílehlé vrstvy vzduchu ve srovnání s měřeními na klimatologické stanici za standardních podmínek. Analyzovány jsou tak situace vytvářející tzv. „micro urban heat island - MUHI“. Monitoring byl realizován v letech 2009 a 2010 v období s ročním výskytem nejvyšších teplot vzduchu a nejvyšší intenzitou solární radiace. Vyhodnocována jsou data ze třetí dekády července a srpnové hodnoty. Teplota asfaltového povrchu střechy

byla měřena infračerveným termometrem Raytek MX2 Raynger s manuálním nastavením emisivity povrchu (asfaltu) v desetisekundovém intervalu měření. Pro upřesnění vlivu albeda na úroveň odrazu záření k dalším srovnáním byla přibližně určena barva odstínu povrchu dle stupnice RAL CLASSIC (www.ralcolor.com), která je celosvětově uznávaným standardem ve stavebnictví. Podle stupnice RAL se jedná o odstín RAL 7043 (RGB 078-084-082) – Traffic grey B. Teplota vzduchu nad asfaltovým povrchem byla zaznamenávána v desetiminutovém intervalu. Čidla s dataloggerem Hobo (Onset Computer) byla umístěna v radičním krytech ve výškách 5 cm, 50 cm, 100 cm a 200 cm nad asfaltový povrch. Pro stanovení vlivu charakteru povrchu na jeho zahřívání a teplotu vzduchu nad ním byla použita patnáctiminutová data (v roce 2009) a desetiminutová data (v roce 2010) a jako srovnávací řada data teplot ve 2 m nad standardním travním porostem (měřeno v meteorologické budce) z klimatologické stanice sítě ČHMÚ Brno – Žabovřesky. Vzdálenost měřících bodů (asfaltový povrch střechy a meteorologická budka) činila cca 25 m horizontálně a 10 m vertikálně. Globální radiace byla měřena čidlem CNR1 Kipp-Zonen (Delft, Nizozemí) umístěným nad monitorovanou střechou, v desetiminutovém intervalu měření. Pro harmonizaci s měřícím intervalem stanice ČHMÚ (při srovnávání dat ze stanice ČHMÚ a experimentálních měření) byla data z termometru zprůměrnována aritmetickým průměrem na patnáctiminutová (rok 2009), respektive desetiminutová (rok 2010). Základní výpočty a grafické zpracování dat byly provedeny v aplikaci MS Excel. Pro interpolaci metodou triangulace s lineární interpolací a grafické vyjádření stratifikace teploty vzduchu nad povrchem byl použit program Surfer ver. 8.03 (Golden Software, Inc.).

Výsledky a diskuze

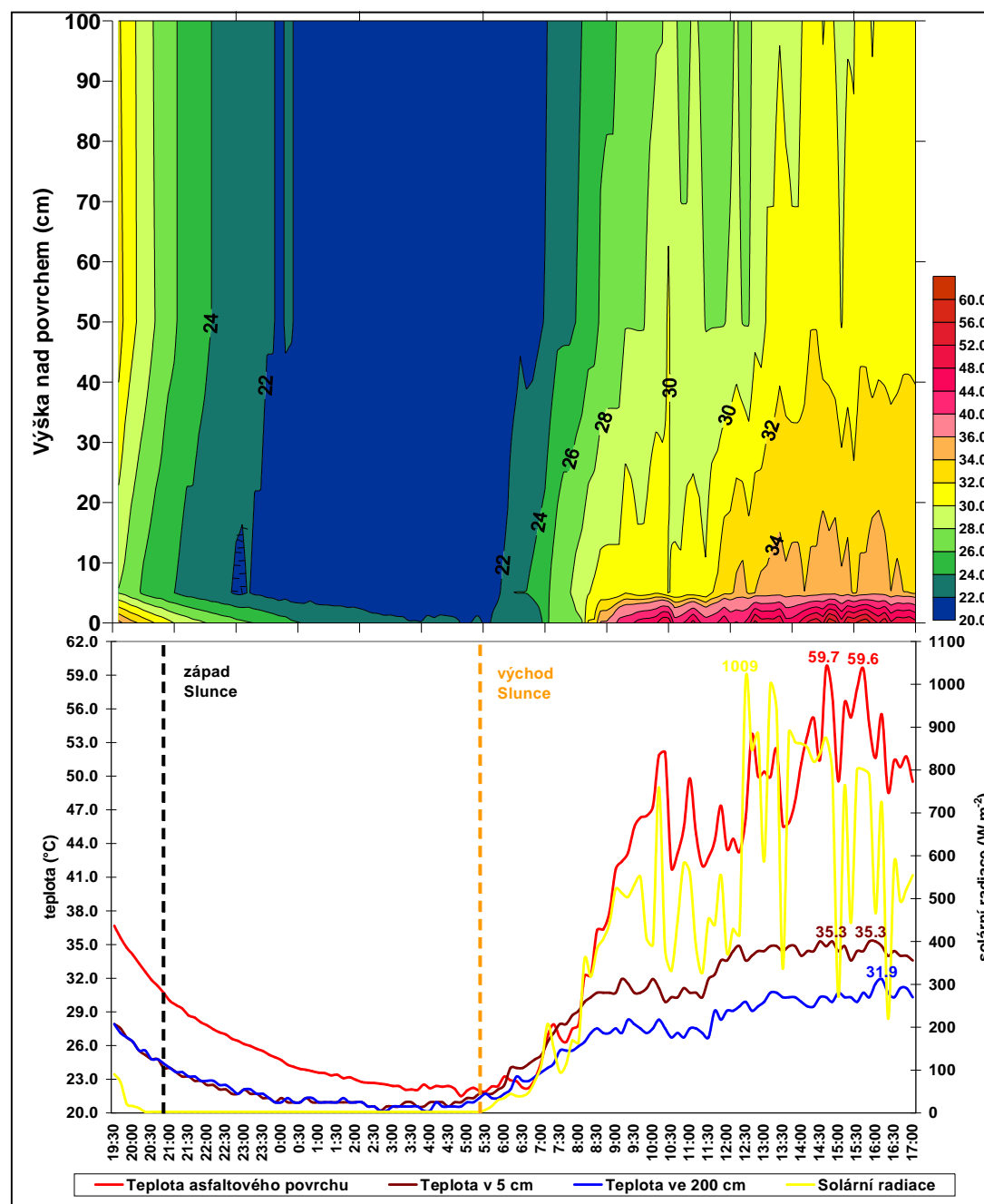
Na Obr. 1 a 2 je zachycen průběh desetiminutových teplot vzduchu nad asfaltovým povrchem naměřených senzory Hobo ve vertikálním profilu a interpolovaný programem Surfer během „průměrného dne“ za sledované období července a srpna v letech 2009 a 2010.



Obr. 1 a 2: Teplota vzduchu nad asfaltovým povrchem během „průměrného dne“ v roce 2009 (vlevo) a 2010 (vpravo)

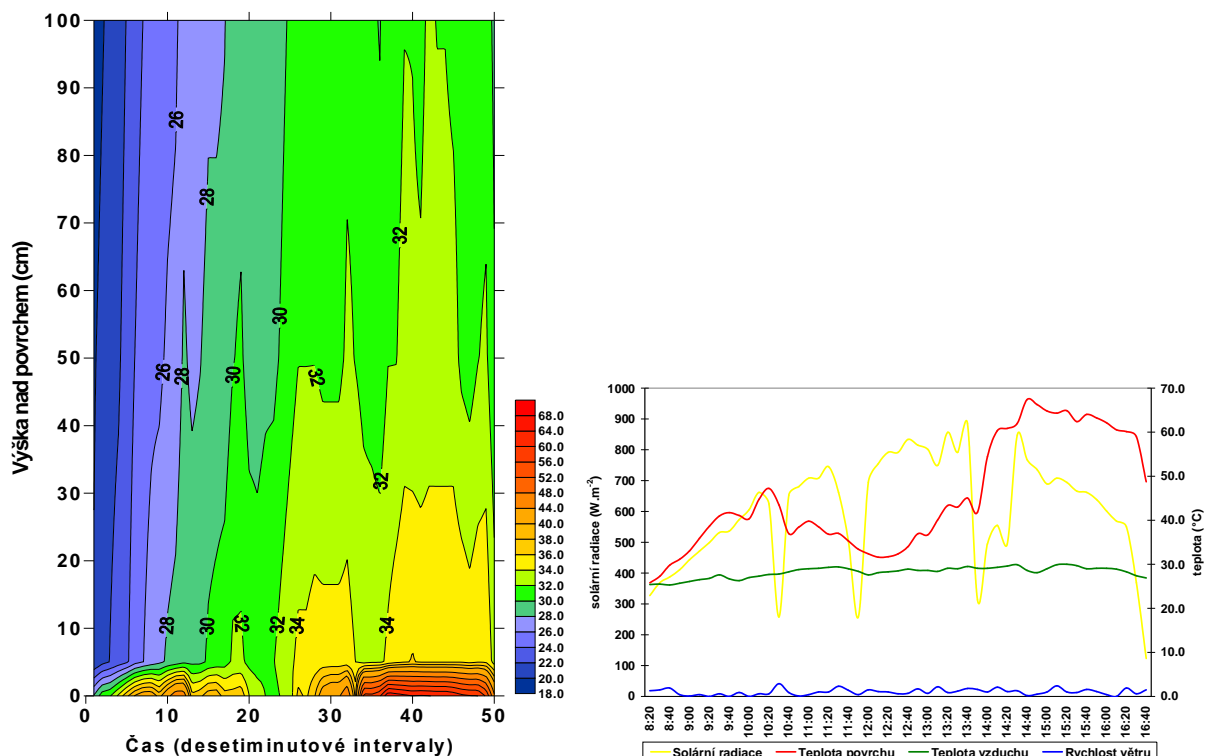
Z průběhu teplot je zřejmý očekávaný výrazný vliv povrchu na stratifikaci teplot ve vertikálním profilu. Efekt intenzivního prohřívání spodní vrstvy vzduchu přilehlé k tmavému

povrchu se projevuje se zejména od cca 9. hodiny ranní (pozice 55 na ose X) do cca 20. hodiny (pozice 120 na ose X) a koresponduje s intenzitou příkonu solární radiace. Maximální rozdíly „přízemní“ teploty vzduchu a teploty ve 2 nad povrchem se pohybují okolo 3 °C (29 °C vs. 26 °C v roce 2009 a 28 °C vs. 25 °C v roce 2010). Uvedené maximální difference se vyskytují okolo 15. hodiny (pozice 90 na ose X). Difference v tmavé části dne jsou výrazně nižší a pohybují se max. okolo 1 °C s tím, že teplotní rozdíl „při zemi“ a ve 2 m nad povrchem je během krátké doby (max. desítky minut) vyrovnáván. Chladnější průběh srpna o 1,7 °C v roce 2010 ve srovnání s rokem 2009 se projevili celkově nižšími teplotami nad monitorovaným povrchem ve všech výškách během „průměrného dne“.



Obr. 3: Teplota asfaltového povrchu a teplota vzduchu nad povrchem asfaltu ve srovnání s intenzitou slunečního záření 22.7. – 23.7.

Na kombinovaném Obr. 3 je zachyceno podrobné vyhodnocení průběhu teplot asfaltového povrchu měřených termometrem a teplot nad povrchem asfaltu ve srovnání s intenzitou slunečního záření během kontinuálního měření během tropických dnů 22.7. – 23.7.2010 od 19:30 do 17:00 hod. Interpolovaný výstup (horní část obrázku) tak pochází z dat z termometru i čidel Hobo. Ve spodní části obrázku jsou potom pro srovnání uvedeny neinterpolované průběhy teploty asfaltového povrchu, intenzity slunečního záření a vybraných teplot vzduchu nad povrchem. Zřejmá je dobrá shoda interpolovaných průběhů se „surovými“ daty. Maximální hodnoty teploty povrchu, teploty vzduchu v 5 a 200 cm nad povrchem, naměřené ve stejném časovém úseku činily 59,6; 35,3 a 31,9 °C.

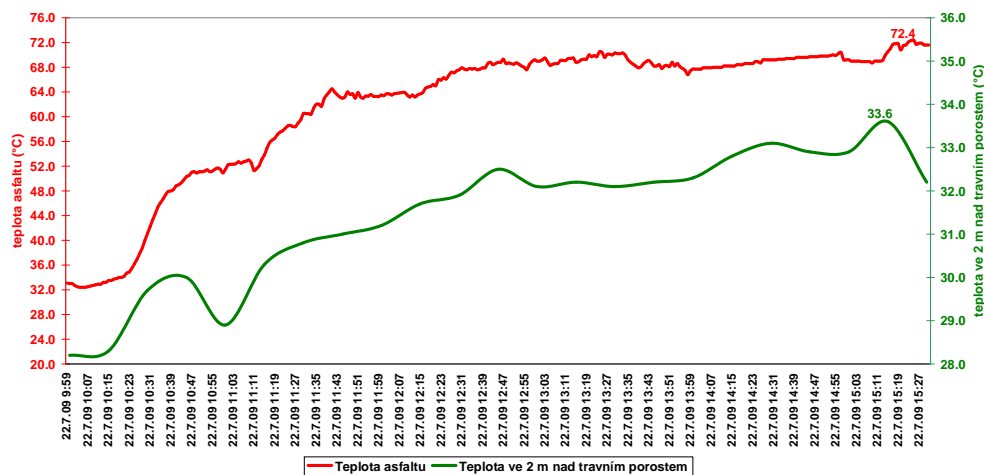


Obr. 4 (vlevo): Teplota asfaltu a vzduchu nad asfaltovým povrchem během 11.8.2010
Graf 1 (vpravo): Teplota asfaltového povrchu a průběh vybraných meteorologických veličin 11.8.2010

Obr. 4 zachycuje podrobný průběh teplot nad povrchem asfaltu během tropického dne 11.8.2010 od 8:30 do 16:30 hod. Výstup byl vytvořen interpolací dat teploty povrchu a teploty vzduchu nad asfaltovým povrchem v 5, 50 a 100 cm.

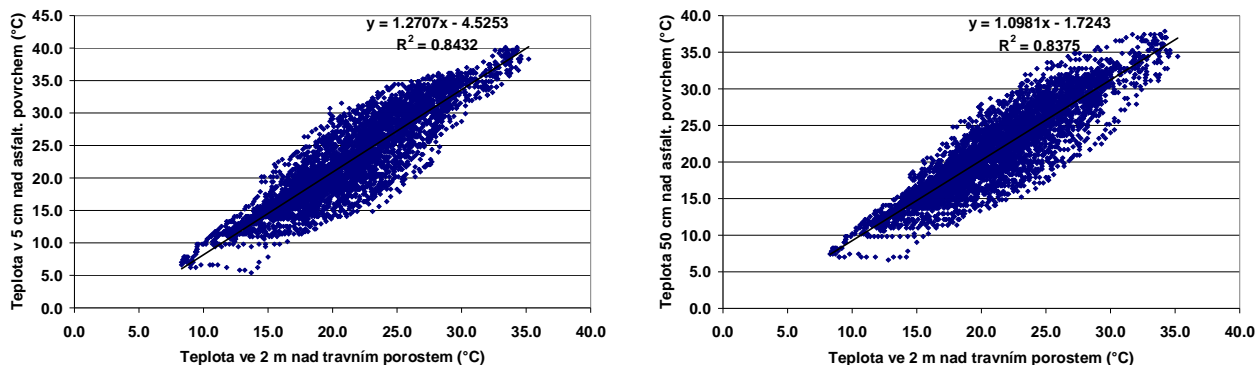
V Grafu 1 je pro srovnání ve stejném časovém úseku uveden průběh veličin, které mají na teplotu povrchu vliv – teplota vzduchu, solární radiace a rychlost větru (srážky se v daný den nevyskytly). Těsnost vztahu mezi teplotou asfaltového povrchu a meteorologickým prvkem byla vyjádřena korelačním koeficientem. Korelace mezi teplotou povrchu a teplotou vzduchu je statisticky vysoce průkazná ($r = 0,538$; $\alpha = 0,01$).

V Grafu 2 je provedeno srovnání průběhu teploty asfaltového povrchu a teploty vzduchu 2 m nad travním porostem v tropický den s naměřenou absolutně nejvyšší teplotou asfaltového povrchu (22.7.2009; 15:19 hod; 72,4 °C). Diference mezi teplotou vzduchu nad travním porostem a teplotou asfaltu činila v tento okamžik 39,4 °C.

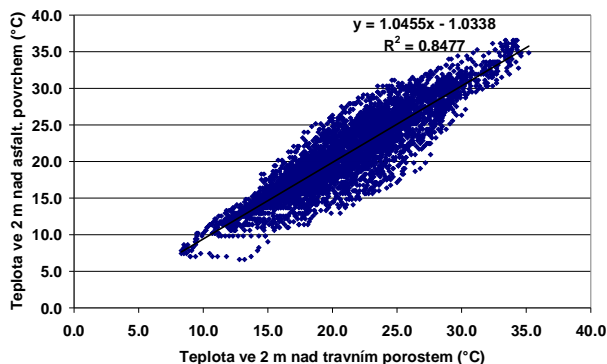


Graf 2: Průběh teploty asfaltového povrchu a teploty vzduchu nad travním porostem 22.7.2009

V Grafech 3 až 5 je uveden a pomocí lineární regrese kvantifikován vztah mezi teplotou vzduchu v různých výškách nad asfaltovým povrchem a teplotou ve 2 m nad travním porostem. Na uvedeném příkladu je zachycen stav reprezentující celé měřené období v roce 2010. Index determinace 0,8432 pro výšku 5 cm, 0,8375 pro výšku 50 cm a 0,8477 pro výšku 200 cm ve srovnání s hodnotami ve 2 m nad travním porostem prokazuje těsnou lineární závislost a dobrou kvalitu použitého lineárního modelu i při zohlednění vysokého počtu vysvětlujících proměnných. Regresní rovnice naznačují zvýšenou teplotu nad asfaltovým povrchem ve srovnání s teplotou ve 2 m nad travním porostem již v průměru od cca 20 °C. Konkrétně pro výšku 5 cm nad asfaltovým povrchem je „bodem zlomu“, kdy teplota začne převyšovat teplotu nad travním porostem hodnota 19,3 °C. Při použití modelové hodnoty 30 °C je teplota nad asfaltovým povrchem v 5 cm vyšší než nad travním porostem ve 2 m o 3,6 °C. V 50 cm o 1,2 °C a ve 200 cm o 0,3 °C.



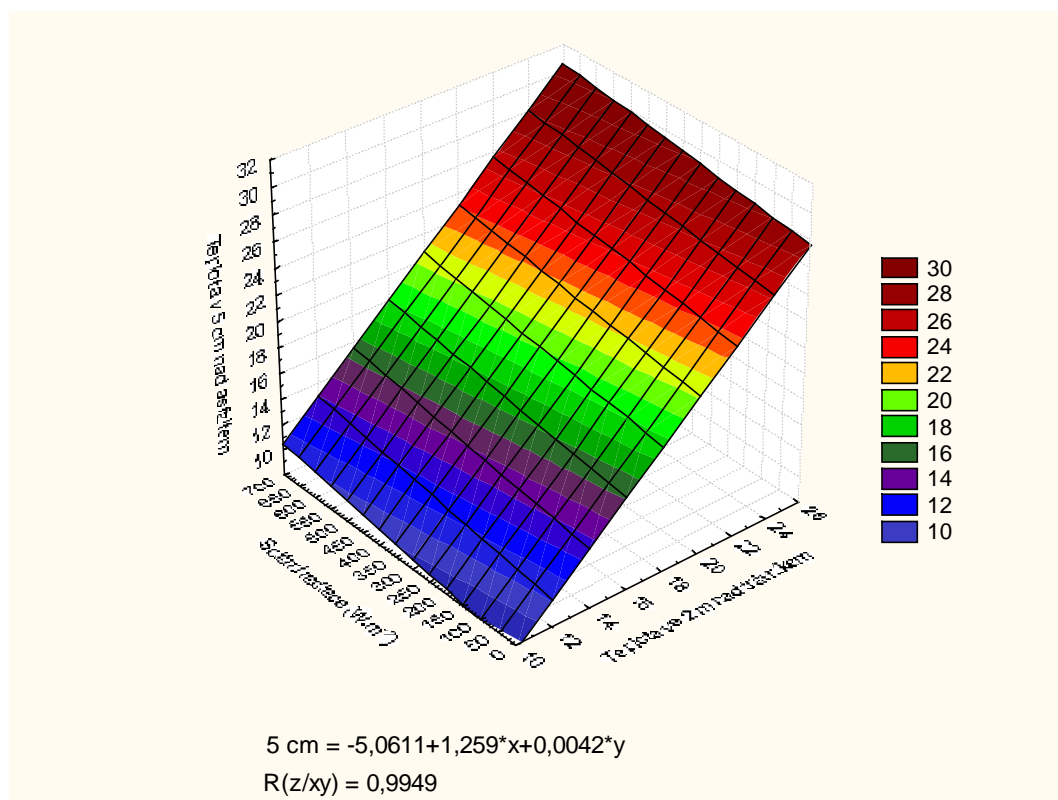
Graf 3 a 4: Regresní vztah mezi teplotou v 5 cm nad asfaltovým povrchem a teplotou ve 2 m nad travním porostem (vlevo) a mezi teplotou v 50 cm nad asfaltovým povrchem a teplotou ve 2 m nad travním porostem (vpravo) – hodnoceno období červenec a srpen 2010



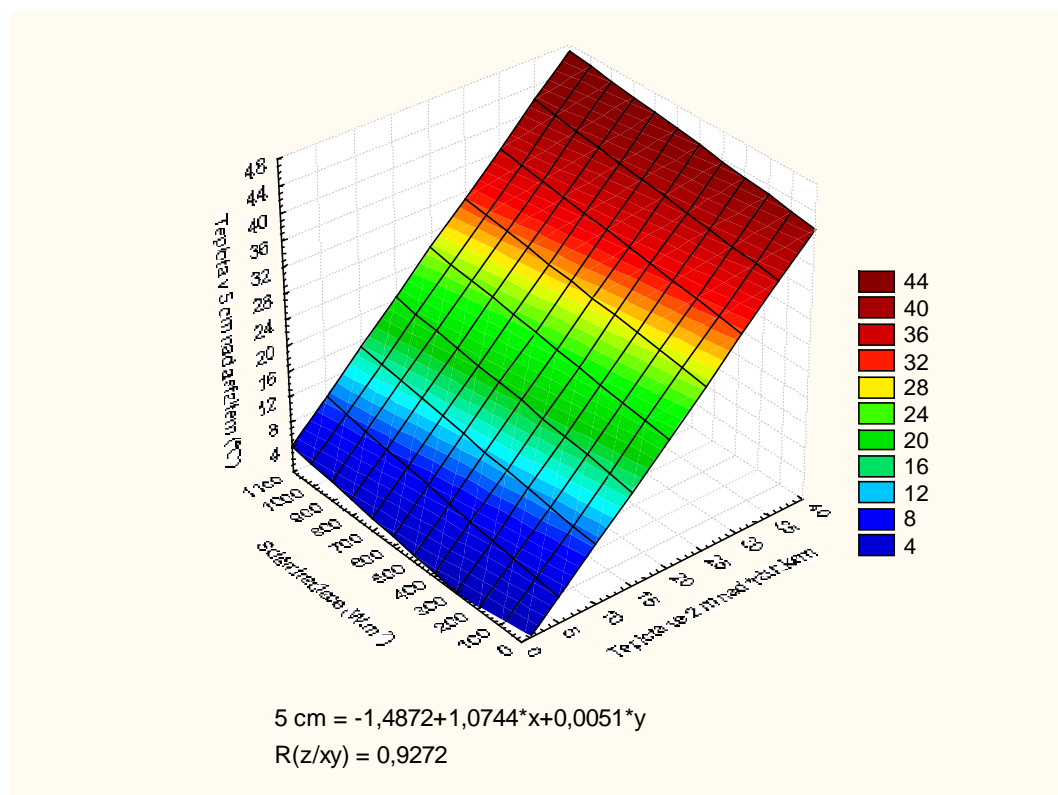
Obr. 5: Regresní vztah mezi teplotou ve 2 m nad asfaltovým povrchem a teplotou ve 2 m nad travním porostem – hodnoceno období červenec a srpen 2010

Na Obr. 5 je pomocí lineární regrese naznačen a kvantifikován kombinovaný vztah mezi teplotou vzduchu v různých výškách nad asfaltovým povrchem, teplotou ve 2 m nad travním porostem a solární radiací. Graf popisuje situaci během „průměrného dne“, uměle vytvořeného zprůměrováním dat z celého období měření v roce 2010. Mnohonásobný korelační koeficient činí 0,995. Regresní rovnice vztahu naznačuje například při použití modelové hodnoty 30 °C a solární radiaci 700 W.m⁻² teplotu vzduchu v 5 cm nad asfaltovým povrchem 35,6 °C.

Na Obr. 6 je potom pomocí lineární regrese naznačen a kvantifikován kombinovaný vztah mezi teplotou vzduchu v různých výškách nad asfaltovým povrchem, teplotou ve 2 m nad travním porostem a solární radiací ze všech naměřených dat (nezprůměrováno do průměrného dne). Mnohonásobný korelační koeficient činí 0,927. Regresní rovnice vztahu naznačuje například při použití modelové hodnoty 30 °C a solární radiaci 700 W.m⁻² teplotu vzduchu v 5 cm nad asfaltovým povrchem 34,3 °C.



Obr. 5: Regresní vztah mezi teplotou vzduchu v 5 cm nad asfaltovým povrchem, teplotou ve 2 m nad travním porostem a solární radiací během „průměrného dne“ – hodnoceno období červenec a srpen 2010



Obr. 6: Regresní vztah mezi teplotou vzduchu v 5 cm nad asfaltovým povrchem, teplotou ve 2 m nad travním porostem a solární radiací během ze všech dat – hodnoceno období červenec a srpen 2010

Závěr

V práci jsou vyhodnocena mikroklimatická měření teplot povrchu asfaltové plochy a přilehlé přízemní vrstvy vzduchu ve srovnání s měřením na klimatologické stanici za standardních podmínek realizována ve třetí dekádě července a v srpnu v letech 2009 a 2010.

Hodnoceny byly teploty asfaltového povrchu, teploty vzduchu ve výšce 5 cm, 50 cm, 100 cm a 200 cm nad asfaltovým povrchem, teplota vzduchu ve 2 m nad standardním travním porostem a globální radiace měřena nad monitorovanou střechou.

Byl potvrzen očekávaný výrazný vliv tmavého povrchu na stratifikaci teplot ve vertikálním profilu zejména cca od 9:00 do 20:00, který koresponduje s intenzitou příkonu solární radiace. Maximální rozdíly „přízemní“ teploty vzduchu a teploty ve 2 m nad povrchem se pohybují okolo 3 °C a byly zaznamenány okolo 15. hodiny. V tmavé části dne se diference během krátké doby vyrovnají a dosahují maximálně okolo 1 °C.

Index determinace mezi teplotou vzduchu v různých výškách nad asfaltovým povrchem a teplotou ve 2 m nad travním porostem určený na základě celého měřeného období v roce 2010 byl pro výšku 5 cm 0,8432, pro výšku 50 cm 0,8375 a pro výšku 200 cm 0,8477.

Zvýšená teplota nad asfaltovým povrchem ve srovnání s teplotou ve 2 m nad travním porostem se projevuje cca od 20 °C.

Korelační koeficient kombinovaného vztahu ($z=a+bx+cz$) mezi teplotou vzduchu v různých výškách nad asfaltovým povrchem, teplotou ve 2 m nad travním porostem a solární radiací činí 0,995 (během uměle vytvořeného „průměrného dne“ - zprůměrnování dat z celého období měření v roce 2010) resp. 0,927 (na základě všech naměřených dat - nezprůměrnováno

do průměrného dne). Při dosažení modelové hodnoty teploty vzduchu nad travním porostem 30 °C a solární radiace 700 W.m⁻² je teplota vzduchu v 5 cm nad asfaltovým povrchem určena jako 35,6 °C resp. 34,3 °C.

Zvláštní pozornost byla věnována dnům s vysokou teplotou vzduchu (tropickým dnům) a vysokou hodnotou globální radiace, kdy je předpokládán nejvyšší vliv antropogenních povrchů na teplotu vzduchu: 22.7., 23.7.2010 a 11.8.2010.

Během kontinuálního měření 22.7. – 23.7.2010 od 19:30 do 17:00 hod byly ve stejném časovém úseku zjištěny maximální hodnoty teploty povrchu, teploty vzduchu v 5 a 200 cm nad povrchem 59,6; 35,3; 31,9 °C. Absolutně nejvyšší teplota asfaltového povrchu 72,4 °C byla dosažena v 15:19 hod, diference mezi teplotou vzduchu nad travním porostem a teplotou asfaltu činila v tento okamžik 39,4 °C.

Na základě měření 11.8.2010 byla mezi teplotou povrchu a teplotou vzduchu zjištěna statisticky vysoce průkazná korelace ($r = 0,538$; $\alpha = 0,01$).

Dedikace

Práce je výstupem projektu GA ČR 205/09/1297 „Víceúrovňová analýza městského a příměstského klimatu na příkladu středně velkých měst“.

Použitá literatura

Aniello, C., Morgan, K., Busbey, A., Newland, L. (1995): Mapping micro - urban heat islands using Landsat - TM and GIS. *Computers and Geosciences*, 21(8), p. 965 - 969.

Givoni, B. (1998): *Climate Considerations in Building and Urban Design*, Canada, John Wiley & Sons, 480 p.

Goward, S.N. (1981): Thermal behaviour of urban landscapes and the urban heat island. *Physical Geography, Remote Sens. Environ.* 2:19-33.

Grimmond, C.S.B. (2006): Progress in measuring and observing the urban atmosphere. *Theor. Appl. Climatol.* 84, p. 3–22.

Litschmann, T., Rožnovský, J. (2005): Příspěvek ke studiu městského klimatu v Brně. In: *Transport vody, chemikálií a energie v systémech půda-rastlina-atmosféra*. Ústav hydrologie a Geofyzikální ústav SAV, Bratislava, CD ROM, s. 331 – 342.

Matson, M., McClain, E.P., McGinnis, Jr., D.F., Pritchard, J.A. (1978): Satellite detection of urban heat islands: *Monthly Weather Review*, 106 (12), p. 1725-1734.

Oke, T.R. (1981): Canyon Geometry and the Nocturnal Urban Heat Island: Comparison of Scale Model and Field Observations. *Journal of Climatology*, 1: 237-254.

Oke, T.R. (1982): The energetic basis of the urban heat island: *Quart. Jour. Roy. Meteor. Soc.* 108, p. 1-24.

Oke, T.R. (1997): Urban climates and global environmental change. In *Applied Climatology* (eds: Thompson, R.D. and Perry, A.). Routledge, London-New York, p. 273 – 287.

Oke, T.R., Johnson, G.T., Steyn, D.G., Watson, I.D. (1991): Simulation of surface urban heat islands under “ideal” conditions at night Part 2: diagnosis of causation: *Boundary-Layer Meteorology*, 56, p. 339-358.

Pokladníková, H., Chuchma, F., Středa, T., Rožnovský J. Výskyt horkých vln a tropických dnů v městském a příměstském prostředí. In *Člověk ve svém pozemském a kosmickém prostředí*. Úpice: Hvězdárna v Úpici, 2010, s. 103-108.

RAL – defining standard colors for paint and coatings. Dostupné z URL: www.ralcolor.com. Citováno: 28.1.2011.

Smargiassi, A., Goldberg, M.S., Plante, C., Fournier, M., Baudouin, Y., Kosatsky, T. (2009): Variation of daily warm season mortality as a function of micro-urban heat islands. *J. Epidemiol. Community Health*, 63(8), p. 659-664.

Stathopoulou, M., Cartalis, C., Keramitsoglou, I. (2004): Mapping micro urban heat islands using NOAA/AVHRR images and CORINE Land Cover: an application to coastal cities of Greece. *International Journal of Remote Sensing*, 25(12), p. 2301 - 2316.

Voogt, J.A. (2002): Urban heat island. In.: *Encyclopedia of global environmental change. Volume 3, Causes and consequences of global environmental change*, p. 660-666.

Kontaktní adresa 1. autora:

Ing. Tomáš Středa, Ph.D.

Český hydrometeorologický ústav, pobočka Brno

Kroftova 43

616 67 Brno

e-mail: tomas.streda@chmi.cz