

Multilevel analysis of temperature spatial variability in Brno region

Víceúrovňová analýza prostorové variability teplotních poměrů v oblasti města Brna

Petr DOBROVOLNÝ^a, Rudolf BRÁZDIL^a, Lukáš KRAHULA^a, Jaroslav ROŽNOVSKÝ^b

^a Masarykova univerzita, dobro@sci.muni.cz

^b Český hydrometeorologický ústav

Abstract

Temperature variability in urban areas can be studied on different levels using various data sources such as standard meteorological measurements, special-purpose measurements or thermal satellite imagery. This paper analyses a spatial distribution of land surface temperature (LST) and air temperature in the Brno region (Czech Republic). LSTs were derived from Landsat 7 ETM+ thermal imagery. The highest LSTs calculated from imagery made on 24 May 2001 exceeded 35 °C. However, such values were typical not only for urban surfaces but also for agricultural fields with sparse vegetation. Whereas thermal imagery provides spatially consistent information on surface temperatures, effects of urban environment on air temperatures can be studied with the help of special-purpose meteorological stations. Such network of stations was established in the Brno region during 2009. Spatio-temporal changes of air temperatures are described for a set of days with a radiation type of weather. Two sets of urban and rural stations are compared with respect to daily temperature variability for individual seasons. Results obtained show significantly higher air temperatures for urban stations with respect to rural stations. The highest differences occurred around noon and in the summer reached 1.5–2.0 °C.

Keywords: urban climate, thermal imagery, land surface temperature, air temperature, Brno

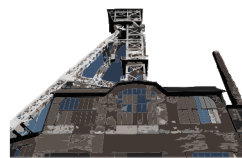
Klíčová slova: klima města, termální snímek, teplota aktivního povrchu, teplota vzduchu, Brno

1. Úvod

Problematika klimatu měst patří v současné klimatologii k frekventovaným tématům (e.g. Arnfield, 2003; Grimmond, 2006; Martilli, 2007; Mills, 2007). Je to dáno především rostoucím podílem městského obyvatelstva a jeho zranitelností, rizikem ztrát na lidských životech a velkých materiálních škod v případě extrémních projevů počasí. Ve velkých městech žije v současné době na 50 % světové populace a ve vyspělých státech světa dokonce až 75 % (Lambin, Geist, 2006). Změna charakteru aktivního povrchu zástavbou, znečištění ovzduší a produkce odpadního tepla jsou hlavními faktory formujícími specifické klima měst (Oke, 1997). Podle čtvrté hodnotící zprávy Mezivládního panelu pro klimatickou změnu (IPCC; Solomon et al., 2007) by růst frekvence a intenzity extrémních projevů počasí mohl být s velkou pravděpodobností jedním z projevů stávající klimatické změny. Tedy i v souvislosti s procesem současného globálního oteplování je problematika klimatu měst velmi aktuální, především s ohledem na dopady extrémních jevů. Tak například byla prokázána zvýšená úmrtnost obyvatelstva v důsledku vln horka v Chicagu v roce 1995 (Karl, Knight, 1997), v Lisabonu v letech 1980–1998 (Dessai, 2002) či v Paříži v extrémně teplém létě roku 2003 (Schär et al., 2004). V České republice (ČR) se studiem vln horka zabývali např. Huth et al. (2000), Kyselý (2002) či Kyselý, Dubrovský (2005). Pokračování procesu globálního oteplování může vést ke zvýšení intenzity, četnosti a trvání vln horka

s přímými dopady na obyvatelstvo (Meehl, Tebaldi, 2004).

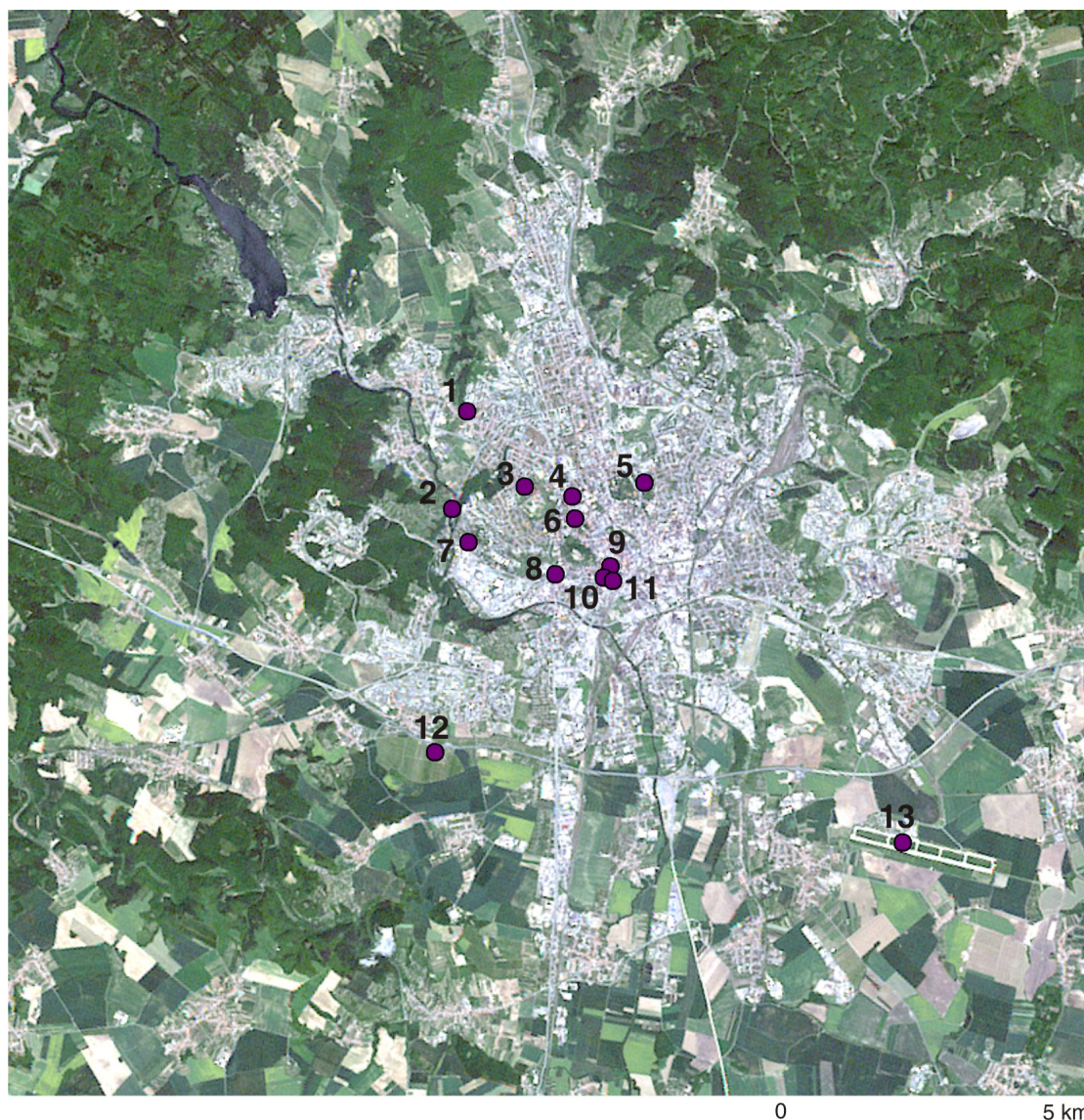
Městská zástavba a různé druhy lidských aktivit ve městě vytvářejí hierarchicky uspořádaný systém, který lze studovat na několika úrovních – od měřítka mikro (např. jednotlivé budovy) až po regionální úroveň. To platí i pro studium časové a prostorové variability základních meteorologických prvků v prostředí městské zástavby (Grimmond, 2006). Nejčastěji analyzovaným projevem městského klimatu je tzv. tepelný ostrov města (urban heat island – UHI). V závislosti na výše uvedené hierarchické struktuře městské zástavby a použitých datových zdrojích lze definovat několik druhů UHI (Oke, 2006). Potenciální ovlivnění teploty vzduchu se může týkat buď mezní vrstvy atmosféry (boundary layer) nebo přízemní vrstvy atmosféry (canopy layer), tedy přibližně vrstvy vzduchu uzavřeného v prostoru městské zástavby. Pro studium obou druhů UHI lze použít standardní či účelová měření teploty vzduchu. Vedle toho se uvádí také tzv. tepelný ostrov aktivních povrchů (surface urban heat island), který je definován jako kladná teplotní anomálie aktivních povrchů v prostoru městské zástavby vůči přirozeným povrchům venkovské krajiny. Velmi vhodným zdrojem informací o prostorové variabilitě teploty aktivních povrchů (land surface temperature – LST) mohou být družicová měření (Voogt, Oke, 2003). Je zřejmé, že teploty aktivních povrchů přímo ovlivňují teplotní poměry přízemní i mezní vrstvy atmosféry.



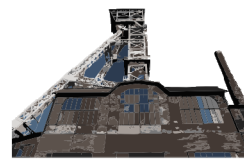
Cílem příspěvku je seznámit s dosavadními výsledky studia prostorové diferenciace teplotních poměrů v oblasti města Brna, které byly získány při řešení projektu GA ČR 205/09/1297 s názvem „Víceúrovňová analýza městského a příměstského klimatu na příkladu středně velkých měst.“ Prostorová diferenciace teploty je charakterizována na základě družicových měření teploty aktivních povrchů a na základě speciálních měření teploty vzduchu v síti automatických meteorologických stanic. Ve druhé části příspěvku je charakterizována studovaná oblast a základní datové zdroje. Jeho třetí kapitola seznamuje se základními metodologickými přístupy. Čtvrtá část sumarizuje dosavadní výsledky. V závěru jsou naznačeny další výhledy řešení projektu.

2. Studovaná oblast a použité údaje

Brno je druhé největší město ČR s téměř 400 000 obyvateli a s plochou katastrálního území 230 km². Na zastavěné plochy studované oblasti připadá 20,91 km². Nadmořské výšky se pohybují od 190 do 479 m. Vyšší polohy s výraznějším podílem lesních ploch jsou typické pro severní část studovaného území, zatímco pro jižní a východní části je typický nižší a plošší terén, v němž převládají zemědělsky využívané plochy (obr. 1). Studovaná oblast patří mezi nejteplejší a nejsušší regiony ČR. Na stanici Brno, Tuřany dosahovala v období 1961–1990 průměrná roční teplota vzduchu 8,7 °C a průměrný roční úhrn srážek 490 mm.



Obr. 1 Studovaná oblast města Brna a jeho okolí na družicovém snímku Landsat 7 s vyznačením polohy stanic s měřeními teploty vzduchu: 1 – Žabovřesky, 2 – Jundrov, 3 – Kraví hora, 4 – Botanická zahrada, 5 – Ústav geoniky, 6 – Filosofická fakulta, 7 – Hroznová ul., 8 – Mendlovo nám., 9 – Veronica, 10 – Biskupství, 11 – Kapucínské nám., 12 – Starý Lískovec, 13 – Tuřany, letiště

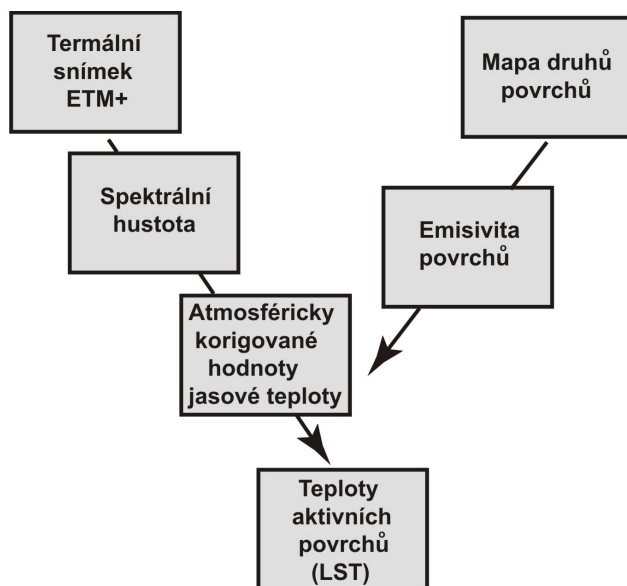


Variabilita povrchových teplot studovaného území byla analyzována pomocí termálního snímku z družice Landsat 7. Snímek byl pořízen radiometrem ETM+ dne 24. května 2001 v 11:35 hod. středoevropského letního času. Termální pásmo zaznamenává intenzitu dlouhovlnného záření v intervalu 10,4–12,5 μm s prostorovým rozlišením 60 m. Den pořízení snímku lze charakterizovat typickým radiačním režimem počasí s minimální oblačností. Podle typizace ČHMÚ (Katalog, 1972) se jednalo o den se severovýchodní anticyklonální situací (NEa).

Dalším zdrojem údajů pro studium teplotního pole byla měření teploty vzduchu v síti účelových stanic, která byla ve studovaném prostoru vybudována v průběhu roku 2009 (obr. 1). Měření teploty vzduchu byla k dispozici v intervalu 15 (resp. 10) minut od března 2009 do července 2010 pro celkem 13 stanic. Podle polohy a charakteru okolních ploch lze uvedené stanice rozdělit na stanice městského charakteru (stanice č. 4–11 v obr. 1) a stanice „příměstské“ (č. 1–3, 12, 13 v obr. 1).

3. Metody zpracování

Radiometr ETM+ umístěný na družici Landsat 7 poskytuje pouze jeden snímek z termální části spektra. Proto byl pro sestavení map prostorové diference povrchových teplot využit postup schematicky uvedený na obr. 2.



Obr. 2. Schematický postup výpočtu teplot aktivních povrchů z termálního snímku pořízeného družicí Landsat 7. Vysvětlivky viz text.

Pro výpočet teploty aktivních povrchů je nejprve nutné převést družicí zaznamenané bezrozměrné hodnoty (tzv. DN hodnoty) termálního pásma ETM+ 6.1 na hodnoty spektrální hustoty záření na horní hranici atmosféry,

kteří již mají fyzikální rozměr ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \mu\text{m}^{-1}$). K získání povrchových teplot je pak třeba odstranit vlivy atmosféry. K tomu byl použit postup navržený Barsi et al. (2005) s využitím modelu MODTRAN. Korigované hodnoty byly poté transformovány za pomoci Planckova zákona na teploty aktivních povrchů (LST). Planckův zákon je odvozen pro tzv. absolutně černé těleso, jehož schopnost vyzařování (emisivita) je rovna jedné. Pro odhady povrchových teplot reálných povrchů musíme získané hodnoty opravit, protože jejich emisivita je menší než jedna. Hodnoty emisivity základních druhů povrchů uvádí např. Snyder et al. (1998). K jejich aplikaci na jednotlivé části zpracovávaného snímku byla sestavena mapa základních druhů povrchů. Výsledné mapy povrchových teplot mají podobu spojitěho pole s rozlišením odpovídajícím původnímu termálnímu snímku.

Povrchové teploty vypočtené z termálních družicových snímků poskytují detailní a prostorově konzistentní informaci, která se však z časového hlediska vztahuje především k době vzniku snímku. Naproti tomu teplota vzduchu měřená v síti standardních či účelových meteorologických stanic může být zjišťována v jednotlivých místech měření téměř kontinuálně. K charakterizování rozdílů v denním chodu teploty vzduchu bylo využito měření na celkem 13 stanicích. Protože potenciální vliv městské zástavby na teplotu vzduchu je největší při radiačním typu počasí, byl analyzován průběh teploty vzduchu ve dnech, které odpovídaly následující definici tzv. radiačních dnů (Prošek, 1978):

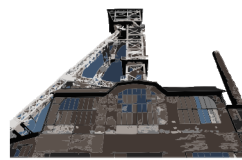
- denní úhrn trvání slunečního svitu představuje nejméně 80 % astronomicky možného
- průměrná denní rychlost větru je nejvýše $4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$
- křivka průběhu teploty vzduchu je plynulá a případné kolísání je způsobeno pouze oblaky z konvekce.

Pro vymezení radiačních dnů byly použity údaje z meteorologické stanice ČHMÚ v Brně, Tuřanech. Průměrný denní chod teploty vzduchu byl analyzován na úrovni jednotlivých ročních období. Zvláštní pozornost byla věnována studiu tvaru křivky denního chodu, době výskytu extrémních teplot a dalším charakteristikám, které mohly indikovat potenciální vliv města na teplotní poměry.

4. Výsledky analýzy teplotních poměrů oblasti města Brna

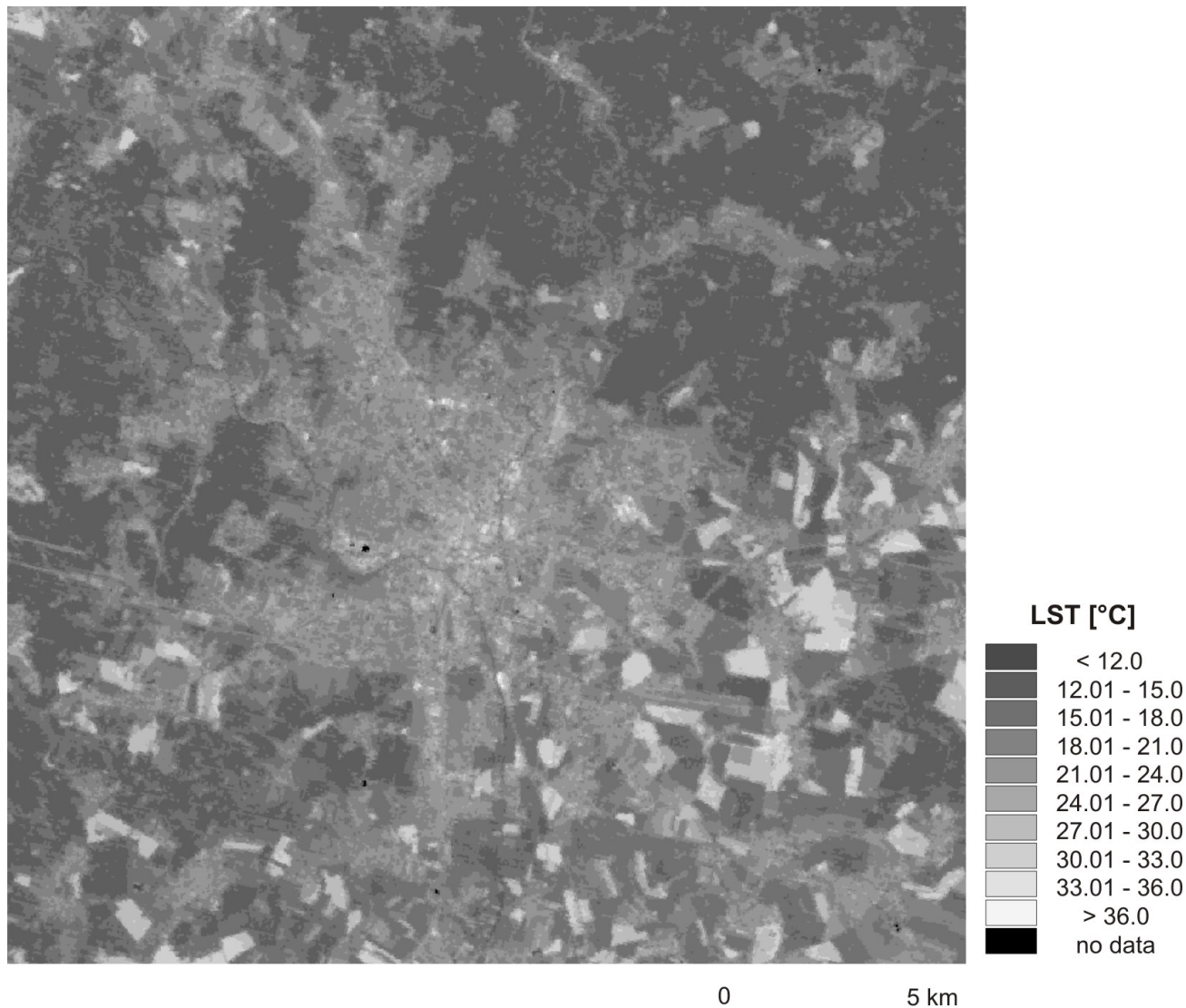
4.1 Prostorová variabilita teploty aktivního povrchu

Použitý družicový snímek byl geometricky korigován, aby bylo možné vypočtené hodnoty povrchových teplot kombinovat s jinou prostorovou informací jako jsou liniové prvky komunikací, vodních toků apod. Upravené



termální snímky byly následně transformovány na hodnoty teplot aktivních povrchů postupem naznačeným

v obr. 2. Jsou prezentovány v podobě spojitých polí teplot aktivních povrchů v obr. 3.



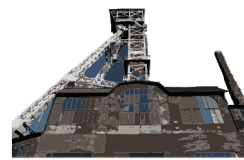
Obr. 3. Variabilita povrchových teplot (LST) v oblasti města Brna sestavená z termálního snímku družice Landsat 7 pořízeného dne 24. května 2001

Jak je patrné z obr. 3, teploty aktivních povrchů se vyznačují značnou prostorovou proměnlivostí. Na základě analýzy družicových měření mohou v oblasti městské zástavby přesahovat hodnoty 35 °C, zatímco teploty povrchů s vegetačním krytem kolísají jen kolem 25 °C. Uvedené údaje lze porovnat s hodnotami teploty vzduchu, které byly v den pořízení družicového snímku zaznamenány na stanici Brno, Tuřany: minimum 8,4 °C; maximum 23,3 °C; průměr 17,6 °C; přízemní minimum 5,0 °C. V porovnání s okolím dosahují LST v prostoru města výrazně vyšších hodnot v lokalitách charakterizovaných vysokou hustotou zástavby. Porovnatelné hodnoty LST však mají také povrchové teploty zemědělských ploch, které jsou bez vegetace a u nichž převládá vyzařování půdního substrátu. Vzhledem

k charakteru reliéfu a k rozložení základních druhů povrchů je pro studovanou oblast města Brna typický především velmi výrazný horizontální gradient hodnot LST ve směru sever – jih s nižšími hodnotami severně od městské zástavby a vyššími hodnotami na jih od centra města.

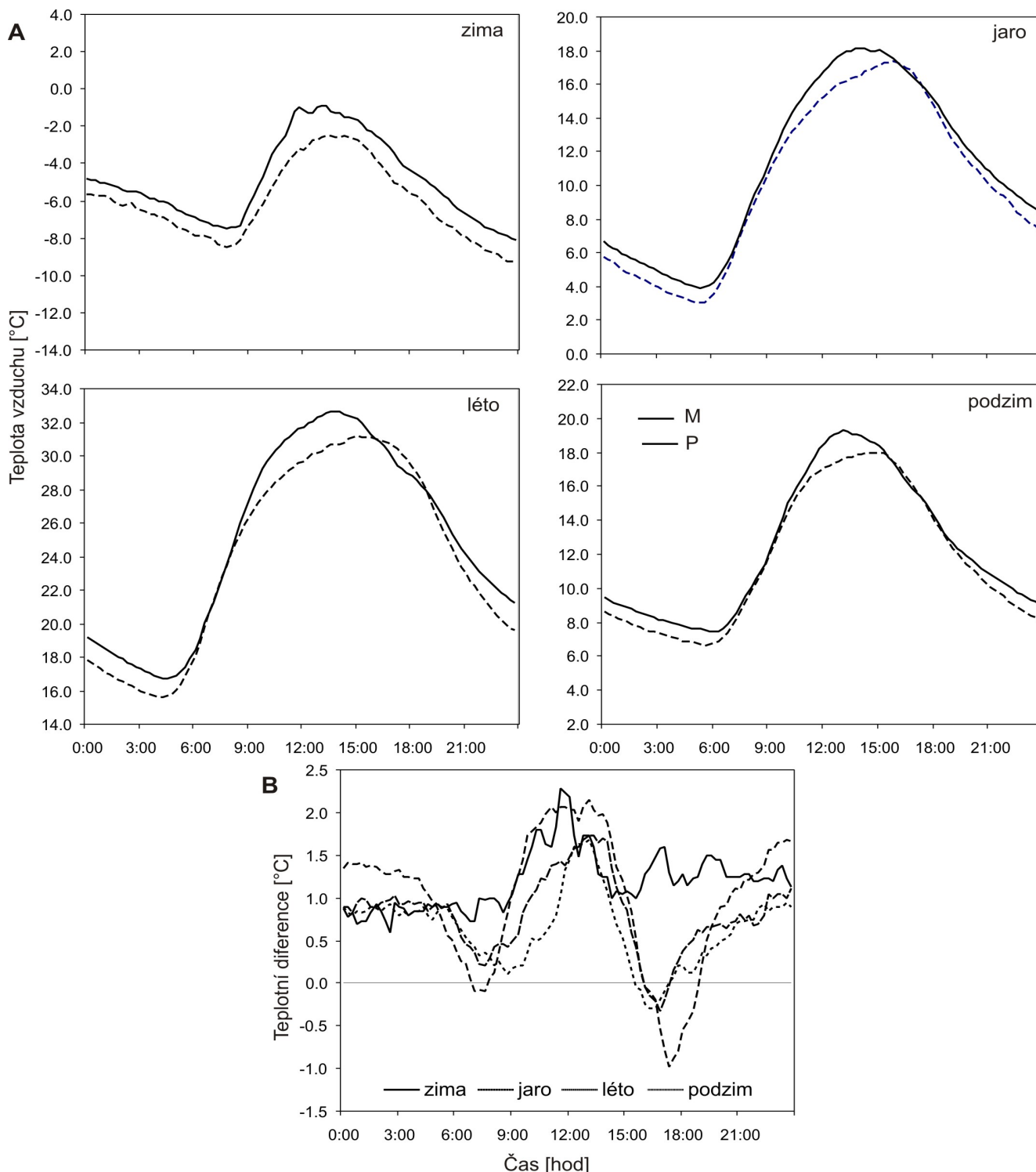
4.2 Variabilita denního chodu teploty vzduchu

V období od 1. ledna 2009 do 31. července 2010 bylo vyčleněno celkem 69 radiačních dnů (zima 4, jaro 19, léto 35, podzim 11). Počty dnů použité pro sestavení průměrných denních chodů teploty vzduchu na stanicích v jednotlivých ročních obdobích jsou poplatné jednak studovanému období (například v zimě 2009/10 nebyl

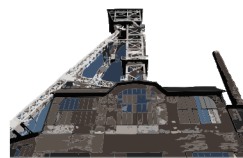


zaznamenán žádný radiační den), jednak začátku měření na jednotlivých účelových stanicích v průběhu roku 2009. S ohledem na počet radiačních dnů a stanic s dostupnými měřeními jsou výsledky

nejreprezentativnější pro léto a nejméně reprezentativní pro zimu. Obr. 4 ukazuje průměrné denní chody teploty vzduchu vypočítané pro skupiny stanic městského a příměstského charakteru (viz kap. 2).



Obr. 4. (A) Průměrné denní chody teploty vzduchu na městských (M) a příměstských (P) stanicích v oblasti města Brna v jednotlivých ročních obdobích sestavené pro dny s radiačním režimem počasí pro leden 2009 – červenec 2010. (B) Diference v denním chodu teploty vzduchu na městských a příměstských stanicích.



Ve dnech s radiačním režimem počasí jsou městské stanice v zimě po celý den o 1–2 °C teplejší než stanice okolní. Výrazný denní chod mají teplotní difference mezi městskými a příměstskými stanicemi v létě. V poledních hodinách tento rozdíl přesahuje 2 °C, zatímco v ranních hodinách (7–8 hod.) je minimální. Obdobně je tomu na jaře a na podzim. V podvečerních hodinách (17–19 hod.) zaznamenávají naopak příměstské stanice v létě teploty asi o 1 °C vyšší. Časový výskyt minimálních hodnot v denním chodu se na obou typech stanic výrazně neliší. Postupný nárůst teploty vzduchu je však v případě městských stanic strmější a maximálních teplot vzduchu je dosaženo ve všech ročních obdobích dříve. V létě mohou mít stanice ve městě maxima teploty vzduchu o 1,5–2 °C vyšší než stanice příměstské.

5. Závěr

Na základě analýzy dvou odlišných datových souborů bylo možné charakterizovat základní rysy prostorové variability teploty v oblasti města Brna a jeho okolí ve dnech s radiačním režimem počasí. Rozložení teploty aktivních povrchů i denní chod teploty vzduchu indikuje významné ovlivnění těchto charakteristik v prostředí městské zástavby v porovnání s okolím a ukazuje na potenciální formování tepelného ostrova města. Studium povrchových teplot bude možné dále rozšířit o analýzu družicových měření z radiometru ASTER, který poskytuje celkem pět termálních snímků. Jeho výhodou je, že jak hodnoty emisivity jednotlivých pásem, tak i výsledné teploty aktivních povrchů lze získat přímo z těchto termálních snímků a není tedy nutné sestavovat mapu základních druhů povrchů.

K dalšímu charakterizování časoprostorových změn v poli teploty vzduchu v Brně a jeho okolí bude na základě kontinuálně probíhajících měření rozšířen soubor analyzovaných případů s radiačním režimem počasí, a to především pro zimu. Zvýšená pozornost bude také věnována analýze výskytu extrémně vysokých teplot vzduchu.

Použité zdroje:

ARNFIELD, A. J. (2003): Two decades of urban climate research: a review of turbulence, exchanges of energy and water, and the urban heat island. *Int. J. Climatol.*, 23, č. 1, s. 1–26.

BARSI, J. A., SCHOTT, J. R., PALLUCONI, F. D., HOOK, S. J. (2005). Validation of a web-based atmospheric correction tool for single thermal band instruments. *Proceedings, SPIE*, vol. 5882. Paper 58820E. Bellingham, WA. 7 s.

DESSAI, S. (2002): Heat stress and mortality in Lisbon. Part I. Model construction and validation. *Int. J. Biometeorol.*, 48, č. 1, s. 37–44.

GRIMMOND, S. (2006): Progress in measuring and observing the urban atmosphere. *Theor. Appl. Climatol.*, 84, č. 1–2, s. 3–22.

HUTH, R., KYSELÝ, J., POKORNÁ, L. (2000): A GCM simulation of heat waves, dry spells, and their relationships to circulation. *Clim. Change*, 46, č. 1–2, s. 29–60.

KARL, T., KNIGHT, R. (1997): The 1995 Chicago heat wave: How likely is a recurrence? *Bull. Amer. Meteorol. Soc.*, 78, č. 6, s. 1107–1119.

Katalog povětrnostních situací pro území ČSSR. Hydrometeorologický ústav, Praha, 1972, 38 s.

KYSELÝ, J. (2002): Temporal fluctuations in heat waves at Prague-Klementinum, the Czech Republic, in 1901–1997, and their relationships to atmospheric circulation. *Int. J. Climatol.*, 22, č. 1, s. 33–50.

KYSELÝ, J., DUBROVSKÝ, M. (2005): Simulation of extreme temperature events by a stochastic weather generator: effects of interdiurnal and interannual variability reproduction. *Int. J. Climatol.*, 25, č. 2, s. 251–269.

LAMBIN, E., GEIST, H., eds. (2006): *Land-Use and Land-Cover Change. Local Processes and Global Impacts.* Springer, Berlin, Heidelberg, 222 s.

MARTILLI, A. (2007): Current research and future challenges in urban mesoscale modelling. *Int. J. Climatol.*, 27, č. 14, s. 1909–1918.

MEEHL, G. A., TEBALDI, C. (2004): More intense, more frequent, and longer lasting heat waves in the 21st century. *Science*, 305, č. 5686, s. 994–997.

MILLS, G. (2007): Cities as agents of global change. *Int. J. Climatol.*, 27, č. 14, s. 1849–1857.

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

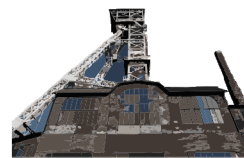
OKE, T. R. (2006): Towards better scientific communication in urban climate. *Theor. Appl. Climatol.*, 84, č. 1–2, s. 179–190.

PROŠEK, P. (1978): Vliv reliéfu na teplotní poměry Pavlovských vrchů. *Univerzita J. E. Purkyně v Brně*, Brno, 99 s.

SCHÄR, C., VIDALE, P. L., LÜTHI, D., FREI, C., HÄBERLI, C., LINIGER, M. A., APPENZELLER, C. (2004): The role of increasing temperature variability in European summer heatwaves. *Nature*, 427, č. 6972, s. 332–336.



XXII SJEZD ČESKÉ GEOGRAFICKÉ SPOLEČNOSTI OSTRAVA 2010



SOLOMON, S., QIN, D., MANNING, M., MARQUIS, M., AVERYT, K., TIGNOR, M. M. B., LEROY MILLER, H., CHEN, Z., eds. (2007): *Climate Change 2007: The Physical Science Basis*. Cambridge University Press, Cambridge, New York, Melbourne, Madrid, Cape Town, Singapore, São Paulo, Delhi, 996 s.

SNYDER, W. C., WAN, Z., ZHANG, Y., FENG, Y. Z. (1998): Classification based emissivity for land surface temperature measurement from space. *Int. J. Rem. Sens.*, 19, č. 14, s. 2753–2774.

VOOGT, J., OKE, T. (2003): Thermal remote sensing of urban climates. *Rem. Sens. Environ.*, 86, č. 3, s. 370–384.

Problematika prezentovaná v tomto příspěvku byla zpracována s finanční podporou pro řešení projektu GA ČR 205/09/1297 s názvem „Víceúrovňová analýza městského a příměstského klimatu na příkladu středně velkých měst.“

Adresy autorů:

Doc. RNDr. Petr Dobrovolný, CSc.

Prof. RNDr. Rudolf Brázdil, DrSc.

Bc. Lukáš Krahula

Geografický ústav

Přírodovědecké fakulty Masarykovy univerzity

Kotlářská 2

611 37 Brno

dobro@sci.muni.cz

RNDr. Ing. Jaroslav Rožnovský, CSc

Český hydrometeorologický ústav, pobočka Brno

Kroftova 43

616 67 Brno