

## ANALÝZA TEPLoty AKTIVNÍCH POVRCHŮ V OBLASTI BRNA

### Analysis of Land Surface Temperatures in Brno Region

Dobrovolný P.

Geografický ústav, přírodovědecká fakulta, Masarykova univerzita, Kotlářská 2, Brno

**Abstrakt.** Časovou a prostorovou variabilitu teplotních poměrů ve městě je možné analyzovat na různých úrovních v závislosti na použitých datových zdrojích. Těmi mohou být standardní meteorologická měření, měření v účelové síti stanic, mobilní měření či měření, která poskytují metody dálkové detekce. Předkládaný příspěvek prezentuje výsledky studia prostorové variability povrchových teplot (Land Surface Temperatures – LST) v oblasti Brna. Analýza byla provedena na základě dostupných snímků pořízených v minulých letech družicemi Terra a Landsat. Ke konstrukci polí LST byly použity dva metodické přístupy. Snímky z družice Landsat (ETM+) obsahují pouze jedno termální pásmo a pro výpočet LST je zapotřebí dodat informaci o emisivitě povrchů. Ta byla sestavena na základě mapy základních druhů povrchů. Naproti tomu družice Terra (ASTER) poskytuje pět snímků pořízených v termální části spektra a výpočet emisivity i LST je možný přímo z těchto snímků. Jsou prezentovány mapy LST sestavené pro oblast Brna z obou zdrojů dat. Porovnání hodnot LST městské zástavby a okolní venkovské krajiny dává představu o potenciálním formování tepleného ostrova v oblasti Brna. Hodnoty LST v rámci zastavěných ploch umožňují vymezit oblasti s nejvyššími povrchovými teplotami. Termální družicové snímky poskytují prostorově konzistentní informaci o povrchových teplotách. Problematika mapování povrchových teplot v oblasti Brna je součástí projektu GAČR 205/09/1297 s názvem „Víceúrovňová analýza městského a příměstského klimatu na příkladu středně velkých měst.“

**Klíčová slova:** klima měst, termální snímky, teploty aktivních povrchů

**Abstract.** Temperature variability in urban environment can be studied on different levels using different data sources such as standard meteorological measurements, special-purpose measurements, mobile measurements or e.g. thermal satellite imagery. Spatial distribution of Land Surface Temperatures (LST) in Brno and surroundings has been modeled using available imagery from Terra ASTER and Landsat 7 ETM+ satellites. We present two different methodological approaches that can be used for construction of LST fields. Since Landsat 7 ETM+ offers a single thermal imagery, the first approach uses emissivity maps that must be constructed from land-use categories in advance. Terra ASTER provides five thermal images and both emissivity and LST can be computed directly from them. We compare both methods and provide LST maps of the study area. These maps are used to describe spatial distribution of LST and to detect areas that are typical with higher LST values. Analysis of LST was prepared within the project no. GA205/09/1297 “Multilevel analysis of the urban and suburban climate taking medium-sized towns as an example”

**Key words:** urban climate, thermal imagery, land surface temperatures

#### Úvod

Mezi hlavní faktory, které formují specifické teplotní poměry městských aglomerací v porovnání s volnou krajinou, náleží změny v charakteru aktivních povrchů zástavbou, znečištění atmosféry či produkce odpadního tepla. Přesto, že je teplota spojitou veličinou, vyznačují se teplotní poměry ve městě specifickými změnami v čase a také značnou

prostorovou variabilitou. K jejímu studiu je zapotřebí speciálních účelových měření v husté síti měřících bodů. Alternativní zdroj dat o teplotních poměrech však představují také družicová měření. Množství emitovaného záření v termální části elektromagnetického spektra, která je nejčastěji vymezena rozsahem vlnových délek 8–12 mikrometrů, je nositelem informace o teplotních poměrech studovaného území. Tyto teplotní poměry jsou však v případě metod dálkové detekce charakterizovány odlišnými veličinami než je tomu v případě měření teploty vzduchu. Z družicových měření lze m.j. určit tzv. teplotu aktivních povrchů (Land Surface Temperature – LST).

V současné době existuje několik družicových systémů, které poskytují termální snímky. Tyto systémy se s ohledem na možnosti využití v různých aplikacích odlišují především počtem snímaných termálních pásem, časovou a prostorovou rozlišovací schopností. Pro účely studia městského klimatu jsou vhodné především snímky z družic Landsat (radiometr ETM+) (Sobrino et al. 2004; Stathopoulou, Cartalis 2007). Dále snímky z radiometru ASTER, umístěného na např. družicích Terra (Gillespie et al. 1998; Dash et al. 2005; Kato, Yamaguchi 2005). Dalším zdrojem dat využitelným ke studiu městského klimatu jsou snímky z radiometru MODIS (Pongracz et. al. 2005; Cheval, Dumitrescu 2009). Tyto však mají poněkud omezené prostorové rozlišení (1 km).

Zastavěné oblasti měst mohou být výrazně teplejší než okolní krajina v důsledku modifikace jednotlivých členů rovnice energetické bilance. Jak uvádí např. Voogt a Oke (2003), formování teplotních poměrů v zastavěných oblastech souvisí především se specifickými vlastnostmi prostředí městské zástavby jako druhu aktivního povrchu v porovnání s volnou krajinou. V prostředí městské zástavby dochází ke změně geometrie aktivního povrchu. Také zvětšení plochy aktivních povrchů a převaha vertikálně orientovaných povrchů vedou ke zvyšování množství pohlceného krátkovlnného záření a k jeho četným odrazům. Uzavřené prostory mezi budovami omezují dlouhovlnné vyzařování a především v nočních hodinách snižují ztráty tepla. V zastavěných oblastech je v důsledku velké drsnosti snížena rychlost větru, čímž dochází k potlačení efektu ochlazování procesy konvekce. Odlišné tepelné vlastnosti aktivních povrchů s velkým podílem materiálů se značnou tepelnou kapacitou vedou ke zvýšenému pohlcování tepla v období pozitivní energetické bilance a naopak k jeho uvolňování v období negativní energetické bilance. Velký podíl nepropustných povrchů snižuje dostupné množství vody k evapotranspiraci a následně se tak snižuje latentní tok tepla. Také turbulentní přenos tepla je redukován v důsledku geometrie městské zástavby. Specifické teplotní poměry zastavěných ploch dále souvisí s nízkým albedem zastavěných ploch, se znečištěním atmosféry a přispívá k němu také produkce odpadního tepla, která je však druhotným faktorem (Oke, 1997). Výše zmíněné faktory podmiňují značnou časovou i prostorovou proměnlivost teplotních poměrů měst.

Předložený příspěvek prezentuje prvotní výsledky studia prostorové diference teplot aktivních povrchů na příkladu města Brna. Nejprve je charakterizována studovaná oblast a použité datové soubory. V metodické části jsou shrnuty principy mapování LST z použitých družicových snímků. Dále se prezentují výsledky analýzy dvou typů družicových snímků a diskutují se přednosti a nedostatky použitých metod.

### **Studovaná oblast a použité údaje**

Katastrální území města Brna má plochu 230 km<sup>2</sup>. Na zastavěné plochy připadá asi 9 % rozlohy, významný podíl ve studované oblasti tvoří zemědělská (35 %) a lesní půda (28 %). Nadmořské výšky se pohybují v rozmezí od 190 m do 479 m. Vyšší polohy s výraznějším podílem lesních ploch jsou typické pro severní část studovaného území, zatímco pro jižní a východní části je charakteristický nižší a plošší terén, v němž převládají zemědělsky využívané plochy (Obr. 1). Významným fenoménem je vodní plocha Brněnské přehrady. Na několika místech obklopuje souvislá městská zástavba plochy pokryté vegetací. Jedná se

především o vyvýšenou oblast s hradem Špilberk a dále o parky Lužánky, Kraví hora či Koliště. 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 byl 490 mm.



Obr. 1. Studovaná oblast města Brna a jeho okolí na družicovém snímku Landsat 7. Barevná syntéza v přirozených barvách vytvořená ze snímků pořízených ve viditelné části spektra s vyznačením hranic katastrálního území Brna.

Variabilita povrchových teplot studovaného území byla analyzována pomocí termálních snímků ze dvou družicových systémů. Snímek z družice Landsat 7 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  $\mu\text{m}$  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). Průměrná denní teplota vzduchu na stanici Brno-Tuřany byla v uvedený den 17,6 °C, minimální teplota 8,4 °C, maximální teplota 23,3 °C a přízemní minimální teplota 5,0 °C.

Obrazový záznam pořízený skenerem ASTER z družice Terra dne 2.4.2002 v 11:57:53 středoevropského letního času zaznamenává v oblasti termálního záření pět pásem s prostorovým rozlišením 90 metrů v celkovém rozsahu vlnových délek od 8,125 do 11,65 mikrometrů. Podle Katalogu (1972) se jednalo o jihovýchodní anticyklonální situací (SEa) a teplotní poměry byly charakterizovány průměrnou denní teplotou 11,3 °C, minimální (7,8 °C) a maximální (16,8 °C) teplotou a přízemním minimem (6,4 °C). Vzhledem k umístění

zpracovávaných scén ASTER, jsou veškeré výpočty vztaženy ke stejnému území, které zahrnuje katastrální území Brna vyjma jeho nejzápadnější části (Obr. 1).

### Metody mapování povrchové teploty (LST) pomocí družicových dat

Potenciál družicových měření pro analýzu řady specifických ukazatelů městského klimatu, především tzv. tepelného ostrova měst, byl prezentován v řadě prací již od počátku 70. let 20. století (Price, 1983; Nichol, 1998; Voogt a Oke, 2003). V současné době existuje celá řada algoritmů pro výpočet povrchové teploty (LST) z družicových měření. Konkrétní postupy lze dělit podle počtu termálních snímků na tzv. mono-window algoritmy, kdy máme k dispozici pouze jeden snímek (např. snímky Landsat ETM+). Dále to jsou tzv. split-window algoritmy využívající dvou snímků. Typickým příkladem jsou snímky z meteorologických družic NOAA AVHRR používané k výpočtu povrchové teploty oceánů a moří (Sea Surface Temperature – SST). Třetí skupinu tvoří tzv. multispektrální algoritmy, které využívají několika termálních snímků (Terra ASTER).

Princip teplotního mapování spočívá v aplikaci základních zákonů záření, především zákona Planckova. Základní zákony záření jsou odvozeny pro tzv. absolutně černé těleso. Pro výpočet teploty reálných povrchů je zapotřebí znát údaje o schopnosti těchto povrchů emitovat dlouhovlnné záření. Tuto schopnost popisuje podle Kirkhofova zákona veličina zvaná emisivita, která dává do poměru vyzařovací schopnost reálného tělesa k vyzařující schopnosti absolutně černého tělesa při dané teplotě. Výpočet LST z družicových snímků tedy musí zahrnovat také určení emisivity reálných povrchů a dále také korekce vlivů atmosféry, která značně ovlivňuje družicí naměřené radiometrické charakteristiky povrchů.

Výpočet hodnot LST z jediného termálního snímku Landsat ETM+ spočíval nejprve v převedení radiometrem zaznamenaných DN hodnot (DN – Digital Numer), které jsou bezrozměrnou veličinou, na hodnoty tzv. spektrální hustoty zářivého toku ( $L_{TOA}$ ) na horní hranici atmosféry (Top Of Atmosphere - TOA) s fyzikálním rozměrem  $W m^{-2} sr^{-1} \mu m^{-1}$ :

$$L_{TOA} = \frac{L_{max} - L_{min}}{QCAL_{max} - QCAL_{min}} (DN - QCAL_{min}) + L_{min},$$

kde  $QCAL_{min}$  (0) a  $QCAL_{max}$  (255) jsou minimální a maximální možné zaznamenané DN hodnoty. Dále  $L_{min}$  (0) a  $L_{max}$  ( $17,04 W m^{-2} sr^{-1} \mu m^{-1}$ ) jsou minimální a maximální možné hodnoty spektrální hustoty pro  $QCAL_{min}$  a  $QCAL_{max}$ .

Ve druhém kroku byla spektrální hustota zářivého toku na horní hranici atmosféry ( $L_{TOA}$ ) korigována o atmosférické vlivy za použití postupu navrženého Barsi et al. (2005). Tento postup využívá model radiačního transferu MODTRAN k výpočtu parametrů potřebných k atmosférické korekci hodnot  $L_{TOA}$ :

$$L_T = \frac{L_{TOA} - L_u - \tau(1 - \varepsilon)L_d}{\tau\varepsilon},$$

kde  $L_T$  je spektrální hustota záření absolutně černého tělesa o teplotě  $T$ ,  $L_u$  je záření atmosféry (upwelling radiance),  $L_d$  je zpětné záření atmosféry (downwelling radiance),  $\tau$  je koeficient propustnosti atmosféry (atmospheric transmission) a  $\varepsilon$  je emisivita. Neznámé hodnoty  $L_u$ ,  $L_d$  a  $\tau$  pro snímek z konkrétního data a místa byly vypočteny pomocí internetové aplikace, která je k dispozici na adrese (<http://atmcorr.gsfc.nasa.gov/>). Hodnoty emisivity pak bylo nutné do výpočtu dodat ve formě mapy, ve které je základním druhům aktivních povrchů přiřazena hodnota emisivity. Hodnoty emisivity pro vybrané druhy povrchů lze získat např. z práce Snyder et al. (1998). V posledním kroku byly hodnoty spektrální hustoty  $L_T$  přepočteny na povrchovou teplotu aplikací Planckova zákona (Chander, Markham, 2003):

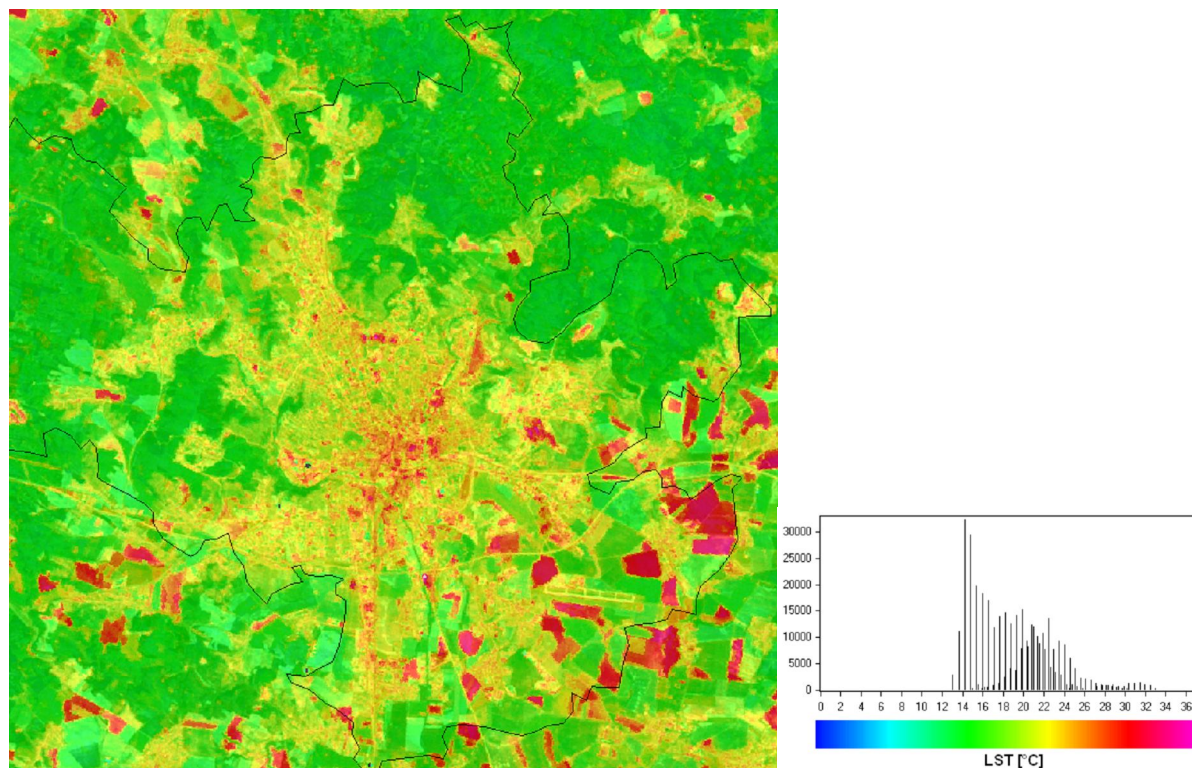
$$LST = \frac{K_2}{\ln\left(1 + \frac{K_1}{L_T}\right)},$$

kde  $LST$  je povrchová teplota v jednotkách Kelvin (K).  $K_1$  a  $K_2$  jsou kalibrační konstanty, jejichž hodnoty pro senzor ETM+ nabývají hodnot:  $K_1 = 666,09 \text{ W m}^{-2}\text{sr}^{-1}$  a  $K_2 = 1282,7 \text{ K}$ .

Nejčastěji používané multispektrální algoritmy mají obecné označení TES (Temperature and Emissivity Separation) a odhadují jak emisivitu tak povrchovou teplotu přímo z termálních snímků. Protože však emisivita závisí na vlnové délce, je nutné řešit úlohu, která odhaduje z  $n$  termálních snímků (pět v případě ASTER)  $n+1$  neznámých hodnot ( $n$  hodnot emisivity a také hodnotu povrchové teploty). Princip výpočtu uvádějí například Gillespie et al. (1998) či Schmugge et al. (2002). V předloženém příspěvku byl pro analýzu dat ASTER využit algoritmus implementovaný v programu ENVI. Použitý algoritmus využívá zjednodušeného modelu atmosférické korekce, který předpokládá, že vlivy atmosféry jsou konstantní na celé ploše snímku a že se na ploše snímku nachází povrch, který se v oblasti termálního záření chová jako absolutně černé těleso.

### **Analýza pole povrchových teplot v oblasti Brna a okolí.**

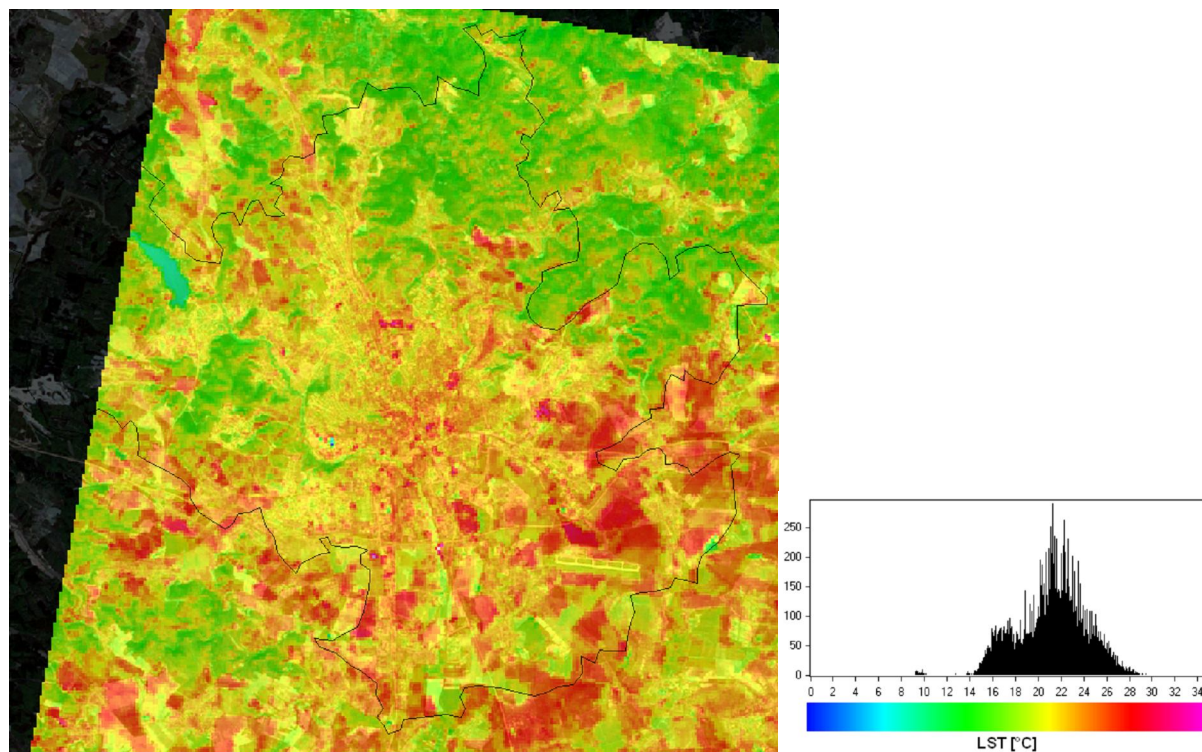
Družicové snímky byly nejprve transformovány do jednotné kartografické projekce a z pásu Landsat ETM+ pořízených ve viditelné a blízké infračervené části spektra byla sestavena postupem automatické klasifikace mapa základních druhů povrchů. Jednotlivým kategoriím pak byly přiřazeny hodnoty emisivity. Termální snímek ze dne 24. května 2001 byl následně transformován na hodnoty teplot aktivních povrchů postupem naznačeným v předchozí části a je prezentován na obr. 2 v podobě spojitého pole.



Obr. 2. Variabilita povrchových teplot (LST) v oblasti města Brna a okolí vypočtená z termálního snímku ETM+ pořízeného družicí Landsat 7 dne 24. května 2001 a histogram dokumentující rozdělení povrchových teplot na katastrálním území Brna

Obr 2 prezentuje také histogram vypočtených hodnot LST, které se pohybují od 0 °C do 37 °C. Z histogramu je však patrné, že povrchové teploty převážně kolísají od 13 °C do cca 33 °C. Výše uvedené extrémní hodnoty představují části snímků, které mají velmi pravděpodobně chybně určené DN hodnoty a následkem toho i nereálné hodnoty emisivity a povrchové teploty. Nejnížší povrchové teploty mají na zpracovávané scéně výše položené plochy pokryté lesním porostem nacházející se především v SV kvadrantu a dále také vodní plocha přehrady. Naopak nejvyššími hodnotami přes 30 °C se vyznačují plošně málo rozsáhlé oblasti s velkou hustotou zástavby ve středu města, ale především také některé plochy polí v JV kvadrantu. U těchto ploch převládá vyzařování půdního substrátu nad vyzařováním málo vzrostlé vegetace, což souvisí s datem pořízení snímku. V rámci zástavby se nejvyšší hodnoty LST vyskytují v zastavěné části města, kterou lze charakterizovat jako průmyslovou. Jedná se zhruba o oblast nacházející se JV směrem od spojnice nádraží Maloměřice – výstaviště. Vyššími hodnotami LST vůči okolí jsou typické především areály bývalých velkých strojírenských komplexů (Královopolská strojírna, Zbrojovka). Poněkud nižší hodnoty LST mají zastavěné plochy s obytnou funkcí. To může souviset s odlišným charakterem aktivních povrchů, které v tomto případě tvoří mozaika zastavěných ploch s menšími plochami vegetace (parky, zahrádky), které mají ochlazující efekt.

Velmi podobné rozložení povrchových teplot ukazuje analýza termálních snímků ASTER (Obr. 3). Z histogramu je patrné, že většina hodnot kolísá od 14 °C do 30 °C. Obdobně jako v předchozím případě se na snímku objevují extrémně nízké hodnoty. Z detailní analýzy bylo možné zjistit, že se tyto odlehle hodnoty na obou analyzovaných snímcích vyskytují v identických místech (pavilon Z na výstavišti). To podporuje domněnku o radiometrických chybách v původním snímku resp. o nesprávně určených hodnotách emisivity těchto objektů.



Obr. 3. Variabilita povrchových teplot (LST) v oblasti města Brna a okolí vypočtených z termálních snímků ASTER pořízených družicí Terra dne 4. dubna 2002 a histogram dokumentující rozdělení povrchových teplot na katastrálním území Brna

Z porovnání Obr. 2 a 3 je patrné, že prostorové rozložení LST ukazuje téměř identický obraz. V rámci zastavěných ploch se oblasti zvýšených povrchových teplot opět koncentrují do

stejných částí města, tedy především do průmyslových areálů. Obytná zástavba severně od centra města a také v okrajových částech vykazuje většinou nižší hodnoty LST v důsledku vyššího podílu ploch s vegetací a tedy nižšího podílu tzv. nepropustných povrchů. Vysoké hodnoty LST na zemědělských plochách mají jiné rozložení při porovnání se snímkem Landsat, což je způsobeno dynamickými parametry jako je druh pěstované plodiny resp. odlišná fenofáze v důsledku odlišného data pořízení snímku.

### **Diskuse a závěr**

Oba použité postupy mají své kladné i záporné stránky. Problematickou částí zpracování termálního snímku Landsat ETM+ je nutnost přiřadit hodnoty emisivit základním druhům povrchů, jejichž rozložení musí být sestaveno na základě klasifikace snímku či z existujících datových podkladů o druzích povrchů a kategoriích využití země. Naopak předností je provedená atmosférická korekce termálního snímku, která podle Barsi et al. (2005) zaručuje přesnost určení LST kolem 2 °C. Naopak TES algoritmus umožňuje odhadnout hodnoty emisivit přímo z použitých termálních snímků avšak využívá zjednodušeného modelu atmosférické korekce. Jisté rozdíly ve výsledcích je možné přičíst také odlišnému prostorovému rozlišení analyzovaných snímků.

Je nutno zdůraznit, že vypočtené povrchové teploty z družicových dat se vztahují ke konkrétnímu datu a charakterizují tedy pole LST za radičního režimu počasí v odlišnou roční dobu - na počátku dubna v případě dat ASTER a ve třetí dekádě května v případě Landsat ETM+. Přesto byly ze dvou odlišných datových zdrojů dvěma odlišnými metodami získány konzistentní výsledky, které lze shrnout následovně.

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. Tyto vyšší hodnoty jsou často vázány na zemědělské plochy, které byly v době pořízení snímku bez vegetace a u nichž převládalo vyzařování půdního substrátu. V rámci zastavěných ploch v centru města a v jeho blízkém okolí vytvářejí především plochy průmyslové zástavby na obou snímcích oblasti zřetelně vyšších povrchových teplot, které umožňují identifikovat tepelné centrum studované oblasti. Toto centrum může souviset s formováním tzv. tepelného ostrova města.

Na existenci tepelného ostrova města ukazují také prvotní výsledky zpracování účelových měření teploty vzduchu v síti automatických stanic, která byla v Brně vytvořena v rámci řešeného projektu v průběhu roku 2009. Na základě porovnání denního chodu teploty vzduchu na dvou skupinách stanic městského resp. příměstského charakteru pro soubor 69 dnů s radičním režimem počasí v letech 2009 a 2010 bylo zjištěno, že teplotní diference mezi městskými a příměstskými stanicemi mají výrazný denní chod především v létě a v poledních hodinách tento rozdíl může přesahovat 2 °C (Dobrovolný et al. 2010). Následná analýza teplotních poměrů Brna se bude soustředit na hledání vazeb mezi polem LST z družicových měření a polem teploty vzduchu sestaveným z měření v účelové síti stanic.

### **Poděkování**

Předložený příspěvek byl vytvořen s finanční podporou projektu GAČR 205/09/1297 s názvem „Víceúrovňová analýza městského a příměstského klimatu na příkladu středně velkých měst.“

### **Použitá literatura**

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, 7 s.

Dash P., Göttsche M.F., Olesen F.S., Fischer H. (2002): Land surface temperature and emissivity estimation from passive sensor data: theory and practice-current trends, *Int.J.Remote Sensing* 23:2563–2594

Dobrovolný P., Brázdil R., Krahula L., Rožnovský J. (2010): Víceúrovňová analýza prostorové variability teplotních poměrů v oblasti Brna. XXII. sjezd České geografické společnosti, Ostrava 31.8.- 1.9.2010. Sborník příspěvků, v tisku.

Chander G., Markham B. (2003): Revised Landsat-5 TM radiometric calibration procedures and postcalibration dynamic ranges. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 41:2674–2677

Cheval S., Dumitrescu A. (2009): The July urban heat island of Bucharest as derived from modis images. *Theor Appl Climatol* 96:145–153

Gillespie, A. R., Rokugawa, S., Hook, S., Matsunaga, T., & Kahle, A. B. (1998). A temperature and emissivity separation algorithm for Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) images. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 36:1113–1126

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

Kato, S., Yamaguchi, Y. (2005) Analysis of urban heat-island effect using ASTER and ETM+ Data: Separation of anthropogenic heat discharge and natural heat radiation from sensible heat flux. *Remote Sensing of Environment* 99:44–54

Nichol, J. (1998) Visualisation of urban surface temperatures derived from satellite images. *Int. J. Remote Sensing* 19: 1639–1649

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

Pongracz, R., Bartholy, J., Dezso, J. (2005) Remotely sensed thermal information applied to urban climate analysis. *Adv Space Res* 37:2191–2196

Price, J.C. (1983) Estimating surface temperature from satellite thermal infrared data. *Remote Sensing of Environment* 13:353–361

Schmugge T., French A., Ritchie J.C., Rango A., Pelgrum H. (2002): Temperature and emissivity separation from multispectral thermal infrared observations. *Remote Sensing of Environment* 79: 189–198

Snyder, W.C., Wan, Z., Zhang, Y., Feng, Y. (1998) Classification-based emissivity for land surface temperature measurement from space. *Int.J.Remote Sensing* 19:2753–2774

Sobrino J.A., Jiménez-Muñoz, J.C., Paulini, L. (2004) Land surface temperature retrieval from LANDSAT TM 5. *Remote Sensing of Environment* 90:434–440

Stathopoulou, M., Cartalis, C. (2007) Daytime urban heat islands from Landsat ETM+ and Corine land cover data: An application to major cities in Greece. *Solar Energy* 81: 358–368

Voogt, J.A. and T.R. Oke (2003) Thermal remote sensing of urban climates. *Remote Sensing of Environment* 86:370–384

### **Kontaktní adresa**

Doc. RNDr. Petr Dobrovolný, CSc.

Geografický ústav

Přírodovědecká fakulta MU

Kotlářská 2

611 37 Brno

dobro@sci.muni.cz