

VYUŽITÍ DAT Z DRUŽICE LANDSAT PRO DETEKCI TEPELNÉHO ZNEČIŠTĚNÍ V MĚSTSKÉ A PŘÍMĚSTSKÉ KRAJINĚ

Pavel Sedláka^{a)}, Jan Prislinger^{b)}, Miroslav Vysoudil^{c)}

^{a)}Ústav systémového inženýrství a informatiky, Fakulta ekonomicko-správní, Univerzita Pardubice, ^{b)}Katedra geoinformatiky, Přírodovědecká fakulta, Univerzita Palackého v Olomouci, ^{c)}Katedra geografie, Přírodovědecká fakulta, Univerzita Palackého v Olomouci

Abstract: *The aim of the paper is to show the way how satellite images can be used for detection of thermal pollution. Surrounding of Olomouc was study area. The influence of the urban heat island within this intensively agriculturally exploited area was examined. Images from LANDSAT were used. The images from two time periods were processed. The first image taken by the TM instrument dated back to October 1990. The second one is from the ETM+ instrument, October 2000. Kinetic temperature was calculated from both images. Finally, comparison of temperature from both two time horizons was done.*

Keywords: *remote sensing, LANDSAT, urban heat island*

1. Úvod

Dálkový průzkum Země (DPZ) je dnes velmi dynamicky se rozvíjející obor, který plnohodnotně zasahuje do mnoha odvětví lidské činnosti. Článek se zabývá dálkovým průzkumem Země v termální části spektra. Tato část spektra umožňuje získání teplotních charakteristik jednotlivých objektů zemského povrchu.

V současnosti je velice aktuální téma globálního oteplování. Právě tento fenomén je nejvíce spojován s rostoucí teplotou, za kterou stojí podle mnohých činnost člověka. Proto jsou pojmy jako tepelné znečišťování nebo tepelný ostrov města v dnešním světě stále častěji diskutovány. Ze satelitních snímků lze zjistit mnoho informací o termálních vlastnostech zemského povrchu, zejména pak rozdíl teplot mezi jednotlivými kategoriemi využití území. Předkládaný text se tedy snaží nastínit postupy, jak získat zmíněné informace z materiálů dálkového průzkumu Země. Cílem projektu bylo získat informace o povrchové teplotě zájmové oblasti s důrazem na teplotní znečištění vybraných prvků zemského povrchu. Článek popisuje všechny fáze zpracování obrazu včetně předzpracování, výběru algoritmu, interpretace a vizualizace výsledků.

2. DPZ v tepelné části spektra

2.1. Základní charakteristika

Tepelná část spektra, navazující na záření střední infračervené, se vyskytuje ve vlnových délkách od 3 μm do 3 cm . V těchto vlnových délkách již převažuje vlastní vyzařování objektů nad odraženým slunečním zářením, což slouží především k získání informace o radiační teplotě objektů. Vlivem atmosférických oken lze získávat informace především ve dvou intervalech vlnových délek, a to 3-5 μm a 8-14 μm a to nejen kvůli atmosférickému oknu, ale také proto, že obsahuje vlnovou délku, na které většina materiálů na zemském povrchu vyzařuje maximálně. [3]

Běžným způsobem je teplota objektů změřena čidlem měřícího zařízení, tímto způsobem je měřena kinetická teplota. Kinetická teplota je interním projevem energie molekul tvořících těleso. Objekty též vyzařují energii jako funkci své teploty. Toto vyzařování je vnějším projevem energie tělesa, který je předmětem zájmu termálního snímání metodami dálkového průzkumu Země. Vyzářená energie poté vyjadřuje radiační teplotu tělesa. Každé těleso, které má kinetickou teplotu větší než absolutní nula, emituje záření, jehož intenzita a spektrální složení jsou funkcí typů materiálu a jeho teploty. [7]

Při studiu teploty je pracováno s pojmem absolutně černého tělesa. Podle [1] je absolutně černé těleso takové, které absorbuje všechno záření a žádné neodráží. Veškerá reálná tělesa emitují pouze část záření, které by emitovalo absolutně černé těleso o stejné teplotě. Tato vyzařovací schopnost reálných těles se nazývá emisivita (ϵ). Podle [3] je to faktor, který popisuje, jak efektivně reálná tělesa vyzařují záření ve srovnání s černým tělesem:

$$\epsilon = M_R(T) / M_A(T),$$

kde $M_R(T)$ - intenzita vyzařování reálného objektu o teplotě T ,

$M_A(T)$ - intenzita vyzařování absolutně černého tělesa o teplotě T .

Emisivita nabývá hodnot od 0 do 1, kde 1 může značit látku s chováním identickým s absolutně černým tělesem. Mnoho látek běžných v přírodě (např. půda, voda) mají emisivitu velmi blízkou hodnotě 1. Avšak je důležité dodat, že emisivita se může měnit s různou teplotou, vlnovou délkou a úhlem pozorování [1].

Jelikož používané senzory většinou senzory zaznamenává radiační energii, přesná interpretace snímku vyžaduje znalost emisivity objektů vyskytujících se na snímku [1].

Pro zjišťování teplotních charakteristik povrchů distančními metodami je nutné měřit pouze energii vyzářenou povrchem. Množství vyzářené energie závisí na tom, kolik jí na těleso dopadá. Energie dopadající na povrch tělesa podléhá vedle odrazu také pohlcování a je také objektem vedena [2]. Ve většině aplikací se považuje propustnost za nulovou položku. Čím nižší je odrazivost tělesa, tím vyšší je jeho emisivita. Toto platí i naopak. Emisivita objektu má výrazný důsledek při měření radiační teploty. Stefan-Boltzmannův zákon aplikovaný na absolutně černé těleso můžeme rozšířit pomocí emisivity na reálné těleso [7].

Jak uvádí [7], výstupem z termálního senzoru je změřená radiační teplota objektu. Uživatelé často zajímá vztah mezi radiační a kinetickou teplotou objektu. Jestliže senzor zaregistruje absolutně černé těleso, pak jsou si obě teploty rovny. Pro reálné objekty, jak již bylo zmíněno, však musíme počítat s hodnotou emisivity. Platí tedy:

$$T_{\text{rad}} = \epsilon^{1/4} T_{\text{kin}},$$

kde T_{rad} = radiační teplota (v kelvinech),

T_{kin} = kinetická teplota (v kelvinech),

ϵ = emisivita.

Tento vztah popisuje, že radiační teplota objektu změřená senzorem bude vždy menší než teplota kinetická.

Teplota objektu během dne je také ovlivňována přímým slunečním svitem, avšak jen ve vlnových délkách 3 - 5 μm , delší vlnové délky (8 - 14 μm) již ovlivňovány nejsou.

2.2. Teplotní mapování

Druhy povrchů reálného světa lze rozdělit do čtyř základních skupin: voda, vegetace, povrch bez vegetace, umělý povrch. Toto rozdělení je však velice hrubé, protože mnoho povrchů Země je směs výše zmíněných.

Jak uvádí [7], pro každý povrch můžeme určit závislost mezi vlnovou délkou a jeho odrazivostí. Průběh této závislosti bude pro daný objekt typický a charakterizuje jí spektrální křivka odrazivosti. Právě tvar této křivky umožňuje proniknout ke spektrálním charakteristikám objektů a má velmi silný vliv na výběr vlnových délek potřebných pro danou aplikaci.

Projekt obsahuje mapy rozložení teploty zemského povrchu, znázorňující teplotní charakteristiky objektů vyskytujících se na snímku. Ty vznikají zpracováním, analýzou a vizualizací digitálních dat zaznamenaných termálních skenerem. Tato získaná data, tedy DN hodnoty, lze vyjádřit tímto vztahem [7]:

$$DN = A + B * \varepsilon * T^4,$$

kde A, B = kalibrační konstanty senzoru,

ε = emisivita v místě měření,

T = kinetická teplota v místě měření (v kelvinech).

Parametry A a B lze získat z kalibračních procedur (např. korelací dat z distančního a pozemního měření). Jestliže jsou tyto parametry známé, můžeme z nich určit kinetickou teplotu pro kterékoliv místo na zemi se změřenou DN hodnotou a známou emisivitou. Takto kalibrovaná data mohou být využita k dalšímu zpracování a zobrazena v mnoha rozdílných formách (např. jako vrstvy v informačním systému).

Data z termálního snímkování lze použít v mnoha různých studiích (např. mapování povrchové teploty, silniční doprava, tepelný ostrov města a studie zabývající se tepelným znečištěním). Pojem tepelné znečištění není v literatuře častý a většinou je spojován se znečištěním vody v okolí např. tepelných elektráren. Obecně lze říci, že je to nadměrné teplo negativně ovlivňující okolní ekosystémy. Většinou je zvýšené teplo způsobeno přítomností elektrárny, těžebního prostoru, velkého města, ale i jiných objektů.

2.3. Tepelný ostrov města

Fenomén tepelného ostrova města (UHI – urban heat island) je dnes celosvětově řešený jev. Zastavěné oblasti absorbují více tepla než místa neurbanizovaná či venkovská. Tento jev primárně vzniká díky změnám ve využití krajiny, kde získávají převahu zastavěné oblasti, čímž se mění teplotní reakce na sluneční záření. Urbanizované plochy se vyznačují neschopností odrazet sluneční záření, a tím narůstá jejich teplota. Objekty jako budovy nebo ulice zvyšují schopnost zastavěných oblastí udržovat teplo. Naopak vegetace má roli naprosto opačnou. Tento jev se neobjevuje jen u velkých měst, ale byl zachycen již u měst s méně než 10 000 obyvateli. [10]

Jiné příčiny vzniku tepelného ostrova města mají původ ve tvaru a ploše zastavěného území. Vysoké městské budovy poskytují větší plochu k absorpci slunečního záření a zvyšují tak možnost jeho pohlcování. Toto se nazývá tzv. kaňonový efekt. Další důsledek budov je blokování průchodu větru, což také potlačuje ochlazování urbanizovaných ploch. [15]

Teplotu ve městech ovlivňují faktory vyvolané lidskou činností. Projevují se především v zimě a ve vyšších zeměpisných šířkách, kdy je intenzita slunečního záření značně omezená. V této době přispívají ke zvyšování UHI zejména lidské aktivity jako jízda automobilem,

jednotky klimatizace nebo různé druhy průmyslu. Vysoká míra různých druhů znečištění z těchto činností poté může vést až k vytvoření lokálního skleníkového efektu. [15]

2.4. Projekty s řešenou problematikou

Samotnou detekcí tepelného znečištění pomocí materiálů dálkového průzkumu Země se příliš autorů nezaobírá. Články popisují především tepelnou situaci daného zájmového území (velmi často termální údaje o tepelném ostrovu města) a nastiňují techniky získání informace o povrchové teplotě. Většina autorů používá data ze senzorů TM, ETM+ a ASTER, ale samozřejmě jsou aplikovány také snímky z dalších senzorů jako např. AVHRR.

Většina projektů je velmi dobře zpracována z hlediska použitých dat, technik a algoritmů, ale téměř všem chybí kvalitní grafické výstupy, zejména pak kartografické.

Van [16] využívá snímky dálkového průzkumu ke zjištění vztahů mezi typem využití krajiny a povrchovou teplotou na příkladě HoChiMinova města a okolí. Používá data ze senzoru ETM+. Algoritmem stejným jako Prisliger [11] získává údaje o radiační teplotě. Následná konverze na teplotu kinetickou této studii naprosto chybí.

S daty z družice LANDSAT pracoval také Nichol [9], jak uvádí Mesev [8], který se zabýval tepelným ostrovem města na příkladu Singaporu a nigerijského města Kano. Tyto města vybral s ohledem na jejich polohu v různých zeměpisných šířkách. Singapore se nachází ve vlhkém tropickém pásmu, zatímco Kano v semiaridní zóně. Do výpočtu teplot zahrnuje i vliv budov (jejich geometrie, výšky, množství), které se na výsledné hodnotě teploty v hustě obydlených místech podílejí.

S pojmem teplotní ostrov města pracuje i Ozawa a kol. [10] v práci, která se zaměřuje na velmi urbanizované plochy Japonska a využívá dat z více senzorů. Zaměřuje se na průměrné teploty jednotlivých částí využití městského území.

Velmi zajímavé práce napsal k problematice tepelného snímkování a získávání informací o teplotě Weng. spolu s Yangem [19], kteří získávají teplotu zemského povrchu ze snímku LANDSAT 7. Považují ji za jeden z činitelů ovlivňující znečištění vzduchu zájmové oblasti nacházející se v jižní Číně mezi roky 1981 a 2000.

Další studie spolu s Lu a Schubringem [18] a Lu [17] se situují do města Indianapolis. První využívá snímky z LANDSAT 7, druhá z ASTER. Postupy k získání teploty zemského povrchu jsou v těchto případech stejné. Oproti předešlému projektu bylo vymezeno více kategorií pro hodnoty emisivity.

Ganase a Lagiose [4] využívají noční snímkování z družice LANDSAT 7 k získání povrchové teploty řecké sopky Nissyros. Hlavním cílem práce je posoudit efektivitu snímku z družice LANDSAT jako nástroje pro monitoring sopky s využitím jednoduchých nástrojů zpracování obrazu (ERDAS, PCI).

Snímky z družice LANDSAT k pozorování sopky Kilauea na Havaji použil také Steven [12]. Srovnával teplotní poměry na dvou snímcích s časovou periodou 3 měsíce. K získání jednotlivých kategorií teploty aplikoval na oba snímky neřízenou klasifikaci, konkrétně metodu ISODATA. Výsledkem tedy nejsou absolutní hodnoty teploty, ale pouze porovnání změn v obou časových údajích.

Z českých autorů se daným tématem zabýval Šíma [13] v rámci projektu Obnova funkce krajiny narušené povrchovou těžbou. Pomocí snímku z LANDSAT – 7 určoval relativní teplotu krajinného pokryvu některých výsypek na Sokolovsku. Používal k tomu techniku hustotního prahování dat.

Další projekty týkající se zpracování tepelných snímků byly prováděny v jižních Čechách. Hais a kol. [5] zkoumali vliv jaderné elektrárny Temelín na teplotně-vlhkostní parametry krajinného krytu. Hais, Pokorný [6] sledovali změny teplotně-vlhkostních parametrů krajinného krytu jako důsledek rozpadu horských smrčín v národním parku Šumava. Oba tyto projekty využívají dat z LANDSAT 5 a 7. Převod DN hodnot na teplotu proběhlo pomocí modulu ATCORT od firmy PCI Geomatics.

3. Zpracování termálních dat

3.1. Charakteristika zájmového území

Zájmovým územím je oblast střední Moravy - Olomouc a jeho okolí. Důvodem výběru této zájmové oblasti bylo zanalyzovat vliv tepelného ostrova města v rámci intenzivně zemědělsky využívané krajiny. Při přesném vymezení území bylo důležité začlenit do zájmové oblasti všechny tři největší města daného regionu, tedy Olomouc, Prostějov i Přerov. Proto bylo přistoupeno ke tvorbě kruhové zóny se středem v jihovýchodním cípu Olomouce a průměrem 40 km. Jako kontrast těmto výrazným tepelným ostrovům slouží nejen zalesněné oblasti především Litovelského Pomoraví a vojenského újezdu Libavá, ale také soustava Tovačovských rybníků jihozápadně od města Přerov. Největší část zájmového území ovšem patří polím, kde je zajímavé sledovat rozdíl teplot mezi poli s vegetací a bez ní.

3.2. Data a software

Nejvíce projektů je řešeno s využitím dat ze senzoru ASTER a senzorů na družici LANDSAT. Z dalších přístrojů lze vyjmenovat např. skener CERES (satelity TERRA, AQUA a TRMM), geostacionární družice GOES, meteorologické družice METEOSAT nebo skener CZCS (Nimbus-7). [1]

V článku byly použity data z družice LANDSAT. V současné době jsou snímky z LANDSAT 5 a 7, jediné použitelné. LANDSAT 5 byl vypuštěn v roce 1984 a nesl přístroje MSS (Multispectral Scanner, vyřazen v roce 1995) a TM (Thematic Mapper). LANDSAT 7 byl vypuštěn v roce 1999 a nese přístroj ETM+ (Enhanced Thematic Mapper Plus). Prostorové rozlišení termálního pásma je u senzoru TM 120 metrů a u ETM+ 60 metrů. [14]

Snímky zájmového území byly pořízeny družicí LANDSAT, avšak různými přístroji. Z přístroje ETM+ byly ve formátu img a souřadném systému S-JTSK. Snímky byly pořízené v říjnu 2000. Druhý časový horizont byl z října 1990 z přístroje TM a data byla ve formátu tiff.

Převážná část zpracování družicových snímků byla provedena v softwaru ERDAS IMAGINE 8.7. V počáteční fázi se jednalo o geometrické korekce, tedy převod všech snímků do souřadného systému S-JTSK. Dále byla dosazením algoritmu do modulu ERDAS Model Maker získána data o radiační teplotě ze snímků pořízených oběma přístroji senzoru LANDSAT. Všechny údaje byly poté zobrazeny v programu ArcView 3.1, kde byla vypočítána výsledná teplota zemského povrchu a provedeny její základní analýzy. V tomto produktu bylo vytvořeno i výsledné kartografické zpracování všech získaných údajů. Posledním použitým softwarem byl ArcGIS 9.1, kde byla provedena digitalizace vrstvy využití území.

Topografický poklad veškerých map je převzat z ArcČR 500 v. 2.0.

3.3. Zpracování snímků

Cílem bylo získat pomocí dostupných sad snímků kinetickou (povrchovou) teplotu zájmových oblastí. Získání této teploty lze rozdělit na dvě části. První část obsahuje práci

s tepelným snímkem, z něhož získáme tzv. radiační teplotu. Tato teplota však není konečným výsledkem a musí být dále upravena o hodnoty emisivity. Získání těchto hodnot zahrnuje druhá část analýzy, ke které byl použit snímek multispektrální. Obě části tohoto procesu byly realizovány v softwaru ERDAS IMAGINE 8.7. Nepracovalo se však s celým rozsahem snímků, ale pouze se zájmovou oblastí. K dosažení požadovaného výsledku první části byl použit modul Model Maker, který se jevil jako nejvhodnější nástroj pro celý algoritmus. Nejprve musely být DN hodnoty termálního snímku převedeny na hodnoty radiance, nezbytné pro dosažení radiační teploty. Do algoritmu byl zaveden následující vzorec [2]:

$$L_{\lambda} = \left(\frac{LMAX_{\lambda} - LMIN_{\lambda}}{QCALMAX - QCALMIN} \right) \times (QCAL - QCALMIN) + LMIN_{\lambda}$$

kde L_{λ} = spektrální radiance senzoru (watts/m² * ster * μm),

$LMIN_{\lambda}$ = spektrální radiance pro pásmo 6 (3,2 watts/m² * ster * μm),

$LMAX_{\lambda}$ = spektrální radiance pro pásmo 6 (12,65 watts/m² * ster * μm),

QCAL = DN hodnoty termálního snímku,

QCALMAX = maximální hodnota pixelu (255),

QCALMIN = minimální hodnota pixelu (1 pro produkt Level 1).

Dosažením jednotlivých hodnot do vzorce byly získány hodnoty radiance, důležité pro druhý vzorec v algoritmu, pomocí něhož lze vypočítat radiační teplotu [2]:

$$T = \frac{K2}{\ln\left(\frac{K1}{L_{\lambda} + 1}\right)}$$

kde T = radiační teplota (v kelvinech),

K1 = kalibrační konstanta (666,09 watts/m² * ster * μm),

K2 = kalibrační konstanta (1282,71 K),

L_{λ} = spektrální radiance (watts/m² * ster * μm).

V samotném Model Makeru byl do vzorce ještě zapracován převod Kelvinů na stupně Celsia. Zápis tedy vypadal následovně:

$$\text{float}((1282.71 / \text{LOG}(666.09 / (\text{radiance}) + 1) - 273)$$

Druhá část postupu výpočtu kinetické teploty zahrnuje získání hodnot emisivity. Zde byla nakonec uplatněna řízená klasifikace multispektrálního snímku. K tomu bylo nutné pomocí nástroje vytvořit trénovací plochy třech vymezených kategorií. Jako nejvhodnější volbou pro natrénování ploch se po několika testech jevila kombinace pásem 5,3,2. Výsledný soubor byl následně začleněn do procesu řízené klasifikace.

Nejvyšší hodnoty emisivity vykazují vodní toky a zalesněné plochy a to 0,98, naopak nejmenší těžební oblasti, komunikace a intravilány (0,92). Ostatní kategorie využití země (např. pole, louky, atd.) mají hodnotu emisivity 0,95. [9]

Po načtení hodnot emisivity a radiační teploty do programu ArcView 3.1 byly veškeré údaje převedeny na grid. Pro získání povrchové teploty bylo nutné hodnoty radiační teploty opravit o emisivitu. Tento proces byl realizován v Map Calculatoru programu ArcView, kde byl použit

vzorec podle [7], který byl uvedený výše. Je nutno zdůraznit, že hodnoty radiální teploty musí být do vzorce dosazeny v kelvinech. Přesný zápis byl tedy takový:

$$[T_{\text{rad}} \cdot \text{kelvin}] / ([\text{Grid} \cdot \text{emisivita}] \cdot \text{Pow}(0.25 \cdot \text{AsGrid}))$$

Závěrečná fáze analýzy byla doplněna o statistické údaje jednotlivých kategorií využití území. Tyto údaje byly získány v ArcView (příkaz Summarize Zones). Vrstva využití území (obr. 1) vznikla digitalizací multispektrálního snímku (kombinace pásem 3,2,1) v softwaru ArcGIS 9.1.

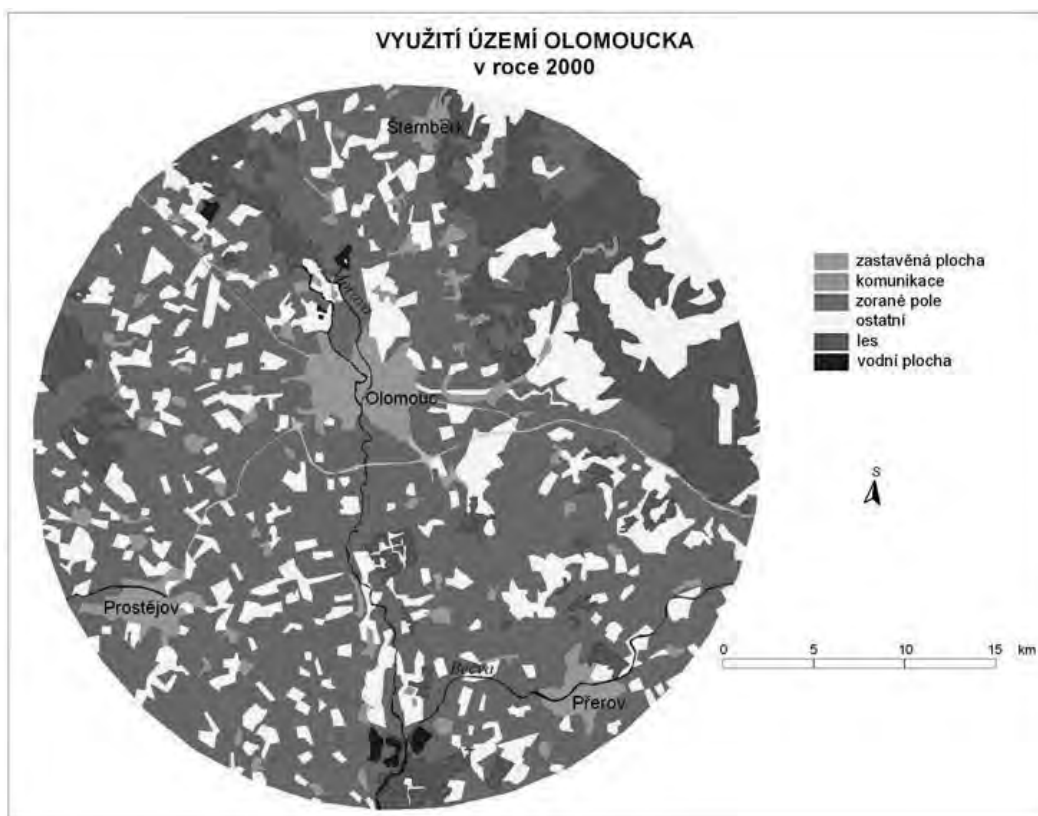
Pro vytvoření potřebné příměstské zóny zájmového území Olomouce byl použit příkaz Create Buffers dostupný v ArcView 3.1.

Snímky z přístroje TM byly poskytnuty po jednotlivých pásmech, bylo tedy nutné vytvořit z nich barevnou kompozici. Ta byla provedena v ArcView 3.1 příkazem Stack Images dostupným v extenzi Image Analysis.

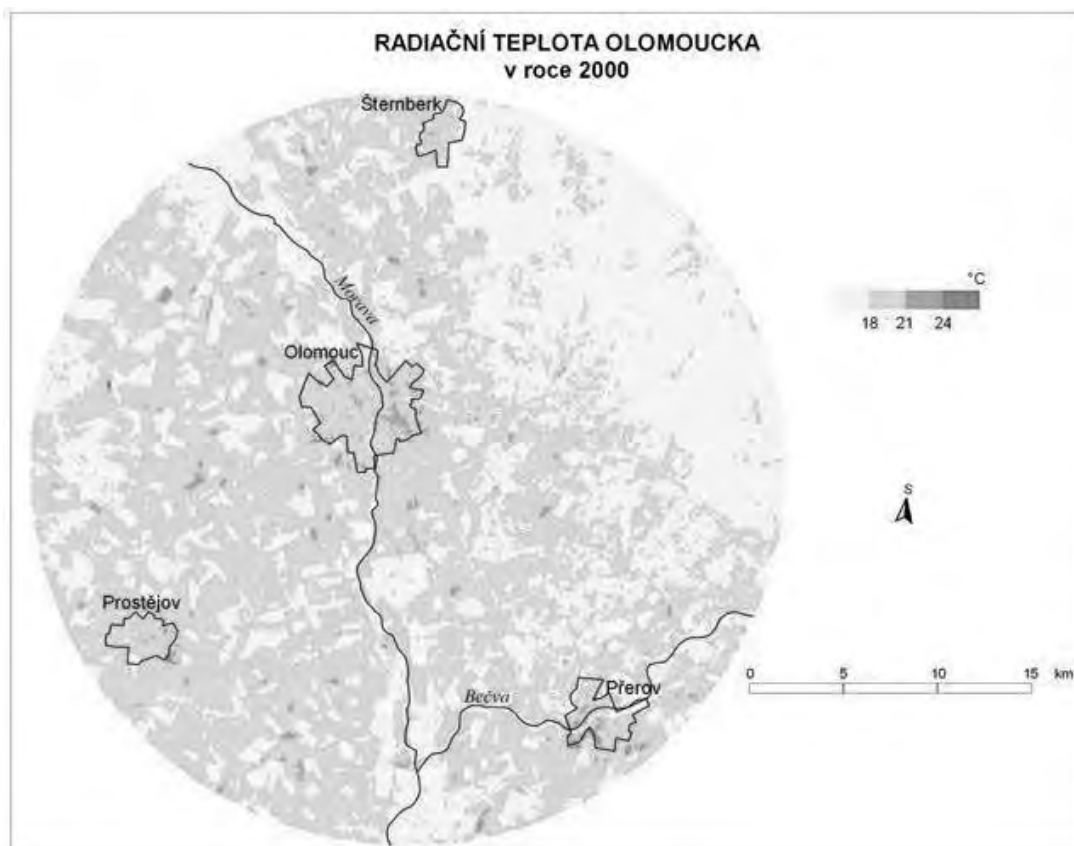
4. Hodnocení získaných výsledků

4.1. Snímky ze senzoru LANDSAT ETM+

Zájmová oblast byla vybrána s cílem zhodnotit teplotní charakteristiky středně velkých měst s intenzivně využívanou zemědělskou krajinou v jejich okolí. Záměrem bylo také zjistit rozdíl teplot zoraného pole s polem s vegetací, které bylo nakonec zařazeno do kategorie využití země „ostatní“ zejména spolu s loukami mající velmi podobné charakteristiky. Jako další zdroje tepelného znečištění atmosféry byly vytipovány nejfrekventovanější silniční tahy vedoucí z Olomouce, které byly vymezeny jako samostatná kategorie využití země. Největší plochu zaujímají zoraná pole (56 %), naopak nejmenší vodní plochy a komunikace (necelé 1 %).



Obr. 1: Využití území (upraveno podle [11])



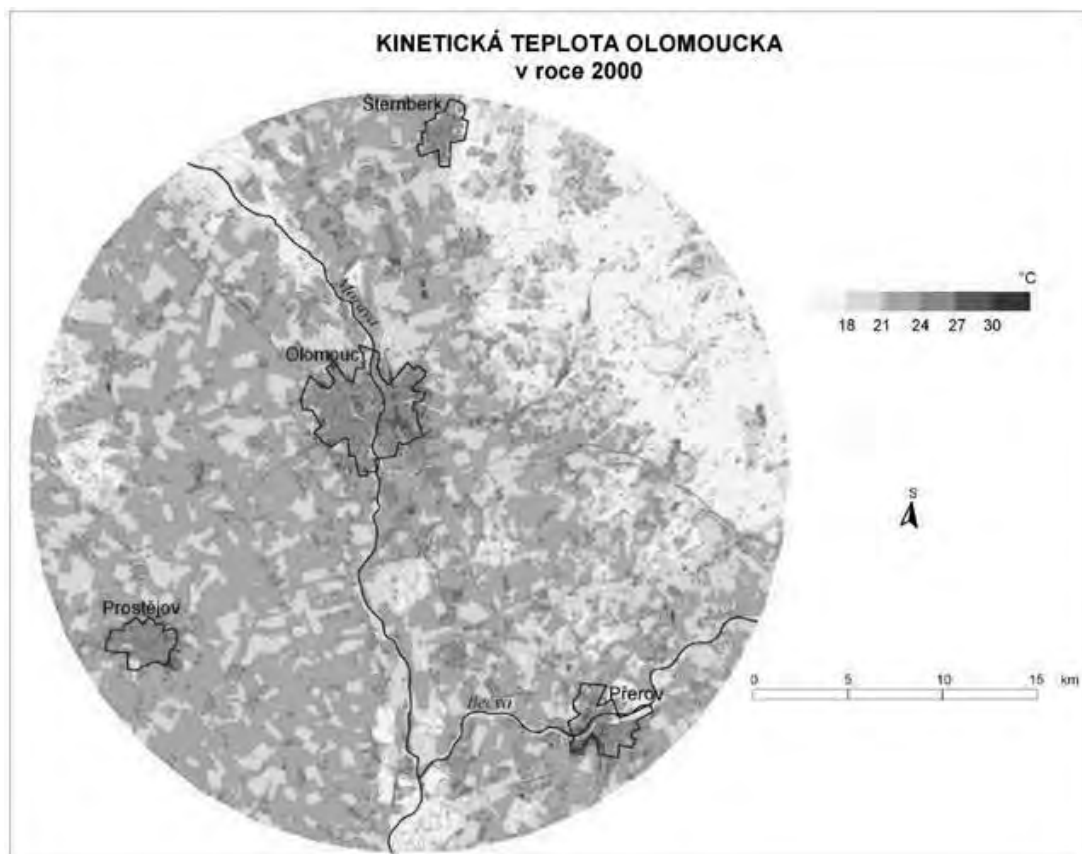
Obr. 2: Prostorové rozložení pole radiční teploty (upraveno podle [11])

Pro získání hodnot emisivity byly zaznamenány důležité silniční tahy. Naopak nebylo možné postihnout rozdíl mezi polem zoraným a nezoraným, proto byla oběma kategoriím přiřazena hodnota emisivity 0,95.

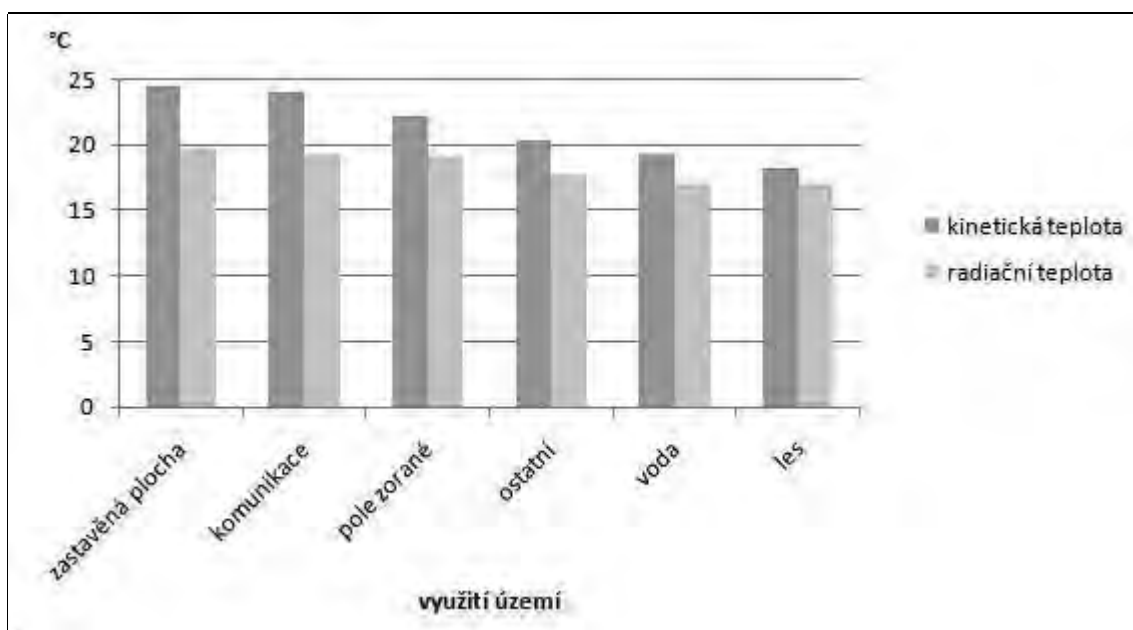
Již z mapy radiační teploty (obr. 2) je zřejmý rozdíl teplot mezi polem zoraným a polem s vegetací. Rozdíl se pohybuje většinou v rozmezí 1 až 2 °C. Naopak tepelný ostrov města není z mapy radiační teploty příliš patrný. Nejvyšší teplota (43 °C), byla zaznamenána západně od Olomouce. Při detailním zkoumání snímku bylo zjištěno, že se jedná o otevřený oheň.

Z mapy rozložení kinetické teploty (obr. 3) lze již dobře detekovat tepelné ostrovy již zmíněných měst. Největšími dlouhodobými tepelnými znečišťovateli byly indikovány především vlaková nádraží v Olomouci a Přerově, průmyslová zóna na jihovýchodě Prostějova a závod Mora v Hlubočkách – Mariánském údolí. Velmi dobře je také na teplotní mapě detekovatelné vojenské letiště v Přerově. Na druhé straně nejnižší povrchovou teplotu mají rozsáhlé lesní plochy východně od Olomouce a Chráněná krajinná oblast Litovelské Pomoraví. Dobře lze určit Tovačovské rybníky na jihu, Chomoutovské jezero severně od Olomouce a koryta dvou největších vodních toků – Moravy a Bečvy.

Z obr. 4 je zřetelně vidět rozdíl mezi radiační a kinetickou teplotou. Průměrná radiační teplota vypočítaná pro celé zájmové území je pouze 18 °C, naproti tomu průměrná teplota kinetická je o více než 3 °C vyšší. Hodnoty teplot prvních tří kategorií využití země stoupají z teploty radiační, kde jsou průměrné teploty prakticky shodné, strmě vzhůru do teploty kinetické až o téměř 5 °C.



Obr. 3: Rozložení kinetické teploty (upraveno podle [11])



Obr. 4: Průměrná teplota pro jednotlivé kategorie využití země v roce 2000

Rozdíl mezi nejvyšší a nejnižší průměrnou kinetickou teplotou (tab. 1) je 6 °C, zatímco u radiační jsou to téměř 3 °C. Nejvyšší průměrné kinetické teploty v území jsou reprezentovány těmito městy: Olomouc – 25,30 °C, Přerov – 25,21 °C, Prostějov – 24,88 °C a Šternberk – 24,42 °C. Důraz byl také kladen na porovnání teploty polí, teplota zoraných polí, jejíž průměr přesahuje 22 °C, je skoro o 2 °C vyšší než u kategorie ostatní, kam byly zařazeny zejména pole bez vegetace a louky. Co se týče komunikací, tak hlavními znečišťovateli jsou silniční tahy z Olomouce na Hradec Králové, Ostravu, Brno a obchvat Olomouce, jejichž průměrná kinetická teplota je 24 °C. Vysoká maxima u kategorie zorané pole a ostatní náleží otevřenému ohni západně od Olomouce.

Tab. 1: Statistické údaje jednotlivých kategorií využití země ve °C

Kinetická t.	Průměr	Minimum	Maximum	Medián	Směrodatná odchylka
Radiační t.					
Zastavěná plocha	24,49	17,00	32,00	25,00	2,22
	19,66	16,00	26,00	19,00	1,07
Komunikace	24,00	18,00	28,00	24,00	1,72
	19,25	17,00	22,00	19,00	0,70
Pole zorané	22,25	17,00	47,00	22,00	1,36
	19,05	16,00	43,00	19,00	0,94
Ostatní	20,34	17,00	37,00	20,00	1,47
	17,72	16,00	33,00	18,00	0,83
Voda	19,29	16,00	27,00	19,00	2,35
	16,94	15,00	21,00	17,00	1,41
Les	18,21	16,00	27,00	18,00	1,20
	16,95	15,00	21,00	17,00	0,81

4.2. Snímky ze senzoru LANDSAT TM

Výsledky analýzy starších snímků mají sloužit k porovnání teplot mezi oběma časovými horizonty. Proto byl postup zpracování snímku totožný jako u senzoru ETM+. Vycházelo se z předpokladu, že teploty především zastavěných území získané z tohoto období měly být nižší než teploty zjištěné z předchozího snímku. Kategorie využití země byly vymezeny stejně jako u předešlého snímku.

Nejvyšší rozdíl mezi oběma časovými obdobími je v kategorii zoraných polí. Jejich podíl v době snímkování v roce 1990 byl výrazně menší a to zejména na úkor kategorie ostatních zastoupené především poli s vegetací. Podíl dalších kategorií zůstává téměř shodný.

Při získávání hodnot emisivity byl kladen důraz především na získání co nejpřesnějších hodnot pro zastavěné plochy a vodní plochy. Ty byly stejně jako v předchozích případech zařazeny do stejné kategorie jako lesní oblasti. Naopak na tomto snímku nebyly příliš patrné silniční tahy.

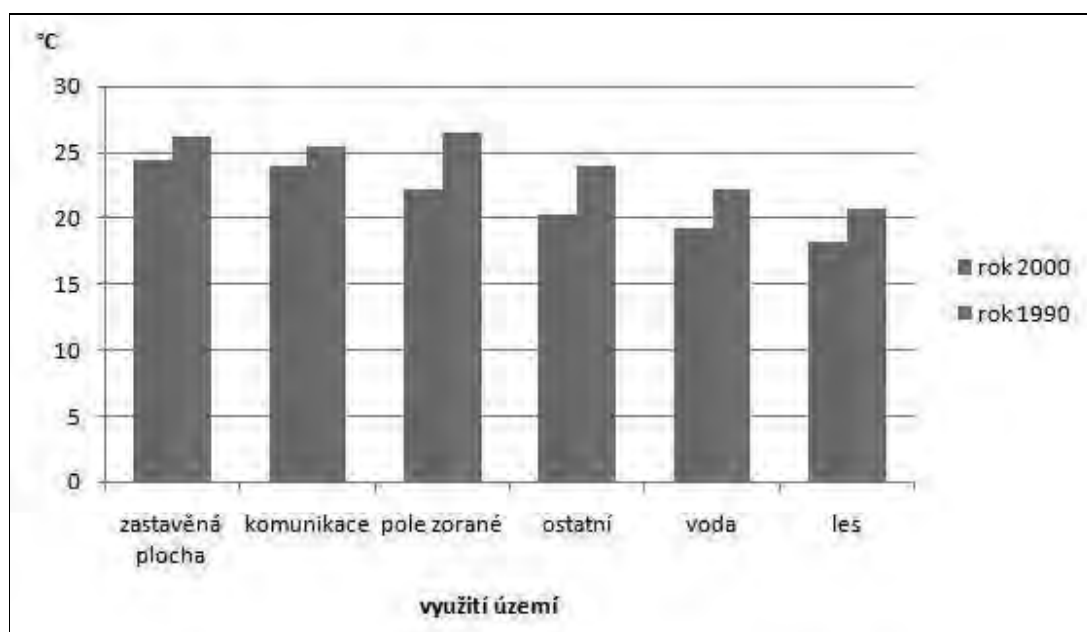
Průměrná radiační teplota území na tomto snímku je výrazně vyšší než u snímku předchozího. Nejvyšší hodnoty představují zoraná pole, zejména pak ty jihovýchodně od Prostějova. Také průměrné hodnoty u kategorií les a vodní plochy přesahují 19 °C, což je o více než 2 °C více než u snímku z roku 2000.

Vysoké hodnoty radiační teploty se samozřejmě projevují také na teplotě kinetické. Jen Tovačovské rybníky a Chomoutovské jezero severně od Olomouce mají teplotu nižší než 18 °C. V sousedství velmi teplých povrchů zoraných polí také částečně zaniká fenomén tepelného ostrova města. Nejvíce je to zřejmé v případě Olomouce.

Průměrná radiační teplota zájmové oblasti přesahuje 21 °C, průměrná kinetická je o 3 °C vyšší. Největší rozdíl průměrů mezi kinetickou a radiační teplotou je u kategorie zastavěných ploch, a to téměř 4 °C. Naopak nejmenší je u lesních ploch.

Další statistické ukazatele obsahuje tab. 1. Rozdíl mezi nejnižší a nejvyšší průměrnou kinetickou teplotou u jednotlivých kategorií je více než 8 °C, u teploty radiační je to polovina. Dominantní roli hrají zoraná pole, která na tomto snímku překrývají i tepelné ostrovy měst. Přesto kinetická teplota města Olomouce (26,52 °C), převyšuje teplotu zjištěnou pro něj z předešlého snímku. V případě silnic jsou nejsilnějšími tepelnými znečišťovateli tahy z Olomouce na Hradec Králové a Prostějov.

Při porovnání kinetických teplot získaných z obou snímků (obr. 5) je jednoznačně vidět vyšší teplotu v roce 1990. Největší rozdíl teplot je u kategorie zoraných polí, naopak nejvíce se k sobě blíží u komunikací. Korelační koeficient je 0,91, vztah mezi oběma soubory hodnot je tedy velmi těsný. Kovariance, průměr součinů odchylek pro každou dvojici bodů dat, je 4,52.



Obr. 5: Průměrná kinetická teplota pro kategorie využití země v období 1990 a 2000

5. Závěr

V zájmové oblasti Olomoucka byly zpracovány termální družicové snímky ze dvou časových horizontů. Z října roku 1990 byl k dispozici snímek z přístroje TM. Průměrná kinetická teplota území z něj zjištěná byla 24,14 °C. Největší průměrnou teplotu převyšující 26 °C vykazuje kategorie zoraných polí. Naopak nejnižší vykazují lesní plochy s hodnotou nad 20,5 °C. Na tomto snímku se projevil tepelný ostrov měst nevýrazně, jejich teplota byla do jisté míry setřena okolními poli.

Druhý snímek, pořízený přístrojem ETM+ v říjnu 2000, naopak velmi dobře vystihuje teplotní kontrast mezi největšími městy oblasti a lesními plochami. Nejvyšší průměrnou teplotu vykazuje město Olomouc – 25,30 °C, na druhé straně teplota lesních oblastí jen o něco málo přesahují 18 °C. Na tomto snímku jsou také velmi dobře detekovatelné nejfrekventovanější silniční tahy v zájmovém území, jejich průměrná kinetická teplota je 24 °C.

Při analýze se poměrně zřetelně projevil rozdíl mezi teplotou radiační a kinetickou. Ten je způsoben změnami v pokrytí země a tím emisivity, která výraznou měrou ovlivňuje teplotu. Průměrná diference mezi oběma teplotami se pohybuje okolo 3 °C.

Zpracování snímku z družice LANDSAT mělo několik slabých stránek. Především je to velikost pixelu tepelného snímku 120 m (u přístroje ETM+ je to 60 m), zatímco snímky v ostatních částech spektra mají prostorové rozlišení 30 m. Protože řízená klasifikace pro výpočet hodnot emisivity používá kombinace pásem 5, 3, 2, vzniká zde rozdíl mezi oběma velikostmi pixelu. Vrstva využití země vznikla digitalizací snímku pořízeného ve viditelné části spektra.

Jeden z nejvýznamnějších faktorů pro výpočet povrchové teploty jsou hodnoty emisivity. Získání přesných údajů o této veličině je velmi obtížné a řešení je výsledkem určitého kompromisu. Jako nejvhodnější postup pro její získání byla nakonec zvolena řízená klasifikace. Území bylo rozčleněno do tří kategorií.

Výsledné hodnoty povrchové teploty může kromě emisivity ovlivnit další řada faktorů. Z těch nejdůležitějších lze jmenovat denní dobu snímkování, optické vlastnosti atmosféry, výšku budov nebo georeliéf. Poslední dva parametry mohou na snímku vytvářet stíny na vlnových délkách 3 – 5 μm , která v konečné fázi ovlivňují hodnoty povrchové teploty. Částečně tento problém řeší digitální model reliéfu či 3D modely výškových objektů.

V konečné fázi zpracování snímku bylo třeba zvážit, zda aplikovat modální filtr na získané hodnoty kinetické teploty. Vzniklo mnoho malých areálů, které bylo možné zahrnout do okolních větších areálů. Filtr však po zvážení nakonec nebyl použit, protože by mnoho malých, ale velmi teplotně výrazných ploch zaniklo (např. nejteplejší povrchové lomy či nejchladnější vodní plochy). Výsledné mapy tedy obsahují i velmi malé plochy vyskytující se v rámci okolního, teplotně poměrně homogenního prostředí.

V zájmovém území Olomoucka je diskutován tepelný ostrov města, který byl na snímku z roku 2000 velmi dobře zachycen, zejména pak u středně velkých měst. Pro detailnější zkoumání tohoto jevu by však byl potřeba snímek s co největším prostorovým rozlišením. To by umožnilo rozdělit město na jednotlivé části (sídlíště, centrum, park, obchodní či průmyslová zóna, atd.) a následně zkoumat povrchovou teplotu těchto částí. Teploty by tedy bylo možno určovat nejen mezi jednotlivými kategoriemi, ale také v rámci jedné kategorie v různou denní dobu.

Dále bylo snahou porovnat teplotní charakteristiky z obou sledovaných časových období. I když byly snímky pořízeny ve stejnou roční dobu, byly velmi rozdílné. Proto ze snímku z roku 1990 vycházely výrazně vyšší teploty v porovnání s rokem 2000. Pro reprezentativní detekování teplotních změn by byla třeba mezi snímky shoda v několika důležitých parametrech (shodné prostorové a radiometrické rozlišení, roční období, čas snímkování, charakter počasí). S rostoucím počtem shodných parametrů se zvyšuje přesnost sledování případných změn.

Příspěvek si klade za cíl přispět k hlubšímu poznání zákonitostí termálního dálkového průzkumu Země. Spolu s využitím těchto poznatků na příkladových studiích podává ucelený přehled o dané problematice. Ta je vzhledem k neustáleným diskusím o projevech a dopadech globálního oteplování stále více v okruhu zájmu odborníků i širší veřejnosti. Výsledky lze použít jako dílčí podklady pro studium časoprostorových změn podnebí v městském a příměstské krajině.

Autoři touto cestou děkují Grantové agentuře České republiky za podporu projektu číslo 205/09/1297 Víceúrovňová analýza městského a příměstského klimatu na příkladu středně velkých měst, v jehož rámci tento příspěvek vznikl.

Použité zdroje:

- [1] CAMPBELL, J., B. Introduction to Remote Sensing. 3rd ed. Taylor and Francis, London and New York, 2002. 621 s.
- [2] Climate Change Impacts and Adaptation: A Canadian Perspective. Poslední revize 10. 2. 2007. [cit. 2008-03-16]. Dostupné na WWW: <http://adaptation.rncan.gc.ca/perspective/health_3_e.php?p=1>
- [3] DOBROVOLNÝ, P. Dálkový průzkum Země. Digitální zpracování obrazu. PřF MU, Brno, 1998. 208 s.
- [4] GANAS, A., LAGIOS, E. Landsat 7 night imaging of the Nissyros Volcano, Greece. International Journal of Remote Sensing, 24, 2003. s. 1579 – 1586.
- [5] HAIS, M. A KOL. Vliv Jaderné elektrárny Temelín na teplotně - vlhkostní parametry krajinného krytu. 2004. [cit. 2007-11-19]. Dostupné na WWW: <<http://kostelec.czu.cz/temelin/conf2004/hais.htm>>
- [6] HAIS, M., POKORNÝ, P. Změny teplotně-vlhkostních parametrů krajinného krytu jako důsledek rozpadu horských smrčín. 2004, [cit. 2007-11-19]. Dostupné na WWW: <<http://www.npsumava.cz/storage/str49-55.pdf>>
- [7] LILLESAND, T., KIEFER, R., CHIPMAN, J. Remote sensing and image interpretation. John Wiley and Sons, Inc., Hoboken, 2004. 724 s.
- [8] MESEV, V. Remotely sensed cities. Taylor and Francis, London and New York, 2003. 378 s.
- [9] NICHOL, J., E. Visualisation of urban surface temperatures derived from satellite images. International Journal of Remote Sensing, 19, 1998, s. 1639 – 1649.
- [10] OZAWA, A. A KOL. Aiborne hyperspectral and thermal information for assessing the heat island in urban areas of Japan. [cit. 2007-10-09]. Dostupné na WWW: <<http://www.isprs.org/istanbul2004/comm7/papers/9.pdf>>
- [11] PRISLINGER, J. Detekce tepelného znečištění pomocí materiálů dálkového průzkumu Země. [Diplomová práce], Univerzita Palackého v Olomouci, Přírodovědecká fakulta. Katedra geoinformatiky, 2008. 57 s.
- [12] STUEVEN, B. A study o fland cover and thermal changesat Kilauea volcano, Hawaii. 2004, [cit. 2007-12-10]. Dostupné na WWW: <<http://www.uwlax.edu/urc/JUR-online/PDF/2004/stueven.pdf>>
- [13] ŠÍMA, M. Náhledové satelitní mapy struktury a relativní teploty krajiny - výzkumná zpráva. Orbitec Consulting, České Budějovice, 2001. 4 s.
- [14] The Landsat Program [online]. Poslední revize 11. 12. 2007, [cit. 2007-12-17]. Dostupné na WWW: <<http://landsat.gsfc.nasa.gov/>>
- [15] Urban heat island. Poslední revize 11. 2. 2008, [cit. 2008-02-17]. Dostupné na WWW: <http://en.wikipedia.org/wiki/Urban_heat_island>

- [16] VAN, T. Relationship Between Surface Temperature and Land Cover Types Using Thermal Infrared Remote Sensing, in Case of HoChiMinh City. [cit. 2007-11-20]. Dostupné na WWW: <www.fao.org/gtos/doc/ECVs/T09/ECV-T9-landcover-ref08-Thi%20Van.doc>
- [17] WENG, Q., LU, D. (2006): Spectral mixture analysis of ASTER images for examining the relationship between urban thermal features and biophysical descriptors in Indianapolis, Indiana, USA. *Remote Sensing of Environment*, 104, s. 157–167.
- [18] WENG, Q., LU, D., SCHUBRING, J. Estimation of land surface temperature–vegetation abundance relationship for urban heat island studies. *Remote Sensing of Environment*, 89, 2004. 467–483.
- [19] WENG, Q., YANG, S. Urban air pollution patterns, land use, and thermal landscape: an examination of the linkage using GIS. *Environmental Monitoring and Assessment*, 117, 2006. s. 463–489.

Kontaktní adresa:

Mgr. Pavel Sedlák, Ph.D.
Ústav systémového inženýrství a informatiky
Fakulta ekonomicko-správní
Univerzita Pardubice
Studentská 84
532 10 Pardubice
+420 466 036 071
Email: pavel.sedlak@upce.cz

Mgr. Jan Prislinger
Katedra geoinformatiky
Přírodovědecká fakulta
Univerzita Palackého v Olomouci
třída Svobody 26
771 46 Olomouc

doc. RNDr. Miroslav Vysoudil, CSc.
Katedra geografie
Přírodovědecká fakulta
Univerzita Palackého v Olomouci
třída 17. listopadu 12
771 46 Olomouc
+420 585 634 502
Email: miroslav.vysoudil@upol.cz