

Výpočet teploty povrchu v Bratislave pomocou satelitných snímok

Rusňák, T., Lieskovský, J.: Calculation of Land Surface Temperature in Bratislava by Satellite Images. *Životné prostredie*, 2017, 51, 1, p. 37–40.

We employed satellite images and the split-window algorithm to estimate land surface temperature in Bratislava and its surrounds on specific days in July and December 2014. Images were obtained from the Landsat 8 Operation Land Imager at 30 m resolution and the Thermal Infrared Sensor at 100 m resolution. Results highlight the relationship between land cover and land surface temperature where areas covered with vegetation or closer to water areas have lower temperature than non-vegetated areas. The coolest summer area is in forests in the northern part of study area and the hottest is the Volkswagen industrial park. Meanwhile, the coolest winter area is Zlaté Piesky lake and the warmest is also in the Volkswagen industrial park.

Key words: Landsat 8, split-window algorithm, normalized difference vegetation index, classification, land surface temperature

Teplota povrchu krajiny hrá významnú úlohu, či už z hľadiska globálnych zmien klímy, alebo z hľadiska mikroklimatických vlastností krajiny. Mestá sú výrazne teplejšie ako okolitá krajina. Tieto výrazné rozdiely spôsobujú predovšetkým rôzne vlastnosti aktívnych povrchov v porovnaní s voľnou krajinou. Aktívny povrch je plocha na zemskom povrchu, na ktorej alebo v ktorej prebieha transformácia žiarivej energie na tepelnú a opačne. V nej sa uskutočňuje transport tepelnej energie do atmosféry a podložia cestou turbulentnej výmeny a molekulárneho vedenia (Marshall, Plumb, 2008). Ide predovšetkým o premenu slnečného žiarenia na teplo, ale aj o vyžarovanie tepla cez infračervené žiarenie. Plocha, ktorá vykazuje značne vyššie teploty ako okolie, sa nazýva tepelný ostrov. Najväčšie teplotné rozdiely spôsobujú zväčšené plochy aktívnych povrchov a prevažne vertikálne orientované plochy (najčastejšie výškovo orientované budovy), ktoré vedú k zvyšovaniu množstva pohlteneho krátkovlnného žiarenia. Okrem toho dochádza v zastavaných oblastiach k zníženiu cirkulácie vzduchu a tým aj k zníženiu výmeny tepla s okolitou krajinou. Ďalším faktorom spôsobujúcim vznik tepelných ostrovov sú nepriepustné povrchy, ako betón alebo asfalt, ktoré sa nedokážu ochladzovať postupným odparovaním vody. Následkom toho bývajú mestá v lete teplejšie a v zime v noci chladnejšie ako okolie. To vedie k poklesu komfortu obyvateľov predovšetkým v lete, keď sa vysoké teploty udržiavajú aj počas noci (Voogt, Oke, 2003).

Diaľkový prieskum Zeme (DPZ) ponúka možnosti na detekovanie teploty povrchu v krajine. S použitím geografických informačných systémov (GIS) možno analyzovať jej zmeny v priestore a čase. Na odhad teploty povrchu bolo vyvinutých viacero algoritmov. Podstata vyjadrenie teploty povrchu pomocou DPZ spočíva v poznaní emisi-

vity jednotlivých povrchov v krajine a radiačnej teploty povrchov zaznamenananej satelitným senzorom. Poznáme viac algoritmov, pomocou ktorých je možné vyjadriť teplotu povrchu z termálnych satelitných snímok. *Dual Angle Observation* algoritmus využíva snímku s jedným termálnym pásmom z dvoch pozorovacích uhlov (Merlin, Chehbouni, 2004). *Single Window* algoritmus je tiež navrhnutý pre snímky s jedným termálnym pásmom, avšak na vyjadrenie teploty treba poznať emisivitu jednotlivých povrchov (Qin et al., 2001). *Split-Window* algoritmus je používaný na zistenie teploty povrchu z dvoch termálnych pásiem v oblasti 10,5 – 12,5 μm elektromagnetického žiarenia. Jeho podstata spočíva v poznatku, že teplota povrchu je v lineárnom vzťahu s radiačnými teplotami týchto dvoch pásiem. Za predpokladu znalosti emisivity povrchov v týchto dvoch pásmach táto metóda z veľkej časti eliminuje vplyv atmosféry (Liang, 2004).

Satelitné snímky

Landsat 8 patrí medzi najmodernejšie satelitné družice zamerané na globálne pozorovanie Zeme. Cieľom satelitu je včas poskytovať vysoko kvalitné snímky zemského povrchu vo viditeľnom, ale aj infračervenom svetelnom spektre, a tak nadviazať na predchádzajúce satelity Landsat, ktoré nepretržite snímajú Zem od roku 1972. Snímkovanie sa opakuje v 16-dňových intervaloch. Dáta sú voľne sťahovateľné zo stránky Earth Explorer (<http://earthexplorer.usgs.gov>). V predkladanej práci boli použité snímky z dvoch období. Prvá snímka pochádza zo 7. júla 2014 a druhá z 1. decembra 2014. Júl predstavuje najteplejší mesiac v roku na danom území. Najchladnejší mesiac je január, avšak pre tento mesiac neboli dostupné bezoblačné snímky, a preto sme vybrali

snímku z decembra. Územie sa nachádza medzi dvoma dráhami letu satelitu. Väčšia časť územia sa nachádza v dráhe *Path 190/26 Row*, na zachovanie jednotnosti údajov boli vybrané snímky práve z tejto dráhy.

Vymedzenie územia

Hranicu študovaného územia tvorí kataster Bratislavy a jej mestských častí. Časti Vrakuňa, Podunajské Biskupice a Čunovo boli len sčasti analyzované, pretože sa nachádzali mimo záberu satelitu. Z klimatologického hľadiska patrí územie do teplej, mierne vlhkej klímy s miernou zimou. Priemerná ročná teplota sa pohybuje v rozmedzí 11 až 12 °C (za roky 1961 – 1990). Najteplejším mesiacom je júl, ktorý má priemerne 20 °C. Najchladnejším mesiacom je január s teplotami okolo –3 °C. Priemerný počet letných dní je 69 za rok, mrazivých dní je priemerne 88. Na územie spadne ročne priemerne 550 mm zrážok (Abaffy a kol., 2002).

Analýza teploty povrchu

Na to, aby bolo možné odhadnúť teplotu povrchu zo satelitnej snímky, je potrebné poznať radiačnú teplotu a emisivitu povrchu. Radiačná teplota je teplota vyžarovaná povrchom, ktorá sa odráža od zemského povrchu do atmosféry. Emisivita povrchu je schopnosť vyžarovať elektromagnetické žiarenie. Každý povrch vyžaruje iné hodnoty elektromagnetického žiarenia. Tieto hodnoty predstavujú vstupné údaje pre *Split-Window* algoritmus, vďaka ktorému je možné vyjadriť teplotu povrchu z dvoch termálnych pásiem, ktorými disponuje Landsat 8. K týmto výpočtom pristúpime až po splnení viacerých medzikrokov:

1. Radiačná teplota spektrálneho žiarenia

Najskôr treba previesť hodnoty pixlov, zaznamenaných sensorom, na hodnoty spektrálneho žiarenia. Pomocou hodnôt spektrálneho žiarenia sa vypočíta radiačná teplota (U. S. Geological Survey, 2015):

$$L_{\lambda} = M_L \cdot Q_{cal} + A_L$$

L_{λ} – horná časť spektrálneho žiarenia senzoru ($W/(m^2 \cdot sr \cdot \mu m)$);

M_L – špecifická hodnota spektrálneho pásma multiplikatívneho prepočtu udaná v metadátach (*RADIANCE_MULT_BAND_x*, kde *x* je spektrálne pásmo);

Q_{cal} – digitálne hodnoty termálnej snímky;

A_L – špecifická hodnota spektrálneho pásma multiplikatívneho prepočtu udaná v metadátach (*RADIANCE_MULT_BAND_x*, kde *x* je spektrálne pásmo).

Radiačná teplota je vyjadrená v kelvinoch, a preto ju treba previesť do stupňov Celzia (U. S. Geological Survey, 2015):

$$BT = \frac{K2}{\ln\left(\frac{K1}{L_{\lambda}} + 1\right)} - 273,15$$

BT – radiačná teplota v kelvinoch;

L_{λ} – spektrálne žiarenie ($Watts/(m^2 \cdot sr \cdot \mu m)$);

K_1 – kalibračná konštanta špecifického termálneho pásma udaná v metadátach snímok (*K1_CONSTANT_BAND_x*, kde *x* je termálne spektrálne pásmo);

K_2 – kalibračná konštanta špecifického termálneho pásma udaná v metadátach snímok (*K2_CONSTANT_BAND_x*, kde *x* je termálne spektrálne pásmo).

2. Emisivita povrchu

Na vyjadrenie emisivity je potrebný frakčný vegetačný kryt (FVC) daného územia. FVC odhaduje podiel vegetácie na povrchu. *Split-Window* algoritmus využíva, na rozdiel od *Single Window* algoritmu, FVC na presnejšie vyjadrenie emisivity povrchov. FVC vypočítame pomocou normalizovaného diferenčného vegetačného indexu (NDVI), ktorý nám ukazuje množstvo a vitalitu vegetácie na zemskom povrchu (Skoković et al., 2014; Mao et al., 2005):

$$FVC = \frac{NDVI - NDVI_s}{NDVI_v - NDVI_s}$$

FVC – frakčný vegetačný kryt;

NDVI – normalizovaný diferenčný vegetačný index;

$NDVI_v$ – NDVI neklasifikované pre vegetáciu;

$NDVI_s$ – NDVI reklasifikované pre pôdu.

Emisivita povrchu (LSE) je kľúčovým parametrom na vyjadrenie teploty povrchu krajiny pomocou *Split-Window* algoritmu (Mao et al., 2005):

$$LSE = \epsilon_s(1 - FVC) + \epsilon_v \cdot FVC$$

LSE – emisivita povrchu;

FVC – frakčný vegetačný kryt;

ϵ_s – hodnota emisivity pôdy;

ϵ_v – hodnota emisivity vegetácie.

Posledné hodnoty, ktoré sú ešte potrebné na vyjadrenie teploty povrchu v krajine, sú priemer emisivity povrchu a rozdiel emisivity povrchu. Tie získame kombináciou emisivity povrchu vypočítanou zo spektrálneho pásma 10 a 11 (Mao et al., 2005):

$$LST = BT_{10} + C_1(BT_{10} - BT_{11}) + C_2(BT_{10} - BT_{11})^2 + C_0 + (C_3 + C_4W)(1 - m) + (C_5 + C_6W)\Delta m$$

LST – teplota povrchu v krajine;

BT_{10} – radiačná teplota pásma 10;

BT_{11} – radiačná teplota pásma 11;

$C_0 - C_6$ – SW hodnoty koeficientu;

W – obsah vodnej pary v atmosfére;

m – priemer emisivity povrchu;

Δm – rozdiel emisivity povrchu.

Výsledky a diskusia

Po zrealizovaní všetkých medzikrokov a záverečnom výpočte teploty povrchu v krajine sme vytvorili dve mapy teplôt daného územia. Nakoľko satelit prelieta nad študovaným územím v ranných hodinách, presnejšie o 09:45 hod. – 7. júla 2014 a o 09:46 hod. – 1. decembra 2014, tak výsledné hodnoty sa vzťahujú k týmto časom. Vypočítané hodnoty teplôt pre letné obdobie zo dňa 7. júla 2014 (obr. na str. 3 obálky dole, tab. 1) sú v rozsahu od 17,14 °C až do 72,82 °C. Lokality s najnižšou teplotou 17,14 °C sa nachádzajú v severnej časti na okraji záujmového územia, kde dominujú lesné porasty. Naopak, najvyššia zistená teplota 72,82 °C sa vyskytla v severnej časti na území priemyselného areálu Volkswagen. Najnižšiu priemernú teplotu povrchu vykazovalo Čunovo (29,62 °C), čo je spôsobené tým, že väčšina územia je pokrytá trávnatou a stromovou vegetáciou. Najvyššia priemerná teplota bola zaznamenaná v mestskej časti Nové Mesto (40,27 °C). Územie Nového Mesta tvorí najmä moderná zástavba a je pokryté betónovými a asfaltovými plochami, ktoré akumulujú teplo.

Teploty zo zimnej snímky zo dňa 1. decembra 2014 sa pohybovali v rozsahu –10,66 °C až 15,24 °C (obr. na str. 3 obálky dole, tab. 2). Najnižšia teplota sa nachádzala vo východnej časti na okraji záujmového územia v blízkosti jazera Zlaté piesky. Najvyššia zistená teplota sa podobne ako v júli vyskytovala v severnej časti územia, v priemyselnom areáli Volkswagen. Najnižšiu priemernú teplotu z mestských častí vykazovali Vínohrady (4,70 °C), ktoré majú značnú časť pokrytú stromovou a trávnatou vegetáciou. Naopak najvyššiu priemernú teplotu mala Devínska Nová Ves (6,28 °C). Obe tieto mestské časti sú do značnej miery pokryté stromovou a trávnatou vegetáciou, avšak na území Devínskej Novej Vsi sa nachádza tepelný ostrov na území priemysel-

ného parku Volkswagen, ktorý zvyšuje priemernú teplotu povrchu.

Snímky z diaľkového prieskumu zeme slúžia na približný odhad teploty v priestore a čase. Na overenie presnosti by bola vhodná validácia pozemnými meraniami v okamihu snímania územia satelitom, avšak tieto merania sú náročné z hľadiska času, priestoru a ľudskej kapacity.

Teplota povrchu v krajine patrí ku kľúčovým vlastnostiam, ktoré opisujú stav povrchu a kritické procesy v štúdiách zaoberajúcich sa klimatológiou, hydrologiou, ekológiou a životným prostredím človeka. V tomto príspevku predstavujeme praktické využitie *Split-Window* algoritmu na odhad teploty povrchu v krajine zo satelitných snímok Landsat 8, ktorý sníma teplotu v dvoch termálnych pásmach. V práci je vymedzené územie klasifikované na päť základných typov krajinných povrchov (voda, zástavba, pôda bez vegetácie, trávnatá vegetácia a stromová vegetácia). V priemere najvyššie teploty oboch období dosahovalo zastavané územie, za ním nasledoval obnažený substrát. Plochy pokryté stromami vykazovali priemerne tretiu najvyššiu hodnotu. Trávnaté plochy a vodné plochy mali najnižšie priemerné teploty.

Najvýraznejšie rozdiely v priemerných teplotách jednotlivých povrchov sa prejavujú v lete, keď sa spevnené materiály výrazne prehrievajú a tak je vplyv vegetácie na ochladzovanie povrchov výraznejší (Keresztesová a kol., 2013). Najčastejšie tepelné ostrovy vznikajú v oblastiach priemyselných parkov (El-Magd et al., 2016, Hajto et al., 2013) a potvrdil to aj najvýraznejší tepelný ostrov v zimnom aj letnom období v oblasti areálu priemyselného parku Volkswagen. Príčinou sú veľké betónové a asfaltové plochy, ktoré nedokážu odraziť slnečné žiarenie a len ho akumulujú. Betón a asfalt predstavujú nepriepustné plochy pre vodu, čo negatívne vplyva na

Tab. 1. Výsledné teploty povrchu jednotlivých prvkov využitia krajiny zo 7. júla 2014 o 09:45 hod.

| Prvky využitia krajiny | Plocha (km ²) | Minimálna teplota (°C) | Maximálna teplota (°C) | Rozsah teplôt (°C) | Priemer (°C) | Smerodajná odchýlka (°C) |
|------------------------|---------------------------|------------------------|------------------------|--------------------|--------------|--------------------------|
| Obnažený substrát | 11,69 | 19,64 | 71,36 | 51,72 | 35,68 | ± 4,08 |
| Voda | 1,92 | 21,97 | 38,38 | 16,42 | 25,61 | ± 2,77 |
| Zástavba | 13,83 | 18,00 | 72,82 | 54,81 | 39,23 | ± 4,32 |
| Stromy | 23,28 | 17,14 | 52,92 | 35,78 | 28,65 | ± 2,36 |
| Tráva | 26,87 | 17,88 | 53,80 | 35,93 | 33,79 | ± 3,64 |

Tab. 2. Výsledné teploty povrchu jednotlivých prvkov využitia krajiny z 1. decembra 2014 o 09:46 hod.

| Prvky využitia krajiny | Plocha (km ²) | Minimálna teplota (°C) | Maximálna teplota (°C) | Rozsah teplôt (°C) | Priemer (°C) | Smerodajná odchýlka (°C) |
|------------------------|---------------------------|------------------------|------------------------|--------------------|--------------|--------------------------|
| Obnažený substrát | 7,92 | 2,30 | 10,66 | 8,36 | 5,81 | ± 0,59 |
| Voda | 1,55 | – 10,66 | 7,65 | 18,31 | 4,20 | ± 0,34 |
| Zástavba | 23,54 | 4,18 | 15,24 | 11,06 | 6,60 | ± 0,95 |
| Tráva | 12,03 | 0,04 | 11,43 | 11,39 | 5,19 | ± 0,68 |
| Stromy | 37,84 | 1,20 | 13,52 | 12,32 | 5,21 | ± 1,02 |

evapotranspiráciu. K podobným výsledkom došli aj Reháčková a Pauditšová (2006), ktoré skúmali vplyv vegetácie na teplotu vzduchu v mestskej časti Karlová Ves. Ich výskum potvrdil, že vegetačná pokrývka s rozličnou štruktúrou má výrazný mikroklimatický efekt. Rozdiely v nameraných teplotách vzduchu potvrdzujú, že využitie vegetačných formácií na zlepšenie mikroklimy v urbánnom prostredí je opodstatnené, napr. rozdiel teploty vzduchu medzi trávnikom a soliterným stromom bol až 14,6 °C.

Výsledky potvrdzujú, že vplyv tepelných ostrovov možno najlepšie eliminovať zvýšením množstva vegetácie v meste. To bolo navrhované v rámci krajinnokoologickej optimalizácie územia (Hrnčiarová a kol., 2006). V skutočnosti sa podiel vegetácie v Bratislave znižuje na úkor zastavaných území (Pazúr et al., 2017). Negatívny efekt zvýšenia pomeru zastaveného územia možno čiastočne eliminovať využívaním „zelených riešení“, ako sú strechy pokryté vegetáciou, používanie priepustných povrchov na parkoviskách a chodníkoch, zadržiavanie vody v meste a podobne. Hudeková a kol. (2007) odporúča, aby pri návrhu koncepcie stavieb a zelene v meste bola kompozícia navrhnutá tak, aby umožnila lepšiu cirkuláciu vzduchu a aby v nočných hodinách podporila prúdenie a výmenu chladnejšieho vzduchu z okolia. V skladbe vegetácie by mal byť väčší podiel drevín a stromov k trávnikom. Tiež odporúča využívať svetlé farby a lesklé povrchy na fasádach, ktoré vo všeobecnosti lepšie odrážajú žiarenie ako tmavé odtiene. Na zvýšenie evapotranspirácie odporúča zvýšiť podiel vodných prvkov, ako sú fontány a vodné toky. Strešné a terasové zvody je možné zaustiť do zberných jarkov a rigolov a odviesť takto zachytenú vodu do zberných jazierok, chodníky a spevnené plochy vyspádovať tak, aby z nich voda stekala do zelene.

* * *

Vplyvom globálnych zmien sa bude teplota v krajine naďalej zvyšovať. Ak v mestách nezvýšime podiel prvkov zlepšujúcich mikroklimu, bude možno o pár rokov život v mestách počas horúcich letných mesiacov nezniesiteľný.

Príspevok vznikol ako výstup vedeckého projektu 2/0171/16 Zmeny poľnohospodárskej krajiny Slovenska vplyvom politik Európskej únie v rámci Vedeckej grantovej agentúry MŠVVŠ SR a SAV.

Literatúra

- Abaffy, D. a kol.: Atlas krajiny Slovenskej republiky. Bratislava: Ministerstvo životného prostredia, Banská Bystrica: Slovenská agentúra životného prostredia, 2002, 344 s.
- El-Magd, I. A., Ismail, A., Zanaty, N.: Spatial Variability of Urban Heat Islands in Cairo City, Egypt using Time Series of Landsat Satellite Images. *International Journal of Advanced Remote Sensing and GIS*, 2016, 5, 3, p. 1 618 – 1 638.
- Hajto, M. J., Walawender, J. P., Struzik, P.: Night-Time Surface Urban Heat Island in the City of Krakow (Poland) Determined with The Use of NOAA/AVHRR Data. 2013. (www.researchgate.net)
- Hrnčiarová, T. a kol.: Krajinnokoologické podmienky rozvoja Bratislavy. Bratislava: Veda, vydavateľstvo SAV, Ústav krajinné ekológie SAV, 2006, 316 s.
- Hudeková, Z., Krajscovics, L., Patrik, M., Pauditšová, E., Reháčková, T.: Ekologická stopa, klimatické zmeny a mestá. Návrh výpočtu ekologickej stopy a predstavenie možností zmiernenia negatívnych prejavov klimatických zmien v meste. Bratislava: REC Slovensko, 2007, 56 s.
- Keresztesová, S., Strelková, M., Rózová, Z.: Vplyv vegetácie na povrchovú teplotu v podmienkach mesta Nitra. In: Heinrichová, M., Reháčková, T. (eds.): Aktuálne problémy krajinné architektúry a krajinného plánovania. Bratislava: Veda, vydavateľstvo SAV, 2013, s. 94 – 99.
- Liang, S.: Quantitative Remote Sensing of Land Surfaces. New Jersey: John Willey & Sons, 2004, 534 p.
- Mao, K., Qin, Z., Shi, J., Gong, P.: A Practical Split-Window Algorithm for Retrieving Land-Surface Temperature from MODIS Data. *International Journal of Remote Sensing*, 2005, 26, 15, p. 3 181 – 3 204.
- Marshall, J., Plumb, R. A.: Atmosphere, Ocean, and Climate Dynamics: An Introductory Text. Amsterdam – Boston – Heidelberg – London – New York – Oxford – Paris – San Diego – San Francisco – Singapore – Sidney – Tokyo: Academic Press, 2008, 344 p.
- Merlin, O., Chehbouni, A.: Different Approaches in Estimating Heat Flux Using Dual Angle Observations of Radiative Surface Temperature. *International Journal of Remote Sensing*, 2004, 25, 1, p. 275 – 289.
- Pazúr, R., Feranec, J., Štych, P., Kopecká, M., Holman, L.: Changes of Urbanised Landscape Identified and Assessed by the Urban Atlas Data: Case Study of Prague and Bratislava. *Land Use Policy*, 2017, 61, p. 135 – 146.
- Qin, Z., Karnieli, A., Berliner, P.: A Mono-Window Algorithm for Retrieving Land Surface Temperature from Landsat TM Data and its Application to the Israel-Egypt Border Region. *International Journal of Remote Sensing*, 2001, 22, 18, p. 3 719 – 3 746.
- Reháčková, T., Pauditšová, E.: Vegetácia v urbánnom prostredí. Bratislava: CICERO, s. r. o., 2006, 132 s.
- Skoković, D., Sobrino, J. A., Jiménez-Muñoz, J. C., Sòria, G., Julien, Y., Mattar, C., Cristóbal, J.: Calibration and Validation of Land Surface Temperature for Landsat 8 – TIRS Sensor. Frascati: ESA, ESRIN, 2014, 27 p.
- U. S. Geological Survey: Landsat 8 (L8) Data Users Handbook. Version 1.0. 2015, p. 61 – 63. (<https://landsat.usgs.gov/documents/Landsat8DataUsersHandbook.pdf>)
- Voogt, J. A., Oke, T. R.: Thermal Remote Sensing of Urban Climates. *Remote Sensing of Environment*, 2003, 86, p. 370 – 384.

Mgr. Tomáš Rusňák, tomas.rusnak@savba.sk
Katedra ekológie a environmentalistiky Fakulty prírodných vied Univerzity Konštantína Filozofa v Nitre, Tr. A. Hlinku 1, 949 74 Nitra

Mgr. Juraj Lieskovský, PhD., juraj.lieskovsky@savba.sk
Ústav krajinné ekológie SAV, pracovisko Nitra, Akademická 2, P. O. Box 22, 949 10 Nitra