

MONITORING DYNAMIKY MESTSKEJ ZELENÉ PRE SPRESNENIE MODELOVANIA SLNEČNÉHO ŽIARENIA V URBÁNNEJ KRAJINE

Ján KAŇUK¹, Michal GALLAY¹, Jaroslav HOFIERKA¹, Ján ŠAŠAK¹, Jozef ŠUPINSKÝ¹, Vladimír SEDLÁK¹, Alena GESSERT¹

¹ Ústav geografie, Prírodovedecká fakulta, Univerzita Pavla Jozefa Šafárika v Košiciach, Jesenná 5, 04011, Košice, Slovenská republika

jan.kanuk@upjs.sk, michal.gallay@upjs.sk, jaroslav.hofierka@upjs.sk, jan.sasak@upjs.sk, jozef.supinsky@upjs.sk, vladimir.sedlak@upjs.sk, alena.gessert@upjs.sk

Abstrakt

Zeleň je kľúčovým prvkom krajinnej pokrývky, ktorý zmierňuje nepriaznivý vplyv mestského ostrova tepla na kvalitu života v meste. V podmienkach mierneho klimatického pásma však vegetácia vykazuje vysokú mieru premenlivosti v priebehu roka, a tak je tiež jej efekt na ochladzovanie klímy v meste premenlivý. Moderné metódy diaľkového prieskumu Zeme a nové generácie senzorov pre jej mapovanie prinášajú možnosť zaznamenať túto dynamiku mestskej zelene vo vysokom priestorovom, spektrálnom a časovom rozlíšení. V tomto príspevku na príklade centrálnej časti mesta Košice preukazujeme metodiku monitorovania mestskej zelene v priebehu jedného vegetačného obdobia. Úloha súvisí s riešením štúdie uskutočniteľnosti pre Európsku vesmírnu agentúru (ESA). Jej cieľom je stanoviť použiteľnosť multispektrálneho záznamu senzorov Sentinel 2 pre určovanie priepustnosti mestskej zelene pre slnečné žiarenie zohľadňujúc jej fenologický aspekt v priebehu roka. Priepustnosť vegetácie v ultra-vysokom rozlíšení sme na štyroch lokalitách monitorovali prostredníctvom pozemného laserového skenovania, ktoré bolo synchronizované s preletom Sentinulu 2A. V celom rozsahu skúmaného územia s plochou 4 km² sme realizovali jednorazové letecké laserové skenovanie a fotogrametriu pre zachytenie geometrickej štruktúry hornej časti vegetácie a pre tvorbu 3D modelu budov a terénu. Druhovú zloženie stromovej vegetácie bolo zisťované prieskumom priamo v teréne. Hoci projekt sa nachádza v prvej tretine riešenia, priebežné výsledky potvrdzujú efektívnosť zvolenej metodiky monitoringu mestskej zelene a jej predstavenie je cieľom tohto príspevku.

Abstract

Urban greenery is the key type of land cover which reduces the effect of urban heat island on the quality of life in contemporary cities. However, vegetation in mid-latitudes phenologically highly dynamic thus the cooling effect of vegetation also changes throughout a year. Modern methods of remote sensing and new generation of sensors for Earth observation bring new capabilities for monitoring the dynamics of urban greenery in high spatial, spectral and temporal resolution. In this paper, we demonstrate the methodological framework applied in monitoring urban greenery during vegetation period in a case study of the Košice city in Slovakia. This task is related to a feasibility study contracted by the European Space Agency (ESA). The aim is to assess the application of multispectral data acquired with Sentinel 2 to ascertain transmissivity of urban greenery for solar radiation considering the phenological aspect. We have monitored the transmissivity of vegetation in ultra-high spatial resolution at four small sites using terrestrial laser scanning which is synchronized with the overpasses of the Sentinel 2A satellite. The entire study area of 4 km² comprises central part of Košice and it was flown in a single mission by airborne laser scanning and photogrammetry to capture the geometric structure of the upper parts of vegetation, generate 3D model of buildings and terrain. Vegetation species were mapped directly in the field. Despite this project is in its beginning stage, the preliminary results demonstrate the efficiency of methods for monitoring the urban greenery. Therefore, the aim of the paper is to present this methodological framework.

Kľúčová slova: Sentinel 2, lidar, laserové skenovanie, mestský ostrov tepla, Košice

Keywords: Sentinel 2, lidar, laser scanning, urban heat island, Košice

1 ÚVOD

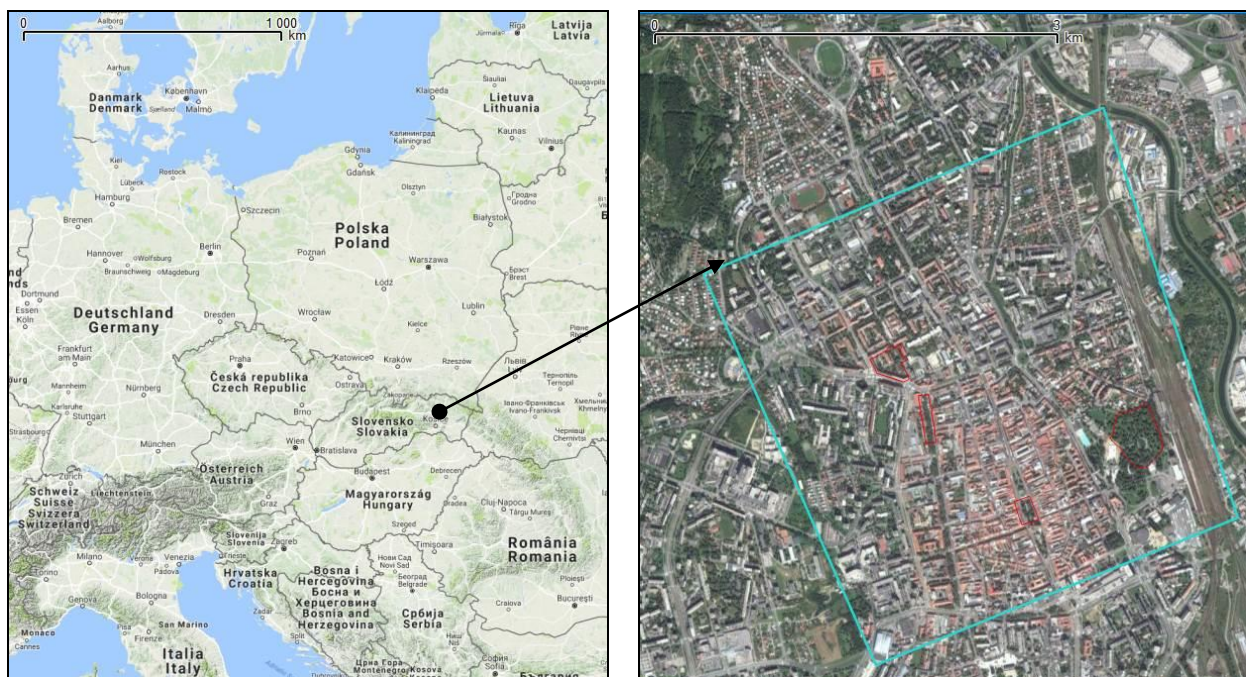
Účinné metódy mapovania a klasifikácie mestskej zelene sú neustále žiadaným výstupom vedy s ohľadom na dokázané vzťahy medzi vegetáciou a biofyzikálnymi ako aj spoločenskými procesmi v urbánnych systémoch (Tooke et al., 2009). Výsledky práce Tooke et al. (2011) indikujú, že stromy priemerne o 38% redukujú celkové slnečné žiarenie dopadajúce na strechy obytných budov. Fogl a Moudrý (2016) v iných podmienkach zistili menší efekt v rozmedzí 3 až 11% a poznamenávajú, že najväčšia redukcia slnečného žiarenia v dôsledku zatienenia vegetáciou nastáva v lete (50%). Žiarenie dopadajúce na povrch urbánnej krajiny je vysoko variabilné v priestore a čase v dôsledku zložitej geometrickej a kvalitatívnej štruktúry krajiny pokrývky v meste. Pochopenie týchto variácií v časo-priestorovej distribúcie slnečnej energie je základným predpokladom pre stanovenie komponentov energetickej bilancie urbánnej krajiny. Príkladmi problémov vyžadujúcich čo najpresnejšie určenie množstva dopadajúceho slnečného žiarenia sú pripovrchová klíma v meste (Voogt and Oke, 1997), dopyt po elektrickej energii a teple v budovách (Ratti et al., 2005, Hofierka a Zlocha, 2012) a teplotný komfort (Lindberg and Grimmond, 2011).

V súčasnosti v prostredí geografických informačných systémov existuje viacero modelov pre výpočet dopadajúceho slnečného žiarenia. Veľmi robustným nástrojom využívajúcim rastrovú dátovú reprezentáciu krajiny je *r.sun* (Šúri a Hofierka 2004, Hofierka a Kaňuk 2009) a *v.sun*, ktorý dokáže pracovať s vektorovým 3D modelmi budov (Hofierka a Zlocha, 2012, Kaňuk et al. 2015). Oba moduly sú navrhnuté pre implementáciu v GRASS GIS (Neteler a Mitášová, 2008). Pri modelovaní dopadajúceho slnečného žiarenia na povrch krajiny sú kritickými parametrami atmosférická priepustnosť a geometrická štruktúra urbánneho priestoru. Napríklad Tooke et al. (2012) zistili, že dátová reprezentácia stromov ako nepriehľadných objektov výrazne podhodnocuje solárne ožiarenie v urbánnej krajine, pričom v obytnej zóne so stromami išlo o 18% podhodnotenie priameho slnečného žiarenia pod stromami. Podľa Tooke et al. (2012) by efektívnejšie zohľadnenie spektrálnej odrazivosti povrchu umožnilo presnejšie určenie zložky odrazeného slnečného žiarenia dopadajúceho na povrch. Potenciál ďalej existuje v oblasti spresnenia prepusteného žiarenia zohľadnením časovej, spektrálnej a geometrickej dynamiky vegetácie. V tomto ohľade sa ako veľmi užitočné ukazujú dáta poskytované misiou Európskej vesmírnej agentúry (ESA) Sentinel 2, ktorej prvý satelit Sentinel 2A je na orbite od júna 2015 a Sentinel 2B má byť vypustený v roku 2017. Multispektrálny záznam Sentinelov 2 umožňuje mapovanie krajiny vo vyššom priestorovom, spektrálnom a časovom rozlíšení ako podobné satelity pre pozorovanie Zeme (Obr. 1).

V tomto príspevku prezentujeme zámer využiť dáta novej generácie multispektrálnych satelitných skenerov pre odvodenie priepustnosti vegetácie pre slnečné žiarenie. Na príklade centrálnej časti mesta Košice preukazujeme metodiku monitorovania mestskej zelene v priebehu jedného vegetačného obdobia. Úloha súvisí s riešením štúdie uskutočniteľnosti pre Európsku vesmírnu agentúru (ESA) s názvom: Simulating the cooling effect of urban greenery based on solar radiation modelling and a new generation of ESA sensors (SURGE).

2 ZÁUJMOVÉ ÚZEMIE

Prezentovaný výskum sa viaže na Košice, ktoré sú druhým najvýznamnejším mestom Slovenskej republiky s počtom obyvateľov vyše 240 000. Košice sú typickým príkladom urbánnej krajiny v podmienkach mierneho pásma Strednej Európy. Zároveň sa tu nachádza domovské pracovisko riešiteľského tímu, čo prirodzene vytvára vhodné predpoklady pre efektívnu logistiku z hľadiska opakovaného pozorovania a mapovania mestskej zelene v zmysle cieľa projektu. V rámci centrálnej časti mesta sme vyčlenili štvorcovú oblasť s plochou 4 km², ktorá zahŕňa rôzne typy mestskej zelene a sídelnej štruktúry ako sú rozľahlé parky, menšie parky v historickom centre mesta, aleje, zeleň v okolí rezidentských zón a iné (Obr. 1). Popri tom je územie dostatočne veľké na to, aby sa jeho diverzita mohla prejavovať aj v satelitných záznamoch Sentinel 2A, Landsat 7 a 8, ktorých priestorové rozlíšenie obrazového elementu dosahuje až desiatky metrov. Pre podrobné a opakované snímanie geometrickej štruktúry zelene sme vybrali štyri menšie lokality s plochou rádovo niekoľko hektárov.



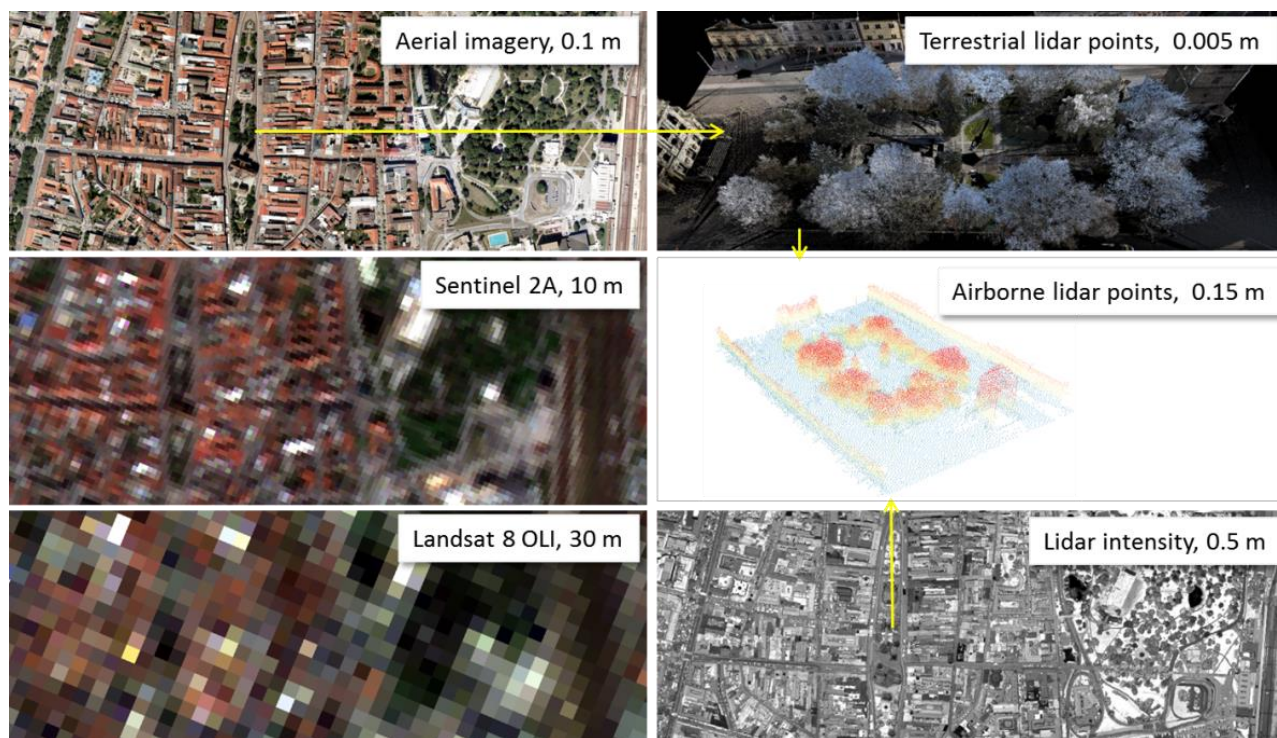
Obr. 1. Poloha Košíc v rámci Európy (vľavo) a vymedzenie záujmového v rámci Košíc (vpravo). Tyrkysová čiara ohraničuje územie mapované jednorázovo leteckým laserovým skenovaním a fotogrametriou. Červenou čiarou ohraničené štyri areály sú predmetom opakovaného pozemného laserového skenovania synchronne s obhom družice Sentinel 2A nad Košicami +/- 2 dni. Zdroj mapového podkladu: © Google.

3 METÓDY A DÁTA

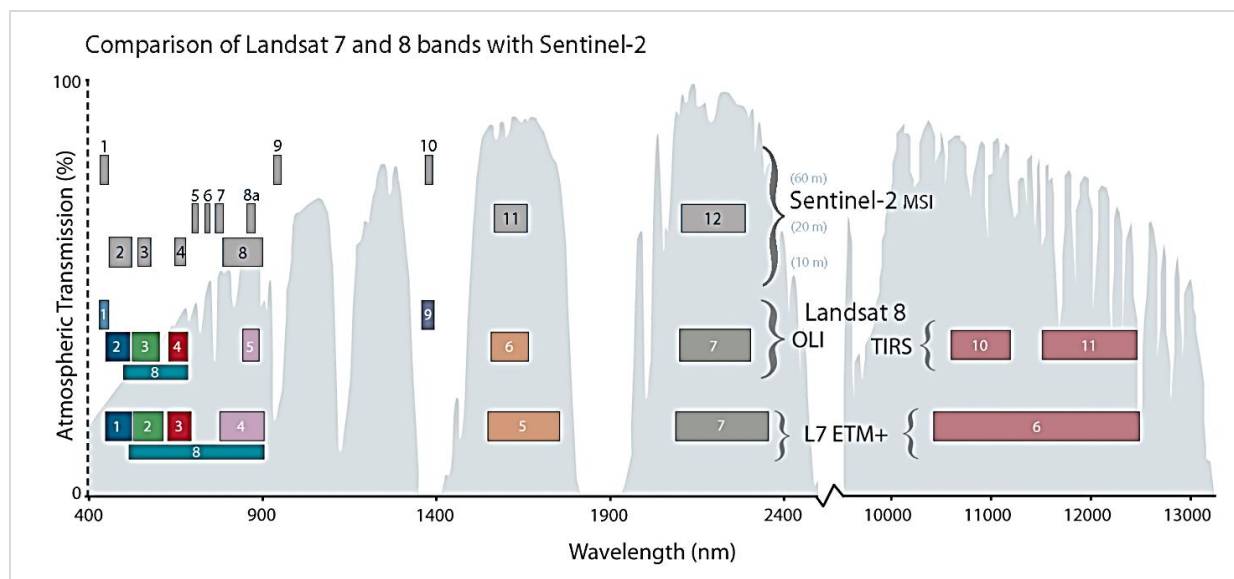
Stanovené ciele si vyžadovali získanie priestorových dát v rôznom priestorovom, spektrálnom a časovom rozlíšení. Predmetom hodnotenia boli najmä satelitné záznamy, ktoré budú v ďalšej fáze riešenia projektu použité pre odvodenie priepustnosti vegetácie pre slnečné žiarenie. Tieto je potrebné validovať vzhľadom na dáta získané s vyššou mierou presnosti a rozlíšenia (najmä priestorového). Z tohto dôvodu bol zvolený postup, ktorý ďalej podrobnejšie opisujeme a zahŕňa multispektrálne satelitné skenovanie, letecké laserové skenovanie a fotogrametriu, ako aj pozemné laserové skenovanie. Ukážky dát získaných uvedenými technológiami zobrazuje Obr. 2. Dáta sú primárne získavané v geodetickom systéme WGS 84.

Priebežne sme zhromažďovali satelitné scény Landsat 7 ETM+, Landsat 8 OLI/TIRS, Sentinel 2A. Výhodou družíc Landsat 7 a 8 je schopnosť záznamu v termálnej časti spektra, ktorou Sentinel 2A nedisponuje (Obr. 3). Avšak Sentinel 2A má vyššie priestorové rozlíšenie pásiem vo viditeľnej časti spektra (10 m) a celkovo viac spektrálnych kanálov v úzkom rozsahu spektrálneho rozhrania medzi červeným a blízkym infračerveným pásmom („red-edge“) (Obr. 2). Citlivejšie tak dokáže zachytiť stav vegetácie. Hoci satelitné dáta majú oveľa nižšie priestorové rozlíšenie v porovnaní so záznamom z leteckých nosičov, ich hlavnou výhodou je záznam vo viacerých spektrálnych pásmach a súčasne vysoká periodicitu záznamu rovnakého územia. Zatiaľ čo Landsat 7 a 8 majú opakovaný prelet po 16 dňoch, Sentinel 2A má periodicitu 10 dní a po vypustení Sentinelu 2B bude dvojicou družíc Sentinel 2A a 2B možné snímanie rovnakého územia každých 5 dní. Tieto dáta sú dostupné zdarma cez portály USGS (<https://earthexplorer.usgs.gov/>) a COPENICUS (<https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home>). Od marca 2016, kedy sme začali s pozemným laserovým skenovaním, do decembra 2016 bolo získaných 36 vhodných scén Sentinel 2A (Obr. 4). Vylúčené boli tie, na ktorých záujmové územie úplne zahaľovala oblačnosť. Z tohto hľadiska boli priaznivé mesiace jún, august a september. Satelitné scény Landsat 7 ETM+ a Landsat 8 OLI/TIRS boli zhromažďované hlavne z dôvodu ich porovnania so záznamom Sentinel 2A a tiež pre záznam v termálnej časti spektra, ktorý umožňuje vypočítať jasovú teplotu zemského povrchu a dať ju do súvisu s parametrami mestskej zelene odvodenými z dát Sentinel 2A alebo získaných z lidarom.

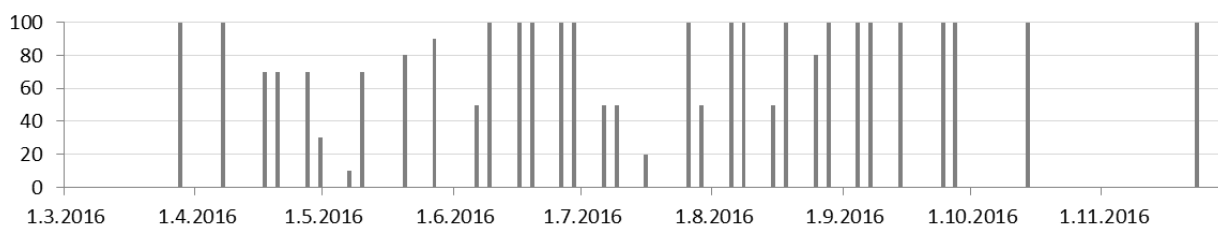
Za účelom zaznamenania detailnej geometrickej štruktúry celého záujmového územia spolu so spektrálnou odrazivosťou vo viditeľnom a blízkom infračervenom pásme boli realizované dve letecké misie firmou Photomap s.r.o so sídlom v Košiciach. Prvá misia zahŕňala digitálny fotogrametrický záznam v auguste 2016 kamerou Vexcel UltracamXp, pričom výsledkom boli dva typy ortofotomozaiiky v rozlíšení 10 cm v prirodzených a nepravých farbách. Druhá misia nasledovala v septembri 2016 používajúc laserové letecké skenovanie (ALS) so skenerom Leica ALS70.



Obr. 2. Prehľad rôznych typov geodát využívaných pre monitoring mestskej zelene s uvedením priestorového rozlíšenia.



Obr. 3. Porovnanie spektrálneho a priestorového rozlíšenia senzorov ETM+, OLI, TIRS a MSI. Zdroj: <http://landsat.gsfc.nasa.gov/sentinel-2a-launches-our-compliments-our-complements/>



Obr. 4. Percentuálny podiel jasnej oblohy nad záujmovým územím v Košiciach v satelitných záznamoch Sentinel 2A level 1C v roku 2016. Úplne oblačné scény sú vynechané.

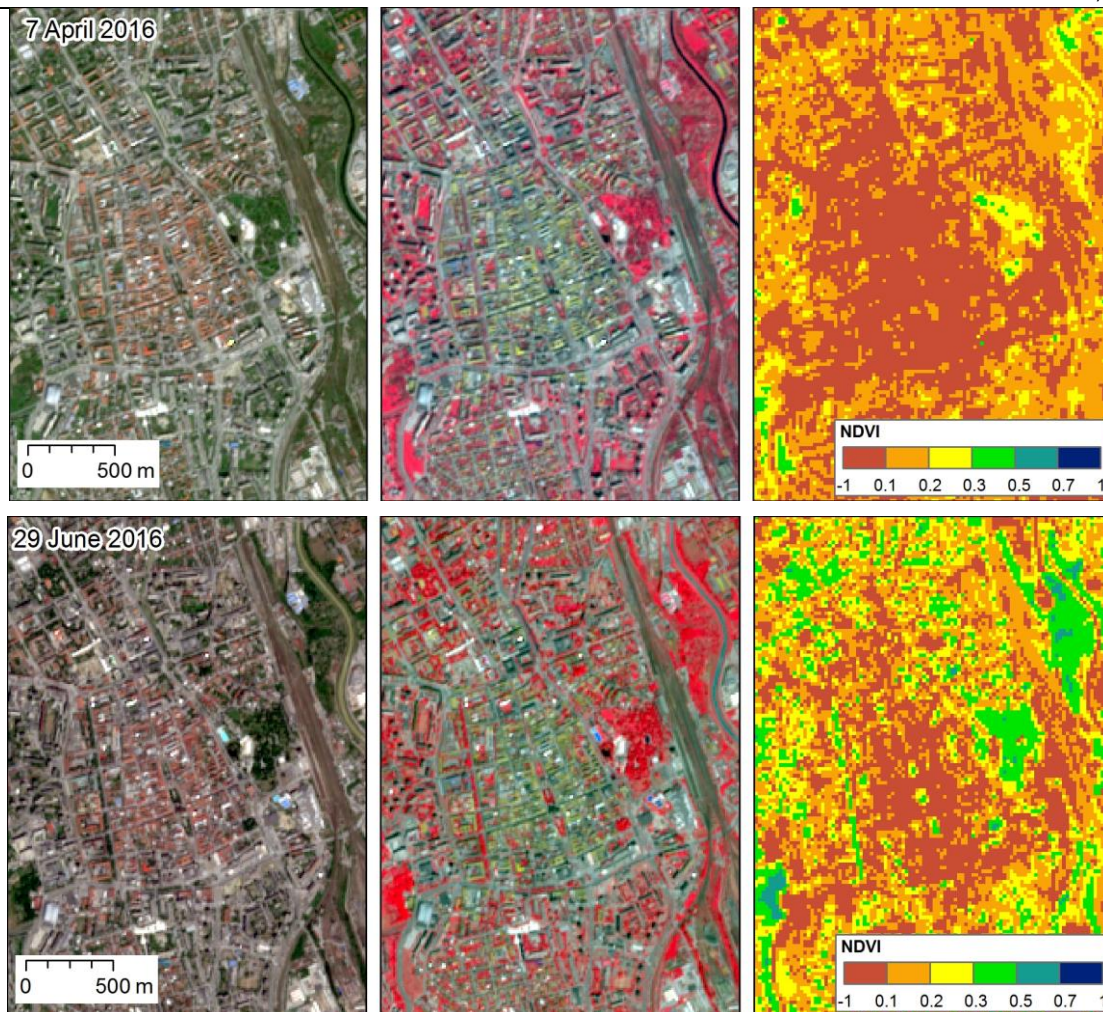
Z hľadiska čo najpresnejšej aproximácie priepustnosti mestskej zelene vykonané letecké mapovanie umožnilo zachytiť stav v čase maximálneho olistenia z vertikálneho až subvertikálneho uhla pohľadu. Pre stanovenie vzťahu medzi spektrálnou odrazivosťou mestskej zelene, ktorú snímajú satelitné senzory a skutočnou priepustnosťou vegetácie bolo potrebné synchrónne zaznamenávať stav vegetácie vo vyššom rozlíšení. Pre tento účel sa výborne hodí pozemné laserové skenovanie (TLS), pretože zaznamenáva okolitú scénu v ultra-vysokom priestorovom rozlíšení a laserový skener je ľahko prenosný. Využili sme skener Riegl VZ-1000 s fotoaparátom Nikon D700, ktorý Ústav geografie UPJŠ v Košiciach nadobudol v rámci budovania Univerzitného vedeckého parku TECHNICOM. Pri pozemnom laserovom skenovaní je dôležitý výber vhodného miesta pre pozíciu skenera tak, aby sa minimalizovali zákryty, vznikol dostatočný prekryt s nasledujúcou pozíciou a počet pozícií bol čo najnižší (Gallay et al., 2015; Smith, 2016). Skenovaním získané mračno 3D bodov je v procese spracovania dát zafarbené podľa fotografického záznamu snímaného bezprostredne po laserovom skenovaní (Obr. 6). Skener disponuje GNSS prijímačom, ktorého polohová presnosť postačuje na uľahčenie vzájomnej registrácie skenovacích pozícií. Konečné vyrovnanie vzájomnej orientácie bolo zabezpečené metódou automatickej vzájomnej registrácie implementovanej v softvéri RiSCAN Pro ako nástroj MSA (Multi Station Adjustment). Podrobnejšie postup opisujú Hofierka et al. (2017). Pozemné laserové skenovanie sme začali vykonávať na štyroch menších lokalitách (Obr. 2 a 6) s typickou štruktúrou zelene od apríla 2016 synchrónne s obehom družice Sentinel 2A nad záujmovým územím (+/- 1-2 dni) zohľadňujúc poveternostné podmienky. Intervaly medzi jednotlivými skenovaniami sme volili aj vzhľadom na fenologickú zmenu vegetácie. Pre spoľahlivé vyhodnotenie spektrálnych parametrov mestskej zelene na satelitných scénach a v lidarovom mračne bodov bol vykonaný terénny prieskum vegetácie na štyroch lokalitách, ktoré monitorujeme pozemným laserovým skenovaním.

4 VÝSLEDKY

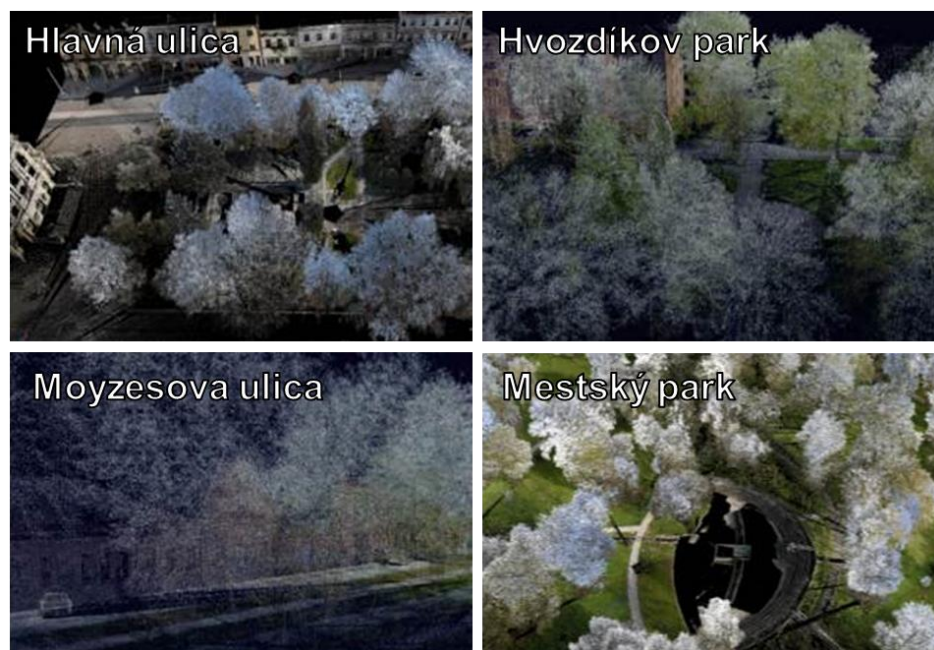
Predstavený metodický rámec monitorovania zelene v Košiciach umožnil v prvých šiestich mesiacoch riešenia projektu SURGE zhromaždiť množstvo dát, ktoré svojím objemom presahujú stovky gigabajtov. V tejto fáze sme sa zamerali na zber a prvotné spracovanie dát. Výsledkom sú časové rady rôznych typov geopriestorových dát v rôznom rozlíšení. Multispektrálne záznamy Sentinel 2A a LANDSAT 8 použijeme v budúcich fázach projektu. Dáta zo Sentinelu 2A poslúžia pre stanovenie priepustnosti zelene na základe korelácie z nich odvodených vegetačných metrík a priepustnosti odvodenej z podrobných meraní pozemným laserovým skenovaním (TLS) a leteckým laserovým skenovaním (ALS). Obrázok 5 je príkladom rozdielu medzi jarným a letným aspektom vegetácie zachyteným na dátach Sentinel 2A. prítomnosť zelenej vegetácie vyjadrujú vysoké hodnoty normalizovaného vegetačného indexu (NDVI). Ďalším typom časovej rady dát, ktoré však reprezentujú mestskú zeleň v ultravysokom rozlíšení sú série mračien bodov získané TLS na štyroch menších lokalitách. Celková presnosť vzájomnej registrácie TLS dát uvedeným postupom dosiahla pre jednotlivé lokality a mapovacie dni štandardnú odchýlku od 1 cm do 4 cm, čo považujeme za postačujúce pre účely projektu. Časovú radu skenov si možno prezrieť na stránke projektu <http://esa-surge.science.upjs.sk/index.php/study-sites>. Pre jeden dátum skenovania ich zobrazuje Obr. 6.

Výsledkom jednorazového leteckého mapovania je vytvorenie vektorového 3-D modelu budov (Obr. 7), vegetácie, vektorový a rastrový digitálny model terénu, pričom cieľom je vytvoriť 3-D model tejto časti mesta pre účely simulácie dopadajúceho slnečného žiarenia na budovy a zemský povrch. Prvotná integrácia mračna bodov z TLS a ALS ukazuje na vysokú mieru dosiahnuteľnej presnosti vzájomnej orientácie týchto dvoch typov mračien bodov. S použitím metódy MSA sme v tomto prípade dosiahli chybu 2 cm (Obr. 8). Zvýšenie presnosti vzájomnej orientácie je limitované rozdielnymi faktormi v čase náletu ALS dát a zberu TLS dát, ako napríklad rozdielna presnosť merania ALS a TLS, pohyb konárov a listov v dôsledku vetra.

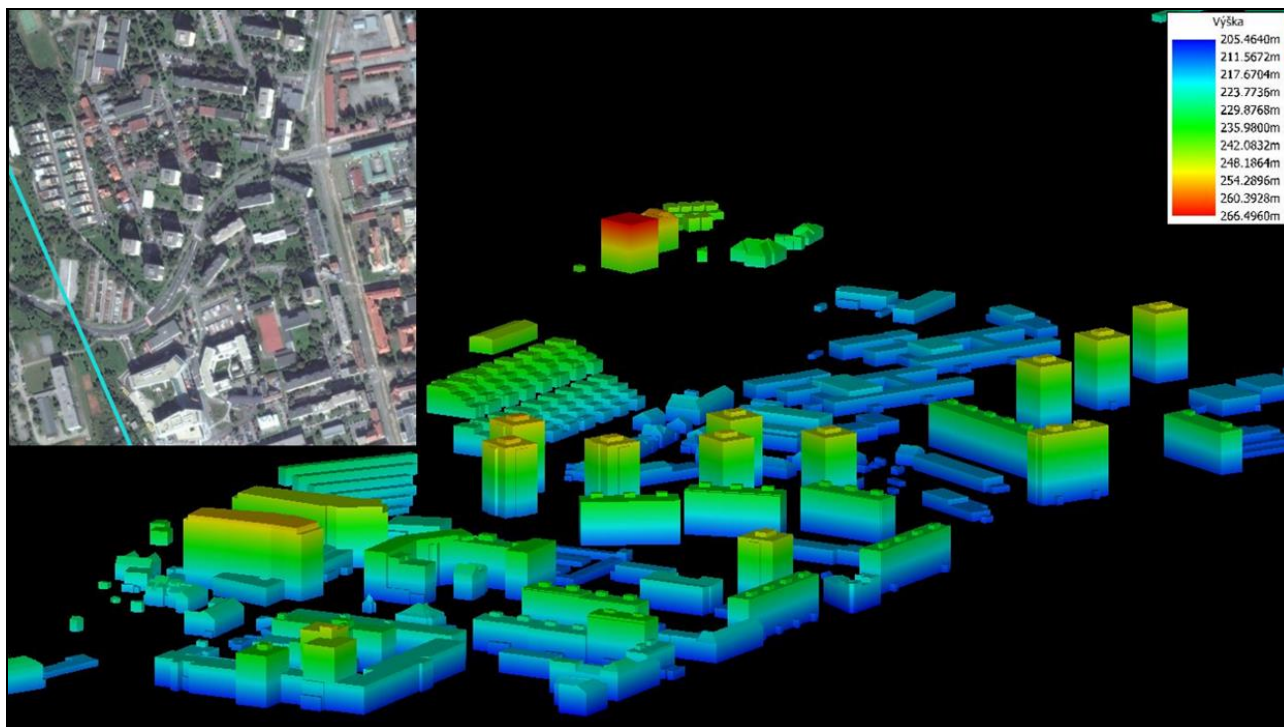
Vytvorená bola geodatabáza drevín, ktorá priestorovo lokalizuje konkrétne druhy a obsahuje údaje o ich zdravotnom stave, priemere koruny, účele vysadenia a ďalších parametroch ako ukazuje Tab. 1 a Obr. 9. Tieto údaje pomáhajú pri interpretácii satelitných snímok, ortofotomozaiky a lidarových dát.



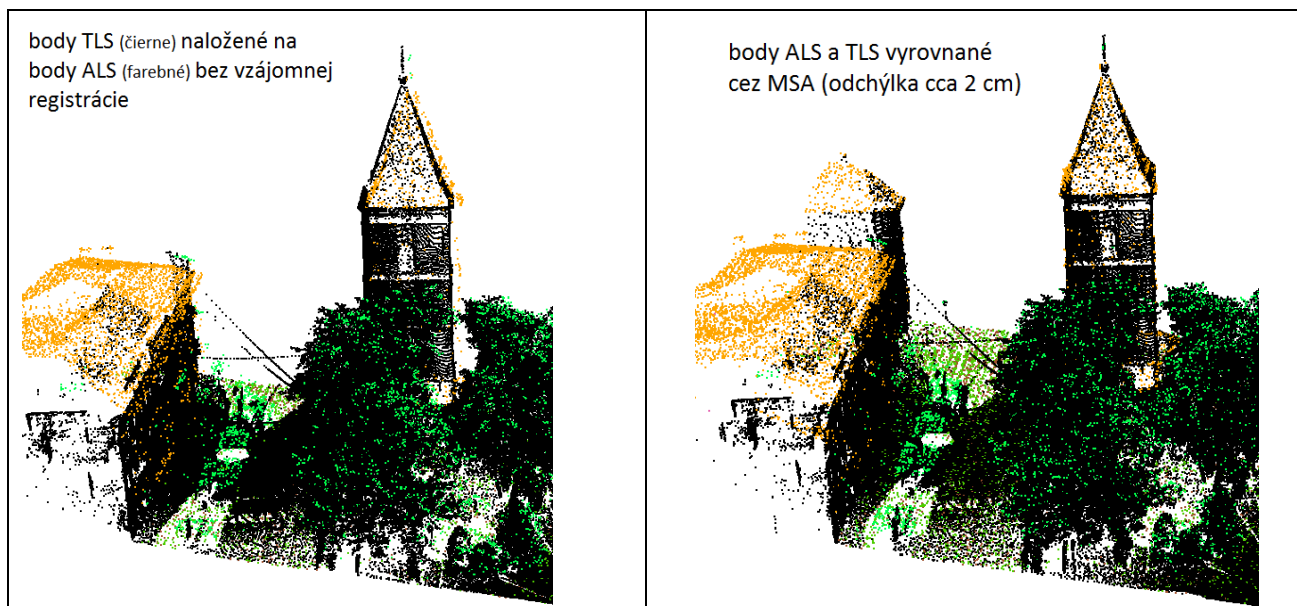
Obr. 5 Centrálna časť mesta Košice na multispektrálnej satelitnej scéne Sentinel 2A v priestorovom rozlíšení 10x10 m pre jarný a letný aspekt vegetácie v prirodzených farbách (vľavo), v nepravých farbách s blízkym infračerveným pásmom v červenom kanále (v strede) a v podobe normalizovaného vegetačného indexu (vpravo).



Obr. 6. Ukážka výsledného mračna bodov v prirodzených farbách z pozemného laserového skenovania štyroch lokalít v rámci záujmového územia pre jeden dátum. Biele body sú zachytené laserovým skenovaním ale v zákryte pre fotografiu.



Obr. 7. 3-D vektorový model budov západnej časti územia odvodený z dát získaných leteckým laserovým skenovaním a fotogrametriou zafarbený podľa nadmorskej výšky (Bp_v).



Obr. 8. Integrácia mračen bodov získaných ALS a TLS pred (vľavo) a po (vpravo) vzájomnej registrácii metódou Multi-station adjustment (MSA) na príklade Urbanovej veže v Košiciach.

Tab. 1. Príklad atribútov zaznamenaných pri terénnom prieskume mestskej zelene.

Id	Date	Lat	Long	Species	Health	Pheno	Cat	Function 1	Crown diameter (m)	Urbcat 1	Urbcat 2
0208	20160714	48°43,572	21°15,057	Acer negundo	Z	O	3	B	6	A	B
0209	20160714	48°43,562	21°15,048	Tilia cordata	Z	KK	3	B	5	A	B
0213	20160714	48°43,542	21°15,047	Acer saccharum	Z	O	3	B	9	A	B
0214	20160714	48°43,538	21°15,049	Fraxinus ornus	P25	O	3	B	7	A	B
0215	20160714	48°43,534	21°15,052	Tilia platyphyllos	Z	KK	3	B	13	A	B
0216	20160714	48°43,528	21°15,053	Acer platanoides	Z	O	3	B	15	A	B



Obr 9. Polohovo lokalizovaná stromová vegetácia na lokalite Městský park ako výsledok terénneho mapovania mestskej zelene s priradenými atribútmi v geodatabáze v tabuľke 4. Podkladom je vlastná letecká ortofotosnímka.

5 ZÁVER

Zeleň má v meste dôležitú funkciu pre zachovanie potrebnej kvality života človeka. Priestorová lokalizácia zelene, jej geometrické rozmery, štruktúra a spektrálne vlastnosti ovplyvňujú pôsobenie zelene na rôzne javy v urbánnom prostredí. V súčasnosti existujú a sú dostupné technológie umožňujúce zachytenie stavu mestskej zelene vo vysokom rozlíšení. Pozemné a letecké laserové skenovanie poskytuje masívne dáta vo vysokom priestorovom rozlíšení, na druhej strane multispektrálne satelitné skenovanie dodáva dáta vo vyššom spektrálnom a časovom rozlíšení. Tieto metódy možno využiť pre detailné skúmanie vplyvu vegetácie na klímu v meste. V predloženom príspevku sme predstavili metodický rámec monitorovania zelene v Košiciach, ktorý zachytáva jej geometrické a spektrálne vlastnosti na viacerých rozlišovacích úrovniach. Preukázali sme, že opakovaným pozemným laserovým skenovaním je možné s vysokou mierou presnosti zachytiť geometrickú štruktúru vegetácie a integrovať tieto dáta v rámci 3D modelu mesta. Vytvorená geodatabáza zahŕňajúca rôzne typy dát vrátane satelitných rastrových scén bude použitá v ďalšej fáze riešenia projektu. V tej sa sústredíme na odvodenie referenčných vegetačných metrík z TLS dát a ALS dát a budeme sledovať ich koreláciu s metrikami odvodenými z multispektrálnych záznamov družice Sentinel 2A. Zámerom bude kvantifikovať priepustnosť mestskej zelene pre slnečné žiarenie pomocou dát Sentinel 2A a validovať ju vzhľadom na priepustnosť určenú z podrobných TLS a ALS meraní. Na základe stanovenej priepustnosti vegetácie budeme môcť v ďalších krokoch modelovať množstvo slnečného žiarenia dopadajúceho na plochy tienené vegetáciou a tým budeme simulovať chladiaci efekt mestskej zelene.

6 POĎAKOVANIE

Výskum prezentovaný v tomto príspevku bol finančne podporený vládou Slovenskej republiky prostredníctvom zmluvy s ESA č. 4000117034/16/NL/NDe v rámci Plánu spolupracujúcich Európskych krajín (PECS). Pohľad a názory vyjadrené v príspevku nie je možné považovať za oficiálne stanovisko Európskej vesmírnej agentúry.



POUŽITÁ LITERATÚRA

Fogl, M., Moudrý, V., (2016) Influence of vegetation canopies on solar potential in urban environments, *Applied Geography*, 66(January 2016), pp. 73 až 80.

Gallay, M., Kaňuk, J., Hochmuth, Z., Meneely, J., Hofierka, J., Sedlák, V. (2015) Large-scale and high-resolution 3-D cave mapping by terrestrial laser scanning: a case study of the Domica Cave, Slovakia. *International Journal of Speleology*, 2015, 44, 3, pp. 277 až 291.

Lindberg, F., Grimmond, C.S.B. (2011) The influence of vegetation and building morphology on shadow patterns and mean radiant temperatures in urban areas: model development and evaluation. *Theoretical and Applied Climatology*, 105 (2011), pp. 1 až 13.

Hofierka, J., Kaňuk, J. (2009) Assessment of photovoltaic potential in urban areas using open-source solar radiation tools, *Renewable Energy*, 34 (10), pp. 2206 až 2214.

Hofierka, J., Zlocha, M. (2012) A New Solar Radiation Model for 3-D City Models. *Transactions in GIS* 16, pp. 681 až 690.

Hofierka, J., Šašák, J., Šupinský, J., Gallay, M., Kaňuk, J., Sedlák, V. (2017) 3D mapovanie krajiny pomocou pozemného a leteckého laserového skenovania. *Životné prostredie*, 51, 1, (v tlači).

Ratti, C., Baker, N., Steemers, K. (2005) Energy consumption and urban texture. *Energy and Buildings*, 37(7), pp. 762 až 776.

Smith, M.W. (2016) 2.1.5. Direct acquisition of elevation data: Terrestrial Laser Scanning. In: Clarke, L. (Ed.) *Geomorphological Techniques* (Online Edition). London: British Society for Geomorphology. http://www.geomorphology.org.uk/sites/default/files/chapters/2.1.5_TLS.pdf

Šúri, M., Hofierka, J. (2004) A new GIS-based solar radiation model and its application to photovoltaic assessments, *Transactions in GIS*, 8 (2), pp. 175 až 190.

Voogt, J., Oke, T. (1997) Complete urban surface temperatures. *Journal of Applied Meteorology*, 36 (9), pp. 1117 až 1132.

Tooke, T.R., Coops, N.C., Goodwin, N.R., Voogt, J.A. (2009) Extracting urban vegetation characteristics using spectral mixture analysis and decision tree classifications. *Remote Sensing of Environment*, 113(2), pp. 398 až 407.

Tooke, T.R., Coops, N.C., Voogt, J.A., Meitner, M.J. (2011) Tree structure influences on rooftop-received solar radiation. *Landscape and Urban Planning*, 102 (2), pp. 73 až 81.

Tooke, T.R., Coops, N.C., Christen, A., Gurtuna, O., Prévot, A., (2012) Integrated irradiance modelling in the urban environment based on remotely sensed data. *Solar Energy*, 86(10), pp. 2923 až 2934.