

3D mapovanie krajiny pomocou pozemného a leteckého laserového skenovania

Hofierka, J., Šašak, J., Šupinský, J., Gallay, M., Kaňuk, J., Sedlák, V.: 3D Landscape Mapping by Terrestrial and Airborne Laser Scanning. *Životné prostredie*, 2017, 51, 1, p. 21–27.

A growing amount of landscape data is collected by laser scanning technology (LiDAR) and increasingly used in environmental research. Topographic LiDAR is widely recognised as a very progressive method of 3D data collection with unprecedented measurement accuracy and spatial detail. This study describes specific issues in the collection of landscape data by terrestrial and airborne laser scanning technology. Herein, we compare datasets acquired by these methods in The Slovenský kras Mts. case study area ("The Slovak Karst Mts."), and we discuss associated technological, methodological and application issues. The integration of laser scanning data from both methods in one small region provides a unique chance to highlight the great potential of high-resolution 3D data in environmental studies.

Key words: terrestrial laser scanning, airborne laser scanning, LiDAR, mapping, karst landscape

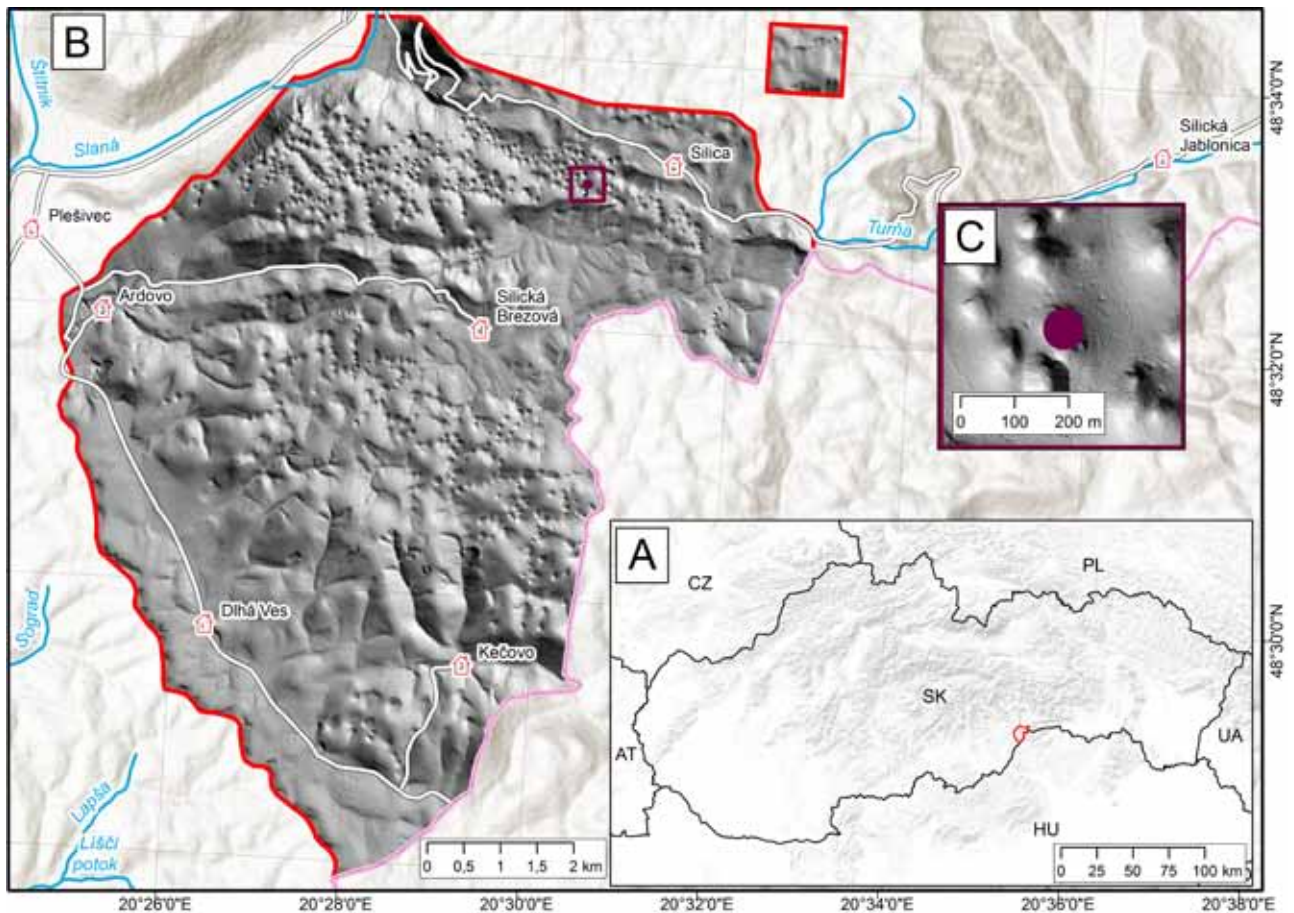
Metódy mapovania krajiny prešli za posledné desaťročia výraznými zmenami podmienenými predovšetkým technickým pokrokom a rozvojom geopriestorových technológií. V porovnaní s minulosťou sa v súčasnosti oveľa viac využívajú bezkontaktné metódy mapovania, akými sú napríklad letecká fotogrametria, radarové snímanie a laserové skenovanie, tiež známe ako LiDAR (*Light Detection And Ranging*). Bezkontaktný zber geodát súvisí s vyššou technologickou dostupnosťou, ako aj rozvojom metód spracovania, ktoré sa stali dostupné aj pre bežného používateľa geografických informačných systémov (GIS). Výhodou týchto metód je ich vysoká presnosť a tiež množstvo dát, ktoré zaznamenávajú prvky krajiny a ich vlastnosti s vysokou mierou detailnosti. V tejto oblasti v posledných rokoch zaregistrovalo obrovský rozmach laserové skenovanie (Vosselman, Maas, 2010). Ide o vysoko presnú a vysoko detailnú metódu mapovania 3D geometrie povrchu a objektov v krajine. V závislosti od spôsobu zberu rozoznávame letecké – ALS (*Airborne Laser Scanning*) a pozemné (terestrické) laserové skenovanie – TLS (*Terrestrial Laser Scanning*).

V súčasnosti sa objavuje čoraz viac aplikácií laserových skenovacích metód v oblasti mapovania krajiny. Na Slovensku bola častou bariérou vysoká cena laserových dát, preto v porovnaní s inými vyspelými krajinami je v oblasti výskumu využívania tohto typu dát menej skúseností. V minulosti sa táto technológia u nás využívala najmä v komerčných projektoch spoločností spravujúcich prenosové siete (plynovody, ropovody, elektrizačnú sústavu) alebo v digitalizácii historických stavieb na zachovanie kultúrneho dedičstva.

Cieľom tohto príspevku je demonštrovať metódu laserového skenovania (leteckého aj pozemného) na

malej časti Silickej planiny v Slovenskom krase (obr. 1) a na základe dosiahnutých výsledkov poukázať na možnosti využitia tejto metódy pri detailnom 3D mapovaní krajiny. Výber územia súvisí s dlhoročnými výskumnými aktivitami a bázou geografických dát z oblasti Slovenského krasu, v ktorej boli realizované viaceré výskumné aktivity pracovníkov Ústavu geografie Prírodovedeckej fakulty Univerzity Pavla Jozefa Šafárika v Košiciach. Navyše krasová krajina je veľmi vhodným príkladom reliéfu s komplikovanou geometrickou štruktúrou s množstvom menších či väčších povrchových a podpovrchových geomorfologických foriem, nevynímajúc rôzne skalné previsy, kde nie je možné uplatniť prístup na modelovanie reliéfu založený na bivariačnej funkcii $z = f(x, y)$. Geometrickej parametrizácii a kvantitatívnej analýze povrchových krasových foriem, najmä závrto, sa už v minulosti čiastočne aj na tomto území venovali napr. Hochmuth (2004), Barabas et al. (2010), Gessert (2016). Ich metodický postup mapovania krasovej krajiny spočíval predovšetkým v terénnom výskume, mapovaní, pozemnom zbere dát založených na tachymetrii a kartometrických meraniach, z ktorých boli odvodzované viaceré geometrické parametre závrto. Tieto metódy sú však časovo náročné a neumožňujú presne zachytiť 3D geometriu geomorfologických foriem. V posledných rokoch sa aj od slovenských autorov objavilo niekoľko prác, ktoré využívajú metódy laserového skenovania na mapovanie povrchových a aj podpovrchových foriem krasového reliéfu vo vysokom priestorovom rozlíšení (Bella a kol., 2015; Hofierka a kol., 2016; Gallay et al., 2015; Gallay et al., 2016a).

Laserové skenovanie v porovnaní s klasickými metódami umožňuje zachytiť celú 3D geometriu reliéfu



Obr. 1. Poloha Silickej planiny ako záujmového územia mapovaného leteckým laserovým skenovaním v rámci Slovenska (A), zobrazeného formou tieňovaného reliéfu (B) a záujmovej lokality zavrú skenovanej pozemným laserovým skenovaním (C)

a tiež objektov na ňom s vysokou presnosťou a za relatívne krátky čas, čím sa stáva efektívnym nástrojom mapovania nielen krasovej krajiny. Technologický princíp laserového skenovania založený na vysielaní laserového žiarenia a prijímaní jeho odrazu je pri ALS aj TLS rovnaký. Avšak samotný zber dát a ich spracovanie sa pri oboch metódach odlišujú, čo umožňuje kombinovať a porovnávať získané dátové súbory.

Letecké laserové skenovanie

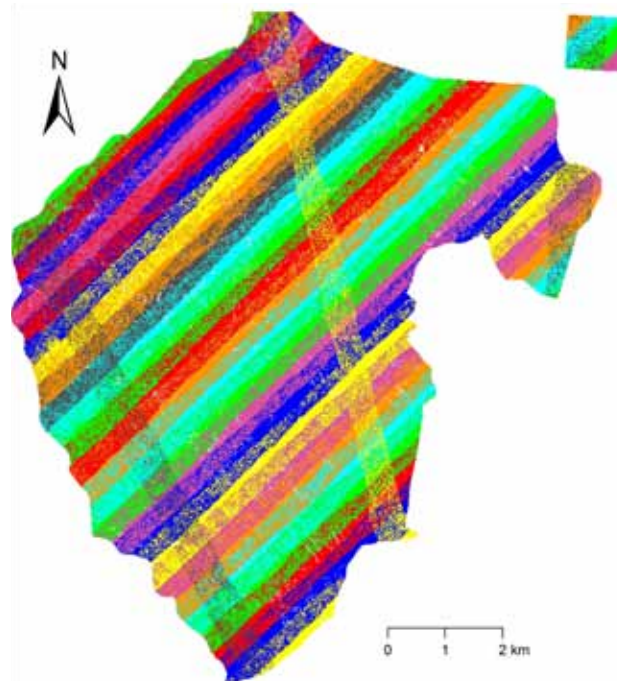
Letecké laserové skenovanie (ALS) sa radí medzi aktívne metódy diaľkového prieskumu Zeme (DPZ), čo znamená, že na detekciu objektov využíva vlastný zdroj elektromagnetického žiarenia (Vosselman, Mass, 2010). Vysielané laserové žiarenie, zväčša v blízkej infračervenej alebo viditeľnej časti spektra, sa vyznačuje vysokým stupňom koherencie, čoho výsledkom je úzky zväzok lúčov s veľmi malým rozptylom. Samotný princíp laserového skenovania spočíva v emitovaní laserového pulzu zo zariadenia pripevneného na pohyblivom nosiči (napr. lietadle) smerom k objektu,

v odraze pulzu od objektu a v následnom prijímaní odrazeného pulzu (žiarenia) skenerom (Vosselman, Mass, 2010; Gallay, 2013). Na základe určenia časového rozdielu medzi vyslaním pulzu a zaznamenaním jeho časti odrazenej od objektu je možné vypočítať vzdialenosť medzi objektom a skenerom. Presné stanovenie 3D polohy miesta odrazu laserového pulzu sa dosiahne simultánnym monitorovaním polohy skenera a jeho rotácií pozdĺž osí x , y a z prostredníctvom inerciálnej meracej jednotky (*Inertial Measurement Unit*, IMU) a umiestnením v geodetickom súradnicovom systéme pomocou globálnych navigačných satelitných systémov (*Global Navigation Satellite Systems*, GNSS). Vysoká koherencia laserového žiarenia umožňuje osvetliť malú plochu povrchu objektov aj z relatívne veľkej vzdialenosti, čo spolu s vysokou frekvenciou emitovania laserového žiarenia (niekoľko desiatok až stoviek tisíc pulzov za sekundu) umožňuje detailne zaznamenať geometrickú štruktúru objektov v podobe hustého bodového poľa, ktoré sa nazýva mračno bodov. Hustota bodov závisí od samotného nastavenia frekvencie zariadenia, od uhla snímania a taktiež od výšky a rých-

losti letu nosiča (Ackermann, 1999; Vosselman, Maas, 2010). V závislosti od priepustnosti povrchu krajiny pokrývky snímaného územia sa energia jedeného laserového pulzu môže odraziť od viacerých objektov, napr. od vrcholov stromu, jeho konárov, kríku pod ním a napokon od terénu, a tak zachytiť ich výšku. Na základe poradia odrazených častí pulzu (*echo*, *return*) možno klasifikovať výsledné mračno bodov na body odrazené od terénu (posledný odraz) a body odrazené od objektov na teréne (prvý a ďalšie odrazy) a použiť ich na tvorbu digitálnych výškových modelov terénu a povrchu krajinného krytu. Polohová presnosť nameraných dát (bodov), je ovplyvnená rôznymi faktormi, najmä výškou letu nad povrchom, presnosťou GNSS prijímača, typom krajiny pokrývky, uhlom medzi povrchom a vyslaným lúčom. Spravidla však štandardná odchýlka merania nepresahuje niekoľko decimetrov, pričom vo vertikálnom smere je menšia ako v horizontálnom smere (Vosselman, Maas, 2010). Štandardom pre výmenu lidarových dát je binárny údajový formát LAS (Graham, 2012). Každý odraz laserového pulzu je reprezentovaný súradnicami x , y a z hodnotou intenzity odrazeného žiarenia, GNSS časom prijatia odrazu a ďalšími atribútmi.

Pozemné laserové skenovanie

Pozemné laserové skenovanie je analógiou leteckého laserového skenovania, a preto preň platia podobné princípy záznamu ako u vyššie spomínaného ALS. Pri pozemnom skenovaní je skener umiestnený na nehybnom statíve, pričom taktiež zaznamenáva povrch objektov v okolí svojej pozície v podobe mračna bodov. Poloha bodu v priestore vzhľadom k zariadeniu sa určuje na základe uhlov natočenia skenera (horizontálne a vertikálne) a vzdialenosti bodu, ktorá sa určí na základe meraného času, za aký sa emitovaný laserový lúč vrátil od odrazeného povrchu späť k zariadeniu. TLS umožňuje panoramatické (360°) skenovanie v horizontálnom smere, vo vertikálnom smere majú pozemné skenery zvyčajne rozsah od 60° do 150°. Pri skenovaní z jednej pozície vznikajú v dôsledku zákrytov dátové tieň. Možno im zamedziť premiestňovaním skenera a skenovaním z viacerých pozícií (stanovísk). Jednotlivé mračná bodov je následne potrebné vzájomne zorientovať pomocou identických bodov, plôch alebo pomocou merania polohy stanovísk skenera. Tento proces sa môže realizovať automaticky alebo manuálne. Pri TLS sa dosahuje veľmi presné zaznamenanie priestoru s odchýlkou pod 1 cm, pričom pri vysokej hustote bodov je táto presnosť na úrovni niekoľkých milimetrov až centimetrov (Vosselman, Mass, 2010; Gallay et al., 2015; Smith, 2016). Získané mračno bodov zvyčajne obsahuje pre každý bod v matici x , y a z súradnicu a hodnotu intenzity odrazeného laserového lúča. Možný je aj záznam panoramatickej fotografie skenovanej oblasti na zafarbenie bodov reálnymi farbami.



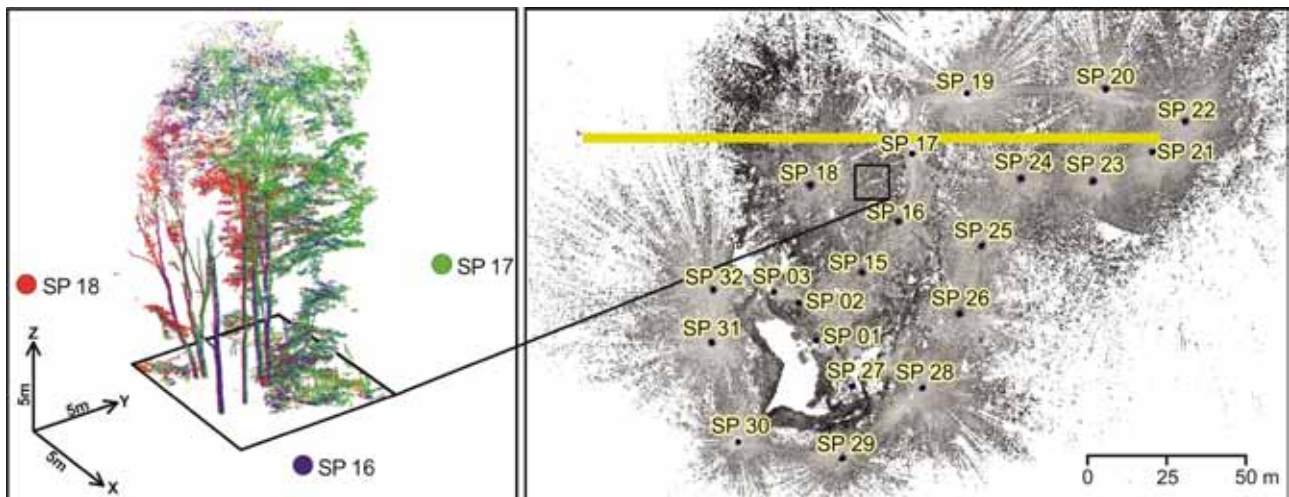
Obr. 2. Rozdelenie mračna bodov ALS do letových pásov na záujmovom území Silickej planiny a záujmovej lokality závrto (obrázok vpravo hore)

Laserové skenery sa dajú charakterizovať primárnymi vlastnosťami, akými sú maximálny a minimálny rozsah, presnosť, zorné pole, rýchlosť, vlnová dĺžka, a sekundárnymi vlastnosťami, medzi ktoré patria rozmery, hmotnosť, odolnosť, napájanie, užívateľské rozhranie, úložný priestor, prenos dát, maximálne hladiny prevádzkovej teploty a vlhkosti a iné (Gallay et al., 2015).

Na mapovaných lokalitách sa zaznamenáva niekoľko desiatok až stoviek skenovacích pozícií v závislosti od veľkosti územia, hustoty objektov a žiadanej detailnosti. Pri pozemnom laserovom skenovaní je preto dôležité určenie polohy na pozíciu skenera tak, aby sa minimalizovali zákryty, vznikalo dostatočné prekrytie s nasledujúcou pozíciou a počet pozícií bol čo najnižší (Gallay et al., 2015; Smith, 2016).

Metodika mapovania pomocou ALS a TLS

Mapovanie krajiny metódou ALS spočíva v snímaní územia po vopred určenej letovej dráhe. Tá sa po skončení skenovacej misie rozdelí na niekoľko letových pásov obsahujúcich zamerané body. Na základe dát z GNSS prijímača, IMU a pozemných referenčných staníc je potrebné rekonštruovať dráhu skenera, čiže určiť priestorové súradnice trajektórie skenera a jeho rotácie. Na základe trajektórie sa spracujú jednotlivé letové pásy. Napriek presnému výpočtu polohy skenera dochádza vplyvom vibrácií počas lietania ku vnášaniu



Obr. 3. Ukážka registrovaného bodového poľa zosnímaného metódou TLS z troch skenovacích pozícií na záujmovej lokalite závrtnu Silickej planiny

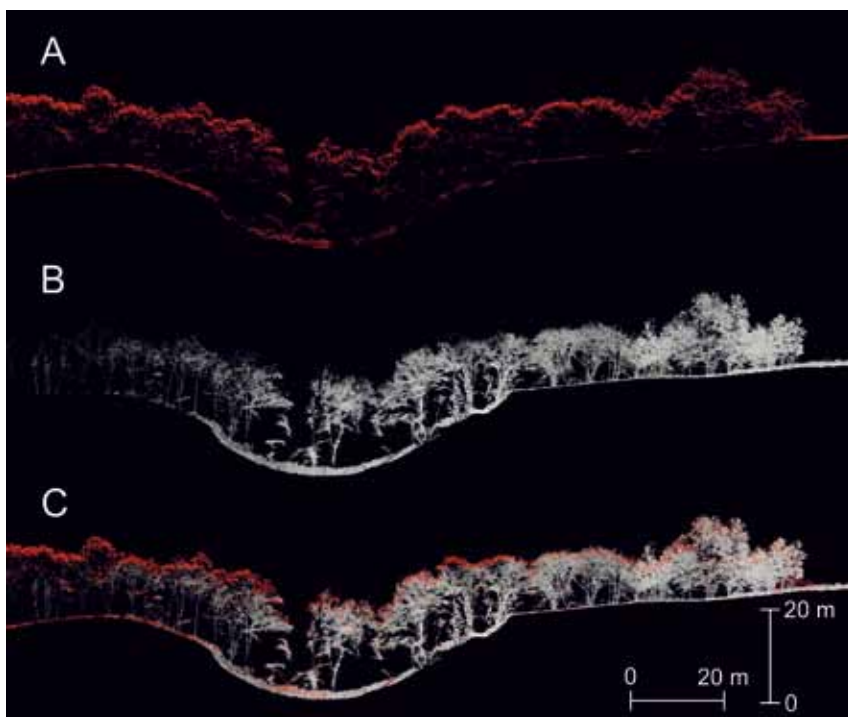
Vysvetlivky: Obrázok vľavo: SP 16 (modrá farba) – bodové pole skenovacej pozície č. 16; SP 17 (zelená farba) – bodové pole skenovacej pozície č. 17; SP 18 (červená farba) – bodové pole skenovacej pozície č. 18; Obrázok vpravo: vyznačený priečny profil (plná vodorovná línia) na záujmovej lokalite závrtnu

chýb. To neumožňuje určiť trajektóriu tak presne, aby sa jednotlivé mračná bodov z letových pásov vzájomne prekrývali. Z tohto dôvodu je nutné vykonať vyrovnávanie letových pásov. Pomocou špecializovaného softvéru je možné dosiahnuť polohovú presnosť jednotlivých pásov na niekoľko milimetrov. Cez záujmové územie,

na ktorom demonštrujeme použitie metód laserového skenovania, prechádza iba jeden letový pás. Avšak záujmová lokalita je súčasťou Silickej planiny, ktorá bola v rámci výskumného projektu *Nové metódy priestorového modelovania pomocou laserového skenovania a 3D GIS-u* zmapovaná metódou ALS v 28 letových pásoch, ktoré boli vzájomne vyrovnané (obr. 2). Podrobný metodický postup spracovania dát ALS z územia Silickej planiny je uvedený v práci Hofierku et al. (2017).

Mapovanie metódou TLS bolo realizované iba na uvedenom záujmovom území, kde bolo vytvorených 22 samostatných mračen bodov z rovnakého počtu skenovacích pozícií. Na obr. 3 je ukážka bodového poľa troch registrovaných skenovacích pozícií, kde možno pozorovať objekty tvorené kombináciou mračen bodov z rôznych uhlov snímania. Vegetácia sa nachádza ideálne uprostred trojuholníka zosnímaného pomocou skenera, takže v danej oblasti je minimálny počet zákrytov, ktoré vznikajú z tienenia objektov. Na eliminovanie zákrytov, ktoré vznikajú kvôli vertikálnym objektom v krajine, je potrebné dôkladne naplánovať umiestnenie skenovacích pozícií, resp. zvýšiť ich počet.

Mračná bodov z jednotlivých skenovacích pozícií sa spájajú do



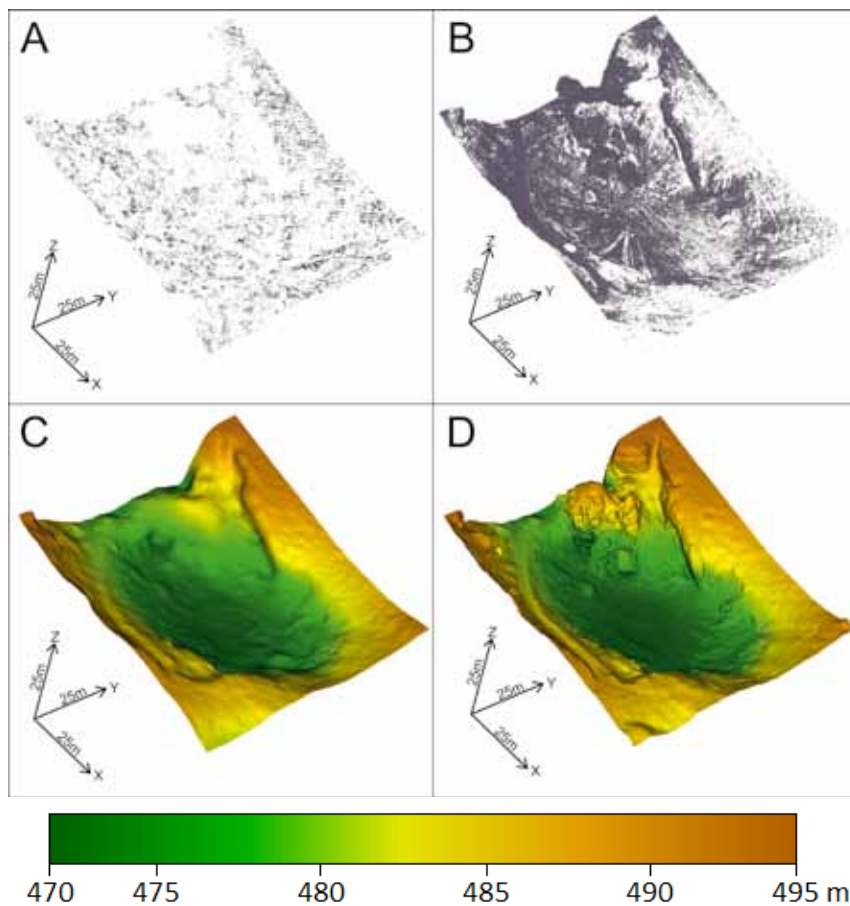
Obr. 4. Priečny profil na záujmovej lokalite závrtnu Silickej planiny v smere východ – západ

Vysvetlivky: A – mračno bodov ALS; B – mračno bodov TLS; C – integrácia ALS a TLS meraní

spoločného bodového poľa skenovanej lokality v procese registrácie. Na manuálnu registráciu sú potrebné aspoň tri identické body na oboch súčasne registrovaných skenovacích pozíciách. Väčšinou sa využíva automatická registrácia pozícií podľa známych umiestnení skenera, napríklad pomocou GNSS, alebo poloautomatická registrácia pomocou referenčných geometrických objektov (guľa, terčik). Skener zvyčajne disponuje GNSS prijímačom, ktorého polohová presnosť postačuje na uľahčenie vzájomnej registrácie skenovacích pozícií. Na precíznejšiu registráciu je potrebné manuálne definovať pozíciu jednotlivých mračen bodov vzhľadom k vybranému referenčnému mračnu, ktorého poloha je statická. Po približnom definovaní pozície mračna bodov bola aplikovaná metóda automatickej vzájomnej registrácie pomocou nástroja MSA (*Multi Station Adjustment* – polohové vyrovanie viacerých pozícií), ktorá registruje bodové pole na základe vyhľadávania zhodných plôch na seba nadväzujúcich pozícií. Tým bola dosiahnutá štandardná odchýlka vzájomnej registrácie mračen bodov na hodnotu do 7 mm, čo považujeme v prípade prírodnej krajiny s vegetáciou za postačujúce.

Integrácia a porovnanie dátových vrstiev ALS a TLS

Dáta z ALS a TLS boli registrované v súradnicovom systéme S-JTSK (Systém jednotnej trigonometrickej siete katastrálnej) a vo výškovom systéme Bpv (Balt po vyrovaní). Integráciu dát z ALS a TLS do jednej geodatabázy demonštrujeme na profile závrty v skúmanom území (obr. 4). Metódou ALS dokážeme efektívne zmapovať najmä povrch krajinného krytu, v tomto prípade vegetácie, a čiastočne aj samotný reliéf. Problematickými prvkami sú napr. skalné previsy, od ktorých sa laserové žiarenie odrazí len zriedka. Tiež možno pozorovať výrazný nepomer v hustote bodov získaných porovnanými metódami. Letecké skenovanie sa využíva najmä na plošne veľkých územiach, kde je použitie pozemného skenera neefektívne a problematické najmä z hľadiska času, objemu dát a nárokov na úložnú kapacitu, spracovanie dát a pod.



Obr. 5. Porovnanie hustoty lidarových dát a úrovne detailu digitálnych modelov terénu (DTM) vytvorených z týchto dát na záujmovej lokalite závrty Silickej planiny

Vysvetlivky: A – mračno bodov ALS; B – mračno bodov TLS; C – DTM vytvorený z dát ALS; D – DTM vytvorený z dát TLS

Z jednotlivých dátových súborov sme vybrali bodové polia zachytávajúce záujmovú lokalitu závrty. Pri ALS sme na tvorbu digitálneho modelu reliéfu (DMR) použili klasifikované body posledného odrazu od terénu. Na tvorbu DMR z dát TLS sme použili redukované bodové pole filtrované podľa metodologického postupu založeného na rozdelení priestoru na hierarchickú stromovú štruktúru s voxelmi (segmentmi) v tvare kocky s veľkosťou strany 0,2 m. Priestor celého mračna bodov je teda členený stromovou voxelovou štruktúrou, pričom každý voxel obsahujúci viac ako jeden bod je rozdelený na osem menších voxelov, pokiaľ voxely nedosiahnu veľkosť hrany 0,2 m. V priestore vymedzenom touto kockou sa ponechá jeden bod z pôvodného mračna bodov, ktorý je najbližšie ku geometrickému stredu kocky. Výsledný DMR bol vytvorený pomocou funkcie *Poisson*, implementovanej v programe *Cloud Compare* (Kazhdan et al., 2006). Vyššia hustota bodového poľa TLS zaručuje lepšiu kvalitu výsledného modelu. To umožňuje aplikovať operácie priestorových ana-

Tab. 1. Porovnanie metód leteckého (ALS) a pozemného/terestrického (TLS) laserového skenovania

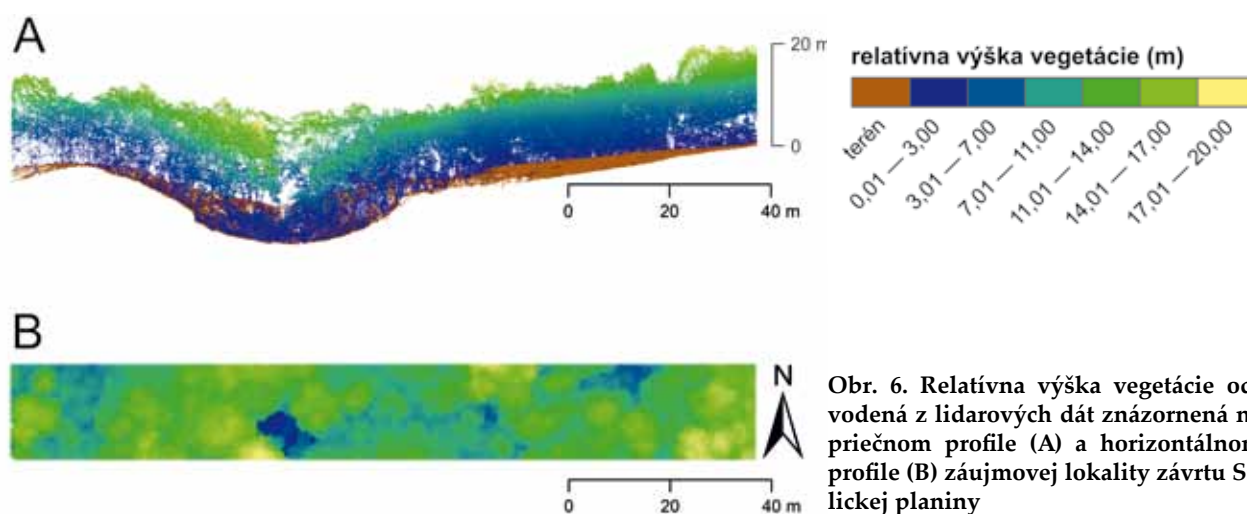
Vybrané ukazovatele	ALS	TLS
Celkový počet zaznamenaných bodov	2 000 000 000	300 000 000
Počet bodov na tvorbu DMR	14 959	667 269
Použitý počet letových pásov ALS, resp. pozícií TLS	1	22
Celková rozloha mapovaného územia	68 km ²	0,03 km ²
Plocha porovnávaného územia	0,008 km ²	0,008 km ²
Parameter <i>Poisson octree depth</i> na tvorbu DMR	12	12
Počet trojuholníkov DMR	91 652	333 299
Celková presnosť merania (polohová/výšková)	0,09/0,06 m	0,008/0,006 m

lých a modelovania procesov v krajine s veľmi vysokým priestorovým detailom, ktorý pri použití tradičných dát nebol možný.

Na druhej strane dáta z TLS sú často redundantné, nehomogénne priestorovo distribuované, čím vznikajú nároky na ďalšie spracovanie a optimalizáciu priestorového rozloženia mračna bodov. Navyše, pre väčšinu aplikácií postačuje aj bodové pole získané pomocou ALS. Výhoda ALS je najmä v tom, že v krátkom čase je možné zachytiť väčšie územie s dostatočnou hustotou výsledného bodového poľa v porovnaní s TLS, ktorá je potrebná na tvorbu digitálnych modelov krajinných povrchov. Pri leteckom skenovaní sú letové dráhy s mračnami bodov registrované na základe ich známych priestorových súradníc, čo je výrazne jednoduchšie ako pri pozemnom skenovaní, kde je potrebné registrovať všetky pozície samostatne a vo viacerých krokoch. Čas, potrebný na spracovanie dát, je pri oboch metódach porovnateľný, avšak pri TLS sa pracuje s priestorovo menšími, no detailnejšími mračnami bodov, ktoré treba v záverečnom štádiu riediť kvôli hardvérovým problémom so spracovaním extrémne objemných dát. Porovnanie oboch metód pre malé územie s rozlohou 8 000 m² je prezentované na

obr. 5 a v tab. 1. Ak by sme pomocou TLS chceli zmapovať podobne veľké územie ako pri ALS (68 km²) a v rovnakej kvalite, trvalo by to viac ako šesť rokov bez spracovania dát a veľkosť digitálneho súboru vytvoreného mračna bodov by bola niekoľko desiatok terabajtov. Pre veľké územia je preto TLS vhodné len ako doplnok k leteckému skenovaniu, ktorým možno zachytiť aj geometricky komplikovanejšie, resp. používateľom špecifikované formy reliéfu. Cenovo je jeden mapovací deň pomocou ALS finančne nákladnejší, no plochy ním zachytené sú neporovnateľne rozsiahlejšie. Pri podrobnom mapovaní malých území (max. niekoľko km²) je v súčasnosti možné použiť aj bezpilotné letecké zariadenia (UAV) vybavené laserovým skenerom, čo ponúka nové možnosti pri operatívnom zbere 3D dát o krajine vo vysokom rozlíšení a s vysokou mierou presnosti (Gallay et al., 2016b). Filtračné techniky umožňujú z lidarových dát odvodit' samostatne body reprezentujúce reliéf a vegetáciu či iné objekty na reliéfe, čo je možné efektívne využiť napríklad pri analýze výšky vegetačnej pokrývky (obr. 6).

* * *



Obr. 6. Relatívna výška vegetácie odvodená z lidarových dát znázornená na priečnom profile (A) a horizontálnom profile (B) záujmovej lokality závrty Siclickej planiny

Laserové skenovanie je inovatívna metóda mapovania krajiny a jej prvkov, či už prírodných alebo antropogénnych. V tomto príspevku sme sa zamerali na zber, spracovanie a porovnanie dát získaných metódami leteckého a pozemného laserového skenovania. Technológia zberu dát vychádza pri oboch metódach z rovnakých princípov. Rozdiel je najmä v metódach zberu dát, ktorý je pri leteckom skenovaní vertikálny a pri pozemnom horizontálny. Rozdiel v oboch technikách skenovania spočíva aj v pohyblivosti skenovacieho zariadenia, ktoré je pri ALS dynamické a pri TLS statické. Spracovanie dát je založené na vzájomnej registrácii letových pásov alebo skenovacích pozícií, čím dosiahneme spojenie čiastkových mračien bodov do jedného dátového súboru. Porovnaním týchto metód sme zistili, že metóda ALS je vhodnejšia na mapovanie veľkých území a pre aplikácie, kde nie je potrebná vysoká úroveň detailu výstupných dát. Naopak, pomocou TLS je vhodnejšie mapovať rozlohou menšie územia, kde sú však nároky na detailnosť podstatne vyššie. Limitujúcim prvkom oboch porovnávaných metód je krajinný kryt (vegetácia, budovy a pod.), ktorý pri skenovaní spôsobuje zákryty. Ideálnym riešením pre menšie územia je preto kombinácia ALS a TLS, čím zachytíme takmer reálny 3D obraz krajiny štruktúry.

Tento príspevok je súčasťou riešenia projektov podporených Agentúrou na podporu výskumu a vývoja č. 0176-12 a Vedeckou grantovou agentúrou MŠVVaV a SAV č. 1/0474/16.

Literatúra

- Ackermann, F.: Airborne Laser Scanning – Present Status and Future Expectations. *Photogrammetry and Remote Sensing*, 1999, 54, p. 64 – 67.
- Barabas, D., Gallay, M., Petrvalská, A.: The Use and Importance of Digital Geomorphometry for Understanding the Development of the Superficial Depression Forms in the Area of Palanta (Jasovská Plateau). *Slovenský kras: Acta Carsologica Slovaca*, 2010, 48, 2, p. 253 – 261.
- Bella, P., Littva, J., Pukanská, K., Gašinec, J., Bartoš, K.: Využitie terestrického laserového skenovania pri skúmaní štruktúrno-geologických diskontinuit a morfológie jaskýň: príklad jaskyne Dúpnica v Západných Tatrách. *Acta Geologica Slovaca*, 2015, 7, s. 93 – 102.
- Gallay, M.: Section 2.1.4: Direct Acquisition of Data: Airborne Laser Scanning. In: Clarke, L. (ed.): *Geomorphological Techniques* (Online Edition). London: British Society for Geomorphology, 2013. (http://www.geomorphology.org.uk/sites/default/files/geom_tech_chapters/2.1.4_LiDAR.pdf)
- Gallay, M., Eck, C., Zraggen, C., Kaňuk, J., Dvorný, E.: High Resolution Airborne Laser Scanning and Hyperspectral Imaging with a Small UAV Platform. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2016b, XLI-B1, p. 823 – 827.
- Gallay, M., Hochmuth, Z., Kaňuk, J., Hofierka, J.: Geomorphometric Analysis of Cave Ceiling Channels Mapped with 3D Terrestrial Laser Scanning. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2016a, 20, p. 1827 – 1849.
- Gallay, M., Kaňuk, J., Hochmuth, Z., Meneely, J., Hofierka, J., Sedlák, V.: Large-Scale and High-Resolution 3D Cave Mapping by Terrestrial Laser Scanning: A Case Study of the Domica Cave, Slovakia. *International Journal of Speleology*, 2015, 44, 3, p. 277 – 291.
- Gessert, A.: Geomorphology of the Slovak Karst (Eastern Part). *Journal of Maps*, 2016, 12, 1, p. 285 – 288.
- Graham, L.: The LAS 1.4 Specification. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 2012, 78, 2, p. 93 – 102.
- Hofierka, J., Gallay, M., Kaňuk, J., Šašak, J.: Modelling Karst Landscape with Massive Airborne and Terrestrial Laser Scanning Data. In: Ivan, I., Singleton, A., Horák, J., Inspektor, T. (eds.): *The Rise of Big Spatial Data, Lecture Notes in Geoinformation and Cartography*. Cham: Springer International Publishing, 2017, p. 141 – 154.
- Hofierka, J., Hochmuth, Z., Kaňuk, J., Gallay, M., Gessert, A.: Mapovanie jaskyne Domica pomocou terestrického laserového skenovania. *Geografický časopis*, 2016, 68, 1, p. 25 – 38.
- Hochmuth, Z.: Rozdiely v intenzite povrchového skrasovatenia na jednotlivých planinách Slovenského krasu. *Geomorphologia Slovaca*, 2004, 4, 2, s. 30 – 35.
- Kazhdan, M., Bolitho, M., Hoppe, H.: Poisson Surface Reconstruction. In: Sheffe, A., Polthier, K.: *Symposium on Geometry Processing Cagliari, Sardinia, Italy: ACM SIGGRAPH and Eurographics Association*, 2006, p. 61 – 70.
- Smith, M. W.: 2.1.5. Direct Acquisition of Elevation Data: Terrestrial Laser Scanning. In: Clarke, L. (ed.): *Geomorphological Techniques* (Online Edition). London: British Society for Geomorphology, 2016. (http://www.geomorphology.org.uk/sites/default/files/chapters/2.1.5_TLS.pdf)
- Vosselman, G., Maas, H.-G.: *Airborne and Terrestrial Laser Scanning*. Dunbeath, UK: Whittles Publishing, 2010, 336 p.

prof. Mgr. Jaroslav Hofierka, PhD., jaroslav.hofierka@upjs.sk

Mgr. Ján Šašak, jan.sasak@upjs.sk

Mgr. Jozef Šupinský, jozef.supinsky@upjs.sk

doc. Mgr. Michal Gallay, PhD., michal.gallay@upjs.sk

RNDr. Ján Kaňuk, PhD., jan.kanuk@upjs.sk

prof. Ing. Vladimír Sedlák, PhD., vladimir.sedlak@upjs.sk

Ústav geografie Prírodovedeckej fakulty Univerzity Pavla Jozefa Šafárika v Košiciach, Jesenná 5, 040 01 Košice