

## MODELOVANIE VYSOKOHORSKÉHO RELIÉFU POUŽITÍM ÚDAJOV POZEMNÉHO LASEROVÉHO SKENOVANIA A BLÍZKEJ LETECKEJ FOTOGRAMETRIE

Ján ŠAŠAK<sup>1</sup>, Michal GALLAY<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Ústav geografie, Prírodovedecká fakulta, Univerzita Pavla Jozefa Šafárika v Košiciach, Jesenná 5, 040 01, Košice, Slovenská republika

*jan.sasak@upjs.sk, michal.gallay@upjs.sk*

### Abstrakt

Vysokohorský reliéf sa vyznačuje výskytom špecifických geomorfologických foriem rôznych veľkostí a tvarov. Na rozdiel od nížinné či vrchovinného typu reliéfu sú tu časté povrchy s výraznou vertikálnou členitosťou. Príkladom takéhoto typu reliéfu je Malá studená dolina vo Vysokých Tatrách. Pri mapovaní vo vysokom priestorovom rozlíšení sa v súčasnosti používajú najmä metódy na báze pozemného laserového skenovanie a fotogrametrie. Pozemné laserové skenovanie má vysokú polohovú presnosť a priestorové rozlíšenie, avšak pri mapovaní vznikajú tzv. diery v dátach vplyvom zákrytov terénu. Teda produktom je vysokodetailné mračno bodov, avšak v niektorých miestach je distribúcia bodov nehomogénna. Práve tieto miesta sú z hľadiska interpolačných metód kritické, nakoľko pri takomto type terénu je zmena priebehu povrchu veľmi vysoká a teda nedá sa vždy uplatniť princíp priestorovej autokorelácie použitím deterministických interpolačných metód. Naopak, blízka fotogrametria na báze bezpilotných leteckých zariadení (UAV) umožňuje mapovať terén komplexnejšie a výstupom sú dáta s homogénnou priestorovou distribúciou. Nevýhoda tejto metódy je hlavne v tom, že polohová presnosť a detailnosť je závislá na viacerých faktoroch, ako je rozlíšenie kamery, výška letu, svetelné podmienky a pod. V predkladanom príspevku sa venujeme modelovaniu vysokohorského reliéfu kombináciou dát získaných pozemným laserovým skenovaním a blízkej fotogrametrie na báze UAV. Selektívnou kombináciou týchto dát je možné generovať homogénne distribuované mračno bodov, čím eliminujeme vznik umelých povrchov vplyvom interpolačných metód. Výsledkom sú modely terénu s vysokým priestorovým rozlíšením.

### Abstract

The alpine terrain is characterized by the occurrence of specific geomorphological forms of different sizes and shapes. Unlike the lowland or highland type of terrain, there are frequent the surfaces with a distinct vertical segmentation. An example of such terrain is Malá Studená dolina valley in the High Tatras. In high resolution spatial mapping, methods based on terrestrial laser scanning and photogrammetry are currently used. Terrestrial laser scanning has a high positional accuracy and spatial resolution, but there may arise voids in data because of terrain covers. Thus, the product is a high-density point cloud, but in some places the distribution of points is inhomogeneous. These sites are critical for interpolation methods, because in this type of terrain the change in the course of the surface is very high and the principles of spatial autocorrelation can not always be applied by using deterministic interpolation methods. Conversely, close-range photogrammetry based on the unmanned aerial vehicles (UAV) allows a more complex terrain mapping and outputs are homogeneous spatial distributed data. The disadvantage of this method is mainly that position accuracy and detail are dependent on several factors, such as camera resolution, flight height, lighting conditions, and so on. In the present paper, we are focusing on the modeling of alpine terrain by combining data obtained by terrestrial laser scanning and close-range photogrammetry based on the UAV. Selective combination of these data allows to generate a homogeneously distributed point cloud, thereby we eliminate the generating of artificial surfaces by interpolation methods. The results are digital terrain models at high spatial resolution.

**Klíčová slová:** vysokohorský reliéf, pozemné laserové skenovanie, letecká fotogrametria, modelovanie reliéfu

**Keywords:** alpine terrain, terrestrial laser scanning, airborne photogrammetry, terrain modeling

## 1 ÚVOD

Zemský povrch a objekty na ňom sú v prostredí GIS často vyjadrované vo forme rastrových digitálnych modelov (Yue et al., 2007). Najdôležitejším atribútom každého rastrového digitálneho modelu je úroveň detailnosti, teda priestorové rozlíšenie, v ktorom je daný jav znázornený (Li et al., 2004). Túto vlastnosť digitálnych modelov ovplyvňujú jednak parametre zvolenej interpolačnej metódy, ale tiež kvalita vstupných údajov. V súčasnosti stále viac preferovanými vstupnými údajovými vrstvami sú tzv. mračná bodov reprezentujúce 3D geometrickú štruktúru zemského povrchu a objektov na ňom (Hofierka et al., 2017). Na získanie mračna bodov sú často využívanými mapovacími metódami pozemné laserové skenovanie (TLS) a blízka letecká digitálna fotogrametria na báze malých bezpilotných zariadení (UAV) s funkciou rekonštrukcie štruktúry povrchu z obrazového záznamu (SfM- Structure from Motion). Týmito metódami možno mapovať krajinu vo vysokom detaile, t.j. s presnosťou na úrovni niekoľkých centimetrov (UAV-SfM) až milimetrov (TLS) (Clapuyt et al., 2016). Pozemný laserový skener emituje laserový lúč v subhorizontálnom smere, čo pri mapovaní komplikovaných území (lesy, vysokohorská krajina, zastavané územia) spôsobuje vznik zákrytov. Eliminovať množstvo a veľkosť zákrytov možno mapovaním daného územia z viacerých pozícií, prípadne mapovaním pomocou UAV zariadení, ktoré zachytia stav daného územia z vertikálnej perspektívy. Kombináciou TLS a UAV-SfM dát možno získať relatívne homogénne bodové pole s minimálnym počtom zákrytov (Xu et al., 2014). Avšak, použitie dvoch rôznych metód na získanie dát môže kvôli rôznej presnosti a hustote spôsobiť komplikácie pri ich vzájomnej integrácii. Výhody a nevýhody kombinácie TLS a UAV-SfM opisuje Wilkinson et al. (2016). Pri modelovaní terénu z údajov zaznamenaných len jednou metódou vznikajú vplyvom interpolačnej funkcie umelé plochy na miestach, ktoré neboli zmapované, resp. pokryté údajmi. Z toho dôvodu je pri modelovaní terénu potrebné použiť údaje z oboch mapovacích metód.

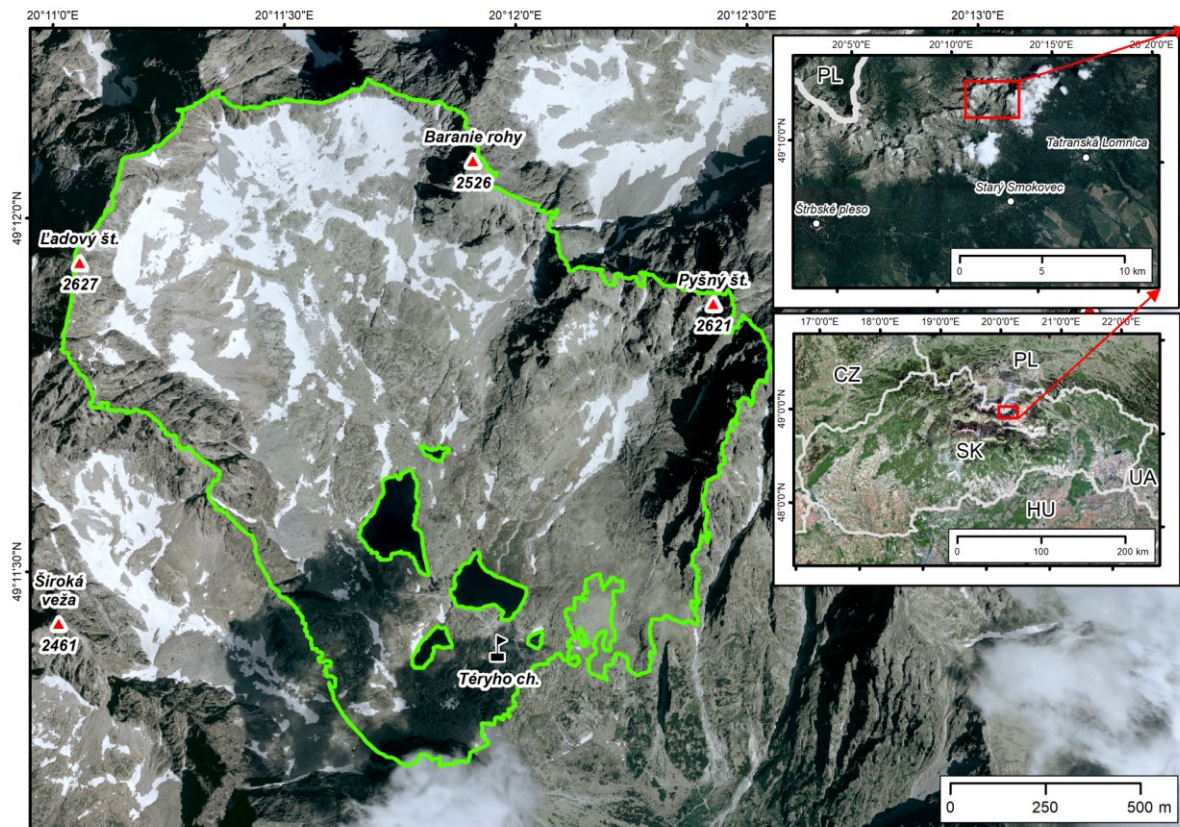
V tomto príspevku sa venujeme mapovaniu vysokohorského prostredia metódami TLS a UAV-SfM na území Malej Studenej doliny vo Vysokých Tatrách, ako aj integrácii týchto dát. Cieľom je vytvoriť digitálny model terénu skúmanej oblasti integráciou údajov TLS a UAV-SfM, čím eliminujeme vznik umelých plôch na výslednom modeli. Tiež chceme poukázať na presnosť použitých metód a zhodnotiť úroveň detailu dát získaných terénnym mapovaním. Výsledkom bude digitálny model terénu vytvorený z dát TLS a UAV-SfM vo vysokom priestorovom rozlíšení

## 2 ZÁUJMOVÉ ÚZEMIE

Údaje opisované v tejto práci boli obstarané mapovaním v najvyšších častiach Karpát, ktoré sú jedným z najrozsiahlejších vnútrozemských pohorí v Európe. Záujmové územie sa nachádza vo vrcholových častiach Malej Studenej doliny vo východnej časti pohoria Tatry (Obr. 1). Tatry tvoria severnú časť Karpatského oblúka dlhú 50 km a širokú 17 km. Ich reliéf bol formovaný niekoľkými etapami alpínskeho zaľadnenia v pleistocéne, kedy sa v Tatrách vytvorili hlboké ľadovcové doliny – trógy a ľadovcové kotly – kary (Lukniš, 1973). Pozostatky zaľadnenia vo forme ľadovcov sa v Tatrách nenachádzajú, avšak prevažne pod severne orientovanými stenami v najvyšších polohách sa môžu celoročne udržať ostrovčeky snehu.

Záujmové územie pozostáva z dvoch spojených karov obklopených skalnými stenami vysokými 400 - 500 m. Nadmorská výška skúmaného územia sa pohybuje približne od 1900 do 2600 m n. m. Pôvodný glaciálny reliéf je v nižších častiach prekrytý kužeľovými akumuláciami deluviálnych a glaciálnych sedimentov Nemčok et al., 1994). Priamo v mapovanej lokalite sa nachádza 5 ľadovcových jazier – plies, situovaných prevažne v nižších častiach územia.

Územie Tatier patrí do chránenej oblasti Tatranského národného parku (TANAP) s vysokým stupňom ochrany. Okrem toho, záujmové územie Malá Studená dolina patrí kvôli ochrane vzácnych druhov do národnej prírodnej rezervácie Studené doliny s najvyšším stupňom ochrany a tiež do zoznamu území európskeho významu. Z tohto dôvodu sú na území TANAP-u obmedzené niektoré aktivity a cestná sieť pre prístup autom je vybudovaná iba v najnižších častiach národného parku, v okolí rekreačných oblastí.



**Obr. 1** Lokalizácia záujmového územia (zelenou líniou) v rámci Slovenska. Zdroj podkladových dát: ortofoto mozaika – © GEODIS Slovakia s.r.o., © Eurosense s.r.o.(2004); satelitné snímky – ArcGIS Online, © ESRI.

### 3 METÓDY A ÚDAJE

Mapovanie záujmového územia v Malej Studenej doline v Tatrách prebehlo počas dvoch terénnych akcií v septembri a októbri 2017. Mapovania sa zakaždým zúčastnili 4 pracovníci Ústavu geografie v Košiciach, pričom všetky meracie prístroje bolo na záujmové územie potrebné vyniesť ručne. Celková váha zariadení bola približne 50 kg a výstup k Téryho chate, kde začína záujmové územie trval asi 3 hodiny. Zariadenia použité pri mapovaní zahŕňali dva GNSS prijímače Topcon Hyper II so statívom a výtyčkou, pozemný laserový skener RIEGL VZ-1000 s externým digitálnym fotoaparátom Nikon D-700 a so statívom, ako aj UAV zariadenie DJI Phantom 4 s integrovanou 12 megapixelovou kamerou umiestnenou na trojosí gimbal.

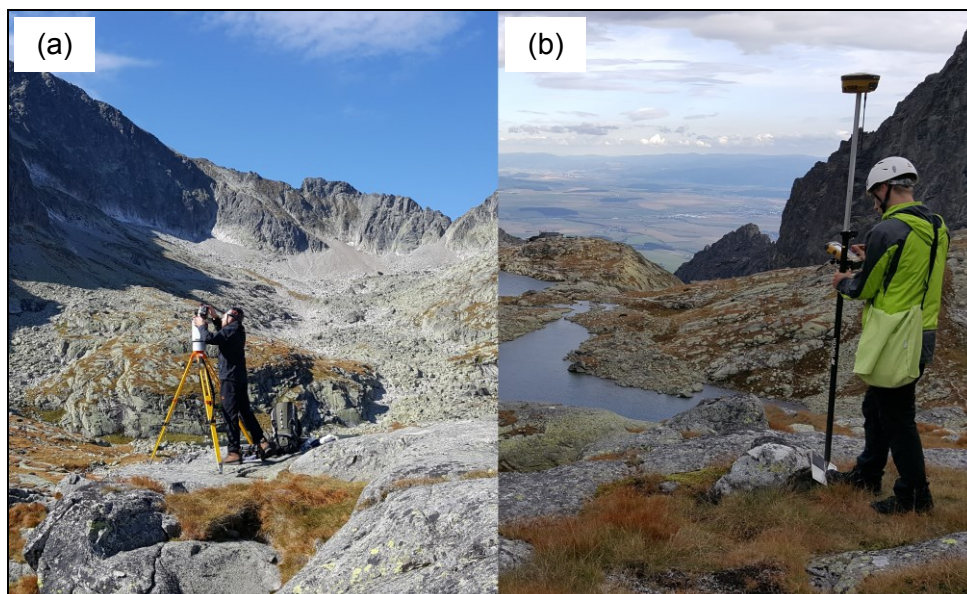
Prvé mapovanie prebehlo v dňoch 13. a 14. septembra 2017 za ideálnych poveternostných podmienok, nakoľko úroveň snehovej pokrývky bola minimálna, obloha bola bez oblačnosti a teplota vzduchu bola približne 15°C. Meracie práce začali pri Téryho chate, kde bola rozložená báza GNSS a neďaleko od nej bola tiež prvá pozícia pozemného laserového skenera (TLS) (Obr. 2). Tak isto, táto lokalita bola východiskovým bodom UAV-SfM mapovania. Počas mapovania, ktoré trvalo 6 hodín (13. septembra) a 4 hodiny (14. septembra) bolo vytvorených 15 skenovacích pozícií lokalizovaných na JZ svahu doliny a tiež v okolí Téryho chaty (Obr. 3). Okolo 4 skenovacích pozícií boli rozmiestnené fotogrametrické terče a zamerané GNSS zariadením (Obr. 3), čím vznikli vlíčovacie body pre umiestnenie naskenovaných dát do súradnicového systému S-JTSK03. Jednotlivé skenovacie pozície boli vzájomne registrované v softvéri RiSCAN PRO metódou Iterative closest point (ICP) a následne umiestnené do súradnicového systému S-JTSK03. Medzi skenovacími pozíciami boli GNSS zariadením zamerané kontrolné body kvôli prípadnému spresneniu registrácie TLS údajov do súradnicového systému S-JTSK03 (Obr. 3). Okrem metódy TLS bolo na mapovanie použité aj UAV zariadenie, ktoré počas 40 minút zmapovalo záujmové územie z výšky 400 – 500 m nad úrovňou terénu. Spracovanie údajov prebehlo v softvéri Photoscan 1.3.3., kde boli jednotlivé snímky spojené do ortofoto mozaiky a z nej následne vyextrahované 3D mračno bodov. Keďže pri leteckej

misii neboli použité pozemné kontrolné body, výsledné mračno bodov z UAV-SfM bolo metódou ICP registrované na TLS dáta, čím bolo umiestnené do súradnicového systému S-JTSK03.

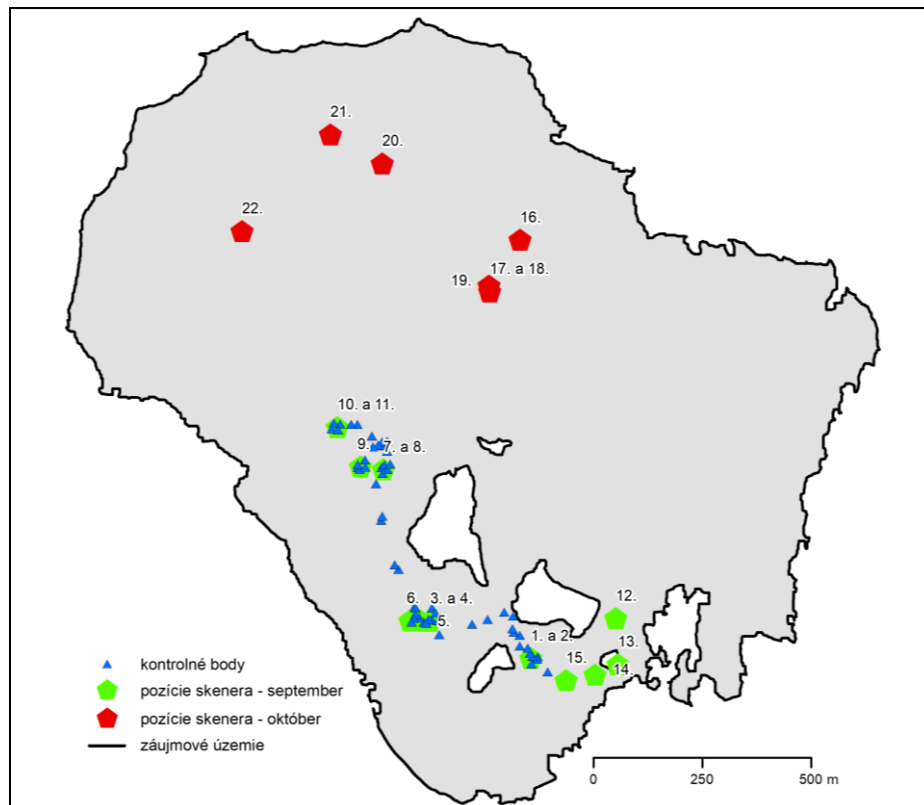
Druhá terénna akcia 19. októbra 2017 bola zameraná na zahustenie TLS dát skenovaním zo SV svahu doliny, kde bolo vytvorených 7 pozícií (Obr. 3). Pri spracovaní dát boli tieto pozície postupne registrované na dáta zamerané v septembri pre dosiahnutie čo najmenšej štandardnej odchýlky. Počas tejto akcie tiež prebehlo mapovanie záujmového územia systémom UAV-SfM, kvôli vytvoreniu podrobnejšej ortofoto mozaiky. Výška letu počas tejto misie bola približne 250 m nad terénom, čo zabezpečilo vyššie priestorové rozlíšenie výslednej ortofoto mozaiky, ako aj vyššiu hustotu mračna bodov. Výsledné mračno bodov z UAV\_SfM bolo tiež registrované na TLS dáta pomocou ICP a tak umiestnené do súradnicového systému S-JTSK03.

Počas mapovania TLS, ale aj UAV-SfM metódou sa v mračne bodov vplyvom rôznych faktorov (vlhký povrch, vysoká vlhkosť vzduchu, tieň/prílišne oslnenie a i.) môžu vytvoriť chybné body (šum) nereprezentujúce terén, resp. objekty na ňom. Takéto body bolo potrebné z mračna bodov odstrániť, aby pri modelovaní povrchov na modeli nevznikali umelé povrchy, ktoré nezobrazujú reálny stav v krajine. V rôznych softvéroch na spracovanie mračien bodov (Cloud Compare, RiSCAN PRO, MeshLab, ...) existujú nástroje na filtráciu a odstránenie chybných bodov, avšak pri územiach s komplikovanou geometrickou štruktúrou môžu tieto nástroje odstrániť aj správne dáta. Preto sme museli aj naše dáta filtrovať manuálne, čo bolo časovo náročné a často sa stalo, že používateľ prehliadol niektoré chybné body, čo sa odzrkadlilo až na výslednom digitálnom modeli terénu.

Pre vytvorenie relatívne homogénneho mračna bodov boli použité predovšetkým dáta TLS. V miestach, kde sa z dôvodu zákrytov alebo absorpcie laserového žiarenia údaje nenachádzali boli použité údaje UAV-SfM. Takto integrované dáta boli cez octree filter decimované 0,5 m krokom a importované do GRASS GIS softvéra. Na vytvorenie digitálneho modelu terénu (DTM) bol v GRASS GIS-e použitý modul *v.surf.rst*, ktorý vytvára DTM použitím interpolačnej metódy regularizovaný splajn s tenziou (Neteler a Mitsova, 2008), pričom hodnota tenzie bola 20 a zhladenia 0,8. Okrem tohto DTM boli rovnakou metódou vytvorené DTM z každého typu dát samostatne, čiže z údajov TLS, UAV-SfM (september) a UAV-SfM (október).



**Obr. 2** Inštalácia pozemného laserového skenera v teréne (a) a zameranie vlčcovacích bodov GNSS zariadením (b).



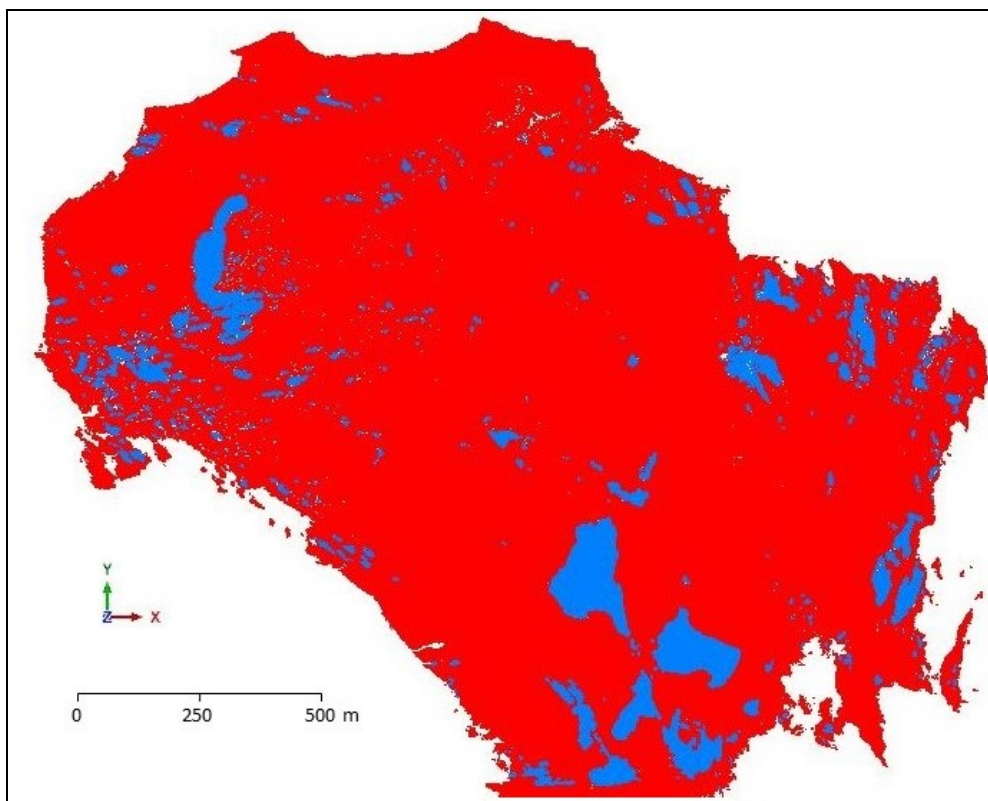
Obr. 3 Rozloženie pozícií skenera a kontrolných bodov GNSS na zájmovom území.

#### 4 VÝSLEDKY A DISKUSIA

Prezentovaný metodický postup mapovania vysokohorského reliéfu metódou TLS a UAV-SfM umožnil získať množstvo údajov o topografii zájmového územia. Z hľadiska úrovne detailu a presnosti ide o jedinečné dáta vytvorené na území Tatier. Všetky zaznamenané dáta boli orezané o polygón zájmového územia s rozlohou približne 2 km<sup>2</sup>.

TLS mapovaním sme získali jednotlivé mračná bodov z celkovo 22 skenovacích pozícií. Vzájomnou registráciou skenovacích pozícií vzniklo mračno bodov pozostávajúce z 248 mil. bodov. Hustota bodov pri použití tejto metódy je závislá na vzdialenosti zaznamenaného bodu od skenera, pričom s narastajúcou vzdialenosťou sa hustota bodov znižuje. Avšak, priemerná hustota bodov TLS bola približne 132 bodov/m<sup>2</sup>. UAV-SfM údaje zaznamenané pri prvej terénnej akcii pozostávali zo 7,5 mil. bodov s priemernou hustotou 4 body/m<sup>2</sup>. Pri druhom mapovaní bolo kvôli nižšej letovej výške rovnakou metódou zameraných až 89 mil. bodov s priemernou hustotou 47 bodov/m<sup>2</sup>. Decimovaním všetkých mračen bodov 0,5 m krokom sme získali priemernú hustotu 4 body/m<sup>2</sup> v rámci celého zájmového územia.

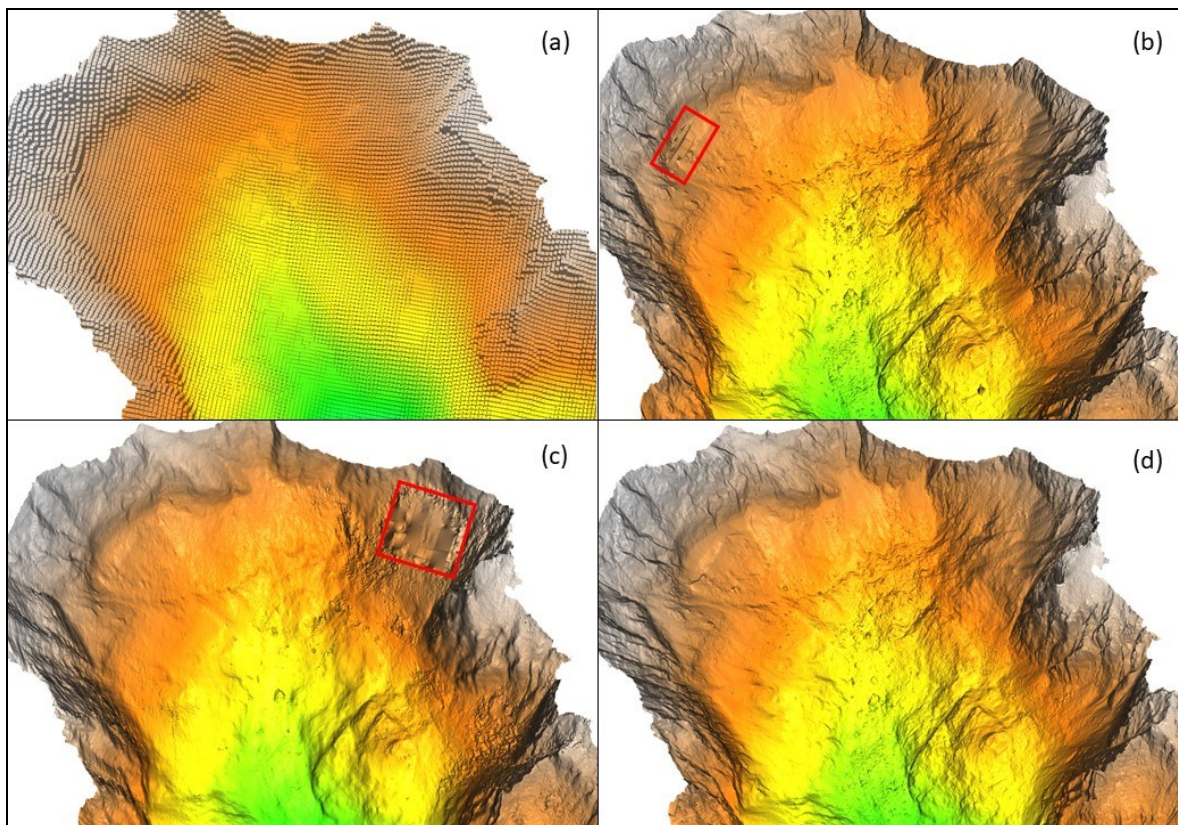
Pre tvorbu DTM boli použité prevažne TLS dáta, UAV-SfM dáta zamerané počas terénnych prác v septembri slúžili iba na vyplnenie prázdnych miest v mračne bodov TLS. Výber UAV-SfM dát na vyplnenie dier bol podmienený ich polohovou presnosťou v rámci súradnicového systému S-JTSK03. Ako bolo spomenuté v predošlej kapitole, na umiestnenie mračna bodov do súradnicového systému bola použitá metóda ICP, pričom štandardná odchýlka septembrových UAV-SfM dát bola 11,8 cm a štandardná odchýlka októbrových UAV-SfM dát bola 13,7 cm vzhľadom na TLS. Vizuálnym zhodnotením na sebe naložených mračen bodov bolo možné vidieť posun UAV-SfM dát (za október) vzhľadom na ostatné dáta, preto boli na vyplnenie dier v TLS mračne bodov vybrané práve UAV-SfM body (cca 430 tis. bodov) zamerané v septembri (Obr. 4). Ako bolo spomenuté vyššie okrem DTM z integrovaných TLS a UAV-SfM dát, ktorý je hlavným výstupom boli odvodené aj parciálne DTM vytvorené len z jedného typu dát.



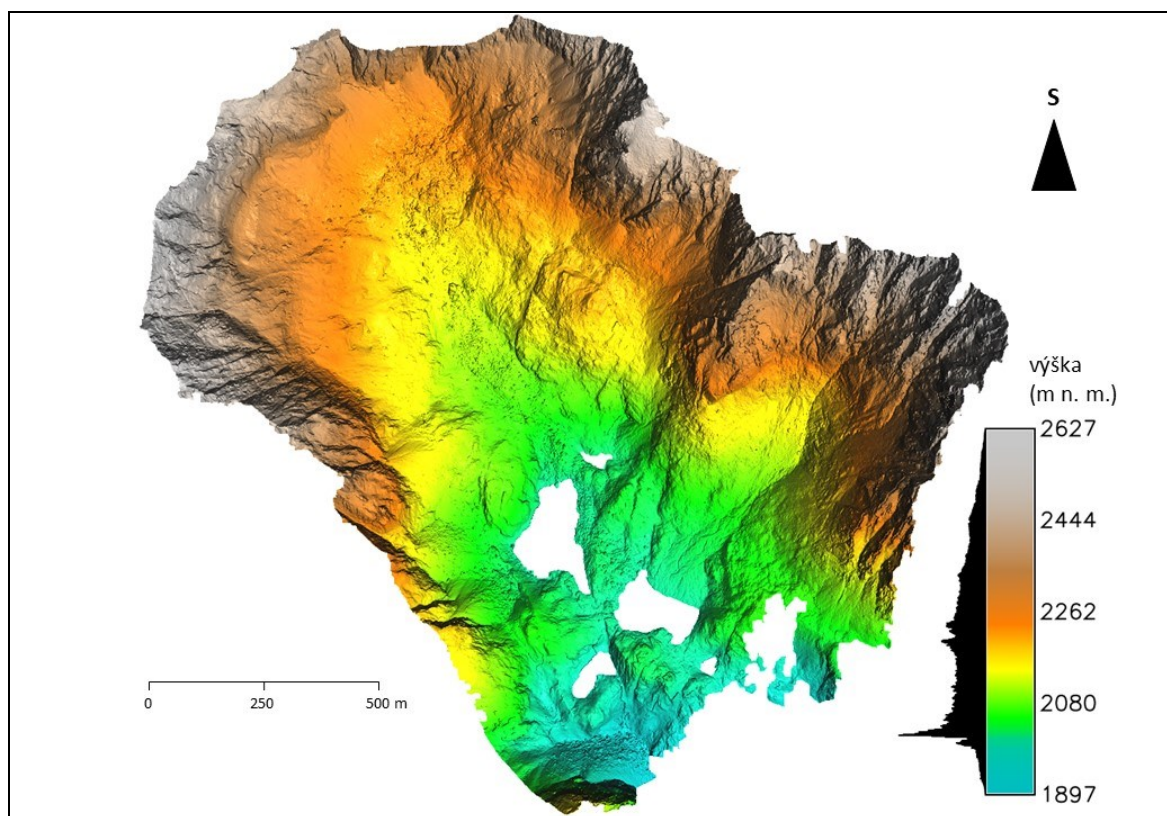
**Obr. 4** Integrované mračno bodov TLS (červené body) a UAV-Sfm (modré body) pre tvorbu DTM.

Dáta a modely opisované v tomto príspevku sú jedinečné z hľadiska úrovne detailu a územia, ktorého topografiu zobrazujú. Doposiaľ najdetailnejší DTM záujmového územia bol vytvorený z vektorizovaných vrstevníc v priestorovom rozlíšení 10x10 m (Obr. 5a). Pri takejto úrovni detailu nie je možné analyzovať štruktúru reliéfu a vyhodnocovať jeho zmeny na mikro úrovni. Naše digitálne modely terénu boli odvodené zo všetkých typov dát interpolačnou metódou regularizovaný splajn s tenziou v priestorovom rozlíšení 0,5 m, pričom výsledný model bol vytvorený integráciou dát TLS a UAV-SfM (Obr. 6). Všetky vytvorené modely zobrazujú reliéf Malej Studenej doliny na určitej úrovni detailu. Kým na DTM vytvorenom z TLS dát možno identifikovať aj relatívne malé formy, na DTM z UAV-SfM dát sú tieto formy z dôvodu menšej hustoty dát zhladené (Obr. 5). Vo všeobecnosti možno na výslednom modeli z integrovaných dát rozoznať takmer všetky formy, ktoré sa v záujmovom území vyskytujú, či už ide o skalné steny, sutinové kužele, ľadovcom zhladené povrchy a i.

Úroveň detailu, ako aj horizontálna a vertikálna presnosť vstupných dát a výstupných modelov je pri každej mapovacej metóde závislá od iných faktorov. Pri mapovaní metódou TLS bol hlavným limitujúcim faktorom členitý reliéf, kvôli ktorému sa v dátach nachádzali diery. To však nemalo vplyv na horizontálnu a vertikálnu presnosť dát. Pri UAV-SfM metóde je hlavným limitujúcim faktorom počasie, ako aj expozícia. Počas UAV-SfM zberu dát boli poveternostné podmienky ideálne, avšak veľká časť reliéfu vrátane privrátených stien bola výrazne oslnená slnečným žiarením a naopak, odvrátené steny boli v tieni. Tieto rozdielne svetelné podmienky spôsobili, že body UAV-SfM sú na privrátených stranách vyššie a na odvrátených stranách nižšie oproti referenčnému TLS datasetu. Pri mapovaní UAV-SfM metódou je preto potrebné dbať najmä na vyhovujúce poveternostné a svetelné podmienky, čo je pri mapovaní vo vysokohorskom prostredí s výrazne dynamickým počasím veľmi ťažké. Tiež je dôležité, pre každú metódu osobitne, rozmiestniť a polohovo zamerať vláčkové body, aby bolo možné namerané dáta priamo umiestniť do súradnicového systému a predišlo sa tak znásobovaniu polohovej chyby.



**Obr. 5** Úroveň detailu digitálnych modelov terénu vytvorených z vrstevníc (a), z bodov TLS (b), z bodov UAV-SfM za september (c) a z bodov UAV-SfM za október (d) so zobrazením umelých plôch (červený polygón) bez pokrytia vstupnými dátami. Zdroj DTM vytvoreného z vrstevníc: © GKÚ.



**Obr. 6** Digitálny model terénu odvodnený z integrovaných dát TLS a UAV-SfM (september) v priestorovom rozlíšení 0,5 m.

## 6 ZÁVER

Údaje prezentované v tomto príspevku vo forme mračna bodov predstavujú veľmi detailnú 3D reprezentáciu topografie vysokohorského reliéfu na príklade Malej Studenej doliny vo Vysokých Tatrách. Vysoká hustota a presnosť použitých dát umožňuje vykonávať geomorfometrické analýzy na veľmi vysokej úrovni detailu a tak zachytiť aj malé zmeny reliéfu vplyvom geomorfologických procesov. Vytvorené dáta môžu tiež slúžiť ako referenčná plocha na zisťovanie hrúbky snehovej pokrývky na danom území alebo na zisťovanie zmien objemu erodovaného a sedimentovaného materiálu. Odvodený digitálny model terénu (DTM) poslúži na identifikáciu ľadom zarovnaných povrchov a stanovenie ich absolútnej výšky v rámci záujmového územia. Vytvorením algoritmu identifikujúceho zarovnané povrchy a ich absolútnu výšku bude možné tento prístup použiť aj na iné územia v rámci Tatier, resp. iných vysokohorských oblastí. Ďalší výskum by mohol byť orientovaný na rozlíšenie viacerých hierarchických úrovni reliéfu použitím vysoko detailných DTM, ako aj na využitie nových metód rekonštrukcie povrchov, napr. 3D mesh.

## POĎAKOVANIE

Tento príspevok vznikol vďaka finančnej podpore Agentúry na podporu výskumu a vývoja v rámci riešenia projektu APVV-15- 0054: Fyzikálne založená segmentácia georeliéfu a jej geovedné aplikácie. Poďakovanie tiež patrí správe Tatranského národného parku za udelenie potrebných povolení na mapovanie vo vybranom záujmovom území.

## LITERATÚRA

- Clapuyt, F., Vanacker, V., Van Oost, K., (2016) "Reproducibility of UAV-based earth topography reconstructions based on Structure-from-Motion algorithms." *Geomorphology*, 260, 4-15.
- Hofierka, J., Gallay, M., Kaňuk, J., Šašák, J. (2017) 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, Springer International Publishing, 1-14.
- Lukniš, M. (1973) *Reliéf Vysokých Tatier a ich predpolia*. Vydavateľstvo Slovenskej akadémie vied, Bratislava.
- Li, Z., Zhu, C., Gold, C., (2004) *Digital terrain modeling: principles and methodology*. CRC Press, Boca Raton.
- Nemčok, J., Bezák, V., Biely, A., Gorek, A., Gross, P., Halouzka, R., Janák, M., Kahan, Š., Mello, J., Reichwalder, P., Zelman, J., (1994) *Geologická mapa Vysokých Tatier v mierke 1:50 000*. Geologický ústav Dionýza Štúra, Bratislava.
- Neteler, M., Mitasova, H., (2008) *Open Source GIS: A GRASS GIS Approach*. Springer, New York
- Wilkinson, M.W., Jones, R.R., Woods, C.E., Gilment, S.R., McCaffrey, K.J.W., Kokkalas, S., Long, J.J., (2016) A comparison of terrestrial laser scanning and structure-from-motion photogrammetry as methods for digital outcrop acquisition." *Geosphere*, 12, 1865–1880.
- Xu, Z., Wu, L., Shen, Y., Li, F., Wang, Q., Wang, R., (2014) Tridimensional reconstruction applied to cultural heritage with the use of camera-equipped UAV and terrestrial laser scanner. *Remote Sensing*, 6, 10413-10434.
- Yue, T. X., Du, Z. P., Song, D. J., Gong, Y. (2007) A new method of surface modeling and its application to DEM construction. *Geomorphology*, 91,161-172.