VYUŽITIE UAV TECHNOLOGIE PRE KLASIFIKÁCIU A MAPOVANIE KRAJINY VO FLUVIÁLNEJ GEOMORFOLOGII

Miloš Rusnák*, Ján Sládek** **, Anna Kidová*

* Geografický ústav SAV, Štefánikova 49, 814 73 Bratislava,

** GEOTECH Bratislava, s. r. o., Černyševského 26, 851 01 Bratislava,
geogmilo@savba.sk, geogslad@savba.sk, geogkido@savba.sk

Using UAV technology for landscape classification and mapping in fluvial geomorphology

The aim of this paper is to present the possibilities of UAVs (Unmanned Aerial Vehicles) as photogrammetry payload carriers for data acquisition and fluvial landform identification and mapping. The manual and automatic classification of the Belá River riparian zone for landscape object identification and the analyses of the point cloud density after vegetation filtration was performed. The HEXAKOPTER XL including the Sony NEX 6 camera with 16 – 50 mm lens for landscape monitoring features was used. Data was processed in Agisoft PhotoScan software. The RMSE (root mean square error) of aligned images was 60.121 mm (x coordinate), 43.7584 mm (y coordinate) and 29.46 mm (z coordinate). The resulting point cloud was semi-automatic classified in the software Terrasolid – Terrascan (Microstation), in the following six classes: high vegetation (over 5 m), medium vegetation (from 1.5 m to 5 m), small vegetation (from 0.2 m to 1.5 m), topographic surface and water surface. Orthophotomosaic was classified in ArcGIS software by supervised Maximum Likelihood Classification (MLC). Here training site signatures identified the five land cover categories (water area, bar surface, vegetation, Large Woody Debris – LWD and bare surface). The classification of photogrammetric derived point clouds increases the accuracy elevation model, but on the other hand, does not capture the real terrain and topography under the vegetation.

Key words: UAV, point cloud classification, 3D modelling, vegetation separation, topography surface, Belá river

ÚVOD

Fluviálna geomorfológia predstavuje veľmi dynamickú a vo svete rozvinutú výskumnú oblasť geomorfológie. Geomorfológia, ako vedná disciplína, sa postupne mení z opisne chápanej na procesne orientovanú vedu, ktorá zdôrazňuje nové a moderné geomorfologické koncepty, ako aj používanie kvantitatívnych metód a spôsobov priestorového zberu dát (Jain et al. 2012, Gallay et al. 2015 a Gallay et al. 2016b). Nevyhnutným predpokladom pre procesne orientované chápanie krajiny je získavanie presných modelov a dát s vysokým rozlíšením (James a Robson 2012 a Westoby et al. 2012). Turner et al. (2015) definujú päť spôsobov tvorby digitálneho modelu v geovednom výskume: 1) pozemné meranie pomocou globálnych navigačných satelitných systémov, 2) tachymetria, 3) pozemné laserové skenovanie, 4) letecké laserové skenovanie a 5) UAV fotogrametriu (UAV – *Unmanned Aerial Vehicle*). Na rozdiel od iných metód má UAV fotogrametria z hľadiska mapovania dynamických procesov viacero predností. Jej hlavné výhody spočívajú predovšetkým v rýchlosti, presnosti a bezkontaktnom spôsobe mapovania, pričom meranie je možné realizovať operatívne (Turner et al. 2015).

Na Slovensku sa v oblasti fluvialnej geomorfológie doposiaľ aplikovali predovšetkým metódy, ktoré sa viažu na analýzy spojené s terénnym prieskumom (analýza priečných profilov, pozdĺžneho profilu, hierarchickej klasifikácie morfológie riek, hydromorfologický prieskum, analýza sedimentov – napr. Lehotský a Lacika 2007, Medveďová et al. 2007, Tomčíková 2007, Anstead a Barabas 2013 a Frandofer a Lehotský 2013) a dištančné metódy založené na získavaní priestorových údajov z historických máp (Pišút 1995, 2002, 2006 a 2008 a Pišút a Tomčíková 2008) a leteckých snímok (Novotný et al. 2007, Frandofer a Lehotský 2014, Rusnák a Lehotský 2014, Kidová et al. 2016, Rusnák et al. 2016b a Novotný a Cebcauerová 2016).

UAV technológie predstavujú finančne dostupné a efektívne mobilné mapovacie zariadenia (Westoby et al. 2012, Fonstad et al. 2013 a Szabó et al. 2017), ktoré premostujú detailné terénne výskumy s klasickým leteckým snímkovaním (Neitzel a Klonowski 2011, Kelcey a Lucier 2012 a Sládek a Rusnák 2013). V súčasnosti sa pri procese spracovania obrazových dát získaných pomocou UAV najčastejšie využíva štandardizovaný proces založený na metóde *Structure from Motion* (SfM) pre tvorbu 3D povrchov (Westoby et al. 2012 a Fonstad et al. 2013). Na rozdiel od klasickej fotogrametrie využívajúcej systém kontrolných bodov (GCP) na výpočet známej pozície kamery a jej orientácie, SfM pomocou algoritmu vyhľadáva identické body na snímkach zosnímaných z rozličných uhlov. Výhodou algoritmu je vyššia miera automatizácie a ľahšieho použitia, čo umožňuje jeho aplikáciu vo viacerých komerčných a voľne dostupných programoch na spracovanie 3D modelov. Na Slovensku a v Česku sa použitie bezpilotných technológií rozvíja predovšetkým v posledných rokoch (tab. 1). Ucelený prehľad o rozdelení a využití UAV v geografii opisujú vo svojej práci Sládek a Rusnák (2013), podobne ako v Česku Miřijovský et al. (2012), ktorí približujú využitie bezpilotných systémov pre zber dát. Miřijovský (2013) komplexne opisuje následný proces spracovania snímok pomocou UAV fotogrametrie. Priekopníkmi vo využívaní UAV pre vedecké účely na Slovensku a v Česku boli Plánka (1984 a 1987), Plánka et al. (1983), Kolečka (1987), Kolečka a Petch (1989) a Hanzl a Plánka (1992), ktorí na analýzu zmien krajiny využívali diaľkovo ovládaný model Rogallo s upravenou kamerou Flexaret. Prehľad počiatkov snímkovania krajiny pomocou RC modelov prináša Plánka (2014), ktorý uvádza prvé pokusy okolo roku 1965 pod vedením O. Stehlíka, na vtedajšom Geografickom ústave ČSAV v Brne. Müllerová et al. (2016 a 2017) využívajú snímky z UAV s vysokým rozlíšením a infračerveným spektrom na identifikáciu a monitoring invázných taxónov v stredných Čechách. Pacina a Holá (2014) použili UAV a KAP (*kite aerial photography*) na identifikáciu zaniknutých sídel v českom pohraničí. Kršlák et al. (2016) a Blišťan et al. (2016b) poukazujú na využitie UAV pri tvorbe digitálnych modelov ťažobných lomov (množstvo odťaženého materiálu) a odkryvov. Stuchlík et al. (2015) využili tvorbu digitálnych modelov a snímkovanie pomocou termálnej kamery v polárnych oblastiach Svalbardu. Presnosť fotogrametrickej derivovaného mračna bodov z UAV pri výskume lesnej pokrývky hodnotí Tomašík et al. (2017) a Mikita et al. (2016) využíva metódy UAV fotogrametrie na detegovanie drevnej hmoty.

Vo svetovej literatúre sa v oblasti fluvialnej geomorfológie UAV technológie využívajú na získavanie presných digitálnych modelov nivy, monitoring ripariálneho lesa a identifikáciu zmien pôdorysnej vzorky a laterálneho pohybu (Dunford et al. 2009, Vericat et al. 2009, Hervouet et al. 2011 a Tamminga et al. 2015) alebo

optickej batymetrie (Lejot et al. 2007 a Flener et al. 2013). Na Slovensku sa UAV fotogrametria vo fluvialnej geomorfológii uplatnila pri výskume avulzného koryta na rieke Ondava (Sládek a Rusnák 2013). Viacero výskumov s aplikáciou UAV fotogrametrie nájdeme v Česku (pozri tab. 1), kde sa využila pri výskume riečného meandra a brehovej erózie na rieke Morava (Mířijovský a Vavra 2012), pri analýze vývoja Kenického meandra rieky Moravy v CHKO Litovelské Pomoraví – Mířijovský et al. (2015), alebo v povodí hornej Vydry v pohorí Šumava (Mířijovský a Langhammer 2015 a Langhammer et al. 2017).

Tab. 1. Prehľad prác autorov zo Slovenska a Česka, ktoré využívali UAV technológie na mapovanie a tvorbu digitálnych modelov krajiny

Oblasť výskumu	Lokalita	Typ nosiča	Kamera	Autori	Poznámka
Metodika zberu dát	Senica na Hané	paraglide PIXY	Canon EOS 500D	Mířijovský et al. (2012)	ortofotomosaika s presnosťou 0,062 m (x,y)
		paraglide PIXY/ hexakopter		Mířijovský (2013)	komplexná metodika zberu dát pomocou UAV
Mapovanie krajiny	priehrada Nové Mlýny	rogalo	Flexaret	Plánka (1984, 1987); Plánka et al. (1983); Kolejka (1987); Kolejka a Petch (1989); Hanzl a Plánka (1992)	prvé práce využívajúce bezpilotný prostriedok pre snímkovanie krajiny
	priehrada Nechanice, povrchová ťažba v oblasti mesta Most	malé lietadlo	Nikon D3X	Pacina a Sládek (2015)	
	letisko Lucerne	Scout B1-100	laser skener Riegle VUX-1/Sony A6000/ hyperspektrálna kamera AISA KESTREL 10	Gallay et al. (2016a)	snímkovanie s rozlíšením 0,1 m a presnosťou 0,02 m, hustota lidarového mračna bodov 1111 bodov/m ²
Mapovanie lomov, odkryvov a ťažobných oblastí	baňa Bankov (Košice)	DJI Phantom 2	DJI HD camera	Blišťanová et al. (2015, 2016)	mapovanie objektov a ich ochrana
	povrchový lom (Jastrabá)	DJI Phantom 2 Vision+	FC200 camera	Kršlák et al. (2016) Blišťan et al. (2016a)	point cloud s rozlíšením 0,0403 m/pixel a RMSE kontrolných bodov 0,0479 m
	dokumentácia geologického odkryvu (Lehôtka pod Brehmi)	DJI Phantom 2 Vision+	FC200 camera	Blišťan et al. (2016b)	tvorba 3D modelu s rozlíšením 0,01 m/pixel
Mapovanie vegetácie	centrálna časť Českej republiky	kridlo	Canon S100/ Sony A5100	Müllerová et al. (2016, 2017)	využitie VIS a NIR snímok pre identifikáciu Agátu bieleho
Výskum lesa	Kremnica, Vysoké Tatry, Modrý Kameň	DJI Phantom 3	DJI camera	Tomašík et al. (2017)	hodnotenie presnosti mračna bodov a vplyvu/rozmiestnenia množstva GCP na kvalitu modelu
	Mariabrunn	DJI S800 Spreading Wings	Sony NEX 5R	Míkita et al. (2016)	detekcia drevnej hmoty
Zaniknuté osídlenie a pamiatky	česko-nemecké pohraničie (Jilmová)	Kite/oktokopter	Canon PowerShot D10/termálna kamera Optiris PI	Pacina a Holá (2014); Brůna et al. (2014)	ortofoto s rozlíšením 0,015 m
	Sudán (Sabaloka)	Kite	Canon PowerShot D10	Pacina (2015)	DSM model s presnosťou 0,05 m
	priehrada Fláje	malé lietadlo	Nikon D810	Pacina et al. (2016)	rozlíšenie DSM: 0,05 - 0,56 m a ortofoto: 0,027 - 0,141 m
Zosuvy	obec Sv. Anton	Hexakopter XL	Sony NEX 6	Rusnák et al. (2016a)	vertikálna chyba DSM 0.425 m a DTM 0.337 m
Arktické oblasti	Svalbard	Hexakopter XL	GoPro HD Hero 3/ termálna kamera Optiris PI	Stuchlík et al. (2015)	RMSE chyba 0,4 m
Fluviálna geomorfológia	rieka Ondava	Hexakopter XL	Nikon D90	Sládek a Rusnák (2013)	ortofoto s rozlíšením 0,02 m
	rieka Belá	Hexakopter XL	Sony NEX6	Rusnák et al. (2018)	DSM a ortofoto s presnosťou 0,05 m
	rieka Morava (Litovelské Pomoraví)	paraglide PIXY	Canon EOS 500D	Mířijovský a Vavra (2012); Svobodová et al. (2012)	RMSE 0,021 m (horizontálna) a 0,023 m (vertikálna)
	rieka Morava (Kenický meander)	Hexakopter XL	Canon EOS 500D	Mířijovský et al. (2015)	vertikálna RMSE 0,093 m
	potok Javoří (Šumava)	Hexakopter XL	Canon EOS 500D	Langhammer et al. (2017)	využitie UAV pre optickú granulometriu
	potok Javoří (Šumava)	hexakopter	Canon EOS 500D	Mířijovský a Langhammer (2015)	4 časové rorizonty s vertikálnou RMSE 0,020 - 0,037 m

Cieľom predkladaného príspevku je mapovanie riečnej krajiny v povodí rieky Belej a zhodnotenie použitia UAV ako nosiča obrazových snímačov na identifikovanie fluviaálnych foriem a vegetácie pomocou manuálnej a automatickej klasifikácie UAV ortofotosnímkov. Dôraz sa kladie na klasifikáciu a analýzu hustoty mračna bodov v jednotlivých fluviaálnych formách. Ďalej si všíma vplyv jednotlivých tried krajiny pokrývky na tvorbu digitálneho modelu zemského povrchu použiteľného vo fluviaálno-geomorfologickom výskume.

PROCES SPRACOVANIA SNÍMOK ZÍSKANÝCH POMOCOU UAV

Rozšírenie bezpilotných systémov pri mapovaní krajiny je úzko zviazané s rozvojom techník počítačovej vizualizácie algoritmu SfM (*Structure from Motion*), ktorý bol vyvinutý v 70. rokoch minulého storočia (Ulman 1979) a neskôr využitý aj v oblasti fotogrametrie ako SfM-MVS – *Structure-From-Motion Multi-View Stereo Photogrammetry* (Harwin a Lucieer 2012 a Dietrich 2016). Algoritmus využíva, podobne ako klasická fotogrametria, prekryvanie snímok (fotografií) na identifikáciu identických objektov z viacerých uhlov, pričom prvky vnútornej a vonkajšej orientácie vypočítava automaticky bez zadávania preddefinovaných a zameračných kontrolných bodov (GCP); (Micheletti et al. 2015). Kombinácia fotogrametrie a počítačovej vizualizácie pre spracovanie UAV dát a tvorbu georeferencovaného mračna bodov sa v súčasnosti označuje ako UAV-MVS metóda (Harwin a Lucieer 2012). Pre tvorbu 3D geometrie sa skúmaný objekt nasníma z rôznych uhlov a algoritmus vypočíta pozíciu kamery, orientáciu a 3D koordináty modelu. V súčasnosti sa najčastejšie na identifikáciu spoločných objektov (keypoints) v celom súbore snímok využíva algoritmus SIFT (*Scale Invariant Feature Transform*). Následne sa medzi jednotlivými bodmi vypočítajú priestorové vzťahy. V druhom kroku získané parametre (orientácia kamery a fotografií) vstupujú do algoritmov (ako je SGM – *Semi-Global Matching*) pre generovanie hustého mračna bodov (dense point cloud), ktoré prebieha automaticky, na rozdiel od klasického generovania 3D modelov na základe stereo dvojice snímok (stereomatching). Výsledkom je vyššia miera automatizácie a ľahšieho použitia, pričom pre tvorbu modelu nie je nutné explicitné definovanie vnútornej a vonkajšej orientácie (Fonstad et al. 2013). Algoritmus využívajú viaceré softvérové riešenia, ktoré prinášajú intuitívnejšie a automatizované alebo poloautomatizované ovládanie a sú založené na komerčnej (Agisoft PhotoScanTM, Pix4DTM) alebo voľne šíriteľnej licencií pre nekomerčné použitie (ARC3DTM, BundlerTM, Microsoft© PhotosynthTM); (Sládek a Rusnák 2013).

ŠTUDOVANÉ ÚZEMIE

Na aplikáciu UAV fotogrametrie bol vybraný riečny úsek vodného toku Belá v jej dolnej časti (obr. 1). Rieka Belá vzniká sútokom Tichého a Kôprovského potoka vo Vysokých Tatrách a po sútok s Váhom dosahuje dĺžku 23,6 km. Povodie je značne asymetrické s prevládajúcimi pravostrannými prítokmi. Plocha povodia má 244 km² s maximálnou nadmorskou výškou 2 494 m n. m. a minimom vo výške 630 m n. m. Nalietané územie malo tvar obdĺžnika v dĺžke 1,6 km a šírke 250 – 300 m. Na hodnotenie presnosti bol zvolený výsek modelového územia s rozmermi 210 × 260 m zahŕňajúci riečny úsek s vrcholovou lavicou a nárazovým svahom, ktorý eroduje tridsať metrov vysokú terasu. Skúmané územie má charakter divočia-co-migrujúceho vodného toku.

Obr. 1. Poloha záujmového územia

a – lokalizácia povodia rieky Belá, b – skúmaný riečny úsek v rámci povodia vodného toku, c – ortofoto skúmaného územia, d – mračno bodov získané pomocou UAV fotogrametrie.

ZÍSKAVANIE A SPRACOVANIE DÁT

Na monitoring rieky Belá bol použitý UAV systém HiSystem Hexakopter XL so šiestimi rotormi a kamerou SONY NEX 6 s objektívom s rozsahom 16 – 50 mm. Pri získavaní a spracovaní dát bol dodržaný postup prác podľa Rusnáka et al. (2018), ktorý pozostával z nasledujúcich piatich krokov: a) rekognoskácia územia, b) predletová príprava, c) vlastný let, d) kontrola kvality a procesu získavania dát a e) operácia so získanými dátami. Oblasť koryta a jeho okolia boli nalietané v troch polohách. Prvá bola kolmé snímokovanie z výšky 80 m nad korytom. Druhý typ predstavovalo šikmé snímokovanie telesa zosuvu pod uhlom 30° – 45° vo výške 80, 60 a 50 m nad terénom. Doplnkovým, tretím snímokovaním v horizontálnej polohe boli nasnímané úseky brehov, ktoré zakrývala vysoká vegetácia. Všetky snímky boli zhotovené v ohniskovej vzdialenosti 16 mm.

Priestorové priradenie modelu sa zabezpečilo pomocou 38 kontrolných bodov (GCP – *Ground Control Point*) zameraných RTK GPS prístrojom Leica Zeno 5 s anténou GG03 s presnosťou 11 mm. Dáta sa spracovávali v prostredí programu Agisoft PhotoScan™ na štandardnom PC vybavenom procesorom Intel i7 a 32 GB pamäťovým modulom. PhotoScan umožňuje blokové spracovanie snímok a ich priestorové priradenie (Agisoft PhotoScan 2017). Do spracovania vstupovalo celkovo 1 820 snímok a 38, resp. 20 vličovacích bodov (GCP). Výsledkom spracovania je 3D model, ktorý vytvára virtuálnu reprezentáciu krajiny a je vytvorený z mračna bodov vysokej hustoty: 100 – 200 bodov na m^2 (obr. 2). Z nalietaných dát bola vytvorená ortofotomozaika s rozlíšením 2,1 cm. V prvom kroku bolo mračno bodov poloautomaticky klasifikované v softvérovom prostredí Microstation Powerdraft s nastavbovým modulom Terrasolid – TerraScan, do nasledujúcich piatich tried: vysoká vegetácia (viac ako 5 m), stredná vegetácia (od 1,5 m do 5 m), nízka vegetácia (od 0,2 m do 1,5 m), zemský povrch a voda (obr. 2). Výsledkom klasifi-

kácie bolo generovanie dvoch základných typov mračna bodov a výškových mode-
lov označených ako: 1) DSM – výškový model (mračno bodov), do ktorého vstu-
povali všetky body mračna (všetky triedy); (obr. 2 časť a a c) a 2) DTM – digitálny
model (mračno bodov) generovaný iba z tried zemský povrch a voda (obr. 2 časť b
a d).

Obr. 2. Vizualizácia mračna bodov

Príklady výsledných formátov a ich 3D vizualizácia vo forme klasifikovaného: a – mračna bodov (hnedá – povrch, odtiene zelenej – vegetácia, modrá – voda), b – mračna bodov triedy povrch, c – rastrového modelu povrchu, d – rastrového modelu terénu.

V druhom kroku bola ortofotosnímka manuálne klasifikovaná do dvojstupňovej databázy, ktorá sa skladala z úrovne geomorfologických foriem (triedy vodná plocha, štrková lavica, ostrov, niva a terasa) a vegetácie (triedy voda, bez vegetácie, nízka vegetácia, krovitá vegetácia, vysoká vegetácia a zhľuky dreva a nedefinovaného materiálu).

V ďalšom kroku bola ortofotosnímka generovaná UAV fotogrametriou prevzor-
kovaná na veľkosti pixela 5, 10, 20 a 50 cm a pomocou kontrolovanej klasifikácie
v softvéri ArcGIS pri použití metódy maximálnej pravdepodobnosti (*Maximum
Likelihood Classification* – MLC) bola klasifikovaná do piatich základných tried:
vodná plocha, štrková lavica, vegetácia, zhľuky dreva a povrch bez vegetácie. Jed-
notlivé trénovacie množiny boli manuálne digitalizované do piatich preddefinova-
ných tried a boli totožné pre všetky rozlíšenia ortofotosnímky. Na odstránenie ne-
správnej klasifikácie jednotlivých pixelov a šumu bol na výsledné MLC klasifiká-
cie uplatnený postklasifikačný proces pozostávajúci z filtrácie, zhladenia hraníc a
odstránenia malých izolovaných regiónov. Validácia a presnosť klasifikácie boli
hodnotené na základe chybovej matice a štatistického indexu zhody – KAPPA in-
dexu. Ako validačná vrstva bola použitá vrstva vzniknutá na základe kombinácie
manuálnej vektorizovanej vrstvy geomorfologických foriem a vegetácie, ktorá bola
reklasifikovaná na rovnaké triedy ako MLC klasifikácia.

V poslednom kroku bola hustota bodov hodnotená na základe dvoch manuálne vektorizovaných vrstiev (vrstva geomorfologických foriem a vrstva vegetácie), ktoré slúžili na hodnotenie vplyvu vegetácie na identifikáciu fluviaálnych foriem.

VÝSLEDKY

Presnosť UAV fotogrametrie a manuálne mapovanie

Celková chyba merania vypočítaná softvérom PhotoScan na základe 38 GCP bola 0,336 pixelov, čo predstavuje 0,08 m. Chyba RMSE (*Root Mean Square Error*), vypočítaná v softvéri PhotoScan, bola po zarovnaní všetkých snímok v smere x súradnice 0,0601 m, v smere y súradnice 0,0438 m a vertikálna chyba bola 0,0295 m. V druhom prípade bol model priradený pomocou 20 GCP a zvyšných 18 slúžilo ako kontrolné body na určenie priestorových chýb. Stredná polohová chyba takto priradeného modelu bola 0,0264 m a RMSE chyba kontrolných bodov bola 0,0246 m v osi x a 0,0281 m v osi y (obr. 3 časť a). Vertikálna RMSE chyba sa

pohybovala na úrovni 0,0284 m (obr. 3 časť b).

Obr. 3. Presnosti kontrolných bodov

Chyba kontrolných bodov (18 GCP): a – v smere súradníc x a y , b – chyba jednotlivých kontrolných bodov aj v smere súradnice z .

Manuálnou klasifikáciou bolo v študovanom území celkovo vyčlenených 1 078 polygónov s minimálnou plochou 0,012 m², priemernou plochou 49,96 m² a mediánom 0,432 m². Ortofotosnímka (obr. 4) poskytuje vysoký rozlišovací detail na identifikáciu drobnej vegetácie pokrývajúcej štrkové lavice a mapovanie zhlukov dreva. Minimálna plocha mapovanej nízkej vegetácie bola 0,012 m², pričom medián pre celkovo 771 polygónov bol 0,23 m², čo predstavuje štvorec so stranou 49 cm a pre najmenšie identifikované plochy trávnatých povrchov štvorec so stranou 10 cm. Mapovanie zhlukov dreva umožňuje identifikovať jednotlivé kmene stromov, resp. celé zhluky dreva obsahujúce kmene, korene a zvyšky konárov. Celkovo bolo v území identifikovaných 141 zhlukov dreva s celkovým objemom 370,31 m³ (vypočítaný na základe sečnej plochy roviny podlažia) a s priemerným objemom 2,63 m³. Objem zhlukov dreva pritom predstavuje drevnú hmotu a vzduch medzi jednotlivými kusmi dreva.

Obr. 4. Porovnanie presnosti UAV ortofotosnímky

a – letecká snímka s rozlíšením 40 cm (EUROSENSE Slovakia), b – UAV ortofotosnímky s rozlíšením 5 cm, c – výsledná klasifikácia vegetácie.

Legenda: modrá – voda, svetlozelená – nízka vegetácia, tmavozelená – krovitá vegetácia a oranžová – zhluky dreva a nedefinovaného materiálu

Automatická klasifikácia UAV ortofotosnímky

Ortofotosnímka (s rozlíšením 5, 10, 20 a 50 cm) bola klasifikovaná do piatich základných tried objektov (tab. 2) s celkovou presnosťou 75 % (pre rozlíšenie 5 cm), 78 % (10 cm), 77 % (20 cm) a 74 % (50 cm). RGB klasifikácia UAV ortofotosnímky je dostatočná na identifikáciu tried vegetácie a štrkových lavíc. Problématická je identifikácia vodnej hladiny, kde vznikajú chyby náklonom vegetácie ponad breh koryta toku (obr. 5) a na okraji plytkých vodných plôch, kde je viditeľná textúra podložia, resp. dna koryta (triedy klasifikované ako povrch bez vegetácie, resp. štrková lavica). Nízkou presnosť vykazujú aj identifikácia povrchov bez vegetácie, predovšetkým trieda zvyškov dreva, ktorá má podobné spektrálne charakteristiky ako trieda vegetácie. Priestorová distribúcia chýb sa viaže predovšetkým na zóny kontaktu voda – štrková lavica (vegetácia) a kontaktu vysokej vegetácie s ostatnými typmi tried. Po odstránení triedy zvyšky dreva (tab. 3) sa presnosť klasifikácie zvýšila na 83 % (KAPPA index 0,633) avšak s výrazne podobným rozmiestnením chybných pixelov (obr. 5 časť d).

Tab. 2. Hodnota štatistického indexu zhody (KAPPA index), celková presnosť automatickej klasifikácie pre ortofotosnímky s rozlíšením 5 cm, 10 cm, 20 cm a 50 cm, ako aj pre jednotlivé klasifikované triedy

		Rozlíšenie ortofotosnímky			
		5 cm	10 cm	20cm	50 cm
KAPPA index		0,535	0,580	0,568	0,533
celková presnosť		75 %	78 %	77 %	74 %
Trieda	vodná plocha	70 %	75 %	82 %	90 %
	štrková lavica	87 %	90 %	91 %	93 %
	vegetácia	95 %	95 %	96 %	96 %
	povrch bez vegetácie	31 %	34 %	33 %	33 %
	zvyšky dreva	12 %	14 %	14 %	11 %

Tab. 3. Chybová matica, hodnota štatistického indexu zhody (KAPPA index) a celková presnosť automatickej klasifikácie pre ortofotosnímku s rozlíšením 5 cm bez klasifikácie triedy zvyšky dreva

Trieda		Validácia			
		Vodná plocha	Štrková lavica	Vegetácia	Povrch bez vegetácie
Klasifikácia	vodná plocha	64 %	1 %	31 %	4 %
	štrková lavica	4 %	86 %	9 %	1 %
	vegetácia	1 %	2 %	95 %	2 %
	povrch bez vegetácie	22 %	19 %	30 %	29 %
		celková presnosť			83 %
		KAPPA index			0,633

Obr. 5. Výsledná automatická klasifikácia ortofotosnímky s rozlíšením 5 cm
a – klasifikácia ortofotosnímky na 5 tried, b – rozmiestnenie jednotlivých chybných pixelov,
c – výsledná klasifikácia po vyradení triedy zhluky dreva, d – rozmiestnenie jednotlivých chýb.

Obr. 6. Množstvo a rozloženie mračna bodov v jednotlivých geomorfologických formách a – vypočítané ako hustota bodov na m² pre kruh s polomerom 10 m pre všetky body, b – pre body klasifikované ako povrch, c – znázornenie počtu bodov na m² pre všetky body mračna, d – pre body klasifikované ako povrch.

Analýza mračna bodov

Priemerná hustota mračna bodov na 1 m² (obr. 6 časť a a b) po exporte zo softvéru Agisoft pre DSM vypočítaná pre kruh s polomerom 10 m bola 52,67, pričom maximálna hodnota bola 278,54. Po klasifikácii a selekcii iba bodov zemský povrch a voda poklesla priemerná hustota mračna bodov na hodnotu 8,73 a maximálna hodnota bola 55,67. Pri hodnotení počtu bodov na m² tak priemerný počet bodov (obr. 6 časť c a d) poklesol z hodnoty 88,18 bodov/m² pre DSM (maximálna hodnota 1 011 bodov/m²) na 20,91 bodov/m² pre DTM (maximálna hodnota 158 bodov/m²). Redukcia bodovej hustoty mračna bodov klasifikovaného ako povrch sa prejavuje aj v rozložení jednotlivých početností bodov mračna (obr. 7). Pri neklasifikovanom mračne bodov (DSM) najväčší počet bodov na m² (obr. 7 časť c) dosahuje geomorfologická forma niva (131,7 bodov/m²), ďalej nasledujú ostrov a riečna terasa (93,6 a 92,3 bodov/m²) a najmenej bodov majú triedy vodná plocha a štrková lavica (29,2 a 36,1 bodov/m²). Pri hodnotení množstva bodov pre jednotlivé typy vegetácie (obr. 7 časť d) tak má najvýraznejšie zastúpenie vysoká vegetácia (157,3 bodov/m²) a krovitá vegetácia (95,0 bodov/m²). Zvyšné kategórie dosahujú hodnoty od 30 do 50 bodov/m². Po selekcii mračna bodov na body reprezentujúce iba povrch (DTM) priemerný počet bodov na štvorcový meter najvýraznejšie klesá v kategórii niva (z 131,7 bodov/m² na 2,8 bodov/m²) a ostrovy (z 93,6 bodov/

m^2 na 4,2 bodov/ m^2); (obr. 7 časť c a e), pričom pokles hustoty bodov narastá so zvyšujúcou sa výškou vegetácie (obr. 7 časť d a f), kde pokleslo množstvo bodov najvýraznejšie v triede vysoká vegetácia (o 154,2 bodov/ m^2) a krovitá vegetácia (o 88,4 bodov/ m^2). Po odfiltrovaní vegetácie z digitálneho modelu (DTM) bolo najhustejšie bodové pole identifikované pre geomorfologické formy (obr. 7 časť e) štrková lavica (19,6 bodov/ m^2) a terasa (17,9 bodov/ m^2). Trieda vodná plocha obsahovala 7,9 bodov/ m^2 a kategórie obsahujúce vegetačný kryt 4,2 a 2,8 bodov/ m^2 (ostrovy a niva). Mračno bodov malo najvyššiu hustotu v rámci tried reprezentujúcich vegetáciu (obr. 7 časť f) v kategóriách povrch bez vegetácie a povrch s nízkou vegetáciou (24,6 a 20,5 bodov/ m^2), pričom ostatné triedy dosahovali výrazne nižšie hustoty bodov.

Obr. 7. Štatistika počtu bodov na m^2 pre jednotlivé geomorfologické formy a pre jednotlivé triedy vegetácie

a – triedy geomorfologických foriem, b – vegetácie, c – v študovanom území spolu so štatistikou (min, max a priemer) počtu bodov na m^2 pre jednotlivé geomorfologické formy: všetky body mračna, e – pre body klasifikované ako povrch, d – pre jednotlivé triedy vegetácie: pre všetky body mračna, f – pre body klasifikované ako povrch.

DISKUSIA

Bezpilotné systémy sú v súčasnosti často využívaným nástrojom na získavanie informácií o krajine vedúcich k tvorbe digitálnych modelov a iných priestorových informácií, ktoré následne vstupujú do priestorových analýz alebo slúžia na identifikáciu geografických objektov. Napriek tomu, že UAV fotogrametria nedokáže preniknúť vegetáciou ako letecký, resp. pozemný laserový skener, predstavuje presnú, rýchlu a operatívnu technológiu zberu priestorových dát (Turner et al. 2015). Jej výhodou je predovšetkým pomerne nízka obstarávacia cena (Sládek a Rusnák 2013 a Barkóczi et al. 2017)), vysoká operabilita a úspora času oproti klasickým terénnym prácam. Použitím tejto technológie sme získali výslednú ortofotosnímkou s rozlíšením 2,1 cm a digitálny model so strednou polohovou chybou 2,6 cm. Miřijovský a Langhammer (2015) aplikovali UAV technológiu pri výskume tokov na Šumave s výsledným rozlíšením ortofotomozaiky 1,9 – 2,3 cm a RMSE chybou 3,7 cm. Flener et al. (2013) poukazujú na rýchlosť získavania údajov pomocou UAV a opisujú kombináciu UAV technológie, batymetrie a pozemného skenovania pri tvorbe komplexného digitálneho modelu vodného toku a jeho okolia s presnosťou UAV derivovaného modelu 10 až 20 cm. Kombináciu klasických terénnych meraní a UAV technológií prezentujú aj Miřijovský et al. (2015) pri výskume Kenického meandra na rieke Morava v Českej republike.

Výsledná presnosť ortofotosnímkou umožňuje spoľahlivú identifikáciu objektov s rozmermi 10 cm, čo vedie k presnejšiemu určeniu jednotlivých mikroforiem (povodňové korytá) a spresneniu lokalizácie sukcesie vegetácie a zvyškov dreva (poloha a orientácia dreva v rámci koryta vytvára prekážky prúdeniu vody). Pri identifikácii objemu zvyškov dreva treba brať do úvahy pomer medzi jednotlivým podielom vzduchu (*air mass*) a pevných častí dreva, pre ktorý sa využíva metodika výpočtu indexu hustoty použitého prvýkrát v práci Théveneta et al. (1998) pre rôzne typy zhlukov dreva. Podobne, využitie UAV neumožňuje identifikovať jednotlivé kusy dreva, ktoré sú pochované štrkovými nánosmi. Automatizácia klasifikácie vedie k zvýšeniu časovej efektivity v porovnaní s manuálnym mapovaním. Mafanya et al. (2017) porovnávajú kontrolovanú a nekontrolovanú klasifikáciu UAV ortofotosnímkou založenú na klasifikácii pixelov alebo objektov (objektová klasifikácia). Zdôrazňujú presnosť kontrolovanej klasifikácie a poukazujú na porovnateľné výsledky klasifikácie založenej na hodnotení objektov a jednotlivých pixelov. Nevýhoda pixelovo orientovaného prístupu spočíva vo výrazne vyššom šume (prejavuje sa efektom „salt and pepper“). Objektovo orientovaný prístup je výhodnejší na klasifikáciu snímok s vysokým rozlíšením a nízkym počtom spektrálnych pásiem, pričom presnosť závisí od segmentačného algoritmu a sezónne sa meniacich environmentálnych podmienok (Mafanya et al. 2017). UAV snímky s rozlíšením 5 cm a metódu OBIA využívajú Husson et al. (2016) na automatickú klasifikáciu akvatickej vegetácie a poukazujú na výhody UAV pre operatívne mapovanie, podobne Bertalan et al. (2016) zdôrazňujú perspektívu využitia UAV technológie na identifikáciu vegetácie a systému výmoľov.

UAV technológie pri použití optických senzorov vytvárajú 3D geometriu obálky povrchov. Na tvorbu digitálneho modelu terénu je preto nevyhnutné získané mračno bodov klasifikovať a filtrovať, pričom dochádza k výraznému poklesu množstva bodov, ktorý explicitne definuje terén po odstránení bodov vegetácie. V oblastiach s hustou vegetáciou dochádza k výraznému úbytku informácií o výške povrchu (obr. 8). Na identifikovanie jednotlivých foriem je potrebné aj po filtrácii dosiahnuť minimálne množstvo bodov nevyhnutné na identifikáciu hrán objektu.

Obr. 8. Rozdiel v hustote mračna bodov zemského povrchu (DTM)

a – ortofotosnímka študovaného územia, b – oblasť štrkovej lavice, c – časti nivy s vegetáciou, korytom a bočnou štrkovou lavicou, d – povrch štrkovej lavice rovnomerne pokrytý mračnom bodov, e – oblasti bez výškovej informácie na nive, f – body mračna vykreslené na profile reprezentujúceho štrkovú lavicu a časť nivy, g – body mračna vykreslené na profile reprezentujúceho štrkovú lavicu s chýbajúcimi údajmi a nižšou hustotou bodov na nive.

Ich množstvo a hustota závisí predovšetkým od veľkosti skúmaného objektu a jeho hierarchického zaradenia. Napríklad na identifikáciu štrkových lavíc v danom území bola postačujúca hodnota okolo 1 bodu na m^2 vypočítaná na základe minimálneho počtu bodov mračna pre jednotlivé manuálne klasifikované polygóny. Pri skúmaní jednotlivých sérií akumulácií na štrkovej lavici je nevyhnuté, aby digitálny model obsahoval niekoľko bodov na m^2 a pri identifikácii granulometrického zloženia to musí byť niekoľko bodov na cm^2 (Woodget a Austrums 2017). Podobne aj Vericat et al. (2009) poukazujú na UAV technológiu s vysokým rozlíšením (5 – 10 cm) ako adekvátnu pre mapovanie riečnych koridorov a využiteľnú ako rutinnú technológiu na monitoring vodného toku, automatickú analýzu veľkosti zrna substrátu alebo morfológickú analýzu. Niethammer et al. (2012) poukazujú na ďalší problém UAV fotogrametrie, a to je vplyv nízkej vegetácie (malých kríkov a tráv) na presnosť výsledného modelu, ktorú nie je možné odstrániť z fotogrametrického modelu. Hugenholtz et al. (2013) konštatujú, že UAV fotogrametria je využiteľná najmä pre územia s minimálnou vegetáciou, pričom zdôrazňujú vysoký potenciál UAV fotogrametrie pri sledovaní geodynamických procesov. Klasifikácia mračna bodov zvyšuje presnosť výškového modelu, avšak na druhej strane neumožňuje zachytiť reálny terén a topografiu pod vegetáciou ani po jej odstránení odfiltrovaním z mračna bodov (Rusnák et al. 2016a). V prípade nivy a ostrovov vyskytujúcich sa v sledovanom úseku, riedky zápoj vegetácie umožňuje zachytiť povrch terénu, avšak s výrazne nižšou bodovou hustotou, pričom dochádza k vytváraniu zhlukov bodov, kde optický snímač zachytil zemský povrch. V porovnaní s metódami klasického terénneho mapovania, ktoré vytvára iba schématicizovaný model študovaného územia, Mířijovský a Langhammer (2015) rovnako zdôrazňujú presnosť a spoľahlivosť technológie pri využití vo fluvialno-geomorfologickom výskume.

ZÁVER

UAV predstavujú rýchlo sa rozvíjajúcu platformu pre zber priestorových dát, monitoring a mapovanie územia vo veľkej mierke. Aplikácia počítačových algoritmov prináša oproti klasickým fotogrametrickým metódam vyššiu mieru automatizácie, čo vedie k ich ľahšiemu použitiu a využitiu v širšom spektre vedeckých oblastí. Na druhej strane, zjednodušené a užívateľsky nekomplikované prostredie vedie k využívaniu technológie ako „čiernej skrinky“, kde je dôležité iba naplnenie dátami a výsledky častokrát nie sú spätne verifikovateľné. Bezpilotné prostriedky a UAV fotogrametria poskytujú presné dáta s vysokým rozlíšením, s prijateľnou nadobúdacou cenou a s časovo nenáročným zberom dát. Výsledkom spracovania je kvalitný 3D model študovaného územia s celkovou chybou geometrie 26,42 mm a RMSE chybou 24,59 mm v smere x ; 28,12 mm v smere y a 28,36 mm v smere z . Limitom technológie je tvorba obálky povrchu, ktorý neumožňuje rekonštrukciu povrchu pod hustou vegetáciou. Pre tvorbu digitálneho modelu terénu je preto nevyhnutné získané mračno bodov klasifikovať a filtrovať, pričom dochádza k výraznému poklesu množstva bodov najmä po odstránení bodov vegetácie. Redukcia mračna bodov je tak najvýraznejšia predovšetkým v oblasti nivy a ostrovov, kde zachytáva iba väčšie fluvialne formy reliéfu, a preto je pre ďalšie priestorové analýzy nevyhnutné zhodnotenie kvality takto získaného výškového modelu povrchu terénu.

Príspevok vznikol s podporou Vedeckej grantovej agentúry Ministerstva školstva, vedy, výskumu a športu Slovenskej republiky a Slovenskej akadémie vied (VEGA) číslo 2/0098/18. Letecké práce boli realizované v spolupráci s GEOTECH Bratislava, s. r. o.

LITERATÚRA

- AGISOFT PHOTOSCAN (2017). *User Manual. Professional Edition, Version 1.3*. [Online]. Dostupné na: http://www.agisoft.com/pdf/photoscan-pro_1_3_en.pdf [cit: 15-02-2017].
- ANSTEAD, L., BARABAS, D. (2013). Hydromorfologický prieskum Váhu ako nástroj pre manažment vodných tokov na Slovensku. *Geografický časopis*, 65, 61-81.
- BARKÓCZI, N., BERTALAN, L., SZABÓ, G., DEÁK, M., KÁRI, S., CSENGE VIZI, J., ZAGORÁCZ, M., SIK, A., RIEDEL, M., MÉSÁROS, J., SZALAI, Z., SZABÓ, O., NAGY, B. (2017). Examples from the boundaries of geographic survey: architecture and flood modelling. In Casagrande, G., Sik, A., Szabó, G., eds. *Small flying drones*. Dordrecht (Springer), pp. 127-156.
- BERTALAN, L., TURI, Z., SZABÓ, G. (2016). UAS photogrammetry and object-based image analysis (GEOBIA): erosion monitoring at the Kazár badland, Hungary. *Acta Geographica Debrecina. Landscape and Environment*, 10, 169-178.
- BLIŠTAN, P., KOVANIČ, E., PALKOVÁ, J., ZELIZŇÁKOVÁ, V. (2016a). Overenie použiteľnosti nízkonákladovej fotogrametrie UAV v kontexte banskomeračskej legislatívy Slovenskej republiky. *Kartografické listy*, 24, 3-11.
- BLIŠTAN, P., KOVANIČ, E., ZELIZŇÁKOVÁ, V., PALKOVÁ, J. (2016b). Using UAV photogrammetry to document rock outcrops. *Acta Montanistica Slovaca*, 21, 154-161.
- BLIŠTANOVÁ, M., BLAŽEK, J., BLIŠTAN, P., REITSPIŠ, J., HAVAJ, P. (2016). Support for protection of the large object using UAVs. *Advances in Military Technology*, 11, 227-237.
- BLIŠTANOVÁ, M., BLIŠTAN, P., BLAŽEK, J. (2015). *Mapping of surface objects and phenomena using Unmanned Aerial Vehicle for the purposes of crisis*. SGEM2015 Conference Proceedings, Book 5, Vol. 1, June 18-24, Sofia, pp. 491-500. [Online]. Dostupné na: <https://sgemworld.at/sgemlib/spip.php?article6317> [cit: 25-05-2017].
- BRŮNA, V., PACINA, J., PACINA, J., VAJSOVÁ, E. (2014). Modelling the extinct landscape and settlement for preservation of cultural heritage. *Citta e Storia*, 9, 131-153.
- DIETRICH, J. T. (2016). Riverscape mapping with helicopter-based structure-from-motion photogrammetry. *Geomorphology*, 252, 144-157.
- DUNFORD, R., MICHEL, K., GAGNAGE, M., PIÉGAY, H., TRÉMÉLO, M. L. (2009). Potential and constraints of unmanned aerial vehicle technology for the characterization of Mediterranean riparian forest. *International Journal of Remote Sensing*, 30, 4915-4935.
- FLENER, C., VAAJA, M., JAAKKOLA, A., KROOKS, A., KAARTINEN, H., KUKKO, A., KASVI, E., HYYPPÄ, H., ALHO, P. (2013). Seamless mapping of river channels at high resolution using mobile LiDAR and UAV-photography. *Remote Sensing*, 5, 6382-6407.
- FONSTAD, M. A., DIETRICH, J. T., COURVILLE, B. C., JENSEN, J. L., CARBONNEAU, P. E. (2013). Topographic structure from motion: a new development in photogrammetric measurement. *Earth Surface Processes and Landforms*, 38, 421-430.
- FRANDOFER, M., LEHOTSKÝ, M. (2013). Stupňovitá štruktúra dna koryta vodného toku s výrazným pozdĺžnym sklonom (na príklade horného úseku rieky Topľa). *Geografický časopis*, 65, 141-159.
- FRANDOFER, M., LEHOTSKÝ, M. (2014). Morfológicko-sedimentová diferenciácia horského vodného toku a jeho odozva na povodňové udalosti. *Geomorphologia Slovaca and Bohemica*, 14(1), 5-86.

- GALLAY, M., ECK, CH., ZGRAGGEN, C., KAŇUK, J., DVORNÝ, E. (2016a). 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*, 16-B1, 823-827.
- GALLAY, M., HOCHMUTH, Z., KAŇUK, J., HOFIERKA, J. (2016b). Geomorphometric analysis of cave ceiling channels mapped with 3D terrestrial laser scanning. *Hydrology and Earth System Sciences*, 20, 1827-1849.
- 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*, 44, 277-291.
- HANZL, V., PLÁNKA, L. (1992). Letecké snímkování z malých výšek s využitím dálkově řízených nosičů neměřických kamer. *Vojenský topografický obzor. Sborník topografické služby*, 1, 11 – 12.
- HARWIN, S., LUCIEER, A. (2012). Assessing the accuracy of georeferenced point clouds produced via multi-view stereopsis from unmanned aerial vehicle (UAV) imagery. *Remote Sensing*, 4, 1573-1599.
- HERVOUET, A., DUNFORD, R., PIÉGAY, H., BELLETTI, B., TRÉMÉLO, M. L. (2011). Analysis of post-flood recruitment patterns in braided-channel rivers at multiple scales based on an image series collected by unmanned aerial vehicles, ultralight aerial vehicles, and satellites. *GIScience & Remote Sensing*, 48, 50-73.
- HUGENHOLTZ, CH. H., WHITEHEAD, K., BROWN, O. W., BARCHYN, T. E., MOORMAN, B. J., LECLAIR, A., RIDDELL, K., HAMILTON, T. (2013). Geomorphological mapping with a small unmanned aircraft system (sUAS): feature detection and accuracy assessment of a photogrammetrically-derived digital terrain model. *Geomorphology*, 194, 16-24.
- HUSSON, E., ECKE, F., REESE, H. (2016). Comparison of manual mapping and automated object-based image analysis of non-submerged aquatic vegetation from very-high-resolution UAS Images. *Remote Sensing*, 8, 724-742.
- JAIN, V., TANDOM, S. K., SINHA, R. (2012). Application of modern geomorphic concepts for understanding the spatio-temporal complexity of the large Ganga river dispersal system. *Current Science*, 103, 1300-1319.
- JAMES, M. R., ROBSON, S. (2012). Straightforward reconstruction of 3D surfaces and topography with a camera: accuracy and geoscience application. *Journal of Geophysical Research*, 117, 1-17.
- KIDOVÁ, A., LEHOTSKÝ, M., RUSNÁK, M. (2016). Spatio-temporal geomorphic diversity in the braided-wandering Belá River, Slovak Carpathians, as a response to modern flood periods and environmental changes. *Geomorphology*, 272, 137-149.
- KELCEY, J., LUCIEER, A. (2012). Sensor correction of a 6-Band multispectral imaging sensor for UAV remote sensing. *Remote Sensing*, 4, 1462-1493.
- KOLEJKA, J. (1987). Stav a metody dálkového průzkumu přírodních a antropogenních krajinných struktur na Geografickém ústavu ČSAV v Brně. *Zprávy GGÚ ČSAV*, 24(1), 17-30.
- KOLEJKA, J., PETCH, J. (1989). Geografické vyhodnocení digitalizovaných leteckých snímků vodních objektů. *Sborník ČSGS*, 94, 241-248.
- KRŠLÁK, B., BLIŠŤAN, P., PAULIKOVÁ, A., PUŠKÁROVÁ, P., KOVANIČ, Ľ., PALKOVÁ, J., ZELIZNÁKOVÁ, V. (2016). Use of low-cost UAV photogrammetry to analyze the accuracy of a digital elevation model in a case study. *Measurement*, 91, 276-287.
- LANGHAMMER, J., LENDZIOCH, T., MIŘIJOVSKÝ, J., HARTVICH, F. (2017). UAV-based optical granulometry as tool for detecting changes in structure of flood depositions. *Remote Sensing*, 9, 240.
- LEHOTSKÝ, M., LACÍKA, J. (2007). Typy segmentov dolinovo-riečnych systémov s veľ-vyščinovou zdrojovou zónou: príklad Tatier. *Geomorphologia Slovaca et Bohemica*, 1, 27-35.

- LEJOT, J., DELACOURT, C., PIÉGAY, H., FOURNIER, T., TRÉMÉLO, M. L., ALLEMAND, P. (2007). Very high spatial resolution imagery for channel bathymetry and topography from an unmanned mapping controlled platform. *Earth Surface Processes and Landforms*, 32, 1705-1725.
- MAFANYA, M., TSELE, P., BOTAI, J., MANYAMA, P., SWART, B., MONATE, T. (2017). Evaluating pixel and object based image classification techniques for mapping plant invasions from UAV derived aerial imagery: *Harrisia pomanensis* as a case study. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 129, 1-11.
- MEDVEĐOVÁ, A., PROKEŠOVÁ, R., KRÁTKA, E. (2007). Morfológia bystrinného toku – príklad potoka Vódka. *Geomorphologia Slovaca et Bohemica*, 2, 25-35.
- MICHELETTI, N., CHANDLER, J. H., LANE, S. N. (2015). Structure from motion (SfM) photogrammetry. In Clarke, L. E., Nield, J. M., eds. *Geomorphological techniques*. London (British Society for Geomorphology), pp. 1-12.
- MIKITA, T., JANATA, P., SUROVÝ, P. (2016). Forest stand inventory based on combined aerial and terrestrial close-range photogrammetry. *Forests*, 7, 165-179.
- MÍRJOVSKÝ, J. (2013). *Bezpilotní systémy – sběr dat a využití ve fotogrammetrii*. Olomouc (UP Publishing).
- MÍRJOVSKÝ, J., LANGHAMMER, J. (2015). Multitemporal monitoring of the morphodynamics of a mid-mountain stream using UAS photogrammetry. *Remote Sensing*, 7, 8586-8609.
- MÍRJOVSKÝ, J., MICHÁLKOVÁ, M. Š., PETYŇIAK, O., MÁČKA, Z., TRIZNA, M. (2015). Spatiotemporal evolution of a unique preserved meandering system in Central Europe – the Morava River near Litovel. *Catena*, 127, 300-311.
- MÍRJOVSKÝ, J., PECHANEC, V., BURIAN, J. (2012). Využití bezpilotního modelu PIXY při snímání krajiny. *Informace ČGS*, 31, 11-17.
- MÍRJOVSKÝ, J., VÁVRA, A. (2012). *UAV photogrammetry in fluvial geomorphology*. *SGEM2012 Conference Proceedings*, 2, June 17-23, Sofia, pp. 909-916, [Online]. Dostupné na: <https://sgemworld.at/sgemlib/spip.php?article2043> [cit: 15-02-2017]. DOI: 10.5593/SGEM2012/S08.V2009.
- MÜLLEROVÁ, J., BRŮNA, J., DVOŘÁK, P., BARTALOŠ, T., VÍTKOVÁ, M. (2016). Does the data resolution/origin matter? Satellite, airborne and UAV imagery to tackle plant invasions. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 41-B7, 903-908.
- MÜLLEROVÁ, J., BARTALOŠ, T., BRŮNA, J., DVOŘÁK, P., VÍTKOVÁ, M. (2017). Unmanned aircraft in nature conservation: an example from plant invasions. *International Journal of Remote Sensing*, 38, 2177-2198.
- NEITZEL, F., KLONOWSKI, J. (2011). Mobile 3D mapping with a low-cost UAV system. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 38-C22, 39-44.
- NIETHAMMER, U., JAMES, M. R., ROTHMUND, S., TRAVELLETTI, J., JOSWIG, M. (2012). UAV-based remote sensing of the Super-Sauze landslide: evaluation and results. *Engineering Geology*, 128, 2-11.
- NOVOTNÝ, J., CEBEAUEROVÁ, M. (2016). Vybrané aspekty transformácie fluviálneho systému rieky Váh v 20. storočí. *Geografický časopis*, 68, 73-92.
- NOVOTNÝ, J., LEHOTSKÝ, M., GREŠKOVÁ, A. (2007). Súčasný morfológický vývoj medzihrádzového priestoru (Dunaj, Bratislava). *Geomorphologia Slovaca et Bohemica*, 2, 72-78.
- PACINA, J. (2015). Geodetic surveying as a tool for discovering the prehistoric settlement in Sudan (the 6th Nile cataract). *Geoinformatics FCE CTU*, 14, 47-64.
- PACINA, J., HOLÁ, M. (2014). *Settlement identification in abandoned borderland*. *SGEM2014 Conference Proceedings, Book 2, Vol. 1, June 19-25, Sofia*, DOI: 10.5593/SGEM2014/B21/S8.099
- PACINA, J., POPELKA, J., TOBISCH, M. (2016). Small format aerial photography used for settlement identification in over flooded area. *Interdisciplinarity in theory and practice*, 10, 258-263.

- PACINA, J., SLÁDEK, J. (2015). Observing landscape changes using distant methods. *The Civil Engineering Journal*, 1, 1-11.
- PIŠŮT, P. (1995). Meandrovanie Dunaja pri Bodíkoch pred zmenou charakteru riečiska v 18. storočí. *Geografický časopis*, 47, 285-298.
- PIŠŮT, P. (2002). Channel evolution of the pre-channelized Danube River in Bratislava, Slovakia (1712 – 1886). *Earth Surface Processes and Landforms*, 27, 369-390.
- PIŠŮT, P. (2006). Evolution of meandering Lower Morava river (West Slovakia) during the first half of 20th century. *Geomorphologia Slovaca et Bohemica*, 6, 55-68.
- PIŠŮT, P. (2008). Endangerment of the village Čunovo (Slovakia) by lateral erosion of the Danube River in the 18th century. *Moravian Geographical Reports*, 16, 33-44.
- PIŠŮT, P., TOMČÍKOVÁ, I. (2008). Rekonštrukcia vývoja rieky Smrečínaky v jej odozvovej zóne podľa historických máp. *Geographia Cassoviensis*, 1, 122-127.
- PLÁNKA, L. (1984). Metoda leteckého snímkování z malých výšek. *Zprávy GGÚ ČSAV*, 21(3), 3-12.
- PLÁNKA, L. (1987). The use of radio-controlled aeromodels for photography with the view of remote sensing of the Earth. In *United Nations Training Course „Remote Sensing Applications to Geological Sciences“*, October 5 – 24, 1987, Dresden, *Veröffentlichungen des Zentralinstituts für Physik der Erde*. Potsdam (ZIPE), pp. 58-69.
- PLÁNKA, L. (2014). Počátky snímkování RC-modely letadel v Československu. In *Praktické využití GIS v lesnictví a zemědělství*, Brno, 27. – 28.2.2014. [Online]. Dostupné na: <http://lfgm.fsv.cvut.cz/telc/2014/texty/Planka.pdf> [cit:17-05-2017].
- PLÁNKA, L., KIRCHNER, K., TRNKA, J. (1983). *Snímkování radiem řízeným modelem letadla v oblasti navrhované státní přírodní rezervace Babín*. Zpracováno pro Správu CHKO Žďárské vrchy, Archiv GGÚ ČSAV, Brno, 12 str.
- RUSNÁK, M., BUŠA, J., SLÁDEK, J., GREIF, V. (2016a). Suitability of digital elevation models generated by UAV photogrammetry for slope stability assessment (case study of landslide in Svätý Anton, Slovakia). *Acta Scientiarum Polonorum, Formatio Circumiec-tus*, 15, 439-450.
- RUSNÁK, M., LEHOTSKÝ, M. (2014). Time-focused investigation of river channel morphological changes due to extreme floods. *Zeitschrift für Geomorphologie*, 58, 251-266.
- RUSNÁK, M., LEHOTSKÝ, M., KIDOVÁ, A. (2016b). Channel migration inferred from aerial photographs, its timing and environmental consequences as the response to present-day floods (the case study: the meandering Topľa River, Slovak Carpathians). *Moravian Geographical Report*, 24(3), 32-43.
- RUSNÁK, M., SLÁDEK, J., KIDOVÁ, A., LEHOTSKÝ, M. (2018). Template for high-resolution river landscape mapping using UAV technology. *Measurement*, 115, 139-151.
- SLÁDEK, J., RUSNÁK, M. (2013). Nízkonákladové mikro-UAV technológie v geografii (nová metóda zberu priestorových dát). *Geografický časopis*, 65, 269-285.
- SVOBODOVÁ, J., MIRIJOVSKÝ, J., KILIANOVÁ, H. (2012). The peculiarities of the digital surface model creation from the data acquired by small format photography. *SGEM2012 Conference Proceedings, Vol. 3, June 17-23, Sofia*, 417-424. [Online]. Dostupné na: <https://sgemworld.at/sgemlib/spip.php?article2136> [cit:17-05-2017]. DOI: 10.5593/SGEM2012/S11.V3010
- STUHLÍK, R., STACHOŇ, R., LÁSKA, K., KUBÍČEK, P. (2015). Unmanned aerial vehicle – efficient mapping tool available for recent research in polar regions. *Czech polar reports*, 5, 210-221.
- SZABÓ, G., BERTALAN, L., BARKÓCZI, N., KOVÁCS, Z., BURAI, P., LÉNÁRT, C. (2017). Zooming on aerial survey. In Casagrande, G., Sik, A., Szabó, G., eds. *Small flying drones*. Dordrecht (Springer), pp. 91-126.
- TAMMINGA, A. D., EATON, B. C., HUGENHOLTZ, CH. H. (2015). UAS-based remote sensing of fluvial change following an extreme flood event. *Earth Surface Processes and Landforms*, 40, 1464-1476.

- THÉVENET, A., CITTERIO, A., PIÉGAY, H. (1998). A new methodology for the assessment of large woody debris accumulations on highly modified rivers (example of two French piedmont rivers). *Regulated Rivers: Research & Management*, 14, 467-483.
- TOMAŠTIK, J., MOKROŠ, M., SALOŇ, Š., CHUDÝ, F., TUNÁK, D. (2017). Accuracy of photogrammetric UAV-based point clouds under conditions of partially-open forest canopy. *Forests*, 8, 151-167.
- TOMČIKOVA, I. (2007). Hierarchická klasifikácia riečnej krajiny na príklade rieky Smrečianka. *Geographia Cassoviensis*, 1, 193-196.
- TURNER, D., LUCIEER, A., de JONG, M. (2015). Time series analysis of landslide dynamics using an unmanned aerial vehicle (UAV). *Remote Sensing*, 7, 1736-1757.
- ULLMAN, S. (1979). *The interpretation of visual motion*. Cambridge (MIT Press).
- VERICAT, D., BRASINGTON, J., WHEATON, J., COWIE, M. (2009). Accuracy assessment of aerial photographs acquired using lighter-than-air-blimps: low-cost tools for mapping river corridors. *River Research and Applications*, 25, 985-1000.
- WESTOBY, M. J., BRASINGTON, J., GLASSER, N. F., HAMBREY, M. J., REYNOLDS, J. M. (2012). "Structure from motion" photogrammetry: a low-cost, effective tool for geoscience applications. *Geomorphology*, 179, 300-314.
- WOODGET, A. S., AUSTRUMS, R. (2017). Subaerial gravel size measurement using topographic data derived from a UAV-SfM approach. *Earth Surface Processes and Landforms*, 42, 1434-1443.

Miloš Rusnák, Ján Sládek, Anna Kidová

USING UAV TECHNOLOGY FOR LANDSCAPE CLASSIFICATION AND MAPPING IN FLUVIAL GEOMORPHOLOGY

The main aim of this paper is to present the possibilities of UAV technology (Unmanned Aerial Vehicle) for the identification and mapping of fluvial landforms and analysis of the point cloud density after vegetation filtration in fluvial geomorphic research. The accuracy and density of classified point cloud and orthophotomosaics in riparian zone within several geomorphic landforms and different vegetation covers was assessed. UAV technology enables to apply a new and perspective method for spatial data collection, monitoring and mapping in large scale research. For monitoring of the selected Belá River reach the UAV system from the HiSystem company was used: HEXAKOPTER XL with 6 rotors and the Sony NEX 6 camera with 16-50 mm lens. Spatial referencing was performed with 38 control points (GCP – Ground Control Point) targeted by RTK GPS Leica Zeno 5 with a GG03 antenna and an accuracy of 11 mm. For data processing Agisoft PhotoScan software was used, which operates on the principle of the SfM algorithm. The advantages of this method is the high level of automation. UAV photogrammetry provides accurate data with a high resolution, affordable acquisition cost and represent a less time-consuming data collection technique. Total geometry error was 80 mm and the RMSE (root mean square error), after aligning all the images, was 60.121 mm (*x* coordinate), 43.7584 mm (*y* coordinate) and 29.46 mm (*z* coordinate). The density of 3D point clouds was 240 points per m² and an orthophotomosaic was generated with a pixel resolution of 0.021 m. Proficient automated classification (supervised Maximum Likelihood Classification) was achieved for the "vegetation" and "gravel bar" classes and the lower accuracy of water class due to vegetation class cover overhanging the bank line, visible bedrock under the water level classified in the bare-surface class and the graveled channel bed in the gravel-bar class was observed. The SfM algorithm creates an envelope surface model with vegetation cover and for that the resulting point cloud was semiautomatically classified in the software Terrasolid – Terrascan (Microstation), in the following five classes: high vegetation (over 5 m), medium vegetation (from 1.5 m to 5 m), small vegetation (from 0.2 m to 1.5 m), topographic surface and water surface. The classification of point clouds increases the accuracy elevation model, but on the other hand, does not capture the real terrain and topography under the vegeta-

tion. The sparse vegetation canopy allows the capture of the surface of the ground, but with a significantly lower point density and therefore it is necessary to evaluate the quality and thus obtained elevation model. The average density of points per square meter is the most significant drop in the category of the floodplain (from 131.7 points per m^2 to 2.8 points per m^2), wherein the density of points is increased with the increasing height of the vegetation. In the areas with dense vegetation there is an obvious significant loss of information of the surface height.