

BEZPILOTNÉ SYSTÉMY VO FYZICKEJ GEOGRAFII

UNMANNED AERIAL SYSTEMS IN PHYSICAL GEOGRAPHY

Ján Sládek, Slovenská akadémia vied, Geografický ústav + GEOTECH Bratislava
geogslad@savba.sk Miloš Rusnák, Slovenská akadémia vied, Geografický
ústav geogmilo@savba.sk

Abstract

The paper deals with the usage of UAVs (Unmanned Aerial Vehicles) in the field of physical geography and geosciences. It begins with a short historical overview of the UAV development, continues with an introduction of an unmanned aerial vehicle as a tool for geosciences and also outlines a legislation of the Slovak Republic and the Czech Republic concerning the proper UAV usage. The last part of the paper offers several examples addressing scientific and commercial projects in which UAVs were used.

Klíčová slova

UAV, geografie, 3D model, mapování

Key words

UAV, geography, 3D model, mapping

ÚVOD

Bezpilotné lietajúce zariadenia predstavujú lietajúce prostriedky schopné letu bez ľudskej posádky na palube, ktorá takéto zariadenie riadi – pilotuje. Tieto zariadenia majú rôzny tvar, veľkosť a typ pohonu. V médiách a laickej verejnosti sa dnes najčastejšie stretávame s pojmom *dron*. Pôvod tohto slova nie je presne definovaný, často sa jeho etymológia

uvádza z anglického slova *drone*, čo znamená hučať, bzučať. Podobný význam má aj nemecké slovo *drohne*. Začiatok používania pojmu *dron* spadá do tridsiatych rokov 20. storočia a spája sa s vojenskými bezpilotnými prostriedkami. V odborných kruhoch sú preto skôr zaužívané pomenovania vychádzajúce z anglického prekladu skratiek – UAV (*Unman-*

ned Aerial Vehicle – bezpilotné lietajúce zariadenie), RPAS (Remotely Piloted Aircraft System – diaľkovo ovládaný lietajúci systém), UAS (Unmanned Aerial System – bezpilotný lietajúci systém) a pod.

Rozšírenie bezpilotných prostriedkov v civilnom sektore nastalo vplyvom miniaturizácie technológií a cenovej dostupnosti až koncom 20. storočia. Od tejto doby bezpilotné systémy postupne prenikajú do bežného života a stávajú sa pomocníkmi v médiách, pri fotografovaní, videoprodukcii, poľnohospodárstve, lesníctve, vede a výskume, ale aplikácie s použitím bezpilotných systémov sa dajú využiť napr. aj v stavebníctve, priemysle, geodézii, kartografii, doprave či architektúre a mnohých iných odvetviach. Výstupmi podľa druhu použitých snímačov potom môžu byť letecké snímky, digitálne modely reliéfu, 3D modely rôznych objektov, ortofoto mapy, mračná bodov, datové sady z rôznych snímačov, multispektrálnych, hyperspektrálnych či termo kamier, senzorov znečistenia ovzdušia a mnohé iné. Cieľom príspevku je predstavenie a využitie bezpilotných prostriedkov vo fyzicko-geografickom, resp. geovednom výskume potenciálnym používateľom, ktorí doposiaľ s touto technológiou neprišli do bližšieho kontaktu. V závere príspevku uvádzame prehľad niektorých štúdií, pri ktorých sme využili bezpilotné prostriedky.

Stručná história

Hoci sa bezpilotné systémy dostali do povedomia širokej verejnosti len pred niekoľkými rokmi, ich existencia ako sme naznačili vyššie, má omnoho dlhšiu históriu. Počiatky a vývoj bezpilotných systémov boli späté s vojenským priemyslom. Medzi prvé použitie nepilotovaných letov, resp. letu bez ľudskej posádky na palube letiaceho zariadenia, možno zaradiť nasadenie teplovzdušných balónov vybavených náložami vo vojne Rakúskej monar-

chie proti Benátskej republike v roku 1849, kde sa rakúske vojská takýmto spôsobom pokúšali dobyť zabarikádovaných Benátčanov (Watts et al. 2009). Prvé lietajúce zariadenia boli skonštruované počas prvej svetovej vojny a boli nimi okrídlené motorizované bomby (1916 – Archibald Montgomery Low, 1918 – Charles Kettering). Napriek niekoľkým úspešným testom neboli tieto zariadenia nikdy reálne nasadené. V 30. až 50. rokoch 20. storočia boli vo Veľkej Británii a Spojených štátoch Amerických bezpilotné prostriedky využívané ako cvičné ciele pre britské kráľovské námorníctvo, resp. americkú armádu na výcvik reakcie pilotov pred riadenými strelami (Karas, Tichý 2016). Počas 2. svetovej vojny sa k mocnostiam pracujúcim na vývoji bezpilotných prostriedkov pridalo aj Nemecko svojimi riadenými strelami V1. Takzvaná studená vojna rozpútala nielen preteky v zbrojení, ale aj v nasadení špiónážnych systémov. Na bezpilotné lietadlá boli umiestňované snímače, ktoré boli zamerané najmä na získavanie obrazových alebo filmových záznamov z nepriateľského územia. V 90. rokoch sa bezpilotné prostriedky použili napr. v občianskej vojne v bývalej Juhoslávii na monitorovanie a zabezpečenie územia v reálnom čase. Dnes je použitie vojenských bezpilotných prostriedkov (dronov) dôležitou súčasťou výbavy väčšiny moderných armád či svetových mocností.

Bezpilotné prostriedky v geovednom výskume

V geovednom výskume sú bezpilotné prostriedky najčastejšie používané ako nosiče zariadení pre zber dát. Vdnešnej dobe trh ponúka veľa druhov a tvarov bezpilotných systémov s rozličnými fyzickými parametrami (rotorové, multirotorové, krídlové atď. – vid' Tab. 2), a teda užívateľ má možnosť výberu rôznych platforiem, ktoré sú pre zamýšľaný projekt alebo prácu najvhodnejšie. Zo snímačov sú

pre geovedné aplikácie ako zariadenia pre zber dát najdostupnejšie rôzne druhy digitálnych fotoaparátov (od jednoduchých kompaktných po digitálne zrkadlovky), ďalej potom štandardné videokamery alebo špecializované termo-, multi- a hyperspektrálne kamery, LiDAR-y, rôzne analyzátory plynov a mnohé ďalšie senzory. V bežnej praxi sa zatiaľ najčastejšie stretávame s použitím digitálnych fotoaparátov, preto bude v nasledujúcich kapitolách venovaná širšia pozornosť zberu dát práve pomocou takýchto snímačov.

Použitie bezpilotných zariadení v geovednom výskume nie je úplnou novinkou ani v našich končinách. Jedným z prvých pokusov nasadiť bezpilotné systémy pre vedecké využitie na území Československa mal koncom 70. a v 80. rokoch 20. storočia tím pracovníkov Geografického ústavu Československej akadémie vied v Brne. Počas takmer 20 rokov používali pre zber dát viacero upravených modelov krídel typu Rogallo ovládaných šesťkanálovým vysielateľom. Pre zber dát boli použité upravené fotoaparáty Flexaret. Z tohto obdobia vzniklo aj viacero zaujímavých publikácií a záverečných správ z výskumu, napríklad Plánka 1984, Plánka 1987, Plánka et al. 1983, Kolečka 1987, Kolečka a Petch 1989, Hanzl a Plánka 1992. Táto metóda zberu dát, hoci inovatívna, bola najmä pre veľkú náročnosť spracovania údajov bez použitia výkonnej výpočtovej techniky pozastavená.

Legislatívne podmienky prevádzky bezpilotných prostriedkov v SR a ČR

Problematika prevádzky bezpilotných lietajúcich prostriedkov na celoeurópskej úrovni nie je zatiaľ uspokojivo vyriešená. Jednotné európske legislatívne podmienky sú momentálne (2016) v príprave, pričom do platnosti by mali vstúpiť až o niekoľko rokov. V súčasnosti legislatívne podmienky prevádzky bezpilotných prostriedkov upravujú národ-

ne letecké úrady. V Slovenskej republike (SR) spadá prevádzka bezpilotných prostriedkov pod gesciu Dopravného úradu – divíziu civilného letectva. Na web stránke úradu <https://goo.gl/ghJfrj> možno nájsť najnovšie informácie o podmienkach prevádzky bezpilotných lietajúcich prostriedkov.

Vzhľadom na nastavené podmienky prevádzky UAV v SR spadá použitie UAV pre zber dát v rámci vedeckého výskumu do konania s Dopravným úradom. Konaniu s Dopravným úradom podliehajú všetky UAV alebo modely lietadiel, ktoré sú ťažšie ako 20 kg, alebo používané na komerčné účely (za odplatu), resp. na vykonávanie leteckých prác, pričom za vykonávanie leteckých prác sa chápe aj fotografovanie a natáčanie videozáznamov. To znamená, že, ak chce užívateľ alebo organizácia prevádzkovať UAV za vyššie spomenutými účelmi, musí splniť základné podmienky:

1. Poistenie UAV voči zodpovednosti za škodu spôsobenou prevádzkou UAV;
2. Registrácia UAV na dopravnom úrade;
3. Ovládať UAV na účely vykonávania leteckých prác môže iba osoba s osvedčením o odbornej spôsobilosti (obdobu pilotného preukazu). Pre jeho získanie je potrebné na Dopravnom úrade absolvovať teoretické a praktické skúšky;
4. Vypracovanie prevádzkovej príručky;
5. Povoľenie na vykonávanie leteckých prác;
6. Povoľenie Ministerstva obrany na letecké snímkovanie

V Českej republike (ČR) je situácia mierne odlišná. Prevádzku bezpilotných prostriedkov vo vzdušnom priestore upravuje Úrad pro civilní letectví (ÚCL). Na svojej web stránke <https://goo.gl/b9LhHn> podáva potenciálnemu užívateľovi podmienky potrebné na prevádzku bezpilotných prostriedkov vo vzdušnom priestore ČR. Na rozdiel od SR, kde je v platnosti Rozhodnutie 1/2015 z 19.8.2015, ktorým sa určujú podmienky vykonania letu lietadlom spô-

sobilom lietať bez pilota vo vzdušnom priestore SR, v ČR upravuje podmienky prevádzky bezpilotných lietadiel Doplnok X, predpisu L2. Podobne ako vo väčšine európskych krajín, aj v ČR je komerčná činnosť vykonávaná bezpilotnými prostriedkami viazaná na určité povolenia od ÚCL. Schematicky možno tento postup zhrnúť nasledovne:

1. Evidencia pilota lietadla bez pilota a povolenie na lietanie
2. Preskúšanie pilota pracovníkmi ÚCL (teoretické a praktické vedomosti)
3. Poistenie zodpovednosti za škodu spôsobenú prevádzkou UAV
4. Vypracovanie prevádzkovej príručky
5. Povolenie na vykonávanie leteckých prác

Na rozdiel od SR, v ČR získavajú všetky UAV imatrikulačnú značku, ktorá je potrebná napr. pri uzavretí poistenia zodpovednosti za škodu spojenú prevádzkou lietadla. Podrobnejšie je celý postup rozpísaný v príslušných právnych úpravách alebo v publikácii Karas a Tichý (2016). Treba si však uvedomiť, že príslušný postup je platný k obdobiu písania príspevku, t.j. r. 2016. V budúcnosti sa tento postup môže meniť aj v súvislosti s pripravovanou jednotnou európskou legislatívou.

Pomerne diskutovanou problematikou z hľadiska nasadenia bezpilotných prostriedkov pri fotografovaní a natáčaní videozábberov je Zákon o ochrane osobných údajov a v prípade SR aj Zákon o ochrane utajovaných skutočností (č. 215/2004 Z.z.), ktoré vo výraznej miere obmedzujú voľnejšie nasadenie bezpilotných prostriedkov v komerčnej sfére ale aj pri geovednom výskume..

Typy a rozdelenie bezpilotných prostriedkov

Koncom 90-tych rokov 20. storočia sa objavujú prvé UAV aj v civilnom sektore v poľnohospodárstve, lesníctve a prieskume. V tejto dobe už existuje veľké množstvo UAS špecifických tvarov, veľkostí, nosnosti, doletu atď., ktoré výrobcovia dokážu prispôbiť priamo pre daný účel použitia. Zaradiť UAV do jednotlivých skupín nie je z tohto dôvodu jednoduché aj vzhľadom na to, že mnoho charakteristík týchto zariadení sa vzájomne ovplyvňuje, čo vplýva na ich letové a užívateľské vlastnosti (Sládek a Rusnák 2013).

Jedny zo základných klasifikácií civilných bezpilotných systémov vychádza z klasifikácie veľkých lietadiel (Tab. 1, 2).

Názov kategórie	Hmotnosť [kg]	Dosah [km]	Výška letu [m]	Výdrž [hodiny]
Mikro UAV	< 5*	< 10	< 150 – 300*	< 1
Mini UAV	< 25 – 150*	< 10	< 300	< 2
UAV s krátkym doletom	25 – 150	10 – 30	3000	2 – 4
UAV so stredným doletom	50 – 250	30 – 70	3000	3 – 6
Vysoko letiace UAV s dlhou výdržou	> 250	> 70	> 3000	> 6

* Hodnoty závisia podľa schválených noriem jednotlivých krajín

Tab. 1 Rozdelenie UAV podľa rôznych kritérií. Upravené podľa Eisenbeiss 2009 (Sládek a Rusnák 2013).

	Ľahšie ako vzduch	Ťažšie ako vzduch		
Bez pohonu	Balóny	Skladacie krídla	Pevné krídla	Rotorové
		Závesné klzáky	Klzáky	Rotorové draky
		Paraglidy		
		Draky		
S pohonom	Vzducholode	Paraglidy	Vrtuľové	Jedno rotorové
			S prúdovým pohonom	Koaxiálne
				Štvorrotorové
				Multirotorové

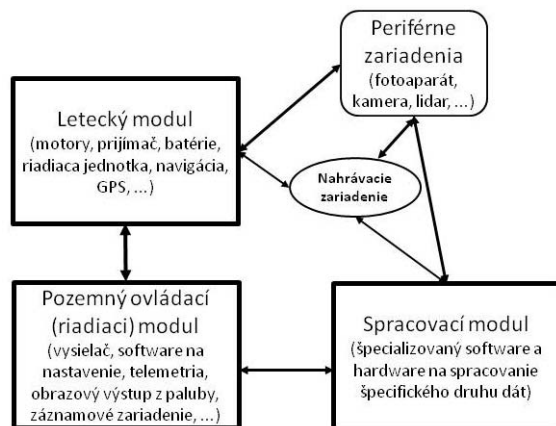
Tab. 2 Klasifikácia UAV podľa typu pohonu a hmotnosti. Prevzaté z Eisenbeiss 2009.

U nás možno v súčasnosti považovať za najrozšírenejšiu kategóriu bezpilotných prostriedkov tzv. mikro, resp. mini UAV (klasifikácia podľa hmotnosti). Tieto druhy menších prostriedkov disponujú oproti veľkým UAV (UAS) či konvenčným lietajúcim prostriedkom ako lietadlá a vrtuľníky viacerými výhodami. Kompaktnými rozmermi sú vhodnejšie na prepravu na miesto, z ktorého majú operovať. Transport na miesto určenia zvládne jeden alebo dvaja ľudia. Mnohé sa pri transporte na väčšie vzdialenosti dajú umiestniť do batožinového priestoru bežných osobných motorových vozidiel. V poslednej dobe sú však použiteľné pre rôzne aplikácie aj UAV s celkovou hmotnosťou pod dva kilogramy a veľkosťou nepresahujúcou 30 cm, čím sa ich transport ešte viac zjednodušuje. Na druhej strane malé a ľahké UAV majú svoje limity predovšetkým v jednocelosti, kedy je užívateľ viazaný napr. na výrobcu predprípravený snímač, väčšinou malú kameru či fotoaparát s limitovaným rozlíšením. Ďalším limitujúcim faktorom malých a ľahkých UAV sú poveternostné podmienky, najmä rýchlosť vetra. Najväčšou prednosťou UAV v porovnaní s konvenčnými leteckými zariadeniami (lietadlá, vrtuľníky, a pod.) je ich priaznivejšia cena, náklady na prevádzku a možnosť výberu času nalietavania a jeho opakovania, ktoré je limitované iba (odhliadnuc od legislatívnych podmienok) vonkajšími poveternostnými podmienkami.

Aj keď v dnešnej dobe existuje nespočetné množstvo rôznych UAS, väčšina týchto systémov sa skladá z troch základných častí – modulov (Obr. 1)

1. Letecký modul

Je tvorený samotným lietajúcim zariadením (UAV), v ktorom je umiestnená riadiaca elektronika a môže niesť na palube rôzne záznamové zariadenia (videokamera, spektrálna kamera, LiDAR, fotoaparát,...). Na spracovanie pokynov operátora zo zeme slúži prijímač, ktorý je umiestnený na palube UAV. Väčšina bežne dostupných UAV je konštruovaná s použitím



Obr. 1 Základné zložky UAS. Šípky znázorňujú smer toku dát medzi jednotlivými modulmi. Upravené podľa Sládek a Rusnák 2013.

komponentov a elektrického vybavenia ktoré využívajú (leteckí) modelári, a teda aj prijímač signálu aby spĺňal legislatívne parametre väčšiny európskych krajín vrátane SR a ČR pracuje vo vyhradenom frekvenčnom pásme pre diaľkovo ovládané modely 2,4 GHz. Tieto systémy ovládania sú počítačovo riadené, takže do komunikácie medzi spárovaným vysielačom a prijímačom nie je možné bežným spôsobom zasiahnuť, čím sa eliminuje napr. narušenie komunikácie iným vysielačom. Navigáciu v priestore umožňuje navigačná a IMU (Inercial Measurement Unit) jednotka. Výšková stabilizácia potrebná napr. pri snímkaní je zabezpečená výškomerom, prípadne údajmi z globálnych navigačných satelitných systémov (GNSS) alebo ultrazvukovými senzormi. UAV môžu byť voliteľne rozšírené ovládacími modulmi pre jednotlivé periférne pripojené záznamové zariadenia a umožňujú tak prenos dát na zem alebo do záznamového úložiska (dátová karta, hard disk a pod.).

2. Ovládací (riadiaci) modul

V kategórii mikro a mini UAV je to najčastejšie vysielač alebo sústava vysielačov, na ktoré môžu byť napojené rôzne moduly (napr. telemetrické,

záložné a pod.) potrebné pre bezpečné ovládanie leteckého modulu. Ovládací modul môže ovládať letové zariadenie tromi spôsobmi. Prvý je priamy – manuálny, kedy operátor(i) zo zeme riadi pohyb stroja, jeho funkcie a funkcie periférnych zariadení na palube pomocou vysielачa alebo počítača. Druhý spôsob je automatický, kedy sa do lietajúceho zariadenia naprogramuje dráha letu (väčšinou podľa navigačných bodov importovaných do navigačného modulu na palube), miesto pristátia a činnosť, ktorú má zariadenie vykonávať počas letu (snímkovanie, natáčanie videa, zber dát pomocou lidarů atď.). Taktiež je vo väčšine zariadení možné prednastavenie azimutu či sklonu záznamových zariadení vzhľadom k horizontálnej rovine. V takomto móde je väčšina systémov schopná autonómneho letu, ktorý však podľa rozhodnutia Dopravného úradu vo vzdušnom priestore SR nie je povolený, preto musí byť operátor schopný kedykoľvek prevziať kontrolu nad systémom a operovať iba v línii dohľadu. Tretí spôsob ovládania predstavuje kombináciu predchádzajúcich dvoch – poloautomatické riadenie, kde sa niektoré kroky môžu naprogramovať

pre automatickú funkčnosť a operátor(i) sa potom môže sústrediť napríklad iba na pilotovanie alebo iba na zber dát. Podľa legislatívnych podmienok prevádzky bezpilotných zariadení je potrebné, aby sa pilot-operátor sústredil iba na pilotovanie a kontrolu samotného samotného UAV, preto sa pre zber dát, alebo videoprodukcii môžu použiť duálne systémy ovládania, kedy kameru alebo iný senzor ovláda pomocou druhého vysielачa druhý operátor.

3. Spracovací modul

Predstavuje súbor softvérových a hardvérových produktov navrhnutých na spracovanie konkrétneho druhu získaných dát. V geografii, geológii, kartografii, geodézii a iných príbuzných disciplínach sa UAV (UAS) používajú predovšetkým na zber obrazových dát za účelom tvorby 3D modelov povrchu, modelov budov, DTM (digitálneho modelu terénu) alebo ortofotosnímkov. Pre spracovanie týchto dát dnes existuje niekoľko softvérových možností založených na nekomerčných, (zväčša pre akademické využitie) alebo komerčných technológiách. Vybrané softvérové možnosti uvádzame v tabuľke 3.

Tab. 3 Vybrané softvérové platformy pre spracovanie dát z UAV.

Produkt	výrobca / vydávateľ	komerčný	nekomerčný	spracovanie / generovanie výstupov				poznámka
				ortofoto	3D model (mesh)	mračno bodov - Fotogrametria + LIDAR	multispektrálne snímky	
Pix4Dmapper Pro	Pix4D	X		X	X	X		Dostupné pre rôzne platformy - mobilná, desktop, cloud
Pix4Dag	Pix4D	X		X			X	
PhotoScan	Agisoft	X		X	X			desktop, možnosť sieťového processingu dát
PhotoScan Pro	Agisoft	X		X	X	X	X	
Airphoto SE	University of Cologne		X	X				
Arc 3D	KU Leuven		X		X			
Photosynth	Microsoft	X			X			Momentálne ukončený
Bundler	Cornell university		X		X			
TerraScan	Terrasolid	X			X	X		funguje iba ako nadstavba Microstation
TerraModeler	Terrasolid	X			X			
TerraPhoto	Terrasolid	X		X	X	X		
TerraMatch	Terrasolid	X				X		
LP360	GeoCue Group	X				X		Standalone verzia aj nadstavba pre Arc GIS
Meshlab			X		X			
Reality Capture	Capturing Reality	X		X	X			Momentálne nemožnosť zobraziť mesh v prostredí RC (na zobrazenie nutný napr. Meshlab)
Context Capture	Bentley	X		X	X			
CloudCompare			X			X		
3D Reashaper	Technodigit							
UAS Master	Trimble	X		X	X	X		
3D Survey	Modri planet	X		X	X			

Mobilné mapovanie

UAS sú v geovedných aplikáciách často využívané na získavanie základnej bázy údajov (verné ortofotosnímky, digitálne modely terénu). Ďalej majú potenciál sa presadiť ako široko využiteľné a flexibilné mobilné mapovacie jednotky. Neitzel a Kolonowski (2011) rozdelili proces mobilného mapovania pomocou UAV do piatich krokov, pričom za najpodstatnejšie možno považovať nasledujúce tri kroky:

1. Proces výberu vhodnej platformy

Výber vhodnej platformy závisí od účelu snímkovania, typu, hmotnosti a veľkosti snímača použitého pre zber dát. Nemenej dôležitá je aj veľkosť územia, ktoré plánujeme snímkovať. Kým pre malé alebo bodové lokality a vertikálne snímkovanie objektov sú vhodné predovšetkým rotorové platformy, ktoré sú schopné letu pomalými rýchlosťami, letu vo vertikálnom smere a vysokou mierou manévrovateľnosti aj v malých priestoroch, pre rozľahlé územia sú vhodnejšie krídlivé nosiče s väčšou výdržou a letiace ustálenou rýchlosťou.

2. Proces získavania dát

Závisí od použitého zariadenia pre získavanie dát. Vo všeobecnosti je potrebné skontrolovať záznamové zariadenie a nastaviť ho na požadované hodnoty zberu. Na malých UAV nosičoch sa pre fotogrametrický zber dát najčastejšie používajú bežne dostupné digitálne fotoaparáty, preto je potrebné venovať zvýšenú pozornosť ich kalibrácii a funkcionalite. Samotnému zberu dát pomocou bezpilotných zariadení by malo predchádzať získanie všetkých potrebných povolení na snímkovanie (napr. súhlas od majiteľa snímkovanej lokality alebo objektu, príslušné povolenia od úradov a pod.), rekognoskačný prieskum, kde pilot určí miesto vzletu, pristátia, prípadne núdzové postupy, všíma si možné prekážky, ktoré môžu ohroziť plánovaný let. V ďalšom kroku je potrebné si vypracovať projekt snímkového letu,

zistiť stav počasia v deň letu, zistiť využitie vzdušného priestoru v mieste snímkovania a v prípade potreby koordinovať svoju činnosť s riadením letovej prevádzky. Ak má byť výstupom priestorovo priradený digitálny model terénu alebo ortofotosnímka, pred samotným snímkovaním je potrebné vhodne rozmiestniť alebo určiť a presne zamerať tzv. vlíčovacie body, pomocou ktorých sa pri spracovaní požadovaný produkt priestorovo priraduje.

Samotné snímkovanie je následne možné vykonať podľa druhu použitého zariadenia buď manuálnym riadením platformy, alebo (polo)automaticky letom po navigačných bodoch, ktoré boli pripravené pri vypracovaní snímkového letu.

3. Proces spracovania dát

Vyhodnocovanie a spracovanie dát získaných z UAV predstavuje v dnešnej dobe oveľa jednoduchší spôsob, ako tomu bolo pred niekoľkými rokmi. Ako sme uviedli na príklade tabuľky 3, na spracovanie dát existuje niekoľko voľných, ale aj komerčných softvérových produktov. V tomto prípade ale platí, že komerčné softvérové riešenia väčšinou predstavujú univerzálnejší, užívateľsky prívetivejší a jednoduchší spôsob spracovania dát. Nevýhodou je často vysoká cenová náročnosť aj niekoľko tisíc EUR. Pretože sa pre (fotogrametricky) zber dát používajú predovšetkým nemeracské kamery, je z určitých dôvodov potrebný zber veľkého objemu dát. Neraz je to z jedného snímkovania aj niekoľko desiatok GB dát. Ich spracovanie je preto pomerne náročné na výpočtovú kapacitu počítača alebo výpočtového servera.

Pri spracovaní je možné z nasnímaných údajov generovať rôzne druhy dát, napr. letecké pohľadové snímky, ortofoto snímky, mračná bodov, digitálne výškové alebo digitálne modely terénu a mnoho ďalších parametrov vychádzajúcich zo spracovania primárnych dát. Výsledné produkty je možné importovať do rôznych GIS alebo CAD systémov a ďalej tak s nimi pracovať a analyzovať ich.

Vybrané príklady použitia bezpilotných systémov

V nasledujúcej kapitole prinášame niekoľko aplikácií, pri ktorých sme použili ako nosiče záznamových médií bezpilotné lietajúce prostriedky. Vzhľadom na charakter lokalít – plošne málo rozsiahle areály – sme pre získavanie dát použili rotorové platformy Hexakopter XL od nemeckého výrobcu HiSystems (Obr. 2) a Altura Zenith ATX8 holandského výrobcu Aerialtronics (Obr. 3).



Obr. 2 HiSystems Hexakopter XL.



Obr. 3 Altura Zenith ATX 8 s termálnou kamerou.

Hexakopter XL predstavuje šesť rotorovú platformu schopnú niesť v podvese náklad do hmotnosti 1,5 kg. Doba letu sa podľa poveternostných podmienok a hmotnosti nákladu pohybuje od 9 do 15 minút. Maximálna vzletová hmotnosť UAV

predstavuje 5,5 kg. Maximálna rýchlosť vetra pri ktorej je možné toto zariadenie prevádzkovať je 10 m/s, no vzhľadom na hmotnosť celého zariadenia si ovládanie pri rýchlostiach vetra nad 7 m/s vyžaduje určité skúsenosti. Za optimálnych podmienok je schopné zariadenie letieť rýchlosťou okolo 40 km/h.

Altura Zenith ATX8 je oktokoptyr (osem rotorový systém) s koaxiálne usporiadanými motormi. Takáto koncepcia konštrukcie spolu s aerodynamicky tvarovaným karbónovým monokokom umožňuje vysoký výkon, bezpečnosť v porovnaní so štvor alebo šesť vrtulovými prostriedkami a aj stabilitu letu pri zachovaní kompaktných rozmerov. Užitočná nosnosť predstavuje 2,9 kg pri maximálnej vzletovej hmotnosti 8,5 kg. Doba letu sa pohybuje od približne 10 minút pri ťažších nákladoch po 25 minút s ľahšími nákladmi pri ideálnych podmienkach. Vzhľadom na svoju konštrukciu umožňuje Altura Zenith ATX8 let aj v náročných poveternostných podmienkach pri vetre do rýchlosti 14 m/s, mrholení, či miernom snežení. Zariadenie má tri letové režimy, pričom pri plne manuálnom ovládaní bez podpory stabilizačných systémov je schopné letu až 72 km/h. Stabilizovaný systém riadenia umožňuje letieť rýchlosťou približne 10 km/h a autonómny stabilizovaný let podľa typu nastavenia až 50 km/h.

Vzhľadom na technické možnosti zariadení a dostupnej foto techniky boli ako snímače pre zber dát použité fotoaparáty Nikon D90 (objektív Nikon AF-S 18–105mm f/3,5–5,6G DX ED VR), Nikon D610 (objektív Nikkor 20mm f/2.8D AF) a Sony NEX6 (objektív Sony 16–50mm). Objektívy s premenlivým ohniskom boli zafixované na kratšom konci, tak aby počas letu nedochádzalo k posunu optických členov objektívu, a tým pádom aj k zmene ohniskovej vzdialenosti, čo by mohlo spôsobiť ťažkosti pri spracovaní zozbieraných dát. Zozbierané údaje boli spracované fotogrametricky v prostredí Agisoft PhotoScan.

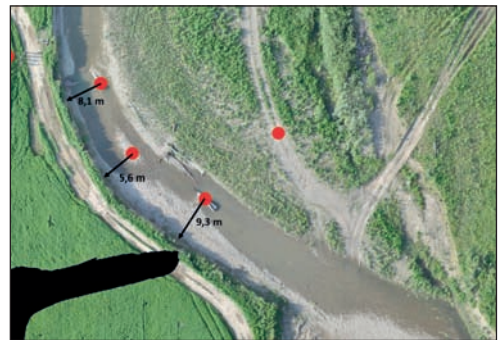
Monitoring avulzného koryta rieky Ondava

Avulzné koryto vzniklo po troch povodňových udalostiach v roku 2010 – Q_{culm} $150 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (17. 5.), $220 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (4. 6.) a $150 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (29. 7.) – zodpovedajúcich 1 – 5 N ročným prietokom. V tomto roku došlo k vytvoreniu a dočasnému sprietočneniu koryta. Monitoring sa realizuje po obdobiach s významnejšími prietokmi v koryte, pri ktorých sa v danom území predpokladá výraznejšia miera brehovej erózie. Parametre jednotlivých letov a presnosť modelov kontrolovaná na GCP sú uvedené v Tab. 4.

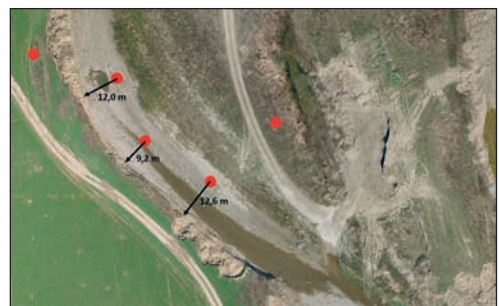
Pre účely monitoringu vývoja koryta boli vyhotovené série ortofotosnímkov, mračná bodov a digitálne modely terénu, resp. digitálne výškové modely územia. Význam monitoringu spočíval najmä v sledovaní vývoja momentálne trvalo neprietočného koryta (prietočného iba za vyšších vodných stavov) v rámci nivy a následkov erózie brehu na poľnohospodársku pôdu. Z vyhotovených ortofotosnímkov bolo zistené, že za dané obdobie v sledovanom úseku pravý breh rieky bočne erodoval priemerne okolo 4,5 m. Príklad dokumentujúci pohyb brehovej línie je zobrazený na sérii Obr. 4–6. Červené body na obrázkoch predstavujú stabilizované body a šípky s číselným údajom udávajú vzdialenosť brehovej línie od jednotlivých bodov v príslušnom období snímkovania. Maximálny posun za sledované obdobie – približne 8 m – bol zaznamenaný na nárazovom brehu oblúka (najjužnejší z trojice bodov). Spracované ortofotosnímky z územia je možné následne použiť aj pre monitoring vegetačnej sukcesie vo vytvorenom koryte v jednotlivých sledovaných obdobiach.

rok	2012	4/2014	7/2014
Platforma	Hexakopter XL	Hexakopter XL	Hexakopter XL
počet vzletov	1	2	2
výška letu nad terénom	65 m	70 m	78 m
dĺžka letu	8 min	28 min	29 min
preletená vzdialenosť	870 m	1800 m	2100 m
priemerná rýchlosť letu	$1,8 \text{ m/s}^{-1}$	$1,3 \text{ m/s}^{-1}$	$1,5 \text{ m/s}^{-1}$
fotopaparát + objektiv	Nikon D90 + Nikon AF-S 18-105mm f/3,5-5,6G DX ED VR	Sony NEX6 + Sony 16-50 mm	
použitá ohnisková vzdialenosť	18 mm	16 mm	
počet snímkov	78	259	375
prekrýv snímkov	60 - 90 %	85 - 90 %	
počet GCP	12	21	18
celkové chyby kontrolované na GCP (cm)			
RMSE (x)	5,4	6,7	1,5
RMSE (y)	8,6	7,8	1,4
RMSE (z)	10,2	2,5	2,2
DTM - počet bodov na m^2	792	753	611
rozlíšenie ortofoto (cm/px)	1,7	1,8	2

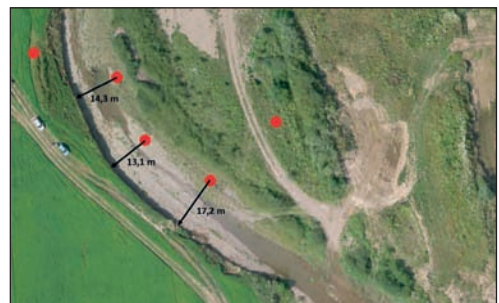
Tab. 4 Parametre letov a presnosť modelov počas sledovaného obdobia rokov 2012–2014.



Obr. 4 Výrez hrany brehu na ortofotomappe z júna 2012



Obr. 5 Výrez hrany brehu na ortofotomappe z apríla 2014.



Obr. 6 Výrez hrany brehu na ortofotomappe z júla 2014.

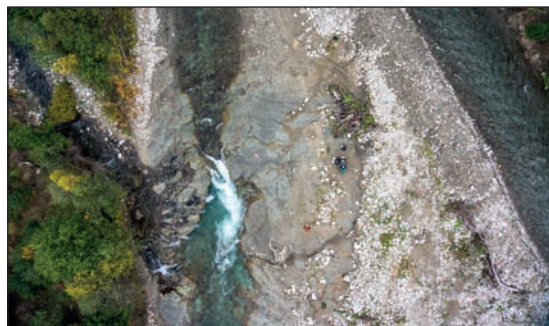
Mapovanie úseku rieky Belá postihnutého hĺbkovou a bočnou eróziou

Na jeseň v roku 2015 bol pomocou bezpilotnej techniky nalietaný približne 1,4 km dlhý úsek rieky Belá (Obr. 7), ktorá sa po odnesení štrkov začala zarezávať do svojho paleogénneho podložja, pričom intenzita zarezania v niektorých úsekoch dosiahla cca 1,5 m za rok (Obr. 8). Rieka Belá predstavuje pomerne unikátny relatívne prirodzený riečny systém, ktorý podlieha prirodzeným a človekom indukovanými zmenami (Kidová 2010, Kidová

a Lehotský 2012, 2015). Rieka v sledovanom úseku podmyva ľavý breh, ktorý tvorí vyzdvihnutá kryha z paleogénnych pieskocov a ílovcov vysoká približne 30 m a pôsobí ako destabilizujúci element brehu, čo spôsobuje jeho zosúvanie do koryta. Cieľom snímokovania bolo vytvoriť 3D model riečneho koryta, ktorý bude použitý na mapovanie, identifikáciu a zmenu fluviaálnych foriem v koryte a jeho okolí, ako aj na výpočet objemu odneseného materiálu z podtínaných brehov. Predbežné výsledky sú na Obr. 9–11. Parametre snímokovacieho letu uvádza Tab. 5.



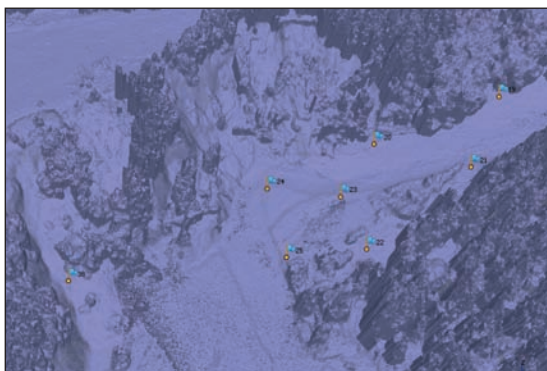
Obr. 7 Monitorovaný úsek rieky.



Obr. 8 Hĺbková erózia rieky (v ľavej časti obrázka) v paleogénnom podloží.



Obr. 9 Výrez z DTM zachytávajúci podtínaný svah.



Obr. 10 Výrez DTM zhotovený z nepravidelnej trojuholníkovej siete (TIN).



Obr. 11 Ortofotosnímká mapovaného úseku s rozlíšením 5 cm/px.

Platforma	Hexakopter XL
počet vzletov	8
výška letu nad terénom	15 - 80 m
celková doba letu	> 75 min
preletená vzdialenosť	> 6700 m
priemerná rýchlosť letu	1,4 m/s ⁻¹
fotoaparát + objektív	Sony NEX6 + Sony 16-50 mm
použitá ohnisková vzdialenosť	16 mm
počet snímok	1820
prekryv snímok	90%
počet GCP	38
celkové chyby kontrolované na GCP (cm)	
RMSE (x)	6
RMSE (y)	4
RMSE (Z)	2
DTM - počet bodov na m ²	240
rozlíšenie ortofoto (cm / px)	1,6

Tab. 5 Vybrané charakteristiky letu pre vytvorenie 3D modelu časti koryta rieky Belá a jeho výsledná presnosť.

Monitoring svahovej deformácie vo Svätom Antone

Monitorované územie sa nachádza v zastavanom území obce Svätý Anton. Svahová deformácia je situovaná približne v strede obce po ľavej strane nad cestou zo Svätého Antona do Prenčova (Obr. 12). Prvá zmienka o svahovej deformácii pochádza už z roku 1962/63. V nedávnej minulosti bola vrchná časť skúmanej oblasti priradená navážkou za účelom zarovnania a rozšírenia terénu pre výstavbu futbalového ihriska. Z toho dôvodu došlo k odtrhnutiu navážky a vzniku odľučnej hrany polkruhovitého tvaru.

Monitorovanie svahovej deformácie prebieha pomocou GNSS na piatich monitorovacích bodoch rozmiestnených na telese svahovej deformácie. Ako podklad pre realizované geofyzikálne merania a morfometrické analýzy bolo potrebné v sledovanom území vytvoriť presný digitálny model terénu. Na tento účel bol zvolený zber dát pomocou UAV. Tento bol realizovaný počas jednodennej terénnej kampane na jeseň v roku 2014 v bezvegetačnom období, tak aby vegetácia – najmä listnaté stromy v záhradách na telese zosuvu – mala čo najmenší vplyv na identifikáciu terénu zakrytého vegetáciou. Teleso svahovej defor-

mácie s rozmermi približne 170×200 m bolo nalieťané približne za 8 minút (Obr. 13) – ostatné charakteristiky ako aj presnosť výsledného produktu (DEM a ortofoto) sú uvedené v tabuľke 6.

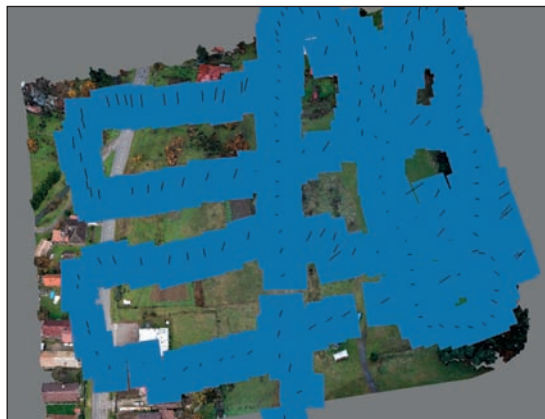
Platforma	Hexakopter XL
počet vzletov	8
výška letu nad terénom	15 - 80 m
celková doba letu	> 75 min
preletená vzdialenosť	> 6700 m
priemerná rýchlosť letu	$1,4 \text{ m/s}^{-1}$
fotopaparát + objektiv	Sony NEX6 + Sony 16-50 mm
použitá ohnisková vzdialenosť	16 mm
počet snímok	1820
prekrýv snímokv	90%
počet GCP	38
celkové chyby kontrolované na GCP (cm)	
RMSE (x)	6
RMSE (y)	4
RMSE (z)	2
DTM - počet bodov na m^2	240
rozlíšenie ortofoto (cm / px)	1,6

Tab. 6 Charakteristiky letu nad svahovou deformáciou vo Svätom Antone a výsledné presnosti modelov.

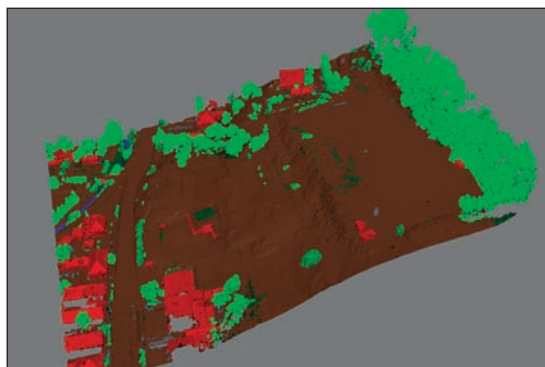


Obr. 12 Pohľad na zosuvné územie vo Sv. Antone.

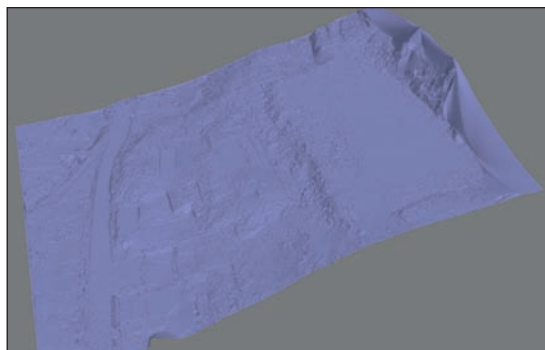
Primárnym výsledkom zberu dát je ortofotosnímka a digitálny model terénu. Digitálny model terénu vznikol klasifikáciou a následným filtrovaním mračna bodov (približne 60 mil. bodov), z ktorého bola odstránená vysoká a stredne vysoká vegetácia, budovy a objekty, ktoré nemali súvis s reliéfom (stĺpy, smetné koše, skládky dreva a pod.) (Obr. 14, 15). Nízka vegetácia – trávovitý porast nemala vzhľadom na svoju výšku a metodiku spracovania výrazný vplyv na výškovú presnosť modelu.



Obr. 13 Dráha letu pri snímokovaní svahovej deformácie z výšky 35–55 m nad povrchom.

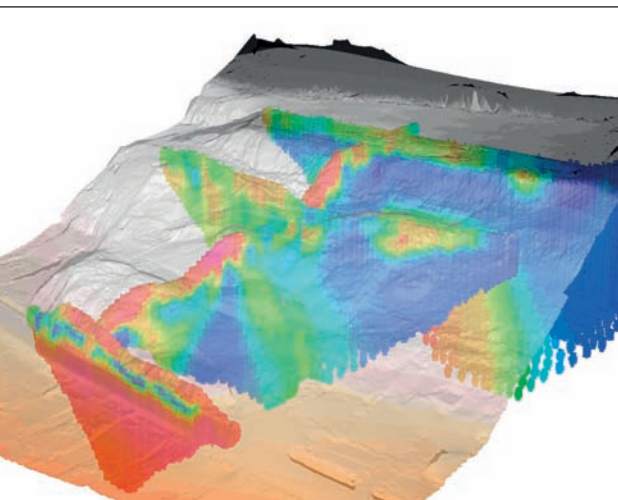


Obr. 14 Klasifikované mračno bodov do jednotlivých tried – vysoká vegetácia, nízka vegetácia, stredne vysoká vegetácia, budovy, vodná plocha, reliéf, ostatné.



Obr. 15 Digitálny model terénu vyfiltrovaný od vegetácie, budov a s reliéfom nesúvisiacimi objektami vyinterpolovaný z mračna bodov z triedy „reliéf“.

Pod takýto digitálny model bolo potom možné nanieť vrstvu geofyzikálnych profilov zostrojených pomocou elektrickej rezistívnej tomografie (Obr. 16) a zistiť tak vlastnosti zosúvaného bloku a jeho súvislosť s terénom. Spracované data vo forme DTM ďalej slúžia ako podklady pre morfometrickú analýzu reliéfu.



Obr. 16 Geofyzikálne profily zhotovené elektrickou rezistívnou tomografiou, nanesené a korigované pomocou fotogrametricky zostrojeného DTM.

Tvorba DTM pre výpočet kubatúry skládky odpadu

Aplikácia UAS je možná nielen pre potreby monitoringu, ale napríklad aj pre výpočty objemov vyťaženej alebo uskladnenej materiálu. V tomto prípade bola tvorba digitálneho modelu terénu realizovaná za účelom zistenia reálneho využitia objemu skládky odpadu, ako aj objemu jej už zrekultivovanej časti (Obr. 17, 18). Pre výpočet modelu bolo použitých 84 snímok a model bol polohovo priradený na 9 vlícovacích bodov. Výsledná ortofotomozaika bola vytvorená s rozlíšením 5 cm a samotný digitálny model s gridom 10 cm.

Presnosť modelu a ortofotomozaiky kontrolovaná na GCP ako aj parametre snímkovania sú uvedené v Tab. 7.

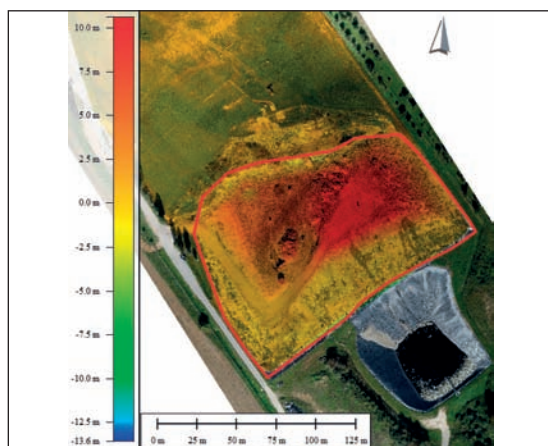
Platforma	Altura Zenith ATX8
počet vzletov	2
výška letu nad terénom	80 m
celková doba letu	16
preletená vzdialenosť	1740 m
priemerná rýchlosť letu	2,5 m/s ⁻¹
fotoparát + objektív	Nikon D610 + Nikkor 20 mm f/2,8D AF
použitá ohnisková vzdialenosť	20 mm
počet snímok	84
prekryv snímkov	80 - 85%
počet GCP	9
celkové chyby kontrolované na GCP (cm)	
RMSE (x)	1,4
RMSE (y)	1
RMSE (z)	1,3
DTM - počet bodov na m ²	414
rozlíšenie ortofoto (cm / px)	5 cm

Tab. 7 Parametre realizovaného letu a presnosti modelov skládky odpadu

Obrázok 18 dokumentuje medziročný prírastok materiálu na skládke. Tento bol vypočítaný na základe zostrojenia digitálneho modelu pôvodného reliéfu zameraného pomocou geodetických prístrojov a terénu skládky v čase snímkovania. Komplikáciu pri výpočte predstavovala skutočnosť, že skládka bola založená vo výmoli, preto nebolo možné použiť jednoduché odčítanie objemov preložené rovnou plochou pri základni skládky. Pomocou GIS nástrojov bol najskôr vypočítaný objem zasypanej časti výmoľa, a následne navezenej časti. Medziročný prírastok materiálu sme dosiahli odčítaním vypočítaného objemu materiálu z dát z prevedeného letu od objemu materiálu z predchádzajúcich období, ktorý sa nachádzal v zasypanej časti výmoľa. Na obrázku je červeným odtieňom vyznačená výška, resp. vzdialenosť povrchu skládky od pôvodného dna.



Obr. 17 Tieňovaný a ofarbený DTM skládky odpadov. Zelená farba predstavuje nižšie položené časti, tmavšia vyššie položené časti.

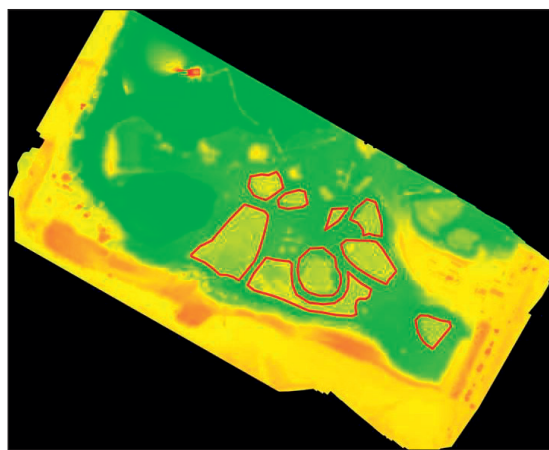


Obr. 18 Výrez ortofotosnímky s počítaným areálom (vyznačený červeným polygónom) medziročného prirastku materiálu.

Výpočet kubatúry vyťaženého materiálu – sklad štrku

Pre výpočty objemov vyťaženého materiálu, ako aj reálnych objemov skladovacích priestorov štrku bolo v časti dobývacieho priestoru štrkoviska realizovaných približne 290 kolmých snímok z výšky približne 80 metrov nad terénom. Výsledkom boli digitálny model terénu (Obr. 19) a ortofotomozaika (Obr. 20) polohovo priradená na 15 vĺicovacích bo-

dov. Presnosť priradenia modelu a ortofotomozaiky vypočítaná na kontrolných bodoch je uvedená v Tab. 8. Na základe DTM a ortofotomozaiky boli vyčlenené areály skladových priestorov štrku a vypočítaná ich kubatúra (červené polygóny v Obr. 19, 20). Takýmto spôsobom je možné relatívne presne zistiť objem zložitých tvarov skladového materiálu nielen štrku, ale napríklad aj drevnej hmoty alebo iných nedostupných, či ťažko zamerateľných alebo nebezpečných skladov a lokalít.



Obr. 19 DTM ťažobnej jamy a skladu štrku. Zelená farba predstavuje dno ťažobnej jamy. Červené polygóny na dne jamy predstavujú skladové zásoby vyťaženého materiálu, pre ktoré sa počítali objemy.



Obr. 20 Ortofotosnímka spracovaného územia. Červené polygóny na dne jamy predstavujú skladové zásoby vyťaženého materiálu, pre ktoré sa počítali objemy.

Platforma	Altura Zenith ATX8
počet vzletov	2
výška letu nad terénom	85
celková doba letu	23 min
preletená vzdialenosť	2570 m
priemerná rýchlosť letu	2,0 m/s ⁻¹
fotoparát + objektív	Nikon D610 + Nikkor 20 mm f/2,8D AF
použitá ohnisková vzdialenosť	20 mm
počet snímok	307
prekryv snímok	85 - 90%
počet GCP	15
celkové chyby kontrolované na GCP (cm)	
RMSE (x)	2
RMSE (y)	1,8
RMSE (Z)	6,1
DTM - počet bodov na m ²	111
rozlíšenie ortofoto (cm / px)	2 cm/px

Tab. 8 Charakteristiky letu a vyhodnotenej presnosti modelu na GCP

ZÁVER

Použitie bezpilotných lietajúcich prostriedkov je v súčasnosti veľmi obľúbeným prostriedkom pre zber primárnych dát o krajine. Prednosťou použitia UAV je tvorba doposiaľ „netradičných“ výstupov takmer vo vlastnej réžii, t.j. pohľadových fotografií (netradičné uhly pohľadu na geografické objekty), mračná bodov a práca s nimi, tvorba digitálnych alebo 3D modelov objektov a mnoho ďalších výstupov, ktoré otvárajú nové možnosti pri veľkomierkovom výskume a mapovaní krajiny. Hlavnou pred-

nosťou je však zber dát s vysokým priestorovým rozlíšením a do istej miery nezávislosť pri snímokovaní, ako aj vysoká presnosť výsledných produktov (ortofoto, digitálne modely terénu,...). V neposlednom rade je to v porovnaní s nasadením tradičných prostriedkov snímkovania (lietadlá, helikoptéry) aj lacnejší a efektívnejší spôsob zberu dát najmä na malých územiach. Malé bezpilotné prostriedky je však nutné vnímať nie ako konkurenciu k plošnému leteckému snímkovaniu, ale skôr ako doplnok pozemného mapovania menších lokalít.

Pri prevádzke bezpilotných prostriedkov a ich využití je potrebné myslieť najmä na bezpečnosť prevádzky a z toho dôvodu dodržiavať platnú legislatívu (bezpečnostné pravidlá, pravidlá pre pohyb vo vzdušnom priestore atď.). Takisto netreba brať spôsob zberu dát pomocou UAV ako nástroj, ktorým sa dá zmapovať všetko a automaticky. Pilot – operátor ako aj človek zodpovedný za tvorbu a analýzu výsledkov sú doposiaľ stálou súčasťou procesu získavania a spracovania dát.

Záverom treba zdôrazniť, že priestor pre príspevok neumožňuje poskytnúť vyčerpávajúce informácie o možnostiach a podmienkach prevádzkovania bezpilotných zariadení, preto sme sa pokúsili podať aspoň základné informácie v zhrnutej forme.

Literatúra

- Eisenbeiss, H. (2009). *UAV photogrametry*. Disertation thesis, Institut für Geodäsie und Photogrammetrie, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich.
- Hanzl, V., & Plánka, L. (1992): *Letecké snímkování z malých výšek s využitím dálkově řízených nosičů a neměřických kamer*. Vojenský topografický obzor. Sborník topografické služby, č. 1, VZÚ Praha, Praha 1992, str. 11–12.
- Karas, J., & Tichý, T. (2016): *Drony*. Computer press, Brno.
- Kidová, A. (2010). Vývoj antropogénneho vplyvu na morfológiu koryta vodného toku – príklad rieky Belej. In: Liga, J., Pavlovič, V., Strelková, M., Ríčov, D., Čápay, M. (Eds.), *Mladí vedci 2010: zborník vedeckých prác doktorandov, mladých vedeckých a pedagogických pracovníkov*. Fakulta prírodných vied Univerzity Konštantína Filozofa, Nitra, pp. 485–491.

- Kidová, A., & Lehotský, M. (2012). Časovo-priestorová variabilita morfológie divočiaceho a migrujúceho vodného toku Belá. *Geografický časopis*, 64, 311-333.
- Kidová, A., & Lehotský, M. (2015). Changes of a braided-wandering river as a response to flood fluctuations during last 60 years inferred from aerial photographs (the Belá River – Slovakia). In I.S. Rivers : proceedings. – Lyon, 2015.
- Kolejka, J., & Petch, J. (1989): Geografické vyhodnocení digitalizovaných leteckých snímků vodních objektů. *Sborník ČSGS*, roč. 94, č. 4, s. 241-248.
- Kolejka, J. (1987): Stav a metody dálkového průzkumu přírodních a antropogenních krajinných struktur na Geografickém ústavu ČSAV v Brně. *Zprávy GGÚ ČSAV*, roč. 24, č. 1, s. 17-30.
- Neitzel, F., & Klonowski, J. (2011). Mobile 3D mapping with a low-cost UAV system. In: International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Conference on Unmanned Aerial Vehicle in Geomatics, Zurich, Switzerland, September 14–16.
- 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.
- Plánka, L. (1984): Metoda leteckého snímkování z malých výšek. *Zprávy GGÚ ČSAV*, roč. 21, č. 3, str. 3–12.
- Plánka, L. (1987): The Use of Radio-controlled Aeromodels for Photography with the View of Remote Sensing of the Earth. United Nations Training Course „Remote Sensing Applications to Geological Sciences“, October 5–24, 1987, Dresden, Veröffentlichungen des Zentralinstituts für Physik der Erde, Potsdam 1987, ZIPE, pp. 58–69
- Sládek, J., & Rusnák, M. (2013): Nízkonákladové mikro-UAV technologie v geografii (nová metoda zberu priestorových dát). In *Geografický časopis*, 2013, roč. 65, č. 3, s. 269-285. ISSN 0016-7193.
- Watts, A. C., Kobziar, L. N., Percival, H. F. (2009). Unmanned Aircraft Systems for Wildland Fire Monitoring and Research. In: Proceedings of the 24th Tall Timbers Fire Ecology Conference: The Future of Fire: Public Awareness, Health, and Safety, Tallahassee, USA, January 11–15.