

VYUŽITIE LETECKÉHO LASEROVÉHO SKENOVANIA PRE POTREBY ARCHEOLOGICKÉHO PRIESKUMU.

Miroslav HOLUBEC¹, Peter BOBÁL¹, Stanislav HRONČEK²; František BIROŠÍK³

¹ YMS, a.s., Hornopotočná 1, 917 01, Trnava, Slovensko
miroslav.holubec@yms.sk; peter.bobal@yms.sk

² Proxima R&D s.r.o., Na pažiti 273/8, 900 21, Svätý Jur, Slovensko
stano.hroncek@proximard.sk

³ OZ Naše Smolenice, Kukučínova 5, 919 04, Smolenice, Slovensko
oz.nasesmolenice@gmail.com

Abstrakt

Článok sumarizuje možnosti využitia LiDAR údajov v oblasti archeológie. Na konkrétnom príklade lokality Molpír (Smolenice) demonštruje využitie tohto typu údajov pre identifikáciu historických objektov v oblastiach štandardne zakrytých vegetáciou. V uvedenej lokalite boli získané letecké snímky a lidarové mračno bodov. Letecké snímky boli vyhotovené v rozlíšení 10 cm/pixel, mračno bodov bolo skenované s hustotou 65 bodov/m². Nad výsledným filtrovaným a klasifikovaným mračnom boli realizované morfometrické analýzy, ktoré pomohli identifikovať hľadané objekty. Pre realizáciu morfometrickej analýzy bola použitá inovatívna metóda s využitím technológie Proxima.

Abstract

Article summarizes the possibilities of using LiDAR data in the field of archeology. At location Molpír (Smolenice) demonstrates the use of this type of data for the identification of archeological artefacts in areas covered by vegetation. During the survey, the aerial images and point cloud were obtained. Aerial photographs were made at a resolution of 10 cm / pixel, cloud points were scanned with a density of 65 points / m². Over the final filtered and classified point cloud were realized morphometric analysis to help identify searched objects. For the realization of morphometric analysis, an innovative method using the Proxima technology was used.

Kľúčové slová: LIDAR, Letecké laserové skenovanie (LLS), archeológia, mračno bodov

Keywords: LIDAR, Airborne laser scanning, archeology, point cloud

1. ÚVOD

V súčasnosti sa pre potreby detailného archeologického prieskumu používajú rôzne druhy kontaktných ale aj bezkontaktných metód. Podrobný archeologický prieskum často vyžaduje použitie kombinácie týchto dvoch typov metód. Pokiaľ ide o bezkontaktné metódy, najdostupnejšie je predovšetkým letecké snímkovanie. Terénny prieskum v kombinácii s leteckým snímkaním však nedokáže vždy poskytnúť archeológom dostatočne presné podklady pre ich prácu. Množstvo archeologických oblastí je lokalizovaných v miestach pokrytých vegetáciou, ktorá má stabilizačný efekt na archeologické pozostatky. Lesný a krovinatý porast dokáže ochrániť archeologické objekty pred vplyvom erózných procesov ale aj ďalších činiteľov. Z tohto dôvodu sú tieto oblasti často predmetom záujmu archeológov. Letecké snímkovanie v oblastiach pokrytých vegetáciou dokáže detegovať len objekty väčších rozmerov, a preto je nutné použiť v oblastiach takého charakteru iné efektívnejšie metódy (Vosselman G., Maas H.G.,2010).

Jednou z najefektívnejších a najpresnejších bezkontaktných metód pre monitorovanie archeologických objektov a vyhľadávanie neznámych lokalít je metóda LLS. Jedná sa o aktívnu metódu diaľkového prieskumu Zeme, ktorá je založená na meraní vzdialenosti medzi objektom nachádzajúcim sa na zemskom povrchu a skenerom. Výsledkom je množina presných georeferencovaných bodov, ktorá sa označuje ako bodové mračno.

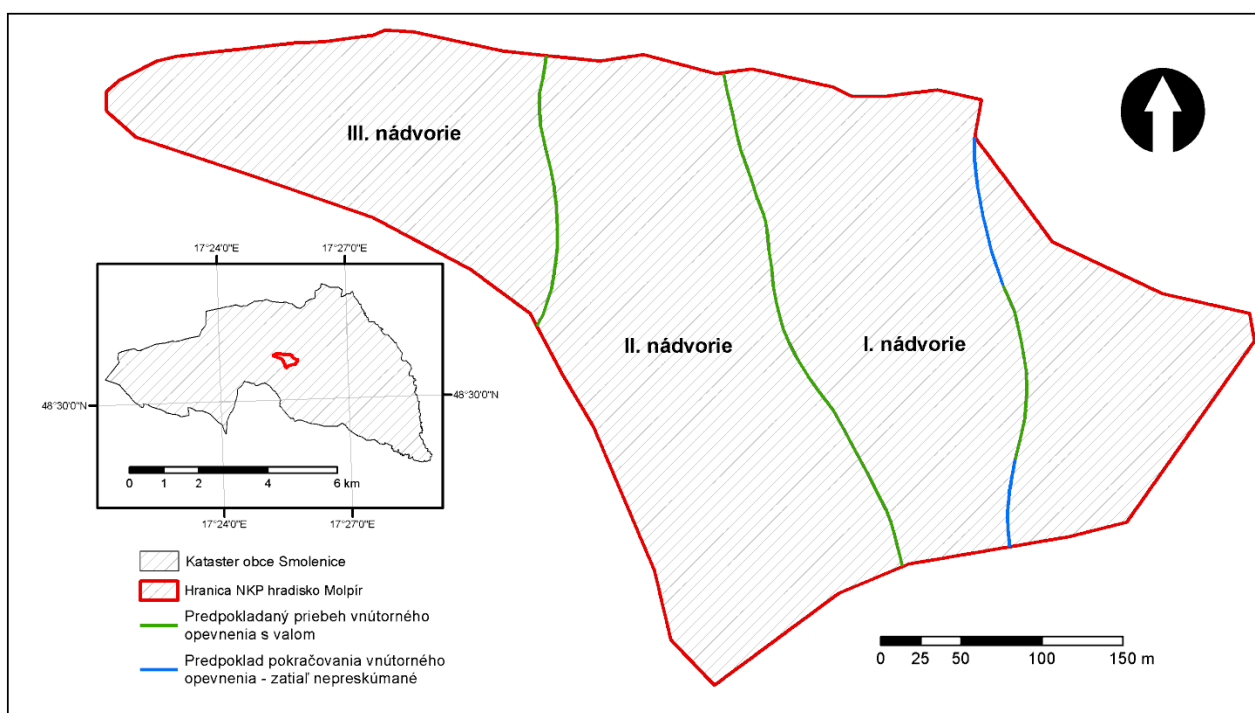
Veľkou výhodou LLS oproti iným technikám je možnosť snímania povrchu terénu pod korunami stromov a krovín. Klasifikáciou a filtrovaním získaného bodového mračna je možné následne získať kvalitné podklady

pre tvorbu detailného digitálneho modelu terénu, na ktorom je možné detegovať aj menšie štruktúry v zalesnených oblastiach. Použitím vhodných vizualizačných techník (ako je napríklad zobrazenie tieňovaného reliéfu) a priestorových analýz nad takto vytvoreným digitálnym modelom terénu možno lokalizovať archeologické objekty a lokality, ktoré by nebolo pomocou bežne používaných metód odhaliť. Z tohto dôvodu, v posledných rokoch letecké laserové skenovanie výrazne prispelo k archeologickým objavom hlavne v zalesnených oblastiach.

Cieľom tohto príspevku je poukázať na možnosti využitia technológie LiDAR v kombinácii s využitím geoinformačných technológií v oblasti archeológie v lokalite Molpír, nachádzajúcej sa v katastri obce Smolenice.

2. ZÁUJMOVÁ OBLASŤ

Oblasťou záujmu tejto štúdie je archeologická oblasť Výšinné hradisko, nachádzajúca sa na návrší Molpíru na východnom úpätí Malých Karpát. Čo sa týka administratívneho členenia, oblasť sa nachádza v katastri obce Smolenice v Trnavskom kraji (Slovenská republika). Územie je pomerne výškovo členité. Nadmorská výška územia sa pohybuje v rozmedzí od 250 do 360 m n. m. Rozloha samotného hradiska je približne 12 ha.



Obr. 1. Záujmová oblasť

Hradisko Molpír pochádza z obdobia staršej doby železnej, ktorá sa nazýva aj ako doba halštalská, podľa náleziska Hallstatt v Hornom Rakúsku (8.-6. stor. pred Kr.). Patrí k najvýznamnejším náleziskám tohto obdobia v celej strednej Európe. Jeho význam je preto nielen lokálny, ale je potrebné sa naň pozerieť v celoeurópskej dimenzii. V roku 1965 bolo územie hradiska vyhlásené za kultúrnu pamiatku a v roku 1990 za národnú kultúrnu pamiatku (Občianske združenie Naše Smolenice, 2015).

Molpír je typom výšinného sídliska. Po vybudovaní opevnenia sa stal typickým obranným hradiskom. Išlo o jedno z najväčších hradísk staršej doby železnej v rámci celej Karpatskej kotliny. Hradisko sa navyše nachádzalo na križovatke obchodných ciest, kadiaľ viedla obchodná cesta spájajúca juhovýchodnú a severnú Európu. Na strategicky výhodnej polohe vrchu Molpír bolo odkryté významné a doposiaľ aj najväčšie spoločensko-hospodárske centrum ľudu východohalštatskej kultúry. Nálezy dokazujú, že sa

jednalo o mocensko-politické centrum s bohatým hospodársko-náboženským životom (Občianske združenie Naše Smolenice, 2015).

Prvé zmienky týkajúce sa archeologických bádání v skúmanom území siahajú už do 19. storočia, kedy sa ako prvý o túto lokalitu zaujímal miestny farár. Neskôr, v dvadsiatych rokoch 20. storočia pokračovali v skúmaní aj ďalší bádatelia. Prvý systematický výskum hradiska bol realizovaný Archeologickým ústavom Slovenskej akadémie vied v rokoch 1963-1971. Počas tohto obdobia sa vykonal plošne rozsiahly odkryv hradiska (hlavne oblasť tretieho a druhého nádvoría). Archeologický výskum bol znovu obnovený v roku 2008. Tento výskum doložil okrem osídlenia v staršej dobe železnej aj dôkazy o osídlení v mladšej dobe železnej (Kelti) a v časnom stredoveku (Slovania). Pri prieskume bol využitý georadar vysielajúci smerom do zeme elektromagnetické vlny s frekvenciou 400 MHz s hĺbkovým dosahom 1-2 metre. Okrem toho bola v niektorých oblastiach využitá magnetometria, merajúca zmeny v zemskom magnetickom poli (Občianske združenie Naše Smolenice, 2015).

V dnešnej dobe je archeologická lokalita Molpír značne zanedbaná napriek jej veľkému významu. Plocha hradiska je zarastená drevinami a kríkmi, čím je sťažený aj prístup k nej. To ovplyvňuje aj dostupnosť jednotlivých lokalít nielen pre verejnosť ale aj pre prípadný ďalší terénny archeologický prieskum. Keďže veľká časť hradiska nebola v minulosti detailne preskúmaná (predovšetkým prvé a druhé nádvorie), v budúcnosti by bolo prínosné pokračovanie výskumov na hradisku. Práve výsledky získané metódou LLS v kombinácii s použitím geoinformačných technológií by mohli podložiť základ pre identifikáciu nových nálezísk v tomto území.

3. POUŽITÉ TECHNOLOGIE

Zber dát bol vykonaný použitím leteckého nosiča PA-34 Seneca, ktorý je vybavený systémom pre pokročilé mapovanie koridorov *Trimble Harrier 68i*. Systém je zložený z full-waveform laserového skeneru a 60 megapixelovej digitálnej kamery *Trimble AC P65+*. Počas jedného náletu boli teda zaznamenané nielen laserové údaje ale aj letecké snímky vo vysokom rozlíšení. Získané údaje boli spracované špecializovaným softwarovým vybavením (viac v kapitole 4). Technické parametre použitého laserového skenera sú uvedené v nasledujúcej tabuľke:

Tab 1. Základné parametre laserového skenera

Frekvencia pulzov (PRR)	80 kHz – 400 kHz	Uhlové rozlíšenie	0.001 °
Frekvencia skenovania	10 Hz – 200 Hz	Presnosť vertikálna	< 0.25 m
Zorný uhol	45 ° – 60 °	Presnosť horizontálna	< 0.15 m
Operačná výška	30 – 1600 m AGL		

4. VSTUPNÉ DÁTA A ICH SPRACOVANIE

Dáta boli naliatané začiatkom mesiaca november. Keďže väčšina územia je pokrytá listnatými stromami, ktoré v tomto období ešte neboli opadané, sledovaná oblasť bola naliataná s viacnásobným prekryvom. To zabezpečilo získanie dostatočnej hustoty bodov reprezentujúcich povrch terénu aj pod korunami stromov.

Zozbierané údaje bolo nutné spracovať tak, aby mohli byť použité ako podklad pre ďalšie spracovanie a analýzu. Prvý krok zahŕňal vyrovnanie letovej dráhy pomocou aplikácie PosPac MMS. Využitie pri tom boli údaje z pozemnej referenčnej stanice a dáta zozbierané pomocou GNSS a IMU jednotky, ktoré sa nachádzajú na palube leteckého nosiča.

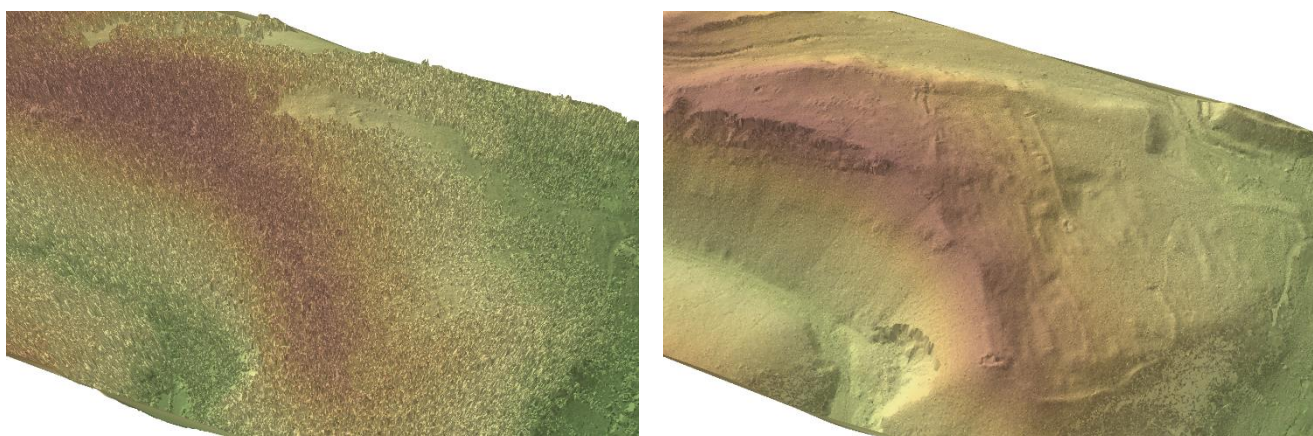
V ďalšom kroku boli zo surového laserového signálu vyextrahované diskkrétne body použitím aplikácie RiANALYZE a metódy gaussovej dekompozície. Jedná sa o jednu z najčastejšie používaných metód pre analýzu full-waveform laserových dát. Výsledkom procesu je bodové mračno uložené v súradnicovom systéme skenera. Pre ďalšie spracovanie je potrebné toto bodové mračno vertikálne a horizontálne vyrovnať.

Vyrovnanie údajov bolo prevedené pomocou aplikácie LP Master. Keďže dáta pozostávali z viacerých nalietaných pásov, najprv sa vykonalo vyrovnanie jednotlivých pásov voči sebe. Tento krok sa označuje ako relatívne vyrovnanie. Po prevedení relatívneho vyrovnania nasledovalo globálne vyrovnanie, ktoré zabezpečuje vyrovnanie dát voči presným referenčným údajom, zozbieraným prostredníctvom metód GNSS v teréne. Pre účely horizontálneho relatívneho vyrovnania boli využité vektorové hranice budov. Zameraných bolo spolu 5 budov v intraviláne obce Smolenice. K vertikálnemu relatívnemu vyrovnaniu sa použili výškové body rovnomerne rozmiestnené v skúmanej oblasti – spolu 25 bodov. Výsledkom vyrovnania je georeferencované mračno bodov.

Georeferencované bodové mračno bolo následne klasifikované tak, aby sa odlišili body reprezentujúce povrch terénu od ostatných bodov. Využitý bol pri tom nástroj DMT Toolkit a v ňom implementovaná automatická klasifikácia mračna bodov. Nakoľko automatická klasifikácia nemusí vo všetkých prípadoch poskytnúť vhodné výsledky, použitím manuálnej klasifikácie je možné tieto výsledky spresniť. Cieľom je zaradiť chybné klasifikované body do správnych kategórií. K tomuto účelu bola využitá aplikácia DTMaster.

Tab 2. Charakteristika získaného bodového mračna

Kategória mračna bodov	Priemerná hustota bodov na m ²	Priemerná vzdialenosť medzi bodmi
Všetky kategórie	66.63	0.122
Kategória Ground	21.07	0.215

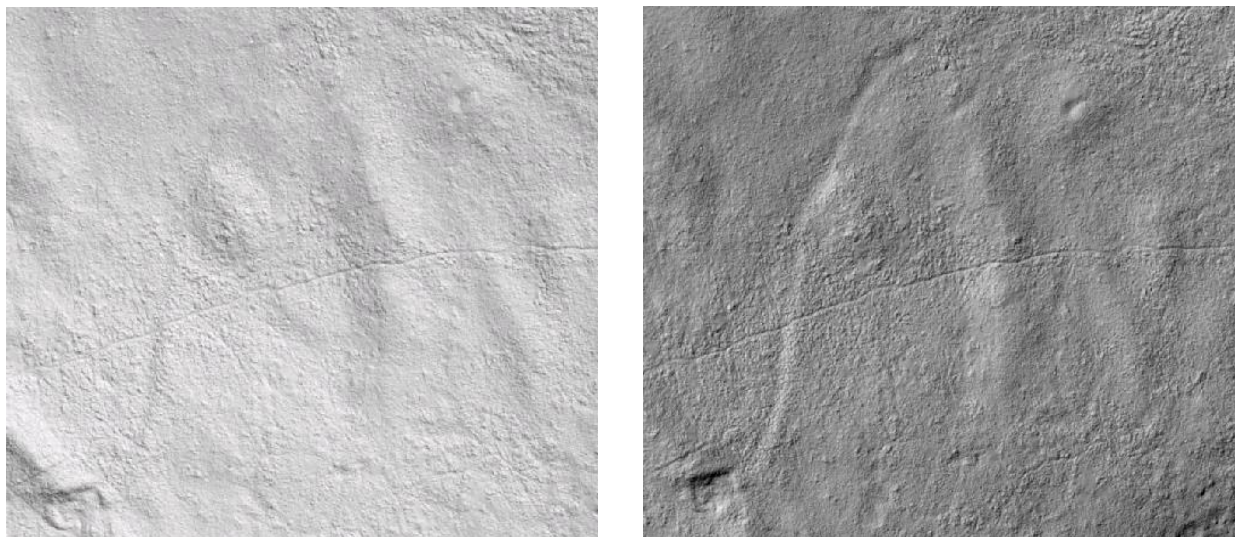


Obr. 2. Digitálny model povrchu vytvorený z nefiltrovaného mračna bodov (vľavo), Digitálny model terénu vytvorený z mračna bodov reprezentujúcich terén (vpravo)

Z bodov reprezentujúcich povrch terénu bol vytvorený rastrový digitálny model terénu s rozlíšením 10 cm / pixel. Za účelom kontroly kvality výsledného DMT sa vykonalo v území zameranie 15 kontrolných bodov technológiou GNSS v systéme SKPOS (Slovenská Priestorová Observačná Služba). Na ich základe sa vypočítali hodnoty strednej kvadratickej chyby RMS (Root Mean Square) a priemernej výškovej chyby. Stredná kvadratická chyba (RMS) dosiahla hodnotu *0.098 m* a priemerná výšková chyba hodnotu *-0.071 m*.

K zvýrazneniu terénnych prvkov, ktoré by mohli reprezentovať archeologické objekty, bol DMT vizualizovaný pomocou tieňovaného reliéfu oslneného z rôznych smerov. Zmena smeru oslnenia pri tieňovanom reliéfe môže v určitých prípadoch zabezpečiť kvalitnejšiu identifikáciu terénnych štruktúr ako zobrazuje aj obrázok 3. Na obrázku zobrazujúcom južnú časť I. nádvorja je vidieť presnejšiu identifikáciu terénnej hrany tiahnucej sa z juhu na sever v prípade oslnenia reliéfu zo severovýchodnej strany.

K lepšej detekcii potencionálnych archeologických objektov prispeli aj použité morfometrické analýzy. Ide konkrétne o technológiu Proxima, ktorá je kompletným celkom spájajúci viacero jednotlivých technologických postupov. Táto technológia nepoužíva k morfometrickej analýze bežne zaužívané algoritmy ale postupy ekvivalentné diferenciálnej geometrii počítané na základe numerickej matematiky. Výsledkom analýzy je kompletný súbor morfometrických veličín popisujúcich vlastnosti povrchu, tak ako ich definuje diferenciálna geometria (Szabova, M., Hroncek, S., 2015).

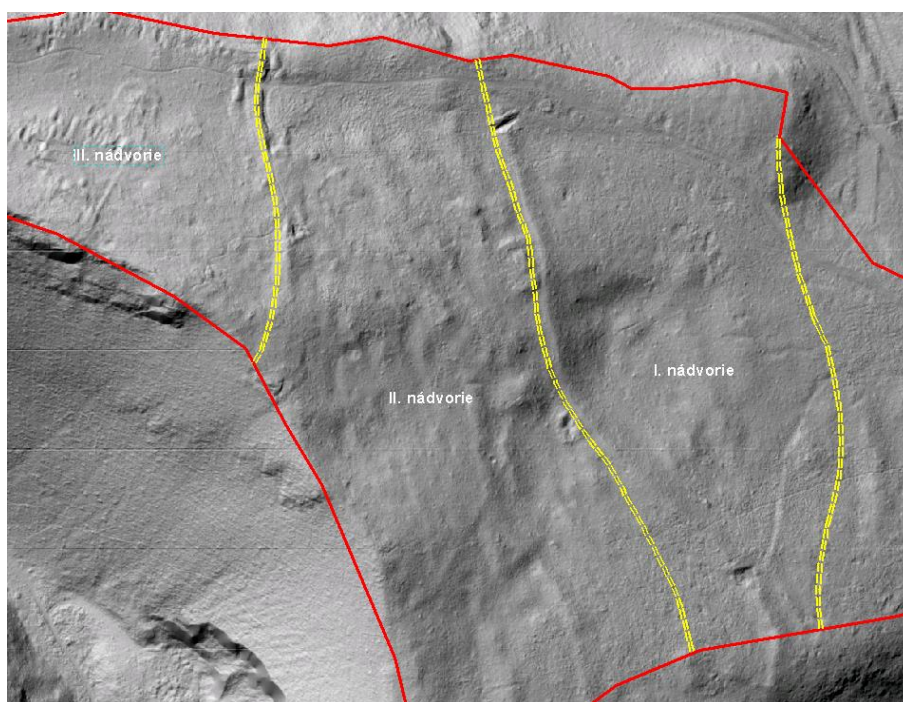


Obr. 3. Tieňovaný reliéf oslnený zo severozápadnej strany (vľavo), Tieňovaný reliéf oslnený zo severovýchodnej strany (vpravo)

5. VÝSLEDKY

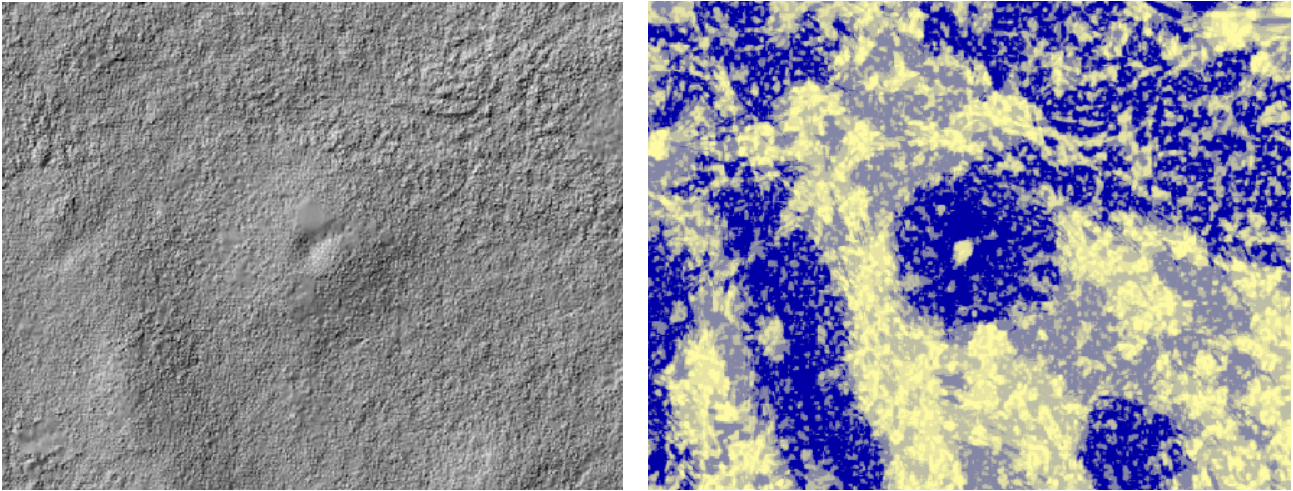
Vyhodnotenie výsledkov spočívalo vo vizuálnej identifikácii možných, doposiaľ v území neidentifikovaných archeologických objektov resp. nálezísk. Použitý pri tom bol výstupný digitálny model reliéfu, tieňovaný reliéf oslnený z rôznych smerov a výstupy analýzy povrchu technológiou Proxima. Vybrané lokality boli následne overené terénnym prieskumom za účasti archeológov a v budúcnosti môžu byť predmetom detailnejšieho archeologického prieskumu.

Už pri prvom pohľade na výstupné dáta je možné vidieť nesúlad predpokladaného priebehu vnútorného opevnenia (interpretácia Stegmann – Rajtárová S., Dušek M.) s priebehom opevnenia viditeľnom na tieňovanom reliéfe. Nesúlad sa prejavuje hlavne v južnej časti skúmaného územia medzi prvým a druhým nádvorím.



Obr. 4. Predpokladaný priebeh vnútorného opevnenia (žltá línia) na podklade tieňovaného reliéfu

V sledovanej oblasti sa podarilo lokalizovať viacero možných archeologických objektov. Jeden z nich sa nachádza v západnej časti územia. Je tvorený pravidelným kruhovým objektom, ktorý svojím tvarom pripomína mohylu. Objekt bol identifikovateľný už z tieňovaného reliéfu, pričom jeho črty sa ešte zvýraznili použitím morfometrických analýz. Rovnako bolo možné tento objekt lokalizovať aj voľným okom priamo v teréne, avšak jeho pravidelný kruhový tvar nebol tak zrejмый ako na výstupoch vytvorených z dát leteckého laserového skenovania. Z tohto dôvodu nebol nikdy záujmom archeológov.

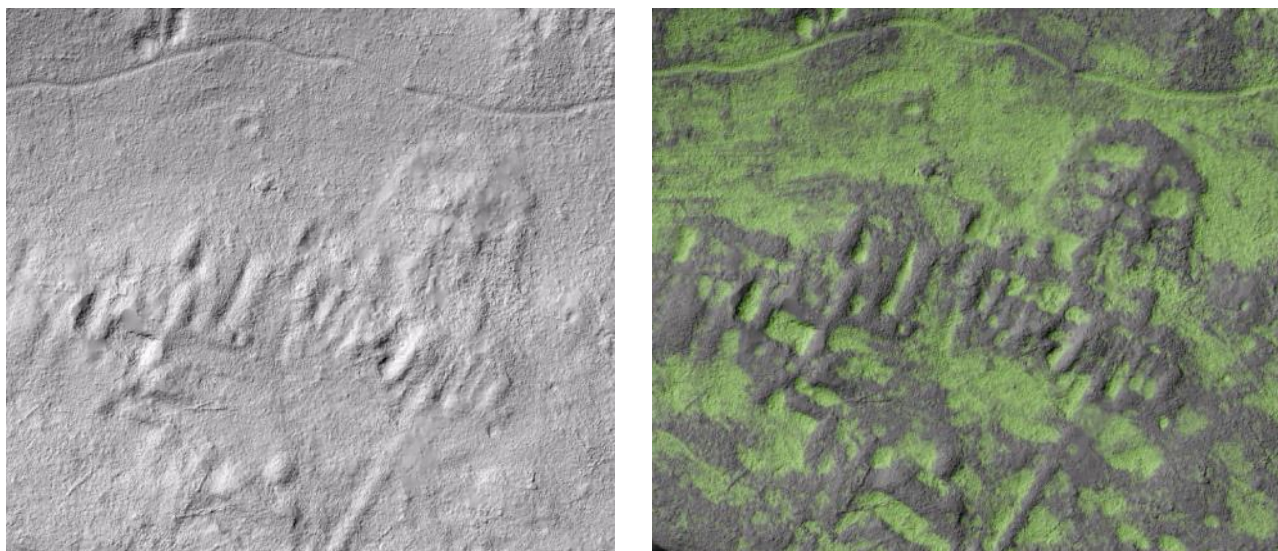


Obr. 5. Tieňovaný reliéf osvetlený zo severozápadnej strany (vľavo), konkávne tvary reliéfu (žltou farbou) vypočítané technológiou Proxima (vpravo)



Obr. 6. Pohľad na identifikovaný kruhový objekt v teréne

V centrálnej časti tretieho nádvoria bolo identifikovaných viacero štruktúr, ktoré neboli doteraz predmetom archeologického prieskumu a mohli by reprezentovať archeologické objekty. Pri terénnom prieskume neboli tieto objekty voľným okom viditeľné, nakoľko bolo toto územie pomerne husto zarastené krovínami.



Obr. 7. Tieňovaný reliéf osvetlený zo severozápadu (vľavo), konkávne tvary reliéfu (zelenou farbou) vypočítané technológiou Proxima na podklade tieňovaného reliéfu (vpravo)

ZÁVER

Zalesnené oblasti sú často územím významných archeologických nálezov. Archeologické objekty sú však v týchto miestach skryté a ťažko lokalizovateľné, čo vyžaduje špecifické metódy na ich identifikáciu. Jednou z najefektívnejších metód je využitie leteckého laserového skenovania, čo dokazujú aj výsledky tejto štúdie. Digitálny model terénu získaný technológiou LIDAR dokáže poskytnúť detailné informácie o priebehu terénu aj pod vegetáciou. Použitím rôznych vizualizačných techník nad takýmto digitálnym modelom terénu a aplikáciou vhodných morfometrických analýz (ako je technológia Proxima) je potom možné zabezpečiť efektívnejšiu a kvalitnejšiu identifikáciu prvkov na teréne. Získané výsledky je samozrejme nutné overiť prieskumom priamo v teréne.

6. LITERATÚRA

Občianske združenie Naše Smolenice. <http://www.oznasesmolenice.sk>, 12.2.2016.

Vosselman G., Maas H.G. (2010) Airborne and terrestrial laser scanning, CRC Press, Dunbeath.

Szabova M., Hroncek S. (2015) Investigating geohazards: Lidar Reveals the Turbulent Life of Mountain Slopes. LIDAR, 6 (5), 48-52.

Článok je publikovaný ako jeden z výstupov projektu Revitalizácie hradiska na Molpíri, z programu „Zachovanie a revitalizácia kultúrneho a prírodného dedičstva a Podpora rozmanitosti v kultúre a umení v rámci európskeho kultúrneho dedičstva“

spolufinancovaného

z Finančného mechanizmu Európskeho hospodárskeho priestoru a štátneho rozpočtu Slovenskej republiky

