

Obr. 1 Přehledová mapa zájmové oblasti: 1 – lokalita Liščí vrch, 2 – lokalita Sfinga (zdroj: ESRI)

Geodetické měření a 3D modelování jako nástroj pro dokumentaci archeologického výzkumu v Súdánu (Sabaloka, 6. nilský katarakt)

Jan Pacina

Archeologický výzkum v oblasti 6. nilského kataraktu v Súdánu úspěšně probíhá již od roku 2009 (Lisá *et al.* 2011; Suková *et al.* 2010; Suková – Cílek 2012; Suková – Varadzin 2012a, 2012b). V pravidelných intervalech vyjíždí do pohoří Sabaloka interdisciplinární tým odborníků za účelem zkoumat pravěké osídlení severovýchodní Afriky (viz obr. 1). Nedílnou součástí archeologického výzkumu je dokumentace pomocí geotechnologií. V předchozích expedicích (v letech 2011 a 2012) byly v rámci terénního výzkumu, s ohledem na technické možnosti, aplikovány převážně metody klasické nižší geodézie, jako např. měření podrobných bodů, tvorba výškopisu a vytyčování. Díky technickému pokroku (rychlejší výpočetní stanice, nové softwarové prostředky) bylo možné v rámci poslední expedice do Súdánu (v roce 2014; viz Suková – Varadzin v tomto čísle) zařadit i sběr dat pomocí letecké a blízké fotogrammetrie. Tyto metody umožňují s využitím klasického fotoaparátu a specializovaného softwaru tvořit 3D modely objektů, lokalit a sond, včetně kvalitních ortofotosnímků ve vysokém rozlišení. Tato data slouží ke studiu dané lokality, její vizualizaci a jako doplněk archeologických map.

Sběr prostorových dat pomocí klasických metod geodézie

V zemích západního světa je možné pro podporu archeologického výzkumu využít velmi hustou síť stabilizova-

ného bodového pole, referenční signál¹ pro GNSS (*Global Navigation Satellite System*) měření a kvalitní pokrytí recentními i archivními leteckými a družicovými snímky. V zemích třetího světa tyto prostředky neexistují nebo jsou pro cizince nedostupné. Metody klasické geodézie tak

hrají při archeologickém výzkumu v Súdánu nezastupitelnou úlohu. Současný stav využívání geografických informačních systémů (GIS) v Súdánu není podle Aliho (2009) ideální a zejména státní správa nemá potřebnou datovou ani technickou základnu.

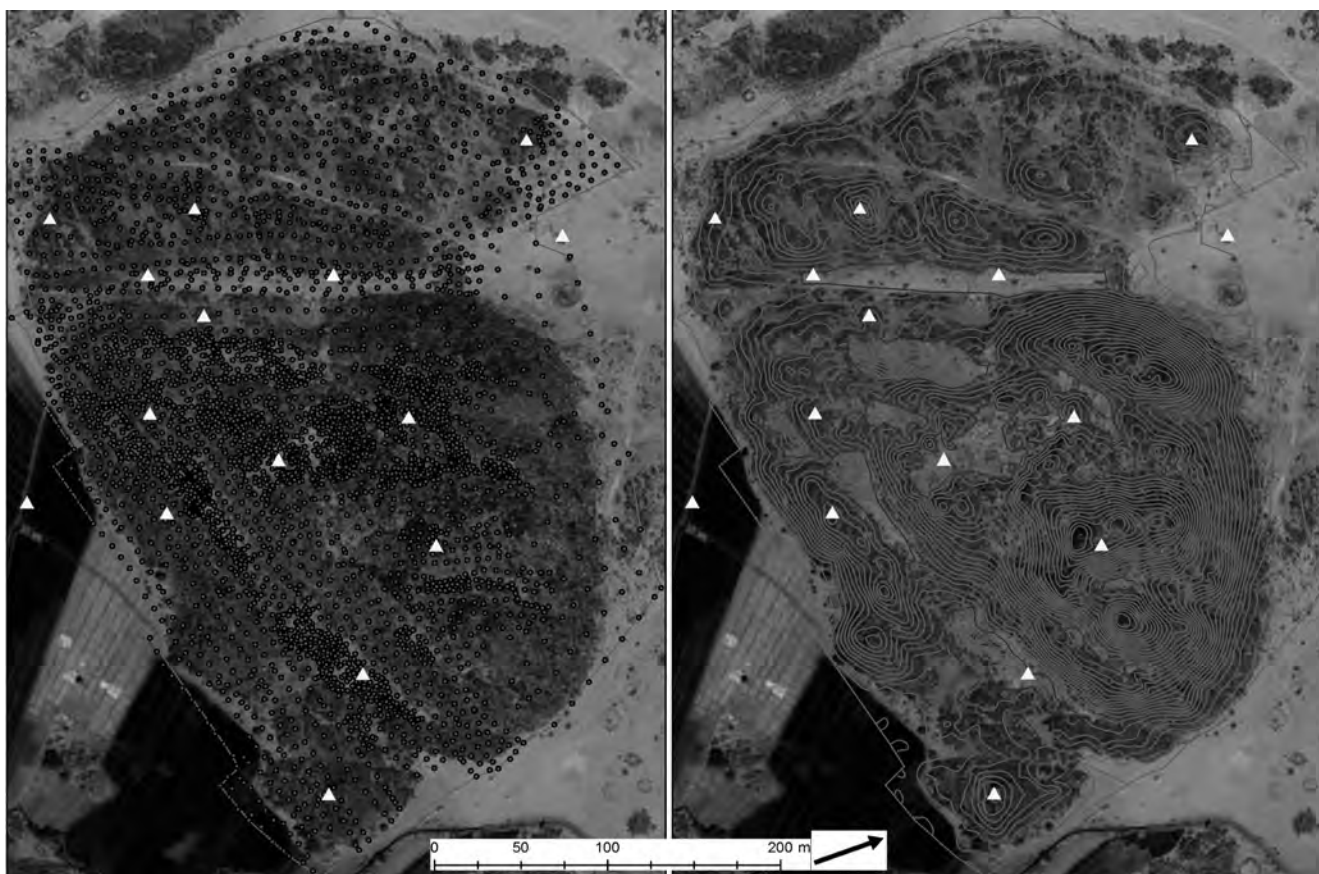
Na počátku archeologického výzkumu na lokalitě Liščí kopec (SBK.W-20/B) v roce 2011 (Suková – Cílek 2012; Suková – Varadzin 2012a, 2012b) nebyl v okolí identifikován žádný stabilizovaný bod súdánského podrobného bodového pole. Pro potřeby sběru prostorových dat byl tedy na úpatí této lokality stabilizován a definován pomocí na sebe kolmých os lokální souřadnicový systém. Původně byl tento systém navržen pouze pro lokalitu Liščí kopec, ale s ohledem k nízké polohové a výškové přesnosti² GNSS přijímačů byl použit i pro podrobné polohopisné měření v rámci všech zájmových lokalit. V prostoru lokalit Liščí kopec a Sfinga (SBK.W-60) bylo následně stabilizováno celkem 21 pevných bodů, z nichž se odvozovalo další podrobné měření. V roce 2012 byly body stabilizovány kvalitní akrylátovou barvou (včetně vyhledávacích měř), přibližně zaměřeny GNSS přijímačem a fotograficky zdokumentovány. Před začátkem měřických prací v sezóně 2014 bylo při rekognoscaci bodového pole zjištěno, že vlivem povětrnostních podmínek došlo k destrukci téměř všech stabilizovaných pevných bodů. Na lokalitě Sfinga nebyl identifikován žádný z původních bodů a na lokalitě Liščí kopec pouze dva. Obnova původního souřadnicového systému byla tedy klíčovou činností³ před zahájením vlastního měření. S ohledem k důležitosti zachování bodového pole pro budoucí činnost expedice bylo po skon-

čení měřických prací několik bodů na lokalitách Sfinga i Liščí kopec pevně stabilizováno formou zabetonovaného železného roxoru.

Při práci v terénu byly zaměřeny následující typy podrobných bodů:

- Výškové body – body byly použity pro tvorbu digitálního modelu reliéfu (DMR)⁴ a následně vrstevnicového plánu lokality. Celá zájmová oblast byla vždy pokryta sítí bodů 5×5 m. Oblasti zájmu (sídlištní terasy) byly pokryty hustší sítí bodů 1×1 m (nebo podrobnější). Pravidelnost sítě bodů byla vizuálně kontrolována na displeji GNSS přijímače.
- Polohopisné body – doplňují pravidelnou síť výškových bodů. Jedná se zejména o osy komunikací, ohraničení sídelních teras, významné kamenné formace a body terénní kostry (hřbetnice, vrcholy, dna sníženin, erozní rýhy).
- Tematická (archeologická) data – jedná se o např. rohy archeologických sond, detailní dokumentace nálezů uvnitř sond, obrysy významných objektů, středy odkrytých objektů, nivelety, terénní profily.
- Vlíčovací body – slouží k transformaci fotografií do referenčního souřadnicového systému. V našem případě byly použity při zpracování snímku z pozemní a letecké fotogrammetrie.

Nejvíce podrobných bodů bylo zaměřeno v rámci naleziště Liščí kopec. Tato nejvýznamnější prehistorická lokalita celé české koncese (o rozloze cca 11,50 ha) zahrnuje celkem 16 sídelních teras a plošin, které jsou jasně vymezené skalisky a balvany a liší se velikostí, nadmořskou výškou, přístupností a typem osídlení, jež je datováno do



Obr. 2 Zaměřené stabilizované a podrobné body (trojúhelník = stabilizovaný bod) na lokalitě Liščí kopec (SBK.W-20/B) a vytvořený vrstevnicový plán s vymezením sídelních teras (data J. Pacina, podkladový snímek Google)

mezolitu (asi 9000–5000 př. n. l.) a neolitu (5000–3000 př. n. l.) (Suková – Varadzin 2012a, 2012b).

V průběhu tří archeologických sezón zde bylo stabilizováno 17 pevných bodů a změřeno více než 4 000 podrobných bodů. Pro potřeby výzkumu a vizualizace byl vytvořen podrobný vrstevnicový plán celé lokality s intervalem vrstevnic 0,30 m pro sídlištní terasy a 1 m pro zbylé oblasti (viz obr. 2). Pro archeologické sondy, otevřené na sídlištních terasách, byly vyhotoveny podrobné specializované mapy velkého měřítka (Pacina *et al.* 2012a, 2012b). Práce na této lokalitě byla ukončena v sezóně 2012 a výzkum se soustředil zejména na lokalitu Sfinga. Druhá nejvýznamnější lokalita české koncese je situovaná v oblasti „skalních měst“ na žulovém výchozu. Tato lokalita zahrnuje jednu terasu o rozloze 940 m², umístěnou zhruba 15 m nad okolním terénem. Na rozdíl od lokality Liščí kopec zde byly objeveny artefakty pouze z období mezolitu (Suková – Varadzin 2012a, 2012b a v tomto čísle).

Jednou z hlavních měřických úloh sezóny 2012 bylo připojení lokality Sfinga do jednotného souřadnicového systému. Vzhledem k její vzdálenosti (cca 4,50 km vzdušnou čarou) od lokality Liščí kopec, kde byly stabilizovány body lokálního souřadnicového systému a členitost okolního terénu, trvalo měření téměř dva dny. Propojenost lokalit do jednotného souřadnicového systému je velmi důležitá – díky ní je možné vzájemně porovnávat výšková data ze všech zpracovávaných lokalit, vizualizovat výsledky měření nad jednotnou podkladovou mapou a doplňovat starší měření novými.

Na jaře 2012 bylo v rámci lokality Sfinga zaměřeno více než 400 podrobných bodů, z nichž bylo vytvořeno několik podrobných archeologických map velkého měřítka (Pacina *et al.* 2012a, 2012c, 2012d).

Nové metody sběru prostorových dat

Již mnoho let jsou v Čechách (Gojda 1996 a 2003; Hašek – Kovárník 1996) i ve světě (Bewley – Raczkowski 2002; Brophy – Cowley 2005; Palmer – Cowley 2009) využívány letecké a družicové snímky pro identifikaci, průzkum a evidenci archeologických lokalit. Ve většině případů jde o šikmé snímky pořízené z kabiny letadla a letecké měřické snímky (LMS).

Letecké měřické snímky jsou získány pomocí speciálních fotogrammetrických kamer, jež jsou umístěny na vysoko letícím letadle (výška letu cca 1 km). Zpracováním LMS pomocí standardních metod fotogrammetrie⁵ (Pavelka 2003) získáváme digitální model povrchu (DMP)⁶ a ortofotosnímek. Oba tyto produkty odvozené z LMS mají velký potenciál při využití v letecké archeologii. Zpracované ortofotosnímky jsou na rozdíl od šikmých snímků georeferencované (umístěné do souřadnicového systému) a transformované do roviny mapy. V praxi to znamená, že po načtení snímku jako vrstvy do GIS můžeme interaktivně odměřovat plochy a délky, přidávat další zpracovaná vektorová (např. obrysy sond) a rastrová (např. starší letecké snímky) data. Pomocí DMP můžeme vytvořit 3D vizualizaci, která umožní lepší interpretaci prostorových vztahů v rámci lokality nebo dalších prvků výzkumu. Z DMP je možné také odvodit vrstevnicový plán, jenž výstižně popisuje výškové poměry dané lokality.

Družicové snímky jsou pořizovány z mnohem větší výšky než LMS a díky využití senzorů s vysokým prostorovým rozlišením⁷ dosahují podrobnosti až 0,50 m. Určité typy družic snímkuji stereoskopicky (např. GeoEye-1) a umožňují tak extrakci DMP⁸, podobně jako je tomu u stereoskopických LMS.

Pro archeologický výzkum v oblasti pohoří Sabaloka byl pořízen satelitní snímek ze systému QuickBird a rozměru 10 × 10 km, pokrývající hlavní část výzkumu. Zakoupený snímek má rozlišení v nadiru 0,60 m v panchromatickém (černobílém) pásmu a 2,40 m v multispektrálním pásmu. Při archeologickém výzkumu je však zapotřebí používat podklady ve větším měřítku. Tato družicová data tedy byla použita pro plánování prospekci, pro obecný přehled o lokalitách a jako podkladová data pro vizualizaci geodeticky zaměřených bodů.

Před zahájením výzkumu byla provedena rešerše dostupných dat na *Sudan National Survey Authority* (SNSA, Národní geodetický a kartografický úřad v Súdánu) s téměř nulovým výsledkem. Dostupné jsou pouze mapy v měřítkách 1:100 000 a menší. Letecké snímky pro danou oblast podle Aliho (2009) neexistují nebo jsou vlastněny *Dams Implementation Unit* a pro civilisty nedostupné.

Rychlý rozvoj výpočetní techniky posledních let však umožňuje tvorbu trojrozměrných modelů a ortofotosnímků ve vysokém rozlišení ze šikmých i svislých snímků (leteckých i pozemních), pořízených klasickými kompaktními digitálními fotoaparáty – tzv. maloformátové letecké snímkování, SFAP⁹ (Aber *et al.* 2010). Bylo provedeno mnoho studií (např. Cardenala *et al.* 2004; Chandler *et al.* 2005; Quan 2010), které prokázaly, že přesnost klasických kompaktních digitálních fotoaparátů pro blízkou (leteckou i pozemní) fotogrammetrii je v porovnání s profesionálními fotogrammetrickými komorami pro dané účely (tvorba DMP, ortofoto) dostačující.

Základním principem tvorby trojrozměrného modelu z digitálních fotografií je nasnímání celého objektu zájmu z více míst tak, aby se snímky navzájem překrývaly. Pro zpracování snímků a tvorbu 3D modelu existuje více programových prostředků – komerčních i volně dostupných. Veškeré snímky pořízené v rámci archeologického výzkumu na Sabaloco jsou zpracovány v prostředí PhotoScan od firmy Agisoft LLC. Pro rekonstrukci scény, polohy kamer a vnitřní a vnější orientace snímků se využívá algoritmus *Structure from Motion*¹⁰ (Ullman 1979). Algoritmus ve snímcích vyhledává geometrické struktury a sleduje jejich pohyb a výskyt v ostatních snímcích. Zároveň jsou určeny polohy kamer a spočítány vnitřní a vnější parametry orientace snímků. Ve výsledku je vytvořeno řídké mračno bodů, které je pomocí dalších algoritmů pro extrakci bodů ze stereosnímků (Seitz *et al.* 2006) doplněno na husté mračno bodů. Husté mračno bodů je dále s pomocí metod triangulace převedeno na spojitý povrch (tzv. *mesh*). Tento spojitý povrch reprezentuje výsledný DMP a je použit pro odvození ortofotosnímku. Detailní popis principu výpočtu v prostředí PhotoScan je uveden v publikaci Verhoevena *et al.* (2012). Data získaná ze zpracovaných SFAP snímků mnohem lépe vystihnou strukturu zpracovávané lokality než podrobné měření pomocí GNSS nebo geodézie. Hustota bodů získaných extrakcí z SFAP snímků je mnohonásobně vyšší než při klasickém sběru



Obr. 3 Snímkování z draka na lokalitě SBK.W.SS-18 na české koncesi a fotografování třecích jamek (tzv. *cup-marks*) na lokalitě Sfinga (SBK.W-60) (foto L. Varadzin)

dat, zatímco čas potřebný pro sběr SFAP snímků je mnohonásobně nižší (Siebert – Teizer 2014).

Podle Abera *et al.* (2010) mohou být jako letecké nosiče pro SFAP použity upoutané balony, říditelné vzducholoď, draci a v neposlední řadě bezpilotní letecké prostředky (UAV, drony). Z hlediska komfortu a kvality sběru dat jsou nejlépe využitelné systémy mikro UAV (Sládek – Rusnák 2013). Systémy UAV disponují možností autonomního letu, při němž je přesně nasnímána oblast zájmu z definované výšky s dostatečným překrytem snímků. Při použití UAV v rámci lokality Liščí kopec by pořízení snímků trvalo okolo 30 minut a přibližně 10 hodin by bylo potřeba na zpracování. Hustota takto získaných bodů se odvíjí od výšky letu a rozlišení pořízených snímků. Při běžné výšce letu 80 m a při použití 24Mpx fotoaparátu dosahujeme průměrné hustoty 110 bodů/m². Zaměření asi 4 500 bodů na lokalitě Liščí kopec pomocí metod nižší geodézie trvalo přibližně 10 dní. Hustota těchto bodů je 0,03 bodu/m².

Vzhledem k politické situaci a přírodním podmínkám v Súdánu je dovoz a provozování UAV téměř nerealizovatelný. S přihlédnutím k tomuto faktu bylo na několika lokalitách provedeno letecké snímkování pomocí upoutaného draka – tzv. metodou KAP (*Kite Aerial Photography*). Metoda KAP byla při archeologickém výzkumu v severovýchodní Africe s úspěchem použita již několikrát (Bitelli *et al.* 2001; Brůna 2013; Chagny – Hesse 2007; Żurawski 1993 a 2005) a i přesto, že snímkování z draka není tak komfortní jako s použitím UAV, získaná data poskytují dostatek informací pro tvorbu DMP a odvozeného ortofotosnímku.

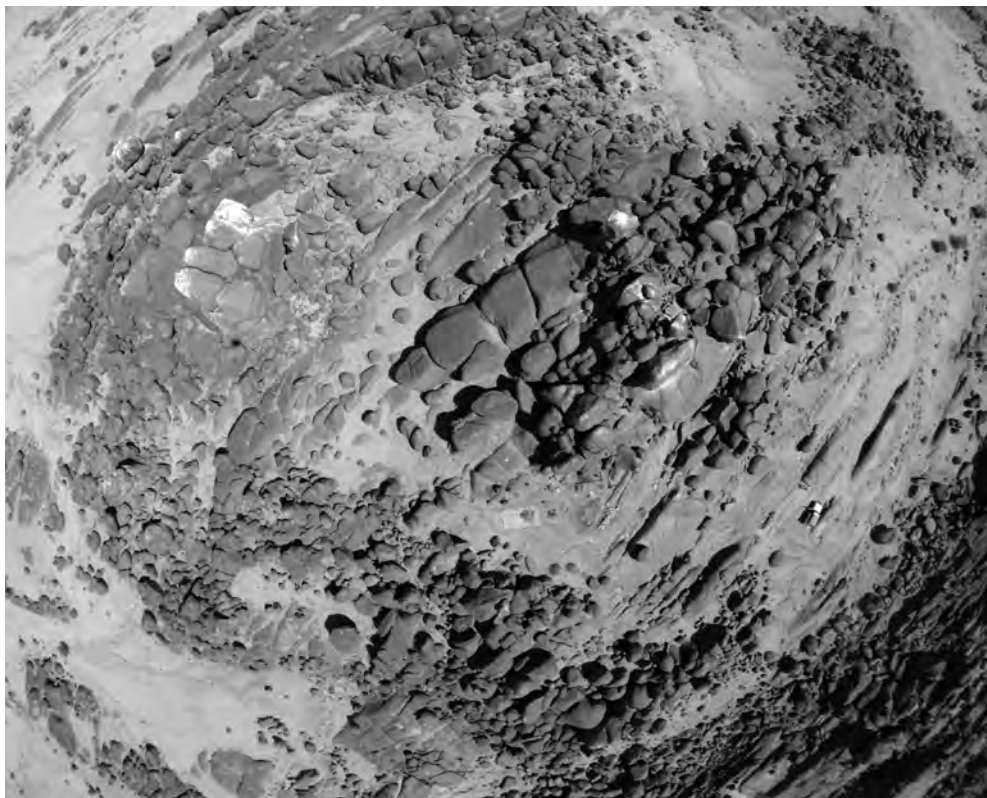
Aplikace nových metod pro sběr dat v rámci lokality Sfinga

Pro snímkování byl použit jednošňůrový drak Elliot Rhombus Mega Power Sled o rozměrech 300 × 170 cm, se šňůrou dlouhou cca 200 m, rozsah větru 2–5 Bft, výztuhy GFK 2 mm (Brůna 2013). Na vlastní šňůru byl umístěn držák fotoaparátu, který byl upraven pro přístroj GoPro Hero 3+. GoPro je širokouhlá vodotěsná kamera, schopná snímat snímky o rozlišení až 12 Mpx. Kamera pořizuje snímky automaticky v definovaném časovém intervalu.¹¹ Tato kamera není primárně určena pro SFAP, nicméně s ohledem k poměru váha / kvalita senzoru / odolnost a s přihlédnutím k vlastním předchozím testům byla s úspěchem použita i v rámci KAP snímkování.

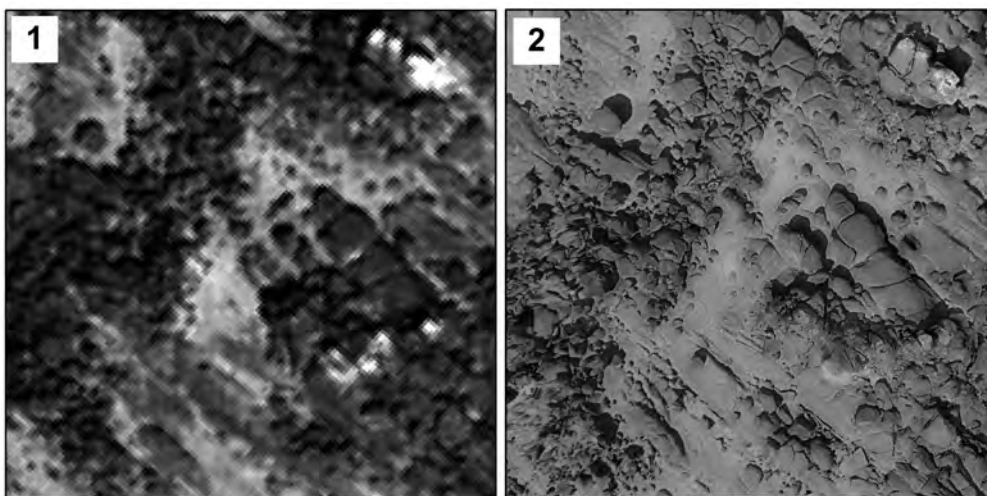
Snímkování metodou KAP bylo použito pro sběr dat na několika lokalitách: Sfinga, Liščí kopec – okolí Mohyly 1 (viz Suková *et al.* v tomto čísle), „jezerní pláň“ a SBK.W.SS-18. V následujícím textu se zaměříme na data z lokality Sfinga, jelikož v rámci tohoto území bylo provedeno podrobné snímkování s využitím SFAP a metod blízké fotogrammetrie.¹²

Během dokumentace výzkumu na lokalitě Sfinga byl vytvořen 3D model celé lokality z fotografií z draka (KAP). Druhou měřítkovou úrovní je vytvoření 3D modelu sídelní terasy a detailní model balvanů s třecími jamkami (ang. *cup-marks*) (obr. 3). Nejpodrobněji je nasnímán průběh exkavace sondy 5, kde proběhlo i podrobné modelování odkrytých kosterních pozůstatků.

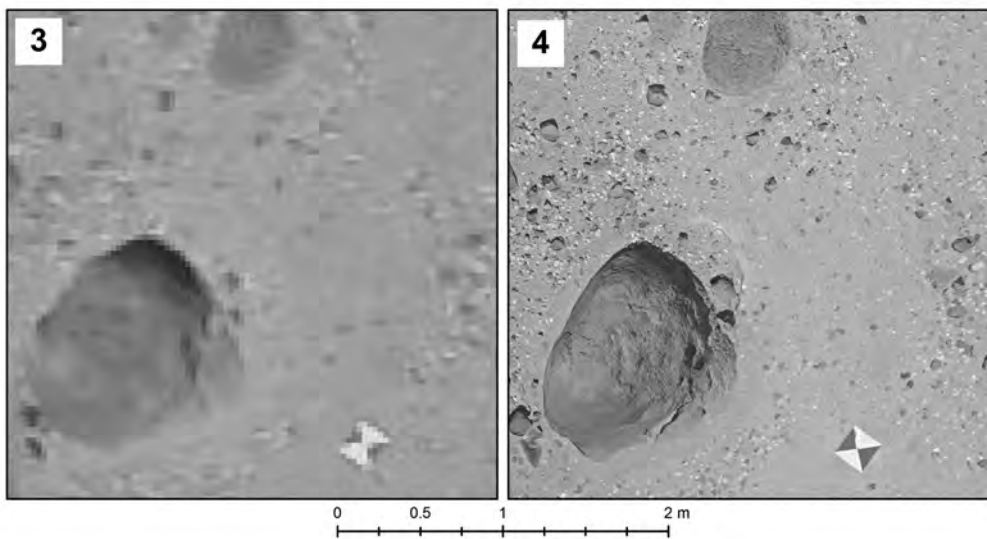
V rámci KAP snímkování lokality Sfinga bylo pořízeno celkem 1 300 snímků. Z tohoto celkového počtu bylo



Obr. 4 Lokalita Sfinga (SBK.W-60) fotografovaná z draka (foto J. Pacina)



Obr. 5 1. Lokalita Sfinga na snímku z družice QuickBird (1 pixel = 0,50 m) 2. Lokalita Sfinga na ortofotosnímku získaného ze snímkování KAP (1 pixel = 3 cm) 3. Detail ortofotosnímku z KAP 4. Detail ortofotosnímku získaného z pozemní fotogrammetrie (1 pixel = 0,50 cm)



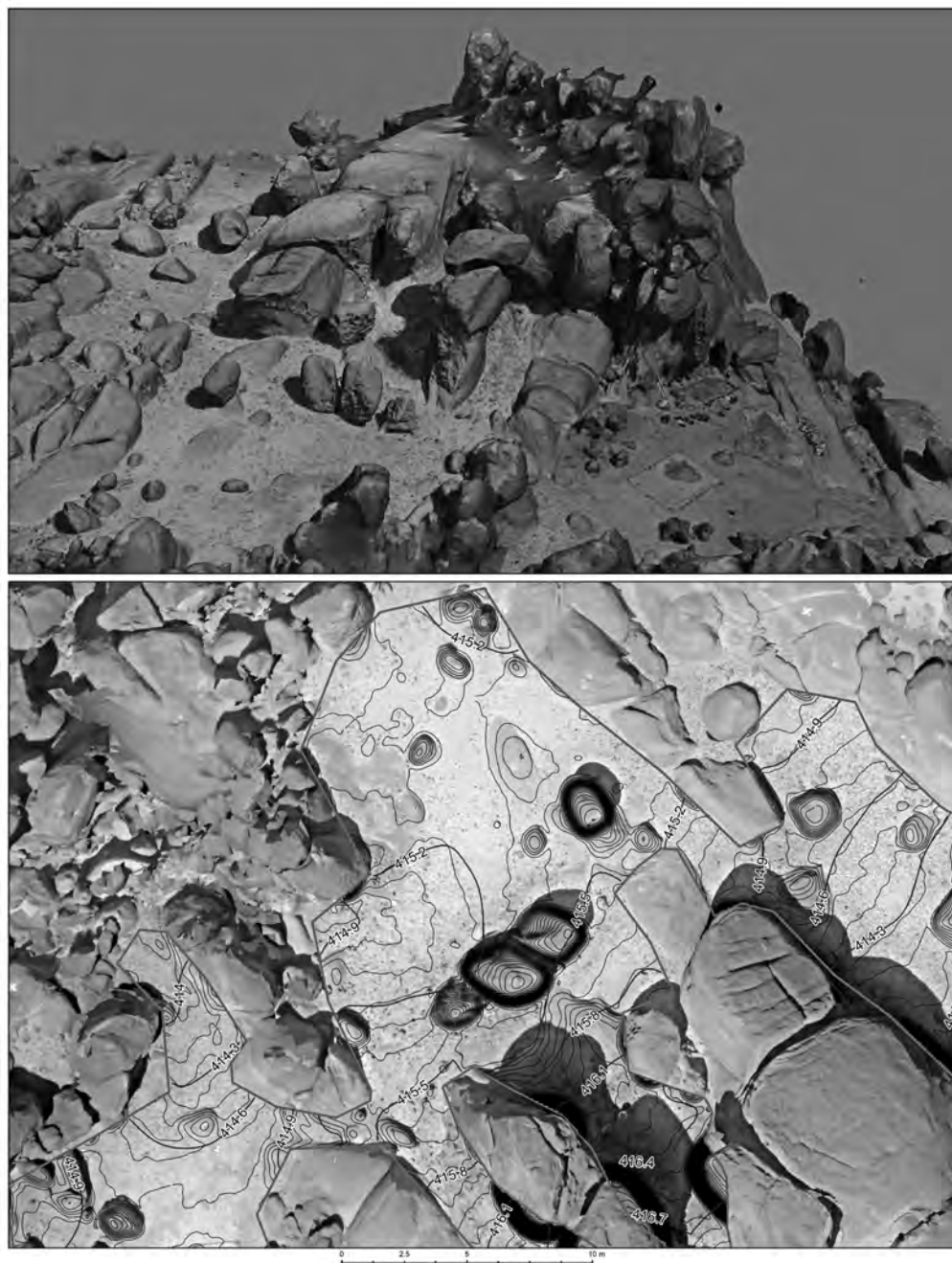
vybráno 49 snímků, jež vhodně pokrývají celou lokalitu s dostatečným překrytem. Snímkování bylo provedeno mezi 12. a 13. hodinou, kdy jsou nejkratší stíny. V prostoru lokality bylo nutné stabilizovat 10 vřícovacích bodů, které definují prostorovou lokalizaci celého výsledného modelu. Fotografie byly zpracovány v prostředí programu PhotoScan, z nichž byl odvozen DMP s průměrnou hustotou 60 bodů/m² a prostorovým rozlišením 12 cm/pixel a dále ortofotosnímek s rozlišením 3 cm/pixel. Snímek lokality Sfinga focený z draka je ukázán na obr. 4. Detail výsledného ortofotosnímků (včetně ukázky vřícovacího bodu) je na obr. 5.

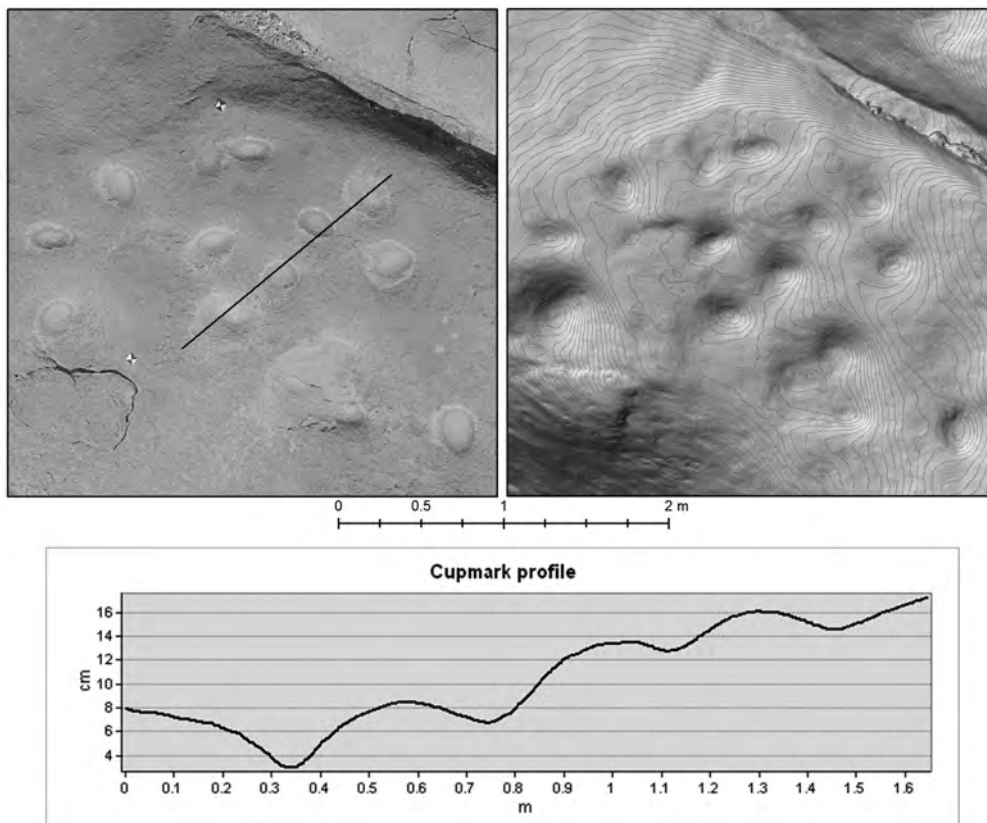
Pro fotografování metodou blízké fotogrammetrie byl použit fotoaparát Sony NEX 7 s rozlišením 24 MPix. Během posledních let bylo provedeno mnoho studií (např. Barsanti *et al.* 2013; Doneus 2011; Kersten 2006), které porovnávají využití laserového skenování a tvorbu 3D modelů z fotografií. Každá z těchto metod má své výhody i nevýhody (Barsanti *et al.* 2013), nicméně vzhledem k proble-

matickému dovozu drahé měřické techniky do rozvojových zemí a k extrémně prašnému prostředí v poušti můžeme metody blízké fotogrammetrie považovat za vhodný prostředek k získávání kvalitních prostorových dat.

Detailní model sídlištní plošiny byl vytvořen z 330 snímků pořízených z vyvýšených míst v okolí. Před započítáním fotografování bylo v rámci lokality stabilizováno 40 vřícovacích bodů, jež slouží stejně jako při snímkování metodou KAP k prostorové lokalizaci modelu. Vyšší počet vřícovacích bodů byl zvolen i s ohledem na prostorovou složitost sídlištní plošiny a snadnější propojování zdrojových snímků. 3D model slouží ke studiu struktury sídlištní plošiny a k tvorbě výškopisného plánu a odvozeného ortofotosnímků. Výsledný 3D model sídlištní plošiny se nachází na obr. 6. Díky podrobným modelům získaným snímkováním lokality Sfinga z draka (60 bodů/m²) i ze země (6580 bodů/m²) jsme schopni vytvořit velmi podrobný vrstevnicový plán¹³ (obr. 6).

Obr. 6 3D model sídlištní plošiny vytvořený z 330 snímků v prostředí PhotoScan firmy Agisoft LLC. Dole v oblasti střední části sídlištní plošiny porovnání původních vrstevnic vytvořených z měřených dat a vrstevnic odvozených z DMP. Jako podklad je použito ortofoto získané z fotografií z draka (KAP) (foto J. Pacina)

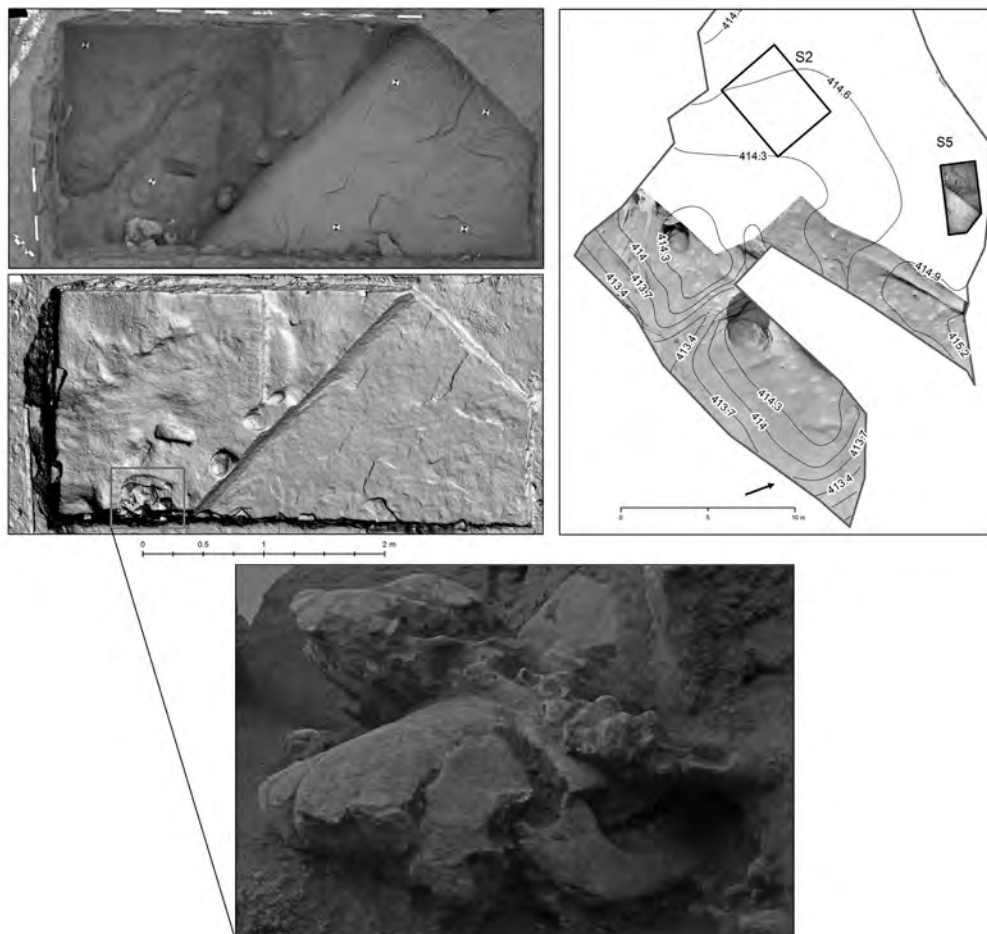




Obr. 7 Detail ortofotosnímku kamenného bloku s třecími jamkami a 3D model včetně vrstevnicového plánu. Dole výškové poměry jednotlivých jamek získané z vyznačeného profilu (foto J. Pacina)

V přibližně stejné měřítkové úrovni je vyhotoven 3D model balvanů s třecími jamkami (*cup-marks*), jejichž nejvyšší koncentrace je u jižního okraje sídlištní plošiny, kde

se jich nachází více než 90. Pro tvorbu 3D modelu byly použity dva typy fotografií – svislé snímky pořízené z vyvýšeného stanoviště (obr. 3) a šikmé snímky pořízené ze



Obr. 8 3D model a ortofoto sondy 5 (lokalita Sfinga), včetně ukázky integrace zpracovaných ortofotosnímků do archeologické mapy. Dole detailní 3D model kosterních pozůstatků nalezených v sondě 5 (foto J. Pacina)

země. Pro tvorbu modelu bylo použito celkem 300 fotografií. S ohledem na blízkost fotografovaného objektu a kvalitu fotografií byl vytvořen DMR dvou skalních bloků s jamkami s rozlišením 3mm/pixel a ortofoto s rozlišením 1mm/pixel. Takto podrobná data umožňují tvorbu vrstevnicového plánu s intervalem vrstevnic 1 mm, proměrování zahloubení jednotlivých misek a přenos těchto informací do archeologické mapy, což může dále sloužit k podrobné analýze mimo lokalitu (obr. 7).

Důležitou součástí archeologického výzkumu je dokumentace exkavace sond a následná tvorba archeologické mapy. Díky technologiím prezentovaným v tomto článku můžeme vytvořit ortofotosnímek archeologické sondy, jež můžeme vložit do výsledné mapy a bez zkreslení odměřovat vzdálenosti. Archeolog si také může celou situaci vizualizovat ve 3D přímo ve svém internetovém prohlížeči, což umožňuje studovat vzájemné prostorové vztahy odkrytých objektů i mimo lokalitu. Model výsledné exkavace sondy 5 na lokalitě Sfinga je vytvořen z celkem 60 šikmých fotografií pořízených z okraje sondy. Výsledný DMR sondy s rozlišením 0,50 mm/pixel obsahuje 3×10^6 bodů/m². Se stejně vysokým rozlišením je vytvořeno ortofoto. Výsledný model sondy, včetně detailu kosterních pozůstatků a implementace do archeologické mapy (Pacina *et al.* 2012b), se nachází na obr. 8.

Závěr

Nové metody sběru a zpracování prostorových dat pomocí bezpilotních leteckých prostředků, KAP, blízké fotogrammetrie, laserového skenování a dalších otevírají dosud nevídané možnosti pro záznam, uchování a vizualizaci archeologického výzkumu. Na lokalitě Sfinga byly aplikovány téměř všechny v Súdánu dostupné metody sběru prostorových dat. Získali jsme tak zajímavou databázi výsledků v různých měřících – od celkového pohledu na lokalitu až po detailní 3D model odkrytých lebek. Všechna data v digitální podobě je možné dále analyzovat v prostředí GIS nebo i v prostředí internetu – všechny modely jsou (v nižším rozlišení) dostupné na internetové adrese: <https://sketchfab.com/jan.pacina/folders>.

Poznámky:

- Referenční signál umožňuje zpřesnit měření pomocí GNSS na cca 2,50 cm.
- V rámci výzkumu bylo potřeba porovnat nadmořské výšky jednotlivých lokalit (např. s ohledem k výšce sezonních záplav v minulosti) a nízká přesnost GNSS přijímačů toto neumožňovala, ač by měření bylo mnohonásobně rychlejší a pohodlnější.
- Pokud by nebyl obnoven původní lokální souřadnicový systém, nebylo by možné propojit měření z roku 2014 s daty získanými během předchozích archeologických kampaní.
- DMR je model zemského povrchu bez vegetace a objektů vytvořených lidskou činností.
- Zpracování LMS vyžaduje znalost prvků vnitřní a vnější orientace snímků. Prvky vnitřní orientace LMS jsou definovány kalibrací kamery u výrobce (ohnisková vzdálenost, poloha hlavního bodu snímku a průběh distorze objektivu). Prvky vnější orientace jsou určeny souřadnicemi středu objektivu a rotací (stočení) letadla v ose X, Y, Z v okamžiku expozice snímku.
- DMP je digitální model terénu, který zahrnuje všechny prvky viditelné na zpracovávaných snímcích – budovy, vegetaci atd.

- Prostorové rozlišení je definováno velikostí jednoho pixelu – např. běžný ortofotosnímek v českém prostředí (dostupný na stránkách ČÚZK) má prostorové rozlišení 1 pixel = 25 cm.
- Cena snímků z družice GeoEye-1, které umožňují extrakci DMP, pro oblast výzkumu v oblasti pohoří Sabaloka byla dodavatelem stanovena na 12 500 dolarů.
- Small Format Aerial Photography*.
- Na rozdíl od zpracování LMS snímků, kde jsou parametry vnitřní a vnější orientace snímku pro zpracování vyžadovány.
- Pro sběr dat pomocí KAP byl použit interval snímkování 2 s.
- Pozemní fotogrammetrie s předmětovou vzdáleností do 30 m.
- Při výzkumu v roce 2012 byl vytvořen vrstevnicový plán lokality z celkem 370 bodů – hustota 0,40 bodu/m².

Literatura:

- Aber, James S. – Marzolf, Irene – Ries, Johannes B.: 2010 *Small-Format Aerial Photography: Principles, Techniques and Geoscience Applications*, Amsterdam – London: Elsevier Science.
- Ali, Abdullah E.: 2009 *Current Status of GIS in the Sudan. Eighteenth United Nations Regional Cartographic Conference for Asia and the Pacific*, Bangkok: United Nations. Economic and Social Council.
- Barsanti, Gonizzi S. – Remondino, Fabio – Visintini, Frank D.: 2013 „3D surveying and modeling of archaeological sites – some critical issues“, in: Grussenmeyer, P. (ed.). *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume II-5/W1, 2013 XXIV International CIPA Symposium, 2–6 September 2013, Strasbourg, France*, s. 145–150, <http://www.isprs-ann-photogrammetry-remote-sensing-spatial-inf-sci.net/II-5-W1/index.html>.
- Bitelli, G. – Unguendoli, M. – Vittuari, L.: 2001 „Photographic and photogrammetric archaeological surveying by a kite system“, in: Alpuente, Jesús *et al.* (eds.). *Proceedings of the 3rd International Congress on Science and Technology for the Safeguard of Cultural Heritage in the Mediterranean Basin. Alcalá de Henares, 9–14 July 2001*, Alcalá de Henares: Servicio de Publicaciones de la Universidad de Alcalá, s. 538–543.
- Bewley, R. H. – Raczkowski, W.: 2002 „Past achievements and prospects for the future development of aerial archaeology: an introduction“, in: Bewley, R. H. – Raczkowski, W. (eds.). *Aerial Archaeology: Developing Future Practice*, Amsterdam – Washington: IOS Press [NATO Science Series. Series I: Life and Behavioural Sciences 337], s. 1–8.
- Brophy, Kenneth – Cowley, Dave: 2005 *From the Air: Understanding Aerial Archaeology*. Stroud: Tempus.
- Brůna, Vladimír: 2013 „Využití KAP (Kite Aerial Photography) při dokumentaci výzkumu v Abúsíru“, *Pražské egyptologické studie* 11, s. 37–43.
- Cardenala, J. – Mataa, E. – Castroa, P. – Delgadoa, J. – Hernandeza, M. A. – Perez, J. L. – Ramos, M. – Torres, M.: 2004 „Evaluation of a digital non metric camera (Canon D30) for the photogrammetric recording of historical buildings“, in: Altan, Orhan (ed.). *ISPRS Congress Istanbul. Vol. XXXV, Part B5*, s. 455–460, <http://www.isprs.org/proceedings/XXXV/congress/comm5/comm5.aspx>.
- Chagny, Bernard Noël – Hesse, Albert: 2007 „Soudan 1994–2006: Photographies archéologiques sous cerf-volant avec Francis Geus“, in: Gratiens, Brigitte (ed.). *Mélanges offerts à Francis Geus. Égypte-Soudan*, Lille: Université Charles de Gaulle – Lille [Cahiers de recherches de l'Institut de papyrologie et d'égyptologie de Lille 26], s. 47–59.
- Chandler, Jim H. – Fryer, John, G. – Jack, Amanda: 2005 „Metric capabilities of low-cost digital cameras for close range surface measurement“, *Photogrammetric Record* 20/109, s. 12–26
- Doneus, M. – Verhoeven, G. – Fera, M. – Briese, Ch. – Kucera, M. – Neubauer W.: 2011 „From deposit to point cloud – a study of low-cost computer vision approaches for the straightforward documentation of archae-

- ological excavations“, in: Čepek, Aleš *et al.* (eds.). *International CIPA Symposium*, Vol. 6, Prague: Faculty of Civil Engineering, Czech Technical University in Prague, s. 81–88.
- Gojda, Martin: 1996 „Letecká archeologie na území bývalého Československa – Introduction to a volume on aerial archaeology on the territory of former Czechoslovakia“, *Archeologické rozhledy* 48, s. 173–176.
- 2003 „Aerial reconnaissance in archaeology and past landscape studies. The application of visual prospection from low altitudes in Bohemia“, *Kartografie a geoinformatika* 5/2, s. 4–10.
- Hašek, Vladimír – Kovárník, Jaromír: 1996 „Letecká a geofyzikální prospekce při výzkumu pravěkých kruhových příkopů na Moravě“, *Sborník prací Filozofické fakulty brněnské univerzity*. M1. Řada archeologická 45, s. 57–79.
- Kersten, Thomas P.: 2006 „Combination and Comparison of Digital Photogrammetry and Terrestrial Laser Scanning for the Generation of Virtual Models in Cultural Heritage Applications“, in: Ioannides, M. – Arnold, D. – Niccolucci, F. – Mania, K. (eds.). *The 7th International Symposium on Virtual Reality, Archaeology and Cultural Heritage, VAST*, Geneva: Eurographics, s. 207–214.
- Lisá, Lenka – Suková, Lenka – Čílek, Václav – Lisý, Pavel: 2011 *Sabaloka a Šestý nilský katarakt*, Praha: Novela bohemia.
- Pavelka, Karel: 2003 *Fotogrammetrie*, Plzeň: Fakulta aplikovaných věd ZČU.
- Pacina, Jan – Suková, Lenka – Varadzin, Ladislav: 2012a *Archaeological Map of Fox Hill, Al Higeir Abu Dom, Sabaloka Dam Region (West Bank), Sudan (2011–2012)*. 1:1500, FŽP_MAP_PAC_2012_1, Ústí nad Labem: Fakulta životního prostředí.
- 2012b *Archaeological Map of Sphinx (SBK.W-60), Sabaloka Dam Region, Sudan (2011–2012)*. 1:300, FŽP_MAP_PAC_2012_2, Ústí nad Labem: Fakulta životního prostředí.
- 2012c *Archaeological Map of Uncovered Features on Terrace 1 at Fox Hill. Al Higeir Abu Dom, Sabaloka Dam Region (West Bank), Sudan (2011–2012)*. 1:200, FŽP_MAP_PAC_2012_3, Ústí nad Labem: Fakulta životního prostředí.
- 2012d *Collection of Plans of Archaeological Soundings on Terrace 1 at Fox Hill, Al Higeir Abu Dom, Sabaloka Dam Region (West Bank), Sudan (2011–2012)*. FŽP_MAP_PAC_2012_4, Ústí nad Labem: Fakulta životního prostředí.
- Quan, Long: 2010 *Image-based Modeling*, New York: Springer.
- Palmer, Rog – Cowley, Dave: 2009 „Interpreting aerial images – developing best practice“, in: Campana, Stefano – Forte, Maurizio – Liuzza, Claudia (eds.). *Space, Time, Place. Third International Conference on Remote Sensing in Archaeology, 17th–21st August 2009, Tiruchirappalli, Tamil Nadu, India*, Oxford: Archaeopress [BAR International Series 2118], s. 129–135.
- Ullman, Shimon: 1979 „The interpretation of structure from motion“, *Proceedings of the Royal Society of London. Series B. Biological Sciences* 203, s. 405–426.
- Seitz, S. M. – Curless, B. – Diebel, J. – Scharstein, D. – Szeliski, R.: 2006 „A comparison and Evaluation of multi-view stereo reconstruction algorithms“, in: Fitzgibbon, Andrew – Taylor, Camillo – LeCun, Yann J. (eds.). *IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR'06)*, Vol. 1, Washington: IEEE, s. 519–528.
- Sládek, Jan – Rusnák, Miloš: 2013 „Nízkonákladové mikro-UAV technologie v geografii (nová metoda zberu priestorových dát)“, *Geografický časopis* 65/3, s. 269–285.
- Siebert, S. – Teizer, J.: 2014 „Mobile 3D mapping for surveying earthwork projects using an Unmanned Aerial Vehicle (UAV) system“, *Automation in Construction* 41, s. 1–14.
- Suková, Lenka – Čílek, Václav – Lisá, Lenka – Lisý, Pavel – Bushara, Mur-tada: 2010 „Geoarcheologický výzkum v oblasti 6. nilského kataraktu (Sabaloky) v Súdán“, in: Dulíková, Veronika – Jirásková, Lucie – My-nářová, Jana (eds.). *Pražské egyptologické studie* 7, Praha: Univerzita Karlova v Praze, s. 11–15.
- Suková Lenka – Čílek, Václav: 2012 „The Landscape and Archaeology of Jebel Sabaloka and the Sixth Nile Cataract, Sudan“, *Interdisciplinaria Archaeologica – Nat. Sciences in Arch.* III/2, s. 189–201.
- Suková Lenka – Varadzin Ladislav: 2012a „Sabaloka Project: Exploration of Jebel Sabaloka (West Bank), 2009–2012“, *Sudan & Nubia* 16, s. 118–131.
- 2012b „Výzkum pravěkého osídlení v pohoří Sabaloka v centrálním Súdán“, *Pražské egyptologické studie* 10, s. 3–10.
- Verhoeven, G. – Doneus, M. – Briese, Ch. – Vermeulen F.: 2012 „Mapping by matching: a computer vision-based approach to fast and accurate georeferencing of archaeological aerial photographs“, *Journal of Archaeological Science* 39/7, s. 2060–2070.
- Žurawski, Bogdan: 1993 „Low altitude aerial photography in archaeological fieldwork: the case of Nubia“, *Archaeologia Polona* 31, s. 243–256.
- 2005 „Miracles of Banganarti. Polish archaeological discoveries in Sudan“, *Focus on Archaeology* 1/5, s. 20–23.

Abstract:

Geodetic measurements and 3D modelling as methods of documenting archaeological research in the Sudan (Sabaloka, 6th Nile cataract)

New spatial data collection methods such as Unmanned Aerial Vehicles, Kite Aerial Photography (KAP), close range photogrammetry and laser scanning provide numerous opportunities for archaeological research documentation. Since the year 2009, the archaeological research covered by the Czech Institute of Egyptology has been situated in the area of the 6th Nile cataract – near the Sabaloka game reserve (the Republic of the North Sudan). The past expeditions employed traditional ways of surveying the archaeological sites in creating archaeological maps and in other types of research. In the 2014 season, the KAP and close range photogrammetry methods were applied at several archaeological sites in order to make a comprehensive database enabling the study of the sites in the virtual environment. The Sphinx locality (SBK.W-60) presented in this paper is completely covered with spatial data of different scales (the whole locality, occupation terrace, soundings and details of discovered features) – surveyed points, orthophotos and digital terrain models derived from KAP and close range photogrammetry. All of the created 3D models are accessible online at <https://sketchfab.com/jan.pacina/folders>.

Sudan – archaeology – surveying – 3D modelling – small format aerial photography – KAP – photogrammetry

Súdán – archeologie – geodézie – 3D modelování – maloformátová letecká fotografie – KAP – fotogrammetrie

Jan Pacina (jan.pacina@ujep.cz)

Fakulta životního prostředí, Univerzita J. E. Purkyně v Ústí nad Labem