

EXPERIMENTÁLNE OVERENIE HYPOTÉZY VZNIKU KVARCITOVÝCH JASKÝŇ

ÚVOD

Počas posledných dvoch desaťročí boli objavené veľké jaskynné systémy vytvorené v arenitických horninách mezoproterozoického veku v stolových horách Južnej Ameriky, ktoré sa tiež nazývajú tepui. Najväčšie z týchto systémov sú Ojos de Cristal (Roraima Sur) objavený v r. 2002 (Šmída et al., 2003), systém Churí Tepuy s najväčšou jaskyňou Cueva Charles Brewer objavenou v r. 2004 (Šmída et al., 2010, sumárne informácie o oboch systémoch sú uvedené v Aubrecht et al., 2012) a systém Imawari Yeuta objavený v r. 2013 (Sauro et al., 2013b).

Náš kolektív vypracoval hypotézu vzniku týchto jaskýň selektívnou litifikáciou pôsobením litifikačných fluid vznikajúcich lateritizáciou nadložných sedimentov bohatých na alumosilikátové minerály. Selektívna litifikácia je spôsobená tzv. prúdením prstami, teda preferenčným vznikajúcim na rozhraní vrstiev jemnozrnných a hrubozrnných pieskov (procesy vzniku prúdenia prstami sú popísané napr. na stránke <http://soilandwater.bee.cornell.edu/research/pfweb/educators.htm>). Výsledkom pôsobenia prúdenia prstami v hrubozrnnnej vrstve je tvorba stĺpovitých útvarov čiastočne litifikovaného pieskovca (obr. 2). Po odstránení nelitifikovanej časti vrstvy eróznymi procesmi vznikajú jaskynné priestory. Postupná erózia stĺpov vedie k zrúteniu stropov, vďaka čomu vznikajú obrovské podzemné priestory (Aubrecht et al., 2008, 2011, 2012).

Vrstvy s krížovým zvrstvením produkujú iný typ preferenčného prúdenia, tzv. prúdenie lievikom, čo taktiež vedie k neúplnej litifikácii v dôsledku vyššej rýchlosti prúdenia litifikačných fluid. Na stolovej hore Akopán boli v prostredí krížového zvrstvenia pozorovateľné menšie jaskyne a previsy trojuholníkového tvaru.

Za účelom overenia horeuvedených hypotéz sme vykonali sériu laboratórnych pokusov prúdenia litifikačných fluid a následnej litifikácie pieskov. Výsledky pokusov sme konfrontovali s konkurenčnou arenizačnou teóriou, ktorá za hlavný speleogenetický proces považuje arenizáciu pieskovcov, t.j. uvoľňovanie zŕn piesku z pieskovca v dôsledku v dôsledku rozpúšťania rekryštalizovaného kremitého tmelu medzi zrnami (Martini, 1979, 2002, 2004).

¹ Tomáš LÁNCZOS

² Roman AUBRECHT

² Ján SCHLÖGL

¹ Petronela FILIPČÍKOVÁ

³ Marek AUDY

Univerzita Komenského v Bratislave
Prírodovedecká fakulta
Ilkovičova 6, Bratislava

¹ Katedra geochemie

² Katedra geológie a paleontológie

³ Česká speleologická spoločnosť
Tyršova 332, Jedovnice, ČR

EXPERIMENTAL PROOF OF THE QUARTZITE CAVES GENESIS

Abstract: South American table mountains (tepui) host the largest arenitic cave systems in the world. To explain speleogenesis in these insoluble rocks, two theories were introduced: a) arenization theory implying selective weathering of quartz cements and releasing of sand grains, b) selective lithification theory implying lithification by descending silica-bearing fluid flow. The latter presumes that the descending fluid flow becomes unstable on the interface between two layers with different porosity and splits to separate flow channels ("finger flow"). The arenites outside these channels remain unlithified. There is also a so-called "funnel-flow" which occurs at inclined layers. This works for cross-bedded arenites. To verify the latter theory, small-scale modelling was performed, using sands and sodium-silicate solution. For experiments with contrasting grain-size, fine to medium sand fraction was used (0.08-0.5 mm), along with coarse (0.5-1.5 mm) fraction. For experiments with cross-bedded sediments, only the fine fraction has been used. The sands were layered and compacted in a transparent plastic boxes. Sodium-silicate solution (so-called water glass) was left to drip for several hours to the top of the sediment. Results of this small-scale modelling mimic the real diagenesis by descending silica-bearing fluids and match the real phenomena observed on the tepuis. The resulting lithified constructions closely mimic many geomorphological features observed on tepuis and inside their caves, e.g. "finger-flow" pillars, overhangs, imperfectly formed (aborted) pillars in forms of hummocks hanging from ceilings, locally also thicker central pillars that originated by merging of smaller fluid-flow channels. The models with cross-bedding display close similarity with triangular-shaped shelters and caves observed in aeolian sediments on Akopán Tepui. The modelling showed that selective lithification theory can explain most of the geomorphological aspects related to the speleogenesis in tepuis, whereas the arenization theory can explain only particular problems.

Key words: tepuis, arenitic caves, preferential flow, modelling

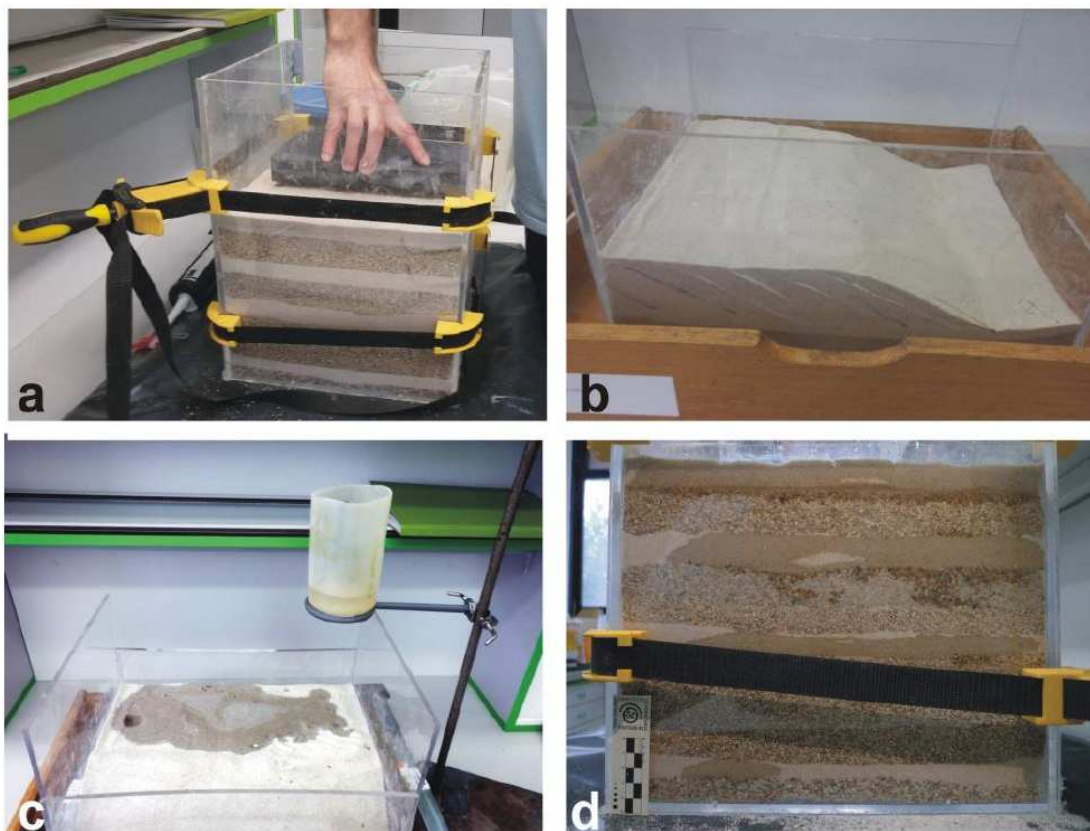
Cieľom experimentov bolo dokázať procesy selektívnej litifikácie pieskovcov prostredníctvom preferenčného prúdenia litifikačných fluid ako významného procesu speleogenézy v prostredí kvarcitových hornín stolových hôr Južnej Ameriky.

MATERIÁL A METÓDY

Za účelom overenia hypotézy o selektívnej litifikácii zostupujúcimi fluidami obsahujúcimi kyselinu kremičitú bola vykonaná séria experimentov na vrstvách piesku obsahujúcimi vrstvy s kontrastnou zrnitosťou. Ďalšie experimenty boli vykonané na vrstvách piesku s krížovým zvrstvením (obr. 1). Na simuláciu litifikačných fluid bol použitý komerčne dostupný roztok kremičitanu sodného („vodné sklo“) o koncentrácii cca. 36% ako médium najvhodnejšie na simuláciu litifikácie pieskovca v krátkom čase. Po niekoľkých pokusoch s pevnými nádobami sa najlepšie osvedčili nádoby z plexiskla konštruované z na mieru narezaných plátov lepených silikónovým lepidlom priamo v laboratóriu.

Pre experiment s vrstvami s kontrastnou zrnitosťou boli nádoby naplnené vrstvami piesku o zrnitosti 0,08 – 0,5 mm a mocnosti 2 – 3 cm striedané s vrstvami o zrnitosti 0,5 – 1,5 mm a mocnosti 5 – 10 cm. Pre experimenty s krížovým zvrstvením sme použili iba jemnozrnnú frakciu, napodobňujúcu eolickú sedimentáciu. Vrstva s krížovým zvrstvením sa nachádzala medzi dvomi horizontálnymi vrstvami. Jednotlivé vrstvičky v krížových vrstvách boli akcentované jemnou vrstvou kaolinitu (obr. 1b). Prienik litifikačných roztokov do súvrstvia bol simulovaný pomalým kvapkaním roztoku kremičitanu sodného na povrch modelov (obr. 1c).

Litifikované arenitové formy boli fotodokumentované a porovnávané s terénnou dokumentáciou a fotografiami z terénneho výskumu na povrchu stolových hôr Churí a Akopán ktoré sú súčasťou masívu Chimantá a tiež Roraimy Tepuy a tiež v jaskynných systémov týchto hôr (jaskynné systémy Churí Tepuy a Ojos de Cristal).



Obr. 1. Príprava a priebeh experimentov. (a) Kompakcia vrstiev piesku s kontrastnou zrnitosťou. (b) Príprava vrstvy s krížovým zvrstvením. (c) Pridávanie roztoku kremičitanu sodného počas priebehu experimentu s krížovým zvrstvením. (d) Prienik roztoku kremičiatnu sodného cez horizontálne vrstvy piesku. Vrchná vrstva hrubozrného piesku je takmer celá nasýtená, vo vrstve hrubozrného piesku pod ňou je možné pozorovať vznikajúce prúdy prstami.

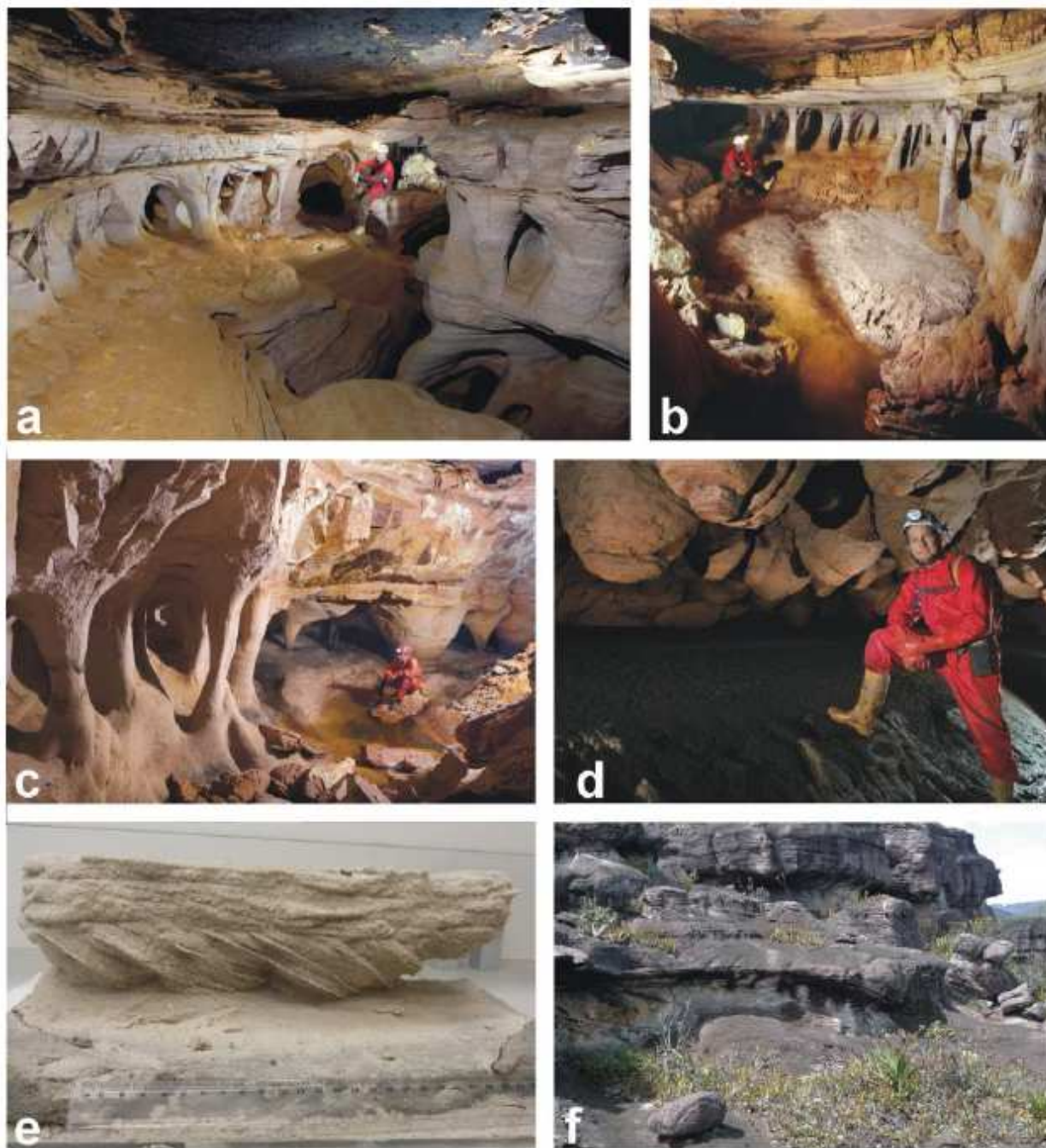
VÝSLEDKY A DISKUSIA

Finálny litifikovaný produkt experimentu s vrstvami s kontrastnou zrnitosťou v niektorých prípadoch obsahoval dobre zachované stĺpy po prúdoch prstami medzi vrstvami s jemnozrnným pieskom (obr. 2), v iných prípadoch sa prúdy spojili a vytvorili mohutnejší centrálny stĺp (obr. 2.d-e), s pozorovateľnými reliktmi individuálnych prúdov na okraji. Avšak aj v takýchto prípadoch zostali miestami zachované kavity alebo individuálne stĺpy.



Obr. 2 Výsledky experimentov s kontrastným zvrstvením. (a-b) Väčšina stĺpov je vyvinutých vo vrstve uprostred, menej v spodnej vrstve. Horná vrstva hrubozrnného piesku je takmer celá litifikovaná. Viacero stĺpov je buľovito zhrubnutých. (c) Raný experiment s pevnou plastovou nádobou. Stĺpy sú vyvinuté iba v strednej vrstve, viacero z nich bolo deštruovaných pri vpremiestňovaní modelu z nádoby. (d) V dôsledku rýchleho prúdenia sa väčšina stĺpov spojila v jeden centrálny, na jeho okrajoch je však stále vidieť reliktu pôvodných stĺpov. (e) V dôsledku použitia nadmerného množstva roztoku došlo k takmer úplnej litifikácii, s jednou zachovanou kavernou. (f) Najhrubšie a najväčšie stĺpy sa vyvinuli v spodnej vrstve, kde sa nachádza aj nedokončený stĺp.

Modely napriek svojim malým rozmerom efektívne simulovali štruktúry pozorovateľné na stolových horách a ich jaskyniach, napr. rovné dná a stropy podopierané stĺpmi po prúdoch prstami (obr. 3a-c). Stĺpy boli väčšinou kolmé k nad- a podložným vrstvám, avšak sa pomerne často vyskytli aj mierne šikmé. Niektoré stĺpy boli miestami buľovito zhrubnuté (obr. 2a-b), čo pripomína stĺpy popísané Saurom et al. (2013b) v jaskyni Imawarí Yeuta na Akopáne. Niektoré stĺpy zostali neukončené vo vývoji, tvoriac hrubé a krátke kvapľovité útvary nazývané miestnymi speleológmi „tetas“, čiže „prsníky“ (obr. 3d). Štruktúry vzniknuté experimentmi s krížovým zvrstvením vykazujú efektívnu litifikáciu horizontálne uložených vrstiev a oveľa slabšiu litifikáciu krížového zvrstvenia (obr. 3e) vytvárajúc trojuholníkovité previsy, aké boli pozorované na stolovej hore Akopán (obr. 3f).



Obr. 3 (a-d) Fotografie z jaskýnných priestorov na stolovej hore Churí Tepui. (a) Dve vrstvy v superpozícii s vyvinutými stĺpmi. Tektonický pôvod stĺpov by neumožnil takúto konfiguráciu (jaskyňa Cueva de las Arañas). (b) Dobre vyvinuté stĺpy v jaskyni Cueva de las Arañas. Vo vrchných častiach niektorých stĺpov je možné pozorovať spájanie prúdov. Ak by bol pôvod stĺpov tektonický, tak by nadložná vrstva mal byť porušená vertikálnymi puklinami (c) Dobre zachované stĺpy v jaskyni Cueva de las Arañas. (d) Neukončené stĺpy ("tetras") na stropě v jaskyni Cueva Eladio (Sistema Brewer). (e) Litifikovaný výsledok experimentu s krížovým zvrstvením. Nad- a podložná vrstva sú litifikované rovnomerne, kým vrstva medzi nimi je litifikovaná neúplne, vytvárajúc negatívny reliéf. (f) Terénna fotografia zo stolovej hory Akopán, na ktorej je možné pozorovať negatívny reliéf vrstvy s krížovým zvrstvením.

Naše experimenty poskytli presvedčivý dôkaz podporujúci našu hypotézu vzniku jaskýň v kvarcitoch stolových hôr. Avšak nie všetky aspekty pozorovateľné v teréne je možné reprodukovat' modelmi takýchto malých rozmerov. Napr. hrubozrnné vrstvy nemali dostatočnú mocnosť k tvorbe dokonale tvarovaných stĺpov s rozšírením na hornom a aj dolnom konci, určujúce procesy sú však evidentné.

Hlavnou konkurenčnou hypotézou je arenizácia (Martini, 1979, 2004), ktorej viaceré aspekty boli diskutované s našim autorským kolektívom na stránkach Journal of Geomorphology (Sauro et al., 2013a; Aubrecht et al., 2013a). V

najnovšej publikácii podporujúcej teóriu arenizácie (Sauro, 2014) je vznik stĺpov vysvetľovaný tektonickou predispozíciou vetikálnymi puklinami ohraničujúcimi jednotlivé stĺpy. V miestach porušených puklinami bol materiál pieskovca erodovaný. Tomuto predpokladu však protirečia tektonicky neporušené nadložné a podložné vrstvy v ktorých sa stĺpy nenachádzajú.

ZÁVER

Výsledky laboratórneho modelovania pomerne verne reprodukovajú geomorfologické črty pozorované na stolových horách, ako aj v jaskyniach ktoré sa v nich nachádzajú, ako sú stĺpy po prstových prúdoch, trojuholníkové previsy, náznaky stĺpov visiace zo stropov („tetas“). Hypotéza selektívnej litifikácie, ktorú sme sa uvedenými laboratórnymi modelmi pokúšali dokázať teda vysvetľuje väčšinu geomorfologických prvkov ktoré súvisia so speleogenézou, kým arenizáciou je možné vysvetliť iba niektoré čiastkové javy.

PodĎakovanie: Táto práca bola podporená projektom APVV 14-0276.

LITERATÚRA

- AUBRECHT, R., LÁNCZOS, T., ŠMÍDA, B., BREWER-CARIÁS, CH., MAYORAL, F., SCHLÖGL, J., AUDY, M., VLČEK, L., KOVÁČIK, L., GREGOR, M., 2008: Venezuelan sandstone caves: a new view on their genesis, hydrogeology and speleothems. *Geologia Croatica*, 61, 2-3, 345-362
- AUBRECHT, R., LÁNCZOS, T., GREGOR, M., SCHLÖGL, J., ŠMÍDA, B., LIŠČÁK, P., BREWER-CARIÁS, CH., VLČEK, L., 2011: Sandstone caves on Venezuelan tepuis: return to pseudokarst? *Geomorphology*, 132, 3-4, 351-365
- AUBRECHT, R., BARRIO-AMOROS, C., BREURE, A., BREWER-CARIÁS, CH., DERKA, T., FUENTES-RAMOS, O.A., GREGOR, M., KODADA, J., KOVÁČIK, L., LÁNCZOS, T., LEE, N.M., LIŠČÁK, P., SCHLÖGL, J., ŠMÍDA, B., VLČEK, L., 2012: Venezuelan tepuis – their caves and biota. *Acta Geologica Slovaca - monograph*, 1-168
- AUBRECHT, R., LÁNCZOS, T., GREGOR, M., SCHLÖGL, J., ŠMÍDA, B., LIŠČÁK, P., BREWER-CARIÁS, CH., VLČEK, L., 2013a: Reply to the Comment on "Sandstone caves on Venezuelan tepuis: Return to pseudokarst?". *Geomorphology*, 197, 1, 197-203
- AUBRECHT, R., LÁNCZOS, T., SCHLÖGL, J., VLČEK, L., ŠMÍDA, B., 2013b: Arenitic caves in Venezuelan tepuis: what do they say about tepuis themselves? In: Filippi, M. and Bosák, P. (eds.): *Proceedings of the 16th International Congress of Speleology*, July 21-28, 2013, Brno, Czech Republic, Vol. 3, 221-226
- MARTINI, J.E.J., 1979: Karst in Black Reef Quartzite near Kaapsehoop, Eastern Transvaal. *Ann. Geol. Surv. South Africa*, 13, 115-128
- MARTINI, J.E.J., 2000: Dissolution of quartz and silicate minerals. In: Klimchouk, A. B., Ford, D. C., Palmer, A. N., Dreybrodt, W. (eds.): *Speleogenesis, Evolution of Karst Aquifer*, January 2000 edition. NSA, Inc., Huntsville, Alabama, 171-174
- MARTINI, J.E.J., 2004: Silicate karst. In: Gunn J. (Ed.): *Encyclopedia of caves and karst science*. Fitzroy Dearborn, London, 1385-1393
- SAURO, F., 2014: Structural and lithological guidance in quartz-sandstone caves: evidences of the arenisation process. *Geomorph.*, 226, 106-123
- SAURO, F., PICCINI, L., MECCHIA, M., DE WAELE, J., 2013a: Comment on "Sandstone caves on Venezuelan tepuis: Return to pseudokarst?" by R. Aubrecht, T. Lánzos, M. Gregor, J. Schlögl, B. Smída, P. Liščák, Ch. Brewer-Carías, L. Vlcek, *Geomorphology* 132 (2011), 351-365. In: *Geomorphology*, 197, 1, 190-196
- SAURO, F., VERGARA, F., DE VIVO, A., DE WAELE, J., LIRA, J., 2013b: In the House of Gods on Devil's Mountain. Imawarí Yeuta Cave, Auyan Tepui, Canaima National Park, Venezuela. *NSS News*, September, 2013, 7, 10-19
- ŠMÍDA, B., AUDY, M., VLČEK, L., 2003: Roraima 2003 expedition. Crystal Eyes Cave. *Bull. SSS*, 34, 2 (spec. vol.), 1-190 (in Slovak).
- ŠMÍDA, B., BREWER-CARIÁS, CH., AUDY, M., MAYORAL, F., BAKŠIĆ, D., VLČEK, L., STANKOVIĆ, J., 2010: Churi-Tepui Cave System: Inside the second largest quartzite cave in the world. *NSS News* 68, 7, 16-23