

## Úloha vody v genéze pseudokrasových javov v kvarcitoch stolových hôr Guayanskej vysočiny

Tomáš LÁNCZOS<sup>1</sup>, Roman AUBRECHT<sup>2</sup>, Miloš GREGOR<sup>3</sup>, Ján SCHLÖGL<sup>2</sup>, Branislav ŠMÍDA<sup>4</sup>, Lukáš VLČEK<sup>5</sup>, Charles BREWER-CARÍAS<sup>6</sup>, Federico MAYORAL<sup>6</sup>

<sup>1</sup>Katedra geochémie Prírodovedeckej fakulty Univerzity Komenského, Bratislava

<sup>2</sup>Katedra geológie a paleontológie Prírodovedeckej fakulty Univerzity Komenského, Bratislava

<sup>3</sup>Geologický ústav Prírodovedeckej fakulty Univerzity Komenského, Bratislava

<sup>4</sup>Slovenská speleologická spoločnosť, Liptovský Mikuláš

<sup>5</sup>Slovenská správa jaskýň, Liptovský Mikuláš

<sup>6</sup>Grupo Espeleológico de la Sociedad Venezolana de Ciencias Naturales, Caracas, Venezuela

### Úvod

Otázka genézy krasových resp. pseudokrasových javov v kvarcitoch vo všeobecnosti zatiaľ nebola v geologickej verejnosti veľmi široko diskutovaná a pravdepodobne aj preto v tejto otázke zatiaľ vládne do istej miery vzácna zhoda. V súčasnosti najakceptovanejším modelom vzniku kvarcitového krasu je model arenizácie prezentovaný Martinim (1979), t.j. rozpúšťanie kremenného tmelu kvarcitov a následné uvoľňovanie kremenných zŕn infiltrovanými zrážkovými vodami. Podľa Chalcrafta a Pye (1984) a Wraya (1997) rozpúšťanie prebieha penetratívne pozdĺž plôch styku medzi jednotlivými zrnami a plôch medzi vrstvami. Tento model je plne akceptovaný pre vysvetlenie karstogenézy v kvarcitoch vo všeobecnosti napr. Briceňom et al. (1991). Arenizáciou bola vysvetlená napr. genéza krasového systému Aonda na venezuelskej stolovej hore Auyán Mécchiom a Piccinim (2009). Vo vyššie uvedených hypotézach voda vstupuje ako rozpúšťadlo kremitého tmelu a erózne, resp. transportné médium. Podľa našich poznatkov však voda predstavuje podstatne komplexnejší faktor v uvedených procesoch, navyše je dominancia rozpúšťacích procesov vo svetle nových poznatkov diskutabilná, takže navrhujeme pre pomenovanie študovaného prírodného fenoménu používať termín pseudokras.

### Lokalizácia a geologické pomery

Známe stolové hory (tepui alebo tepuy) sa nachádzajú vo venezuelskej časti Guayanskej vysočiny (juhovýchodná Venezuela, štát Bolívar). Širšie okolie stolových hôr je tvorené odlesnenou savanou nazvanou Gran Sabana (4°30'–6°45' N a 60°34'–62°50' W), v hornej časti povodia rieky Caroní, jedného z hlavných prítokov rieky Orinoco.

Širšie okolie oblasti Gran Sabana je budované horninami Guayanského štítu ktorý predstavuje severný segment Amazónskeho kratónu. Guayanský štít sa rozprestiera na ploche asi 900 000 km<sup>2</sup> v oblasti medzi riekami Amazonka a Orinoco (Cordani et al., 1988 in Voicu et al. 2001).

Stolové hory sú tvorené horninami skupiny Roraima pozostávajúcej z pieskovcov so zdrojovou oblasťou v Transamazónskom pohorí, ktoré boli deponované v predobľukovej panve v prostredí divočiach riek, delt a plyn-

kého mora, avšak prevažujú piesočnaté kontinentálne depozity (Reis et al. 1990 in Santos 2003). Horniny skupiny Roraima tvoria stolové hory, kvesty a kozie chrbty čnejúce ponad paleoproterozoické podložie o mocnosti od 200 m do vyše 3000 m. Skupina pozostáva z nasledujúcich formácií v postupnosti od najspodnejšej k najvrchnejšej: Arai, Suapi (Uiramutã, Verde, Pauré, Cuquenán, Quinô), Uaimapuê a Matauí (Reis a Yáñez, 2001). Stolové hory sa vytvárali najmä v rámci formácie Matauí. Vek hornín najvrchnejšej časti skupiny Roraima stanovený na základe U-Pb metódy v zirkónoch v zelených tufoch formácie Uaimapuê je 1873 ± 3 Ma (Santos et al., 2003)

### Metodika

V predložennom príspevku sú prezentované výsledky terénneho geologického, geochemického a mikrobiologického výskumu viacerých kvarcitových jaskýň stolových hôr Macizó del Chimantá a Monte Roraima počas expedícií v rokoch 2007 a 2009. Počas terénnych prác boli odobrané vzorky hornín, speleotém, mikrobiologického materiálu a vody. Horninové vzorky a vzorky speleotém boli skúmané polarizačným mikroskopom, scanovacím elektrónovým mikroskopom (SEM) a RTG difrakčnou analýzou. Vo vzorkách vôd boli in situ stanovené hodnoty pH a mernej elektrickej vodivosti. Ešte v deň odberu bolo vo vzorkách filtrovaných cez filter 0,45 µm boli kufríkovým kolorimetrom Merck Spectroquant® Multy v r. 2007 stanovené Fe, SiO<sub>2</sub>-Si, Al, PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N; v r. 2009 bol súbor parametrov doplnený o Mn a NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N. V laboratóriách Oddelenia izotopovej geológie Štátneho geologického ústavu Dionýza Štúra boli v týchto vzorkách stanovené hodnoty δD a δ<sup>18</sup>O.

### Výsledky

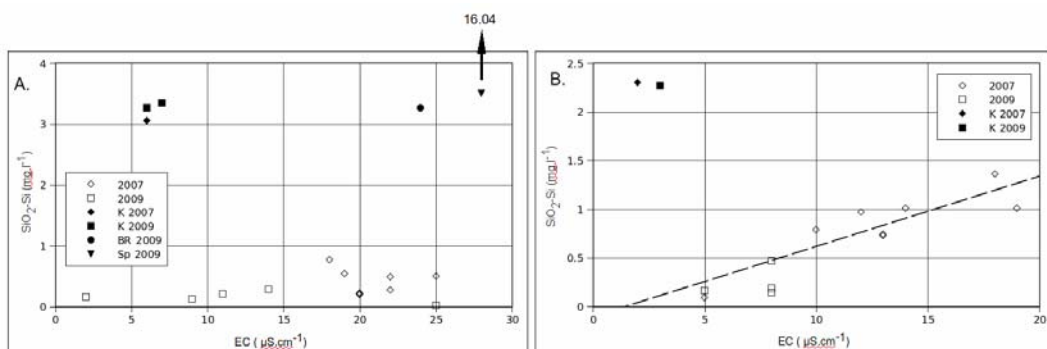
Úloha vody v procese tvorby pseudokrasových javov v kvarcitoch je zrejme podstatne komplexnejší fenomén ako to bolo doteraz popisované (Martini, 1979; Chalcraft a Pye, 1984; Wray, 1997). V ďalšom texte popíšeme špecifickú úlohu vody v procese diagenézy kvarcitov, rozpúšťacích procesov, ako transportného média a tiež jej úlohu pri tvorbe speleotém.

V procese diagenézy kvarcitov má voda svoju špecifickú funkciu vytváraním predispozície tvorby pseudo-

krasových fenoménov. Už na povrchu stolových hôr masívu Chimantá a Monte Roraima je zjavná rôzna odolnosť jednotlivých polôh kvarcitov voči erózii. V polohách s najmenšou odolnosťou je typická prítomnosť odolných stĺpovitých útvarov vyvetrávajúcich zo stien. Tieto útvary je možné pozorovať aj v jaskyniach, kde niekedy podpierajú stropy jaskýň, vytvárajúcich tak vnútorný skelet jaskynných priestorov. Slabo spevnený až nespevnený piesočnatý materiál spomedzi stĺpovitých útvarov bol podrobený skúmaniu v SEM na základe čoho sme zistili, že tento materiál nenesie stopy prítomnosti kremitého tmelu, ktorý by bol v procese arenizácie rozpúšťaný a ani samotné kremenné zrná nevykazujú žiadne známky napleťovania, či rozpúšťania. Na základe tohto pozorovania usudzujeme, že tieto polohy boli najviac spevnené iba v rámci spomínaných stĺpovitých útvarov. Vznik takýchto útvarov môže byť dôsledkom tzv. prstového prúdenia, resp. prúdenia lievikom (Bauters et al., 1999; Liu et al., 1994) ktoré vzniká počas presakovania diagenetických roztokov z nadložnej vrstvy piesku s nižšou hydraulickou vodivosťou do vrstvy, ktorej hydraulická vodivosť je vyššia. Nadložná vrstva je v dôsledku nižšej rýchlosti prúdenia nasýtená roztokmi v celom objeme, avšak pri prestupe do vrstvy pod ňou sa prúdenie zrýchli, ale už nevyplní celý medzizrnový priestor polohy, ale postupuje v podobe prstovitých prúdov. Roztoky prednostne postupujú v prúdoch, kde už bol piesok raz zmáčaný (Liu et al., 1994) a tým pádom dochádza k diagenéze iba v priestore týchto postupových ciest, ktoré sú spevnené vo forme stĺpov.

*Rozpúšťanie horninotvorných minerálov* sa vo všeobecnosti považuje za kľúčový proces vzniku krasových javov; podľa Martiniho (1979) je rozpúšťanie kremenného tmelu kvarcitov tiež spúšťacím mechanizmom vzniku krasových javov v kvarcitoch. Významný vplyv rozpúšťacích procesov by sa mal prejaviť skôr za podmienok vyšších hodnôt pH, avšak tomuto podľa našich priamych

pozorovaní protirečia nami pozorované mimoriadne nízke hodnoty pH (3,3 až 5,64), čo je v súlade s publikovanými údajmi o geochémii prírodných vôd Gran Sabany (Briceño et al., 1991). Extrémne nízke hodnoty pH v týchto vodách sú spôsobené jednak slabou neutralizačnou schopnosťou reakcií voda – hornina a tiež rozkladnými procesmi rastlinného detritu produkujúcimi rôzne organické kyseliny, čo sa prejavuje aj typickým žltým až červeným zafarbením vody. Nízka intenzita reakcií rozpúšťania rôznych foriem  $\text{SiO}_2$ , či už kremenných zŕn alebo kremitého tmelu kvarcitov jednotky Matauí sa prejavuje nízkymi hodnotami mernej vodivosti a teda aj celkovým obsahom rozpustených látok. Minimálna stanovená hodnota mernej vodivosti v súbore všetkých hodnotených vzoriek bola  $2 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ , maximálna 28. Priemerné hodnoty konduktivity v r. 2007 boli  $16.7 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$  a mediánové  $19 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ , kým v roku 2009 bol tieto priemerné hodnoty  $11.8 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$  a mediánové  $9 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ . Uvedené rozdiely sú spôsobené najmä vyššou zrážkovou činnosťou počas expedície r. 2009 a pred ňou, čo sa prejavilo aj oveľa väčším rozptýlením hodnôt konduktivity vo vodách tokov v r. 2009. Naopak vody v tokoch r. 2007 boli vzorkované po dlhšie trvajúcom období sucha a teda boli významnejšie ovplyvnené výparom. Stanovené koncentrácie Si vo väčšine vzoriek sa pohybujú v rozmedzí od 0,02 do  $1,36 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$ ; v niekoľkých špecifických prípadoch v intervale  $2,27 - 3,35 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$  a v jednom prípade sme stanovili extrémnu hodnotu  $16,03 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$ . K tomu aby sme dokázali vyhodnotiť vplyv interakcií voda-hornina by bolo potrebné odobrať vzorky vôd v reprezentatívnych bodoch krasovo-puklinového systému od miesta prestupu do horninového systému po miesto výveru z neho, čo je vzhľadom na extrémne zlé priechodnosť a slabú preskúmanosť terénu fyzicky mimoriadne náročná úloha, ale nám sa to do istej miery podarilo na stolovej hore Monte Roraima počas expedície v roku 2007.



Obr. 1. Diagramy závislosti koncentrácie  $\text{SiO}_2$  od mernej elektrickej vodivosti vo vzorkách z Macizó del Chimantá (A.) a Monte Roraima (B.). 2007, 2009 – rok odberu, K 2007, K 2009 – vzorky skvapov zo stien s prejavmi koróziívneho rozpúšťania, BR 2009 – vzorka skvapovej vody z „barro rojo“, Sp 2009 – vzorka skvapovej vody zo speleotému

Na obrázku 1 vidíme zjavnú pozitívnu koreláciu medzi hodnotami mernej elektrickej vodivosti a koncentraciami Si, od najnižších hodnôt z jazera so zrážkovou vodou na povrchu po vyvieračku Tuná Deutá vyvierajúcu zo steny, cca. 200 – 300 m pod hranou stolovej hory, čo môže poukazovať na kineticky kontrolované rozpúšťanie  $\text{SiO}_2$ . Vzorky s koncentraciami Si nad  $2 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$

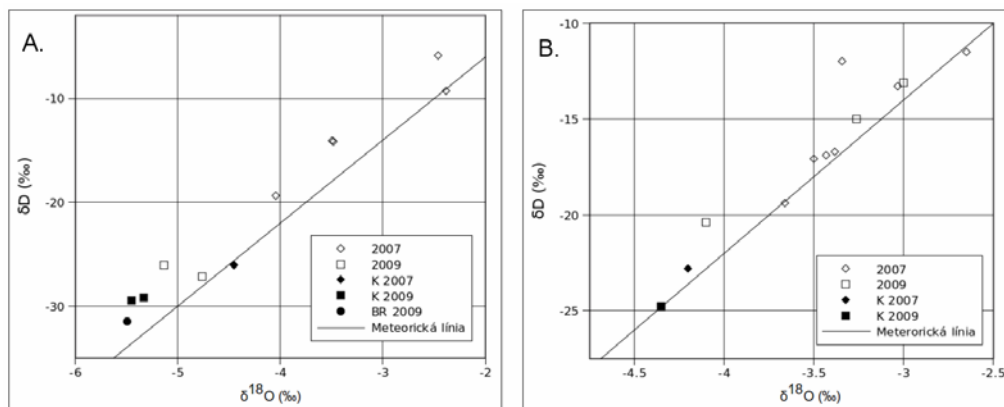
a hodnotami mernej elektrickej vodivosti  $2 - 3 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$  z jaskyne Cueva de los Pemones na Monte Roraima a hodnotou mernej elektrickej vodivosti  $6 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$  z jaskyne Cueva Charles Brewer na Macizó del Chimantá reprezentujú skvapové vody kondenzované na stenách jaskýň zo vzdušnej vlhkosti, čo dokazujú jednak mimoriadne nízke hodnoty mernej elektrickej vodivosti a zá-

roviť relatívne vysoké koncentrácie Si, ktoré sa dosiahli intenzívnym rozpúšťaním  $\text{SiO}_2$  silne nedosýtenou, v podstate destilovanou vodou (tzv. korozívne rozpúšťanie).

Pozícia týchto vzoriek v diagrame závislosti hodnôt  $\delta\text{D}$  od  $\delta^{18}\text{O}$  (obr. 2) poukazuje na posun k nižším hodnotám oproti vzorkám z jaskynných tokov, čo potvrdzuje predpoklad o ich pôvode v kondenzácii zo vzdušnej vlhkosti v podmienkach jaskynnej mikroklimy.

Ďalším pomerne často pozorovaným fenoménom v jaskynných systémoch Macizó del Chimantá je tzv. „barro rojo“, t.j. „červené blato“, vyskytujúce sa vo forme často mohutných výtokov bahna o mocnosti do

cca. 5–6 m. RTG difrakčná analýza vzoriek tohto materiálu potvrdila prítomnosť kaolinitu a goethitu. „Barro rojo“ teda možno považovať za produkt zvetrávania polôh pieskoviec s vyšším podielom alumosilikátov, prípadne až arkózových polôh, v dôsledku intenzívneho rozpúšťania/zvetrávania alumosilikátov (v podstate lateritizácie) v prostredí kyslých vôd stolových hôr. Vzorka vody presakujúca cez takýto bahnotok odobratá v jaskyni Cueva Juliana na Macizó del Chimantá vykazuje vysokú hodnotu mernej elektrickej vodivosti ( $24 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ ), koncentrácie Si ( $3,26 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$ ) a Fe ( $1,7 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$ ), čo je dôsledkom rozpúšťania sekundárnych, prípadne relikto primárnych alumosilikátov v „barro rojo“.



Obr. 2. Diagramy závislosti hodnôt  $\delta\text{D}$  od  $\delta^{18}\text{O}$  vo vzorkách z Macizó del Chimantá (A.) a Monte Roraima (B.). 2007, 2009 – rok odberu, K 2007, K 2009 – vzorky skvapov zo stien s prejavmi korozívneho rozpúšťania, BR 2009 – vzorka skvapovej vody z „barro rojo“.

S vysokými koncentraciami Si vo vodách pochádzajúcimi z korozívneho rozpúšťania, resp. lateritizácie arkózových polôh a rozpúšťania sekundárnych alumosilikátov v „barro rojo“ môže súvisieť výskyt morfoloicky mimoriadne rôznorodých opálových speleotém často nezvyčajne veľkých rozmerov s priemerom niekoľko desiatok centimetrov až presahujúcich 1 m. Ich stromatolitická štruktúra speleotém typu, ktorý bol nazvaný „champiñones“ je zrejme výsledkom pôsobenia mikroorganizmov. Podrobnejšie vysvetliť mechanizmus ich vzniku však ešte stále nedokážeme. Vo vzorke skvapovej vody z trsovitej opálovej speleotémy s dĺžkou cca. 1,5 m a mocnosťou do 30 cm bola stanovená extrémne vysoká hodnota koncentrácie Si ( $16,08 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$ ) a mernej elektrickej vodivosti ( $28 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ ), čo poukazuje na vplyv evaporácie na vody presakujúce z puklín v stene jaskyne.

**Podakovanie:** Práca bola financovaná z grantov agentúr APVV (grant APVV 0251-07) a VEGA (grant č. 1/0246/08).

## Literatúra

- Bauters, T.W.J., DiCarlo, D.A., Steenhuis, T.S., Parlange, J.-Y., 2000: Soil water content dependent wetting front characteristics in sand. *Journal of Hydrology* 231-232, 244-254.
- Briceño, H. O., Schubert, C., Paolini, J. 1991: Table-mountain Geology and Surficial Geochemistry: Chimantá massif, Venezuelan Guyana Shield. *Journal of South American Earth Sciences*, 3, 179-194.
- Chalcraft, D., Pye, K. 1984: Humid and tropical weathering of quartzite in southeastern Venezuela. – *Z. Geomorphol.*, 28, 321-332.
- Liu, Y., Steenhuis, T.S., Parlange, J.-Y., 1994: Formation and persistence of fingered flow fields in coarse grained soils under different characteristics in sands. *Journal of Hydrology*, 159, 187-195.
- Martini, J.E.J. 1979: Karst in Black Reef Quartzite near Kaapsehoop, Eastern Transvaal. – *Ann. South Afr. Geol. Surv.*, 13, 115-128.
- Piccini, L., Mecchia, M. 2009: Solution weathering rate and origin of karst landforms and caves in the quartzite of Auyan-tepui (Gran Sabana, Venezuela). *Geomorphology* 106, 15-25.
- Reis, N.J., Yanez, G., 2001: O Supergrupo Roraima ao longo da faixa fronteira entre Brasil-Venezuela (Santa Elena del Uairen-Roraima Mountain), in Reis, N.J., and Monteiro, M.A.S., eds., *Contribuição a geologia da Amazonia*, Volume 2: Manaus, Brazil, Sociedade Brasileira de Geologia, 113-145.
- Santos, J.O.S., Potter, P.E., Reis, N.J., Hartmann, L.A., Fletcher, I.R., McNaughton N.J. 2003: Age, Source, and Regional Stratigraphy of the Roraima Supergroup and Roraima-like Outliers in Northern South America Based on U-Pb geochronology, *GSA Bulletin*, 115; 3, 331-348.
- Voicu, G., Bardoux, M., Stevenson, R. 2000: Lithostratigraphy, Geochronology and Gold Metallogeny in the northern Guiana Shield, South America: a Review, *Ore Geology Reviews* 18, 211 – 236.
- Wray, R.A.L. 1997: Quartzite dissolution: karst or pseudokarst? *Cave and Karst Science* 24 (2), 81-86.