

OBR. 3: a: OBROVSKÉ PRÁZDNE PRIESTORY V JASKYNI CHARLESA BREWERA (FOTOGRAFIA: M. AUDY), b: CHARLES BREWER-CARIÁS, PRIEKOPNÍK VÝSKUMU STOLOVÝCH HŔR A OBJAVITEL JEDNEJ Z NAJVÄČŠÍCH JASKÝŇ V PIESKOVCOCH NA SVETE.

čiatkoch a jej povrch bol zväčša neprebádaný. Na začiatku všetkého boli dvaja jaskyniari: Marek Audy z Moravy a Zolo Ágh zo Slovenska, ktorí sa na výlete po Južnej Amerike vybrali aj na trek po slávnej stolovej hore. Hore sa vybrali podobne ako sir Everard im Thurn po úzkej cestičke vyšliapanej v osyloch a suti, ktorá vedie až na južný okraj vrcholového plató. Táto cesta, po ktorej sa dnes presúvajú stovky turistov, dostala názov Rampa. Motali sa v okolí najvyššieho bodu hory, ktorý má názov Maverick, keď nadabli na depresiu obkolesenú amfiteátrom skál a na ich úpäti zbadali niečo, čo by mohla byť jaskyňa. Ako skúseným jaskyniarom im to nedalo a s jednoduchými čelovkami začali skúmať jej začiatok. Boli udivení, že jaskyňa sa tiahne do diaľky skoro v horizontálnom smere a tvorí úplný labyrint chodieb. Na podlahe jednej z chodieb našli dve erózne priehlbiny vedľa seba, vyplnené opracovanými kremennými kryštálmi. Podľa nich dostala jaskyňa názov Kryštálové oči (španielsky Ojos de Cristal). Obaja jaskyniari nevedeli, aký významný objav majú na svedomí a že objavili jednu z najdlhších jaskýň v pieskovcovo-kremencových horninách na svete. Tepuis sú totiž tvorené sedimentmi stredného proterozoika (1,8 - 1,4 mld. r.), ktorej geológovia dali názov skupina Roraima. Celá skupina je tvorená rôznymi piesčitými a flovitými sedimentmi, pričom jej najvyššia časť, nazvaná formácia Matauí, je

z tvrdých kremencov. A práve v tom spočíva najväčšia záhada. Kremence sú takmer nerozpustné. Ako sa v takých horninách vôbec vytvorila jaskyňa? Až do výskumu slovenských geológov panovala o ich vzniku len jediná teória – tzv. teória arenizácie (pretvorenia kremencov a pieskocov späť na piesok). Predpokladalo sa, že horniny boli vystavené rozpúšťaniu veľmi dlhý čas; oveľa dlhší než je potrebný na vytvorenie vápencových jaskýň a to v rádoch až desiatok miliónov rokov. Najprv sa mal rozpúšťať kremitý tmel okolo pieskových zŕn, ktoré sa tým uvoľňovali a vypadávali. Táto teória ešte vyhovovala v časoch, keď boli známe jaskyne len zo stolovej hory Auyán Tepui, ktoré boli zväčša vertikálnymi trhlinami rozšírenými eróziou, ale s rozsiahlymi horizontálnymi jaskynnými chodbami sa speleológovia stretli v tomto prostredí prvý raz. Doposiaľ zmapované priestory jaskyne Kryštálové oči dosahujú dĺžku takmer 17 km. A to nie je všetko. Na stolovej hore Chimantá objavil venezuelský bádateľ Charles Brewer-Carías mohutnú horizontálnu jaskyňu, ktorá dnes nesie jeho meno – Cueva Charles Brewer (obr. 3). Po niekoľkoročnom mapovaní sa zistilo, že táto jaskyňa je súčasťou veľkého systému, ktorý dosahuje dĺžku skoro 18 km. Ide o najväčší jaskynný systém v kremencoch. Na chrbát mu však „dýcha“ najnovší objav talianskych speleológov – systém Imawari Yeuta zo stolovej hory Auyán, ktorého odhadovaná dĺžka je

okolo 16 km. Tieto jaskynné systémy nie sú pozoruhodné len svojou dĺžkou, ale aj svojou mohutnosťou. Chodby v Cueva Charles Brewer sú často až 40 m široké. Najväčší zaznamenaný jaskynný priestor v jaskyni je Gran Galería Karen y Fanny, ktorá je 40 m vysoká, 355 m dlhá a 70 m široká. Jej objem bol odhadnutý na 400 000 m³ a patrí medzi 10 najväčších podzemných prírodných priestorov na svete. V novoobjavenom systéme Imawari Yeuta sú podľa prvých správ talianskych jaskyniarov ešte väčšie priestory. Jaskyne na tepuis navyše skrývajú úžasné jedinečné speleotémy, aké sa nedajú nájsť inde vo svete. Sú totiž z opálu (obr. 4). Bežné kvaple, ktoré poznáme z vápencových jaskýň, sú z kalcitu, prípadne aragonitu, ktoré sú oveľa lepšie rozpustné a ich tvorba je dokonale preštudovaná. Spôsob tvorby opálových kvapľov bol doposiaľ viac-menej neznámy.

Jaskyne očami geológov

Tieto fakty odporujúce všetkým učebnicovým pravidlám pritiahli pozornosť geológov. Tí dlhý čas považovali tepuis za geomorfologickú zaujímavosť, avšak z vedeckého hľadiska považovali všetko za známe a vyriešené.

Výskumný tím geológov z Prírodovedeckej fakulty Univerzity Komenského sa na dvoch expedíciách pripojil k vynikajúcim slovenským a českým jaskyniarom, ktorí viedli prieskum v systémoch Ojos de Cristal a systému Charles Brewer. Ex-

pedície doplnili aj jaskyniari z Venezuely a Chorvátska. Zatiaľ čo jaskyniari objavovali nové a nové kilometre chodieb, geológovia sa s úžasom prechádzali už po objavených priestoroch, fotografovali, merali a odoberali vzorky. Nevynechali ani geomorfologický prieskum povrchových útvarov na tepuis, kde našli hlavný kľúč k riešeniu záhady.

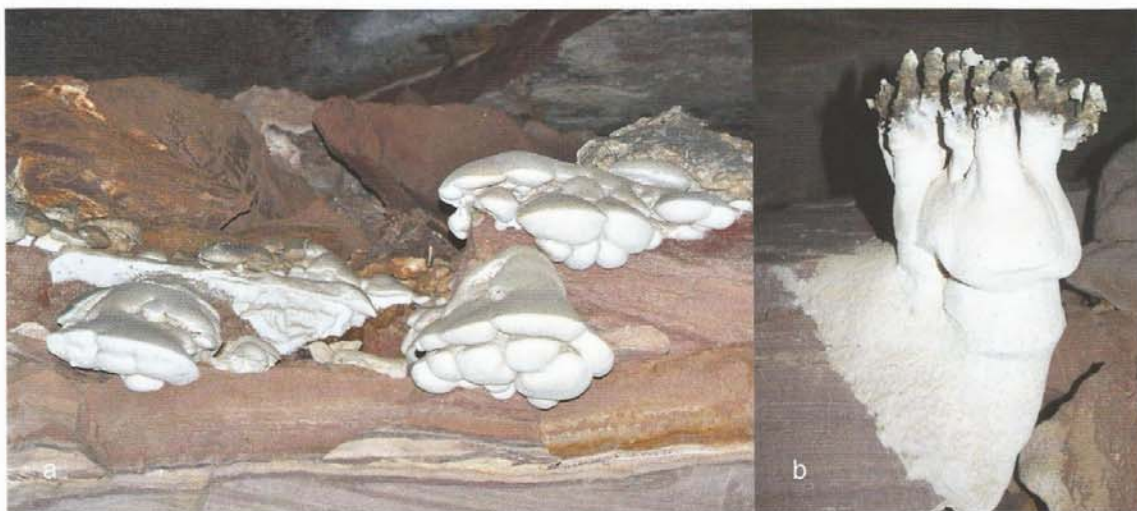
Zistili, že v skúmaných jaskynných systémoch v súčasnosti prevláda formovanie podzemných priestorov najmä eróziou a rútením stropov. Tieto procesy zastierajú však skutočné procesy, ktoré viedli k vzniku samotných jaskýň. Kľúčom k riešeniu vzniku jaskýň boli mladé, juvenilné časti jaskýň, ako aj časti povrchu tepuis, kde vrstvy arenitov tvoria previsy. Podložné a nadložné vrstvy sú z tvrdých silno litifikovaných (spevnených) hornín, zastúpených najmä pieskovecami a kremenecami. Odber vzorky z nich bol možný len s použitím kladiva. Avšak vrstvy medzi nimi tvorili nezriedka len slabo litifikované pieskovce, ba až nelitifikované piesky. Z týchto sa naopak často ani nedala odobrať pevná vzorka na petrografické štúdium. Bolo v nich možné holými rukami vyhrabať diery hlbokú až 30 cm bez toho, aby narazili na pevnú skalu. Cez tieto slabo litifikované vrstvy prenikajú kolmé stĺpovité útvary. V strede sú užšie, ale na hornej a spodnej časti sa lievikovite rozširujú. Tieto stĺpy sú opäť z pevne litifikovaných pieskovecov až kremenecov. Kombináciou previsov a spomínaných stĺpov vznikajú najkrajšie

morfológické útvary na povrchu tepuis (obr. 5). Pôvod týchto stĺpov je čisto diagenetický a ich prítomnosť dokazuje, že nespevnenosť okolitých sypkých vrstiev je skôr primárna než sekundárna. Stĺpy pravdepodobne vznikli mechanizmom prstovitého vertikálneho prúdenia diagenetických roztokov. Najdôležitejším faktorom tohto procesu, ktorý spôsoboval aj variabilitu v litifikácii jednotlivých vrstiev, boli rôzne hydraulické vlastnosti usadenín v rôznych vrstvách. Diagenetické fluidá (voda nasýtená SiO_2) pravdepodobne prenikali vertikálne z nadložia v podobe zostupného prúdu. V jemnozrnných sedimentoch fluidá vyplnili vrstvu rovnomerne pozdĺž medzizrnných priestorov a spôsobili dokonalé spevnenie horniny a jej odolnosť proti zvetrávaniu a erózii. V hrubozrnných vrstvách arenitov s vyššou hydraulickou vodivosťou sa jednotný front fluid rozdelil do izolovaných prúdov, tzv. prstov, ktoré sediment spevnili len v mieste toku a vytvorili spomínané stĺpy. Podobný proces bol rôznymi autormi opísaný z pôdnych profilov a piesčitých podzemných vodných rezervoárov, ba dokonca ho možno pozorovať pri topení snehu, keď voda z vyšších vrstiev preniká nadol a opäť zamrzá. Takto v nespevnených horninách vznikajú litifikované stĺpy. Vrchný lievikovitý tvar stĺpov vznikol vplyvom zrýchlenia prúdu smerom nadol, zatiaľ čo spodný lievík vznikol spomalením toku pri styku s podložnou, menej priepustnou jemnozrnnou vrstvou. Slabo spev-

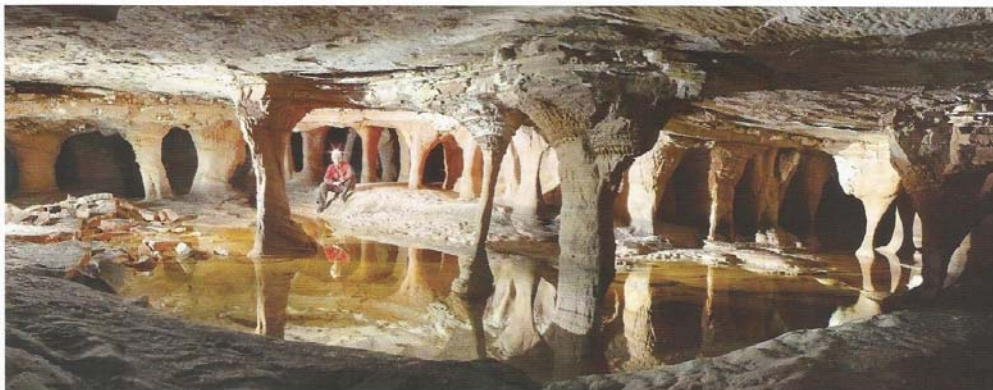
nené vrstvy tvoria výrazné horizonty v morfológii tepuis a sú viditeľné na dlhé vzdialenosti. Nadložné, dobre spevnené vrstvy chránia nelitifikovaný piesok pred dažďom, ale v prípade narušenia nadložia sú ľahko erodované, keď sa k nim dostane tečúca voda. V tomto prípade môžu vzniknúť horizontálne jaskynné priestory. V prípade niekoľkých nespevnených horizontov nad sebou po vymytí sedimentu nastáva kolaps jednotlivých poschodí a vznik gigantických jaskynných priestorov. Neskoré štádiá tvorby jaskýň nezriedka vedú k pokračujúcim kolapsom, ktoré sa prepracujú až k povrchu, ako to vidno v prípade obrovských kruhových priepastí Sima Mayor a Sima Menor na stolovej hore Sarisariňama, ale taktiež na známej a turistami hojne navštevovanej depresii El Foso na Roraime.

Červené bahno

Okrem slabého spevnenia hrá pri vzniku jaskýň na tepuis významnú úlohu lateritizácia. Jaskyniari si už dávno všimli prítomnosť značného množstva červeného bahna v jaskynných priestoroch. Bahno zvyčajne vyteká z puklín a spomedzi plôch vrstevnatosti. Po vyschnutí tvorí kopy, ba až dokonca speleotémy v podobe nátekových útvarov, globúl a malých stalaktitov. Niekedy sa farba týchto speleotém mení na čiernu. Mineralogickou analýzou sa ukázalo, že bahno je tvorené hlavne oxidmi a hydroxidmi železa, s malou prímiesou ešte nerozložených ilovitých minerálov, napríklad kaolinitu.



OBR. 4: a: OPÁLOVÉ SPELEOTÉMY, TZV. ŠAMPIŇÓNY, JASKYŇA CHARLESA BREWERA, CHURÍ TEPUI, b: OPÁLOVÁ SPELEOTÉMA, JASKYŇA CHARLESA BREWERA, CHURÍ TEPUI, VÝŠKA CCA 40 CM.



OBR. 5: VZNIK TUNAJSÍCH JASKÝŇ SA VYSVETĽUJE ERÓZIOU TAKMER NELITIFIKOVANÝCH VRSTVIEV.

Toto zloženie jednoznačne zodpovedá lateritom. Lateritové pôdy sú v tropickej zóne všadeprítomné. Ako vznikajú? Rozpúšťaním. Avšak nie rozpúšťaním kremeňa, ale tzv. alumosilikátov, čiže živcov, síd a ílových minerálov. V našich zemepisných šírkach sa rozpad týchto minerálov zastaví niekde na úrovni ílových minerálov a ďalej už nepokračuje. Agresívne kyslé vody v tropickom pásme v kombinácii s vysokými teplotami spôsobia rozpustenie aj ílových minerálov a ako zvyšok ostávajú len oxidy a hydroxidy železa, prípadne hliníka (známe bauxity). Preto je v trópoch všade pôda výrazne červená. Ako sa však dostali laterity do jaskýň? Vznikli rozpúšťaním piesčitých hornín, avšak nie čisto kremenných, ale tých, ktoré obsahovali hojné alumosilikáty. Takého piesčité horniny nazývame droby a arkózy. Paradoxne, čistý kremeň sa v agresívnych kyslých vodách na tepuis rozpúšťa najmenej. Pre svoje rozpúšťanie potrebuje vody s oveľa vyššou zásaditosťou. Preto možno povedať, že pri vzniku jaskýň na tepuis sa predsa len uplatňuje rozpúšťanie. Avšak nie také, aké predpokladali zástancovia arenizačnej teórie.

Kvaple a mikroorganizmy

Po vyriešení záhady samotných jaskýň sa geológovia ešte museli popasovať so záhadou vzniku opálových kvaplov. Drobné opálové kvaple sú známe aj z iných silikátových jaskýň na svete, avšak tie z tepuis sú unikátne svojimi veľkými rozmermi. Skúmané speleotémy predstavujú rôzne nátekové formy anorganického pôvodu, podobne ako vo vápencoch. Avšak oveľa častejšie sú formy, ktoré vznikli mikrobiálnou akumuláciou.

Pri speleologickom prieskume bolo rozlíšených vyše 10 rôznych tvarových foriem, z ktorých najčastejšie sú „šampiňóny“, „panáčiky“, „čierne koralý“ a zvláštne formy – „pavučinové stalaktity“, vzniknuté inkrustáciou pavučin visiacich zo stropu. Napriek rôznym tvarom ide všeobecne o mikrobiality, ktoré majú pomerne jednotnú základnú stavbu. Pretože sú laminované, možno ich nazvať odborným názvom - stromatolity. Tieto najčastejšie pozostávajú z centrálneho tmavého kompaktného stromatolitu a vonkajšej bielej vrstvy pripomínajúcej kriedu. Pri niektorých speleotémach vidno aj striedanie sa týchto dvoch typov. Výskum pomocou optickej a elektrónovej mikroskopie ukázal, že centrálny kompaktný stromatolit je jemne laminovaný a na jeho stavbe sa podieľajú mikróby, ktoré najbližšie pripomínajú cyanobaktérie (sinice) radu *Oscillatoriales*, ako napr. rod *Phormidium*. Vonkajšia kriedovitá vrstva je tvorená bielymi peloidmi, usporiadanými v laminách. Ich mikrobiálne komponenty sú zväčša zotreté; zachované sú len v najvrchnejších, najmenej inkrustovaných vrstvičkách. Výskum ukázal, že ide s najväčšou pravdepodobnosťou o cyanobaktérie z radu *Nostocales* (známe je napr. rod *Nostoc*). Bližšie určenie v jednotlivých prípadoch však nie je možné a je potrebné počkať na výsledky analýzy DNA.

Prečo by však jaskyne obývali organizmy, ktoré poznáme z povrchu a ktoré využívajú na svoju obživu fotosyntézu? Prítomnosť fototrofných organizmov, ako sú sinice, v jaskynnom prostredí nie je až taká prekvapujúca, ako by sa mohlo zdať. Niektoré cyanobaktérie neznášajú nad-

merné slnečné svetlo, ktoré môže poškodiť ich bunky. Niektoré sa chránia zvýšenou produkciou pigmentov v extracelulárnom povlaku (napr. *Lyngbya estuarii* tvorí pigment „scytonemin“), iné sa dokonca pred priamym svetlom chránia zavítaním sa do podkladu až do hĺbok so zníženým osvetlením, ako napr. endolitické vrťavé rody *Hormathonema* a *Hyella*. Pri rodoch *Fisherella* a *Calothrix* bolo zistené, že sú schopné pomalého chemolitoautotrofného rastu aj v úplnej tme. A nakoniec je potrebné sa zmieniť o tom, že niektoré druhy siníc boli nájdené aj v jaskyniach, napr. druhy *Geitleria calcarea* a *Scytonema julianum*. Izraelskí vedci opisujú výskyt cyanobaktérií rodu *Nostoc* v jednej z jaskýň v Negevskej púšti a to od oblasti vchodu až po oblasti v úplnej tme. Je zrejme, že aj v skúmaných jaskyniach na tepuis došlo tiež k adaptácii siníc na spôsob života, ktorý nevyužíva fotosyntézu.

Autori fotografií: Charles Brewer-Carías, Branislav Šmida, Ján Schlögl

Doc. RNDr. ROMAN AUBRECHT, Dr.

(Katedra geológie a paleontológie, Prírodovedecká fakulta UK a Geofyzikálny ústav SAV) sa zaoberá širokým spektrom geologickej problematiky, najmä z oblasti sedimentológie a historickej geológie.

Mgr. JÁN SCHLÖGL, PhD.

(Katedra geológie a paleontológie, Prírodovedecká fakulta UK) zaoberá sa paleontológiou, predovšetkým výskumom hlavonožcov.