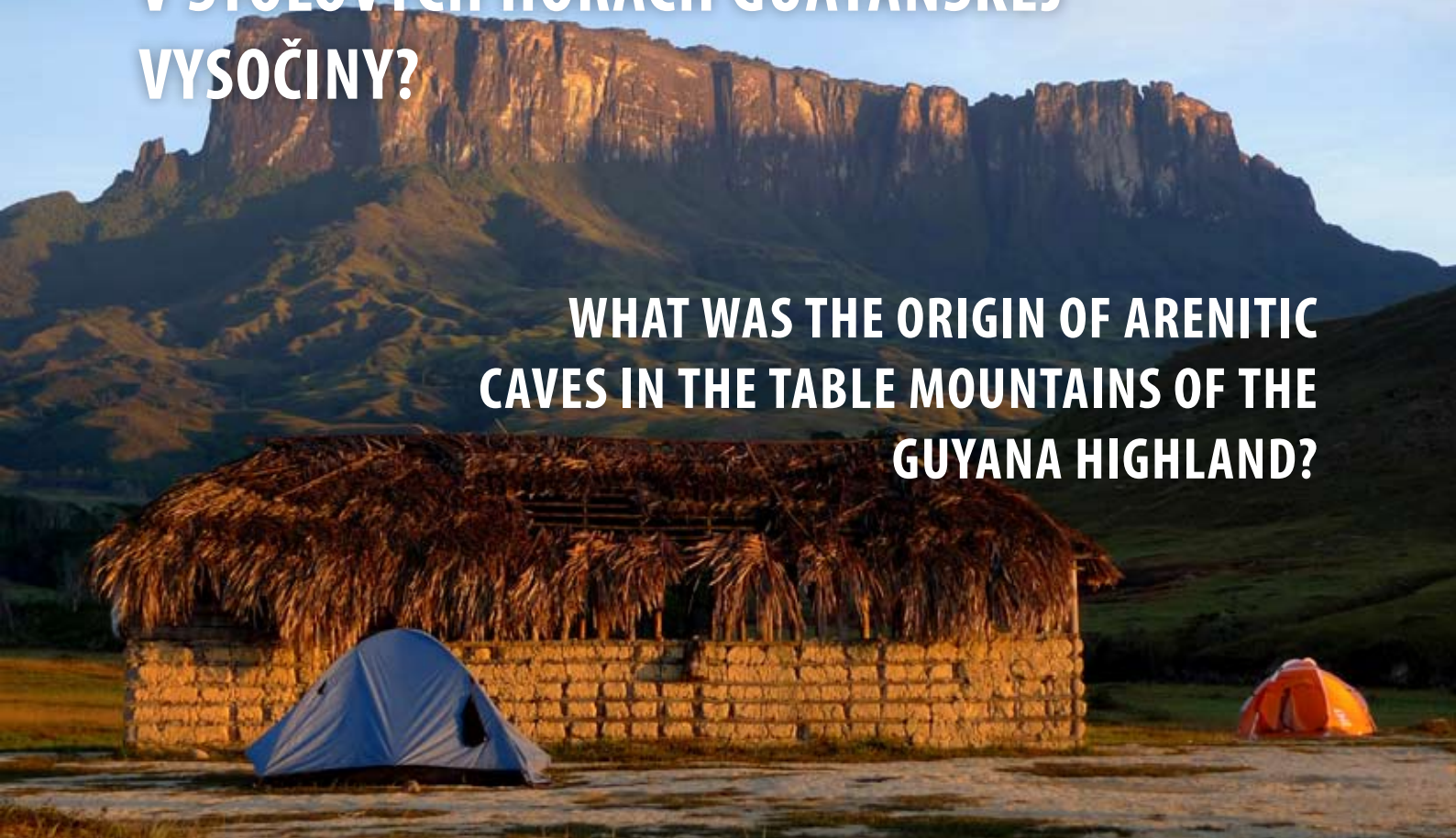


AKO VZNIKLI ARENITOVÉ JASKYNE V STOLOVÝCH HORÁCH GUAYANSKEJ VYSOČINY?

WHAT WAS THE ORIGIN OF ARENITIC CAVES IN THE TABLE MOUNTAINS OF THE GUYANA HIGHLAND?



Obr. 1 Stolová hora Kukenán. Samotnú stolovú horu tvoria tvrdé pieskovce až kremence formácie Matawí. Pod nimi sú mäkké pieskovce, arkózy a ílvice formácie Uaimapué. Obe patria do skupiny Roraima, proterozoického sedimentárneho pokryvu Guayanského štítu. Foto: R. Aubrecht

➤ Abstract:

Venezuelan table mountains (tepuis) host the largest arenite caves in the world. The most frequently used explanation of their origin so far was the “arenization” theory, involving dissolution of quartz cement around the sand grains and subsequent removing of the released grains by water. New research in the two largest arenite cave systems – Churi-Tepui System in Chimanta Massif and Ojos de Cristal System in Roraima Tepui showed that quartz dissolution plays only a minor role in their speleogenesis. Arenites forming the tepuis are not only quartzites but they display a wide range of lithification and breakdown, including also loose sands and sandstones. Speleogenetic processes are mostly concentrated on the beds of unlithified sands which escaped from

diagenesis by being sealed by the surrounding perfectly lithified quartzites. Only the so-called “finger-flow” pillars testify to confined diagenetic fluids which flowed in narrow channels, leaving the surrounding arenite uncemented. Another factor which influenced the cave-forming processes was lateritization. It affects beds formed of arkosic sandstones and greywackes which show strong dissolution of micas, feldspars and clay minerals, turning then to laterite.

This unusual way of arenite lithification in tepuis infers new views on their genesis and on the geomorphological evolution of the north of South America. Tepuis were formed from hard quartzites and sandstones of the Matawí Formation, which are underlain by softer claystones and arkoses of the Uaimapué Formation. From the

1) Univerzita Komenského, Prírodovedecká fakulta, Katedra geológie a paleontológie, Ilkovičova 6, 842 15 Bratislava

2) Ústav vied o Zemi, Slovenská akadémia vied, Dúbravská cesta 9, 840 05 Bratislava

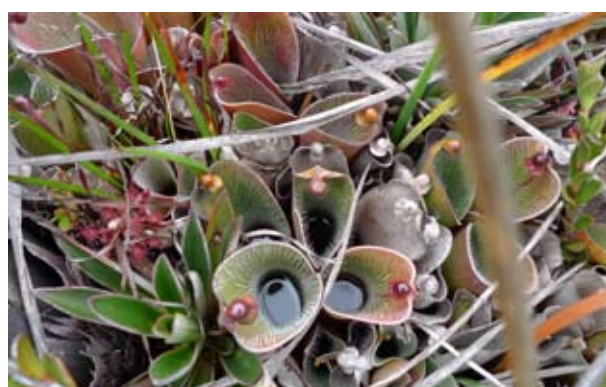
speleogenetic and geomorphological observations it is evident that the main lithification phase of the Matawí Formation which caused their hardening to quartzites was represented by descending silica-bearing fluids which did not penetrate to the underlying arkoses which remained almost unlithified. The question is: what was the source of these fluids? According to the new, duricrust theory, tepuis originated in places where there was an intensive descending fluid flow, most likely emanating from surface water reservoirs, such as rivers or lakes. This continuous flow carried SiO_2 from the lateritized surface beds. Thus,

the underlying part of the Roraima Supergroup was impregnated with SiO_2 and strongly lithified. These indurated parts of the formation remained as tepuis, while the remainder of the formation was removed by erosion. The duricrust theory also presumes that the the origin of tepuis as a pronounced geomorphological forms cannot be traced back to Mesozoic as supposed by the arenization theory. Most likely, they are not older than Tertiary, which is consistent with the results of the biological DNA research.

► **Key words:** Guyana Highland, tepuis, geomorphology, arenitic caves, duricrusts.



Obr. 2 Endemická rastlina *Chimantea* rastie len na stolových horách masívu Chimantá. (Chimantá – Churí). Foto: R. Aubrecht



Obr. 3 Pôda chudobná na živiny spôsobila, že veľa druhov rastlín na stolových horách je mäsožravých, podobne ako táto *Heliophora minor* (Chimantá – Akopán). Foto: R. Aubrecht

OBROVSKÉ JASKYNE V STOLOVÝCH HORÁCH

Koncom roka 2015 sa uskutočnila v poradí už tretia prírodovedecká expedícia do Guayanskej vysočiny vo Venezuele s účasťou geológov. Unikátny fenomén tamojších stolových hôr (tepuis) priťahoval už oddávna najmä biológov, lebo strmé až kolmé steny z proterozoických pieskocov až kremencov (formácia Matawí), ktoré ich izolujú od okolia (Obr. 1) z nich urobili dokonalé evolučné laboratórium (Obr. 2-4). Pozornosť geológov pritiahli najmä po roku 2003, kedy na stolovej hore Roraima bola objavená dnes najdlhšia pieskocová jaskyňa na svete – Cueva Ojos de Cristal (Obr. 5). Zásluhu na jej objavení a preskúmaní majú najmä slovenskí a českí jaskyniari. Neskôr, akoby sa vreco roztrhlo s novými objavmi ešte väčších a mohutnejších jaskýň – Cueva Charles Brewer (Obr. 6) na stolovej hore Churí v masíve Chimantá a Imawarí Yeuta na stolovej hore Auyán. Všetko sú to jaskyne s dĺžkou cez 15 km a mohutnými chodbami, z ktorých niektoré patria medzi najväčšie

prírodné podzemné priestory sveta. Majú subhorizontálny priebeh a pre geológov predstavovali záhadu. Jaskyne sú typickým fenoménom oblastí tvorených vápencami, prípadne horninami s vyššou rozpustnosťou, ako je napr. sadrovec, prípadne soľ. Obrovské jaskyne v arenitoch vyvolali celý rad otázok. V tomto článku stručne načrtneme ich možnú genézu vyplývajúcu z najnovších výskumov. Pre obmedzený priestor sa nebudeme zaoberať rovnako zaujímavými opálovými speleotémami, ktoré sa v nich nachádzajú. Je možné, že im venujeme niektorý z ďalších článkov.



Obr. 4 Unikátna žaba *Stefania ginesi*, ktorá je typická tým, že nosí svoje oplodnené vajčička a neskôr aj vyľiahnuté malé žabky na svojom chrbte (Chimantá – Akopán). Foto: R. Aubrecht



Obr. 5 Podzemná riečka v jaskyni Cueva de los Pémones, súčasť systému jaskynného Ojos de Cristal na stolovej hore Roraima. Foto: Marek Audy



Obr. 6 Jazero Lago Chayo v jaskyni Cueva Charles Brewer na stolovej hore Churí. Foto: Marek Audy

ROZPUSTNÉ KREMENCE?

Ešte v časoch, keď boli na tepuis známe len niektoré menšie, subvertikálne jaskynné systémy, sa pre vysvetlenie ich genézy použil termín “arenizácia”. Ten znamená zvetrávanie menej stabilných súčastí silikátových hornín a uvoľňovanie stabilnejších súčastí v podobe piesku. V arenitoch má dochádzať prednostne k rozpúšťaniu tmelu a uvoľňovaniu pieskovcových zŕn. Podľa tejto teórie arenizácia funguje aj v kremencoch, kde sa rozpúšťa kremenný tmel a vzniká akýsi nový pieskovec (neosandstone), ktorý už oveľa ľahšie podlieha erózii a vymývaniu. Je nutné

podotknúť, že túto interpretáciu speleogenézy na tepuis používajú niektorí vedci dodnes. Nakoľko rozpúšťanie kremeňa, navyše v kyslých tropických vodách Guayanskej vysočiny, je veľmi pomalý proces, zástancovia arenizácie odhadujú, že jaskyne ako aj celý geomorfologický vývoj tepuis sa museli začať tvoriť už v mezozoiku. Výskumy slovenských geológov však odhalili niečo diametrálne odlišné.

STĽPOVITÉ ÚTVARY SÚ KLÚČOM K VYSVETLENIU VZNIKU JASKÝŇ

Povrch tepuis je veľmi variabilný a bizarný a to vďaka nerovnomernému zvetrávaniu proterozoických arenitov. Najvýraznejšie sa to prejavuje v oblastiach, kde vrstvy arenitov tvoria previsy (Obr. 7). Podložné a nadložné vrstvy sú z tvrdých silno litifikovaných hornín, zastúpených najmä pieskovecami a kremencami. Avšak vrstvy medzi nimi nezriedka tvoria len slabo litifikované pieskovce, ba až nelitifikované piesky. Cez ne prenikajú kolmé stĺpovité útvary, ktoré sú opäť z pevne litifikovaných arenitov (pieskovcov až kremencov). Ukazuje sa, že pôvod týchto stĺpov je čisto diagenetický a ich prítomnosť dokazuje, že nespevnenosť sypkých vrstiev je skôr primárna, než sekundárna. Sú hlavným indikátorom spôsobu speleogenézy, ale aj vzniku samotných tepuis. Aj petrografická analýza odhalila, že dobre spevnené pieskovce a kremence majú zvyškové póry úplne vyplnené opálom, zatiaľ čo nespevnené arenity majú pórovitosť zachovanú, prípadne sú cementované len kaolinitom.

Stĺpy pravdepodobne vznikli mechanizmom descendenčného prstovitého vertikálneho prúdenia diagenetic-



Obr. 7 Previs na stolovej hore Churí v masíve Chimantá. Nadložie a podložie je tvorené tvrdým kremencom, rovnako ako lievikovito-stĺpovité útvary medzi nimi. Zvyšná hornina predstavuje slabo spevnený pieskovec až piesok. Foto: R. Aubrecht

Pozorovania v skúmaných jaskynných systémoch ukázali, že stĺpy „prstového prúdenia“ sa vyskytujú vo väčšine jaskýň (Obr. 8), najmä v častiach, ktoré sú doposiaľ v mladších štádiách vývoja. Tie sa vyznačujú nízkym stropom a striktné sa držia jedného vrstevného horizontu. Reliktné stĺpy sa tiež vyskytujú v okrajových, neskolabovaných častiach starších chodieb. V prípade niekoľkých nespevnených hori-

kých roztokov. Najdôležitejším faktorom tohto procesu, sú rôzne vlastnosti sedimentu a jeho rôzna hydraulická vodivosť. Diagenetické fluidá pravdepodobne prenikali vertikálne z nadložia v podobe zostupného prúdu. V jemnozrnných sedimentoch fluidá vyplnili vrstvu rovnomerne pozdĺž medzizrnných priestorov a spôsobili dokonalú litifikáciu horniny aj jej odolnosť voči zvetrávaniu a erózii. V hrubozrnných vrstvách arenitov s vyššou hydraulickou vodivosťou pod vrstvami jemnozrnných arenitov sa jednotný front fluid rozdelil do izolovaných prúdov, tzv. prstov, ktoré sediment spevnili len v mieste toku a vytvorili stĺpy. Podobný proces bol rôznymi autormi opísaný z pôdnych profilov a piesčitých podzemných vodných rezervoárov, ale bol dokonca pozorovaný aj pri topení snehu. Nadložné a podložné dobre litifikované vrstvy izolujú a chránia nelitifikovaný piesok, ale v prípade narušenia tejto izolácie sú ľahko erodované, keď sa k nim dostane tečúca voda. V tomto prípade môžu vzniknúť subhorizontálne jaskynné priestory.

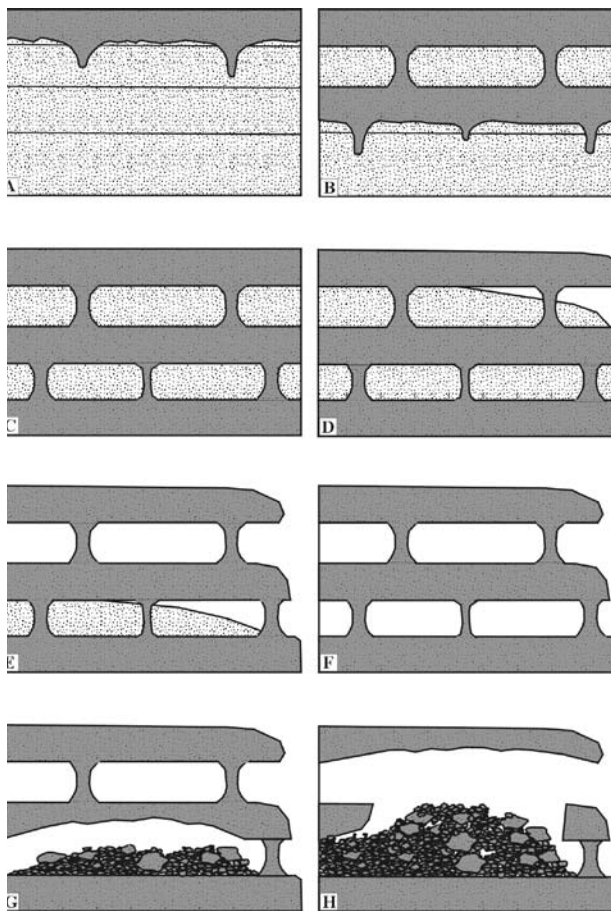


Obr. 8 Stĺpy „prstového prúdenia“ v jaskyni Cueva de Arañas na stolovej hore Churí. Foto: Marek Audy

zontov nad sebou po vymytí sedimentu nastáva kolaps jednotlivých poschodí a k vzniku gigantických jaskynných priestorov (Obr. 9). Neskoré štádiá speleogenézy nezriedka vedú k pokračujúcim kolapsom, ktoré sa prepracujú až k povrchu. Tam sa prejavujú rozsiahlymi kolapsami, ako sú napr. Sima Mayor a Sima Menor na stolovej hore Sarisariñama.

Všetky vyššie spomenuté geomorfologické pozorovania potvrdzujú, že hlavným spúšťačom a faktorom, ktorý výrazne ovplyvňuje aj morfológiu tepuis je vymývanie nespevných arenitov.

Prejavy skutočného rozpúšťania kremeňa v arenitoch sú pomerne zriedkavé. Prejavujú sa najmä ohladenými okrajmi pieskocových a kremencových blokov, ako aj bizarnými vyleptanými vzormi na povrchu. Oveľa výraznejší a zástancami arenizácie podceňovaný je proces lateritizácie, čiže rozpúšťania alumosilikátov, ako sú



Obr. 9 Schéma vzniku arenitových jaskýň na tepuis. Sivé – silno litifikované arenity, svetlé – slabo litifikované až nelitifikované arenity. A-B – Postupná duagenéza arenitov spôsobená zostupnými prúdmi roztokov bohatých na SiO_2 , C – Dva horizonty s nespevnými arenitmi nad sebou. D-E – Prienik tečúcej vody do pôvodne izolovaných častí a postupné vymývanie slabo spevneného sedimentu. F – Dva horizonty s iniciálnymi jaskynnými priestormi nad sebou, podopreté len stĺpmi "prstovitého prúdenia". G-H – Kolaps oboch etáží a vytvorenie veľkého jaskynného priestoru. Autor: R. Aubrecht (Aubrecht et al., 2012).

sľudy, živce a ílové minerály za vzniku oxidov a hydroxidov železa a hliníka. Tento proces postihuje najmä drobné a arkózovité arenity a dobre prebieha v kyslých vodách tropického pásma, zatiaľ čo pre rozpúšťanie kremeňa sú potrebné alkalické podmienky. Lateritizácia významne prispieva ku speleogenéze, o čom svedčí veľké množstvo červeného bahna lateritického zloženia vo všetkých skúmaných jaskyniach (Obr. 10).



Obr. 10 Červené lateritické bahno vytekajúce z pukliny v jaskyni Cueva Charles Brewer. Foto: R. Aubrecht

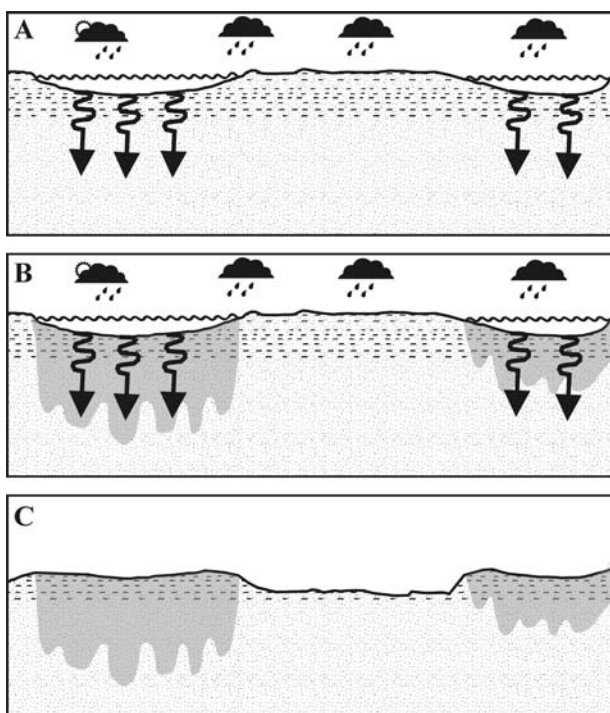
IZOLOVANÉ OSTROVY STOLOVÝCH HÔR

Veľmi dôležitým bolo zistenie, že v súčasnosti zachované reliqvy formácie Matawí sa neskladajú len z tvrdých kremencov a pieskovcov, ale je tu prítomná celá škála arenitov v rôznom stupni litifikácie. Silno litifikované typy síce na tepuis prevládajú, avšak nemožno to tvrdiť o celej formácii, z ktorej väčšia časť už bola odstránená eróziou. Je možné, že zistenú vertikálnu variabilitu litifikácie arenitov formácie Matawí možno aplikovať aj v laterálnom smere. Odstránená väčšia časť formácie už nie je a ani nikdy nebude prístupná priamemu pozorovaniu, avšak jestvujú nepriame indície. Stolové hory tepuis tvoria izolované ostrovy a po zvyšku formácie medzi nimi neostali ani len "ruiny", alebo kopy balvanov. Je možné, že tieto sedimenty neboli nikdy dostatočne spevnené.

Stĺpy "prstovitého prúdenia" nájdené v jaskyniach naznačujú, že hlavnou fázou litifikácie celej formácie boli fluidá nesúce rozpustený SiO_2 stekajúce zhora nadol (nedokonale vyvinuté stĺpy trčiace zo stropu jaskýň tento smer prúdenia podporujú). Tie spôsobili vznik niekoľko sto metrov silne litifikovaných arenitov, ktoré vo svojej podstate nemajú obdobu nikde vo svete. V nižších polohách, na nížine zvanej Gran Sabana sa už s takýmito formami litifikácie stretávame len veľmi zriedka. Horniny tvoriace podložné súvrstvia sú oveľa mäkkšie. Je očividné, že pokryv tvrdých kremencov chránil aj podložné horniny pred eróziou. Väčšina tepuis má strmé, väčšinou kolmé

steny. Je to zapríčinené práve mäkkším podložím a eróznym "podtínaním" svahov a následným rútením okrajov tepuis. Bloky z nich potom tvoria okolo tepuis akési lemy. Tie potom prechádzajú do okolitej plochej krajiny, kde však už nie sú žiadne stopy po kremencových blokoch. Navyše pri bližšom skúmaní lemu okolo Roraimy zisťujeme, že je tvorený nielen spadnutými blokmi, ale zväčša mäkkými arenitmi podložného súvrstvia Uaimapué. Práve erózia tohto súvrstvia spôsobuje "podtínanie" okrajov Roraimy a udržuje jej steny kolmé.

Všetky tieto pozorovania vedú k záveru, že ostrovčekovité rozmiestnenie tepuis muselo byť preddefinované už dávno, ešte počas litifikácie formácie Matawí. Litifikácia vyžadovala značné množstvo fluid v nadloží formácie a zdroj rozpusteného SiO_2 . Najlepším zdrojom SiO_2 , podobne ako to vidno v dnešnom vývoji oblasti, je proces lateritizácie. V nadloží formácie, alebo v jej vrchnej časti sa pravdepodobne nachádzali horniny bohaté na sludy, živce a ílové minerály, ktoré v tropickom podnebí ľahko podľahli rozpúšťaniu. To značí, že tento proces s mohol začať už v období vrchného karbónu, kedy sa oblasť severu dnešnej Južnej Ameriky (v tom čase súčasť Gondwany) dostala do tropickej zóny. Najlepším zdrojom fluid mohli byť povrchové vodné rezervoáre – rieky a jazerá. Je možné, že dnešná distribúcia tepuis odráža rozmiestnenie voľakedajších starých riek a jazier. Len v miestach, kde došlo k spevneniu formácie matawí došlo neskôr prakticky k inverzii reliéfu a vzniku tepuis. Okolitá, nelitifikovaná časť formácie bola odstránená eróziou (Obr. 11).



Obr. 11 Nový model vniku stolových hôr - tepuis. A – Skupina Roraima bola pôvodne prekrytá sedimentami bohatými na sludy, živce a ílové minerály, ktoré ľahko podľahli lateritizácii. B – Lateritizácia sa odohrávala najmä v oblastiach s prebytkom povrchovej vody, ako sú rieky a jazerá. Zostupné prúdy vody prenikajú do podložja, prinášajú SiO_2 uvoľnené lateritizáciou a spôsobujú silnú cementáciu najvrchnejšej formácie Matawí. Cementácia je ostrovčekovitá, viazaná na oblasti s prebytkom vody. Zvyšné časti formácie ostávajú slabo litifikované. C-D – V neskorších štádiách geomorfologického vývoja dochádza k erózii slabo spevnených častí superskupiny Roraima, zatiaľ čo silno litifikované časti ostávajú a vytvárajú pozitívny reliéf. Taktiež chránia slabo litifikované sedimenty v podloží pred eróziou. Čiastočná bočná erózia týchto podložných sedimentov udržuje kolmý tvar stien stolových hôr. Autor: R. Aubrecht (Aubrecht et al., 2012).

CIELE ĎALŠIEHO VÝSKUMU

Táto tzv. "durikrustová" teória je síce úplne nová, avšak doposiaľ neboli k dispozícii rozumnejšie a pravdepodobnejšie vysvetlenia. Naša teória je v súčasnosti založená len na obmedzených údajoch a pre jej overenie je nevyhnutný ďalší výskum. Ten práve prebieha v rámci nového projektu APVV 14-0276, ktorý má za cieľ objasniť

genézu tepuis. Počas poslednej expedície sa podarilo nazbierať dostatok materiálu, ktorý indikuje, že "durikrustová" teória je opodstatnená a že na vznik tepuis nebol potrebný veľmi dlhý čas (Obr. 11.-13). Je to v zhode s výskumom biológov. Genetické výskumy ukazujú, že fauna a flóra na tepuis sa nevyvinula skôr než v neogéne.



Obr. 12 Stolová hora Autana (vpravo) na juhozápade Venezuely je tiež vytvorená v súvrstviach, ktoré podľa doterajšieho členenia patria do skupiny Roraima, avšak ležia na paraguazských granitoch veku 1,7-1,5 miliardy rokov (v popredí). Na západe Venezuely je to vek už samotnej formácie Matawí. Je zrejmé, že ide o úplne iné súvrstvie a rozhodujúci je spôsob vzniku a nie stratigrafická príslušnosť sedimentu. Stolový charakter hory je zrejme spôsobený mäkkým podloží. Okolité hory (vľavo) majú homolovitý tvar, lebo v podloží majú priamo granity. Foto: R. Aubrecht



Obr. 13 Na stolovej hore Akopán (súčasť masívu Chimantá) sa zistilo, že previsy a malé jaskyne sa tvoria aj v častiach vrstiev so strmým šikmým zvrstvením (pravdepodobne eolického pôvodu). Na šikmom zvrstvení tiež dochádza k zrýchleniu toku descendenčných prúdov, čo vedie k nižšiemu stupňu litifikácie týchto vrstiev. Tento fakt bol v súčasnosti výskumným tímom overený aj experimentálne. Foto: R. Aubrecht

🔍 Literatúra

Aubrecht, R., Barrio-Amoros, C., Breure, A., Brewer-Carías, 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 (Bratislava), ISBN 978-80-223-3349-8, 1-168.