

# SLOVENSKÉ MEXIKO ALEBO KRYŠTÁLOVÁ JASKYŇA

Andrej Renčko<sup>1</sup>, Andrea Čipáková<sup>2</sup>, Michal Toropila<sup>1</sup>

*Cieľom našej práce bolo zhodnotiť vybrané rádionuklidy v jednotlivých mineráloch geotermálnych krasových útvarov a porovnať ich s hodnotami rádionuklidov v kalcitoch Kryštálovej jaskyne v Krivánskej Malej Fatre. Okrem týchto špecifických meraní sme zisťovali a zaradili do práce i základné podmienky v jaskyni, ako je teplota, vlhkosť vzduchu, miestopis i zaujímavosti nášho jaskynného skvostu.*

## Úvod

Všetko je podstatné, svet sa skladá z detailov. V prírode všetko so všetkým súvisí. Na prvom mieste je poznanie, bez ktorého by sme nedosiahli nič. Otázka poznania je však veľmi komplexná a zložitá a za každým jedným poznatkom, za každou vetou a slovom sa skrýva úsilie našich predkov a predchodcov. Kto chodí po prírode s otvorenými očami, vidí mnoho súvislostí. Tie si treba spájať. Bežný človek sa však všade nedostane a na niektoré otázky ešte ľudstvo nemá odpoveď. Útroby Zeme skrývajú svoje tajomstvá, ktoré človek odhaľuje dlho a postupne, po malých krôčikoch. Na Zemi sú jaskyne, ktoré svojou genézou, pôvodom či obsahom presahujú doteraz dosiahnutú vyspelosť ľudstva a úroveň vedy a poznania. Či už ide o jaskyne s výskytom vzácných živočíchov, akými sú napríklad svetielkujúce červy v jaskyni Waitomo na Novom Zélande, alebo jaskynné rybky, ktoré sú slepé, či svetoznáma, mloku podobná slovinská „človečka riba“ *Proteus anguinus*. Existujú i jaskyne, ktoré udivujú svojou vzácnou mineralogickou výplňou, ako je selenitová Jaskyňa mečov v púšti Tihua v Mexiku či podobná, málo známa kremenná jaskyňa na Ukrajine. V Španielsku bola objavená obria sadrovcová geóda Gran Geoda v bani Mina Rica (Rozložník, 2012).

Slovensko je krajina malá rozlohou, avšak veľká krásou. Karpatská príroda oplýva nevídanými pokladmi. Je to najväčší zachovaný komplex hôr a lesov v Európe. A hoci na

Slovensku nemáme geódy kryštálov a ceny ako v Mexiku a nenachádzajú sa tu ani stolové hory ako vo Venezuele, máme viac ako 6 a pol tisíc jaskýň, z ktorých mnohé sa vymykajú z rámca obyčajnosti. Svedčia o tom i zápisy viacerých z nich do svetového prírodného dedičstva UNESCO a do Ramsarského dohovoru. Každá jedna jaskyňa je tu jedinečná a unikátna. Medzi najznámejšie a najväčšie určite patrí Ochtinská aragonitová jaskyňa. Ale odborná speleologická komunita pozná i vzácnu, verejnosti neprístupnú Kryštálovú jaskyňu v Malej Fatre pod Malým Rozsutcom.

## Kryštálová jaskyňa

Že existuje v srdci Karpát Kryštálová jaskyňa, vieme už dávno. No o jej pôvode toho až tak veľa nevieme. Známe sú viac-menej len dohady, bez konkrétnych meraní a faktov. Jaskyňa sa nachádza v Národnom parku Malá Fatra pod úpäťm Malého Rozsutca, pripomínajúceho stolovú horu. Ide o malú jaskyňu s menšími chodbami, sienkami a plazivkami, vytvorenú v tmavosivých reiflinských vápencoch, ktorá nevyniká veľkosťou, ale svojím obsahom. Nie je to jaskyňa s klasickým sintrom, kde rastú stalaktity a stalagmity, ale jaskyňa kryštálová s dokonale vyvinutými kryštálmi kalcitu. Pri našej návšteve v máji 2013 sme v nej namerali teplotu 5,4 °C a vlhkosť 79 %. Časti jaskyne nesú poetické názvy: Dionýzov sud, Aničkina studnička, Ondrejova sienka, Klenotnica, Kaplnka Panny Márie, Jánošíkov skok, Líščia komora. V jaskyni vykonávajú v súčasnosti prieskum členovia Slovenskej speleologickej spoločnosti z Jaskyniarskej skupiny Adama Vallu v Terchovej.

Rozhodli sme sa vniesť svetlo aspoň do niektorých otázok genézy tejto jaskyne rozborom rádioizotopov a porovnaním výsledkov s inými krasovými útvarmi vzniknutými geo- a hydrotermálnou cestou. Oblasť Malej Fatry a Chočských vrchov je bohatá na takéto krasové útvary, ktoré sú v tom istom príkrove

<sup>1</sup> Univerzita veterinárskeho lekárstva a farmácie v Košiciach, Ústav biológie, zoológie a rádiobiológie

<sup>2</sup> Regionálny úrad verejného zdravotníctva so sídlom v Košiciach, Ipeľská 1, Košice



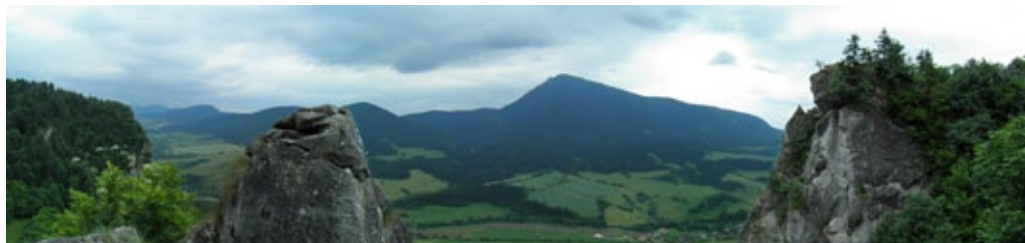
1 V Kryštálovej jaskyni, zľava Andrej Renčko, Ondrej Števko, Tomáš Hampl. Foto: A. Renčko



2 Geotermálne pleso v Kalamenoch. Foto: A. Renčko



3 Travertínový vodopád v Lúčkach. Foto: A. Renčko



4 Veľký Choč, vrch oddelujúci Liptov od Oravy. Foto: A. Renčko

a z pohľadu geológie blízko seba. Najvýznamnejšie z nich sú nesporne malé geotermálne pliesko za dedinou Kalameny a travertínový, 12 metrov vysoký kaskádový vodopád v Lúčkach. Práve s nimi je možné konfrontovať podľa jednotlivých stôp rádionuklidov i Kryštálovú jaskyňu. Do pokusu sme zaradili aj materiál z vrcholu 1611 metrov vysokého Veľkého Choča.

### Iné slovenské jaskyne s výskytom kalcitu

V hydrotermálnych jaskyniach sa spravidla vyskytujú minerály hydrotermálneho pôvodu zväčša v podobe veľkých idiomorfných kryštálov kalcitu a kremeňa. Z ďalších minerálov hydrotermálneho pôvodu sa v jaskyniach vyskytuje baryt, sfalerit, fluorit a iné. Niektoré z týchto minerálov (napr. kalcit, aragonit, fluorit, sadrovec) môžu vznikáť aj z vodných roztokov nižšej teploty (Dublyansky, 1997 a iní). V niektorých jaskyniach Nízkych Tatier (Silvošova diera, Nová stanišovská jaskyňa, Kalcitová jaskyňa) sa našli kryštály kalcitu hydrotermálneho pôvodu, ktoré sú asi predp-  
liocénneho veku – pravdepodobne pochádzajú z miocénu alebo dokonca z paleogénu (Orvošová et al., 2004; Orvošová, 2005; Orvošová a Hurai, 2008). Zväčša sa vyskytujú v korózných geodovitých dutinách prerezaných mladšími jaskynnými chodbami. Na základe výskytu veľkých kryštálov kalcitu v jaskyni Drienka na Silickej planine v Slovenskom krase Ľ. Gaál (2009) predpokladá jej hydrotermálny vývoj, resp. remodeláciu v súvislosti s postvulkanickou činnosťou v sarmate alebo panóne. Kryštály kalcitu mohli vzniknúť kryštalizáciou karbonátov (tak, ako to opisuje Lánzos) z roztoku v suspenzii. Ďalším pôsobením prenikajúcich zrážkových vôd dochádzalo k postupnému rozpúšťaniu karbonátových klastov, čím sa vytvárali voľné dutiny v pevnejšom a

odolnejšom matrici. Kryštalizáciou z prenikajúcich roztokov sa tieto dutiny opäť vyplňajú kryštálmi kalcitu (Lánczos a kol., 2013).



V Kryštálovej jaskyni sú predpoklady výskytu ďalších priestorov s kryštálmi kalcitu. Foto: A. Renčko

## Hydrotermálny pôvod?

Termínom hydrotermálny (proces) sa označuje posledná fáza kryštalizácie a konsolidácie zmesi silikátov a oxidov nazývanej magma alebo roztavený horninový materiál, ktorý vyvierá z hĺbín zeme spolu s vodnými parami a inými prchavými látkami. Tento proces sa odohráva pri teplotách pod 374 °C (kritická teplota vody), ktoré sú možné pre podpovrchové hĺbky, a je charakterizovaný prítomnosťou podpovrchovej vody a iných kvapalných roztokov v už vytvorených horninách s následnou tvorbou sulfidov, sulfátov, uhličitanov a kremičitanov druhej generácie (Costantini, 2005). Karbonáty predstavujú významnú skupinu minerálov v zemskej kôre. Karbonátové minerály kalcit a dolomit sa nachádzajú v sedimentoch, napr. v kriede a vápencoch, v moriach ako mušle a koralové útesy, aj v metamorfovaných horninách – mramoroch. Vyskytujú sa aj v nízkoteplotných hydrotermálnych žilách. Najrozšírenejšou modifikáciou karbonátu vápnika je kalcit, známy vďaka veľkej rozmanitosti a prekrásnemu vývoju kryštálov (Bonewitz, 2005). Kalcit vytvára viac ako 1000 kryštálových tvarov a ich kombinácií (Ďuďa a kol., 2008). V hydrotermálnych ložiskách poskytuje habitus jeho kryštálov informácie o teplote a o ďalších panujúcich podmienkach vzniku (Bonewitz, 2005).

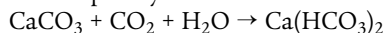
Ak si v súvislosti s Kryštálovou jaskyňou dovoľíme vysloviť hypotézu o jej hydrotermálnom pôvode, robíme tak napriek tvrdeniam odborníkov, ktorým sa nezdá pravdepodobný, lebo hĺbková kontinuita s prírodnými cestami hydrotermu je vraj ťažko preukázateľná. Lenže tieto tvrdenia sú spred 40 rokov, keď Kryštálová jaskyňa mala dĺžku 22 m a nepredpokladali sa ďalšie významnejšie pokračovania. Dnes má však dĺžku 45,81 m a po zameraní to bude okolo 53 m, pričom sa predpokladajú ďalšie komunikácie a pokračovania jaskynného priestoru. **Obr. 5** Okrem toho preukázanie prírodných ciest hydrotermu je veľmi zložitá (na prestup roztoku pod tlakom stačí škára hrubá ako vlas) aj pre obsah mazľavej hnedej hliny a čiastočne aj hliny typu terra rossa.

## Chemizmus uhličitanu vápenatého (CaCO<sub>3</sub>)

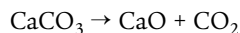
Aragonit, kalcit, dolomit, travertín – všetky horniny, minerály a formácie majú spoločného menovateľa, či už s prímiesami horčíka (eventuálne iných prvkov) alebo nie, stále je to z chemickej stránky uhličitan vápenatý.

### Kolobeh uhličitanu v prípade vysokotermálnych roztokov

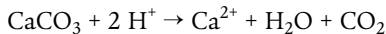
Uhličitan vápenatý je vo vode nerozpustný, ale reakciou s vodou nasýtenou rozpusteným oxidom uhličitým vniká rozpustný hydrogenuhličitan vápenatý:



Zahrievaním na 825 °C bez prístupu vzduchu sa mení na nehasené vápno (oxid vápenatý, CaO):



Je stály v alkalickom prostredí, s kyselinami sa rozkladá za vzniku oxidu uhličitého:



## Vzácné formácie

Čo je to geóda? Je to dutina s kryštálmi. Presne to je Kryštálová jaskyňa: jedna obrovská geóda, do ktorej sa zmestí človek. Z geologického hľadiska má vzácnu genézu; boli vyslovené viaceré hypotézy jej vzniku, nikdy sa však jednoznačne nepreukázali alebo nevyvrátili. Ešte vzácnejšia je z mineralogického hľadiska. Je cenná práve výskytom viacerých typov kryštalizácie. Okrem toho, že sa tu nachádzajú plne vyvinuté krásne klence, ide minimálne o päť rôznorodých typov kryštálov kalcitu v rôznych veľkostiach, od 2 až do 5 cm, niektoré dokonca do 7 cm. Ojedinelé sú formy kryštálov kalcitu



Najväčší kryštál kalcitu v jaskyni. Foto: A. Renčko



Lentiformné kryštály kalcitu. Foto: A. Renčko

do 15, ba až 17 cm. Tento jav je možné pozorovať vo viacerých drobnejších geódach. Napríklad achátová geóda z Maroka z oblasti La yun, pláž Fouml-Oued, má priemer 16 cm. Ide síce o kremennú geódu, ale i tu na malej ploche môžeme pozorovať až 3 typy kryštálov kremeňov v pomerne malej dutine. To znamená, že teplota roztoku a tlak sa počas kryštalizácie museli meniť. Podobné to pri vzniku kryštálov muselo byť i v Kryštálovej jaskyni, dokonca mohli idiomorfne kryštály kryštalizovať vo viacerých fázach a vlnách. Kryštalografické rozboru ukázali najmenej týchto 5 typov kryštálov (podľa Andermatta, 2012): trigonálny skalenoéder,

romboéder, calcit-doppelender, calcit-bitermite a prizmatický kryštál.

### Rádioaktivita našich jaskýň

Najvýznamnejšia expozícia človeka ionizujúcim žiarením pochádza z prírodných zdrojov. Na ožiarení prírodným ionizujúcim žiarením sa podieľa kozmické a terestriálne žiarenie. Zdrojom terestriálneho žiarenia sú pôvodné prírodné rádionuklidy (tzv. primordiálne rádionuklidy) vo všetkých zložkách životného prostredia (pôda, horniny, voda, vzduch, rastliny) aj v ľudskom tele, ktoré pochádzajú z doby vzniku Zeme. Spolu s produktmi svojho samovoľného rádioaktívneho rozpadu spôsobujú externé a interné ožiarenie človeka (Tölgessy, 2009). V prírode bolo identifikovaných 340 rôznych nuklidov, z ktorých približne 70 je rádioaktívnych. Všetky prvky, ktoré majú protónové číslo väčšie ako 80, tvoria rádioaktívne izotopy a všetky izotopy prvkov s protónovým číslom vyšším ako 83 sú rádioaktívne (Mátel, 2011). Hmotnostná aktivita významných rádionuklidov  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  a  $^{40}\text{K}$  v rôznych horninách sa líši až o niekoľko rádov. (Hmotnostné aktivity  $^{226}\text{Ra}$  a jeho produktov premeny sú v horninách približne v rádioaktívnej rovnováhe s  $^{238}\text{U}$ , na základe čoho môžeme porovnať naše výsledky s výsledkami meraní spred



7 Achát s 3 druhmi kryštálov kremeňa v geóde, Maroko. Foto: A. Renčko

štyridsiatich rokov. Typické hodnoty hmotnostných aktivít  $^{226}\text{Ra}$  ( $^{238}\text{U}$ ) sú v rozmedzí 1 – 1000  $\text{Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$ , pričom v uránových ložiskách môžu byť väčšie ako desiatky tisíc  $\text{Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$ , ale priemerné hodnoty sa pohybujú na úrovni desiatok  $\text{Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$ . Vyšší obsah uránu býva vo vyvretých horninách (napr. žula), stredný v metamorfovaných horninách (napr. v pararulách) a najnižší v sedimentárnych horninách (pieskovce, ílovce). Hmotnostná aktivita  $^{232}\text{Th}$  v horninách je v rozsahu 1 – 100  $\text{Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$ . Extrémne hodnoty sú však až stovky  $\text{kBq}\cdot\text{kg}^{-1}$ , napr. v monazitových pieskoch. Priemerné hodnoty hmotnostných aktivít  $^{232}\text{Th}$  v horninách sú na úrovni desiatok  $\text{Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$ . Obsah  $^{40}\text{K}$  v horninách sa uvádza v rozsahu 70 – 1800  $\text{Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$ , pričom priemerné hodnoty sú na úrovni stoviek  $\text{Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$  (Holý, 2009).

### Rádioaktivita je normálna, závisí však od množstva

Rádioaktívne prvky sa vo väčšom alebo menšom množstve vyskytujú vo všetkých horninách, ale ich obsah nie je rovnaký. Každá hornina má svoju prirodzenú rádioaktivitu. Koncentrácia rádioaktívnych prvkov je zvýšená vtedy, ak niekoľkonásobne prevyšuje prirodzený obsah, charakteristický pre určitú horninu (Tulis, 1974), čiže keď presahuje klarkovú hodnotu. V. Bukovinský (1966) opisuje pravdepodobný výskyt rádioaktívneho izotopu  $^{14}\text{C}$  v Májovej priepasti (Mojtínskej priepastej jaskyni). Ide o rádioaktívny izotop uhlíka, ktorého jadro obsahuje 6 protónov a 8 neutónov. Táto hypotéza však nebola potvrdená. (Uvádza dokonca výskyt berýlia, čo je veľmi nepravdepodobné, pretože je to skôr octanový ión, a ten je v prostredí karbonátového krasu takmer vždy neprítomný.) O rádioaktivite jaskynných systémov sme už z nášho pracoviska publikovali prácu pod názvom Rádioaktivita v jaskyniach (Renčko a kol., 2012). Hodnoty nami sledovaných rádioelementov sú však pomerne nízke. Ako ukazuje prax, sumárne hodnoty žiarenia v jaskyniach väčšinou prevyšujú hodnoty žiarenia na povrchu, i napriek tomu, že na povrchu sa pridružuje aj kozmické žiarenie, ktoré v hlbokých vrstvách zeme absentuje. V podzemných priestoroch sa však ionizujúce žiarenie koncentruje zo všetkých strán, v niektorých dómoch a sieňach bývajú zvýšené hod-

noty radónu. Aj z tohto pohľadu je Kryštálová jaskyňa pod Rozsutcom zvláštna, pretože v nej na rozdiel od väčšiny jaskýň nie je hodnota žiarenia zvýšená (ako uvádza Bukovinský, 1941), ale znížená! Práve tento paradox sme tu zistili pri meraní i my, a vysvetľuje ho vo svojej práci už J. Tulis (1974). Ide o spomenuté odtlmenie kozmického žiarenia a hodnoty rádioaktívnych premien, ktoré nedosahujú ani klarkové hodnoty karbonátových hornín.

### Špecifické rádionuklidy

Produkty rozpadu ťažkých prvkov sú nestabilné a rozpadajú sa ďalej. Tento proces sa opisuje ako rozpadový rad. Poznáme 4 rozpadové rady: uránový, aktínuránový, tóriový a neptúniový (umelý). Tórium sme si zvolili ako marker. Tórium objavil v roku 1828 švédsky chemik Jons Jakob Berzelius. Izotop  $^{232}\text{Th}$  má polčas rozpadu  $1,4 \times 10^{10}$  rokov. To sa rozpadá na rádium a radón,  $^{228}\text{Ra}$  a  $^{220}\text{Rn}$ . Okrem toho poznáme ešte ďalšie rádioizotopy tória, a to  $^{230}\text{Th}$  a  $^{228}\text{Th}$ . Ide vlastne o celý rad izotopov od  $^{209}\text{Th}$  až po  $^{238}\text{Th}$ . V prírode sa však v horninách vyskytuje len rádionuklid  $^{232}\text{Th}$ . Kvantová mechanika umožňuje pre každý izotop spočítať pravdepodobnosť, že jadro sa v danom časovom intervale rozpadne. Pre väčšie množstvo látky je možné určiť polčas rozpadu (po novom čas polrozpadu), ktorým charakterizujeme rýchlosť premeny. Práve preto nám tento polčas rozpadu pomáha detegovať vek horniny. Udáva, za aký čas sa rozpadne práve polovica jadier vo vzorke.

### Metodiky meraní

Pri terénnych meraniach prístrojom slúžiacim na meranie rádioaktivity meračom dávkového príkonu (ktorý obsahuje 3 Geiger-Müllerove trubice) Surface contamination monitor (zn. Polon), medzi odborníkmi bežne nazývaným žehlička, sme na základe stanovenia hodnôt okamžitých dávkových príkonov namerali vnútri jaskyne hodnoty v priemere  $0,15 \mu\text{Gy/s}^{-1}$ , a to v rôznych sieňach a chodbách (od  $0,13 \mu\text{Gy/s}^{-1}$  do  $0,17 \mu\text{Gy/s}^{-1}$ ), no vonku pred jaskyňou bol priemerný dávkový príkon  $0,3 \mu\text{Gy/s}^{-1}$ .

Prinajmenšom zvláštno sú však v porovnaní s kryštálmi niekoľkonásobne zvýšené hodnoty rádioaktivity mazľavej hliny prí-



Prístroj na meranie rádioaktivity, tzv. Terénne merania rádioaktivity. Foto: A. Renčko  
žeblička. Foto: A. Renčko

tomnej v útrobách jaskyne – až  $0,8 \mu\text{Gy/s}^{-1}$ . Je to udivujúce v súvislosti s koexistenciou kalcitových kryštálov, kde sa nedosiahli ani klarkové hodnoty rádioaktivity. Mohla sa táto hodnota „minúť“ pri procese kryštalizácie? To nevieme. Ešte sme nepochopili a nepoznáme presné mechanizmy. Ešte zaujímavejšie je, že pôda pred jaskyňou ani zďaleka takéto hodnoty nedosahuje. Odkiaľ sa vzala hlina v jaskyni? Bola tu splavená alebo vysedimentovaná? Pravdepodobne existoval dôkaz, že kryštály vznikajú kryštalizáciou z mäkkého sintra. Podľa Ondreja Števka, predsedu JS Adama Vallu z Terchovej, sa pred niekoľkými

rokmi našiel hnedý mäkký útvar ponášajúci sa na kryštál s pravidelnými hranami vo veľkosti niekoľkých centimetrov v novoobjavenej časti Kryštálovej jaskyne. Bol však krehký a zničil sa. Podobné útvary z mäkkého sintra, avšak bez kryštalickej formy, môžeme vidieť i v Talianskych Dolomitoch v údolí Val di Non v krasovej škarpe zvanéj Centrála. Nález opísaného záhadného polokryštálu sa podaril v čase, keď vandali poškodili Kryštálovú jaskyňu (r. 2002, súdny znalec odhadol škodu na 32 mil. Sk), a vtedy bolo dôležitejšie rýchlo zabezpečiť ochranu jaskyne. Odvtedy sa takýto dôkaz síce nenašiel, no s predpokladanými



Jeden z autorov článku pri odbornej práci v jaskyni. Foto: A. Renčko

Útvary z mäkkého sintra, Val di Non, Talianske Dolomity. Foto: A. Renčko



**13** Poškodená kalcitová výplň Kryštálovej jaskyne. Foto: A. Renčko



**14** Pri spracovaní sa kryštály kalcitu efektne rozpadali na menšie kryštály. Foto: A. Renčko



**15** Gamaspektrometer. Foto: A. Renčko

novými priestormi je eventuálna šanca na objav a následné preskúmanie ďalšieho takéhto napoly vyvinutého útvaru.

Po spomínaných terénnych meraniach sme sa rozhodli podrobnejšie pustiť do výskumu a vniesť svetlo aspoň do genézy jaskyne. Vo významnom (azda najväčšom) jaskynnom skvoste Slovenska sa dlho odborne nepracovalo. Na otázku potvrdenia hydrotermálneho pôvodu sme potrebovali dokázať súvislosť s inými už známymi krasovými útvarmi vzniknutými hydrotermálnou cestou. V Malej Fatre a Chočských vrchoch o tieto krasové unikáty nie je núdz a vyskytujú sa v jednom, chočskom príkrove, ktorého súčasťou sú aj tmavosivé reiflinské vápence. Vzorky hornín na gamaspektrometrické stanovenie rádionuklidov a následné porovnanie týchto hodnôt so vzorkou kalcitu z Kryštálovej jaskyne sme odobrali z týchto lokalít: krasový travertínový Lúčanský vodopád, geotermálne jazero Kalameny, vrchol Choča. Vzorky vápenca, kalcitu a travertínu sa odborne spracovali. Pri odbere vzoriek sa samozrejme rešpektovali všetky zásady odberu vzoriek s ohľadom na životné prostredie a ochranu prírody, keďže

ide o lokality v 5. stupni ochrany a o jaskyňu s mimoriadnou hodnotou pre celé ľudstvo. (Z tohto dôvodu sa v jaskyni neodoberal materiál zo stien, ale len vzorky jednotlivých kryštálov z dna.) Vzorky hornín a minerálov sa odobrali z terénu najčastejšie vo forme hrubozrnného štrku s čo najmenším obsahom pôdy a iného organického materiálu (tráva, lístie, ihličie atď.) a následne sa transportovali na spracovanie. Po odbere vzoriek sme stanovovaný materiál očistili od zvyškov organického materiálu

umývaním vodou a následne zhomogenizovali pomocou kladiva a sita s okami  $5 \times 5$  mm na štrk s veľkou časticou max. 0,5 mm. Vzorky pred vlastným stanovením stáli v nádobách na vyrovnanie časticovej rovnováhy minimálne 4 týždne pred meraniami. Merania aktivity rádionuklidov tória, draslíka, rádia a cézia sa vykonali gamaspektrometriou. Vzorky sa gamaspektrometricky analyzovali Ge detektorom (GC 3520) a mnohokanálovým analyzátorom DSA 1000 firmy Canberra. Získané spektrá boli vyhodnotené pomocou programu Genie 2000. Stanovenia prebehli v Marinelliho nádobách s objemom 0,45 l. Stanovovali sme prírodné rádioizotopy  $^{40}\text{K}$ ,  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$ , ako aj rádioizotop  $^{137}\text{Cs}$ . Tento rádionuklid je však umelý (technogénny) a pri dokazovaní a porovnávaní nemá v prípade jaskýň praktický význam.

### Výsledky, dôkazový materiál a diskusia

Už v roku 1974 J. Tulis odmeral hodnoty kalcitov (takisto gamaspektrometrom) v Kryštálovej jaskyni a dospel k záveru, že hodnota izotopu rádia  $^{226}\text{Ra}$  je  $3,2 \cdot 10^{-4} \%$  U, čo koreluje i s našimi nameranými hodnotami travertínu z Lúčok  $36,78 \pm 0,50$  Bq/kg a vápenca s Kalamien  $37,68 \pm 0,41$  Bq/kg (v tabuľke zvýraznené polotučne). Je to jasný a jednoznačný dôkaz v prospech hydrotermálnej hypotézy vzniku jaskyne. Okrem tohto rádionuklidu korelujú i hodnoty rádionuklidu  $^{232}\text{Th}$ , a to  $1,08 \pm 0,21$  Bq/kg (pozri tabuľku), konkrétne z vrcholu Veľkého Choča (1611 m n. m.), pretože pri predošlej štúdií o Kryštálovej jaskyni takisto namerali hodnotu 1,0 (Tulis, 1974). (My sme tento rá-

dionuklid v jaskyni nezaznamenali, lebo jeho hodnota bola pod detekčný limit, preto i v tabuľke chýba.) To už nemôže byť náhoda. Tým sa teda hydrotermálna teória vzniku jaskyne potvrdila a množstvá jednotlivých zastúpených rádioizotopov a ich rovnaké hodnoty sú toho jednoznačným dôkazom.

### Záver

Na záver môžeme konštatovať, že po našich terénnych a laboratórnych meraniach kvánt rádioizotopov a porovnávaní so štúdiami predošlých autorov sme dospeli k jednoznačnému potvrdeniu hypotézy o hydrotermálnom pôvode Kryštálovej jaskyne.

**Poďakovanie.** Práca vznikla na základe podpory projektu VEGA 1/0415/13. Naša vďaka patrí aj Jaskyniarskej skupine Adama Vallu z Terchovej.

### Použitá literatúra

- ANDERMATT, P. J. 2012: Die Morphologie der Calcitkristalle vom Steinbruch des Buis, La Sarraz, Waadt. Schweizer Strahler, 1, 9.
- BONEWITZ, R. L. 2005: Kamene a drahokamy. Slovart, Bratislava, 360 s., ISBN 978-80-8085-291-7.
- BUKOVINSKÝ, V. 1966: Výskumy v Mojtínskom kráse. Krásy Slovenska, 4, 145.
- COSTANTINI, L. 2005: Slovenský opál - Znovuobjavenie „kráľovského“ drahokamu. Vivit, Kežmarok, 282 s., ISBN 80-88903-83-8.
- DUBLYANSKY, Y. V. 1997: Hydrothermal Cave Minerals. In Hill, C. - Forti, P.: Cave Minerals of the World. NSS, Huntsville, Alabama, USA, 252-255.

Tabuľka: Obsah prírodných a umelých rádionuklidov vo vzorkách hornín

Číslo vzorky	Druh	Lokalita	Hmotnostná aktivita [Bq/kg]			
			$^{137}\text{Cs}$	$^{40}\text{K}$	$^{226}\text{Ra}$	$^{232}\text{Th}$
1.	travertín	Lúčky - travertínový vodopád	-	208,05 ± 7,12	<b>36,78</b> ± 0,50	0,93 ± 0,22
2.	kalcit	Kryštálová jaskyňa	0,43 ± 0,06	104,05 ± 3,64	20,44 ± 0,29	-
3.	vápenec	Kalameny - geotermálne jazero	1,13 ± 0,16	210,80 ± 5,40	<b>37,68</b> ± 0,41	6,90 ± 0,18
4.	dolomit	Vrchol Choča, Chočské vrchy	3,08 ± 0,26	126,27 ± 5,98	25,86 ± 0,47	<b>1,08</b> ± 0,21



- ĎUĎA, R., REJL, L., SLIVKA, D. 2008: Minerály. Aventinum, Praha, 519 s., ISBN 978-80-86858-44-9.
- GAÁL, L. 2008: Geodynamika a vývoj jaskýň Slovenského krasu. ŠOP SR, SSJ, Liptovský Mikuláš – Knížné centrum, Žilina, 166 s., ISBN 978-80-8064-330-0.
- HOLÝ, K. 2009: Prírodné zdroje ionizujúceho žiarenia. Slovenská nukleárna spoločnosť, 2–29. 
- CZOS, T., LAČNÝ, A., JÁNOŠÍK, M., FEKETEOVÁ, Z. 2013: Speleogenéza Havranickej jaskyne ako významného fenoménu Plaveckého krasu (Malé Karpaty). Acta Geologica Slovaca, 5, 1, in press (in Slovak), ISSN 1338-0044.
- MÁTEL, L. 2011: Rádioekológia. Kartprint, Bratislava, 183 s., ISBN 978-80-89553-01-3.
- ORVOŠOVÁ, M. 2005: Kalcitové kryštály v reliktoch fosílného hydrotermálneho krasu v Nízkyh Tatráh. Slovenský kras, 43, 53–66.
- ORVOŠOVÁ, M., HURAI, V. 2008: Kryštály kalcitu v Kalcitovej jaskyni 1 a 2 na Poludnici, Nízke Tatry. Slovenský kras, 46, 1, 87–97.
- ORVOŠOVÁ, M., HURAI, V., SIMON, K., WIEGEROVÁ, V. 2004: Fluid inclusion and stable isotopic evidence for early hydrothermal karstification in vadose caves of the Nízke Tatry Mountains (Western Carpathians). Geologica Carpathica, 55, 5, 421–429.
- RENČKO, A., TOROPILA, M., ŠPALKOVÁ, M., DAŇOVÁ, D., STREČANSKÁ, A. 2012: Rádioaktivita v jaskyniach. Spravodaj Slovenskej speleologickej spoločnosti, 43, 4, 4–6, ISSN 1335-5023.
- ROZLOŽNÍK, O. 2012: Gigantická kryštalická forma minerálov. Myšlienky a fakty, 1–2, 17–19, ISBN 978-80-89456-12-3.
- TÖLGYESSY, J. 2009: Priemyselné zdroje žiarenia. Slovenská nukleárna spoločnosť, 30–35.
- TULIS, J. 1974: Príspevok k problému rádioaktívneho žiarenia v karbonátových horninách. Slovenský kras, 21, 97–109.