

## PŘIROZENÁ RADIOAKTIVITA HORNINOVÉHO PROSTŘEDÍ BELIANSKÉ JESKYNĚ

*Jiří Zimák – Jindřich Štelcl – Ján Zelinka – Juraj Hlaváč*

Jednou ze základních fyzikálních vlastností horninového prostředí je jeho přirozená radioaktivita. Ta je určována zejména obsahem radioaktivních izotopů draslíku ( $^{40}\text{K}$ ), uranu ( $^{235}\text{U}$ ,  $^{238}\text{U}$ ) a thoria ( $^{232}\text{Th}$ ). Přirozená radioaktivita karbonátových hornin (vápenců a dolomitů) je zpravidla velmi nízká, a to díky relativně nízkým obsahům všech tří uvedených prvků. Podle Veizera (1983) karbonátové horniny zemské kůry obsahují v průměru jen 0,3 % K, 2,2 ppm U a 1,7 ppm Th; v případě uranu jde o hodnotu nepatrně nižší než klark (t. j. průměrný obsah daného prvku v zemské kůře – klark U je 2,5 ppm), obsahy draslíku a thoria v karbonátových horninách jsou výrazně „podklarkové“

(klark K = 2,5 %, Th = 13 ppm). Také speleotémy mají obvykle velmi nízkou přirozenou radioaktivitu (relativně velmi nízké obsahy K a Th, někdy mírně zvýšené obsahy U). Jeskynní hlíny a fluvialní jeskynní sedimenty vykazují vysokou variabilitu obsahů K, U a Th v závislosti na jejich vzniku a původu materiálu – na řadě lokalit jde o horniny s relativně vysokou přirozenou radioaktivitou (příkladem jsou fluvialní jeskynní sedimenty v jeskyních Demänovské doliny, v nichž dominuje klastický materiál pocházející z granitoidů).

Tento článek obsahuje výsledky terénního gamaspektrometrického měření přirozené radioaktivity horninového prostředí v prostoru Belian-

ské jeskyně a také karbonátových hornin ve výchozech nad jeskyní. Uvedeny jsou též údaje o chemismu karbonátových hornin a sintrů i data o chemickém a zrnitostním složení vzorků jeskynních hlín.

### GEOLOGICKÉ POMĚRY BELIANSKÉ JESKYNĚ

Belianská jeskyně leží v NPR Belianske Tatry. Je situována na severním svahu Kobylího vrchu (1109 m). Prostory Belianské jeskyně vznikly v gutensteinských vápencích krížňanské jednotky, a to v dílčím příkrovu Bujačího vrchu

Tab. 1. Chemismus triasových vápenců a dolomitů (vzorky Bel-37, 55, 62, 83 a 95) a sintrů (vzorky Bel-1 a 24) z Belianské jeskyně (n. p. = nerozpustný podíl), přepočet na hlavní karbonátové molekuly, analytik P. Kadlec (PřF MU Brno). Místa odběru vzorků: Rázcestie (Bel-1 a 24), severní konec Dlhé chodby (Bel-37), Kaltsteinov dóm (Bel-55), chodba západně od Velkého dómu (Bel-62), Biely dóm (Bel-83), Hlboký dóm (Bel-95).

Table 1. Chemistry of Triassic limestones and dolostones (Samples Bel-37, 55, 62, 83 and 95) and sinters (Samples Bel-1 and 24) from the Belianska Cave (n. p. = insoluble residue, stopy = traces, hm. % = wt%), conversion into main carbonate molecules, analyst P. Kadlec (PřF MU Brno).

Vzorek	Bel-37	Bel-55	Bel-62	Bel-83	Bel-95	Bel-1	Bel-24
CaO (hm. %)	55,67	32,17	53,62	54,75	55,07	55,29	55,22
MgO (hm. %)	0,39	12,74	1,92	0,71	0,87	0,28	0,48
FeO (hm. %)	0,01	0,70	0,01	0,03	0,02	0,03	0,04
MnO (hm. %)	stopy	stopy	stopy	0,001	stopy	-	-
SrO (hm. %)	0,11	0,03	0,03	0,01	0,04	-	-
n. p. (hm. %)	0,29	14,43	0,07	0,28	0,39	0,22	0,24
CaCO <sub>3</sub> (mol. %)	98,92	63,76	95,22	98,18	97,78	99,26	98,75
MgCO <sub>3</sub> (mol. %)	0,96	35,13	4,74	1,77	2,15	0,70	1,19
FeCO <sub>3</sub> (mol. %)	0,01	1,08	0,01	0,04	0,03	0,04	0,06
MnCO <sub>3</sub> (mol. %)	-	-	-	-	-	-	-
SrCO <sub>3</sub> (mol. %)	0,11	0,03	0,03	0,01	0,04	-	-

(horniny tohoto příkrovu vystupují prakticky na celém Kobylím vrchu – viz Mello a Wiczorek, 1993).

Základní údaje o geologických poměrech Belianské jeskyně, její morfologii, genezi i o charakteru jeskynních výplní uvádí např. Pavlarčík (2001, 2002), Pavlarčík a Plučinský (2002), Bella a Pavlarčík (2002). Podle citovaných autorů je převážná část jeskyně vytvořena v tmavě šedých až šedočerných hrubě deskovitých vápencích. Ve směru do nadloží popsané vápence přecházejí do světlejších vápenců, nad nimiž leží dolomity, zjištěné např. v jeskynních prostorech nad Vysokým dómem. Pavlarčík (2001) tyto dolomity řadí

k ramsauským; podle Pavlarčíka (2002) však mohou být součástí gutensteinského souvrství. Pavlarčík (2002) poznamenává, že ve zpřístupněné části Belianské jeskyně se dolomity nenacházejí (s tím však nelze souhlasit – viz níže).

Belianská jeskyně představuje jeskyni v senilním stadiu vývoje. Její geneze byla patrně velmi složitá (viz Bella a Pavlarčík, 2002; Pavlarčík, 2002). O vysokém stáří jeskyně svědčí výsledky paleomagnetického výzkumu siliciklastických sedimentů v profilu na lokalitě Hudobný dóm (Pruner *et al.*, 2000), z nichž je zcela zřejmé, že jde o sedimenty starší než hranice epoch Brunhes/Matuyama (0,78 Ma).

Tab. 2. Výsledky parciálních chemických analýz jeskynních hlín. Obsahy všech komponent jsou uváděny v hm. %, analytik P. Kadlec (PřF MU Brno). Místa odběru vzorků: Dóm objevitelov (Bel-34), Velký dóm (Bel-57), chodba záp. od Velkého dómu (Bel-64 a 65). Table 2. Results of partial chemical analyses of cave soils. Contents of all components are given in wt %, n. p. = insoluble residue, ztr. žih. = loss on ignition, analyst P. Kadlec (PřF MU Brno).

Vzorek	Bel-34	Bel-57	Bel-64	Bel-65
n. p.	19,11	7,10	61,68	18,37
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,72	0,49	5,81	1,08
FeO	0,20	0,06	0,22	0,10
MnO	0,03	0,02	0,11	0,03
CaO	26,64	29,39	5,36	24,44
MgO	14,29	18,66	4,55	16,59
SrO	-	0,02	0,01	0,02
ztr. žih.	36,73	43,30	13,51	37,86
H <sub>2</sub> O-	0,46	0,21	2,25	0,40

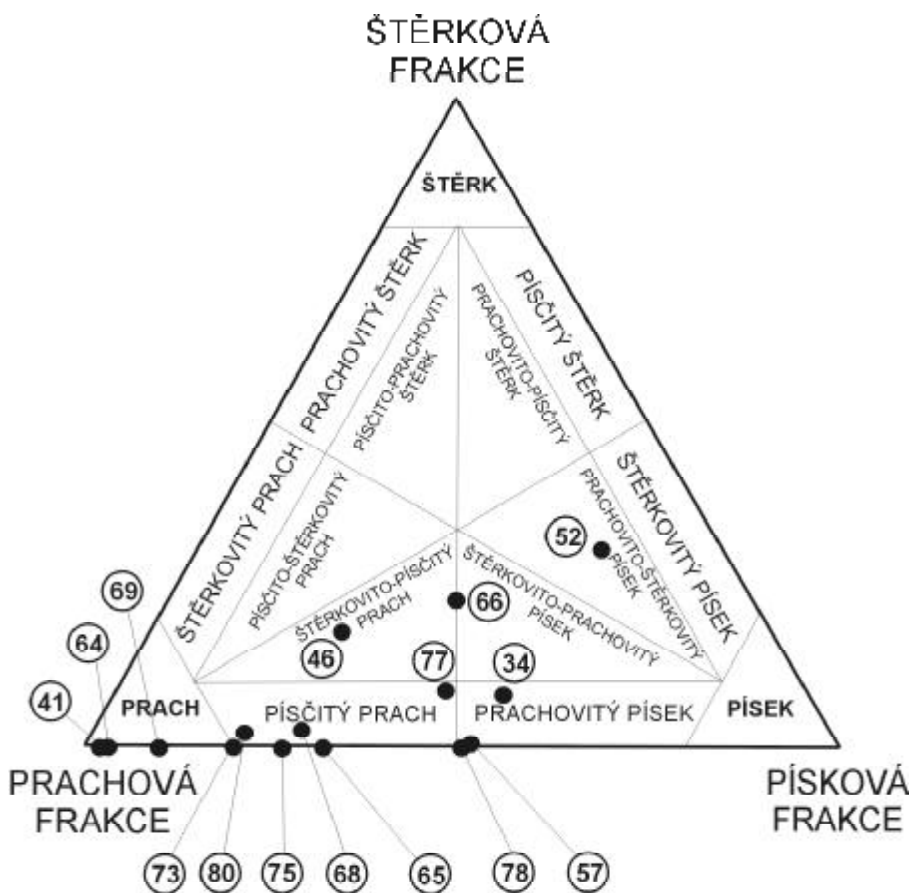
## CHEMISMUS KARBONÁTOVÝCH HORNIN A SINTRŮ

Výsledky chemických analýz karbonátových hornin odebraných ve veřejnosti přístupných úsecích Belianské jeskyně dokládají, že jde o vápence s relativně nízkým podílem dolomitu (do 10 % – viz tab. 1, vzorky Bel-37, 62, 83 a 95), jen lokálně jsou přítomny dolomity s vysokým obsahem calcitu (t. j. vápnité dolomity) a podstatným podílem nekarbonátové složky (tab. 1, vzorek Bel-55, Kaltsteinov dóm). Z provedených analýz sintrů je zřejmé, že jsou tvořeny převážně uhlíkatým vápenatým (viz tab. 1, vzorky Bel-1 a 24).

## ZRNITOSTNÍ SLOŽENÍ A CHEMISMUS JESKYNNÍCH HLÍN

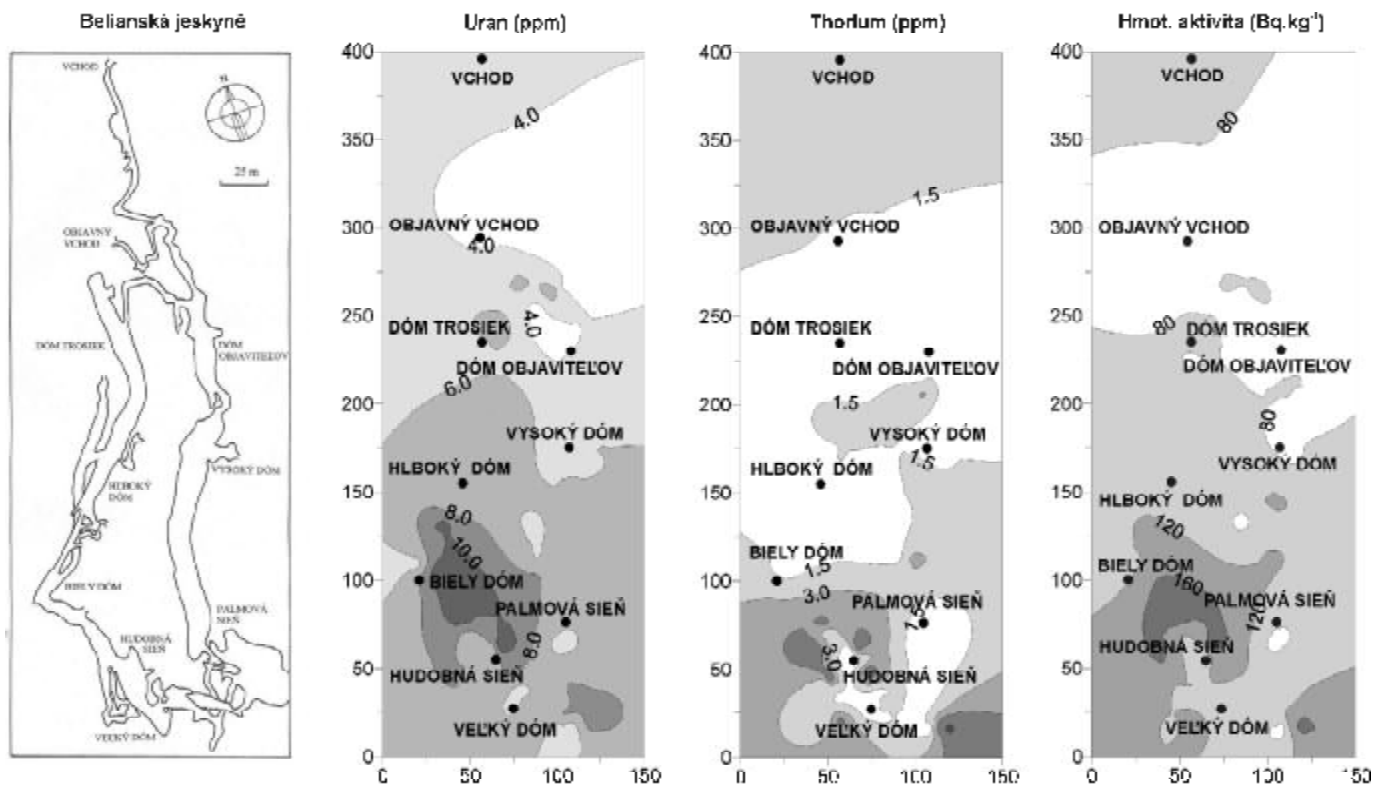
Pojem „jeskynní hlína“ je speleology běžně užíván jako negenetický termín, jímž jsou označována všechna rezidua a nepevněné klastické sedimenty o velikosti zrna převážně pod 2 mm, tvořící výplň jeskynních dutin. Takto široce je tento termín užíván i v tomto článku. Do kategorie jeskynní hlína tedy začleňujeme i fluviaální jeskynní sedimenty, a to jedině proto, že při zběžném terénním výzkumu v Belianské jeskyni jsme nebyli schopni posoudit, zda námi hodnocený sediment je skutečně jeskynní hlínou v užším slova smyslu (viz Panoš, 2001, str. 52) nebo zda jde o fluviaální jeskynní sediment.

Ve vlhkém stavu mají jeskynní hlíny Belianské jeskyně béžovou, světle hnědou až hnědou barvu. Klasickou síťovou metodou bylo v 15 vzorcích jeskynních hlín stanoveno kvantitativní zastoupení tří zrnitostních frakcí: jílův a prachové (velikost částic pod 0,063 mm), pískové (0,063 až 2 mm) a šterkové (nad 2 mm). Pokud byly v jeskynních hlínách přítomny klasty větší než 3 – 4 cm, byly odstraněny již při odběru vzorku. Na základě provedených zrnitostních analýz lze studované sedimenty klasifikovat za použití modifikovaného Kontova trojkomponentního klasifikačního diagramu *prach – písek – šterk* (viz Konta, 1969), v němž jsou do kategorie prachu začleněny všechny částice o velikosti pod 0,063 mm. Jeskynní hlíny z Belianské jeskyně spadají do pole prachu, písčitého prachu, šterkovito-písčitého prachu,



Obr. 1. Pozice jeskynních hlín v modifikovaném klasifikačním diagramu prach-písek-šterk podle Konty (1969). Místa odběru vzorků: Dóm objevitelov (Bel-34), Dlhá chodba (Bel-41 a 46), Zbojnická komora (Bel-52), Velký dóm (Bel-57), chodba západně od Velkého dómu (Bel-64, 65, 66, 68 a 69), Hudobná sieň (Bel-73, 75 a 77), chodba spojující Hudobnú sieň a Biely dóm (Bel-78 a 80).

Fig. 1. Location of cave soils in the modified triangular diagram silt-sand-gravel after Konta (1969).



Obr. 2. Schématický náčrt Belianskej jaskyne, distribúcia obsahů uranu a thoria v triasových vápencích a dolomitech, vypočítaná hmotnostní aktivita ( $a_m$ ).  
 Fig. 2. Ground plan of the Belianska Cave, distribution of uranium and thorium contents in Triassic limestones and dolomites, and calculated mass activities ( $a_m$ ).

prachovitého písku, šterkovito-prachovitého písku a prachovito-šterkovitého písku (obr. 1). V prípade tří vzorků s velmi vysokým podílem frakce pod 0,063 mm (nad cca 90 %) bylo provedeno alespoň orientační stanovení poměru mezi prachovou frakcí (0,004 až 0,063 mm) a jílovou frakcí (částice pod 0,004 mm). Výsledky naznačují, že v jednom ze vzorků (Bel-64) dominuje jílová frakce a že tento vzorek by měl být klasifikován v trojkomponentním diagramu *jíl – prach – písek*, v němž by zrnitostně odpovídal patrně prachovitému jílu. Ve všech ostatních vzorcích jeskynních hlín z Belianské jaskyne převažuje prachová frakce nad jílovou.

Již na základě makroskopického hodnocení jeskynních hlín z Belianské jaskyne bylo zřejmé, že jejich podstatnou složku tvoří karbonáty. Proto byla při studiu jejich chemismu dána přednost parciálními analýzám, při nichž byl vzorek rozkládán HCl (byl použit stejný postup jako při provádění parciálních chemických analýz karbonátů na mokré cestě). Z výsledků provedených analýz (tab. 2) je zcela evidentní podstatné množství karbonátu. Poměr mezi CaO a MgO dokládá, že dominantním a možná i jediným karbonátem ve studovaných vzorcích je dolomit. Jeho množství v jeskynní hlíně může dosahovat až cca 90 %

(vzorek Bel-57). Studované jeskynní hlíny z Belianské jaskyne lze považovat za rezidua vytvořená selektivním rozpuštěním karbonátových hornin řady vápenec – dolomit.

### METODIKA GAMASPEKTROMETRICKÉHO MĚŘENÍ

Gamaspektrometrická stanovení obsahů K, U a Th v karbonátových horninách, jeskynních hlínách a sintrech byla provedena pomocí terénního gamaspektrometru GS-512 (výrobce Geofyzika Brno) ve veřejnosti přístupné části Belianské jaskyne na celkem 112 bodech (viz Zimák *et al.*, 2002); dalších 15 gamaspektrometrických měření bylo realizováno na výchozech karbonátových hornin nad Belianskou jaskyní. Ze stanovených koncentrací K, U a Th byla vypočtena hmotnostní aktivita ekvivalentu  $^{226}\text{Ra}$  ( $a_m$ ), již je pak vyjádřována gama-aktivita horniny. K získání hodnot  $a_m$  byly použity přepočtové koeficienty, uváděné např. Matolínem a Chlupáčovou (1997):

$$1\% \text{ K v hornině} = 313,00 \text{ Bq.kg}^{-1} \text{ } ^{40}\text{K}$$

$$1 \text{ ppm U v hornině} = 12,35 \text{ Bq.kg}^{-1} \text{ } ^{226}\text{Ra}$$

$$1 \text{ ppm Th v hornině} = 4,06 \text{ Bq.kg}^{-1} \text{ } ^{232}\text{Th}$$

Hmotnostní aktivita byla vypočtena pomocí vztahu:

$$a_m = 12,35\text{U} + (1,43 \times 4,06\text{Th}) + (0,077 \times 313\text{K})$$

do nějž jsou obsahy U a Th dosazovány v ppm, obsah K v hm. %.

### VÝSLEDKY GAMASPEKTROMETRICKÝCH MĚŘENÍ

Výsledky gamaspektrometrických měření v Belianské jaskyni a na výchozech karbonátových hornin nad jaskyní jsou sumarizovány v tab. 3. Distribuce obsahů uranu a thoria v triasových vápencích a dolomitech v Belianské jaskyni a vypočtené hodnoty hmotnostní aktivity jsou znázorněny na obr. 2. Stanovené obsahy K a Th v triasových vápencích a dolomitech jsou velmi nízké. Na gama-aktivitě těchto hornin se podílí hlavně uran. Jeho nejvyšší koncentrace a následně i maximální hodnoty hmotnostní aktivity byly zaznamenány v jižním úseku veřejnosti přístupné části jaskyne (Biely dóm a Hudobná sieň, max. 11 ppm U, max. 149 Bq.kg<sup>-1</sup>). Na obr. 3 je distribuce hmotnostní aktivity v triasových vápencích a dolomitech vyjádřena v prostorovém diagramu.

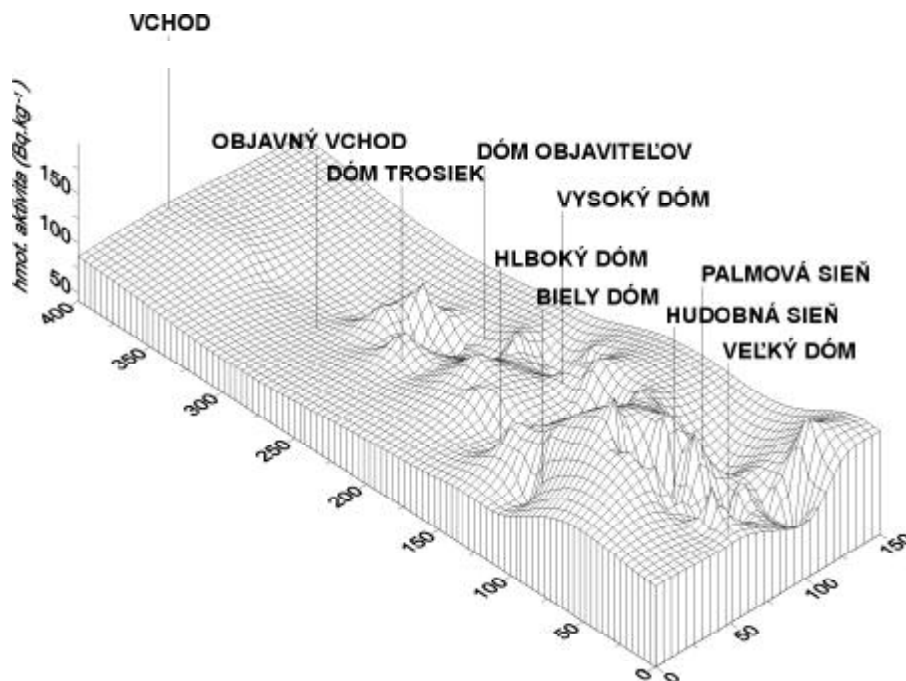
Tab. 3. Obsahy přirozených radioaktivních prvků (K, U, Th), vypočtené hodnoty hmotnostní aktivity ( $a_m$ ) a poměru Th/U v triasových karbonátových horninách (v tabulce jsou označeny jako vápence), sintrech a jeskynních hlínách.  
 Table 3. Natural radioactive element (K, U, Th) contents and calculated mass activity ( $a_m$ ) and Th/U ratio in the Triassic carbonate rocks („vápence“ in the table), sinters and cave clays.

Hornina	n	K (%)		U (ppm)		Th (ppm)		am (Bq.kg <sup>-1</sup> )		Th/U	
		rozpětí	Ø	rozpětí	Ø	rozpětí	Ø	rozpětí	Ø	rozpětí	Ø
vápence – povrch	15	0,1–0,4	0,2	2,1–4,3	3,1	0,4–3,9	1,5	36–70	53	0,1–1,1	0,5
vápence – jaskyně	64	0,0–1,1	0,4	3,1–11,0	6,6	0,0–3,8	1,3	54–149	98	0,0–0,8	0,2
sintry	26	0,0–0,5	0,2	2,6–8,6	5,2	0,0–1,6	0,5	41–114	72	0,0–0,5	0,1
jeskynní hlíny	22	0,4–1,7	1,0	4,4–11,6	7,7	1,4–7,4	4,2	97–207	144	0,2–1,7	0,6

## ZÁVĚR

Přirozená radioaktivita všech tří sledovaných horninových typů v prostoru Belianské jeskyně (triasové vápence a dolomity, jeskynní hlíny a sintry) je velmi nízká. Vypočtené hodnoty hmotnostní aktivity ani v jediném proměřovaném bodě nedosáhly  $370 \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$  (limitní hodnota uváděná v normách zemí OECD pro tzv. „pobytové místnosti“, za něž lze považovat i veřejnosti přístupné jeskyně). Přirozená radioaktivita horninového prostředí Belianské jeskyně by tedy neměla negativně působit na její návštěvníky a ani na zaměstnance SSJ, kteří v jeskyni tráví značnou část pracovní doby.

Na základě gamaspektrometrických měření provedených v mnoha krasových územích Západních Karpat i Českého masivu lze konstatovat, že zatímco obsahy K a Th v karbonátových horninách (vápencích a dolomitech) v jeskynním systému a ve výchozech nad ním jsou v podstatě shodné, je průměrná koncentrace uranu v karbonátových horninách endokrasu zpravidla výrazně vyšší než v karbonátových horninách ve výchozech nad jeskynním systémem (viz např. Štelcl – Zimák, 2001; Zimák – Štelcl, 2001). To platí i pro Belianskou jeskyni. Ve výchozech karbonátových hornin nad jeskyní je průměrný obsah uranu 3,1 ppm; v karbonátových horninách endokrasu je v průměru 6,6 ppm U (lokálně až 11 ppm U). V případě zvýšených koncentrací uranu je nápadné, že tyto byly zjištěny pouze v některých úsecích jeskynního systému. Pozitivní uranové anomálie v endokrasu jsou patrně jedním z výsledků karsťfikačních procesů. Lze předpokládat, že k obohacení vápenců (a také dolomitů) uranem dochází ve freatické zóně, zřejmě díky rozpadu



Obr. 3. Prostorový diagram distribuce vypočtených hodnot hmotnostní aktivity ( $a_m$ ) v triasových vápencích a dolomitech Belianské jeskyně.

Fig. 3. Distribution space diagram of calculated mass activities ( $a_m$ ) in Triassic limestones and dolomites in the Belianska Cave.

uranyl-karbonátových komplexních iontů a adsorpci uranuly např. na oxid-hydroxidy Fe a Mn, jílové minerály apod.

Vzhledem k poměrně nízkým obsahům uranu mohou být horniny přítomné v Belianské jeskyni jen málo významným zdrojem  $^{222}\text{Rn}$ . Na

základě výsledků zrnitostních analýz jeskynních hlín lze konstatovat, že tyto sedimenty mají ve vztahu k radonu nízkou nebo (častěji) střední propustnost. I proto nelze vyloučit lokálně mírně zvýšené koncentrace radonu v jeskynní atmosféře.

## LITERATURA

- BELLA, P. – PAVLARČÍK, S. (2002). Morfológia a problematika genézy Belianskej jaskyne. In Bella, P. (ed.): Výskum, využívanie a ochrana jaskýň, 3. Zborník referátov z vedeckej konferencie, Liptovský Mikuláš, 22–35.
- KONTA, J. (1969). Quantitative analytical petrological classification of sedimentary rocks. Acta Univ. Carol., Geol. 1969, 175–253.
- MATOLÍN, M. – CHLUPÁČOVÁ, M. (1997). Radioaktivní vlastnosti hornin. In Kobr, M. et al.: Petrofyzika, 109–126. Vydavatelství Karolinum Praha.
- MELLO, J. – WIECZOREK, J. (1993). Krížňanský príkrov (veporikum). In Nemčok, J. (ed.): Vysvetlivky ku geologickej mape Tatier 1 : 50 000. GÚDŠ Bratislava, 36–49.
- PAVLARČÍK, S. (2001). Dokumentácia priestorov nad Vysokým dómom v Belianskej jaskyni. Aragonit, 6: 15–17.
- PAVLARČÍK, S. (2002). Geologické pomery východnej časti Belianskych Tatier a ich vplyv na vývoj Belianskej jaskyne. In Bella, P. (ed.): Výskum, využívanie a ochrana jaskýň, 3. Zborník referátov z vedeckej konferencie, Liptovský Mikuláš, 15–21.
- PAVLARČÍK, S. – PLUČINSKÝ, L. (2002). Dokumentácia jaskynných priestorov nad Vstupnou chodbou v Belianskej jaskyni. Aragonit, 7: 15–19.
- PRUNER, P. – BOSÁK, P. – KADLEC, J. – VENHODOVÁ, D. – BELLA, P. (2000). Paleomagnetický výskum sedimentárných výplní vybraných jeskyní na Slovensku. In Bella, P. (ed.): Výskum, využívanie a ochrana jaskýň. Zborník referátov z 2. vedeckej konferencie, Liptovský Mikuláš, 13–25.
- ŠTELCL, J. – ZIMÁK, J. (2001). Radioactivity of Devonian limestones of the Moravian Karst (Czech Republic). Acta Univ. Palacki. Olomuc., Fac. rer. nat., Geologica 37, 47–49.
- VEIZER, J. (1983). Trace elements and isotopes in sedimentary carbonates. In Reeder, R. J. (ed.): Carbonates: Mineralogy and Chemistry. Reviews in Mineralogy, Vol. 11, 265–299.
- ZIMÁK, J. – ŠTELCL, J. (2001). Rock radioactivity in the Javoříčko Karst and Mladeč Karst (Czech Republic). Acta Univ. Palacki. Olomuc., Fac. rer. nat., Geologica 37, 67–82.
- ZIMÁK, J. – ŠTELCL, J. – ZELINKA, J. – HLAVÁČ, J. (2002). Výsledky gamaspektrometrických měření v Belianské jeskyni (závěrečná zpráva). MS. UP Olomouc – MU Brno – SSJ Liptovský Mikuláš.

## SUMMARY

The Belianska Cave is situated in the eastern part of the Belianske Tatry Mts. in Slovakia. It was created in Middle Triassic limestones and dolomites of the Krížňanský nappe.

Concentrations of natural radioactive elements were measured in the rocks using gamma-ray spectrometry. The monitored parts of the Belianska Cave are characterized by low contents of potassium, uranium and thorium both in Triassic carbonates (K 0 to 1.1, avg. 0.4 wt%; U 3.1 to 11.0, avg. 6.6 ppm; Th 0 to 3.8, avg. 1.3 ppm), and in sinters (K 0 to 0.5, avg. 0.2 wt%; U 2.6 to 8.6, avg. 5.2 ppm; Th 0 to 1.6, avg. 0.5 ppm, and in siliciclastic sediments (cave soils, K 0.4 to 1.7, avg. 1.0 wt%; U 4.4 to 11.6, avg. 7.7 ppm; Th 1.4 to 7.4, avg. 4.2 ppm). Concentrations of K, U and Th were converted to the mass activity of  $^{226}\text{Ra}$  equivalent ( $a_m$ ) in order to present the gamma-ray activity of the locality in question. Average values  $a_m$  for Triassic carbonates, sinters and siliciclastic sediments are only 98, 72 and 144  $\text{Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$ , respectively.