

# PŘIROZENÁ RADIOAKTIVITA HORNINOVÉHO PROSTŘEDÍ VE VEŘEJNOSTI PŘÍSTUPNÝCH JESKYNÍCH SLOVENSKE REPUBLIKY

Jindřich Štelcl<sup>1</sup> – Jiří Zimák<sup>2</sup> – Ján Zelinka<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Ústav geologických věd PřF MU, Kotlářská 2, 611 37 Brno, Česká republika; stelcl@sci.muni.cz

<sup>2</sup> Katedra geologie PřF UP, tř. Svobody 26, 771 46 Olomouc, Česká republika; zimak@prfnw.upol.cz

<sup>3</sup> Správa slovenských jaskýň, Hodžova 11, 031 01 Liptovský Mikuláš; zelinka@ssj.sk

**J. Štelcl, J. Zimák & J. Zelinka: Natural radioactivity of the rock environment in show caves of Slovakia**

**Abstract:** Concentrations of natural radioactive elements (potassium, uranium and thorium) were measured using field gamma-ray spectrometers GS-256 and GS-512 (both manufactured by Geofyzika Brno, Czech Republic) in the karst rocks, clastic cave sediment (incl. cave soils), fluvial sediments and sinters in all twelve show caves managed by the Slovak Caves Administration. Concentrations of these elements were converted to the mass activity of <sup>226</sup>Ra equivalent ( $a_m$ ) in order to express gamma-ray activity at the studied sites. With the exception of the Važec Cave and Ochtiná Aragonite Cave, the calculated average  $a_m$  values for the individual rock types are lower than 370 Bq.kg<sup>-1</sup> (limit value used in the OECD countries). In Ochtiná Cave, only aragonite sinters yielded values overstepping this limit. Važec Cave represents an exceptional site among the show caves in Slovak Republic as the natural radioactivity of the rocks concerns: average  $a_m$  of carbonate rocks and sinters in this cave corresponds to 498 Bq.kg<sup>-1</sup> and 385 Bq.kg<sup>-1</sup>, respectively. In case of clastic cave sediments and fluvial sediments, the average  $a_m$  value reaches even 722 Bq.kg<sup>-1</sup>, maximum value being 930 Bq.kg<sup>-1</sup>. Very high average  $a_m$  values of the rock environment of the Važec Cave are caused by anomalously high contents of uranium in all examined rock types (see Table 1). Gamma-spectrometrical measurements carried out in the karst areas in Slovakia have shown, that potassium and thorium contents in carbonate rocks of the cave system and in outcrops above it are in general very similar. In case of uranium, the situation is different. Its contents measured by gamma-spectrometry are in general markedly higher in carbonate rocks of the endokarst than in carbonate rocks in outcrops above the cave system. Positive uranium anomalies in carbonate rocks of the endokarst probably represent one of the consequences of the karstification processes. These uranium anomalies in the endokarst are conspicuously often spatially associated with sections in which dolomitic limestones or dolomites occur. Mass activity of sinters is roughly the same or slightly lower compared to the carbonate rocks, in which the cave system has been formed. Mass activity of the clastic cave sediments and also of the fluvial sediments is within a single cave system always higher (as a rule two to three times) than the mass activity of the carbonate rocks. This is caused by higher concentration of all three elements measured by gamma-spectrometry, especially potassium and thorium.

**Key words:** gamma-ray spectrometry, karst rocks, fluvial sediments, clastic cave sediments, sinters

## ÚVOD

Správa slovenských jaskýň v Liptovském Mikuláši zabezpečuje ochranu a provoz ve 12 zpřístupněných jeskyních. Pomocí terénních gamaspektrometrů GS-256 a GS-512 byly v těchto jeskyních stanoveny obsahy přirozených radioaktivních prvků (K, U a Th) v krasových horninách (vápence, dolomity, příp. kalcitické mramory a „ankerity“), klastických jeskynních sedimentech (včetně jeskynních hlín), fluviálních sedimentech a sintrech. Metodiku těchto měření a zpracování dat popisují Zimák et al. (2003a), Zimák a Štelcl (2004); v publikaci Zimáka et al. (2003a) lze najít podrobné údaje o přirozené radioaktivitě horninového prostředí ve všech slovenských jeskyních spravovaných SSJ.

## VÝSLEDKY GAMASPEKTROMETRICKÝCH MĚŘENÍ A JEJICH DISKUSE

S výjimkou sintrů jsou výsledky gamaspektrometrických měření sumarizovány v tab. 1, v níž je uvedena také hmotnostní aktivita ekvivalentu <sup>226</sup>Ra (dále jen  $a_m$ ), která nejlépe vyjadřuje výši přirozené radioaktivity studovaných hornin ( $a_m$  je vypočtena ze stanovených obsahů K, U a Th). Na základě těchto měření a také údajů získaných petrografickým hodnocením vybraných horninových vzorků lze formulovat tyto závěry:

1. S výjimkou Važecké jeskyně a Ochtinské aragonitové jeskyně jsou průměrné hodnoty  $a_m$  pro jednotlivé skupiny hornin (krasové horniny, klastické jeskynní sedimenty a fluviální sedimenty, sintry) ve všech ostatních sledovaných jeskyních nižší než 370 Bq.kg<sup>-1</sup> (limitní hodnota pro „pobytové místnosti“ v zemích OECD). V Ochtinské aragonitové jeskyni je hodnota 370 Bq.kg<sup>-1</sup> překročena pouze u aragonitových sintrů (jen velmi mírně - průměr 403 Bq.kg<sup>-1</sup>, maximální  $a_m$  530 Bq.kg<sup>-1</sup>). Z hlediska přirozené radioaktivity hornin je zcela výjimečným objektem Važecká jeskyně. Průměrná  $a_m$  karbonátových hornin a sintrů je zde 498 Bq.kg<sup>-1</sup> a 385 Bq.kg<sup>-1</sup>; průměrná hodnota  $a_m$  klastických jeskynních sedimentů a fluviálních sedimentů dokonce 722 Bq.kg<sup>-1</sup>, maximální 930 Bq.kg<sup>-1</sup>. Velmi vysoká přirozená radioaktivita horninového prostředí Važecké jeskyně je způsobena anomál-

Tab. 1. Obsahy přirozených radioaktivních prvků (K, U, Th) a vypočtené hodnoty hmotnostní aktivity ( $a_m$ ) horninového prostředí ve veřejnosti přístupných jeskyních na Slovensku

Lokalita / Hornina	n	K (%)		U (ppm)		Th (ppm)		$a_m$ (Bq.kg <sup>-1</sup> )	
		rozpětí	Ø	rozpětí	Ø	rozpětí	Ø	rozpětí	Ø
<i>Driny</i>									
křídové karbonátové horniny	40	0,2 – 0,9	0,5	0,8 – 3,8	2,2	0,4 – 3,2	1,7	27 – 76	50
klastické jeskynní sedimenty	8	0,8 – 2,3	1,3	1,7 – 3,5	2,6	2,9 – 10,6	6,0	71 – 160	99
<i>Harmanecká jaskyňa</i>									
triasové karbonátové horniny	58	0 – 0,3	0,1	3,2 – 23,7	12,0	0 – 1,2	0,2	42 – 300	150
klast. jesk. sed. a fluv. sedimenty	11	0,2 – 0,9	0,6	7,9 – 14,2	10,4	1,3 – 5,5	3,4	131 – 213	163
<i>Demänovská ľadová jaskyňa</i>									
triasové karbonátové horniny	17	0,1 – 0,6	0,3	1,3 – 4,5	2,7	0 – 1,6	0,4	18 – 78	43
<i>Demänovská jaskyňa slobody</i>									
triasové karbonátové horniny	40	0 – 1,7	0,7	3,6 – 16,4	9,3	0 – 5,9	1,8	52 – 225	142
klast. jesk. sed. a fluv. sedimenty	20	1,2 – 3,4	2,4	10,4 – 27,1	14,5	4,0 – 12,0	7,7	208 – 436	282
<i>Bystrianska jaskyňa</i>									
triasové karbonátové horniny	44	0,1 – 1,8	0,7	5,9 – 26,0	14,3	0,3 – 9,2	2,7	89 – 366	209
klast. jesk. sed. a fluv. sedimenty	10	1,7 – 3,5	2,6	9,3 – 21,6	15,9	8,7 – 17,3	12,2	236 – 452	329
<i>Važecká jaskyňa</i>									
triasové karbonátové horniny	28	0,1 – 1,1	0,6	5,7 – 70,9	37,8	0,9 – 6,8	2,8	93 – 891	498
klast. jesk. sed. a fluv. sedimenty	11	1,2 – 2,3	1,7	36,9 – 65,0	50,5	6,4 – 14,9	9,8	576 – 930	722
<i>Belianska jaskyňa</i>									
triasové karbonátové horniny	64	0 – 1,1	0,4	3,1 – 11,0	6,6	0 – 3,8	1,3	54 – 149	98
klastické jeskynní sedimenty	22	0,4 – 1,7	1,0	4,4 – 11,6	7,7	1,4 – 7,4	4,2	97 – 207	144
<i>Dobšinská ľadová jaskyňa</i>									
triasové karbonátové horniny	16	0 – 0,1	0	0,1 – 0,9	0,5	0 – 0,6	0,2	2 – 11	7
<i>Ochtinská aragonitová jaskyňa</i>									
kalcitické mramory	18	0 – 0,4	0,2	10,6 – 27,9	19,1	0,3 – 4,1	1,7	147 – 363	251
ankerity	14	0 – 0,4	0,2	10,3 – 26,3	17,3	0,6 – 3,0	1,5	141 – 342	227
klastické jeskynní sedimenty	3	1,2 – 1,5	1,3	12,1 – 29,6	20,2	6,3 – 13,3	9,8	215 – 454	339
<i>Gombasecká jaskyňa</i>									
triasové karbonátové horniny	29	0 – 0,7	0,3	0,4 – 5,0	2,2	0,5 – 5,6	2,6	8 – 100	50
klast. jesk. sed. a fluv. sedimenty	12	0,6 – 2,3	1,3	2,8 – 6,6	4,4	2,7 – 18,3	10,9	65 – 228	148
<i>Domica</i>									
triasové karbonátové horniny	100	0 – 0,9	0,3	0,4 – 5,7	3,0	0 – 9,7	2,7	18 – 134	59
klast. jesk. sed. a fluv. sedimenty	44	0,1 – 1,7	1,0	1,6 – 8,2	4,8	0,6 – 14,8	10,0	29 – 215	141
<i>Jasovská jaskyňa</i>									
triasové karbonátové horniny	37	0 – 1,3	0,5	0 – 10,0	4,4	0,1 – 9,9	2,8	4 – 167	82
klastické jeskynní sedimenty	17	1,0 – 3,2	2,2	0,5 – 11,0	6,4	4,6 – 21,5	13,1	70 – 323	207

Poznámka: Obsahy K, U a Th pod mezí detekce použitého gamaspektrometru uvádíme jako „nulové“.

Tab. 2. Gamaspektrometricky stanovený obsah U a poměr Th/U v karbonátových horninách endokrasu a exokrasu

Jeskynní systém	U (ppm)				Th / U			
	endokras		exokras		endokras		exokras	
	rozpětí	Ø	rozpětí	Ø	rozpětí	Ø	rozpětí	Ø
Driny	0,8 – 3,8	2,2	0,6 – 1,7	1,2	0,3 – 2,6	0,9	0,6 – 2,7	1,5
Harmanecká jaskyňa	3,2 – 23,7	12,0	1,2 – 2,8	2,0	0 – 0,1	0	0 – 0,2	0,2
Demänovská j. mieru, j. slobody	1,3 – 23,1	8,8	1,6 – 8,2	3,5	0 – 1,6	0,2	0 – 1,3	0,5
Važecká jaskyňa	5,7 – 70,9	37,8	13,3 – 25,6	18,7	0 – 0,5	0,1	0 – 0,2	0,1
Belianska jaskyňa	3,1 – 11,0	6,6	2,1 – 4,3	3,1	0 – 0,8	0,2	0,1 – 1,1	0,5
Dobšinská ľadová jaskyňa	0,1 – 0,9	0,5	0,1 – 1,7	0,9	0 – 2,0	0,5	0 – 3,0	0,9
Gombasecká jaskyňa	0,4 – 5,0	2,2	0,3 – 0,7	0,4	0,2 – 2,4	1,3	0,1 – 0,7	0,4
Domica	0,4 – 5,7	3,0	0,1 – 2,1	1,0	0 – 8,8	1,0	0 – 6,8	3,0
Jasovská jaskyňa	0 – 10,0	4,4	1,4 – 3,2	2,1	0 – 2,4	0,7	0 – 1,1	0,4

ně vysokými obsahy uranu ve všech sledovaných skupinách hornin. Je však nutno poznamenat, že na lokalitách s vysokými koncentracemi radonu ve speleoatmosféře (a to je právě případ Važecké jeskyně) může ve významném rozsahu docházet k fixaci produktů radioaktivní přeměny  $^{222}\text{Rn}$  například na stěnách jeskyně. Jedním z produktů přeměny  $^{222}\text{Rn}$  je  $^{214}\text{Bi}$ , jenž může ovlivnit výsledek nepřímého gamaspektrometrického stanovení obsahu uranu v hornině směrem k vyšším hodnotám ( $^{222}\text{Rn}$  je jedním z dceřiných produktů v rozpadové řadě  $^{238}\text{U}$ ; radioaktivní přeměnou  $^{222}\text{Rn}$  vzniká m. j.  $^{214}\text{Bi}$ , jehož koncentrace je stanovována v gamaspektrometricky proměřovaném „bodě“, a z ní je pak vyčíslena koncentrace uranu v hornině). „Přesné“ stanovení obsahu uranu v horninovém prostředí Važecké jeskyně by tedy bylo nutno provést jinou metodou. O anomálně vysokých obsazích uranu v horninách Važecké jeskyně však nelze pochybovat. Svědčí o tom výsledky gamaspektrometrických měření provedených na výchozech karbonátových hornin v exokrasu, přibližně nad jeskynním systémem, kde bylo stanoveno v průměru 18,7 ppm U (max. 25,6 ppm U). Ve výchozech karbonátových hornin nad ostatními sledovanými jeskynnými systémy jsou průměrné obsahy U v rozpětí 0,4 až 3,5 ppm, nejvyšší zjištěný obsah U v jednotlivém „bodě“ je 8,2 ppm (viz tab. 2).

2. Obsahy K i obsahy Th v karbonátových horninách v jeskynním systému a ve výchozech nad ním jsou většinou velmi podobné. V případě Th tato skutečnost souvisí patrně s jeho velmi nízkou mobilitou v roztocích za hypergenních podmínek. Na dvou lokalitách (Jasovská jeskyně a jeskyně Gombasecká) však existují výrazné rozdíly mezi obsahy Th v karbonátových horninách endokrasu a exokrasu (v průměru 2,6 ppm Th v karbonátových horninách Gombasecké jeskyně, jen 0,2 ppm Th v karbonátových horninách exokrasu). V případě těchto dvou jeskyní je nutno připustit transport Th v pevné fázi (jako součást minerálů) a následně relativně vysokou koncentraci těchto pevných fází na puklinách probíhajících karbonátovými horninami v endokrasu. Odlišná je situace v případě U, jehož gamaspektrometricky stanovený obsah v karbonátových horninách endokrasu je zpravidla výrazně vyšší než v karbonátových horninách ve výchozech nad jeskynním systémem (tab. 2); výjimku představuje Dobšinská ledová jeskyně (obsahy U ve vápencích v této jeskyni i ve výchozech nad ní jsou navíc extrémně nízké). Ve většině sledovaných krasových území se zvýšení koncentrace U v karbonátových horninách endokrasu projevuje nižší hodnotou poměru Th/U ve srovnání s exokrasem (viz tab. 2) – výjimkou je Jasovská a Gombasecká jeskyně, a to díky již zmíněným relativně vysokým obsahům Th v karbonátových horninách endokrasu.

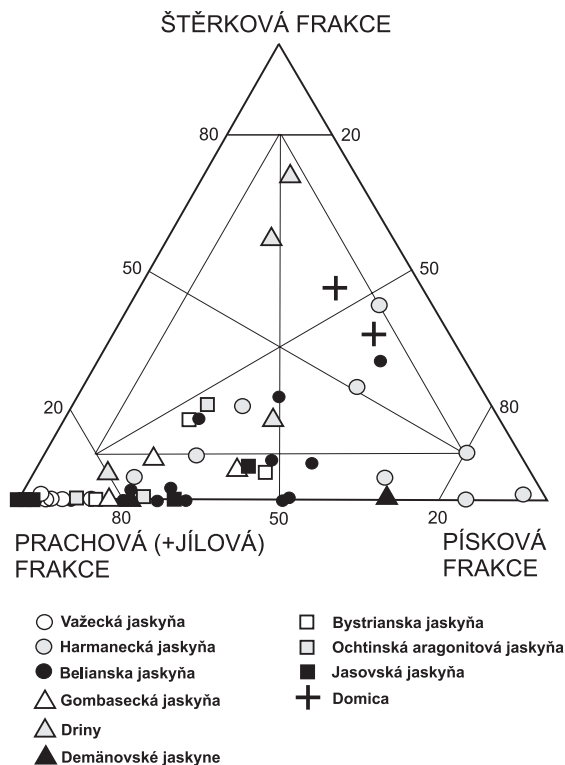
3. V případě zvýšených obsahů uranu v karbonátových horninách endokrasu je nápadné, že byly zjištěny pouze v některých úsecích jeskynních systémů. Tyto pozitivní uranové anomálie v endokrasu mohou být jedním z výsledků karstifikačních procesů; zdrojem uranu jsou rozpouštějící se karbonátové horniny. Lze předpokládat, že k obohacení karbonátových hornin uranem dochází ve freatické zóně, zřejmě díky rozpadu uranyl-karbonátových komplexních iontů a adsorpci uranylu např. na oxid-hydroxidy Fe a Mn, jílové minerály, fosfáty apod. Zvýšené koncentrace uranu ve vápencích endokrasu byly prokázány i v krasových územích Českého masivu a i zde jsou považovány za produkt krasových pochodů (viz např. Štelcl – Zimák, 2001; Zimák – Štelcl, 2001, 2004). Nutno zdůraznit, že některé pozitivní uranové anomálie v krasových horninách slovenských jeskynních systémů nemusí být geneticky spjaty s karstifikací, ale že jejich vznik může být výsledkem diagenetických či epigenetických procesů, příp. zvýšené obsahy uranu v krasových horninách mohou souviset s primární litologií (viz níže).

Ve většině studovaných jeskynních systémů není dostatečně podrobně známo složení karbonátových hornin v jejich jednotlivých částech, a tak v případech, kdy je zcela evidentní, že v jeskynním systému jsou přítomny jak vápence, tak i dolomity, nelze často ani velmi přibližně vymezit úseky, v nichž jeden či druhý typ horniny je tím dominantním. Výsledky námi provedených gamaspektrometrických měření a také studia makrochemismu karbonátových hornin (i když z ekonomických důvodů jen na malém počtu vzorků) naznačují, že pozitivní uranové anomálie v endokrasu jsou nápadně často prostorově sblíženy s úseky, v nichž se vyskytují dolomitické vápence nebo dolomity. Nejvýrazněji se tento vztah projevuje v systému Domica – Baradla, kde byly nadprůměrné obsahy uranu v karbonátových horninách zaznamenány v jeho nejvýchodnější části (Vörös-tó – Jósvalfő), kde jsou dle našich zjištění poměrně dlouhé úseky jeskynního systému vytvořeny v dolomitech (viz Zimák et al., 2003b). Zatím nejsme schopni posoudit, zda jsou tyto uranové anomálie rysem původního sedimentu nebo výsledkem diagenetických a všech dalších procesů, jimiž byly tyto horniny postiženy (včetně procesů karstifikačních).

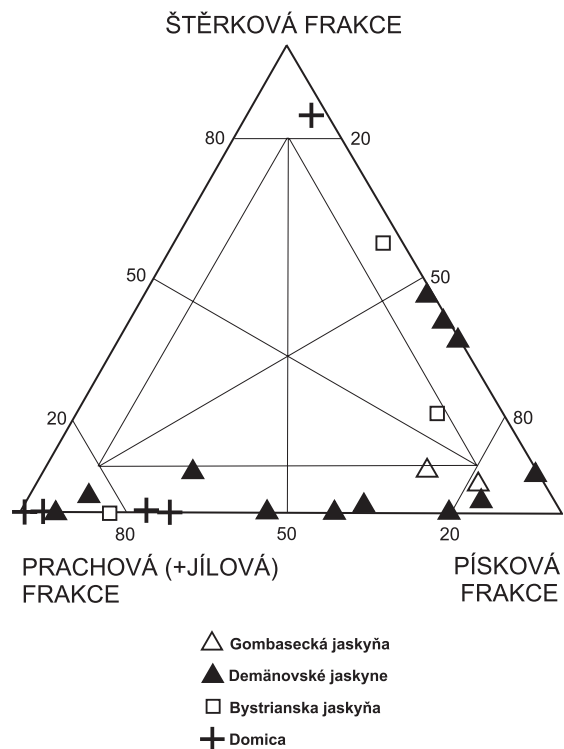
4. Hmotnostní aktivita sintrů je zhruba stejná nebo mírně nižší ve srovnání s karbonátovými horninami, v nichž je vytvořen jeskynní systém (Zimák et al., 2003a).

5. Při hodnocení přirozené radioaktivity jeskynního systému jsou významnou složkou horninového prostředí klastické jeskynní sedimenty (k nimž patří i tzv. jeskynní hlíny) a na mnoha lokalitách i fluvialní sedimenty.

Klastické jeskynní sedimenty ze studovaných jeskyní patří převážně mezi siliciklastické sedimenty, někdy výrazně polystrukturní, jindy dobře vytříděné (obr. 1), s variabilním, převážně však nízkým obsahem karbonátové složky. Některé jeskynní hlíny z Belianské jeskyně (zrnitostně odpovídají písčitému prachu, prachu, příp. prachovitému jílu) mají vysoký obsah dolomitu (až 90 %) – tyto sedimenty mají povahu reziduí (nepřemístěných nebo přeplavených, uložených ve stagnujícím vodním prostředí), vytvořených selektivním rozpouštěním karbonátových hornin řady vápenc-dolomit (v některých případech nelze vyloučit fluvialní původ).



Obr. 1. Pozice klastických jeskynních sedimentů z veřejnosti přístupných jeskyní Slovenska v klasifikačním diagramu *prachová (+ jílová) frakce – písková frakce – štěrková frakce*, upraveném podle Konty (1969)



Obr. 2. Pozice fluviálních sedimentů z veřejnosti přístupných jeskyní Slovenska v klasifikačním diagramu *prachová (+ jílová) frakce – písková frakce – štěrková frakce*, upraveném podle Konty (1969)

Fluviální sedimenty přítomné ve studovaných jeskynních systémech mají zpravidla povahu zrnitostně velmi dobře vytríděných siliciklastik se zcela nepatrným zastoupením karbonátové složky, které v diagramech *prachová (+ jílová) frakce – písková frakce – štěrková frakce* dle Konty (1969) odpovídají sedimentům řad prach – písek a písek – štěrk (obr. 2). V Demänovském jeskynním systému se však běžně vyskytují i fluviální sedimenty, které lze na základě struktury a nerostného složení klasifikovat jako dolomitový prach nebo písčité dolomitový prach, přičemž prachové částice tvořené dolomitem jsou produktem selektivního rozpouštění krasových hornin (převážně na povrchu krasového území); v pískové frakci těchto sedimentů převažuje materiál pocházející z granitoidů.

Hmotnostní aktivita klastických jeskynních sedimentů a také fluviálních sedimentů je v rámci jednoho jeskynního systému vždy vyšší (zpravidla 2 až 3 x) než  $a_m$  karbonátových hornin. Je to dáno vyššími koncentracemi všech tří gamaspektrometricky sledovaných prvků, zejména však K a Th (viz data v tab. 1). Důvodem je skutečnost, že jeskynní hlíny a fluviální jeskynní sedimenty obsahují ve zvýšeném množství v krasových vodách nerozpustné, příp. nesnadno rozpustné složky karbonátových hornin nebo materiál, který byl do jeskyně vplaven či spláchnut z okolního povrchu nekrasových hornin nebo ze sedimentárního pokryvu krasu (např. svahové sedimenty, spraše) nebo který byl do jeskyně transportován vodním tokem (např. materiál z granitoidů).

## LITERATURA

KONTA, J. 1969. Quantitative analytical petrological classification of sedimentary rocks. *Acta Univ. Carol., Geol.* 1969, 175–253.

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.

ZIMÁK, J. – ŠTELCL, J. 2001. Rock radioactivity in the Javoříčko Karst and the Mladeč Karst (Czech Republic). *Acta Univ. Palacki. Olomuc., Fac. Rer. Nat., Geologica* 37, 67–83.

ZIMÁK, J. – ŠTELCL, J. 2004. Přirozená radioaktivita horninového prostředí v jeskyních České republiky. Vydavatelství UP Olomouc.

ZIMÁK, J. – ŠTELCL, J. – ZELINKA, J. 2003a. Přirozená radioaktivita horninového prostředí v jeskyních Slovenské republiky. Vydavatelství UP Olomouc.

ZIMÁK, J. – ŠTELCL, J. – ZELINKA, J. 2003b. Natural radioactivity of rocks in the Hungarian part of the Domica – Baradla Cave System. MS. PřF UP Olomouc, PřF MU Brno a SSJ Liptovský Mikuláš.