

# PŘIROZENÁ RADIOAKTIVITA KRASOVÝCH HORNIN NA VÝCHODNÍM OKRAJI ČESKÉHO MASIVU

Jiří Zimák<sup>1</sup> – Jindřich Štelcl<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Katedra geologie PřF UP, tř. Svobody 26, 771 46 Olomouc, Česká republika; zimak@prfnw.upol.cz

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

## J. Zimák & J. Štelcl: Natural radioactivity of karst rocks in the eastern margin of the Bohemian Massif

**Abstract:** Concentrations of natural radioactive elements (K, U, Th) were determined by using a field gamma-ray spectrometer in Palaeozoic carbonate rocks (limestones, dolostones and marbles) in the eastern part of the Bohemian Massif. The 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 of carbonate rocks in the individual geological units. Relatively low natural radioactivity of the studied rocks (average values of  $a_m$  under 100 Bq.kg<sup>-1</sup>) is caused by low contents of K and Th; the uranium contents correspond approximately to the clark value. Slightly increased contents of uranium were found in limestones near the boundary of Macocha Fmt./Líšeň Fmt. and also in a phosphorite-rich horizon in limestones of the Líšeň Fmt. (e.g. in the Hranice Karst area). Uranium contents in limestones of the endokarst are in general markedly higher than in limestones in outcrops above the cave system. Positive uranium anomalies in limestones of the endokarst probably represent one of the consequences of the karstification processes.

**Key words:** limestones, marbles, gamma-spectrometry, natural radioactive elements

Přirozená radioaktivita je jednou ze základních fyzikálních vlastností hornin, včetně hornin krasových. Je způsobována radioaktivní přeměnou draslíku, uranu a thoria. Obsahy těchto tří prvků v horninách lze stanovit např. terénním gamaspektrometrickým měřením.

Pomocí gamaspektrometru GS-256 bylo autory tohoto článku realizováno 2756 měření na povrchových výchozech paleozoických karbonátových hornin (vápence, dolomity, kalciturbidity a metamorfni ekvivalenty) ve východní části Českého masivu. Standardním způsobem byl pak proveden přepočít gamaspektrometricky zjištěných obsahů K, U (resp. eU) a Th (resp. eTh) na hmotnostní aktivitu ekvivalentu <sup>226</sup>Ra (dále jen hmotnostní aktivita nebo  $a_m$ ), jíž lze vyjádřit přirozenou radioaktivitu horniny ve sledovaném bodě. Podrobnější popis metodiky uvádí Zimák a Štelcl (2004).

Výsledky gamaspektrometrických měření jsou sumarizovány v tab. 1. V prostoru Moravského krasu a také grygovského devonu a devonu hranického bylo respektováno členění na macošské souvrství (MS) a souvrství líšeňské (LS) – ve smyslu Zukalové a Chlupáče (1982). V konicko-mladečském pruhu (KMP) jsou rozlišeny jesenecké vápence a vápence macošského souvrství (MS). V řádku „devon ŠHB pruhu“ (tj. šternbersko-hornobenešovského pruhu) jsou shrnuty výsledky měření na karbonátových horninách až vápnitých břidlicích u Leskovce nad Moravicí a Šternberka (Chabičov, Aleš). Poslední tři řádky tab. 1 se týkají hranického devonu (HD) a z hlediska přirozené radioaktivity charakterizují: a) tzv. hněvotínské vápence na jejich neostratotypové lokalitě (stěna Hranické propasti – viz Zukalová a Chlupáč, 1982; Bábek a Novotný, 1999) a v bezprostředním okolí, b) vápence líšeňského souvrství na jedné z lokalit u Teplíc nad Bečvou (výchoz cca 400 m severně od železničního nádraží), kde byla gamaspektrometrická měření provedena na horizontu s fosfority a také na vápencích bez fosforitů (resp. s jejich malým zastoupením) v bezprostředním nadloží i podloží fosforitového horizontu.

Výsledky provedených gamaspektrometrických měření umožňují formulovat tyto závěry:

1. Přirozená radioaktivita paleozoických karbonátových hornin východního okraje Českého masivu je nízká. To souvisí hlavně s relativně nízkými, výrazně „podklarkovými“ obsahy K a Th. Průměrné obsahy U v karbonátových horninách jednotlivých jednotek jsou zpravidla „podklarkové“, v případě hranického devonu zhruba odpovídají klarku.

2. Vždy existuje pozitivní korelace mezi K a Th. Hodnota korelačního koeficientu je obvykle 0,7 až 0,9; v některých případech je však výrazně nižší (karbonátové horniny sovineckého devonu, MS grygovského devonu) – viz obr. 1 a 2, tab. 2. Obsahy obou prvků se zvyšují s rostoucím podílem silikátové složky v hornině, maximální jsou v kalciturbiditách (reprezentovaných vápenci hádsko-říčskými líšeňského souvrství), resp. jejich metamorfních ekvivalentech, i když v případě některých mramorů silezika není vysoký obsah K a Th dán povahou protolitu, ale spíše souvisí s částečným odnosem karbonátové složky v průběhu metamorfních procesů.

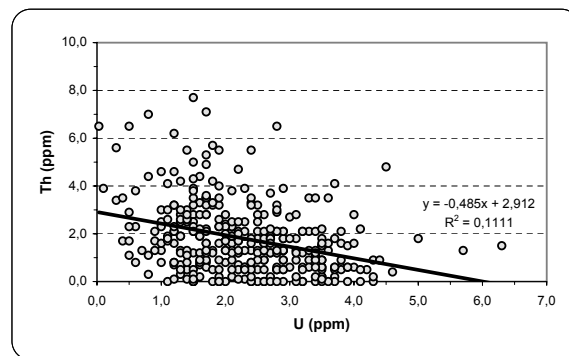
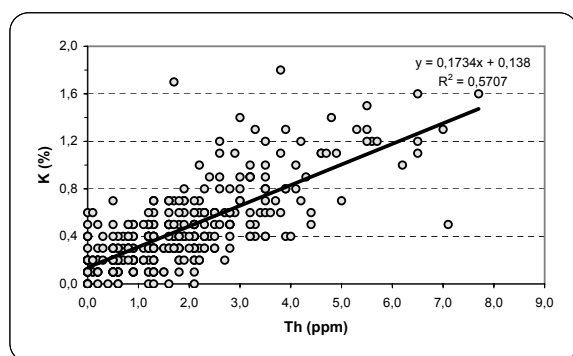
3. Zpravidla neexistuje výrazná korelace mezi U na straně jedné a K nebo Th na straně druhé – viz obr. 1 až 2, tab. 2. Výjimku představují karbonátové horniny (vápnité břidlice) z Leskovce nad Moravicí (s max. 4,3 hm. % K a 18,5 ppm Th) s výraznou pozitivní korelací mezi U a Th (korelační koeficient = 0,86).

4. Karbonátové horniny MS a LS mají v rámci jedné a téže lokality velmi podobné obsahy uranu (viz údaje z Moravského krasu, grygovského devonu a devonu hranického v tab. 1). Vzhledem ke značné mobilitě uranu

Tab. 1. Obsahy přirozených radioaktivních prvků (K, U, Th) v karbonátových horninách a vypočtené hodnoty hmotnostní aktivity ( $a_m$ ). Vysvětlivky: KMP – konicko-mladečský pruh, MS – macošské souvrství, LS – líšeňské souvrství, ŠHB pruh – šternbersko-hornobenešovský pruh, HD – hranický devon

Tab. 1. Contents of natural radioactive elements (K, U, Th) in carbonate rocks and calculated mass activity ( $a_m$ ). Explanations: KMP – Konice-Mladeč belt, MS – Macocha Fm., LS – Líšeň Fm., ŠHB pruh – Šternberk-Horní Benešov belt, HD – Hranice Devonian

	n	K (hm. %)		U (ppm)		Th (ppm)		$a_m$ (Bq.kg <sup>-1</sup> )	
		rozpětí	Ø	rozpětí	Ø	rozpětí	Ø	rozpětí	Ø
Moravský kras – MS	861	0 – 3,1	0,4	0 – 5,4	1,5	0 – 18,5	1,5	1 – 212	35
Moravský kras – LS	715	0 – 3,4	0,6	0 – 11,9	2,2	0 – 15,7	3,4	5 – 207	57
devon KMP – jesenecké váp.	28	0,1 – 1,1	0,5	0 – 2,4	0,8	0 – 8,0	2,3	13 – 74	36
devon KMP – MS	350	0 – 1,4	0,3	0,2 – 5,7	1,7	0 – 8,7	1,8	2 – 113	36
čelechovický devon	36	0,3 – 1,1	0,6	0,8 – 4,0	2,1	0,1 – 3,8	0,7	30 – 68	46
hněvotínský devon	41	0 – 0,5	0,2	0 – 2,3	0,9	0 – 1,8	0,7	7 – 44	20
přerovský devon	41	0 – 0,6	0,2	0 – 2,9	1,3	0 – 4,0	1,0	4 – 52	25
grygovský devon – MS	33	0 – 0,3	0,2	0 – 2,7	1,5	0 – 2,3	0,9	12 – 45	27
grygovský devon – LS	21	0,3 – 1,6	0,6	0,5 – 3,1	1,4	0,5 – 9,8	3,1	20 – 123	50
hranický devon – MS	100	0 – 1,3	0,2	0 – 8,0	2,3	0 – 6,1	1,1	1 – 129	41
hranický devon – LS	208	0,1 – 2,4	1,0	0 – 8,8	2,8	0 – 10,9	3,7	14 – 174	80
devon ŠHB pruhu	58	0,6 – 4,3	1,9	0,3 – 5,4	2,2	2,1 – 18,5	7,8	38 – 274	119
sovinecký devon	27	0,4 – 2,0	1,0	0 – 1,4	0,8	0 – 7,4	2,1	13 – 81	47
vitošovské vápence	16	0 – 0,8	0,3	0,5 – 4,0	1,7	0 – 3,5	1,4	10 – 66	37
skupina Branné	97	0 – 1,2	0,3	0,1 – 7,1	2,2	0 – 5,2	1,2	4 – 101	43
heřmanovické vápence	58	0,2 – 2,6	0,8	0 – 9,2	1,3	0 – 11,9	2,4	9 – 178	50
plášť žulovského plutonu	66	0 – 1,7	0,5	0 – 7,7	1,3	0 – 4,7	1,7	6 – 115	38
HD – hněvotínské vápence	21	0,3 – 0,9	0,5	0,2 – 3,4	1,7	0,8 – 5,2	2,2	25 – 73	45
HD – LS s fosfority	16	0,2 – 0,7	0,4	2,6 – 6,3	4,0	0,2 – 4,9	1,9	50 – 101	69
HD – LS bez fosforitů	14	0,2 – 0,7	0,4	1,6 – 4,6	2,6	0 – 3,5	1,8	30 – 79	51



Obr. 1. Korelace gamaspektrometricky stanovených prvků ve vápencích líšeňského souvrství v Lesním lomu (Moravský kras)

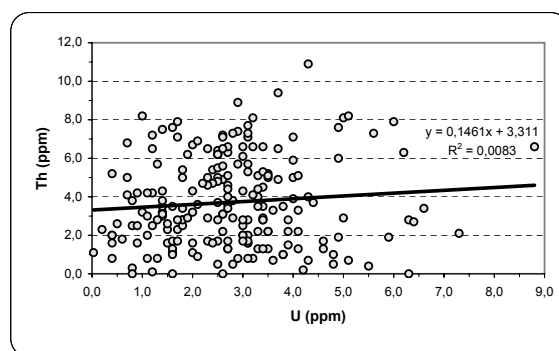
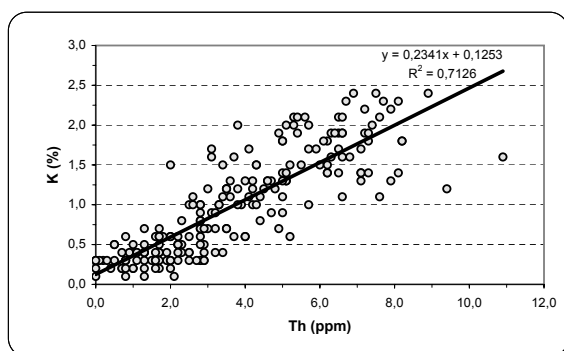
Fig. 1. Correlation of elements determined by gammaspectrometry in Líšeň Fm. limestones in the Lesní quarry (Moravian Karst)

nemusí být jeho stávající obsah v hornině odrazem jeho koncentrace ve výchozím sedimentu (k výrazným změnám v obsahu U může dojít již v průběhu diagenese a dále při epigenezi, včetně metamorfních a zvětrávacích procesů). Gamaspektrometrická měření na několika lokalitách prokázala existenci dvou zřetelných pozitivních uranových anomálií při rozhraní MS a LS (o těchto U-anomáliích se zmiňuje již Štelcl a Zimák, 2003; Bábek et al., 2003). První z U-anomálií se nachází v nejvyšší části MS, v cca 1 – 2 m mocném horizontu, ležícím bezprostředně pod rozhraním MS a LS. Druhá anomálie je při bázi LS, cca 1 m nad rozhraním MS a LS.

5. Při gamaspektrometrickém profilování v LS v prostoru hranického devonu se jako pozitivní uranová anomálie projevuje stratigraficky významný horizont s fosfority. Ve výchozu u Teplic nad Bečvou byly v horizontu s fosfority stanoveny 2,6 až 6,3 ppm U (průměr 4,0 ppm), okolní vápence bez fosforitů nebo s jen jejich malým zastoupením obsahují pouze 1,6 až 4,6 ppm U (průměr 2,6 ppm); v obsazích Th neexistuje výrazný

Tab. 2. Korelační koeficienty K vs. Th a U vs. Th pro karbonátové horniny vybraných jednotek  
 Tab. 2. Correlation coefficients K vs. Th and U vs. Th for carbonate rocks of selected units

		K vs. Th	U vs. Th
Moravský kras	macošské souvrství	0,92	0,34
	líšeňské souvrství	0,76	0,17
konicko-mladečský pruh	macošské souvrství	0,88	0,09
	jesenecké vápence	0,75	-0,17
grygovský devon	macošské souvrství	0,24	-0,43
	líšeňské souvrství	0,92	0,36
hranický devon	macošské souvrství	0,79	0,55
	líšeňské souvrství	0,84	0,09
šternbersko-hornobenešovský pruh	Leskovec nad Moravicí	0,92	0,86
	Chabičov a Šternberk-Aleš	0,85	0,05
sovinecký devon		0,43	0,30

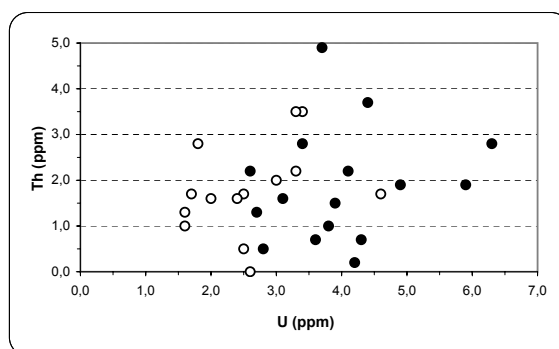


Obr. 2. Korelace gamaspektrometricky stanovených prvků ve vápencích líšeňského souvrství v hranickém devonu  
 Fig. 2. Correlation of elements determined by gammaspectrometry in Líšeň Fm. limestones of the Hranice Devonian

rozdíl mezi oběma horninovými prostředími – viz obr. 3. Zcela analogická (i když méně výrazná) pozitivní uranová anomálie byla zjištěna i v centrální části velkolomu Mokrá v jižní části Moravského krasu.

6. Hněvotínské vápence v prostoru hranického devonu mají často plástevnatou či laminovanou stavbu, jejíž deformační (střížný) původ prokázal již Šteffan a Melichar (1996). Výsledky gamaspektrometrických měření na stěně Hranické propasti a na výchozech vápenců v jejím okolí dokládají vztah mezi primární litologií a stávající stavbou. Hněvotínské vápence s relativně vysokým podílem nekarbonátové složky (0,3 až 0,9 hm. % K) jsou zde výrazně laminované. V případě hornin s malým obsahem nekarbonátové složky (max. 0,3 hm. % K) je laminace méně výrazná a v extrémních případech může být makroskopicky nezřetelná (na některých výchozech jde zcela jistě o hněvotínské vápence, na jiných však nelze vyloučit příslušnost k macošskému souvrství).

7. Zajímavé poznatky přineslo sledování obsahů přirozených radioaktivních prvků v karbonátových horninách endokrasu. V devonských vápencích vystupujících ve Zbrašovských aragonitových jeskyních byly terénní gamaspektrometrií stanoveny relativně vysoké obsahy uranu (až 104 ppm eU) v prostoru tzv. „plynových jezer“ (s vysokou koncentrací juvenilního CO<sub>2</sub> ve speleoatmosféře – viz Zimák a Štelcl, 2003). Nelze vyloučit, že neobvykle vysoké hodnoty eU ve vápencích na této lokalitě mohou souviset s migrací uranu po zlomových strukturách, podél nichž v současnosti do jeskyně vystupuje CO<sub>2</sub>. Zcela jistě však podél těchto puklin do jeskyně vystupuje také radon. Ten může ovlivnit výsledek gamaspektrometrického stanovení uranu směrem k vyšším hodnotám.



Obr. 3. Obsahy Th a U ve vápencích líšeňského souvrství u Teplic nad Bečvou (prázdné kroužky = vápence bez fosforitů nebo s jejich nepatrným zastoupením; plné kroužky = horizont s fosfority)

Fig. 3. Contents of Th and U in Líšeň Fm. limestones close by Teplice nad Bečvou (empty circles = limestones without phosphorites or with a slight phosphorite content, full circles = phosphorite-rich horizon)

tám, a to pokud dojde k fixaci jeho dceřiných produktů (včetně  $^{214}\text{Bi}$ ) v gamaspektrometricky proměřovaném „bodě“ (při terénní gamaspektrometrii jsou koncentrace uranu v horninovém prostředí stanovovány nepřímo na základě koncentrace dceřiného izotopu  $^{214}\text{Bi}$ ). Domníváme se, že s vysokými koncentracemi radonu ve speleoatmosféře a následnou fixací dceřiných produktů na stěnách jeskyní souvisí i gamaspektrometricky stanovené vysoké koncentrace uranu v devonských vápencích nejen ve Zbrašovských aragonitových jeskyních, ale také v určitých úsecích Holštejnské jeskyně (až 143 ppm eU), jeskyně Býčí skála a Sloupsko-šošůvských jeskyní (vše v Moravském krasu) a také v jeskyni Ve štolě v Mladečském krasu.

K výše uvedeným údajům o obsazích uranu v horninovém prostředí jeskyní je nutno poznamenat, že použitý gamaspektrometr byl kalibrován na poloprostor. To znamená, že jím zjištěné údaje o obsazích přirozených radioaktivních prvků v horninovém prostředí jeskyní jsou vyšší ve srovnání s realitou – pokud je gamaspektrometrické měření provedeno na stěně podzemní dutiny v prostředí z hlediska obsahů K, U a Th homogenním, pak jsou takto stanovené obsahy K, U a Th dvojnásobné ve srovnání s reálnými obsahy, které by bylo možno naměřit na velkém plochém (horizontálním) povrchovém výchozu, jehož geometrie odpovídá poloprostoru. Na některých lokalitách je však terénní gamaspektrometrií stanovený průměrný obsah uranu v karbonátových horninách endokrasu výrazně vyšší než v karbonátových horninách ve výchozech nad jeskynním systémem (3 až 5 x vyšší průměrné obsahy U ve vápencích endokrasu vykazují např. Javoříčské jeskyně, Mladečské jeskyně, Zbrašovské aragonitové jeskyně, jeskyně Balcarka a Kateřinská jeskyně). Uvedenou skutečnost nelze vysvětlit ani „geometrií“ jeskynních prostor (bylo by možno očekávat hodnoty jen 2x vyšší), ani přítomností jeskynních hlín či fluvialních jeskynních sedimentů v prostoru měřených bodů (vzhledem k jejich složení by se vliv těchto sedimentů projevil výrazným zvýšením gamaspektrometricky stanoveného obsahu Th). Na vyšší obsahy uranu ve vápencích endokrasu ve srovnání s vápenci exokrasu lze usuzovat i z hodnot Th/U – v případě všech pěti výše uvedených jeskyní je hodnota Th/U ve vápencích endokrasu výrazně nižší než ve vápencích vystupujících nad jeskyněmi (viz Zimák a Štelcl, 2004).

V případě zvýšených obsahů uranu v karbonátových horninách endokrasu je nápadné, že tyto byly zjištěny pouze v některých úsecích jeskynních systémů. Pokud jsou v prostoru jeskynních systémů vyraženy štoly, pak lze na základě porovnání gamaspektrometricky stanovených obsahů U ve vápencích na stěně krasových dutin a na stěně štol konstatovat, že obsahy U ve vápencích endokrasu jsou často výrazně vyšší ve srovnání s krasováním nedotčenými vápenci ve štolách. Nižší obsahy U ve štolách jsou např. ve Sloupsko-šošůvských jeskyních a Javoříčských jeskyních. Výjimkou je štola v Býčí skále s extrémně vysokými obsahy U ve vápencích její určité části, kde jsou výsledky gamaspektrometrických stanovení uranu pravděpodobně ovlivněny vysokou koncentrací radonu ve speleoatmosféře. Studium vilémovických vápenců z velkolomu Mokrý za použití CL-mikroskopu prokázalo, že v úsecích postižených karstifikací jsou vápence prostoupeny hustou sítí jemných „vlasových“ kalcitových žilek a někdy mladší kalcit se shodnými luminiscenčními vlastnostmi v těchto vápencích tvoří i nepravidelné útvary („nebuli“). Je velmi pravděpodobné, že roztoky, které se podílely při vzniku těchto žileček a „nebulí“, do endokrasu transportovaly uran z exokrasu. Pozitivní uranové anomálie ve vápencích endokrasu jsou tedy patrně jedním z výsledků karstifikačních procesů; způsob vazby uranu v hornině však dosud není jasný.

## LITERATURA

BÁBEK, O. – NOVOTNÝ, R. 1999. The Hněvotín limestone neostratotype locality revisited: a conodont biostratigraphy and carbonate microfacies approach, Moravia, Czech Republic. *Acta Univ. Palacki. Olomuc., Fac. Rer. Nat., Geologica* 36, 63–68. Olomouc.

BÁBEK, O. – ZIMÁK, J. – ŠTELCL, J. 2003. Carbonate facies, compositional variations and physical stratigraphy of Upper Devonian drowned-platform successions of the Moravo-Silesian basin, Czechia. In I. Vlahovic, Ed. *Abstract Book, 22nd IAS Meeting of Sedimentology, Opatija* 17. – 19. 9. 2003, s. 8.

ŠTEFFAN, M. – MELICHAR, R. 1996. Tzv. plástevnaté vápence a tektonika Hranického krasu. In *Tektonický vývoj orogenních pásem – termální, mechanické a sedimentární záznamy. ČGÚ Brno–Jeseník 1996*, s. 48.

ŠTELCL, J. – ZIMÁK, J. 2003. Radioactivity of Devonian limestones of the Moravian Karst (eastern part of the Bohemian Massif, Czech Republic). *Krystalinikum*, 29, 147–154.

ZIMÁK, J. – ŠTELCL, J. 2003. Natural radioactivity of rocks in the Zbrašov Aragonite Caves (Hranice Karst, Czech Republic). *Acta Univ. Palacki. Olomuc., Fac. Rer. Nat., Geologica* 38, 39–43.

ZIMÁK, J. – ŠTELCL, J. 2004. Přirozená radioaktivita horninového prostředí v jeskyních České republiky. *Univerzita Palackého v Olomouci*.

ZUKALOVÁ, V. – CHLUPAČ, I. 1982. Stratigrafická klasifikace nemetamorfovaného devonu moravsko-slezské oblasti. *Čas. min. geol.*, 27, 225–241. Praha.