ISSN 1211-8796

Acta Mus. Moraviae, Sci. geol.
XCVII (2012): 1, 89–104, 2012

ODRAZ MODÁLNÍHO SLOŽENÍ SILICIKLASTICKÝCH SEDIMENTŮ V GAMASPEKTROMETRICKÉM ZÁZNAMU: APLIKACE V PROVENIENČNÍM A STRATIGRAFICKÉM STUDIU

MODAL COMPOSITION OF SILICICLASTIC SEDIMENTS AND ITS IMPACT ON THEIR SPECTRAL GAMMA-RAY RECORD: APPLICATION IN PROVENANCE ANALYSIS AND STRATIGRAPHY

DANIEL ŠIMÍČEK[1], ONDŘEJ BÁBEK[1, 2] & JAROMÍR LEICHMANN[1]

Abstract

Šimíček, D., Bábek, O., Leichmann, J. (2012): Odraz modálního složení siliciklastických sedimentů v gamaspektrometrickém záznamu: aplikace v provenienčním a stratigrafickém studiu. – Acta Mus. Moraviae, Sci. geol., 97, 1, 89–104 (with English summary).

Modal composition of siliciclastic sediments and its impact on their spectral gamma-ray record: application in provenance and stratigraphic study

The spectral gamma-ray (GRS) logs are usually used as indicators of facies trends both in subsurface and outcrop. However, our outcrop and laboratory GRS data from Lower Carboniferous (upper Viséan) siliciclastic sediments of the Moravice Formation (MF) and Hradec-Kyjovice Formation (HKF), the Nízký Jeseník part of the Culm Basin, revealed very weak dependence on facies. Therefore, alternative sources of their GRS variation should be searched for. Sandstones of the MF have only slightly lower radioactivity than mudstones while at some stratigraphic levels their radioactivity is even higher. No statistical correlation was observed between field and laboratory GRS data but, considering their different methodologic approach and the numerous external factors affecting the field measurement, it is no surprise. However, both field and laboratory GRS failed to show a significant dependence on facies. A possible explanation can be given by the stratigraphic variation in the concentrations of K-, U- and Th-bearing minerals. Sandstone modal composition, cathodoluminescence microscopy and microprobe analyses identified potassium feldspars, muscovite (sericite), biotite and albite as the main carriers of K. The main carriers of U and Th include xenotime, monazite, zircon and apatite. Three stratigraphic segments in can be distinguished in the MF and HKF based on the variations in sandstone modal composition, mineral chemistry and the gamma-ray spectra. The lower segment (Bohdanovice and Cvilín Members of the MF) is characterized by increased concentrations of U and Th/U ratios and low contrast between the radioactivity of sandstones and mudstones. Sandstones of this segment reflect source from predominantly low-grade metamorphic, sedimentary and volcanic rocks. The middle segment (Brumovice and Vikštejn Members, MF) is characterized by relatively high concentrations of U and partly Th and, generally, higher radioactivity of sandstones in comparison with mudstones. Sandstones of middle segment reveal provenance change towards predominantly magmatic sources with ultrapotassic plutonic rocks (svrchní goniatitová zóna Goα a zóna Goβ). In the upper segment the contents of U, Th and K generally decrease and the gamma-ray spectra reveal relatively stronger dependence on facies. The modal composition of sandstones indicates a provenance shift towards high-grade metamorphic rocks in the Uppermost Visean. The GRS and the detrital provenance data sensitively reflect an extremely rapid exhumation of the deeper crustal parts of the Moldanubian nappe pile of the Bohemian Massif.

Key words: gamma-ray spectrometry; sandstone petrography; foreland basin; stratigraphy

[1] Ústav geologických věd Přírodovědecké fakulty Masarykovy univerzity, Kotlářská 2, 611 37 Brno, 106915@mail.muni.cz (D. Šimíček)

[2] Katedra geologie Univerzity Palackého, Tř. Svobody 26, 771 46 Olomouc

1. Úvod

Gamaspektrometrie ve vrtech i měření na výchozech jsou užitečnými metodami, které jsou primárně používány pro studium sedimentárních výplní pánví (korelace vrtů, sekvenčně-stratigrafické analýzy, distribuce sedimentárních facií, atd.) (DOVETON 1994, RIDER 1999, EHRENBERG a SVANA 2001). Spektrální gamaspektrometrie (GRS) umožňuje stanovení koncentrací přirozených radioaktivních prvků v hornině a v případě siliciklastických sedimentů poskytuje zprostředkovaně důležité informace, jakými jsou např. obsahy a složení jílových minerálů (JAIN *et al.* 1998, SCHNYDER *et al.* 2006) nebo detritické složení pískovců (RIDER 1999). Koncentrace K, U a Th v siliciklastických horninách jsou řízeny mnoha faktory včetně modálního složení hlavních a akcesorických detritických minerálů (draselné živce, slídy, zirkon, apatit, monazit, thorit, atd.) a zrnitosti (obsah a složení jílových minerálů, někdy označováno jako „shaliness") (DOVETON 1994, LÜNING *et al.* 2004). Vhodným výběrem vzorků je možno eliminovat vliv chemického zvětrávání a postdepozičních změn. Přirozenou radioaktivitu klastických sedimentů, odrážející jejich minerální a chemické složení, lze tedy interpretovat jako kombinaci: 1) minerálního složení hornin ve zdrojové oblasti (detritická provenience) a 2) hydraulického vytřídění během transportu a depozice (facie). V této práci se zabýváme především srovnáním modálního a chemického složení pískovců a břidlic s povrchovými terénními a laboratorními gamaspektrometrickými daty ze spodnokarbonských kulmských sedimentů Nízkého Jeseníku s cílem odlišit od sebe faciální a provenienční signál.

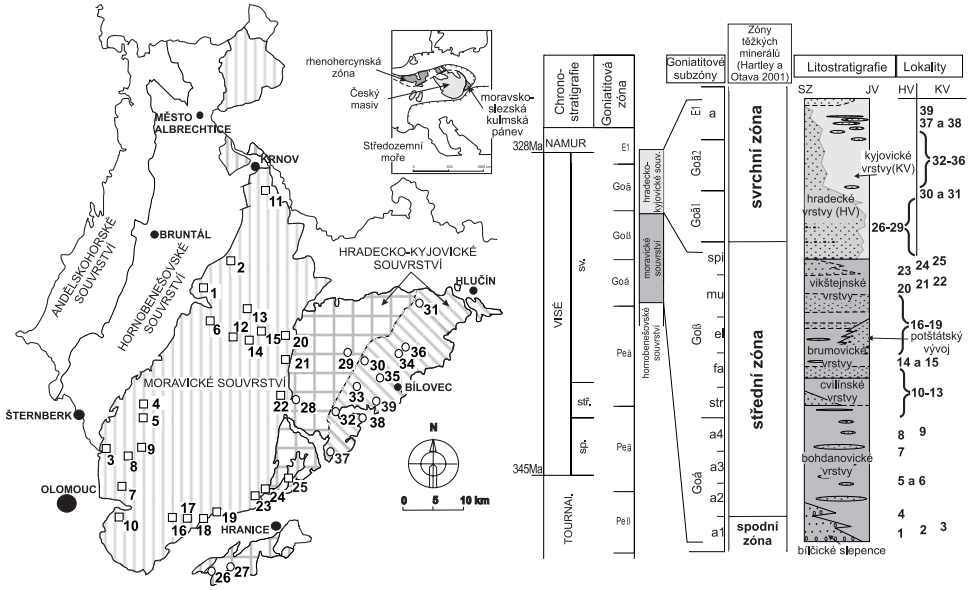
2. Geologie studované oblasti

Nízkojesenická část kulmské pánve je příkladem turbiditní flyšové sedimentace ukládané v předpolí orogenního pásma. Tento typ depozičního systému bývá často koncovým úložištěm materiálu erodovaného z přilehlých kontinentálních oblastí, a proto dobře odráží minerální a chemické složení zdrojových hornin. Krátký transport a vysoký topografický gradient navíc snižuje vlivy chemického zvětrávání a sedimentární recyklace (cf. FERGUSSON a TYE 1999). Tato práce je zaměřena na nejlépe odkryté a zároveň nejméně tektonicky postižené členy nízkojesenické kulmské sedimentace: moravické a hradecko-kyjovické souvrství.

Nízkojesenická část (Obr. 1) spolu s jižněji situovanou drahanskou částí kulmské pánve představují relikty nejvýchodnějšího výběžku rhenohercynského systému kolizních pánví (HARTLEY a OTAVA 2001) ohraničené na západě variskými příkrovovými šupinami (SCHULMANN *et al.* 1991) a na východě kenozoickými sedimenty karpatské předhlubně. Litostratigraficky se kulm Nízkého Jeseníku dělí na andělskohorské, hornobenešovské, moravické (MS) a hradecko-kyjovické (HKS) souvrství (KUMPERA 1983). MS a HKS představují synorogenní hlubokovodní siliciklastickou sedimentární výplň (MAZUR *et al.* 2006) spodnokarbonské periferní předpolní pánve variského orogénu (HARTLEY a OTAVA 2001, BÁBEK *et al.* 2004). Biostratigrafie MS a HKS je založena na amonitové fauně s rozsahem od svrchnovisécké zóny *Goniatites* Goα po zónu *Eumorphoceras* E1 (KUMPERA 1983). HARTLEY a OTAVA (2001) vyčlenili v kulmské pánvi 3 zóny těžkých minerálů: 1) spodní zóna těžkých minerálů (zóna Peγ až Goα) s výskytem epidotu, turmalínu, granátu, titanitu a zirkonu; 2) střední zóna těžkých minerálů (báze zóny Goα až Goβ, zhruba MS); a 3) svrchní zóna těžkých minerálů (báze zóny Goγ až E1, nejsvrchnější část MS a celé HKS) s typicky narůstajícími obsahy granátů, především pyrop-almandinového složení.

Moravické souvrství (hranice goniatitových subzón Goα2/Goα3 až subzóna Goβmu) dosahuje maximální mocnosti 1 500 m (CHLUPÁČ *et al.* 2002). Litostratigraficky jej lze rozdělit na bohdanovické, cvilínské, brumovické a vikštejnské vrstvy (KUMPERA 1983). Nadložní hradecko-kyjovické souvrství (hranice subzón Goβspi/Goγ1 až zóna E1), dělené na hradecké a kyjovické vrstvy (KUMPERA 1983), dosahuje maximální mocnosti až 800 m

(DVOŘÁK 1994). V namuru turbiditní sedimentace postupně přechází do paralických sedimentů ostravského souvrství. MS a nejspíše také HKS představují polyfázovou, asymetricky cyklickou výplň hlubokovodní předpolní pánve (BÁBEK *et al.* 2004), která je odrazem tektonických změn v orogenním pásmu. Tektonika ovlivňovala především vzájemný poměr materiálu transportovaného do pánve: (1) ze série menších bodových zdrojů umístěných v týlu pánve na Z (v dnešní orientaci) a (2) osním přínosem detritu ze vzdáleného bodového zdroje na J (HARTLEY a OTAVA 2001). Tento kombinovaný přínos materiálu se projevuje zastupováním písčitých turbiditních systémů odpovídajících traktu nízké hladiny (korytovité až rozlivové sedimenty) s obecně jemnozrnnými distálními turbiditními systémy (BÁBEK *et al.* 2004).



Obr. 1. Schématická geologická mapa nízkojesenické části kulmské pánve (podle DVOŘÁKA 1994) s vyznačenými pozicemi studovaných lokalit a stratigrafickou tabulkou upravenou podle BÁBKA *et al.* (2004). Seznam lokalit; moravické souvrství: 1. Slezská Harta, 2. Svobodné Heřmanice, 3. Bělkovický lom, 4. Domašov nad Bystřicí, 5. Malý Rabštejn, 6. Dvorce, 7. Hlubočky-Kovákov, 8. Hrubá Voda-železniční most, 9. Hrubá Voda-Hotel Akademie, 10. Čechovice, 11. Úvalno, 12. Budišov nad Budišovkou, 13. Kružberk, 14. Svatoňovice, 15. Nové Těchanovice, 16. Výkleky, 17. Skoky, 18. Bohuslávky, 19. Lipník nad Bečvou-Loučka, 20. Vítkov-Podhradí, 21. Vítkov, 22. Klokočůvek, 23. lom Hrabůvka, 24. lom Olšovec, 25. lom Nejdek; hradecko-kyjovické souvrství: 26. lom Podhůra, 27. Paršovice, 28. Jakubčovice nad Odrou, 29. Skřípov 2, 30. Skřípov 1, 31. Josefovice, 32. Fulnek-Jerlochovice, 33. Fulnek-Lukavec, 34. lom Stara Ves u Bílovce, 35. Těškovice, 36. Kyjovice, 37. Fulnek-Stachovice, 38. Mankovice, 39. Fulnek-Jílovec.

Fig. 1. Geological sketch-map of the Nízký Jeseník area of the Moravo-Silesian Culm Basin (after DVOŘÁK 1994) with the position of the studied localities and a stratigraphic chart modified after BABEK *et al.* (2004). List of localities; Moravice Formation: 1. Slezská Harta, 2. Svobodné Heřmanice, 3. Bělkovice Quarry, 4. Domašov nad Bystřicí, 5. Malý Rabštejn, 6. Dvorce, 7. Hlubočky-Kovákov, 8. Hrubá Voda-Railway Bridge, 9. Hrubá Voda-Hotel Akademie, 10. Čechovice, 11. Úvalno, 12. Budišov nad Budišovkou, 13. Kružberk, 14. Svatoňovice, 15. Nové Těchanovice, 16. Výkleky, 17. Skoky, 18. Bohuslávky, 19. Lipník nad Bečvou-Loučka, 20. Vítkov-Podhradí, 21. Vítkov, 22. Klokočůvek, 23. Hrabůvka Quarry, 24. Olšovec Quarry, 25. Nejdek Quarry; Hradec-Kyjovice Formation: 26. Podhůra Quarry, 27. Paršovice, 28. Jakubčovice nad Odrou, 29. Skřípov 2, 30. Skřípov 1, 31. Josefovice, 32. Fulnek-Jerlochovice, 33. Fulnek-Lukavec, 34. Stara Ves u Bílovce Quarry, 35. Těškovice, 36. Kyjovice, 37. Fulnek-Stachovice, 38. Mankovice, 39. Fulnek-Jílovec.

3. Metodika

Přirozená radioaktivita hornin byla v terénu stanovena gamaspektrometrem RS-230 Super Spec s BGO 2×2" scintilačním krystalem. Byly vytipovány čtyři skalní defilé o délce 25–55 m, na kterých bylo provedeno měření s pravidelnými intervaly 0,5 m. Dále byla zkoumána radioaktivita hornin na 35 menších výchozech, kde byly měřící body rozmístěny v náhodných intervalech v závislosti na přítomných faciích (celkem 187 terénních měření). Pozemní měření bylo vždy prováděno přímo na povrchu horniny, pokud možno kolmo na plochou skalní stěnu a paralelně s vrstevnatostí. Délka měření každého bodu byla 120 s, což je pro středně radioaktivní křemen-živcové psamity dostatečné (cf. SVENDSEN a HARTLEY 2001). Terénní gamaspektrometrické měření bylo doplněno popisem facií dle faciální klasifikace BÁBKA *et al.* (2004) a záznamem výchozů standardními terénními metodami (TUCKER 2003). Laboratorním gamaspektrometrem RT-50 se scintilačním krystalem NaI(Tl) bylo vždy po dobu 30 minut měřeno celkem 108 vzorků, každý o objemu 200 až 250 ml. Všechny vzorky byly odebrány na lokalitách, kde bylo prováděno také výše zmíněné terénní měření a každý z odebraných vzorků má svůj ekvivalent v terénním měření. Hodnoty standardního gama záření (SGR) byly vypočítány podle Schlumbergerova (NGT-A) vzorce: SGR [API]= U[ppm]·8.09 + Th[ppm]·3.93 + K[%]·16.32 (RIDER, 1999).

Modální složení pískovců bylo studováno bodovou sčítací metodou s využitím standardní Gazzi-Dickinsonovy metodiky (DICKINSON 1970), která minimalizuje vliv velikosti zrna na změny ve složení (DICKINSON 1985). V každém z 66 výbrusových preparátů z 29 lokalit bylo identifikováno 300 zrn. Pro detritická zrna písčité frakce (0,064–2 mm) byly použity kompoziční skupiny DICKINSONA (1985) a INGERSOLLA *et al.* (1984): monominerální (Qm) a polykrystalický křemen (Qp), draselné živce (Kf), plagioklasy (Pf) a litické klasty sedimentárních (Ls), vulkanických (Lv) a magmatických (Lm) hornin. Základní hmota ani tmel nebyly počítány. Pro následnou klasifikaci byly použity ternární diagramy DICKINSONA (1985). Optická mikroanalýza byla doplněna katodo-luminiscenční (CL) mikroskopii s použitím CL systému s horkou katodou Simon Neuser HC2.

Chemické složení hlavních, vedlejších a akcesorických minerálů, tmelu a základní hmoty za účelem identifikace možných zdrojů K, Th a U bylo analyzováno elektronovým mikroskopem CAMECA SX 100 s WDX a EDX detektory. Budící napětí bylo 15 kV, proud 10–20 nA a průměr svazku byl 2 až 4 μm. Složení jílových minerálů v břidlicích bylo studováno pomocí rentgenové práškové difrakce. Orientované preparáty byly analyzovány rentgenovým difraktometrem typu STOE Stadi P v transmisním režimu a s Ge (111) monochromátorem a lineárním PSD detektorem.

4. Výsledky

4.1. Terénní a laboratorní gamaspektrometrie a stratigrafická distribuce spekter gama záření

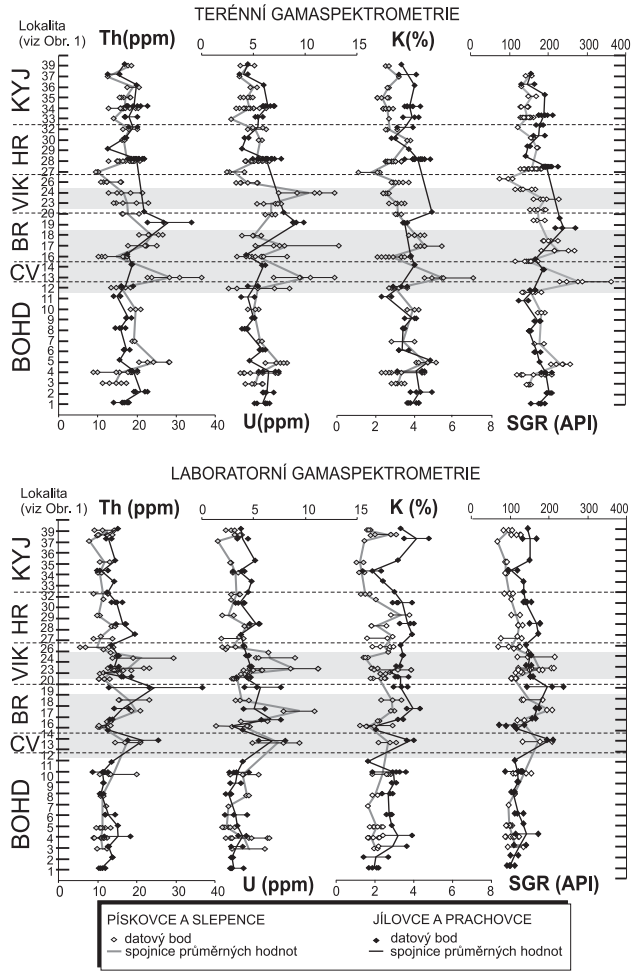
Terénní GR spektra z celého datového souboru vykazují střední až relativně vysokou radioaktivitu (Tab. 1) s průměrnými obsahy K (3,45 %), U (5,78 ppm) a Th (18,07 ppm). Průměrné koncentrace K, U a Th v pískovcích a slepencích jsou obecně jen mírně nižší a variabilnější než je tomu u prachovců a jílovců (Tab. 1). Na některých stratigrafických úrovních (brumovické a vikštejnské vrstvy) byl však pozorován i opačný trend (Tab. 1, Obr. 5). Laboratorní GRS dosahuje zhruba 75 % terénních hodnot a potvrzuje obecně mírně vyšší průměrné obsahy K, U a Th ve vzorcích jílovců a prachovců v porovnání s pískovci a slepenci (Tab. 1). Mezi terénními a odpovídajícími laboratorními daty nebyla zjištěna žádná korelace (lineární regresní koeficient, [R^2] - $K_{lab.}/K_{ter.}$: 0,03; $U_{lab.}/U_{ter.}$: 0,09; $Th_{lab.}/Th_{ter.}$: 0,38). Tento fakt není ovšem nijak překvapivý vzhledem k množství faktorů ovlivňujících měření v terénu (okolní radioaktivita, nehomogenní rozmístění zdrojů radioaktivity ve skalním výchozu, překryv radioaktivních signálů u rychle se měnícího sledu růz-

ných facií, doba měření atd, (SVENDSEN a HARTLEY 2001, IAEA 2003). I přes tuto slabou vzájemnou korelaci ukazují oba soubory dat na určité stratigraficky vázané změny ve spektrálních záznamech gama záření (Obr. 2, 5). Bohdanovické a cvilínské vrstvy v MS a sedimenty HKS jsou charakteristické obecně nízkými koncentracemi K, U a Th (Tab. 1). HKS ve srovnání s podložním MS vykazuje nižší variabilitu GR spekter, která jen slabě korespondují s faciální architekturou. Vyšší obsahy radioaktivních prvků, především U, byly zjištěny v sedimentech brumovických a vikštejnských vrstev (Tab. 1).

Tabulka 1. Přepočtené hodnoty laboratorní a terénní gamaspektrometrie podle jednotlivých litostratigrafických členů moravického a hradecko-kyjovického souvrství. SST+CG – pískovce + slepence, SLTS+MDS – prachovce + jílovce.

Table 1. Recalculated field and laboratory GRS values according to individual lithostratigraphic members of the Moravice Formation and the Hradec-Kyjovice Formation. SST+CG – sandstones + conglomerates, SLTS+MDS – siltstones + mudstones.

			celkový datový soubor		litostratigrafické členění (vrstvy) bohdanovické		cvilínské		brumovické		vikštejnské		hradecké		kyjovické	
			SST+CG	SLTS+MDS	SST+CG	SLTS+MDS	SST+CG	SLTS+MDS	SST+CG	SLTS+MDS	SST+CG	SLTS+MDS	SST+CG	SLTS+MDS	SST+CG	SLTS+MDS
terénní měření	SGR (API)	medián	**168,9**	**182,9**	**177,4**	**178,4**	**155,6**	**151,2**	**205,4**	**179,9**	**180,5**	**238,4**	**146,1**	**187,5**	**145,1**	**179,2**
		min.	75,1	123,7	118,2	149,7	132,2	123,7	114,8	165,6	151,8	218,3	75,1	145,3	122,1	155,9
		max.	255,5	269,6	255,5	209,9	182,6	165,7	361,2	188,5	226,8	269,6	182,1	208,2	167,5	210,7
		st.odch.	*41,29*	*23,11*	*36,41*	*17,82*	*19,01*	*15,38*	*56,92*	*10,21*	*19,00*	*19,09*	*26,28*	*18,59*	*11,65*	*13,73*
	K (%)	medián	**3,22**	**3,82**	**3,63**	**3,89**	**3,04**	**2,98**	**4,05**	**3,93**	**2,89**	**3,85**	**2,91**	**3,97**	**2,57**	**3,66**
		min.	1,10	2,30	2,30	3,10	2,70	2,30	2,10	3,80	2,40	3,40	1,10	2,80	2,10	3,00
		max.	7,00	4,90	5,10	4,90	3,60	3,60	7,00	4,00	3,50	4,90	3,70	4,80	3,20	4,30
		st.odch.	*0,89*	*0,52*	*0,78*	*0,91*	*0,33*	*0,44*	*1,14*	*0,09*	*0,35*	*0,61*	*0,57*	*0,51*	*0,23*	*1,76*
	U (ppm)	medián	**5,76**	**5,81**	**5,79**	**5,61**	**5,38**	**4,82**	**6,90**	**5,40**	**8,08**	**8,90**	**4,75**	**5,85**	**4,49**	**5,77**
		min.	2,40	3,40	3,70	3,90	2,60	3,80	4,30	3,40	5,30	7,90	2,40	4,10	2,80	4,40
		max.	12,80	13,20	8,20	7,40	8,50	5,40	6,10	13,20	12,80	9,80	6,50	7,70	6,20	7,00
		st.odch.	*2,06*	*1,20*	*1,30*	*0,49*	*2,19*	*0,63*	*2,59*	*0,79*	*2,21*	*0,68*	*1,03*	*0,84*	*0,83*	*0,74*
	Th (ppm)	medián	**17,74**	**16,61**	**18,16**	**17,69**	**15,90**	**16,18**	**21,22**	**18,33**	**17,28**	**26,35**	**15,31**	**19,20**	**17,01**	**18,51**
		min.	8,80	14,10	8,80	14,10	13,40	14,10	10,20	17,50	12,70	21,90	9,60	15,70	12,50	15,50
		max.	36,50	33,90	28,30	22,60	18,40	19,00	36,50	18,80	22,90	33,90	20,70	21,90	20,50	22,80
		st.odch.	*4,55*	*3,07*	*4,78*	*2,00*	*1,77*	*1,58*	*6,19*	*0,59*	*2,96*	*4,75*	*3,27*	*1,62*	*2,05*	*1,76*
laboratorní měření	SGR (API)	medián	**112,0**	**134,3**	**108,4**	**116,8**	**114,0**	**118,4**	**162,0**	**168,6**	**134,4**	**153,7**	**111,3**	**153,5**	**91,3**	**124,7**
		min.	76,4	71,9	86,3	92,1	85,3	86,7	118,5	115,4	88,9	71,9	76,4	134,5	85,4	95,4
		max.	215,2	236,2	153,8	171,1	129,7	132,4	208,9	210,0	215,2	236,2	132,3	176,5	107,1	167,2
		st.odch.	*33,43*	*30,62*	*17,00*	*17,84*	*9,32*	*15,66*	*33,52*	*27,71*	*37,96*	*34,47*	*19,37*	*15,78*	*10,23*	*20,84*
	K (%)	medián	**2,17**	**3,03**	**2,04**	**2,58**	**1,85**	**2,73**	**2,68**	**3,47**	**2,00**	**3,12**	**2,51**	**3,50**	**1,49**	**2,75**
		min.	1,05	1,23	1,62	1,42	1,41	1,65	2,18	2,06	1,40	1,23	1,58	2,91	1,05	1,36
		max.	3,77	4,79	2,82	3,92	2,18	3,58	3,37	4,30	2,69	3,88	3,77	3,99	1,76	4,79
		st.odch.	*0,52*	*0,74*	*0,35*	*0,61*	*0,18*	*0,72*	*0,41*	*0,67*	*0,39*	*0,65*	*0,58*	*0,38*	*0,22*	*0,82*
	U (ppm)	medián	**4,37**	**4,08**	**3,65**	**3,17**	**3,90**	**3,49**	**6,26**	**5,85**	**5,48**	**4,63**	**3,23**	**4,28**	**2,97**	**3,85**
		min.	1,52	1,40	2,00	2,27	2,57	2,65	3,24	3,94	2,90	1,40	1,87	3,30	1,52	2,85
		max.	11,20	8,10	6,50	4,37	4,82	4,50	10,90	8,10	11,20	7,62	4,52	5,54	3,66	5,17
		st.odch.	*2,28*	*1,27*	*1,41*	*0,62*	*0,35*	*0,59*	*2,51*	*1,48*	*2,64*	*1,22*	*0,96*	*0,76*	*0,60*	*0,67*
	Th (ppm)	medián	**13,07**	**14,39**	**11,58**	**12,46**	**13,40**	**11,63**	**17,20**	**16,46**	**14,63**	**16,62**	**11,25**	**15,72**	**10,92**	**12,40**
		min.	5,54	8,85	9,10	10,58	9,68	8,85	12,50	12,70	10,00	10,30	5,54	13,50	7,86	9,78
		max.	29,50	36,75	20,03	18,40	14,28	13,67	23,28	25,50	29,50	36,75	14,41	19,53	14,17	15,28
		st.odch.	*4,16*	*4,16*	*2,15*	*1,90*	*1,49*	*1,47*	*3,42*	*4,16*	*5,24*	*5,81*	*2,72*	*1,87*	*1,80*	*1,69*



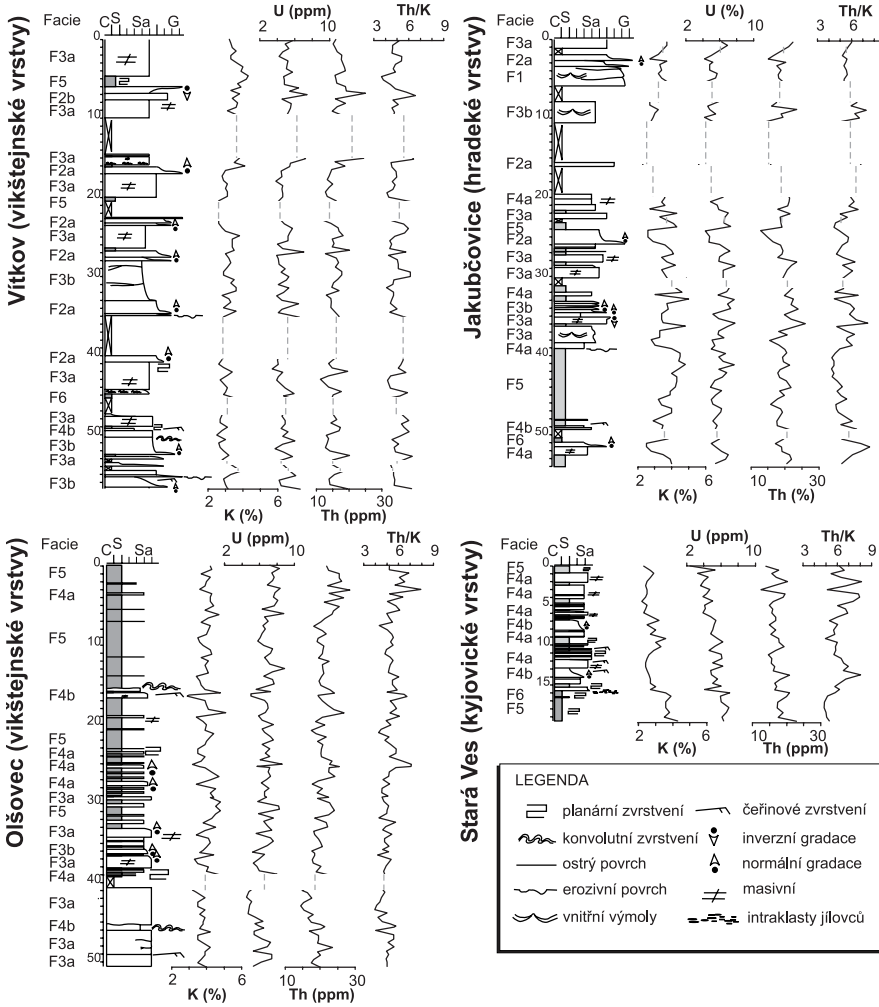
Obr. 2. Stratigrafické změny gamaspektrometrického signálu v pískovcích a jílovcích ze studovaných lokalit moravického a hradecko-kyjovického souvrství. BOHD – bohdanovické vrstvy, CV – cvilínské vrstvy, BR –brumovické vrstvy, VIK – vikštejnské vrstvy, HR – hradecké vrstvy, KYJ – kyjovické vrstvy.

Fig. 2. Stratigraphic variations of spectral gamma-ray record in sandstones and mudstones from studied outcrops of the Moravice Formation and the Hradec-Kyjovice Formation. BOHD – Bohdanovice Member, CV – Cvilín Member, BR – Brumovice Member, VIK – Vikštejn Member, HR – Hradec Member, KYJ – Kyjovice Member.

4.2. Faciální závislost spekter gama záření

Bábek *et al.* (2004) popsal šest faciálních tříd a deset podtříd, zahrnujících jílovce, pískovce a konglomeráty interpretované jako hemipelagické sedimenty, nízkohustotní turbidity, vysokohustotní turbidity a písčité zrnotoky. Dobrá odezva gamaspektrometrie na faciální změny (zejména zrnitost) popisovaná např. Dovetonem (1994) nebo Lüningem *et al.* (2004) se v případě moravického a hradecko-kyjovického souvrství ukazuje být poměrně komplikovaná. Korelace mezi laboratorními GRS hodnotami a zrnitostí pískovců nebyla, s výjimkou vzorků z vikštejnských vrstev, pozorována (U (lab):střední velikost zrna, $R^2 = 0{,}32$; Th(lab):střední velikost zrna, $R^2 = 0{,}30$). Faciální architektuře relativně lépe odpovídají GRS záznamy z lomů v Jakubčovicích a Staré Vsi (HKS, Obr. 3), kde vrstvy pís-

kovců vykazují zřetelně nižší terenní hodnoty K (2,6 až 3,1 %) než heterolitické jílovce a laminované prachovce (K: 4,2 až 4,8 %). Odezva Th a U na facie je méně výrazná než v případě K. Na lokalitě Olšovec (MS, Obr. 3) jsou naopak U a Th lepším faciálním indikátorem (14 až 15 ppm Th v pískovcích a 21 až 28 ppm Th v jílovcích a prachovcích), zatímco obsahy K v pískovcích i heterolitech jsou přibližně vyrovnané (3,5 až ~4,3 %). Lineárně regresní koeficienty neindikují žádnou nebo jen slabou vzájemnou korelaci mezi K, U a Th a to jak v případě lokality Jakubčovice (K:Th, R^2 = 0,31; Th:U, R^2 = 0,33; K:U, R^2 = 0,42), tak v Olšovci (K:Th, R^2 = 0,2; Th:U, R^2 = 0,32; K:U, R^2 = 0,21). Tento komplikovaný, a obecně slabý, faciální odraz ve spektrech gama záření by mohl být způsoben silnějším vlivem modálního složení zkoumaných sedimentů.



Obr. 3. Faciální závislost spektrální signálu gama záření studovaná na vybraných skalních defilé v kulmu Nízkého Jeseníku: 1 – Vítkov-Podhradí, 2 – Olšovec, 3 – Jakubčovice nad Odrou, 4 – Stará Ves u Bílovce; C – jílovec, S – prachovec, Sa – pískovec, G – slepenec.

Fig. 3. Faciální závislost spektrální signálu gama záření studovaná na vybraných skalních defilé v kulmu Nízkého Jeseníku: 1 – Vítkov-Podhradí, 2 – Olšovec, 3 – Jakubčovice nad Odrou, 4 – Stará Ves u Bílovce; C – jílovec, S – prachovec, Sa – pískovec, G – slepenec.

4.3. Modální složení pískovců a stratigrafická distribuce

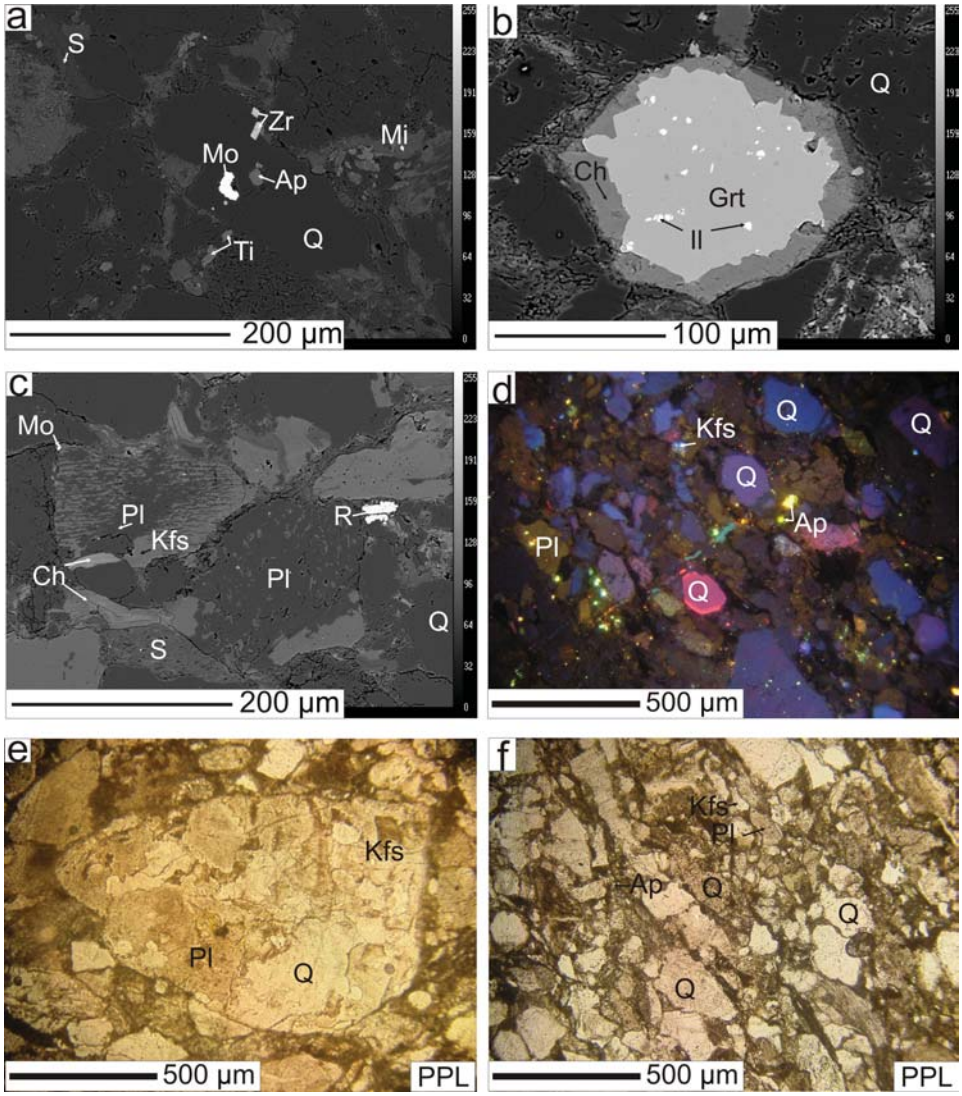
Pískovce MS a HKS lze na základě průměrného složení Q71:F21:L8 % charakterizovat jako převážně křemen-živcové psamity, občas s vyšším zastoupením litických klastů. Modální složení (Obr. 5) odpovídá převážně proveniencnímu poli recyklovanému orogénu, některé vzorky svým složením materiálově odpovídají zdrojům z magmatického oblouku, rychlého výzdvihu podloží a kratonních jader (Dickinson *et al.* 1983).

Křemen (Qt) se vyskytuje v polykrystalické (Qp) (průměrně 32,9 %) i monokrystalické (Qm) (průměrně 30,2 %) formě. Qp zrna jsou v 75 % případů tvořena více než 3 subzrny. Katodovou luminiscencí byly zjištěny čtyři skupiny křemenných zrn. První dvě skupiny s modrou až tmavě fialovou CL barvou jsou dominantní ve všech studovaných vzorcích. Křemenná zrna s červenou až růžovou CL barvou (Obr. 4) se hojně vyskytuje pouze v brumovických a kyjovických vrstvách, kde mohou tvořit až 1/3 všech křemenných zrn. Čtvrtá skupina bez CL zbarvení a se žlutými žilkami byla zjištěna v některých vzorcích hradeckých vrstev. Průměrné obsahy celkového křemene v pískovcích MS a HKS se pohybují mezi 60 až 80 %. Ve cvilínských a brumovických vrstvách obsahy křemene obecně klesají (od 40 do 70 %) následovány jejich opětovným postupným nárůstem ve směru do nadloží. Zvyšování obsahů Qm a poměru Qm/Qp napříč MS a HKS ukazuje na narůstající přínos materiálu z rul, granulitů a granitoidních hornin (Blatt 1967, Bábek *et al.* 2003, Das 2008).

Živce (F) jsou zastoupeny jak plagioklasy (Fp) (průměrně 5,8 %) tak draselnými živci (Fk) (průměrně 16,3 %). Většina živcových zrn je postižená alterací. CL mikroskopií byly identifikovány tři rozdílné populace zrn draselných živců: nejčastěji mají azurově modrou CL barvu; druhá skupina se vyznačuje ztrátou luminescence a obsahem odmíšených zrn hematitu/limonitu; třetí skupina má matně žlutou CL barvu a vyskytuje se pouze v hradecko-kyjovickém souvrství. Zrna plagioklasů mají žlutou CL barvu, často s oranžově zbarvenými produkty alterace (karbonáty). Plagioklasová řada je ve většině případů zastoupena albitem s typickým dvojčatěním. Draselné živce, především ortoklasy, bývají jen slabě zonální až nezonální, případě mikrokliny s typickým křížovým dvojčatěním. V hradecko-kyjovickém souvrství jsou rovněž hojné pertitické živce (Obr. 4). Celkové obsahy živců v MS mírně narůstají ve směru do nadloží a maxima dosahují v brumovických vrstvách (průměrně 31,1 %; maximum 61,9 %), ve vikštějnských vrstvách začínají klesat a tento trend pokračuje i napříč hradecko-kyjovickým souvrstvím.

Skupina litických klastů (L) (průměrně 6,8 %) zahrnuje materiál z vulkanických (Lv), plutonických a meta-plutonických (Lm) a sedimentárních a meta-sedimentárních (Ls) zdrojů. Plutonické litoklasty představují nejčastěji úlomky rul (Obr. 4) a jemnozrnných granitoidů. Skupina Ls je tvořena především jemnozrnnými sedimenty starších kulmských vrstev (intraklasty, pánevní kanibalismus). Stratigrafická distribuce litických klastů je v MS a HKS silně proměnlivá. Plutonické litické klasty a jejich metamorfní ekvivalenty převažují nad sedimentárními a meta-sedimentárními klasty. Obsahy Ls v obou souvrstvích obecně do nadloží klesají. Vulkanické klasty se vyskytují hojněji pouze v brumovických a kyjovických vrstvách.

Z dalších stavebních složek kulmských pískovců mohou být významným zdrojem radioaktivních prvků fylosilikáty, základní hmota a těžké minerály. Fylosilikáty se vyskytují jako deformované šupinky biotitu (více či méně chloritizované) (průměrně 6,1 %) a jemnozrnného sericitu (průměrně 4,1 %). Základní hmota pískovců je v případě obou studovaných souvrství tvořena jemnozrnným detritem křemene, živců (především zvětralých plagioklasů), sericitu, autigenního chloritu a těžkými minerály. Elektronová mikrosonda ukázala, že alespoň část chloritu je autigenního původu (chloritové lemy kolem detritických zrn, prorůstání chloritu a albitu), což ukazuje na slabě metamorfní alteraci těchto sedimentů (cf. Franců *et al.* 2002). Těžké minerály se vyskytují buď jako součást základní hmoty nebo jsou uzavřeny (Obr. 4) ve větších zrnech křemene (apatit, rutil, monazit nebo zirkon), živců (xenotim, apatit či titanit) a slíd (rutil, zirkon, magnetit, apatit). Pískovce bohdanovických vrstev obsahují především zirkon, titanit, apatit a granáty. Spektra těžkých



Obr. 4. Vybrané znaky pískovců na fotografiích z elektronové (BSE) (a–d) a optické (e–f) mikroskopie. (a) zrno křemene s uzavřenými zrníčky apatitu, zirkonu a titanitu; (b) zrno granátu s lemem autigenního chloritu a uzavřenými zrníčky illmenitu; (c) zrna pertitických živců; (d) mikrostruktura pískovců s převahou křemene a živců (v centru zonální zrno křemene s červenou CL barvou); (e) úlomek vysoce metamorfované horniny (granulit či rula); (f) koroze křemenných zrn. Zkratky: Q – křemen; Kfs – draselný živec; Pl – plagioklas; S – sericit; Mi – muskovit; Ch – chlorit; Ap – apatit; Grt – granát; Il – ilmenit; Mo – monazit; R – rutil; Ti – titanit; Zr – zirkon.

Fig. 4. Selected features of the sandstone composition in photomicrographs from electron (BSE) (a–d) and optical (e–f) microscope. (a) Quartz grain with inclusions of apatite, zircone and titanite; (b) grain of garnet with authigenic chlorite coating and illmenite inclusions; (c) perthitic feldspar grains; (d) dominancy of quartz and feldspar grains in sandstone structure (zonal quartz grains with red CL colour in centre); (e) high metamorphic rock fragment (granulite or gneiss); (f) corrosion of quartz grains. Abbreviations: Q – quartz; Kfs – potassium feldspar; Pl – plagioclase; S – sericite; Mi – muscovite; Ch – chlorite; Ap – apatite; Grt – garnet; Il – ilmenite; Mo – monazite; R – rutile; Ti – titanite; Zr – zircon.

minerálů z nadložních vrstev jsou tvořena především granáty, zirkonem a rutilem. Epidot, monazit, xenotim, thorit a sekundární minerály s vysokými obsahy prvků vzácných zemin se vyskytují vzácně, i když například obsahy monazitu a apatitu mírně narůstají směrem do nadloží. Dříve publikovaná spektra těžkých minerálů souhlasí s výše zmíněnými daty a ukazují na zdroj materiálu z vysoce metamorfních hornin jako jsou granulity, ruly a migmatity (MORTON 1991, HARTLEY a OTAVA 2001). Složení společenstva granátu v sedimentech brumovických a vikštejnských vrstev je velmi podobné granátickým asociácím z moldanubické zóny (HARTLEY a OTAVA 2001).

4.4. Zdroje gamaspektrometrického signálu

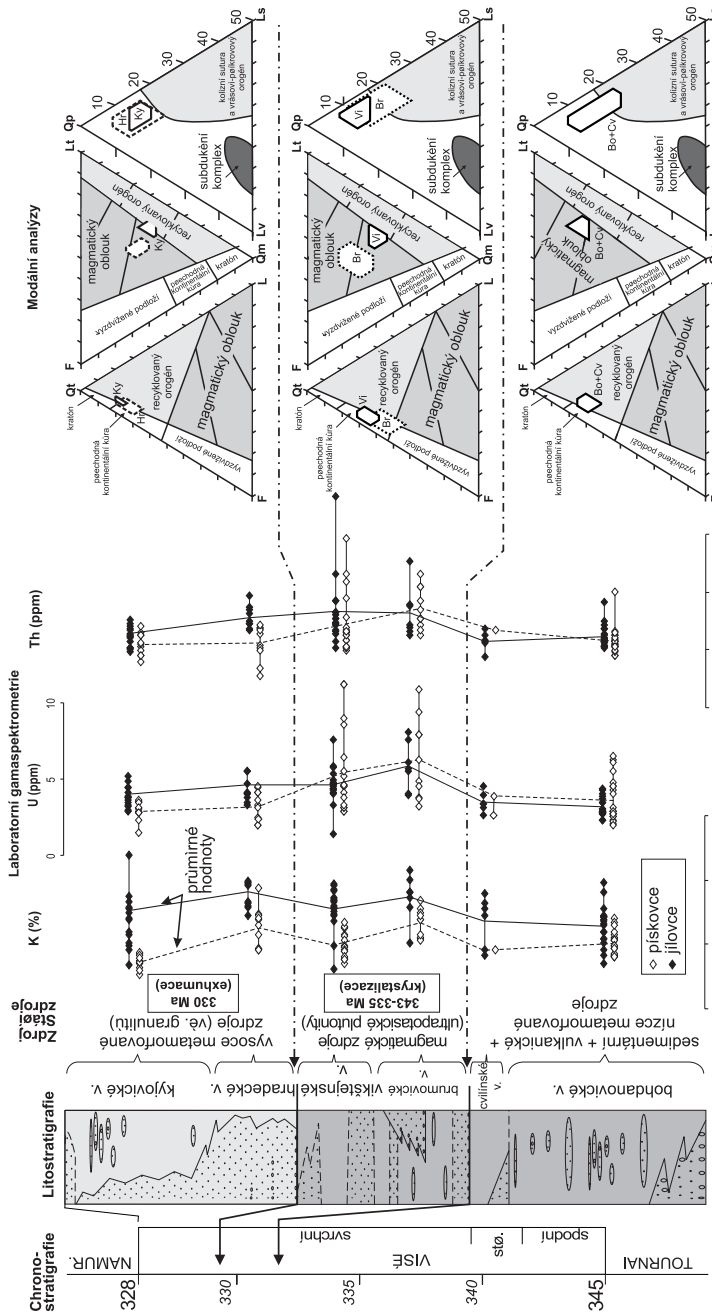
Z modálních analýz a studia chemismu minerálů na mikrosondě (Tab. 2) vyplývá, že nejvýznamnějšími zdroji draslíku ve studovaných pískovcích jsou draselné živce, muskovit (sericit), biotit a vzhledem ke své hojnosti i albit (průměrně 0,1 hm. % K_2O) a to jako základní stavební minerály tak jako součást základní hmoty pískovců. Nejdůležitějšími zdroji U a Th jsou těžké minerály. Hlavními nositeli uranu jsou vzhledem ke své hojnosti zirkon a apatit, který v průměru obsahuje 0,04 hm. % UO_2. Xenotim, monazit (průměrně 0,49 hm. % UO_2) a thorit mají řádově vyšší obsahy U, ale jsou mnohem méně hojné než apatit a zirkon. Nejdůležitějším zdrojem thoria je nejspíše monazit (průměrně 6,19 hm. % ThO_2), běžný těžký minerál v sedimentech MS a HKS. Th se vyskytuje také v thoritu, sekundárních minerálech REE, xenotimu, apatitu (průměrně 0,01 hm. % ThO_2) a zirkonu (cf. ČOPJAKOVÁ 2007).

Tabulka 2. Obsahy oxidů K, U a Th v hlavních detritických a nejběžnějších těžkých minerálech v nízkojesenické části kulmské pánve.

Table 2. Concentrations of K, U and Th oxides in the most important framework grains and heavy minerals in the Nízký Jeseník area of the Moravo-Silesian Culm Basin.

MINERÁLY A MINERÁLNÍ SKUPINY	počet vzorků	Výskyt	K_2O			UO_2			ThO_2		
			prům.	*min.*	*max.*	*prům.*	*min.*	*max.*	*prům.*	*min.*	*max.*
draselný živec	4	**11,45%**	**13,7**	6,66	16,16	0	0	0	0	0	0
sericit	7	**~ 4 %**	**9,15**	7,23	10,54	0	0	0	0	0	0
chloritizovaný biotit	3	**~ 2,5 %**	**1,02**	0,39	1,63	0	0	0	0	0	0
albit	6	**5,2 %**	**0,09**	0	0,42	0	0	0	0	0	0
těžké minerály		**celkem: 0,45 %**									
thorit	1	**vzácný**	0	0	0	**1,17**	1,17	1,17	**57,24**	57,24	57,24
sekund. min. s REE prvky	2	**vzácný**	0	0	0	**0,55**	0,29	0,81	**29,72**	3,91	55,53
monazit	4	**běžný**	0	0	0	**0,49**	0,19	0,95	**6,17**	0,28	12,19
xenotim	3		0	0	0	**0,57**	0,1	1,42	**0,16**	0	0,3
zirkon	7	**hojný**	0	0	0	0,06	0	0,2	0,005	0	0,03
apatit	6	**hojný**	0	0	0	0,04	0	0,11	0,01	0	0,02
granát	1	**hojný**	0,02	0,02	0,02	0	0	0	0	0	0

Rentgenová difrakční analýza minerálních fází ve vzorcích břidlic ukazuje na složení, které je velmi blízké složení základní hmoty pískovců (viz kap. 4.3). Obsahují chlorit, illit, sericit, křemen a živce, což je v souladu s předchozími zjištěními FRANCŮ *et al.* (1999). Z toho vyplývají i hlavní zdroje K v jílovcích, kterými jsou illit, sericit a živce. U a Th jsou pravděpodobně sorbovány na jílové minerály. Organická hmota nebyla studována, ačkoliv by mohla být rovněž významným zdrojem části U.



Obr. 5. Kombinovaný diagram hlavních provenienčních změn (s vyznačením předpokládaných zdrojových hornin) a jejich vliv na stratigraficky vázané změny koncentrací K, U a Th v sedimentech moravického a hradecko-kyjovického souvrství.

Fig. 5. Combined diagram of the main provenance changes (incl. supposed source rocks) and their influence on stratigraphic distribution of K, U and Th concentrations in sediments of the Moravice Formation and the Hradec-Kyjovice Formation.

5.Diskuze

5.1. Faciální a provenienční závislost gamaspektrometrického signálu

Ze studia sedimentů moravického (MS) a hradecko-kyjovického (HKS) souvrství vyplývá, že radioaktivita (a tedy koncentrace K, U a Th) sedimentů je vázána: (1) v písčité frakci především na draselné živce a albit, v menší míře také sericit a biotit; (2) v prachové frakci především na sericit, biotit a těžké minerály a (3) v jílové frakci na illit, jílové minerály se smíšenými strukturami a sericit. Koncentrace K, U a Th (a tedy i GRS signál) jsou v nízkojesenické části kulmské pánve silně proměnlivé a jednoduchá faciální závislost, tj. předpoklad nižších hodnot (především Th a U) u pískovců a vyšších hodnot u jílovců, nemusí vždy platit (Tab. 1).

Vyšší radioaktivita pískovců dle výsledků petrografických analýz koreluje s vyššími obsahy draselných živců a prachovito-jílovité základní hmoty tvořené směsí křemene, albitu, těžkých minerálů, sericitu a illitu. Naopak pískovce s vyššími obsahy křemenného tmelu jsou méně radioaktivní. Podobný vztah ukázala také korelace (i když slabá) mezi režimy hlavních detritických minerálů a křivkou obsahů K. Naopak koncentrace Th a U jsou ovlivněny především přítomností těžkých minerálů. Vzhledem k vysoké aktivitě Th a U mají asociace těžkých minerálů zásadní vliv na variabilitu GRS záznamů. Vyšší radioaktivita pískovců s vysokými obsahy některých detritických (živce, slídy, jílové minerály) a těžkých minerálů není v geologickém záznamu nijak neobvyklá (Rider 1999).

Jílovce v kulmu Nízkého Jeseníku mají obecně jen mírně vyšší průměrnou radioaktivitu než pískovce a na určitých stratigrafických úrovních moravického souvrství je jejich radioaktivita dokonce nižší (Tab. 1, Obr. 5). Z výsledků gamaspektrometrie a petrografických analýz vyplývá, že obsahy a složení detritických a těžkých minerálů mají na celkovou radioaktivitu sedimentů větší vliv než obsah jílových minerálů. Vzhledem k materiálové podobnosti složení detritických zrn písčité frakce a základní hmoty pískovců a částečně také složení jílovců je gamaspektrometrie jen slabě závislá na faciích a její použití pro identifikaci břidlic (Doveton 1994, Rider 1999) je proto ve studované oblasti silně limitované. Variabilita spekter gama záření je spíše ovlivněná stratigrafickými změnami v detritické provenienci než faciální distribucí.

5.2. Odraz geotektonické evoluce zdrojové oblasti v GR spektrech siliciklastických sedimentů

Relativně monotónní modální složení studovaných sedimentů indikuje dominantní zdroj materiálu z vysoce metamorfovaných a plutonických hornin a v menší míře vulkanicko-sedimentárních a nízce metamorfovaných hornin. V MS a následně v HKS ve směru do nadloží obecně narůstá zastoupení materiálu vysoce metamorfované a plutonické provenience (Hartley a Otava 2001, Bábek *et al.* 2004). Na provenienci z kyselých až intermediálních magmatických (granity a pegmatity) a vysoce metamorfovaných hornin (ruly) poukazují litické úlomky, hojná křemenná zrna s modrou až tmavě fialovou luminiscencí, monokrystalická křemenná zrna se slabým zhášením, hojný apatit, často zonální, nezonální až slabě zonální draselné živce, občas s mikroklinovým mřížkováním, plagioklasy (albit) s nízkými obsahy K, myrmekitické srůsty křemene a plagioklasu, pertitické živce, hojnost Fe-Mn granátů, zirkonu, rutilu a monazitu (Blatt 1967, Helmond 1985, Krainer a Spoil 1989, Das 2008, Gallala *et al.* 2009). Zonální křemenná zrna s červeno-růžovou luminiscencí a vulkanické litoklasty indikují vulkanický zdroj a pozorovaná sedimentární a metasedimentární litická zrna souhlasí s daty publikovaných z valounových analýz slepenců (cf. Maštera 1987, 1997, Hartley a Otava 2001).

Na základě povahy GR spekter můžeme přibližně vyčlenit tři stratigrafické oddíly (Obr. 5). Modální složení pískovců spodního oddílu (bohdanovické a cvilínské vrstvy) odpovídá zdroji z recyklovaného orogénu. Převažuje materiál z nízce metamorfovaných, sedimentárních a plutonických hornin, jejichž zdroj je na základě studia těžkých minerálů kladen do oblasti moravsko-slezské a lužické jednotky Českého masivu (Čopjaková *et al.*

2005). GR spektra se v tomto oddílu vyznačují relativně nízkými obsahy K, U a Th. Obecně lze říct, že jílovce ve srovnání s pískovci vykazují jen mírně vyšší přirozenou radioaktivitu, způsobenou především zvýšenými koncentracemi K a Th (Tab. 1). Ovšem, v řadě případů byly zjištěny v pískovcích zvýšené obsahy U, což způsobilo jejich vyšší přirozenou radioaktivitu ve srovnání s jílovci.

Ve středním oddílu (brumovické a vikštejnské vrstvy) pozorujeme oproti podložním vrstvám posun k metamorfní a kyselé magmatické provenienci (Hartley a Otava 2001, Bábek *et al.* 2004), což se v pískovcích projevuje nárůstem poměru Qm/Qp, rostoucími obsahy Ft a klesajícími koncentracemi Lt. Geotektonická pozice zdroje odpovídá recyklovanému orogénu s výrazným zapojením materiálu z magmatického oblouku, přechodně-kontinentálního zdroje a z vyzdviženého podloží. Pro GR spektra jsou typické relativně vysoké a velmi proměnlivé obsahy Th a U a vysoký poměr Th/U. Pískovce často mají, podobně jako ve spodním oddílu, zvýšené obsahy U a občas i Th, což má za následek jejich vyšší radioaktivitu ve srovnání s jílovci (viz Tab. 1). Malý faciální vliv na radioaktivitu (koncentrace K, U a Th) sedimentů a vysoké obsahy chemicky nestabilních granátů v asociacích těžkých minerálů (Hartley a Otava 2001) ve spodním a středním oddílu a narůst obsahů draselných živců indikují nízkou zralost sedimentů spojenou s krátkým transportem a krátkou dobu zdržení ve fluviálním a příbřežním prostředí (cf. Fergusson a Tye 1999). Data z katodoluminscenční mikroskopie a valounových analýz slepenců myslejovického souvrství (Hartley a Otava 2001, Zachovalová a Leichmann 2004) ukazují na přítomnost klastického materiálu pocházejícího z vysoce radioaktivních, ultradraselných magmatických hornin (durbachity nebo jejich subvulkanické či vulkanické ekvivalenty), jejichž přítomnost by mohla vysvětlit zvýšené hodnoty radioaktivity pískovců středního oddílu. Spodní limity koncentrací K, U a Th (K = 4,4–6,1 hm. %, eU = 15–24 ppm, eTh = 38–49 ppm; Žáček *et al.* 2009) vázaných v těchto durbachitech především na zirkon, thorit, allanit-(Ce) a monazit, jsou podobné svrchním limitům koncentrací v siliciklastických horninách středního oddílu kulmu Nízkého Jeseníku. Magmatická krystalizace durbachitů byla datována zhruba na rozhraní středního a spodního visé (335 až 343 Ma) (Kotková *et al.* 2010). Jejich přítomnost v pískovcích svrchního visé svědčí o rychlé exhumaci ultradraselných magmatitů (Hartley a Otava 2001). Sedimenty středního oddílu se zvýšenou radioaktivitou (brumoviské a vikštejnské vrstvy MS) by tak mohly být citlivými indikátory eroze moldanubické skupiny příkrovů.

Ve svrchním oddílu (HKS) obecně rostou obsahy Qt na úkor živců a litických klastů. Složení pískovců odpovídá přechodně-kontinentální provenienci doplněné o kratonní materiál a detrit z recyklovaného orogénu. Obsahy U a Th jsou ve srovnání se středním oddílem nižší, naopak hodnoty K jsou relativně srovnatelné, což dokumentuje předpokládaný provenienční posun z převážně ultrapotasických plutonických zdrojů k vysoce metamorfovaným horninám bohatých na křemen. Vyšší obsahy křemene a nižší zastoupení živců v sedimentech způsobují, že laboratorní i terénní GR spektra jsou citlivější k faciálním změnám než tomu bylo v případě podložních vrstev. Hranice středního a svrchního oddělení zhruba odpovídá bázi svrchní zóny těžkých minerálů Hartleyho a Otavy (2001). Granátová asociace odpovídá vysoce metamorfnímu zdroji materiálu (Hartley a Otava 2001), např. granulitům moldanubické skupiny příkrovů exhumované v intervalu 333–340 Ma (Kotková *et al.* 2010). Extrémně rychlá denudace ve variském orogenním pásmu vedla k rychlému vyplnění předpolní kulmské pánve před zhruba 330 Ma (Hartley a Otava 2001).

Časový interval mezi krystalizací ultrapotasických plutonických zdrojových hornin (Kotková *et al.* 2010) a uložením jejich klastických derivátů v hlubokovodní předpolní pánvi se pohybuje mezi ~3 až ~11 mil. let a doba mezi exhumací vysoce metamorfovaných hornin a jejich uložením v hradecko-kyjovickém souvrství je odhadována dokonce jen na ~1 mil. let. Extrémní rychlost výzdvihu, eroze a transportu potvrzuje bouřlivou sedimentaci v moravskoslezské kulmské pánvi ovlivňovanou v prvé řadě procesy v dynamickém tek-

tonickém systému. Přítomnost chemicky i mechanicky nestabilních komponent ukazuje, že zvětrávání, eustatické změny a diagenetická alterace (DICKINSON 1985, REED *et al.* 2005, DUTTON a LOUCKS 2010) měly na výsledné složení jen malý vliv.

6. Závěr

Na výchozech hlubokovodních siliciklastických sedimentů nízkojesenické části kulmské pánve byly zjištěny mírně zvýšené gamaspektrometrické hodnoty (průměrné hodnoty: 174 API; 3.45 % K; 5.78 ppm U; 18.07 ppm Th). Laboratorní GR data a koncentrace K, U a Th jsou zhruba o třetinu nižší a nekorelují se svými protějšky stanovenými v terénu.

Jak terénní tak laboratorní soubory dat ukazují na nízkou citlivost obsahů K, U a Th na facie, což je patrné z malého rozdílu mezi průměrnými koncentracemi K, U a Th v pískovcích a jílovcích a heterolitech. Na některých stratigrafických úrovních MS dokonce pískovce vykazují vyšší radioaktivitu (obsahy K, U a Th) než jílovce. Z rozdílného vlivu facií na jednotlivých lokalitách lze odvodit, že koncentrace K, U a Th nejsou v případě kulmu Nízkého Jeseníku pouze jednoduchou funkcí zrnitosti (obsahu jílových minerálů).

Podle analýz na mikrosondě jsou hlavními zdroji K: draselné živce, muskovit, sericit, biotit a albit; U: zirkon, apatit, monazit a xenotim; a Th: monazit, thorit, sekundární minerály bohaté prvky vzácných zemin, xenotim, apatit a zirkon. V GRS hodnotách se projevuje určitá, prostorově-stratigrafická variabilita patrně odrážející změny v detritickém složení pískovců.

Materiálová změna od slabě metamorfní, vulkanické a sedimentární provenience k převážně magmatickým zdrojům (ultrapotasické plutonity) na začátku svrchního visé je spojena s výrazným nárůstem obsahů U, Th, poměrů Th/U a obecně vysokou radioaktivitou pískovců ve srovnání s jílovci (brumovické a vikštejnské vrstvy). Přítomnost materiálu pocházejícího z vysoce radioaktivních durbachitů v pískovcích středního oddílu dokládá rychlou erozi ultrapotasických magamatitů. Další posun z převážně magmatické provenience k vysoce metamorfovaným zdrojům (ruly, granulity) koncem svrchního visé je spojen se silným poklesem Th a U a postupným poklesem koncentrací K v pískovcích (hradecké a kyjovické vrstvy), což se projevuje snížením GRS signálu.

Změny ve složení GR spekter odrážejí extrémně rychlou exhumaci hlubších korových partií moldanubické zóny Českého masivu představující hlavní zdrojovou oblast předpolní kulmské pánve.

Poděkování

Tato práce byla finančně zajištěna grantem GAČR č. 205/09/1257.

LITERATURA

BÁBEK, O., PŘICHYSTAL, A., LEHOTSKÝ, T., 2003: Modální složení a gamaspektrometrie psamitů moravického souvrství: důsledky pro provenienční studie sedimentů kulmské facie. – Geol. výzk. Mor. Slez. v r. 2002, 10, 36–39.

BÁBEK, O., MIKULÁŠ, R., ZAPLETAL, J., LEHOTSKÝ, T., 2004: Combined tectonic-sediment supply-driven cycles in a lower carboniferous deep-marine forehand basin, Moravice Formation, Czech Republic. – Int. J. Earth Sci. (Geol. Rundsch.), 93, 241–261.

BLATT, H., 1967: Original characteristics of clastic quartz grains. – J. Sediment. Petrol., 37, 401–424.

CHLUPÁČ, I., BRZOBOHATÝ, R., KOVANDA, J., STRÁNÍK, Z., 2002: Geologická minulost České republiky. – Academia, Praha, 436 p.

ČOPJAKOVÁ, R., 2007: Odraz změn provenience v psefitické a psamitické frakci sedimentů myslejovického souvrství (analýza těžkých minerálů). – MS, disertační práce, PřF MU Brno, 137 s.

Čopjaková, R., Sulovský, P., Paterson, B. A., 2005: Major and trace elements in pyrope-almandine garnets as sediment provenance indicators of the Lower Carboniferous Culm sediments, Drahany Uplands, Bohemian Massif. – Lithos, 82, 51–70.

Das, P. K., 2008: Petrography of sandstones of Thekopili Formation, Jaintia Hills district, Meghalaya. – Bulletin of Pure & Applied Sciences-Geology, 27, 19–24.

Dickinson, W. R., 1970: Interpreting detrital modes of greywacke and arkose. – J. Sediment. Petrol., 40, 695–707.

Dickinson, W. R., 1985: Interpreting relations of detrital modes of sandstone. – In: G.G. Zuffa (Ed.): Provenance of Arenites. Nato ASI Series, 333–361, Reidel Dordrecht, Boston, USA.

Dickinson, W. R., Beard, S., Brakenridge, G. R., Erjavec, J. L., Ferguson, R. C., Inman, K. F., Knepp, R. A., Lindberg, F. A., Ryberg, P. T., 1983: Provenance of North American Phanerozoic sandstones in relation to tectonic setting. – GSA Bulletin, 94, 2, 222–235.

Doveton, J. H., 1994: Geologic Log Interpretation: Reading the Rocks from Wireline Logs. – SEPM Short Course Notes, Tulsa, 29, 169 p.

Dutton, S. P., Loucks, R. G., 2010: Reprint of: Diagenetic controls on evolution of porosity and permeability in lower Tertiary Wilcox sandstones from shallow to ultradeep (200–6 700 m) burial: Gulf of Mexico Basin (USA). – Marine and Petroleum Geology, 27, 8, 1 775–1 787.

Dvořák, J., 1994: Variský flyšový vývoj v Nízkém Jeseníku, na Moravě a ve Slezsku. – Práce ČGS 3, 3, 77 p.

Ehrenberg, S. N., Svana, T. A., 2001: Use of spectral gamma-ray signature to interpret stratigraphic surfaces in carbonate strata; an example from the Finnmark carbonate platform (Carboniferous-Permian), Barents Sea. – Bull. Am. Assoc. Petrol. Geol., 85, 295–308.

Fergusson, C. L., Tye, S. C., 1999: Provenance of Early Palaeozoic sandstones, southeastern Australia, part 1: vertical changes through the Bengal fan-type deposit. – Sediment. Geol., 125, 135–151.

Franců, E., Franců, J., Kalvoda, J., 1999: Illite crystallinity and vitrinite reflectance in Paleozoic siliciclastics in the SE Bohemian massif as evidence of the thermal history. – Geologica Carpathica, 50, 5, 365–372.

Franců, E., Franců, J., Kalvoda, J., Poelchau, H. S., Otava, J., 2002: Burial and uplift history of the Palaeozoic Flysch in the Variscan foreland basin (SE Bohemian Massif, Czech Republic). – European Geoscience Union Stephan Mueller Special Publication Series, 1, 167–179.

Gallala, W., Gaied, M. E., Montacer, M., 2009: Detrital mode, mineralogy and geochemistry of the Sidi Aich Formation (Early Cretaceous) in central and southwestern Tunisia: Implications for provenance, tectonic setting and paleoenvironment. – J. Afr. Earth Sci., 53, 159–170.

Hartley, A., Otava, J., 2001: Sediment provenance and dispersal in a deep marine foreland basin: the Lower Carboniferous Culm Basin, Czech Republic. – J. Geol. Soc., 158, 1, 137–150.

Helmond, K. P., 1985: Provenance of feldespathic sandstone. The effect of diagenesis on provenance interpretations: A review. – In: G.G Zuffa (Ed.): Provenance of Arenites. Nato ASI Series, 138–164, Reidel Dordrecht C-148, Boston, USA.

IAEA (International Atomic Energy Agency), 2003: Guidelines for radioelement mapping using gamma ray spectrometry data. (IAEA-TECDOC-1363), Wien.

Ingersoll, R.V., Bullard, T. F., Ford, R. L., Grimm, J. P., Pickle, J. D., Sares, S. W., 1984: The effect of grain size on detrital modes: a test of the Gazzi-Dickinson point-counting method. – J. Sediment. Petrol., 54, 103–116.

Jain, R. B., Hingoraney, S. P., Singh, J., 1998: A note on radioactivity in the Lower Jurassic sandstones of Lathi Basin, western Rajasthan (India). – J. Atom Miner. Sci., 6, 117–125.

Kotková, J., Schaltegger, U., Leichmann, J., 2010: Two types of ultrapotassic plutonic rocks in the Bohemian Massif – Coeval intrusions at different crustal levels. – Lithos, 115, 163–176.

Krainer, K., Spoil, C., 1989: Detrial and authigenic feldspars in Permain and Early Triassic Sandstones, Eastern Alps. – Sediment. Geol., 62, 57–77.

Kumpera, O., 1983: Geologie spodního karbonu jesenického bloku. – Knihovna ÚÚG, Praha, 59, 171 p.

Lüning, S., Schulze, F., Marzouk, A. M., Kuss, J., Gharaibeh, A., Kolonic, S., 2004: Uranium-enrichment horizons refine the stratigraphic framework of Cenomanian-Turonian (Late Cretaceous) strata in central Jordan and northern Tunisia. – Z. Dtsch. Geol. Ges., 155, 1, 49–60.

Maštera, L., 1987: Petrografie spodního karbonu na mapovém listě 1:25 000 Horákov-Mokrá 24-413. – In: J. Hladil (Ed.): Vysvětlivky k základní geologické mapě ČSFR 1 : 25 000, 24-413 Horákov-Mokrá. MS, ÚÚG, Brno.

Maštera, L., 1997: Petrofaciální srovnání drob hornobenešovského, moravického a hradecko-kyjovického souvrství v Nízkém Jeseníku (severní Morava) (15-13 Vrbno pod Pradědem, 15-31 Bruntál, 15-14 Krnov, 15-32 Opava, 15-33 Moravský Beroun, 15-34 Vítkov, 25-11 Hlubočky, 25-12 Hranice). – Zpr. geol. Výzk. v Roce 1996, 125–127.

Mazur, S., Aleksandrowski, P., Kryza, R., Oberc-Dziedzic, T., 2006: The Variscan Orogen in Poland. – Geol. Q., 50, 1, 89–118.

Morton, A. C., 1991: Geochemical studies of detrital heavy minerals and their applications to provenance studies. – In: A.C. Morton, S.P. Todd, P.D.W. Haughton (Eds.): Developments in Sedimentary provenance Studies. Spec. Publ. Geol. Soc. Lond., 57, 31–45.

Reed, J. S., Eriksson, K. A., Kowalewski, M., 2005: Climatic, depositional and burial controls on diagenesis of Appalachian Carboniferous sandstones: qualitative and quantitative methods. – Sediment. Geol., 176, 225–246.

Rider, M. H., 1999: The geological interpretation of well logs, 2nd Edition. – Whittles Publishing Services, Dunbeath, 288 p.

Schnyder, J., Ruffell, A., Deconinck, J. F., Baudin, F., 2006: Conjunctive use of spectral gamma-ray logs and clay mineralogy in defining late Jurassic-early Cretaceous palaeoclimate change (Dorset, U.K.). – Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 229, 4, 303–320.

Schulmann, K., Ledru, P., Autran, A., Melka, R., Lardeaux, J. M., Urban, M., Lobkowicz, M., 1991: Evolution of nappes in the eastern margin of the Bohemian Massif: a kinematic interpretation. – Geol. Rundsch. Z. Allg. Geol., 80, 73–92.

Svendsen, J. B., Hartley, N. R., 2001. Comparison between outcrop spectral gamma ray logging and whole rock geochemistry: implications for quantitative reservoir characterization in continental sequences. – Journal of Marine and Petroleum Geology 18, 65–670.

Tucker, M. E., 2003: Sedimentary Rocks in the Field, 3rd Edition: The Geological Field Guide Series. – John Wiley&Sons, Ltd., New York, 234 p.

Zachovalová, K., Leichmann, J., 2004: Příspěvek k poznání provenience valounů ve slepencích svrchnoviséského stáří na Drahanské vrchovině: V. durbachity. – Acta Musei Moraviae, Scientiae geologicae, 89, 161–172.

Žáček, V., Škoda, R., Sulovský, P., 2009: U-Th-rich zircon, thorite and allanite-(Ce) as main carriers of radioactivity in the highly radioactive ultrapotassic melasyenite porphyry from the Sumava Mts., Moldanubian Zone, Czech Republic. – Journal of Geosciences, 54, 4, 343–354.