

Geochemie a radioaktivita paleozoických hornin na listech 15-31 Bruntál a 15-33 Moravský Beroun a jejich souvislost se složením variské hydrotermální mineralizace

Geochemistry and radioactivity of Palaeozoic rocks on the sheets 15-31 Bruntál and 15-33 Moravský Beroun and their relation to a composition of the Variscan hydrothermal mineralization

Jiří Zimák¹✉, Marek Slobodník², Přemysl Pořádek^{2,3}

¹ Katedra geologie PŘF UP, tř. 17. listopadu 12, 771 46 Olomouc

² Ústav geologických věd PŘF MU, Kotlářská 2, 61137 Brno

³ Česká geologická služba, Leitnerova 22, 658 69 Brno

Key words:

Vrbno Group, Moravosilesian Palaeozoic, flysch sediments, gamma-spectrometry, uranium, thorium, dose rate, hydrothermal mineralization

✉ zimak@prfnw.upol.cz

Editor:

David Buriánek

Abstract

This paper deals with the natural radioactivity of Palaeozoic rocks on the map sheets 15-31 Bruntál and 15-33 Moravský Beroun in the NE part of the Bohemian Massif. Studied rocks belong to the Vrbno Group (greenschists and phyllites) and mainly to the Moravosilesian Palaeozoic, particularly to the Andělská Hora, Horní Benešov and Moravice Fms. Potassium, uranium and thorium contents were measured in 1 596 rock samples using a laboratory gamma-ray spectrometer, values of mass activity of ²²⁶Ra equivalent (a_m) were calculated. The average a_m of analysed rock samples is 138 Bq.kg⁻¹. This value is very close to the a_m value calculated for the average continental crust. Natural radioactivity of flysch sedimentary rocks of the Andělská Hora, Horní Benešov and Moravice Fms. (1 350 analysed samples, avg. a_m = 150 Bq.kg⁻¹) grows from psefites (conglomerates) to psammities (dominating greywackes) up to the group of aleurites and pelites (siltstones, silty shales, clay shales). The highest uranium and thorium contents, along with other metals (Cs, Ga, Rb, Sn, Zr, La, Ce, Pb, Zn, As) were found in flysch rocks of the Horní Benešov Fm. in the area near Valšov: greywacke shows content up to 13 ppm U and 25 ppm Th (a_m = 364 Bq.kg⁻¹) and siltstone up to 21 ppm U and 43 ppm Th (a_m = 624 Bq.kg⁻¹). Low-grade metamorphic mobilization of elements is documented by hydrothermal minerals in syntectonic quartz veins which are e.g. fluorite, sulphides, REE-bearing phases, U-bearing phases.

Úvod

Jednou z významných fyzikálních vlastností přírodního horninového prostředí je přirozená radioaktivita, která při překročení určité úrovně může představovat zdravotní riziko. Studie se zabývá radioaktivitou paleozoických hornin na mapových listech 15-31 Bruntál a 15-33 Moravský Beroun. Vychází z obsahů tří radioaktivních prvků (K, U a Th) stanovených laboratorní gamaspektrometrií v reprezentativních souborech horninových vzorků. Detailnější studium geochemie hornin bylo provedeno v okolí Valšova, kde byla studována i hydrotermální mineralizace.

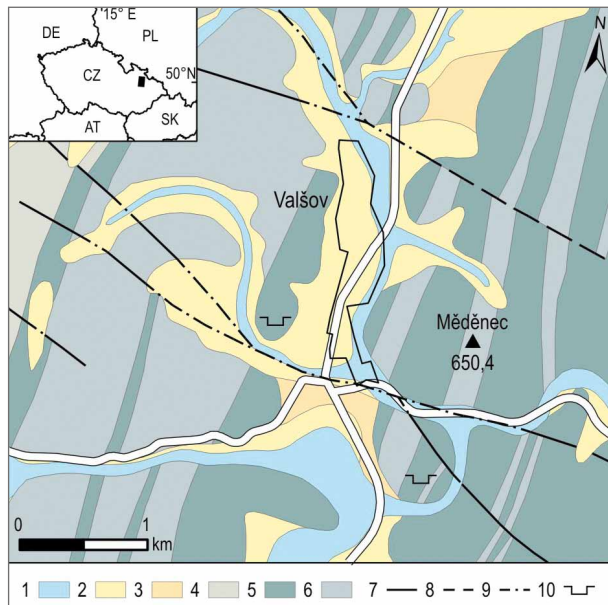
Geologické jednotky a jejich horniny

Paleozoické horniny na obou mapových listech (15-31 Bruntál, 15-33 Moravský Beroun) náleží ke dvěma hlavním geologickým jednotkám – sileziku a moravskoslezskému paleozoiku (MSP). Silezikum vystupuje na velmi malé ploše v sz. cípu mapového listu 15-31 Bruntál, kde je reprezentováno vrbenskou skupinou, zde tvořenou hlavně zelenými břidlicemi (s tělesy Fe-rud) a fylity. Součástí MSP je stínavsko-chabičovské souvrství (paleobazalty a jejich tufy, keratofyrové

Doporučená citace článku:

Zimák, J., Slobodník, M., Pořádek, P. (2019). Geochemie a radioaktivita paleozoických hornin na listech 15-31 Bruntál a 15-33 Moravský Beroun a jejich souvislost se složením variské hydrotermální mineralizace. – *Geologické výzkumy na Moravě a ve Slezsku*, 26, 1–2, 90–97.

DOI: <https://doi.org/10.5817/GVMS2019-1-2-90>



Obr. 1: Geologická mapa okolí Valšova s vyznačeným opuštěným a činným lomem a s pozicí mapových listů na schématu střední Evropy. Vysvětlivky: kvartér: 1 – nivní sediment; 2 – kamenitý až hlinito-kamenitý sediment; neogén–kvartér: 3 – eluvium; spodní karbon: andělskohorské souvrství: 4 – jílovité břidlice, prachovce a droby; hornobenešovské souvrství: 5 – droby; 6 – jílovité břidlice, prachovce, droby; tektonika: 7 – zlom zjištěný; 8 – zlom předpokládáný; 9 – zlom zakrytý; 10 – lom. Upraveno podle Geologické mapy 1 : 50 000, Česká geologická služba, dostupné z: <https://geology.cz/>.

Fig. 1: The Geological map of the Valšov area with an indication of abandoned and active quarry and of map sheets in the scheme of the Central Europe. Explanation: Quaternary: 1 – fluvial plain; 2 – stony, up to loamy-rocky sediment; Neogene–Quaternary: 3 – eluvium; Lower Carboniferous: Andělská Hora Fm.: 4 – shale, siltstone, greywacke; Horní Benešov Fm.: 5 – greywacke; 6 – shale, siltstone, greywacke; tectonics: 7 – certain fault; 8 – indicated fault; 9 – hidden/covered fault; 10 – quarry.

horniny, železnorudné akumulace lahn-dillského typu), líšeňské souvrství (jen na listu 15-31 Bruntál, vápence až vápnité břidlice), ponikevské souvrství (silicity), moravskoberounské souvrství (křemenné pískovce a slepence) a typická variská flyšová souvrství (kulm), na obou listech zastoupená andělskohorským (AS), hornobenešovským (HS) a moravickým souvrstvím (MS) viz Dvořák (1995), Dvořák et al. (1991). V AS v hodnoceném území převažují droby a pískovce nad jílovými a siltovými břidlicemi a siltovci (často jde o rytmy) a ojedinělými slepenci. HS je tvořeno droby (převážně jemnozrnnými, místy přecházejícími do křemenných pískovců), jílovými a siltovými břidlicemi a také siltovci (časté jsou rytmy). Střídání typů flyšových hornin a charakter stavby AS a HS v širším okolí Valšova jsou znázorněny na obrázku 1. V MS dominují droby (hlavně litické) a rytmy, v nichž se střídají siltové nebo jílové břidlice se siltovci a jemnozrnnými droby; podřízené jsou v MS přítomny konglomeráty (převážně gravelity) s drobovou matrix.

Materiál a metody

Na 758 lokalitách na území obou mapových listů bylo odebráno a následně analyzováno 1 596 vzorků paleozoických hornin. Determinace hornin byla prováděna jen makroskopicky, a proto nejsou ve skupině psamitů rozlišovány jednotlivé horninové typy (křemenné pískovce, droby apod.). Z téhož důvodu jsou všechna kulmská siliciklastika s aleuritickou nebo pelitickou strukturou zařazena do skupiny aleurity + pelity. V případě siliciklastických sedimentů na rozhraní aleurit/psamit mohlo makroskopické hodnocení vést k chybnému zařazení horninového vzorku podle zrnitosti (droby/siltovce). V případě produktů devonského vulkanismu ve šternbersko-hornobenešovském pruhu nejsou rozlišována efuziva a extruziva (efuziva patrně silně převažují). Všechna bazika (nebo horniny bazika připomínající) jsou označovány jako „paleobazalty“, produkty kyselého nebo intermediárního vulkanismu jako „keratofyrové horniny“.

Metodou laboratorní gamaspektrometrie byl v horninových vzorcích stanoven obsah K, U a Th. Analýzy byly provedeny na PŘF UP v Olomouci pomocí spektrometru SG – 1000 LAB s NaI(Tl) detektorem o objemu 0,35 dm³ (průměr 76 mm, délka 76 mm), délka analýzy 1 800 s, hmotnost vzorku cca 400 g. Obsah draslíku byl stanoven přímo z koncentrace ⁴⁰K. V případě uranu a thoria jde o nepřímé stanovení na základě koncentrací dceřiných produktů, a proto jsou takto zjištěné obsahy při uvádění výsledků analýz označovány jako eU a eTh. Meze detekce: K = 0,5 hm. %, U a Th = 1,5 ppm. Při výpočtu hodnot parametrů a_m (hmotnostní aktivita ekvivalentu ²²⁶Ra) a D (dávkový příkon záření gama terestrického původu) a při statistickém zpracování dat byly obsahy K pod mezí detekce nahrazeny hodnotou 0,33 hm. %, obdobně v případě U a Th hodnotou 1 ppm. Oba parametry byly vypočteny z výsledků gamaspektrometrického stanovení K, U a Th s použitím rovnice pro a_m [Bq.kg⁻¹] = (0,077 × 313K) + 12,35U + (1,43 × 4,06Th), D [nGy.h⁻¹] = (0,043 × 313K) + (0,427 × 12,35U) + (0,662 × 4,06Th), do nichž je obsah K dosazován v hm. %, obsahy U a Th v ppm (Beretka, Mathew 1985; UNSCEAR 1988; Matolín, Chlupáčová 1997; Ngachin et al. 2007; Eštoková, Palaščíková 2013).

V případě 13 vzorků siltovců a drob z lokality Valšov s anomálně vysokými obsahy U a Th byl sledován jejich celkový chemismus pomocí XRF analyzátoru DELTA-PREMIUM v laboratořích firmy URGA, s.r.o. se sídlem v Olomouci (metodika in Zimák et al. 2016). Použity jsou jen stanovení Al₂O₃ a SiO₂.

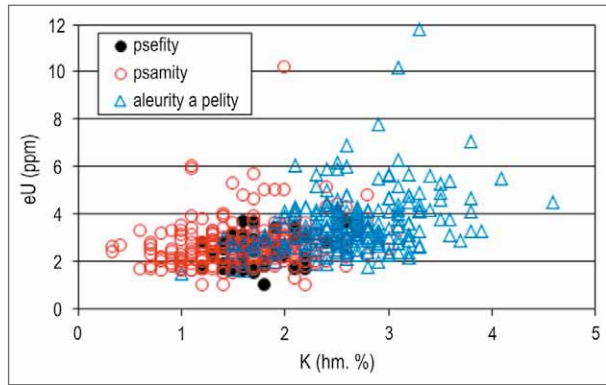
Na několika lokalitách byly odebrány průměrné vzorky jako více menších úlomků, z různých částí výchozů (lomů), s poměrným zastoupením typů hornin na lokalitě. Pro stanovení obsahu vzácných zemin, kovů a celkového uhlíku (TOT/C) byly homogenizované vzorky o hmotnosti 0,2 a 0,5 g rozkládány metaboritanem/tetraborátem lithným, kyselinou dusičnou a Aqua Regia a aplikovány standardní analytické procesy založené na hmotnostní spektrometrii ICP v laboratořích Acme-Labs (Bureau Veritas), Vancouver, Kanada.

Tab. 1: Obsahy přirozených radioaktivních prvků (K, U, Th) v paleozoických horninách na listu 15-31 Bruntál, vypočtené hodnoty hmotnostní aktivity ekvivalentu ^{226}Ra (a_m); n = počet vzorků, x = průměr.Tab. 1: Contents of the natural radioactive element (K, U, Th) in Palaeozoic rocks in the map sheet 15-31 Bruntál, calculated mass activity of ^{226}Ra equivalent (a_m); n = number of samples, x = arithmetic mean.

geol. jednotka/hornina	n	K (hm. %)				eU (ppm)				eTh (ppm)				a_m (Bq.kg ⁻¹)			
		min.	max.	med.	x	min.	max.	med.	x	min.	max.	med.	x	min.	max.	med.	x
<i>vrbská skupina</i>																	
fylity	6	1,5	4,0	2,8	2,7	< 1,5	1,5	< 1,5	< 1,5	1,8	12,5	6,7	6,6	59	181	111	127
metabazika	21	< 0,5	3,9	< 0,5	0,8	< 1,5	< 1,5	< 1,5	< 1,5	< 1,5	2,9	< 1,5	< 1,5	26	119	32	41
železné rudy	3	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 1,5	< 1,5	< 1,5	< 1,5	< 1,5	< 1,5	< 1,5	< 1,5	26	26	26	26
<i>stínávsko-chabičovské souvrství ve šternbersko-hornobenešovském pruhu</i>																	
paleobazalty	37	< 0,5	3,3	1,6	1,6	< 1,5	4,0	< 1,5	< 1,5	< 1,5	16,3	< 1,5	2,6	26	204	62	69
keratofyrové horniny	2	4,2	4,6	4,4	4,4	2,8	6,9	4,9	4,9	19,7	22,5	21,1	21,1	250	327	288	288
<i>líšeňské souvrství</i>																	
karbonátové horniny	9	< 0,5	1,7	0,8	0,9	< 1,5	2,5	1,5	1,5	2,2	10,9	4,1	5,2	36	131	58	72
<i>poníkevské souvrství</i>																	
silicity	23	< 0,5	2,7	< 0,5	0,8	< 1,5	3,0	< 1,5	< 1,5	< 1,5	8,0	< 1,5	2,8	26	133	34	52
<i>moravskoberouenské souvrství</i>																	
křemenné slepence	5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 1,5	< 1,5	< 1,5	< 1,5	< 1,5	< 1,5	< 1,5	< 1,5	26	26	26	26
křemenné pískovce	21	< 0,5	1,1	< 0,5	< 0,5	< 1,5	1,5	< 1,5	< 1,5	< 1,5	4,5	< 1,5	< 1,5	26	50	26	32
<i>andělskohorské souvrství</i>																	
psefity	10	0,6	1,9	1,5	1,3	< 1,5	2,5	< 1,5	< 1,5	5,6	11,7	8,1	8,3	59	141	97	97
psamity	69	0,6	2,8	1,3	1,4	< 1,5	3,5	1,8	1,8	3,3	16,6	8,4	8,8	59	171	101	107
aleurity a pelity	64	1,0	3,8	2,4	2,4	1,6	4,7	2,4	2,5	6,6	22,7	9,9	10,4	93	263	145	149
<i>hornobenešovské souvrství</i>																	
psefity	12	1,1	2,5	2,0	2,0	1,5	4,2	2,5	2,5	7,9	18,1	12,0	12,2	91	192	151	148
psamity	197	0,8	4,5	1,8	1,9	< 1,5	13,1	2,4	2,7	5,9	25,2	10,6	11,3	93	364	134	144
aleurity a pelity	56	1,5	4,6	2,7	2,8	1,7	26,2	2,9	5,4	7,7	43,3	13,0	16,2	121	624	174	228
<i>moravické souvrství</i>																	
psefity	27	1,2	2,0	1,6	1,6	< 1,5	3,7	1,6	1,6	3,6	11,5	7,2	7,3	67	140	100	100
psamity	51	0,6	2,8	1,6	1,6	< 1,5	5,3	2,1	2,2	5,8	24,4	10,1	10,4	73	236	121	126
aleurity a pelity	66	1,1	3,5	2,3	2,4	1,5	6,6	3,3	3,6	8,7	27,1	11,4	11,9	117	285	168	170

Tab. 2: Obsahy přirozených radioaktivních prvků (K, U, Th) v paleozoických horninách na listu 15-33 Moravský Beroun, vypočtené hodnoty hmotnostní aktivity ekvivalentu ^{226}Ra (a_m); n = počet vzorků, x = průměr.Tab. 2: Contents of the natural radioactive element (K, U, Th) in Palaeozoic rocks in the map sheet 15-33 Moravský Beroun, calculated mass activity of ^{226}Ra equivalent (a_m); n = number of samples, x = arithmetic mean.

geol. jednotka/hornina	n	K (hm. %)				eU (ppm)				eTh (ppm)				a_m (Bq.kg ⁻¹)			
		min.	max.	med.	x	min.	max.	med.	x	min.	max.	med.	x	min.	max.	med.	x
<i>stínávsko-chabičovské souvrství</i>																	
paleobazalty	54	< 0,5	8,2	3,8	3,9	< 1,5	7,3	< 1,5	1,6	< 1,5	3,9	2,5	2,5	20	231	126	127
železné rudy	7	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 1,5	2,7	< 1,5	< 1,5	< 1,5	4,0	< 1,5	1,9	26	62	26	37
<i>poníkevské souvrství</i>																	
silicity	30	< 0,5	2,7	1,3	1,3	< 1,5	3,3	< 1,5	< 1,5	< 1,5	11,0	4,7	5,0	26	141	75	76
<i>moravskoberouenské souvrství</i>																	
křemenné slepence	9	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 1,5	< 1,5	< 1,5	< 1,5	< 0,5	1,9	< 0,5	< 0,5	26	31	26	27
křemenné pískovce	19	< 0,5	0,8	< 0,5	< 0,5	< 1,5	< 1,5	< 1,5	< 1,5	< 0,5	2,6	< 0,5	< 0,5	26	46	26	29
<i>andělskohorské souvrství</i>																	
psamity	44	0,8	3,1	1,8	1,8	< 1,5	4,7	2,3	2,3	7,2	15,6	9,7	9,9	82	216	129	130
aleurity a pelity	12	1,2	2,9	2,4	2,2	1,6	3,7	2,5	2,5	8,5	12,8	9,6	10,0	112	168	144	142
<i>hornobenešovské souvrství</i>																	
psefity	3	< 0,5	0,9	< 0,5	< 0,5	< 1,5	1,8	< 1,5	< 1,5	< 1,5	4,9	1,7	2,5	26	72	30	43
psamity	154	0,7	3,2	1,9	1,9	< 1,5	8,3	2,5	2,7	6,7	20,3	10,4	10,7	84	259	138	141
aleurity a pelity	33	1,1	4,1	2,6	2,7	1,7	7,7	2,8	3,1	7,3	21,8	11,4	12,5	113	282	161	176
<i>moravické souvrství</i>																	
psefity	53	1,2	2,6	1,7	1,7	< 1,5	3,7	2,5	2,5	6,5	15,9	8,7	9,0	95	185	122	124
psamity	259	< 0,5	3,1	1,6	1,6	< 1,5	10,2	2,6	2,7	5,7	24,9	10,1	10,7	71	255	131	135
aleurity a pelity	229	1,0	4,6	2,6	2,6	1,5	11,8	3,3	3,6	6,6	31,4	12,0	12,4	81	330	175	179



Obr. 2: Obsahy draslíku a uranu v siliciklastických sedimentech moravického souvrství na mapovém listu 15-33 Moravský Beroun.

Fig. 2: Contents of potassium and uranium in siliciclastics of the Moravice Formation on the map sheet 15-33 Moravský Beroun.

Výsledky

Gamaspektrometrie hornin

Výsledky gamaspektrometrických stanovení obsahů K, U a Th v 1 585 horninových vzorcích jsou prezentovány v tabulkách 1 a 2. V případě psamitů a aleuritů + pelitů HS na listu 15-31 Bruntál byly při zpracování dat pro tabulku 1 vyloučeny výsledky 11 gamaspektrometrických analýz ze zóny s anomálně vysokou přirozenou radioaktivitou v lomu Valšov (viz níže).

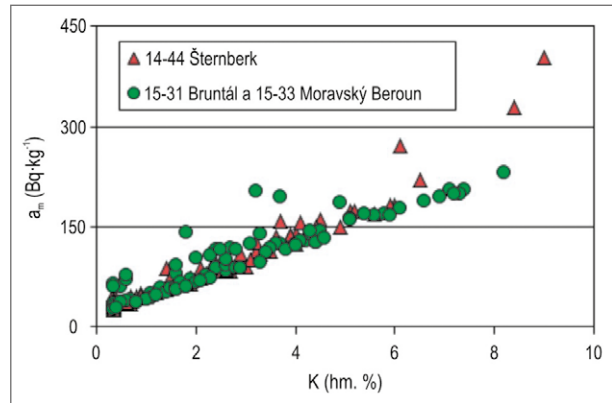
Vypočtená průměrná a_m pro celý soubor 1 596 vzorků paleozoických hornin na mapových listech 15-31 Bruntál a 15-33 Moravský Beroun je 138 Bq.kg^{-1} ($D = 67 \text{ nGy.h}^{-1}$). Pro siliciklastika AS, HS a MS (celkem 1 350 horninových vzorků) byla vypočtena průměrná a_m 150 Bq.kg^{-1} ($D = 73 \text{ nGy.h}^{-1}$).

Nejvyšší průměrné hodnoty a_m jsou ve všech třech flyšových souvrstvích ve skupině aleuritů a pelitů což souvisí s vyššími průměrnými obsahy K, U a Th v těchto horninách ve srovnání se siliciklastikou s psamitickou nebo psefittickou strukturou (tab. 1, 2). V případě K a U jsou tyto parametry nejvyšší v sedimentech MS na mapovém listu 15-33 Moravský Beroun (obr. 2). Horniny AS mají o něco nižší obsahy K, U a Th ve srovnání s horninami HS a MS (tab. 1, 2).

Ve studovaných spodnokarbonských sedimentech roste podíl tří sledovaných prvků na přirozené radioaktivitě v pořadí U–K–Th. Vyjdeme-li z vypočtených průměrných obsahů těchto tří prvků, pak je podíl U (a dceřiných izotopů) na hodnotě a_m ve všech třech zrnitostních kategoriích hornin shodně jen 25 %, vyšší podíl je u K v rozpětí 29 až 35 % a nejvyšší u Th (a dceřiných izotopů) 40 až 46 %.

Relativně vysoká přirozená radioaktivita byla zjištěna u keratofyrových hornin šternbersko-hornobenešovského pruhu na listu 15-31 Bruntál, které mají vyšší obsahy všech tří sledovaných prvků (tab. 1), odpovídající a_m 250 až 327 Bq.kg^{-1} ($D = 124$ až 159 nGy.h^{-1}).

Paleobazalty šternbersko-hornobenešovského pruhu (včetně jejich pyroklastik) vykazují vysokou variabilitu obsahů draslíku v rozpětí < 0,5 až 8,2 hm. % (tab. 1, 2). V paleobazaltech s vyššími obsahy K se objevují vyšší koncentrace uranu (až 7,3 ppm eU), což se projevuje vyššími



Obr. 3: Variační diagram draslík versus a_m pro paleobazalty (včetně jejich pyroklastik) šternbersko-hornobenešovského pruhu na mapových listech 14-44 Šternberk, 15-31 Bruntál a 15-33 Moravský Beroun.

Fig. 3: Variation diagram of potassium and a_m for paleobasalts (incl. their pyroclastics) of the Šternberk-Horní Benešov Belt on the map sheets 14-44 Šternberk, 15-31 Bruntál and 15-33 Moravský Beroun.

hodnotami a_m (obr. 3). Do obr. 3 byly začleněny i údaje o 85 vzorcích paleobazaltů z jižní části šternbersko-hornobenešovského pruhu na mapovém listu 14-44 Šternberk. V těchto vzorcích jsou gamaspektrometricky stanovené obsahy K v rozpětí < 0,5 až 9,0 hm. % (Zimák 2016).

Výrazně zvýšené obsahy U a Th byly zjištěny v sedimentech HS z lomu 300 m z. od železničního nádraží Valšov. Vzhledem ke značnému rozsahu lomu (plocha cca $400 \times 300 \text{ m}$) z něj bylo odebráno 10 horninových vzorků (droby, siltovce, siltové břidlice), převážně z halového materiálu. Ve všech vzorcích siltovců a siltových břidlic byly stanoveny překvapivě vysoké obsahy U a Th, a proto byly ze stěn lomu odebrány další vzorky siltovců, jejichž analýzy zvýšené obsahy obou prvků potvrdily, ale jen v určité části valšovského lomu. Na základě těchto

Tab. 3: Obsahy přirozených radioaktivních prvků (K, U, Th) a vypočtené hodnoty hmotnostní aktivity ekvivalentu ^{226}Ra (a_m) v horninách profilu ve valšovském lomu (vzorky 1–13 jsou zleva doprava, od Z k V, na obr. 4).

Tab. 3: Contents of the natural radioactive element (K, U, Th) and calculated mass activity of ^{226}Ra equivalent (a_m) in rocks of a section in the Valšov quarry (samples 1–13 arranged from left to right, from W to E, see Fig. 4).

vzorek	hornina	K (hm. %)	eU (ppm)	eTh (ppm)	a_m (Bq.kg^{-1})
1	siltovec	2,8	14,4	30,4	422
2	droba	2,3	13,1	25,2	364
3	siltovec	3,5	19,6	39,5	556
4	droba	2,3	12,0	19,9	319
5	siltovec	4,6	21,2	43,3	624
6	droba	1,7	10,8	21,6	300
7	siltovec	2,8	15,4	29,9	431
8	droba	2,0	10,5	20,1	295
9	siltovec	3,3	15,6	30,6	450
10	droba	2,1	10,0	17,2	274
11	siltovec	2,4	11,5	21,3	324
12	droba	1,6	10,1	20,4	282
13	siltovec	2,7	12,7	29,6	394

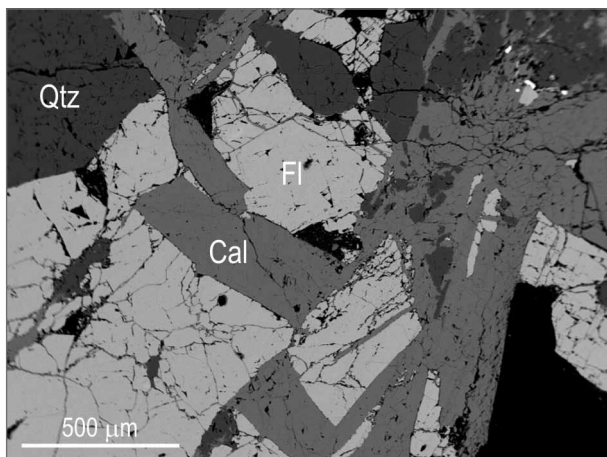


Obr. 4: Střídání siltovců a drob hornobenešovského souvrství ve valšovském lomu. Místa odběru vzorků: červené body = siltovce, oranžové body = droby. Uvedené hodnoty hmotnostní aktivity ekvivalentu ^{226}Ra (a_m) jsou uvedeny v $\text{Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$.

Fig. 4: Alternating siltstones and graywackes of the Horní Benešov Formation in the Valšov Quarry. Location of the studied samples: red circles = siltstones, orange circles = greywackes. Presented values of mass activity of ^{226}Ra equivalent (a_m) are given in $\text{Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$.

poznatků byl v severní stěně lomu vybrán profil o délce 2,6 m, v němž se střídají droby se siltovci (obr. 4), a odebráno 13 horninových vzorků. Výsledky analýz vzorků z tohoto profilu jsou označeny čísly 1 až 13 (tab. 3, seřazeny zleva doprava ve směru od Z k V na obr. 4). V tomto úseku lomu jsou nejen vysoké obsahy U a Th v siltovcích (max. 21,2 ppm eU a 43,3 ppm eTh), ale i v drobách (max. 13,1 ppm eU a 25,2 ppm eTh) a tomu odpovídají i extrémně vysoké hodnoty a_m : max. 624 $\text{Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$ pro siltovec, max. 364 $\text{Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$ pro drobu (obr. 4, tab. 3).

Do výpočtu průměrných obsahů K, U, Th a hodnot a_m (tab. 1) byly zahrnuty jen dva vzorky z tohoto profilu, a to siltovce s nejvyššími obsahy U a Th a droby s nejvyššími obsahy obou prvků, aby nedošlo k výraznému ovlivnění statistických hodnot hornin HS na listu 15-31 Bruntál.



Obr. 5: Křemenná žíla (Qtz) s kalcitem (Cal) a fluoritem (Fl). Lom Valšov. Obraz BSE.

Fig. 5: Quartz vein (Qtz) with calcite (Cal) and fluorite (Fl). The Valšov Quarry. BSE image.

Geochemie hornin a mineralizace v okolí Valšova

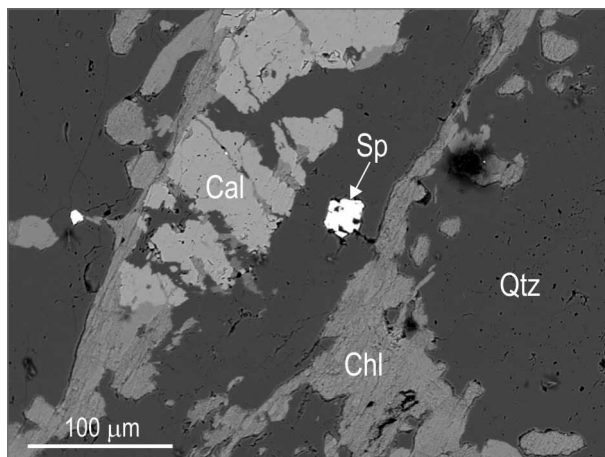
V okolí Valšova se střídají polohy jílových až siltových břidlic, siltovců a drob, které jsou protínány regionálními zlomy směru SZ–JV (obr. 1). V horninách jsou vyvinuty četné hydrotermální žíly, jejichž minerální asociace obsahuje kromě typických fází křemen±kalcit±chlorit i fluorit (obr. 5) a sulfidy (sfalerit, galenit, pyrit) (obr. 6), blíže nespecifikované uranonosné fáze malých rozměrů (cca 20 μm), v okolních horninách se objevuje novotvořený epidot a allanit-(Ce) (obr. 7). Fyzikálně-chemické podmínky vzniku těchto syntektonic-

kých žil byly studovány na fluidních inkluzích v křemenu, v nichž byly zjištěny nízkosalinní (do 6 hm. % NaCl ekv.) vodné roztoky systému H_2O -NaCl. Podmínky vzniku žil této generace byly s použitím teplot homogenizace, izochor a chloritového termometru (Cathelineau, Nieva 1985; Kranidiotis, MacLean 1987) definovány v rozsahu 175–285 $^{\circ}\text{C}$ a 110–340 MPa (Pořádek 2014).

Geochemické analýzy hornin (tab. 4) ukazují na vyšší obsahy některých prvků v břidlicích a siltovcích valšovského lomu ve srovnání s flyšovými sedimenty z jiných lokalit v HS nebo i AS. Zmíněné horniny z Valšova mají výrazně vyšší obsahy U a Th a také dalších stopových prvků jako např. Cs, Ga, Rb, Sn, Zr, REE (kromě Eu), Pb a As.

Diskuze

1. Míru přirozené radioaktivity jednotlivých typů hornin lze dobře posoudit na základě vypočtených



Obr. 6: Variská žíla s křemenem (Qtz), kalcitem (Cal), chloritem (Chl) a sfaleritem (Sp). Břidličná. Obraz BSE.

Fig. 6: The Variscan vein with quartz (Qtz), calcite (Cal), chlorite (Chl) and sphalerite (Sp). Břidličná. BSE image.

hodnot a_m (tab. 1, 2) a jejich srovnáním s průměrnou a_m kontinentální zemské kůry. Z klarků zveřejněných Goldschmidtem (1937): 2,59 hm. % K, 4 ppm U a 11 ppm Th (též Bouška et al. 1980) je vypočtena hodnota a_m 179 Bq.kg⁻¹ (D = 87 nGy.h⁻¹). Rudnick a Gao (2003) pro svrchní část zemské kůry kontinentálního typu uvádí hodnoty 2,80 hm. % K₂O (= 2,32 hm. % K), 2,7 ppm U a 10,5 ppm Th; těmto hodnotám odpovídá a_m 150 Bq.kg⁻¹ (D = 74 nGy.h⁻¹). S výjimkou keratofyrových hornin šternbersko-hornobenešovského pruhu lze proto zjištěnou přirozenou radioaktivitu všech ostatních měřených horninových typů (vyjádřenou průměrnou hodnotou a_m pro daný typ horniny) hodnotit ve srovnání s „průměrnou horninou svrchní části zemské kůry kontinentálního typu“ jako nižší nebo víceméně shodnou.

2. Draslík je v případě většiny analyzovaných vzorků paleobazaltů hlavním a často zcela dominantním zdrojem jejich přirozené radioaktivity (obr. 3). Vysoké koncentrace draslíku v bazických horninách některých úseků šternbersko-hornobenešovského pruhu byly již dříve známy díky letecké gamaspektrometrii (Gnojek, Přichystal 1984) a byly doloženy i chemickými analýzami (Přichystal 1990; Mixa, Orel 1993). Zvýšené obsahy draslíku v paleobazaltech lze považovat za indikátor hydrotermálních alterací, s nimiž by mohlo souviset formování sulfidické mineralizace typu SEDEX (Zimák 2016).

3. Postupné zvyšování radioaktivity flyšových sedimentů MSP v řadě psefit – psamit – aleurit + pelit již prokázali např. Manová, Matolín (1989), Zimák, Štelcl (2004) a Zimák (2012). Růst obsahů K a Th v této řadě je vysvětlitelný postupným snižováním objemu klastického křemene a současně zvyšováním podílu fylosilikátů v sedimentu. V případě U lze předpokládat vazbu na organickou hmotu, jejíž nejvyšší primární obsahy lze předpokládat při sedimentaci aleuritů a pelitů (redistribuce U v průběhu diagenese a dalších procesů je samozřejmě možná). Modální složení strukturně odlišných klastik a následně i jejich

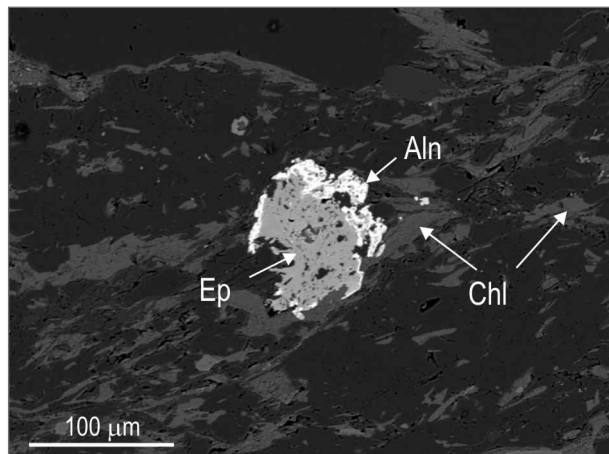
Tab. 4: Obsahy kovů a prvků vzácných zemin v horninách hornobenešovského (HS) a andělskohorského (AS) souvrství. DA – Dalov (jemnozrnná droba + prachovec, HS), BR – Břidličná (1 – prachovec + břidlice, 2 – břidlice + jemnozrnná droba + prachovec, AS), VL – Valšov (1 – břidlice, 2 – droba, HS), SN – Široká Niva (břidlice + droba až gravelit, AS/HS), DT – Dětrichovice (břidlice až slepence deformované, AS).

Tab. 4: Content of metals and REE in rocks of the Horní Benešov (HS) and Andělská Hora (AS) Fms. DA – Dalov (fine-grained greywacke + siltstone, HS), BR – Břidličná (1 – siltstone + shale, 2 – shale + fine-grained greywacke + siltstone, AS), VL – Valšov (1 – shale, 2 – greywacke, HS), SN – Široká Niva (shale + greywacke/gravelite, AS/HS), DT – Dětrichovice (shale to deformed conglomerate, AS).

	jednotky	DA	BR 1	BR 2	VL 1	VL 2	SN	DT
TOT/C	%	0,2	N.A.	0,42	0,3	0,21	N.A.	0,3
Ba	ppm	922	382	424	705	639	695	666
Be	ppm	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	1	< 1,0	2
Co	ppm	10,9	10,9	14,6	16,5	10	12,2	17,7
Cs	ppm	4,7	3,6	5,1	31,4	6,4	5,6	5,4
Ga	ppm	17,6	14,9	16,5	29,6	14,7	17,1	23
Hf	ppm	4,8	5,2	4,7	7,6	4,5	4,6	6,4
Nb	ppm	9,7	12,2	10,7	18,1	8,9	11,3	15,5
Rb	ppm	104,3	64	93,8	336,8	110,3	112,9	112,2
Sn	ppm	4	2	2	11	2	3	3
Sr	ppm	242,1	101	175,4	181,2	241,6	210,7	105,7
Ta	ppm	0,7	0,9	0,7	2	0,8	0,8	1,1
Th	ppm	12,9	7,3	9,8	29,5	10,8	11,4	11,6
U	ppm	4,5	2,5	3,2	12,9	4	3,3	3,3
V	ppm	82	91	98	114	71	92	137
W	ppm	1,5	1,3	1,8	4,1	1,3	1,4	2,1
Zr	ppm	184,1	182,4	163,9	251,9	163,6	167,8	219,4
Y	ppm	20,9	24,7	22,9	35,6	19,6	22,2	30,7
La	ppm	29,5	25,9	25,8	42,5	25,9	29,2	33,3
Ce	ppm	56,8	49,9	50,9	90,8	50,9	55,7	69,3
Pr	ppm	6,8	6,62	6,37	10,68	6,05	6,8	8,45
Nd	ppm	27,2	25,3	23,6	41	23,5	24,9	31,6
Sm	ppm	5,15	5,17	5,14	7,95	4,52	5,19	6,58
Eu	ppm	1,11	1,12	1,08	1,23	0,98	1,11	1,3
Gd	ppm	4,2	4,84	4,66	7,33	3,93	4,33	5,82
Tb	ppm	0,64	0,8	0,73	1,1	0,6	0,67	0,89
Dy	ppm	3,76	4,74	4,11	6,3	3,36	4,31	5,32
Ho	ppm	0,74	0,86	0,81	1,18	0,68	0,77	1
Er	ppm	2,27	2,62	2,49	3,59	2,12	2,26	3,21
Tm	ppm	0,34	0,42	0,37	0,52	0,31	0,35	0,47
Yb	ppm	2,14	2,5	2,29	3,46	2,16	2,26	2,82
Lu	ppm	0,33	0,34	0,37	0,5	0,31	0,34	0,48
Mo	ppm	0,4	0,2	0,2	0,6	0,2	0,1	0,2
Cu	ppm	13,2	25,1	27,3	31,5	16,8	27,3	37,5
Pb	ppm	18,8	12,3	16	23,8	17	18,6	18,7
Zn	ppm	58	74	91	99	58	74	110
Ni	ppm	26,7	44	44,2	43,2	27,8	34,3	52,7
As	ppm	5,1	14,5	13	33,5	10,8	11,8	14,2
Cd	ppm	< 0,1	< 0,1	< 0,1	0,1	0,1	< 0,1	0,1
Sb	ppm	0,2	0,3	0,5	0,5	0,4	0,3	0,2
Bi	ppm	0,2	0,2	0,2	1	0,2	0,3	0,3
Ag	ppm	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1
Au	ppb	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	1,5
Hg	ppm	0,01	0,09	0,16	0,04	0,02	0,07	0,09
Tl	ppm	< 0,1	< 0,1	< 0,1	0,3	< 0,1	< 0,1	< 0,1
Se	ppm	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5

N.A. – not analysed

radioaktivita jsou ovlivněny jak procesy probíhajícími během transportu a sedimentace v turbiditních systémech,



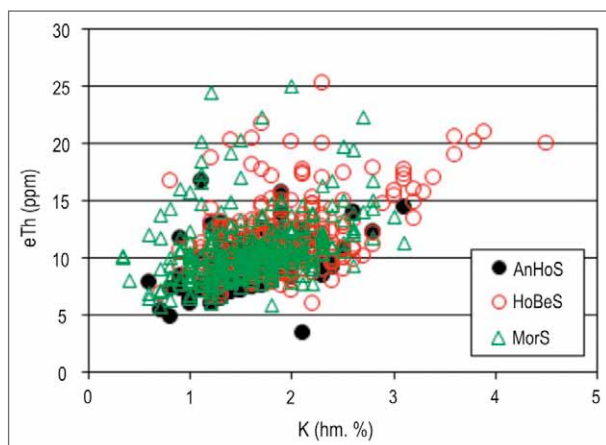
Obr. 7: Hydrotermální epidot (Ep) a allanit-(Ce) (Aln) v siltové až jílové břidlici s chloritem (Chl). Břidličná. Obraz BSE.

Fig. 7: Hydrothermal epidote (Ep) and allanite-(Ce) (Aln) in silty to clay shale with chlorite (Chl). Břidličná. BSE image.

tak zcela zásadně i petrografickými poměry ve snosové oblasti (Zimák, Štelcl 2004; Zimák 2012).

Obsah K, U a Th v psamitech AS, HS a MS je podobný a pomineme-li anomálně zvýšené obsahy U a Th v některých vzorcích psamitů z HS, pak jsou rozdíly mezi těmito souvrstvími jen nepatrné (obr. 8, 9). Dokládají to i mediánové hodnoty obsahů sledovaných prvků v psamitech, které jsou velmi blízké: 1,5 hm. % K, 1,9 ppm eU a 9,0 ppm eTh ($a_m = 114 \text{ Bq.kg}^{-1}$) v AS, 1,9 hm. % K, 2,4 ppm eU a 10,5 ppm eTh ($a_m = 135 \text{ Bq.kg}^{-1}$) v HS, 1,6 hm. % K, 2,5 ppm eU a 10,1 ppm eTh ($a_m = 129 \text{ Bq.kg}^{-1}$) v MS.

4. V prostoru valšovského lomu s vysokými hodnotami a_m drob a siltovců, a doloženými obsahy stopových kovů, se specifické geochemické rysy horninového prostředí odrážejí i ve složení variské žilné mineralizace. Tyto syntektonické mineralizace vznikají v souvislosti s deformací a slabou variskou metamorfózou hornin (Slobodník et al. 1997, Halavínová et al. 2005, Slobodník



Obr. 8: Obsahy draslíku a thoria v psamitech andělskohorského (AS), hornobenešovského (HS) a moravického souvrství (MS) na mapových listech 15-31 Bruntál a 15-33 Moravský Beroun.
Fig. 8: Contents of potassium and thorium in psammites of the Andělská Hora (AS), Horní Benešov (HS) and Moravice (MS) formations on the map sheets 15-31 Bruntál and 15-33 Moravský Beroun.

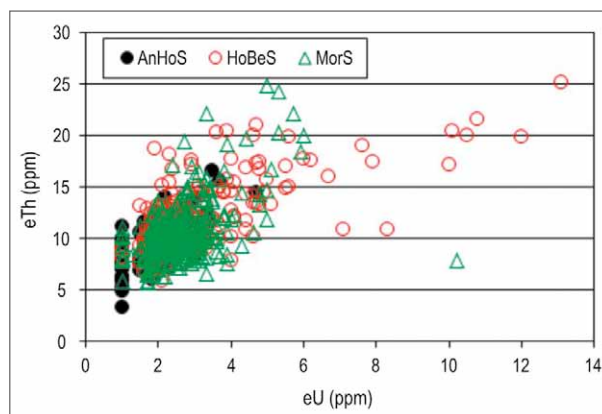
et al. 2008). Během zmíněných procesů dochází i k mobilizaci fluid a některých horninových složek za vzniku hydrotermálních žil.

Závěr

Zjištěné hodnoty a_m pro paleozoické horniny na mapových listech 15-31 Bruntál a 15-33 Moravský Beroun jsou nižší nebo víceméně shodné s hodnotami a_m spočítanými z klarků K, U a Th pro „průměrnou horninu svrchní části zemské kůry kontinentálního typu“, a lze tedy přirozenou radioaktivitu paleozoických hornin ve studovaném území hodnotit jako relativně nízkou. Radioaktivita hornin se mírně zvyšuje společně se zvyšováním obsahů radioaktivních prvků a kovů v horninách v pořadí psefit – psamit – aleurit + pelit a odpovídá zvyšování jílové frakce a organické hmoty.

Horniny s anomálně vysokými hodnotami a_m byly zjištěny na dvou územích: (1) Ve šternbersko-hornobenešovském pruhu na k. ú. Razová a Leskovec nad Moravicí (lokálně zjištěné – fragmenty? – keratofyrové horniny, až 6,9 ppm U a 22,5 ppm Th, $a_m = 327 \text{ Bq.kg}^{-1}$). (2) V siliciklastikách v lomu u Valšova jsou vysoké koncentrace U a Th (až 13,1 ppm U a 25,2 ppm Th, $a_m = 364 \text{ Bq.kg}^{-1}$), ve vzorcích siltovce až 21,2 ppm U a 43,3 ppm Th ($a_m = 624 \text{ Bq.kg}^{-1}$). Zvýšené obsahy uranu i dalších zmíněných prvků by se za určitých okolností mohly projevit nadlimitními koncentracemi uranu v místních vodních zdrojích. Zvýšené obsahy prvků jsou však lokální a s výskytem mimo oblasti s trvalým osídlením.

Zjištěné podmínky vzniku hydrotermálních žil u Valšova jsou typické pro variské žíly v celém MSP, ale jejich minerální asociace je pestřejší než na jiných lokalitách vzhledem k vyššímu zastoupení některých prvků v hostitelských horninách.



Obr. 9: Obsahy uranu a thoria v psamitech andělskohorského (AS), hornobenešovského (HS) a moravického (MS) souvrství na mapových listech 15-31 Bruntál a 15-33 Moravský Beroun.
Fig. 9: Contents of uranium and thorium in psammites of the Andělská Hora (AS), Horní Benešov (HS) and Moravice (MS) formations on the map sheets 15-31 Bruntál and 15-33 Moravský Beroun.

Poděkování

Výzkum hydrotermální mineralizace a geochemie hornin byl umožněn s využitím fondů institucionální podpory a specifického výzkumu PŘF MU. Autoři děkují recenzentům J. Havířovi a Z. Lososovi za poznámky a připomínky, které vedly ke zkvalitnění článku.

Literatura

- Beretka, J., Mathew, P. J. (1985). Natural radioactivity of Australian building materials, industrial wastes and by-products. – *Health Physics*, 48, 87–95. <http://dx.doi.org/10.1097/00004032-198501000-00007>
- Bouška, V., Jakeš, P., Pačes, T., Pokorný, J. (1980). *Geochemie*. – Academia. Praha. 555 s.
- Cathelineau, M., Nieva, D. (1985). A chlorite solid solution geothermometer. The Los Azufres (Mexico) geothermal system. – *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 91, 235–244. <https://doi.org/10.1007/BF00413350>
- Dvořák, J., Macoun, J., Maštera, L. (1991). Geologická mapa ČR 1 : 50 000. List 15–33 Moravský Beroun. – Český geologický ústav. Praha.
- Dvořák, J. (1995). Geologická mapa ČR 1 : 50 000. List 15–31 Bruntál. – Český geologický ústav. Praha.
- Eštoková, A., Palaščíková, L. (2013). Study of natural radioactivity of Slovak cements. – *Chemical Engineering Transactions*, 32, 1675–1680. <http://www.doi.org/10.3303/CET1332280>
- Gnojek, I., Přichystal, A. (1984). Metalogenetický význam leteckých draslíkových anomálií Nízkého Jeseníku. – *Acta Universitatis Carolinae, Geologica*, 4, 361–388.
- Goldschmidt, V. M. (1937). The principles of distribution of chemical elements in minerals and rocks. – *Journal of the Chemical Society*, 655–673.
- Halavínová, M., Slobodník, M., Krmíček, L., Kučera, J. (2005). Hydrotermální asociace na žilách v klastických horninách spodního karbonu Drahanské a Zábřežské vrchoviny: genetické aspekty. – *Geologické výzkumy na Moravě a ve Slezsku v r. 2004*, 12, 55–58. Brno.
- Kranidiotis, P., MacLean, W. H. (1987). Systematics of chlorite alteration at the Phelps Dodge massive sulfide deposit, Matagami, Quebec. – *Economic Geology*, 82, 1898–1911. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.82.7.1898>
- Manová, M., Matolín, M. (1989). Radioaktivita hornin ČSSR. – In: Ibrmajer, J. – Suk, M. et al.: *Geofyzikální obraz ČSSR*, 196–213. ÚÚG – Academia Praha.
- Matolín, M., Chlupáčová, M. (1997). Radioaktivní vlastnosti hornin. – In: Kobr, M. et al.: *Petrofyzika*, 109–126. Vydavatelství Karolinum, Praha.
- Mixa, P., Orel, P. (1993). Manifestation of Paleozoic submarine geothermal activity in the eastern part of Middle European Variscides (Czechoslovakia). – *Proceedings Eight IAGOD Symposium, Ottawa, Canada, August 12–18, 1990*, 505–511. Stuttgart.
- Ngachin, M., Garavaglia, M., Giovani, C., Kwato Njock, M. G., Nourreddine, A. (2007). Assessment of natural radioactivity and associated radiation hazards in some Cameroonian building materials. – *Radiation Measurements*, 42, 61–67. <https://doi.org/10.1016/j.radmeas.2006.07.007>
- Pořádek, P. (2014). Variské hydrotermální žíly v klastických sedimentech moravskoslezského paleozoika. – MS, diplomová práce. Přírodovědecká fakulta Masarykovy univerzity. Brno.
- Přichystal, A. (1990). Hlavní výsledky studia paleozoického vulkanismu ve šternbersko-hornobenešovském pruhu (Nízký Jeseník). – *Sborník geologických věd, řada ložisková geologie, mineralogie*, 29, 41–66.
- Rudnick, R. L., Gao, S. (2003). Vol. 3: The Crust, 3.01– The Composition of the Continental Crust. – In: Holland, H. D., Turekian, K. K. (eds): *Treatise on Geochemistry*, 1–64. Elsevier-Pergamon, Oxford. <http://dx.doi.org/10.1016/b0-08-043751-6/03016-4>
- UNSCEAR, United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (1988): Exposures from natural sources of radiation. – Report to the General Assembly. U. N., New York, USA.
- Slobodník, M., Muchez, Ph., Viaene, W. (1997). Hydrothermal fluid flow in the Devonian and Carboniferous of the Rhenohercynicum of the Bohemian Massif. – In: Papunen H. (ed.): *Mineral Deposits: Research and Exploration – Where do They Meet?*, p. 583–586. A.A.Balkema, Rotterdam, 980 p. Proceedings of the 4th Biennial SGA Meeting, 11–13 August 1997, Turku, Finland.
- Slobodník, M., Hurai, V., Čopjaková, R. (2008). Variská syntektonická fluida generovaná z paleozoických sedimentů Moravského krasu a Drahanské vrchoviny. – *Acta Musei Moraviae, Scientiae geologicae*, 93, 113–126. MZM Brno.
- Zimák, J. (2012). Přirozená radioaktivita kulmských sedimentů na východním okraji Českého masivu. – *Geologické výzkumy na Moravě a ve Slezsku*, 19, 1–2, 130–133.
- Zimák, J. (2016). Studium radioaktivity krystalinických hornin a paleozoických sedimentů na mapovém listu 14-44 Šternberk. – *Geologické výzkumy na Moravě a ve Slezsku*, 23, 1–2, 116–120.
- Zimák, J., Dalajková, K., Donocik, R., Krist, P., Reif, D., Štelcl, J., Kopecká, L. (2016). Využitelnost terénních rentgenfluorescenčních analyzátorů ke stanovení chemismu cementářských surovin – na příkladu velkolomu Mokrá. – *Zprávy o geologických výzkumech*, 49, 79–82.
- Zimák, J., Štelcl, J. (2004). Přirozená radioaktivita hornin moravskoslezského kulmu v oblasti Nízkého Jeseníku a Oderských vrchů: příspěvek k poznání zdrojové oblasti klastického materiálu. – *Geologické výzkumy na Moravě a ve Slezsku v roce 2003*, 11, 103–106.