

ANALÝZA LABORATORNÍCH HODNOT RADIOAKTIVITY HORNIN NA MAPOVÉM LISTU 15-11 ZLATÉ HORY

Analysis of laboratory values of rock radioactivity within the map sheet 15-11 Zlaté Hory

Jiří Zimák

Katedra geologie PřF UP, tř. 17. listopadu 12, 771 46 Olomouc; e-mail: jiri.zimak@upol.cz

(15-11 Zlaté Hory)

Key words: *Vrbno Group, Andělská Hora Formation, Horní Benešov Formation, Moravice Formation, Peruc-Korycany Formation, gamma-spectrometry*

Abstract

Natural radioactive elements (potassium, uranium and thorium) abundances were measured in 769 samples of metamorphic and igneous rocks and pre-Cenozoic sedimentary rocks from all geological units on the map sheet 15-11 Zlaté Hory, using a laboratory gamma-ray spectrometer. Metamorphic rocks belong to two geological units of the Silesicum: to the Vrbno Group (a volcano-sedimentary complex composed mainly of phyllites, quartzites, amphibolites, greenschists, acid to intermediate metavolcanites and their metatuffs) and the Desná Group (metagranites and blastomylonites). Unmetamorphosed pre-Cenozoic sedimentary rocks are represented by three Variscan flysch formations – the Andělská Hora, Horní Benešov, and Moravice Fms. (rocks of the first formation are unmetamorphosed to anchimetamorphosed), only in small areas by Cretaceous sandstones of the Peruc-Korycany Formation and Devonian limestones of the Líšeň Formation. Unmetamorphosed magmatites are represented by granitoids, lamprophyres and microgabbro. From calculated values of mass activity of ^{226}Ra equivalent it is evident that natural radioactivity of most of the studied rocks is low. Slightly increased mass activity values were found in feldspar-rich quartzites (186 Bq.kg^{-1} on average), metakeratophyres (200 Bq.kg^{-1}) and felsic metatuffs (229 Bq.kg^{-1}) of the Vrbno Group.

Úvod

Jedním z parametrů přírodního prostředí je jeho přirozená radioaktivita, která je při hodnocení větších území často vyjadřována formou radiometrických map (např. Manová – Matolín 1995). Podkladem pro tyto mapy bývají výsledky letecké gamaspektrometrie (stanovovány jsou koncentrace K, U a Th), někdy však vycházejí jen z letecky měřené úhrnné aktivity gama. Na základě aeroradiometrie lze posoudit přirozenou radioaktivitu jednotlivých geologických jednotek i odhadnout kategorii radonového rizika, avšak z více důvodů není možno zhodnotit přirozenou radioaktivitu jednotlivých horninových typů (viz např. Zimák 2015a).

Tento článek sumarizuje a stručně komentuje výsledky laboratorních gamaspektrometrických analýz vzorků metamorfů, magmatitů a předkenozoických sedimentů na mapovém listu 15-11 Zlaté Hory. Západní část tohoto listu je součástí silezika, zastoupeného zde hlavně vrben-skou skupinou (metamorfovaný vulkanosedimentární komplex s významným podílem produktů jak kyselého až intermediárního vulkanismu, tak bazického vulkanismu) a desenskou skupinou (metagranity a blastomylonity). Střední a východní část listu je budována třemi variskými flyšovými souvrstvími – andělskohorským, hornobenešovským a moravickým. Při východním okraji listu vystupují ostrůvky paleozoických vápenců líšeňského souvrství a křídové pískovce perucko-korycanského souvrství. Nemetamorfované magmatity jsou zastoupeny variskými granitoidy (Ondřejovice v Jeseníkách), lamprofyry (Jindřichov ve Slezsku) a mikrodioritem (Dolní Údolí).

Vzorky a metody

Na listu 15-11 Zlaté Hory bylo na 362 lokalitách odebráno 769 vzorků reprezentujících jak dominantní horninové typy ve všech výše zmíněných geologických jednotkách a jejich částech, tak i horniny, které jsou na ploše listu zastoupeny jen zcela lokálně. Determinace hornin byla prováděna jen makroskopicky. To působilo zásadní problémy pouze u některých hornin zlatohorského rudního revíru, kde však jejich systematické zařazení a zejména určení povahy protolitu bývá obtížné nebo nemožné i při použití laboratorních metod.

V horninových vzorcích byly na PřF UP v Olomouci za použití spektrometru SG – 1000 LAB s NaI(Tl) detektorem o objemu $0,35 \text{ dm}^3$ (průměr 76 mm, délka 76 mm) stanoveny obsahy K, U a Th (na základě dečirých produktů, a proto jsou jejich 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 a_m a D (viz níže) 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. Před měřením byly horninové vzorky rozdrceny a uzavřeny do krabiček o objemu 250 ml, v nichž byly následně měřeny. Hmotnost takto připravených vzorků se pohybovala kolem 400 gramů.

Přirozená radioaktivita hornin je hodnocena na základě hmotnostní aktivity ekvivalentu ^{226}Ra (a_m) a též dávkového příkonu záření gama terestrického původu (D). Z výsledků gamaspektrometrických analýz byly tyto parametry vypočteny pomocí vztahů $a_m [\text{Bq.kg}^{-1}] = (0,077 \times 313K) + 12,35U + (1,43 \times 4,06\text{Th})$, $D [\text{nGy.h}^{-1}] = (0,043 \times 313K) + (0,427 \times 12,35U) + (0,662 \times 4,06\text{Th})$,

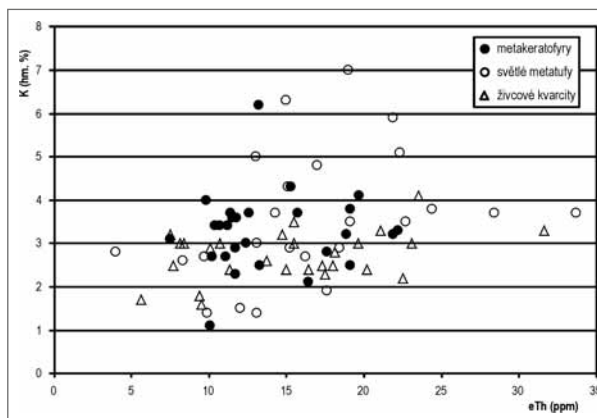
do nichž je obsah K dosazován v hm. %, obsahy U a Th v ppm (UNSCEAR 1988; Matolín – Chlupáčová 1997; Ngachin et al. 2007).

Výsledky

Výsledky všech provedených laboratorních gama-spektrometrických měření jsou shrnuty v tabulkách 1 a 2. Přirozenou radioaktivitu horninového prostředí na listu 15-11 Zlaté Hory lze považovat za nízkou. Průměrná hmotnostní aktivita hornin zde s výjimkou některých metamorfítů vrbenské skupiny (živcové kvarcitty, metakeratofyry a světlé metatufy) nedosahuje hodnot vypočtených pro průměrnou zemskou kůru (kolem 180 Bq.kg⁻¹). Významné či zajímavé poznatky jsou komentovány v následující kapitole.

Diskuze

1. Ve vrbenské skupině na listu 15-11 Zlaté Hory (Otava et al. 1992) byly mapujícími geology rozlišeny troje kvarcitty. Bází skupiny tvoří tzv. drakovské kvarcitty, které do nadloží přecházejí do fylitů nebo svorů s vložkami kvarcítů. Tyto bazální a vložkové kvarcitty se vyskytují pouze z. od linie Ondřejovice – Dolní Údolí – Horní Údolí, tj. mimo prostor zlatohorského rudního revíru. Protolitem drakovských kvarcítů byly křemenné písky nebo šterky. To ale neplatí pro kvarcitty na agrárních haldách západně od Ondřejovic. Vedle typických drakovských kvarcítů se zde vyskytují i živcové kvarcitty (ve všech třech analyzovaných vzorcích byly zjištěny obsahy draslíku v rozpětí 2,4 až 2,5 hm. % K, podíl slíd na složení těchto hornin je jen nepatrný). Vznik jejich protolitu by mohl souviset s kyselým nebo intermediárním vulkanismem (o lokálních



Obr. 1: Obsahy thoria a draslíku v metakeratofyrech, světlých metatufech a živcových kvarcitech vrbenské skupiny.

Fig. 1: Thorium and potassium contents in metakeratophyres, felsic metatuffs and feldspar-rich quartzites of the Vrbno Group.

projevch kyselého vulkanismu ve spodní části drakovských kvarcítů se zmiňuje Koverdinský 1993). Výše zmíněné vložkové kvarcitty v parabřidlicích se makroskopicky podobají běžným „neživcovým“ drakovským kvarcítům, někdy však obsahují značný podíl slíd a plynule přecházejí do okolních metapelitů (v 9 vzorcích vložkových kvarcítů byly zjištěny obsahy draslíku do 0,8 hm. % K, ve vzorku s vysokým podílem slíd 2,1 hm. % K). Stratigraficky výše ležící „kvarcitty Příčné hory“ vystupují jen ve zlatohorském rudním revíru. V horizontu „kvarcítů Příčné hory“ jsou kromě masivních kvarcítů přítomny muskovitické a chloritické kvarcitty (s přechody do kvarciticích fylitů) a hojně též živcové kvarcitty, prostorově spjaté s metakeratofyry a světlými metatufy (metatufy?) – viz např. Hettler et al.

Tab. 1: Obsahy přirozených radioaktivních prvků (K, U, Th) v horninách vrbenské skupiny, v horninách v podloží vrbenské skupiny, mikrodioritu a granitu, vypočtené hodnoty hmotnostní aktivity (a_m); n = počet vzorků, x = průměr.

Tab. 1: Contents of the natural radioactive elements (K, U, Th) in rocks of the Vrbno Group, in rocks underlying the Vrbno Group, microdiorite and granite, calculated mass activity (a_m); n = number of samples, x = average.

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>vrbenská skupina</i>																	
fylyty	66	1,1	6,9	2,9	3,1	< 1,5	4,3	2,2	2,2	5,3	28,0	12,0	11,7	89	378	167	171
kvarcitty	32	< 0,5	2,9	< 0,5	0,7	< 1,5	9,5	< 1,5	< 1,5	< 1,5	12,2	2,6	3,6	26	149	43	55
živcové kvarcitty	27	1,6	4,1	2,8	2,7	< 1,5	9,4	2,0	2,6	5,6	31,6	15,5	15,2	92	379	182	186
metakeratofyry	27	1,1	6,2	3,3	3,3	< 1,5	5,9	3,2	3,3	7,5	22,2	12,4	13,9	114	284	191	200
světlé metatufy	24	1,4	7,0	3,5	3,6	< 1,5	7,1	3,4	3,6	4,0	33,7	15,7	16,8	122	347	214	229
metabazika	64	< 0,5	4,3	< 0,5	< 0,5	< 1,5	4,8	< 1,5	< 1,5	< 1,5	7,1	< 1,5	1,6	26	122	26	35
ortoruly	3	< 0,5	0,5	< 0,5	< 0,5	< 1,5	1,8	< 1,5	< 1,5	4,6	5,9	5,3	5,3	47	69	51	56
mramory	15	< 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	30	26	27
svory	7	2,0	5,4	2,8	3,2	1,5	3,6	2,3	2,4	8,1	16,1	11,5	11,7	133	204	185	174
pararuly	9	0,8	4,1	2,2	2,3	< 1,5	3,6	1,8	2,0	2,1	10,7	7,1	6,4	79	183	106	117
<i>horniny v podloží vrbenské skupiny</i>																	
blastomylonity	10	1,6	3,8	3,0	3,0	1,6	7,4	1,7	2,4	8,8	12,9	9,9	10,6	113	239	158	164
metagranitoidy	4	1,5	4,5	2,8	2,9	< 1,5	2,3	1,6	1,6	3,2	8,0	5,3	5,4	67	162	128	121
svory a svorové ruly	4	2,0	2,7	2,4	2,4	1,8	2,8	2,0	2,1	6,0	7,3	7,0	6,8	113	132	122	123
ruly	6	0,9	2,6	1,1	1,4	1,6	2,3	2,0	2,0	6,3	7,9	7,4	7,3	84	136	91	99
<i>mikrodiorit a granit</i>																	
mikrodiorit	3	0,8	1,7	1,1	1,2	1,6	1,8	1,8	1,7	10,1	11,6	11,1	10,9	106	119	116	114
granit	7	1,6	2,8	2,3	2,3	< 1,5	3,8	1,7	1,9	2,6	44,4	3,8	9,9	73	343	101	136

Tab. 2: Obsahy přirozených radioaktivních prvků (K, U, Th) v horninách líšeňského, andělskohorského, hornobenešovského, moravického a perucko-korycanského souvrství a v lamprofyrech vystupujících v andělskohorském souvrství, vypočtené hodnoty hmotnostní aktivity (a_m); n = počet vzorků, x = průměr.

Tab. 2: Contents of the natural radioactive elements (K, U, Th) in rocks of the Líšeň, Andělská Hora, Horní Benešov, Moravice, and Peruc-Korycany Formations, and in lamprophyres outcropping in the Andělská Hora Formation, calculated mass activity (a_m); n = number of samples, x = average.

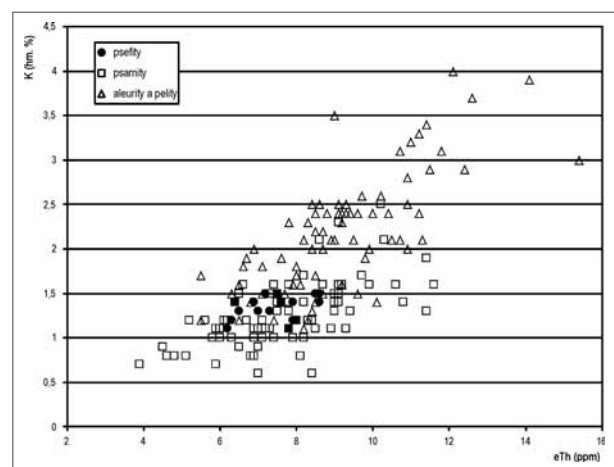
geol. jednotka/ hornina	n	K (hm. %)				eU (ppm)				eTh (ppm)				a_m (Bq.kg ⁻¹)			
		min.	max.	med.	x	min.	max.	med.	x	min.	max.	med.	x	min.	max.	med.	x
<i>líšeňské souvrství</i>																	
vápence	6	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 1,5	1,7	< 1,5	< 1,5	< 1,5	2,2	1,7	1,6	26	40	31	31
<i>andělskohorské souvrství a lamprofyry v něm vystupující</i>																	
psefity	17	1,1	1,5	1,4	1,3	< 1,5	2,3	1,7	1,6	6,2	8,6	7,5	7,4	75	113	94	95
psamity	81	0,6	2,5	1,2	1,3	< 1,5	3,5	2,0	1,9	3,9	11,6	7,6	7,7	52	145	99	99
aleurity a pelity	79	1,1	4,0	2,1	2,2	< 1,5	4,2	2,1	2,2	5,5	15,4	9,0	9,2	83	203	129	134
lamprofyry	11	1,1	2,6	1,7	1,8	< 1,5	2,6	1,8	1,8	6,7	10,2	8,9	8,5	85	151	109	115
<i>hornobenešovské souvrství</i>																	
psefity	9	1,3	2,0	1,7	1,7	1,8	2,6	2,2	2,1	7,6	11,0	9,5	9,5	105	140	121	123
psamity	59	0,6	2,7	1,8	1,7	< 1,5	4,3	2,4	2,4	3,4	15,3	10,8	10,3	47	200	137	131
aleurity a pelity	19	1,6	3,0	2,1	2,2	1,8	3,2	2,4	2,5	8,8	13,2	10,8	10,6	117	186	146	145
<i>moravické souvrství</i>																	
psefity	21	1,2	3,0	1,7	1,9	< 1,5	4,0	2,3	2,4	5,7	14,9	9,5	10,0	87	196	135	133
psamity	111	< 1,5	4,0	1,9	2,0	< 1,5	5,4	2,5	2,6	2,0	17,6	10,5	10,9	32	243	140	143
aleurity a pelity	30	1,1	3,1	2,3	2,2	2,5	6,2	3,4	3,7	7,5	22,0	12,4	12,4	105	249	168	171
<i>perucko-korycanské souvrství</i>																	
psamity	18	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 1,5	1,5	< 1,5	< 1,5	< 1,5	3,6	< 1,5	< 1,5	26	42	26	28

(1977) a Fojt et al. (2001). Přirozená radioaktivita kvarcitů („neživcových“) je bez ohledu na jejich stratigrafickou pozici velmi nízká, jejich a_m je v průměru jen 55 Bq.kg⁻¹ (tab. 1). Živcové kvarcité mají relativně vysoké obsahy všech tří sledovaných prvků (tab. 1 a obr. 1 – tři vzorky v tomto souboru hornin pochází z drakovských kvarcitů, zbývajících 24 vzorků reprezentuje živcové kvarcité z horizontu „kvarcitů Příčné hory“), jejich průměrná a_m je 186 Bq.kg⁻¹ (D = 91 nGy.h⁻¹). Protolitem živcových kvarcitů jsou patrně produkty kyselého nebo intermediárního vulkanismu (včetně tufitů), jejichž složení mohlo být výrazně ovlivněno hydrotermálními alteracemi. Živcové kvarcité se svými obsahy K, U a Th velmi podobají metakeratofyry a světlým metatufům, které jsou součástí horizontu „kvarcitů Příčné hory“ (tab. 1, obr. 1).

2. Horninami s nejvyšší přirozenou radioaktivitou na listu 15-11 Zlaté Hory jsou metakeratofyry a světlé metatufy vrbenské skupiny (v horizontu „kvarcitů Příčné hory“). To je dáno nadklarkovými obsahy K, U a Th, které jsou v obou skupinách hornin velmi podobné – viz data v tabulce 1 a obrázku 1 (nutno ale poznamenat, že některé horniny zde považované za metatufy mohou být ve skutečnosti efuzívy, změněnými hydrotermálními alteracemi a termodynamickou metamorfózou na horniny připomínající metamorfovaná pyroklastika). Průměrná a_m metakeratofyry je 200 Bq.kg⁻¹ (D = 99 nGy.h⁻¹), světlých metatufů 229 Bq.kg⁻¹ (D = 113 nGy.h⁻¹).

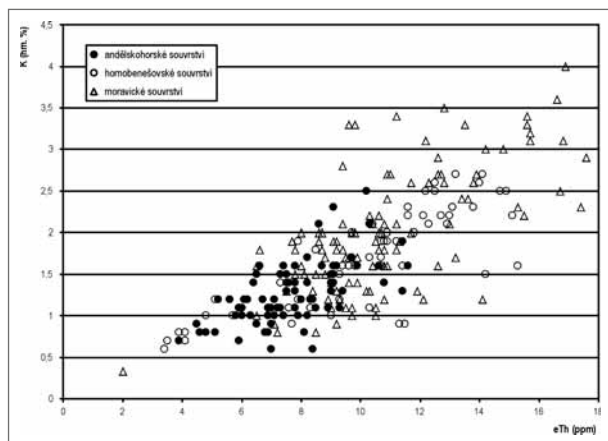
3. V siliciklastikách andělskohorského, hornobenešovského a moravického souvrství dochází ke zvyšování průměrných obsahů K, U a Th s klesající velikostí klastů, tedy v pořadí slepence – droby a pískovce – prachovce, siltové břidlice a jílové břidlice (tab. 2). Obsahy thoria a draslíku v horninách andělskohorského souvrství jsou

vyjádřeny na obrázku 2. Výrazně vyšší obsahy K a Th ve skupině aleuritů a pelitů ve srovnání s psamity a psefity jsou z obrázku 2 zcela zřejmé. Průměrné obsahy K a také Th v psamitech a psefitech andělskohorského souvrství jsou prakticky shodné (viz tab. 2), obr. 2 ukazuje velmi široké rozpětí obsahů K a Th ve skupině psamitů, v níž jsou poměrně hojně zastoupeny křemenné pískovce s relativně nízkými obsahy obou sledovaných prvků. Nutno poznamenat, že růst přirozené radioaktivity hornin flyšového souvrství se zmenšující se zrnitostí je v podstatě obecným jevem (samozřejmě s možnými výjimkami), v moravsko-slezském kulmu doloženým již např. Manovou – Matolínem (1989), Zimákem – Štelclem (2004) a Zimákem (2012).



Obr. 2: Obsahy thoria a draslíku v psamitech andělskohorského, hornobenešovského a moravického souvrství.

Fig. 2: Thorium and potassium contents in psamites of the Andělská Hora, Horní Benešov and Moravice Formations.



Obr. 3: Obsahy thoria a draslíku v sedimentech andělskohorského souvrství.

Fig. 3: Thorium and potassium contents in sedimentary rocks of the Andělská Hora Formation.

4. Průměrné obsahy jednotlivých sledovaných prvků a též vypočtené hodnoty a_m v rámci shodného strukturního typu siliciklastického sedimentu vždy rostou od andělskohorského souvrství přes hornobenešovské k moravickému (tab. 2, obr. 3). Tento trend je doložitelný i v jiných úsecích moravskoslezského kulmu, a nutno poznamenat, že zvyšování obsahů K, U a Th (a následně hodnot a_m) dále pokračuje do souvrství hradecko-kyjovického (Zimák – Štelcl 2004, Zimák 2012, 2015b). Látkové složení siliciklastik moravskoslezského kulmu včetně obsahu přirozených radioaktivních prvků výraznou měrou závisí na petrografických poměrech ve snosové oblasti. Ve zdrojové oblasti klastického materiálu andělskohorského souvrství převažovaly epizonálně metamorfované

horniny (kvarcity, metalydity, fylity, metavulkanity) a anchimetamorfované sedimenty (viz např. Dvořák 1994). Tomu odpovídají nízké obsahy K, U a Th v sedimentech andělskohorského souvrství. Ze zvyšujících se obsahů sledovaných prvků v sedimentech hornobenešovského, moravického a hradecko-kyjovického souvrství usuzují již Zimák – Štelcl (2004) na významný (a patrně stále rostoucí) podíl kyselých magmatitů ve zdrojové oblasti klastického materiálu (to je zcela v souladu s údaji o modálním složení psefitů a psamitů těchto souvrství – viz např. Maštera 1975; Dvořák 1994; Tomášková – Přichystal 1995).

Závěr

Průměrná hmotnostní aktivita jednotlivých typů metamorfitů, magmatitů a předkenozoických sedimentů na mapovém listu 15-11 Zlaté Hory většinou nedosahuje hodnot vypočtených pro průměrnou zemskou kůru (kolem 180 Bq.kg^{-1}). Mírně zvýšená průměrná hmotnostní aktivita byla zjištěna pouze u některých metamorfitů vrbenké skupiny, jejichž protolitem byly produkty kyselého až intermediárního vulkanismu nebo horniny obsahující podstatný podíl pyroklastického materiálu uvedeného složení. Jde o živcové kvarcity (v průměru 186 Bq.kg^{-1}), metakeratofyry (200 Bq.kg^{-1}) a světlé (ketatofyrové) metatufy (229 Bq.kg^{-1}), vystupující v prostoru zlatohorského rudního revíru.

Poděkování

Autor děkuje editorovi RNDr. Davidu Buriánkovi, Ph.D. a recenzentům RNDr. Zuzaně Skácelové a doc. RNDr. Jindřichu Štelcovi, CSc. za cenné rady a připomínky, které přispěly ke zkvalitnění tohoto článku.

Literatura

- Dvořák, J. (1994): Variský flyšový vývoj v Nížkém Jeseníku na Moravě a ve Slezsku. – ČGÚ Praha.
- Fojt, B. – Hladíková, J. – Kalenda, F. (2001): Zlaté Hory ve Slezsku – největší rudní revír v Jeseníkách. Část 2.: C. Geologie D. Mineralogie E. Geochemie stabilních izotopů. – Acta Musei Moraviae, Scientiae geologicae, 86, 3–58. Brno.
- Hettler, J. – Skácel, J. – Tomšík, J. (1977): Rudní revír Zlaté Hory. – Sborník Geologického průzkumu Ostrava, 13, 1–149. Ostrava.
- Koverdinský, B. (1993): Geologické problémy silezika. In Přichystal, A. – Obstová, V. – Suk, M. (ed.): Geologie Moravy a Slezska, 31–40. – Moravské zemské muzeum a Sekce geologických věd PřF MU, Brno.
- Manová, M. – Matolín, M. (1989): Radioaktivita hornin ČSSR. – In: Ibrmajer, J. – Suk, M. et al.: Geofyzikální obraz ČSSR, 196–213. ÚÚG – Academia Praha.
- Manová, M. – Matolín, M. (1995): Radiometrická mapa České republiky 1 : 500 000. – ČGÚ Praha.
- Maštera, L. (1975): Petrografie slepenců moravických vrstev a hradeckých drob v Nížkém Jeseníku. – Výzkumné práce Ústředního ústavu geologického, 8, 25–36. Praha.
- Matolín, M. – Chlupáčová, M. (1997): Radioaktivní vlastnosti hornin. – In: Kobr, M. et al.: Petrofyzika, 109–126. – Vydavatelství Karolinum, Praha.
- 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.
- Otava, J. – Sekyra, J. – Opletal, M. – Maštera, L. (1992): Geologická mapa ČR 1 : 50 000. List 15-11 Zlaté Hory. – Český geologický ústav.
- Tomášková, A. – Přichystal, A. (1995): Valouny vulkanitů z kulmských slepenců: pravděpodobná geotektonická pozice a možné zdrojové oblasti vulkanitů. – Geologické výzkumy na Moravě a ve Slezsku v roce 1994, 75–77. Brno.
- 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.
- 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. (2015a): Vztah mezi přirozenou radioaktivitou hornin a půd na nich vytvořených – základní problém interpretace dat získaných leteckou a terénní gamaspektrometrií. – Geologické výzkumy na Moravě a ve Slezsku, 22, 1–2, 80–83.
- Zimák, J. (2015b): Přirozená radioaktivita metamorfítů, magmatitů a předkenozoických sedimentů na mapovém listu 15-13 Vrbno pod Pradědem. – Acta Musei Moraviae, Scientiae geologicae, 100, 1, 69–73.
- Zimák, J. – Štelcl, J. (2004): Přirozená radioaktivita hornin moravskoslezského kulmu v oblasti Nížkého Jeseníku a Oderských vrchů: příspěvek k poznání zdrojové oblasti klastického materiálu. – Geologické výzkumy na Moravě a ve Slezsku v roce 2003, 11, 103–106.