

PŘIROZENÁ RADIOAKTIVITA METAMORFITŮ A MAGMATITŮ NA MAPOVÉM LISTU 14-22 JESENÍK

NATURAL RADIOACTIVITY OF METAMORPHIC AND IGNEOUS ROCKS
IN THE MAP SHEET 14-22 JESENÍK

JIRÍ ZIMÁK

Abstract

Zimák, J. (2017): Přirozená radioaktivita metamorfitů a magmatitů na mapovém listu 14-22 Jeseník. - Acta Mus. Moraviae, Sci. Geol., 103, 2, 63-79.

Natural radioactivity of metamorphic and igneous rocks in the map sheet 14-22 Jeseník

The paper provides detailed information about natural radioactivity of crystalline rocks in the map sheet 14-22 Jeseník in the northeastern part of the Bohemian Massif. Magmatic and metamorphic rocks on the western edge of the map sheet belong to the Lugicum, namely to the Sněžník-Gieraltów Group (gneisses and granulites dominate), the Staré Město Group (gneisses, quartzites, amphibolites and metatonalite), and the Velké Vrbno Group (gneisses, mylonites, amphibolites and leptynites prevail). The rest of the map sheet belongs to the Silesicum, namely to the Branná Group (phyllites, marbles, quartzites and metadacite prevail), the Keprník Group (mainly gneisses and mica schists) and the Vrbno Group (mainly mica schists, gneisses, quartzites, amphibolites, greenschists, and metamorphosed acid to intermediate volcanites). The Silesicum contains Variscan I-type granitoid bodies: the Žulová Pluton is the largest of them. In the Žulová Pluton and in its mantle (gneisses and migmatites dominate) there are dispersed numerous pegmatite bodies. Calcic skarns composed mainly of grossular, vesuvianite, epidote, diopside and quartz occur in the Žulová Pluton mantle.

Potassium, uranium and thorium contents were measured using a laboratory gamma-ray spectrometer in more than two thousand rock samples. It is evident from the calculated values of mass activity of ^{226}Ra equivalent (a_m) that the natural radioactivity of major rock types is lower or approximately the same as the natural radioactivity of the average Earth crust (about 180 Bq.kg^{-1}). Slightly higher a_m values were measured in granitoids of the Žulová Pluton (in average 195 Bq.kg^{-1}), biotite plagioclase gneiss of the Vrbno Group (209 Bq.kg^{-1}) and acid to intermediate metavolcanic rocks of the Vrbno Group (242 Bq.kg^{-1}). The uranium and thorium contents are anomalously high in Ca-skarns in the Žulová Pluton mantle: 104 ppm U and 254 ppm Th in a sample with highest radioactivity ($a_m = 2769 \text{ Bq.kg}^{-1}$), vesuvianite can be considered the main uranium-hosting mineral in the studied rocks.

Key words: Silesicum, Lugicum, laboratory gamma-spectrometry, gamma dose rate, uranium, thorium.

Jiří Zimák: Department of Geology, Faculty of Science, Palacký University, 17. listopadu 12, 771 46 Olomouc; e-mail: jiri.zimak@upol.cz

1. ÚVOD

Naše populace je vystavena ionizujícímu záření, jehož převážná část má terestrický původ a primárně souvisí s přítomností přirozených primordiálních radionuklidů v horninovém prostředí (viz BEAMISH 2014). Jak uvádí například BENCKO *et al.* (2011), lze rozlišit dvě hlavní skupiny zdrojů radiační zátěže obyvatelstva: i) přírodní zdroje, k nimž patří

radon vdechovaný z ovzduší (způsobující radiační zátěž 1,2 mSv/rok), litosferická radiace (0,5 mSv/rok), radiace z potravin (0,3 mSv/rok) a radiace kosmického původu (0,4 mSv/rok), ii) antropogenní zdroje, kdy radiační zátěž souvisí se získáváním jaderné energie, jadernými zkušebními a také haváriemi jaderných zařízení (v sumě 0,01 mSv/rok).

Tento článek sumarizuje údaje o obsazích tří hlavních přirozených radioaktivních prvků (draslík, uran, thorium) v metamorfitech a magmatitech na mapovém listu 14–22 Jeseník, získané na základě laboratorních gamaspektrometrických analýz 2100 horninových vzorků. Přirozená radioaktivita všech hlavních typů studovaných hornin je hodnocena na základě vypočtené hmotnostní aktivity ekvivalentu ^{226}Ra . V případě horninových typů, které vystupují na velkých plochách a zásadním způsobem zde ovlivňují terestrickou složku ionizujícího záření, je uvedena i hodnota dávkového příkonu, odvozená z obsahů tří výše zmíněných prvků.

2. GEOLOGIE ÚZEMÍ

Území mapového listu 14–22 Jeseník patří ke geologicky nejkomplicovanějším v Českém masivu (to konstatuje i ŽÁČEK *et al.* 2003). Krystalinikum zde náleží ke dvěma regionálně geologickým jednotkám – lugiku a sileziku.

V názorech na stavbu lugika dosud nepanuje shoda, jeho jednotlivé části jsou různé označovány a definovány (např. SVOBODA *et al.* 1964, SKÁCEL 1995, ŽÁČEK *et al.* 2003, CHÁB *et al.* 2008). V následujícím textu je plně respektováno pojetí autorů mapového listu 14–22 Jeseník (ŽÁČEK *et al.* 1995) a vysvětlivek k němu (ŽÁČEK *et al.* 2003).

Lugikum je na tomto mapovém listu reprezentováno orlicko-sněžnickou jednotkou, velkovrbenskou skupinou a horninami staroměstského pásma. V *orlicko-sněžnické jednotce* (zastoupené zde sněžnicko-gierałtowskou skupinou) mapující geologové rozlišili tři hlavní horninové typy: ruly gierałtowské facie (zde dominantní), granulitické ruly a také granulity (světlé granátické granulity a také tmavé pyroxenické – viz ŽÁČEK *et al.* 1995). *Velkovrbenská skupina* je tvořena hlavně rulami až rulovými mylonity (někdy jde o horniny svorového vzhledu), amfibolity, leptynity (časté jsou leptyno-amfibolitové stromatity) a mramory s grafitickými horninami. Horniny *staroměstského pásma* či spíše staroměstských pásem včetně Skácelova „autonomního pásma Hraničné“ (pokud je nepokládáme za součást mlynowiecko-stroňské skupiny – viz CHÁB *et al.* 2008) jsou v tomto článku (např. tab. 1) zahrnuty do položky „staroměstská skupina“ (je to nepřesné a zjednodušující, článek však neřeší geologickou stavbu a litostratigrafii). Hlavními horninami staroměstského pásma jsou biotitické pararuly, mylonitické dvojslídité ruly až fylonity (včetně tzv. skorošických svorů), migmatitické ruly až migmatity a amfibolity. Tímto horninovým komplexem probíhá mohutná žíla metatonalitu (vedle hornin tonalitového složení jsou součástí tohoto tělesa křemenné diority a granodiority).

Silezikum je na mapovém listu 14–22 Jeseník zastoupeno skupinou Branné, keprnickou jednotkou včetně tzv. spodního oddílu skupiny Branné (dále v článku „keprnická skupina“), vrbenskou skupinou, krystalinikem v podloží vrbenské skupiny mezi Jeseníkem a Mikulovicemi, žulovským plutonem a drobnými granitoidními intruzemi (ŽÁČEK *et al.* 1995, 2003).

Skupina Branné je složena z biotitických fylitů, muskovitických fylitů (často silně kvarcitických), mramorů, metadacitů a také z kvarcitů a ojedinělých metabazitů. *Keprnická skupina* je zde tvořena biotitickými až dvojslídími ortorulami, leukokratní křemen-živcovou skalinou a biotitickými až dvojslídími rulami až svory s složkami erlanu. Ve *vrbenské skupině* jsou v území východně od toku Bělé mezi Jeseníkem a Mikulovicemi přítomny hlavně amfibolity a kvarcity, méně metapelity (svory, ruly – nutno poznamenat, že LAURENT *et al.* 2014 tyto horniny považuje za metadroby), její součástí jsou i metamorfované produkty kyselého nebo intermediárního vulkanismu. *Podloží vrbenské skupiny* je v tomto území tvořeno ortorulami a pararulami až svory. V plášti žulovského plutonu (v území západně

od toku Bělé) jsou horniny vrbenské skupiny ovlivněny kontaktní, resp. periplutonickou metamorfózou – vedle amfibolitů a kvarcitů jsou zde hojně zastoupeny metapelity (metadrobly LAURENTA *et al.* 2014) charakteru biotitických rul s granátem a sillimanitem, migmatitických rul nebo migmatitů, přítomny jsou i mramory a vápenato-silikátové horniny (ŽÁČEK *et al.* 1995).

Součástí silezika jsou variská granitoidní tělesa na mapovém listu 14–22 Jeseník reprezentovaná žulovským plutonem (zaujímá cca 40 % plochy listu) a několika drobnými intruzemi v prostoru keprnické skupiny (na k. ú. Dolní Lipová) a v krystaliniku vystupujícím v podloží vrbenské skupiny (k. ú. Česká Ves a Písečná).

Žulovský pluton je tělesem s výraznou převahou granitoidů, v rámci nichž dominují biotitické granity (monzogranit převažuje nad syenogranitem – viz JEDLIČKA 1997), relativně hojně jsou granodiority, jen sporadicky se vyskytují tonality a alkalicko-živcové granity. Lokálně jsou v žulovském plutonu přítomny horniny ze skupiny dioritoidů, ŽÁČEK *et al.* (1995) označované jako amfibol-biotitický křemenný diorit, podle JEDLIČKY (1997) jsou zde i monzodiority a křemenné monzodiority. Ojedinelá je přítomnost enkláv gabroidních hornin. LAURENT *et al.* (2014) na základě litologie rozlišuje v žulovském plutonu čtyři hlavní typy hornin: biotitický granit (středně zrnitý, 4 až 7 obj. % Bt, jde o dominantní horninu plutonu), granodiorit typu Starost (jemnozrnitý, 7 až 12 obj. % Bt, vyskytuje se jen v okolí Žulové), tmavý granodiorit (jemnozrnitý až středně zrnitý, 8 až 14 obj. % Bt, 4 až 11 obj. % Hbl, zjištěn podél západního okraje plutonu) a křemenný monzodiorit až monzogabro (tvoří enklávy v biotitickém granitu). Žulovský pluton místy obsahuje značné množství xenolitů rul v různém stupni migmatitizace, erlanů a mramorů, časté jsou výskyt Ca-skarnů (zejména na k. ú. Žulová a Vápenná).

Se žulovským plutonem jsou geneticky spjaty **žily aplitů a pegmatitů**. Žíly aplitů pronikají granitoidními i dioritoidními horninami. Častou součástí mohutnějších aplitových žil je zóna (jednotka), která má charakter biotitického pegmatitu. Biotitické pegmatity jsou pro žulovský pluton typické (často mají relativně mohutnou okrajovou aplitovou zónu). V plášti žulovského plutonu se hojněji než biotitické pegmatity vyskytují muskovitické pegmatity, v případě větších těles přecházející do pegmatoidních granitů (např. KRUŽA 1973, NOVÁK 2005).

3. DOSUD ZVEŘEJNĚNÉ ÚDAJE O PŘIROZENÉ RADIOAKTIVITĚ HORNIN NA LISTU 14-22 JESENÍK A O OBSAŽÍCH RADIOAKTIVNÍCH PRVKŮ V TĚCHTO HORNINÁCH

Z radiometrické mapy ČR 1 : 500 000 (MANOVÁ a MATOLÍN 1995) je zřejmé, že v poli relativně nízké přirozené radioaktivity na listu 14–22 Jeseník představuje výraznou pozitivní anomálii žulovský pluton. Nejzákladnější data o radioaktivitě hlavních typů hornin vystupujících v této oblasti lze najít v publikacích hodnotících celé území Českého masivu (MATOLÍN 1970, IBRMAJER a SUK *et al.* 1989, MANOVÁ a MATOLÍN 1995, MATOLÍN a CHLU-PÁČOVÁ 1997). Autorem tohoto článku již byly publikovány podrobné údaje o radioaktivitě hornin na mapových listech sousedících s listem 14–22 Jeseník (ZIMÁK 2013a, 2015a, b, 2016a, b), vycházející z výsledků laboratorních gamaspektrometrických měření, zpracovaných shodným způsobem.

Hodnocení radioaktivity hornin na listu 14–22 Jeseník publikované ŠALANSKÝM a MANOVOU (2003) je založeno na výsledcích letecké geofyziky, poněkud ovlivněných – jak uvádějí citovaní autoři – členitým povrchem a hlavně lesními porosty, ale též odkrytostí hornin. Nejvýraznější kladné anomálie se vyskytují v granitoidech žulovského plutonu. ŠALANSKÝ a MANOVÁ (2003) konstatují, že radioaktivita tohoto tělesa roste od jeho okrajů do středu tvořeného středně až hrubě zrnitým granitem, avšak výrazná lokální maxima se vyskytují i v bazičtější části (jv. od Žulové) a v drobnozrném granitu j. a jv. od Bernartic. Letecká gamaspektrometrie v pozitivních anomáliích poskytuje hodnoty kolem 3,5 hm. % K,

5 ppm U a 10 ppm Th (ŠALANSKÝ a MANOVÁ 2003). Na základě letecké geofyziky MANOVÁ a MATOLÍN (1995) dělí území žulovského plutonu na bazičtější okrajovou část s nižší radioaktivitou hornin (2 hm. % K, 2 až 4 ppm U a 6 až 9 ppm Th, D = 45 až 90 nGy.h⁻¹) a na granit s vyšší radioaktivitou (2 až 3,5 hm. % K, 2 až 4 ppm U a 7 až 11 ppm Th, D = 75 až 110 nGy.h⁻¹). ZACHOVALOVÁ *et al.* (2002) uvádí chemismus pěti vzorků granitoidů analyzovaných metodami ICP-ES a ICP-MS: granit (3 vzorky) obsahuje 3,7 až 5,3 hm. % K₂O (= 3,1 až 4,4 hm. % K), 2,6 až 2,8 ppm U a 13,4 až 18,6 ppm Th, mafické enklávy v granitu (jde o tonalit a granodiorit) obsahují 2,1 a 2,7 hm. % K₂O (= 1,7 až 2,2 hm. % K), 3,1 a 3,7 ppm U, 7,2 a 22,3 ppm Th. V elektronické příloze k publikaci LAURENT *et al.* (2014) s odvoláním na MSci práci A. Laurenta z roku 2013 jsou uvedeny pro biotitický granit obsahy 2,9 až 14,1 ppm U (v průměru 6,4 ppm U) a 20,4 až 27,6 ppm Th (4 vzorky), granodiorit typu Starost 1,6 ppm U a 12,2 ppm Th, křemenný monzodiorit 1,3 ppm U a 8,3 ppm Th (vše ICP/MS). V případech thoria tedy byly v granitoidech žulovského plutonu stanoveny metodou ICP/MS výrazně vyšší obsahy než leteckou gamaspektrometrií. ZIMÁK (2015c) upozorňuje na vliv půdního pokryvu na výsledky letecké gamaspektrometrie, a to i na příkladech ze žulovského plutonu.

Údaje o obsazích přirozených radioaktivních prvků v pegmatitech a aplitech v žulovském plutonu a jeho plášti uvádí ZIMÁK (2013b). Extrémně vysoké obsahy U a Th v Ca-skarnech v plášti žulovského plutonu zmiňuje ZIMÁK (2012). Horniny uvedené v tomto odstavi však neovlivňují výrazněji pole radioaktivity (vzhledem k jejich malým objemům), a leteckou geofyzikou nemohla být jejich přítomnost zjištěna.

Jak již bylo konstatováno, krystalinikum v okolí žulovského plutonu na sledovaném mapovém listu vykazuje jen relativně nízkou radioaktivitu, alespoň pokud jde o dominantní horninové typy, které určují regionální pole radioaktivity (viz např. IBRMAJER a SUK *et al.* 1989, MANOVÁ a MATOLÍN 1995). Při hodnocení radioaktivity vrbenské skupiny na listu 14–22 Jeseník se ŠALANSKÝ a MANOVÁ (2003) zmiňují o kladné anomálii v blízkosti Rejvizu, související s keratofyry, které jsou v některých případech obohaceny radioaktivními prvky, zejména uranem (jak uvádí citovaní autoři).

4. VZORKY A METODY

Během terénních prací bylo na mapovém listu 14–22 Jeseník na 773 lokalitách odebráno 2100 vzorků, reprezentujících horninové typy ve všech výše zmíněných litostratigrafických či tektonických jednotkách. Determinace hornin byla prováděna jen makroskopicky. To působilo větší problémy v následujících případech, které byly řešeny takto: 1) světlé metavulkanity (a metatufy?) ve spodní části skupiny Branné jsou označeny jako „metadacit“, a to v souladu s legendou geologické mapy (ŽÁČEK *et al.* 1995), 2) všechny horniny tonalitové suity ve staroměstském pásmu jsou označeny jako „metatonalit“, v legendě již citované mapy jde o „středně zrnitý amfibolický metatonalit“, nutno však poznamenat, že i hrubozrnné variety jsou zde zcela běžné a že – jak již bylo uvedeno výše – modální složení plutonitu nemuselo vždy odpovídat tonalitě, 3) pro dominantní horniny žulovského masivu odpovídající biotitickému granitu až granodioritu je užít skupinový název „granitoidy“, 4) dioritoidy a gabroidy žulovského plutonu jsou autorem rozlišovány na základě obsahu tmavých minerálů (to je samozřejmě nesprávné kritérium!), a je proto možné, že některé horniny bazicitou plagioklasu náležející mezi gabroidy byly mylně považovány za dioritoidy a naopak; některé ze vzorků zařazených mezi dioritoidy mohou klasifikačně odpovídat tonalitě (případně až granodioritu). V následujících kapitolách se autor snažil co nejvíce respektovat názvy hornin užité v legendě mapy (ŽÁČEK *et al.* 1995).

V horninových vzorcích byly na PřF UP v Olomouci za použití spektrometru SG – 1000 LAB s NaI(Tl) detektorem o objemu 0,35 dm³ (průměr 76 mm, délka 76 mm) stanoveny obsahy dusíku (přímo na základě koncentrace ⁴⁰K), uranu a thoria (na základě dceřiných produktů), a proto jsou jejich obsahy při uvádění výsledků analýz označovány jako

eU a eTh). Meze detekce: K = 0,5 hm. %, U = 1,5 ppm, Th = 1,5 ppm. Při výpočtu hodnot a_m a D (viz níže), při statistickém zpracování dat a též při sestavování obrázků byly obsahy draslíku pod mezi detekce nahrazeny hodnotou 0,33 hm. %, obdobně v případě uranu a thoria 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. V případě pegmatitů byly k měřením zpravidla použity větší vzorky, a to o hmotnosti až 1200 gramů. I tak nelze jednotlivé vzorky z pegmatitů považovat za dostatečně reprezentativní (vzhledem k jejich zrnitosti). Proto byl z pegmatitového tělesa často odebrán a analyzován větší soubor vzorků, v němž jsou zastoupeny různé strukturně-texturní jednotky. Úprava horninových vzorků drcením nebyla prováděna u většiny vzorků Ca-skarnů z pláště žulovského plutonu.

Ze stanovených obsahů draslíku, uranu a thoria byla vypočtena hmotnostní aktivita ekvivalentu ^{226}Ra (a_m), umožňující jednoduše a jednoznačně (jediným číslem) vyjádřit přirozenou radioaktivitu horniny, a kalkulován byl i dávkový příkon záření gama terestrického původu (D), tedy dávkový příkon záření gama pocházejícího z horniny se známými obsahy draslíku, uranu a thoria. Tyto parametry byly z výsledků gamaspektrometrických analýz vypočteny pomocí vztahů $a_m [\text{Bq}\cdot\text{kg}^{-1}] = (0,077 \times 313\text{K}) + 12,35\text{U} + (1,43 \times 4,06\text{Th})$, $D [\text{nGy}\cdot\text{h}^{-1}] = (0,043 \times 313\text{K}) + (0,427 \times 12,35\text{U}) + (0,662 \times 4,06\text{Th})$, do nichž je obsah K dosazován v hm. %, obsahy U a Th v ppm (BERETKA a MATTHEW 1985, UNSCEAR 1988, MATOLÍN a CHLUPÁČOVÁ 1997, NGACHIN *et al.* 2007, EŠTOKOVÁ a PALAŠČÁKOVÁ 2013).

Z technických důvodů nelze v tomto článku uvádět místa odběru jednotlivých vzorků. Výjimkou jsou některé pegmatitové lokality (v tab. 4 uvedené samostatně) a také výskyty Ca-skarnů v plášti žulovského plutonu (tab. 5), avšak jen v případech, kdy poloha není jasná z názvu lokality.

Charakter a poloha pegmatitových lokalit, doplněná údajem o povaze slíd, jsou-li přítomny alespoň jako vedlejší součástka (Bt = biotit, Ms = muskovit): Petrovice-1 (bloky v deluviu, cca 280 m sv. od kóty 859 m Borůvkový vrch, Bt), Petrovice-2 (blok v deluviu, cca 290 m j. od kóty 755 m Jezevčí vrch, Bt>Ms), Vápenná-1 (bloky v deluviu nad pravým břehem Ztraceného potoka, cca 1130 m jjz. od kóty 742 m Černý kopec), Vápenná-2 (bloky v deluviu nad levým břehem Ztraceného potoka, cca 900 m jjz. od kóty 742 m Černý kopec, Ms), Dolní Lipová-1 (bloky v deluviu, cca 600 m jižně od památníku obětem frývaldovské stávky, Ms), Dolní Lipová-2 (bloky ve valu, cca 480 m vjv. od kóty 727,8 m Strážný, Bt), Dolní Lipová-3 (bloky v deluviu, cca 400 m z. od kóty 727,8 m Strážný, Bt), Jeseník (výchozy a bloky v deluviu, s. od Lázní Jeseník, střed území cca 300 m v. od kóty 765,2 m, Bt), Česká Ves-Sommerovy skály (výchoz, cca 460 m ssz. od kóty 878,4 m Jehlan, Bt), Velké Kunětice (bloky v eluviu/deluviu, cca 50 m jv. od kóty 441 m, Bt), Nová Červená Voda-Stříbrný vrch (detailně popisuje ŽÁČEK 1997), Písečná-1 (výchozy v zářezu silnice, v úseku cca 500 až 700 m vjv. od kostela v Písečné, Ms>Bt), Písečná-2 (agrární halda, cca 860 m sv. od kóty 507,3 m U Kapličky, Ms=Bt), Písečná-3 (agrární halda a val, střed území cca 500 m jv. od kóty 507,3 m U Kapličky, Ms>Bt), Široký Brod (výchoz, cca 850 m sv. od kostela v Širokém Brodu, Bt=Ms), Hradec u Jeseníku (výchozy nad levým břehem Bělé, v úseku cca 200 m, cca 550 m s. od kostela v Širokém Brodu, Ms>Bt) a Česká Ves-Kostelník (skalní útvar Kostelník a bloky na hřbetu s. od něj, Ms).

Vzorky Ca-skarnů v plášti žulovského plutonu pochází z 11 lokalit (viz tab. 5). Lokality Borový vrch, Jaškův lom a Vycpálkův lom patří mezi obecně známé – informace o nich uvádí např. KRUTA (1973), PAULIS (2001), NOVOTNÝ a ZIMÁK (2002) a ZIMÁK a NOVOTNÝ (2002). Sedm lokalit je na jv. svahu Boží hory (dále jen BH) u Žulové: BH-1 (výkopy v lese nad lomem s lokalitou BH-2), BH-2 (lom cca 200 m jv. od vrcholu BH), BH-3 (výkop v lese cca 35 m jižně od XII. zastavení křížové cesty), BH-4 (lom cca 300 m jv. od vrcholu BH), BH-5 (lom cca 400 m jjz. od vrcholu BH), BH-6 (výkop na poli cca 800 m jv. od vrcholu BH) a BH-7 (výkop bezprostředně nad lomem s lokalitou BH-4). Mineralogii lokalit BH-1 až 6 se zabývá BLAŽKOVÁ (2002), lokalitou BH-4 také LOSOS *et al.* (2002) a BH-6

NOVOTNÝ a ZIMÁK (2001). Jako Nová Červená Voda je označen lom ležící cca 1 km severně od lomu s původním názvem „Hagenwasserbruch“.

5. VÝSLEDKY A DISKUZE

Výsledky provedených laboratorních gamaspektrometrických měření jsou shrnuty v tab. 1 až 5. V tab. 6 a 7 jsou uvedeny vypočtené hodnoty hmotnostní aktivity ekvivalentu ^{226}Ra (a_m) jednotlivých horninových typů, avšak jen těch, jejichž průměrná a_m je minimálně 80 Bq.kg^{-1} . Těto limitní hodnoty nedosahují bazické a ultrabazické horniny (gabroidy, hornblendity, amfibolity, zelené břidlice, serpentinity), kvarcity a mramory. Do tab. 6 a 7 nebyly začleněny žilné horniny (aplity a pegmatity) a granitoidy malých intruzí, které vzhledem k rozměrům nemohou zásadněji ovlivnit pole přirozené radioaktivity, a také Ca-skarny v plášti žulovského plutonu, které sice vykazují velmi vysokou radioaktivitu, avšak jejichž vliv je jen zcela lokální (mocnost Ca-skarnů je v řádu dm). Tab. 6 a 7 uvádí také vypočtené hodnoty dávkového příkonu záření gama terestrického původu (D), spjatého s konkrétními horninovými typy. Významné či zajímavé poznatky jsou komentovány v následujících odstavcích:

1. Údaje v tab. 6 a 7 umožňují vzájemně porovnat hodnoty a_m horninových typů splňujících výše uvedené kritérium (a také hodnoty D vztahujících se k těmto horninám). Kdy však lze považovat konkrétní hodnotu a_m za relativně vysokou nebo naopak nízkou? Jako nejlogičtější se nabízí srovnání s hodnotami a_m vypočtenými výše uvedeným způsobem z klarků K, U a Th, tedy z jejich průměrných obsahů v zemské kůře. V literatuře uváděné klarky pro konkrétní chemický prvek se často výrazně liší jak v závislosti na kvantitě a kvalitě dat, tak i na způsobu jejich zpracování. Z klarkových hodnot zveřejněných GOLDSCHMIDTEM v roce 1937 (viz např. BOUŠKA *et al.* 1980), kdy jde o 2,59 hm. % K, 4 ppm U a 11,5 ppm Th, je za použití vztahů v kapitole 4 vypočtená a_m 179 Bq.kg^{-1} ($D = 87 \text{ nGy.h}^{-1}$). RUDNICK a GAO (2005) pro svrchní část zemské kůry kontinentálního typu uvádí 2,80 hm. % K_2O (= 2,32 hm. % K), 2,7 ppm U a 10,5 ppm Th. Tomu odpovídá a_m 150 Bq.kg^{-1} ($D = 74 \text{ nGy.h}^{-1}$). Z klarků vypočtených jinými autory (přehled poskytuje např. RUDNICK a GAO 2005) lze samozřejmě odvodit jiné hodnoty a_m a D. Pro posouzení míry radioaktivity hornin na listu 14–22 Jeseník byla zvolena hodnota a_m kalkulovaná z klarků Goldschmidta (po zaokrouhlení 180 Bq.kg^{-1}). Nutno doplnit, že průměrná hodnota globálního D je odhadována na 55 nGy.h^{-1} (UNSCEAR 1988, MANOVÁ a MATOLÍN 1995), střední hodnota D pro území ČR je $65,6 \pm 19,0 \text{ nGy.h}^{-1}$ (MANOVÁ a MATOLÍN 1995).

Přirozenou radioaktivitu hlavních horninových typů lugička a silezika na mapovém listu 14–22 Jeseník lze hodnotit jako podprůměrnou až průměrnou, a to jak ve vztahu k průměrné zemské kůře, tak i v porovnání s jinými oblastmi Českého masivu – to je zřejmě již z publikace IBRMAJER a SUK *et al.* (1989) nebo z radiometrické mapy ČR 1 : 500 000 a vysvětlivek k ní (MANOVÁ a MATOLÍN 1995).

2. Dominantním horninovým typem sněžnicko-gierałtowské skupiny na listu 14–22 Jeseník je drobnozrnná zrnito-šupinatá dvojslídna rula gierałtowské facie, v tab. 1 označená shodně s OPLETALEM *et al.* (1980) jako rula typu A. Podstatně méně jsou zde rozšířeny středně až hrubě zrnité, plástevnaté až zrnito-plástevnaté dvojslídne ruly, dříve zčásti řazené k rulám gierałtowským, zčásti k sněžnickým, výše citovanými autory označované jako ruly typu B, k nimž byly v tab. 1 přiřazeny i ruly na přechodu mezi oběma typy (A/B). Typické hrubě okaté dvojslídne ruly (ruly sněžnické facie, typ C) na listu 14–22 Jeseník zjištěny nebyly. Vztah výše uvedených typů rul a jejich geneze je dlouhodobě diskutovaným problémem, za jejich protolit je považován buď granit, nebo pelit, resp. metapelit (viz např. OPLETAL *et al.* 1997, BRÖCKER *et al.* 2003, BURIÁNEK *et al.* 2009). I když je soubor analyzovaných rul typu A/B a B z listu 14–22 Jeseník velmi malý (v podstatě nereprezentativní), je zřejmé, že pokud jde o obsahy K, U a Th, neexistuje žádný výraznější rozdíl mezi rulami typu A a B (viz data v tab. 1). To již konstatuje ZIMÁK (2013a) na základě studia rul

sněžnicko-gieraltowské skupiny na listech 14–23 Králíky a 14–12 Deštné. Pokud připustíme, že ruly typu A a B a je provázející granulitické ruly a světlé granulity mají shodný protolit (lhostejno jaké povahy), pak je zřejmé, že postupná přeměna ruly na světlý granulit byla provázena výnosem uranu. Je otázkou, zda by s tímto procesem nemohl souviset vznik hydrotermální uranové mineralizace ve východní části lugika.

3. V případě skupiny Branné je zajímavé srovnání biotitických a muskovitických fylitů. Zatímco obsahy draslíku jsou v obou skupinách hornin velmi podobné, liší se biotitické fylity od muskovitických výrazně vyššími obsahy U a Th (tab. 2, obr. 1). Příčina tohoto rozdílu není jasná, snad souvisí s různou povahou jílových minerálů v protolitu.

4. V legendě geologické mapy 14–22 Jeseník a ve vysvětlivkách k ní (ŽÁČEK *et al.* 1995, ŽÁČEK 2003) je užit termín „krystalinikum v podloží vrbenské skupiny“ (dále jen KPVS), a shodně i v tab. 2. Jen na základě gamaspektrometrických dat nelze tvrdit, že horniny KPVS na hodnoceném mapovém listu jsou součástí keprnické skupiny (KS) nebo dešenské skupiny. Lze však konstatovat, že svory až ruly KPVS mají velmi podobné obsahy K, U a Th jako horniny stejné povahy v KS (tab. 2). Pro ortoruly to však neplatí. Soubor 12 analyzovaných vzorků ortorul KS v tab. 2 není příliš reprezentativní (na hodnoceném listu jsou tyto horniny přítomny na jen malé ploše), lze však pro toto srovnání doplnit údaje o horninách KS na listech 14–41 Šumperk a 14–24 Bělá pod Pradědem (ZIMÁK 2014,

Tabulka 1. Obsahy přirozených radioaktivních prvků (K, eU, eTh) v horninách lugika, bez metapegmatitů a pegmatitů; n = počet vzorků, x = průměr.

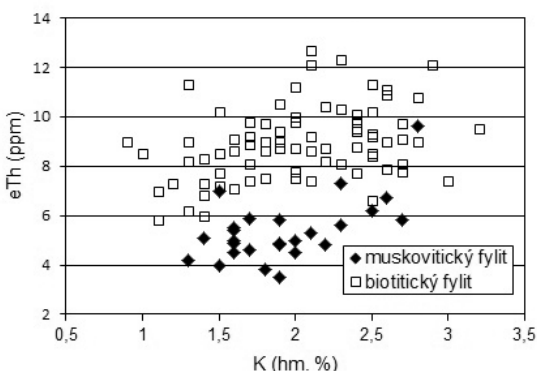
Table 1. Contents of the natural radioactive element (K, eU, eTh) in rocks of the Lusicum, without metapegmatites and pegmatites; n = number of samples, x = average.

geol. jednotka / hornina	n	K (hm. %)			eU (ppm)			eTh (ppm)		
		min.	max.	x	min.	max.	x	min.	max.	x
<i>sněžnicko-gieraltowská skupina</i>										
rula (typ A)	76	1,3	5,4	3,0	<1,5	5,8	2,4	1,9	22,6	8,9
rula (typ A/B a B)	6	2,7	3,5	3,2	1,8	2,6	2,2	4,6	11,6	7,7
granulitická rula	14	1,5	3,7	3,1	<1,5	2,8	1,7	2,1	15,2	9,8
světlý granulit	7	2,2	3,4	2,8	<1,5	<1,5	<1,5	2,5	4,4	3,6
<i>staroměstská skupina</i>										
pararula (60)	49	1,0	4,4	2,7	2,1	6,6	3,3	4,4	16,3	16,6
migmatizovaná rula (61)	7	1,9	3,7	2,7	<1,5	3,7	2,5	8,5	13,5	10,0
rula - fylonit (57)	10	0,9	4,0	2,5	<1,5	4,3	2,5	<1,5	16,2	9,8
leukokratní rula (56)	8	0,7	6,9	3,0	<1,5	6,7	2,4	2,9	21,2	10,8
kvarcit, kvarcitická rula	18	<0,5	4,0	0,9	<1,5	2,1	<1,5	<1,5	8,3	2,1
amfibolit, metagabro	30	<0,5	1,0	<0,5	<1,5	<1,5	<1,5	<1,5	3,1	<1,5
serpentin	5	<0,5	<0,5	<0,5	<1,5	<1,5	<1,5	<1,5	<1,5	<1,5
metatonalit	31	1,1	3,3	2,3	<1,5	2,8	<1,5	1,5	20,8	7,8
<i>velkovrbenská skupina</i>										
rula - mylonit (47, 51)	72	0,7	4,2	2,6	<1,5	3,4	1,8	1,8	22,1	9,0
amfibolit, amfibolická rula	56	<0,5	1,7	0,7	<1,5	2,2	<1,5	<1,5	7,8	2,2
leptynit (48, 49, 50, 51)	55	<0,5	4,0	1,8	<1,5	4,9	<1,5	<1,5	20,3	5,5
kvarcit	2	<0,5	<0,5	<0,5	<1,5	3,3	2,2	2,2	4,2	3,2

2015b). Na listu 14-41 Šumperk mají ortoruly a metagranitoidy KS (celkem 33 vzorků) v průměru 2,4 hm. % K, 1,6 ppm eU a 9,8 ppm eTh, blastomylonity KS (87 vzorků) v průměru obsahují 2,4 hm. % K, 1,6 ppm eU a 7,7 ppm eTh. Soubor ortorul, blastomylonitů a metagranitoidů KS z listu 14-24 Bělá pod Pradědem (233 vzorků) má v průměru 2,3 hm. % K, <1,5 ppm eU a 6,2 ppm eTh. Ortoruly KPVS mají ve srovnání s ortorulami (a také metagranitoidy a blastomylonity) KS nižší obsahy všech tří sledovaných prvků, výrazné je to u draslíku. Zastoupení K a Th v diskutovaných horninách KPVS a KS je zřejmé z obr. 2. Zajímavé je zjištění, že ortoruly KPVS se svými obsahy K, U a Th shodují s metagranitoidy desenské skupiny na listu 14-24 Bělá pod Pradědem, obsahujícími v průměru 1,6 hm. % K, <1,5 ppm eU a 5,1 ppm eTh (95 vzorků).

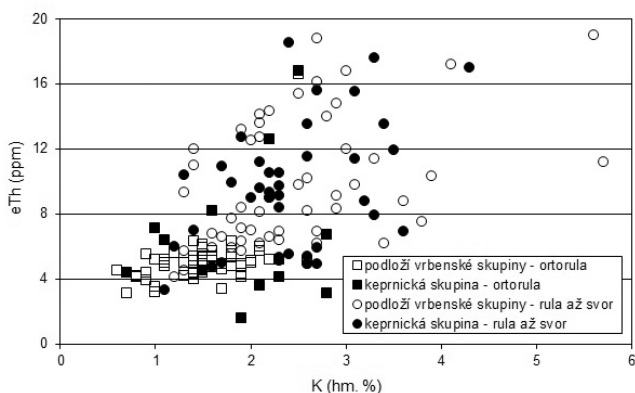
5. Ve vulkanosedimentárním komplexu vrbenské skupiny na listu 14-22 Jeseník vykazují zvýšenou radioaktivitu produkty kyselého nebo intermediárního vulkanismu, tj. keratofyrové horniny (tab. 3).

S nimi je spjata již výše zmíněná pozitivní anomálie v poli přirozené radioaktivity, zjištěná aeroradiometricky u Rejvízu (ŠALANSKÝ a MANOVÁ 2003). Nejvyšší radioaktivita ve skupině keratofyrových hornin byla zaznamenána u vzorku horniny označené v tab. 2 a 7 jako „světlý metatuf“ ($a_m = 311 \text{ Bq.kg}^{-1}$, $D = 144 \text{ nGy.h}^{-1}$), pocházejícího ze západního svahu Orliho vrchu (k. ú. Ondřejovice v Jeseníkách). Tato hornina je za „světlý metatuf“ považována jen na základě makroskopického pozorování, nelze vyloučit, že by mohlo jít o metavulkanit, postižený hydrotermální alterací, s níž by mohl souviset vysoký obsah uranu



Obr. 1. Korelace draslík versus thorium v muskovitických a biotitických fylitech skupiny Branné.

Fig. 1. Potassium versus thorium correlation in muscovite and biotite phyllites in the Branná Group.



Obr. 2. Korelace draslík versus thorium v horninách vystupujících v podloží vrbenské skupiny a v horninách keprnické skupiny.

Fig. 2. Potassium versus thorium correlation in rocks outcropping in the bedrock of the Vrbno Group and in rocks of the Keprník Group.

Tabulka 2. Obsahy přirozených radioaktivních prvků (K, eU, eTh) v horninách silezika, bez variských intruzivních hornin a pláště žulovského plutonu; n = počet vzorků, x = průměr.

Table 2. Contents of the natural radioactive element (K, eU, eTh) in rocks of the Silesicum, without Variscan intrusive rocks and the Žulová Pluton mantle; n = number of samples, x = average.

geol. jednotka / hornina	n	K (hm. %)			eU (ppm)			eTh (ppm)		
		min.	max.	x	min.	max.	x	min.	max.	x
<i>skupina Branné</i>										
muskovitický fylit (40)	26	1,3	2,8	1,9	<1,5	2,2	<1,5	3,5	9,6	5,4
biotitický fylit (35)	78	0,9	3,2	2,0	<1,5	8,0	2,7	5,8	12,7	8,9
mramor	28	<0,5	<0,5	<0,5	<1,5	<1,5	<1,5	<1,5	<1,5	<1,5
amfibolit, zelená břidlice	3	<0,5	0,6	<0,5	<1,5	2,6	1,5	1,8	7,7	3,8
kvarcit, živcový kvarcit	10	<0,5	2,8	1,3	<1,5	1,5	<1,5	1,5	6,9	3,0
metadacit (39)	26	1,0	6,5	2,5	<1,5	2,0	<1,5	3,0	15,8	6,9
<i>keprnická skupina</i>										
ortorula (45)	12	0,7	2,8	1,9	<1,5	4,3	1,7	1,6	16,8	6,6
křemen-živcová skalina (44)	18	0,9	3,8	2,3	<1,5	1,8	1,5	1,7	8,5	4,7
rula - svor (41, 43)	40	1,1	4,3	2,4	<1,5	4,3	2,0	3,3	18,5	9,5
erlan	5	<0,5	2,6	1,6	<1,5	1,9	<1,5	5,9	7,4	6,7
<i>krystaliniku v podloží vrbenské skupiny</i>										
ortorula (42)	53	0,6	2,6	1,5	<1,5	3,2	<1,5	3,1	16,6	5,1
rula - svor (41)	52	1,2	5,7	2,5	<1,5	5,4	2,4	4,1	19,0	9,7
<i>vrbenská skupina (východně od toku řeky Bělá mezi Jeseníkem a Mikulovicemi)</i>										
svor - rula (23, 25, 34)	30	1,5	5,1	3,1	<1,5	4,5	2,2	4,5	15,8	8,2
rula, fylit (31, 33)	5	1,6	5,5	3,1	<1,5	4,4	2,7	1,6	10,5	5,2
rula s lapilly (32)	6	0,9	4,7	2,1	<1,5	2,3	1,6	<1,5	9,5	5,1
biotitická plagioklasová rula	5	2,4	4,5	3,5	2,5	3,4	2,9	13,3	19,3	15,3
amfibolická rula, stromatit	5	2,1	4,5	3,3	<1,5	3,3	1,7	<1,5	2,1	<1,5
amfibolit, zelená břidlice	37	<0,5	1,4	<0,5	<1,5	3,3	<1,5	<1,5	2,8	<1,5
(meta)hornblendit	3	<0,5	<0,5	<0,5	<1,5	<1,5	<1,5	<1,5	<1,5	<1,5
porfýroid (30)	10	4,0	7,2	5,5	1,6	4,4	2,9	7,2	26,8	12,6
světlý metatuf (30)	1	1,9	1,9	1,9	10,2	10,2	10,2	24,0	24,0	24,0
kvarcit, živcový kvarcit	56	<0,5	3,5	0,6	<1,5	3,3	<1,5	<1,5	10,4	2,3
mramor	1	1,8	1,8	1,8	<1,5	<1,5	<1,5	<1,5	<1,5	<1,5

(10,2 ppm eU). Zvýšená radioaktivita metavulkanitů označených v tab. 2 a 7 jako porfyroidy je způsobena relativně vysokými obsahy draslíku (v průměru 5,5 hm. %), obsahy U a Th jsou v těchto horninách blízké klarkovým hodnotám. Mírně zvýšená radioaktivita keratofyrových hornin v severní části vrbenské skupiny (jak metamorfovaných vulkanitů, tak i pyroklastik) byla zjištěna i na listech 15–11 Zlaté Hory a 15–13 Vrbno pod Pradědem (ZIMÁK 2015a, 2016b).

6. Radiometrická mapa ČR 1 : 500 000 (MANOVÁ a MATOLÍN 1995) ukazuje, že výraznou pozitivní anomálii v sv. části silezika představuje žulovský pluton. Jeho granitoidy mají díky relativně vysokým obsahům všech tří sledovaných prvků (tab. 3) zvýšenou přirozenou radioaktivitu (tab. 7): průměrná a_m je 195 Bq.kg^{-1} ($D = 96 \text{ nGy.h}^{-1}$), vzorek granitoidu s nejvyšší přirozenou radioaktivitou má 469 Bq.kg^{-1} ($D = 223 \text{ nGy.h}^{-1}$). V souboru 230 analyzovaných granitoidů výrazně převažují vzorky středně zrnitého biotitického granitu (jde o tzv. „hlavní granit“), zastoupeny jsou však v něm i granitoidy s vyšším podílem mafických minerálů ze západního okraje plutonu (granodiorit typu Starost a tmavé granodiority se značným podílem amfibolu – viz LAURENT *et al.* 2014). Ve srovnání s „hlavním granitem“ je přirozená radioaktivita granodioritů obou typů mírně nižší, a to díky nižším obsahům K a Th: relativně tmavé granodiority z okolí Žulové obsahují v průměru 2,6 hm. % K, 2,5 ppm eU a 11,2 ppm eTh, jejich průměrná a_m je 180 Bq.kg^{-1} ($D = 89 \text{ nGy.h}^{-1}$). Přirozená radioaktivita hornin žulovského plutonu tedy klesá s rostoucí bazicitou v pořadí granit – granodiorit – dioritoidy – gabro (viz data v tab. 3 a také 7).

Tabulka 3. Obsahy přirozených radioaktivních prvků (K, eU, eTh) v horninách pláště žulovského plutonu a ve variských intruzívech, kromě pegmatitů a aplitů; n = počet vzorků, x = průměr.

Table 3. Contents of the natural radioactive element (K, eU, eTh) in rocks of the Žulová Pluton mantle and in Variscan intrusive rocks, without pegmatites and aplites; n = number of samples, x = average.

geol. jednotka / hornina / území	n	K (hm. %)			eU (ppm)			eTh (ppm)		
		min.	max.	x	min.	max.	x	min.	max.	x
<i>plášť žulovského plutonu</i>										
rula	67	0,8	5,7	2,5	<1,5	8,5	2,5	2,1	24,1	16,3
migmatit, migmatitizovaná rula	58	1,0	4,7	2,6	<1,5	16,2	2,5	<1,5	25,9	12,0
amfibolit	27	<0,5	0,8	<0,5	<1,5	<1,5	<1,5	<1,5	3,8	<1,5
kvarcit, živcový kvarcit	44	<0,5	2,8	1,3	<1,5	4,3	<1,5	<1,5	16,1	2,2
mramor	21	<0,5	0,9	<0,5	<1,5	2,0	<1,5	<1,5	3,7	<1,5
erlan	25	<0,5	2,8	0,8	<1,5	4,0	2,2	<1,5	18,4	7,0
<i>žulovský pluton</i>										
granitoidy	230	1,0	5,3	3,1	<1,5	6,9	2,5	2,9	60,1	15,2
pegmatoidní granit	4	2,1	5,5	3,4	<1,5	8,2	4,1	6,0	10,4	8,2
aplitický granit	6	3,2	4,2	3,8	<1,5	2,9	1,7	5,3	17,4	10,3
dioritoidy	76	<0,5	2,7	1,8	<1,5	4,7	2,1	4,6	48,5	9,8
gabroidy	6	<0,5	1,5	0,7	<1,5	2,7	1,6	<1,5	8,0	4,6
<i>drobné granitoidní intruze v prostoru silezika (G = granit, PG = pegmatoidní granit)</i>										
Česká Ves (G)	6	2,4	2,9	2,7	2,2	3,7	2,8	8,8	22,2	14,0
Česká Ves (PG)	25	0,9	4,2	2,2	<1,5	5,5	2,5	2,9	7,8	4,6
Písečná (PG)	3	1,3	3,1	2,1	1,7	5,3	3,7	6,5	13,1	9,1
Dolní Lipová (G, PG)	9	1,9	3,6	2,7	1,8	8,2	3,9	1,0	7,3	3,8

Tabulka 4. Obsahy přirozených radioaktivních prvků (K, eU, eTh) v metapegmatitech, pegmatitech a aplitech;
n = počet vzorků, x = průměr.
Table 4. Contents of the natural radioactive element (K, eU, eTh) in metapegmatites, pegmatites and aplites;
n = number of samples, x = average.

hornina / geol. jednotka / oblast (lokality)	n	K (hm. %)			eU (ppm)			eTh (ppm)		
		min.	max.	x	min.	max.	x	min.	max.	x
<i>metapegmatity ve sněžnické skupině</i>										
Petrovice-1	2	4,2	4,6	4,4	<1,5	<1,5	<1,5	1,6	2,1	1,9
<i>metapegmatity ve staroměstské skupině</i>										
Petrovice-2	1	2,2	2,2	2,2	2,0	2,0	2,0	5,4	5,4	5,4
<i>metapegmatity ve velkovrbenské skupině</i>										
Vápenná-1	18	<0,5	4,1	2,2	<1,5	4,3	<1,5	<1,5	4,0	1,5
Vápenná-2	3	3,6	5,3	4,4	2,4	2,6	2,5	2,9	3,4	3,2
<i>pegmatity pronikající horninami keprnické skupiny</i>										
Dolní Lipová-1	2	1,0	1,2	1,1	<1,5	<1,5	<1,5	<1,5	2,1	1,1
<i>aplit, aplopegmatit, granitové pegmatity v žulovském plutonu</i>										
aplit	31	0,5	5,1	3,5	<1,5	10,1	3,7	3,0	20,7	8,4
aplopegmatit	19	0,8	4,7	3,2	1,7	11,0	5,1	2,7	35,9	16,1
pegmatit	84	<0,5	9,9	4,0	<1,5	17,1	3,4	<1,5	66,7	8,8
<i>granitové pegmatity v plášti žulovského plutonu</i>										
Dolní Lipová-2	4	<0,5	4,2	2,7	<1,5	3,2	1,6	4,6	28,7	12,8
Dolní Lipová-3	6	4,7	7,6	5,8	<1,5	1,5	<1,5	<1,5	11,2	4,1
Jeseník	12	0,9	6,1	3,1	<1,5	4,6	2,1	1,9	14,1	5,9
Česká Ves – Sommerovy sk.	3	3,7	6,7	4,7	<1,5	9,2	3,7	6,2	14,6	10,7
Velké Kunětice	8	3,2	6,3	4,7	<1,5	<1,5	<1,5	<1,5	6,9	2,0
ostatní lokality	26	<0,5	5,7	2,6	<1,5	4,3	<1,5	<1,5	5,9	2,6
<i>pyroxenické pegmatity a pegmatoidy v plášti žulovského plutonu</i>										
N. Č. Voda – Stříbrný vrch	6	<0,5	1,2	0,5	<1,5	<1,5	<1,5	<1,5	2,7	1,9
Žulová – Jaškův lom	8	<0,5	6,3	1,3	3,4	15,0	6,8	4,9	18,0	8,8
ostatní lokality	6	<0,5	4,7	2,0	<1,5	9,5	3,1	<1,5	5,3	3,3
<i>pegmatity pronikající horninami v podloží vrbenské skupiny</i>										
Písečná-1	7	1,7	5,6	2,7	<1,5	2,7	<1,5	<1,5	7,6	3,1
Písečná-2	5	2,2	4,3	2,9	<1,5	2,5	<1,5	2,5	5,3	3,7
Písečná-3	10	1,9	4,3	2,8	2,1	5,2	3,6	3,0	18,7	10,3
Široký Brod	11	0,9	6,5	4,0	<1,5	5,3	2,1	1,6	17,1	7,2
Hradec u Jeseníku	11	0,6	7,0	3,5	1,5	7,2	3,2	2,6	9,4	5,6
Česká Ves – Kostelník	8	1,3	4,3	2,8	<1,5	2,4	<1,5	<1,5	9,0	4,6

7. Obsahy uranu a thoria v granitových pegmatitech, metapegmatitech a aplitech silezika podrobně hodnotí ZIMÁK (2013b). Některé z údajů sumarizovaných v tab. 4 již byly diskutovány v citované práci. Z dat v tab. 3 a 4 je zřejmé, že pegmatity a aplity v granitoidech žulovského plutonu mají v průměru vyšší obsahy U a nižší obsahy Th ve srovnání s okolními granitoidy. V případě aplopegmatitů to platí jen o uranu, průměrný obsah thoria je v obou srovnávaných horninových typech víceméně shodný. Mezi obsahy U a Th existuje statisticky zjistitelná lineární závislost. Vždy jde o pozitivní korelaci, kdy koeficient de-

Tabulka 5. Obsahy přirozených radioaktivních prvků (K, eU, eTh) v Ca-skarnech; n = počet vzorků, x = průměr.
Table 5. Contents of the natural radioactive element (K, eU, eTh) in Ca-skarns; n = number of samples, x = average.

lokality	n	K (hm. %)			eU (ppm)			eTh (ppm)		
		min.	max.	x	min.	max.	x	min.	max.	x
Žulová – Jaškův lom	9	<0,5	1,2	<0,5	<1,5	22,8	9,7	2,5	42,4	11,4
Žulová – Borový vrch	44	<0,5	<0,5	<0,5	<1,5	44,5	11,0	<1,5	31,4	5,5
Žulová – Boží hora-1	28	<0,5	<0,5	<0,5	<1,5	26,4	5,7	<1,5	21,6	4,7
Žulová – Boží hora-2	20	<0,5	<0,5	<0,5	<1,5	31,3	6,9	<1,5	25,0	6,0
Žulová – Boží hora-3	31	<0,5	<0,5	<0,5	<1,5	39,8	10,7	<1,5	139,4	13,9
Žulová – Boží hora-4	12	<0,5	<0,5	<0,5	2,0	81,3	17,9	<1,5	27,2	9,0
Žulová – Boží hora-5	42	<0,5	<0,5	<0,5	<1,5	104,1	11,8	<1,5	254,2	28,0
Žulová – Boží hora-6	8	<0,5	<0,5	<0,5	<1,5	5,8	1,7	<1,5	3,0	<1,5
Žulová – Boží hora-7	14	<0,5	<0,5	<0,5	<1,5	84,9	17,0	<1,5	6,2	2,9
Vápenná – Vycpálkův lom	21	<0,5	<0,5	<0,5	<1,5	50,8	8,8	<1,5	43,1	9,9
Nová Červená Voda	17	<0,5	<0,5	<0,5	<1,5	27,0	6,5	<1,5	80,1	7,9

Tabulka 6. Vybrané horninové typy lugička - vypočtené hodnoty hmotnostní aktivity ekvivalentu ^{226}Ra (a_m) a dávkového příkonu záření gama (D); n = počet vzorků, x = průměr.

Table 6. Selected rock types of the Lucicum - calculated values of mass activity of ^{226}Ra equivalent (a_m) and gamma radiation dose rate (D); n = number of samples, x = average.

geol. jednotka / hornina	n	a_m (Bq.kg ⁻¹)			D (nGy.h ⁻¹)		
		min.	max.	x	min.	max.	x
<i>sněžnická skupina</i>							
rula (typ A, A/B, B)	82	57	259	154	29	126	77
granulitická rula	14	99	196	152	53	98	77
granulit	7	82	120	101	43	63	53
<i>staroměstská skupina</i>							
pararula, migmatitizovaná rula (60, 61)	56	107	234	166	51	115	82
rula – fylonit (57)	10	91	208	147	43	102	73
leukokratní rula (56)	8	51	276	165	25	131	82
metatonalit	31	53	211	118	27	102	59
<i>velkovrbenská skupina</i>							
rula – mylonit (47, 51)	72	43	238	137	21	116	68
leptynit (48, 49, 50, 51)	55	30	207	93	14	100	47

terminace (R^2) pro soubory pegmatitů a aplopegmatitů má hodnotu 0,48 a 0,38, pro aplity jen 0,18. Široké intervaly obsahů K, U a Th ve vzorcích z jednoho a téhož pegmatitového tělesa souvisí s jeho mineralogickou zonálností (variabilita obsahů K a U ve všech třech skupinách žilných hornin je zřejmá z obr. 3). Pro blokovou jednotku pegmatitových těles jsou charakteristické nízké obsahy U a Th, a to jak v blokovém živci (v případě U to dokumentuje obr. 3), tak i v křemenu z blokové jednotky (resp. křemenného jádra).

Ve skupině pyroxenických pegmatitů a pegmatoidů v plášti žulovského plutonu je zvýšenými obsahy U a Th zajímavý pyroxenický pegmatit z Jaškova lomu u Žulové. Jeho hojnými akcesoriemi jsou titanit a allanit-(Ce), s nímž lze spojovat zvýšené koncentrace obou uvedených prvků (tab. 4).

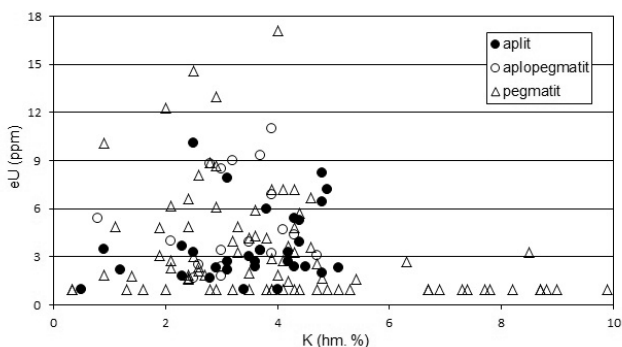
Tabulka 7. Vybrané horninové typy silezika - vypočtené hodnoty hmotnostní aktivity ekvivalentu ^{226}Ra (a_m) a dávkového příkonu záření gama (D); n = počet vzorků, x = průměr.

Table 7. Selected rock types of the Silesicum - calculated values of mass activity of ^{226}Ra equivalent (a_m) and gamma radiation dose rate (D); n = number of samples, x = average.

geol. jednotka / hornina	n	a_m (Bq.kg ⁻¹)			D (nGy.h ⁻¹)		
		min.	max.	x	min.	max.	x
<i>skupina Branné</i>							
muskovitický fylit (40)	26	68	147	91	34	74	46
biotitický fylit (35)	78	84	197	134	40	94	65
metadacit (39)	26	54	218	113	27	116	57
<i>keprnická skupina</i>							
ortorula (45)	12	55	176	104	27	87	52
křemen-živcová skalina (44)	18	51	132	97	25	69	50
rula – svor (41, 43)	40	58	234	138	29	117	68
erlan	5	73	113	94	34	58	47
<i>krytalinikum v podloží vrbenské skupiny</i>							
ortorula (42)	53	47	196	80	23	95	40
rula – svor (41)	52	65	312	146	32	155	72
<i>vrbenská skupina (východně od toku řeky Bělá mezi Jeseníkem a Mikulovicemi)</i>							
svor – rula (23, 25, 34)	30	78	223	150	39	109	76
rula, fylit (31, 32)	11	51	201	117	25	104	59
biotitická plagioklasová rula	5	177	262	209	86	130	104
porfýroid (30)	10	204	300	242	101	154	124
světlý metatuf (30)	1	311	311	311	144	144	144
<i>plášť žulovského plutonu</i>							
rula	67	65	334	152	32	159	75
migmatit, migmatitizovaná rula	58	45	304	162	23	141	80
erlan	25	26	164	86	12	79	41
<i>žulovský pluton</i>							
granitoidy	230	79	469	195	39	223	96
dioritoidy	76	75	330	126	37	152	62

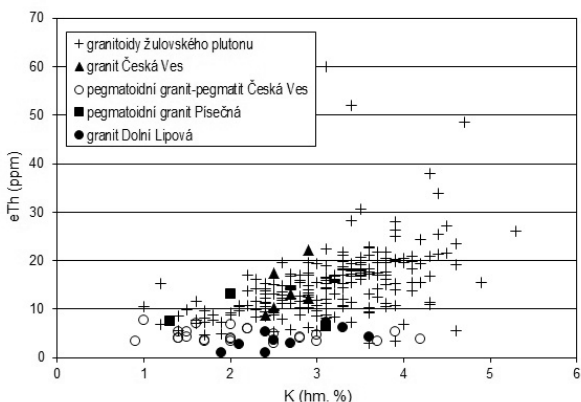
8. Drobné granitoidní intruze v prostoru silezika (tab. 3) vykazují nižší přirozenou radioaktivitu ve srovnání s granitoidy žulovského plutonu, avšak s výjimkou intruze v prostoru mezi Čertovými kameny a Bělákem na k. ú. Česká Ves, jejíž granit i vzhledem odpovídá „hlavnímu granitu“ žulovského plutonu. Nižší přirozená radioaktivita ve srovnání s granitoidy žulovského plutonu je charakteristická pro drobné intruze tvořené pegmatoidním granitem na k. ú. Česká Ves (mezi Čertovými kameny a Bělákem, kde pegmatoidní granit přechází až do granitového pegmatitu), Písečná (výchozy u Studeného Zejfu, vlevo od silnice z Písečné do Mikulovic) a Dolní Lipová (cca 800 m jz. od památníku obětem frývaldovské stávky, převažuje drobnozrný dvojslidný granit, lokálně je přítomen pegmatoidní granit). Ve srovnání s granitoidy žulovského plutonu mají zmiňované pegmatoidní granity a také dolnílipovský dvojslidný granit výrazně nižší obsahy Th (tab. 3, obr. 4), zcela obdobně jako pegmatoidní granity a pegmatity v žulovském plutonu (viz data v tab. 3 a 4).

9. Pro Ca-skarny v pláštích žulovského plutonu jsou charakteristické často anomálně vysoké obsahy uranu a thoria (tab. 5). Nejvyšší obsah obou prvků (104 ppm eU a 254 ppm eTh) byl stanoven ve vzorku tvořeném hlavně vesuvianem, granátem a křemenem z jedné z lokalit na Boží hoře u Žulové (BH-5). Přirozená radioaktivita tohoto vzorku je extrémně vysoká, vypočtená a_m je 2769 Bq.kg^{-1} . Pro celý soubor 42 vzorků z této lokality je však průměrná a_m „jen“ 316 Bq.kg^{-1} .



Obr. 3. Korelace draslík versus uran v aplitech, aplopegmatitech a pegmatitech žulovského plutonu.

Fig. 3. Potassium versus uranium correlation in aplites, aplopegmatites and pegmatites of the Žulová Pluton.



Obr. 4. Korelace draslík versus thorium v horninách ve variských granitoidích silezika.

Fig. 4. Potassium versus thorium correlation in the Variscan granitoides of the Silesicum.

Zvýšené koncentrace uranu v Ca-skarnech bývají v partiích s vysokým podílem vesuvianu, případně s dominancí granátu a vesuvianu. Relativně vysoké obsahy uranu v obou minerálech jsou známy z jiných oblastí (např. HIMMELBERG – MILLER 1980, SMITH *et al.* 2004). Ze dvou vzorků Ca-skarnu z Boží hory (lokality BH-5) a ze dvou vzorků reakčního Ca-skarnu z Borového vrchu složených hlavně z grossularu a vesuvianu proto byly připraveny vždy dvě frakce – jedna byla tvořena převážně granátem, v druhé převažoval vesuvian. Výsledky gamaspektrometrických analýz těchto frakcí prokázaly, že ve všech čtyřech vzorcích je většina uranu vázána na vesuvian (frakce s dominancí vesuvianu měly obsah uranu 3× až 6× vyšší než granátová frakce). Uran sice může být přítomen ve struktuře vesuvianu, ale mohl by být vázán i na inkluze U-minerálů, vyskytující se přednostně ve vesuvianu. Nutno poznamenat, že dosud žádné inkluze U-minerálů ve studovaných vzorcích zjištěny nebyly (viz ZIMÁK 2012).

V partiích tvořených dominantně granátem a vesuvianem a také v křemen-vesuvianových agregátech bývají nejen extrémně vysoké obsahy U, ale také Th, které zde může být vázáno na granát, vesuvian i epidot (použitými metodami se však nositele Th nepodařilo odhalit). Příčinou vysokých obsahů Th může být i přítomnost allanitu-(Ce), jenž byl zcela výjimečně zjištěn ve výbrusech.

Nízkými obsahy uranu a thoria ze souboru jedenácti lokalit v tab. 5 vybočuje lokalita BH-6. Od všech ostatních známých výskytů Ca-skarňů v plášti žulovského plutonu se lokalita BH-6 liší i mineralogicky a geologickou pozicí. Jinde druhově pestrá asociace Ca-silikátů je zde redukována na dvojici granát + epidot. Jinde běžný vesuvian a též wollastonit zde zcela chybí, nehojný pyroxen je zcela přeměněn na vláknitý křelinoamfibol. Granát a epidot společně s albitem a křemenem na lokalitě BH-6 tvoří lem mohutné křemenné žíly pronikající granitoidy (NOVOTNÝ a ZIMÁK 2001). Mramory nebo metapelity přítomné na všech ostatních výskytech Ca-skarňů nebyly na lokalitě BH-6 zjištěny.

Vzhledem k malému objemu nemohou Ca-skarňů v plášti žulovského plutonu významněji ovlivnit pole přirozené radioaktivity, výpočet hodnot D nemá z fyzikálního hlediska opodstatnění (pro výše uvedený vzorek s extrémními obsahy U a Th by šlo o 1237 nGy.h⁻¹).

6. ZÁVĚR

Z vypočtených hodnot hmotnostní aktivity ekvivalentu ²²⁶Ra (a_m) je zřejmé, že přirozená radioaktivita jednotlivých horninových typů, které na mapovém listu 14–212 Jeseník vystupují na větších plochách a určují pole přirozené radioaktivity terestrického původu, je nižší nebo velmi blízká a_m vyčíslené pro „průměrnou“ zemskou kůru (kolem 180 Bq.kg⁻¹). Mírně zvýšené hodnoty a_m vykazují granitoidy žulovského plutonu (v průměru 195 Bq.kg⁻¹), biotitické plagioklasové ruly vrbenské skupiny (209 Bq.kg⁻¹) a také produkty kyselého až intermediárního vulkanismu ve vrbenské skupině, reprezentované porfýroidy (242 Bq.kg⁻¹).

Anomálně vysoké koncentrace uranu a thoria byly zjištěny v Ca-skarnech v plášti žulovského plutonu: ve vzorku s nejvyšší radioaktivitou jde o 104 ppm U a 254 ppm Th ($a_m = 2769$ Bq.kg⁻¹). Hlavním nositelem uranu je vesuvian. Vzhledem k malému objemu nemohou Ca-skarňů významněji ovlivnit pole přirozené radioaktivity, a proto jejich přítomnost není spojena s žádným rizikem.

LITERATURA

- BEAMISH, D. (2014): Environmental radioactivity in the UK: the airborne geophysical view of dose rate estimates. – *Journal of Environmental Radioactivity*, 138, 249–263.
- BENCKO, V., NOVÁK, J., SUK, M. *et al.* (2011): Zdraví a přírodní podmínky (medicina a geologie). DOLIN, s.r.o., Praha.
- BERETKA, J., MATTHEW, P. J. (1985): Natural radioactivity of Australian building materials, industrial wastes and by-products. – *Health Physics*, 48, 87–95.

- BLAŽKOVÁ, I. (2002): Kontaktní minerály na Borovém vrchu a Boží hoře u Žulové. MS. Diplomová práce. PřF UP Olomouc.
- BOUŠKA, V., JAKEŠ, P., PAČES, T., POKORNÝ, J. (1980): Geochemie. Academia Praha.
- BRÖCKER, M., LANGE, U., MEZGER, K., ŻELAZNIEWICZ, A. (2003): The orthogneisses of the Orlica-Śnieżnik dome (West Sudetes, Poland): Sr-Nd isotope characteristics and Rb-Sr geochronology. - *Journal of the Czech Geological Society*, 48, 1-2, 25-26.
- BURIÁNEK, D., VERNER, K., HANŽL, P., KRUMLOVÁ, H. (2009): Ordovician metagranites and migmatites of the Svratka and Orlice-Sněžník units, northeastern Bohemian Massif. - *Journal of Geosciences*, 54, 2, 181-200.
- EŠTOKOVÁ, A., PALAŠČÁKOVÁ, L. (2013): Study of natural radioactivity of Slovak cements. - *Chemical Engineering Transactions*, 32, 1675-1680.
- HIMMELBERG, G.R., MILLER, T. P. (1980): Uranium- and thorium-rich vesuvianite from the Seward Peninsula, Alaska. - *American Mineralogist*, 65, 1020-1025.
- CHÁB, J., BREITER, K., FATKA, O., HLADIL, J., KALVODA, J., ŠIMŮNEK, Z., ŠTORCH, P., VAŠÍČEK, Z., ZAJÍC, J., ZAPLETAL, J. (2008): Stručná geologie základu Českého masivu a jeho karbonského a permského pokryvu. Vydavatelství České geologické služby, Praha.
- IBRMAJER, J., SUK, M. *et al.* (1989): Geofyzikální obraz ČSSR. Ústřední ústav geologický, Praha.
- JEDLIČKA, J. (1997): Žulovský masív ve Slezsku - přehled dosavadních znalostí. - *Zprávy o geologických výzkumech v roce 1996*, 121-123. Praha.
- KRUŽA, T. (1973): Slezské nerosty a jejich literatura. Moravské muzeum v Brně.
- LAURENT, A., JANOUŠEK, V., MAGNA, T., SCHULMANN, K., MÍKOVÁ, J. (2014): Petrogenesis and geochronology of a post-orogenic calc-alkaline magmatic association: the Žulová Pluton, Bohemian Massif. - *Journal of Geosciences*, 59, 415-440.
- LOSOS, Z., ZIMÁK, J., NOVOTNÝ, P. (2002): Lokalita č. 8. Žulová - Boží hora. Bimetasomická kontaktní zóna. In: Zimák, J. *et al.*: Exkurzní průvodce po mineralogických lokalitách v okolí Javorníku, Jeseníku a Zlatých Hor, 20-21. Vydavatelství UP Olomouc.
- MANOVÁ, M., MATOLÍN, M. (1995): Radiometrická mapa České republiky 1 : 500 000. Český geologický ústav, Praha.
- MATOLÍN, M. (1970): Radioaktivita hornin Českého masivu. Academia, 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.
- NOVÁK, M. (2005): Granitické pegmatity Českého masivu (Česká republika): mineralogická, geochemická a regionální klasifikace a geologický význam. - *Acta Musei Moraviae, Scientiae geologicae*, 90, 3-74. Brno.
- NOVOTNÝ, P., ZIMÁK, J. (2001): Výskyt taktitu poblíž lokality „Korálové jámy“ u Žulové. - *Bulletin mineralogicko-petrologického oddělení Národního muzea v Praze*, 9, 238-240. Praha.
- NOVOTNÝ, P., ZIMÁK, J. (2002): Lokalita č. 11. Vápenná - Vycpávkův lom. Klasické naleziště kontaktní minerálů. In: Zimák, J. *et al.*: Exkurzní průvodce po mineralogických lokalitách v okolí Javorníku, Jeseníku a Zlatých Hor, 27. Vydavatelství UP Olomouc.
- OPLETAL, M., ČECH, S., SEKYRA, J. (1997): Geologie území. In: Müller, V. ed.: Vysvětlivky k souboru geologických a ekologických účelových map přírodních zdrojů v měřítku 1 : 50 000. List 14-23 Králíky, 7-15. Český geologický ústav, Praha.
- OPLETAL, M. *et al.* (1980): Geologie Orlických hor. - Ústřední ústav geologický - Academia Praha.
- PAULÍŠ, P. (2001): Nejzajímavější mineralogická naleziště Moravy a Slezska. Kuttna Kutná Hora.
- Rudnick, R. L., Gao, S. (2005): Composition of the continental crust. In: Rudnick, R. L.: Treatise on geochemistry. Vol. 3 - The crust, 1-64. Elsevier, Amsterdam etc.
- SKÁČEL, J. (1995): Přehled geologie a vysvětlivky ke geologické mapě Rychlebských hor 1 : 50 000. - *Acta Universitatis Palackianae Olomucensis, Facultas Rerum Naturalium, Geologica* 34, 9-23. Olomouc.
- SMITH, M. P., Henderson, P., Jeffries, T.E.R., Long, J., Williams, C.T. (2004): The rare earth elements and uranium in garnets from the Beinn an Dubhaich aureole, Skye, Scotland, UK: constraints on processes in a dynamic hydrothermal system. - *Journal of Petrology*, 45, 3, 457-484.
- SVOBODA, J. *et al.* (1964): Regionální geologie ČSSR. Díl I. Český masív. Sv. 1. Krystalinikum. Nakladatelství ČSAV, Praha.
- ŠALANSKÝ, K., MANOVÁ, M. (2003): Geofyzikální poměry. In: Müller, V. (ed.): Vysvětlivky k souboru geologických a ekologických účelových map přírodních zdrojů v měřítku 1 : 50 000. Listy 04-43 Bílý Potok, 04-44 Javorník, 14-21 Travná, 12-44 Jeseník, 27-32. Česká geologická služba, Praha.

- 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.
- ZACHOVALOVÁ, K., LEICHMANN, J., ŠVANCARA, J. (2002): Žulová Batholith: a post-orogenic, fractionated ilmenite-allanite I-type granite. – *Journal of the Czech Geological Society*, 47, 1–2, 35–44.
- ZIMÁK, J. (2012): Anomálně vysoké obsahy uranu v taktitech a reakčních skarnech pláště žulovského masivu. – *Geologické výzkumy na Moravě a ve Slezsku*, 19, 1–2, 166–168. Brno.
- ZIMÁK, J. (2013a): Přirozená radioaktivita metamorfovaných a magmatických hornin na mapovém listu 14–23 Králíky. – *Geologické výzkumy na Moravě a ve Slezsku*, 20, 157–161. Brno.
- ZIMÁK, J. (2013b): Uran a thorium v granitických pegmatitech a aplitech silezika. – *Geologické výzkumy na Moravě a ve Slezsku*, 20, 162–166. Brno.
- ZIMÁK, J. (2014): Přirozená radioaktivita metamorfítů, magmatitů a předkenozoických sedimentů na mapovém listu 14-41 Šumperk. – *Acta Musei Moraviae, Scientiae geologicae*, 100, 2, 85–94. Brno.
- ZIMÁK, J. (2015a): Přirozená radioaktivita metamorfítů, magmatitů a předkenozoických sedimentů na mapovém listu 15-13 Vrbno pod Pradědem. – *Acta Musei Moraviae, Scientiae geologicae*, 100, 1, 69–73. Brno.
- ZIMÁK, J. (2015b): Přirozená radioaktivita metamorfítů a magmatitů na mapovém listu 14-24 Bělá pod Pradědem. – *Acta Musei Moraviae, Scientiae geologicae*, 100, 2, 69–79. Brno.
- ZIMÁK, J. (2015c): 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. Brno.
- ZIMÁK, J. (2016a): Přirozená radioaktivita metamorfítů a magmatitů na mapovém listu 14–21 Travná. – *Geologické výzkumy na Moravě a ve Slezsku*, 23, 1–2, 121–124. Brno.
- ZIMÁK, J. (2016b): Analýza laboratorních hodnot radioaktivity hornin na mapovém listu 15-11 Zlaté Hory. – *Geologické výzkumy na Moravě a ve Slezsku*, 23, 1–2, 125–129. Brno.
- ZIMÁK, J., NOVOTNÝ, P. (2002): Lokalita č. 7. Žulová – Borový vrch. Naleziště hesonitu a vesuvianu. In: Zimák, J. et al.: Exkurzní průvodce po mineralogických lokalitách v okolí Javorníku, Jeseníku a Zlatých Hor, str. 18–19. Vydavatelství UP Olomouc.
- ŽÁČEK, V. (1997): Metasomatické žíly pyroxenického pegmatoidu z pláště žulovského granitového plutonu. – *Geologické výzkumy na Moravě a ve Slezsku v roce 1996*, 111–114. Brno.
- ŽÁČEK, V. et al. (1995): Geologická mapa ČR 1 : 50 000. List 14–22 Jeseník. Český geologický ústav, Praha.
- ŽÁČEK, V., SKÁCEL, J., SKÁCELOVÁ, D. (2003): Geologie území. In: Müller, V. (ed.): Vysvětlivky k souboru geologických a ekologických účelových map přírodních zdrojů v měřítku 1 : 50 000. Listy 04-43 Bílý Potok, 04–44 Javorník, 14–21 Travná, 12–44 Jeseník, 7–27. Česká geologická služba, Praha.