## RADIOAKTIVITA A CHEMISMUS GRANITOIDŮ VE VÝCHODNÍ ČÁSTI LUGIKA (ČESKÁ REPUBLIKA)

# RADIOACTIVITY AND CHEMISTRY OF GRANITOIDS IN THE EASTERN PART OF THE LUGICUM (CZECH REPUBLIC)

## JIŘÍ ZIMÁK

#### Abstract

Zimák, J., 2023: Radioaktivita a chemismus granitoidů ve východní části lugika (Česká republika). – Acta Musei Moraviae, Scientiae geologicae, 108, 2, 243–268 (with English summary).

Radioactivity and chemistry of granitoids in the eastern part of the Lugicum (Czech Republic)

Two petrographically different types of granitoid bodies cropout in the eastern part of the Lugicum in the territory of the Czech Republic. The first type is represented by small granite or granodiorite massifs (namely Olešnice-Kudowa Massif, Nový Hrádek Stock, Litice Massif and Javorník Massif) and less important granite or granodiorite bodies in the surroundings of the town of Rychnov nad Kněžnou. These rocks contain 2.6 ppm U and 10.8 ppm Th on average, the calculated value of mass activity of <sup>226</sup>Ra equivalent ( $a_m$ ) is 160 Bq.kg<sup>-1</sup> (379 samples analyzed). The second type is represented by plutonic rocks of a so-called tonalite suite ("tonalites"). Modal composition of these rocks corresponds mainly to granodiorite, quartz diorite and quartz monzodiorite. These rocks outcrop along with metamorphites of the Zábřeh Group in the foothills of the Orlické hory Mountains and in the Staré Město Belt. On average, they contain 2.6 ppm U and 10.2 ppm Th,  $a_m = 148$  Bq.kg<sup>-1</sup> (378 samples analyzed). Natural radioactivity of granitoids in the eastern part of the Lugicum can be evaluated as low, more or less consistent with the average radioactivity of the continental-type crust. Natural radioactivity of the studied granitoids does not pose any health risk.

Key words: Lugicum, granitoids, bulk chemistry, trace elements, uranium, thorium, natural radioactivity.

Jiří Zimák, Department of Biology, Faculty of Education, Palacký University, Purkrabská 2, 771 46 Olomouc, Czech Republic; e-mail: jiri.zimak@upol.cz

## ÚVOD

Naše populace je vystavena ionizujícímu záření, jehož podstatná část má terestrický původ. Primárně souvisí s přítomností přirozených primordiálních radionuklidů v horninovém prostředí. Zcela zásadní roli mají čtyři radionuklidy: <sup>40</sup>K, <sup>232</sup>Th, <sup>235</sup>U a <sup>238</sup>U. Thorium a oba uvedené izotopy uranu stojí na počátku rozpadových řad, jejichž členy jsou radioaktivní dceřiné produkty (posledním členem pak některý ze stabilních izotopů olova). Součástí rozpadové řady <sup>238</sup>U je <sup>222</sup>Rn, tedy radioaktivní izotop radonu, jenž při vysokých koncentracích může představovat zdravotní riziko. Jak uvádí BENCKO *et al.* (2011), radon vdechovaný z ovzduší nám způsobuje radiační zátěž 1,2 mSv/rok, litosférická radiace jen 0,5 mSv/rok (jde o ionizující záření vycházející z hornin a také z půdy). Uvedené hodnoty rámcově odpovídají obtížně stanovitelnému průměru, na konkrétních lokalitách mohou být výrazně odlišné. Území na granitoidních tělesech jsou často riziková z hlediska výskytu radonu. Vysoké koncentrace radonu například v ovzduší některých budov mohou souviset se

zvýšenými obsahy uranu v horninách v jejich podloží, ale také s možností migrace radonu k povrchu a do těchto objektů. Vzhledem k často zvýšeným obsahům K, U a Th mohou být granitoidy významným zdrojem litosférické radiace.

V tomto článku je hodnocena přirozená radioaktivita granitoidních hornin ve východní části lugika na základě gamaspektrometricky stanovených obsahů K, U a Th. Uvedeny jsou údaje o celkovém chemickém složení studovaných hornin, které ukazují na jejich vzájemné vztahy a které mohou být zajímavé z geologického hlediska.

### VZORKY A METODY

Během terénních prací v letech 2004 až 2019 bylo ve východní části lugika odebráno 758 horninových vzorků, reprezentujících všechny typy granitoidů vystupujících na území České republiky v prostoru od novohrádeckého masivu na západě až po "tonalitovou" žílu probíhající staroměstskými pásmy v blízkosti východního okraje lugika (obr. 1). Determinace hornin byla prováděna jen makroskopicky. Zařazení vzorku ke konkrétnímu petrografickému typu bylo prováděno metodou kvalifikovaného odhadu, kdy se autor nechával inspirovat publikovanými popisy hornin ze sledovaného území, v nichž byly granitoidy a je



- Obr. 1. Rozmístění granitoidních těles ve východní části lugika (na základě geologických map Českého geologického ústavu a České geologické služby).
  Vysvětlivky: 1 = novohrádecký masiv, 2 = olešnický masiv, 3 = Malý Uhřínov, 4 = Lukavice, 5 = Liberk, 6 = Javornice, 7 = Slatina nad Zdobnicí, 8 = litický masiv, 9 = Potštejn, 10 = Pěčín, 11 = Kunvald, 12 = Klášterec nad Orlicí, 13 = Nekoř, 14 = Mistrovice, 15 = Bystřec, 16 = úsek Dolní Heřmanice Klášterec, 17 = úsek Bušín Staré Město pod Králickým Sněžníkem, 18 = úsek Kunčice pod Králickým Sněžníkem Vlčice, 19 = javornický masiv.
- Fig. 1. Distribution of granitoid bodies in the eastern part of the Lugicum (according to geological maps of the Czech Geological Survey). Explanations: 1 = Nový Hrádek Stock, 2 = Olešnice Massif, 3 = Malý Uhřínov, 4 = Lukavice, 5 = Liberk, 6 = Javornice, 7 = Slatina nad Zdobnicí, 8 = Litice Massif, 9 = Potštejn, 10 = Pěčín, 11 = Kunvald, 12 = Klášterec nad Orlicí, 13 = Nekoř, 14 = Mistrovice, 15 = Bystřec, 16 = Dolní Heřmanice - Klášterec section, 17 = Bušín - Staré Město pod Králickým Sněžníkem section, 18 = Kunčice pod Králickým Sněžníkem - Vlčice section, 19 = Javorník Massif.

doprovázející plutonity (dioritoidy, gabroidy) klasifikovány na základě modálního složení. Protože tento postup rozhodně neumožňuje spolehlivé určení horninového typu, jsou v této práci rozlišovány jen dvě velké skupiny hornin: i) granity a granodiority, ii) horniny tonalitové suity (obr. 1).

V horninových vzorcích byly pomocí spektrometru SG – 1000 LAB s NaI(Tl) detektorem o objemu 0,35 dm<sup>3</sup> (na PřF UP v Olomouci) stanoveny obsahy draslíku (přímo na základě koncentrace <sup>40</sup>K), uranu a thoria (na základě dceřiných produktů, a proto jsou jejich obsahy při uvádění výsledků analýz označovány jako eU a eTh). 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. Délka gamaspektrometrické analýzy byla vždy 1800 s. Meze detekce: K = 0,5 hm. %, U = 1,5 ppm, Th = 1,5 ppm. V případě stanovení draslíku ve studovaném souboru granitoidů je hodnota standardní odchylky (dále jen s.d.) obvykle 0,1 hm. %. Pro U v obvyklých obsazích do 5 ppm je s.d. 0,2–0,3 ppm, při stanovených obsazích 5 až 10 ppm U může s.d. dosahovat až 0,5 ppm. V případě obsahů Th do 12 ppm je s.d. obvykle 0,4–0,7 ppm, při obsazích kolem 30 ppm Th roste s.d. až na 1,2 ppm. Při výpočtu hodnot a<sub>m</sub> a D (viz níže) a při statistickém zpracování dat byly obsahy draslíku pod mezí detekce nahrazeny hodnotou 0,33 hm. % (to se týká jen několika vzorků albitického granitu z novohrádeckého masivu), zcela analogicky byly obsahy uranu pod mezí detekce nahrazeny hodnotou 1 ppm eU.

Z gamaspektrometricky stanovených obsahů draslíku, uranu a thoria byla vypočtena hmotnostní aktivita ekvivalentu <sup>226</sup>Ra ( $a_m$ ), umožňující jediným číslem vyjádřit přirozenou radioaktivitu horniny. 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 vypočteny pomocí vztahů  $a_m$  [Bq.kg<sup>-1</sup>] = (0,077×313K) + 12,35U + (1,43×4,06Th), D [nGy.h<sup>-1</sup>] = (0,043×313K) + (0,427×12,35U) + (0,662x4,06Th), do nichž byl obsah K dosazován v hm. %, obsahy U a Th v ppm (BERET-KA a MATTHEW 1985, UNSCEAR 1988, MATOLÍN a CHLUPÁČOVÁ 1997, NGACHIN *et al.* 2007, EŠTOKOVÁ a PALAŠČÁKOVÁ 2013).

Údaje o chemismu 223 reprezentativních vzorků granitoidů (v případě tonalitové suity i výjimečně dioritoidů) byly získány pomocí XRF analyzátoru DELTA-PREMIUM (výrobek firmy Olympus Innov-X) v laboratořích firmy URGA, s.r.o. se sídlem v Olomouci. Analyzovány byly rozemleté horninové vzorky (cca 250 g), z nichž byly pro potřeby analýzy připraveny pelety (metodiku popisuje ZIMÁK et al. 2016). Analýzy byly provedeny v módu GEOCHEM, délka analýzy byla vždy 40 s (celkově pro "beam-1" a "beam-2"). Použitý XRF analyzátor v principu neumožňuje stanovení obsahu Na a H<sub>2</sub>O<sup>+</sup>, v případě studovaných granitoidů také Mg, jehož obsahy byly vždy pod detekčním limitem (tj. pod cca 3 hm. % MgO). Proto byl v případě granitoidů lugika proveden přepočet výsledku každé XRF analýzy na sumu hlavních stanovitelných oxidů  $(Al_2O_3 + SiO_2 + P_2O_5 + K_2O + CaO + TiO_2 + CaO + TiO_2 + CaO + TiO_2 + CaO + CaO + TiO_2 + CaO + CaO + TiO_2 + CaO +$ FeOtot.) rovnu 92 hm. %. Zbývajících 8 hm. % v tomto postupu připadá na Na2O + MgO +  $H_2O^+$ ; na základě průměrných nebo mediánových obsahů hlavních složek granitoidů v různých tělesech východní části lugika uváděných KLOMÍNSKÝM et al. (2010, 2016) se suma Na<sub>2</sub>O + MgO + H<sub>2</sub>O<sup>+</sup> pohybuje v rozpětí 7,5 až 9,2 hm. % (výše uvedených 8 hm. % bylo zvoleno z tohoto intervalu). Obsahy stopových prvků jsou z hlediska metodiky přepočtu výsledků XRF analýz nepodstatné.

Obsahy draslíku ve studovaných horninách byly stanoveny dvěma rozdílnými metodami, jejichž výsledky se neshodují. Existuje alespoň pozitivní korelace mezi obsahy stanovenými gamaspektrometricky a XRF analýzou, avšak hodnota  $R^2$  je jen 0,64. Ze srovnání dat je zřejmé, že XRF analýzou byly po provedených přepočtech (viz výše) zjištěny vždy vyšší obsahy draslíku, patrně bližší realitě. Gamaspektrometricky stanovené obsahy K nejsou v práci uvedeny, avšak byly použity k výpočtu hodnot  $a_m$  a D. Jsou-li obsahy K skutečně podhodnocené, pak jsou vypočtené hodnoty  $a_m$  a D nižší ve srovnání s realitou (samozřejmě za předpokladu, že obsahy Th a U byly ve vzorcích stanoveny víceméně správně). Takto vzniklý rozdíl však není zásadní a z hlediska této práce je nepodstatný (na srovnání mezi jednotlivými tělesy nebo horninovými typy nemá vliv).

#### Přesnost a správnost analýz provedených pomocí XRF analyzátoru DELTA-PREMIUM

Tato stať byla do článku zařazena na základě žádosti jednoho z recenzentů, jenž zcela oprávněně klade otázku, nakolik lze věřit analytickým datům získaným pomocí XRF analyzátoru DELTA-PREMIUM.

Přesnost XRF analyzátoru DELTA-PREMIUM lze na základě provedených testů hodnotit jako vysokou. Při opakovaných měřeních na tabletě připravené z rozemletého horninového vzorku byly získány vždy velmi podobné výsledky (to platí nejen pro granitoidy). Přesnost se zvyšuje s délkou analýzy. Obrázek 2 ukazuje obsahy Si, Al, Fe, K, Zr a Y ve vzorku granitu 14-11-29, stanovené analýzami v délce 40 a 120 sekund. Je zřejmé, že i analýzy trvající "jen" 40 s jsou dostatečně přesné. Obrázek 3 dokládá přesnost (reprodukovatelnost) analýz na příkladu dvou vzorků granitu (14-11-29, 14-14-86) a dvou vzorků hornin tonalitové suity (14-23-1050, 14-23-1056) – opět jde o obsahy Si, Al, Fe, K, Zr a Y, délka analýzy 40 s. K obrázkům 2 a 3 nutno poznamenat, že stanovené obsahy všech prvků neodpovídají realitě, tj. nejsou správné (viz níže).



Obr. 2. Výsledky opakovaných měření XRF analyzátorem DELTA-PREMIUM, délka analýzy 40 nebo 120 sekund.

Fig. 2. Results of repeated measurements with the XRF analyser DELTA-PREMIUM, analysis duration 40 or 120 seconds.



Obr. 3. Výsledky opakovaných měření čtyř různých vzorků granitoidů XRF analyzátorem DELTA-PREMIUM, délka analýzy 40 sekund.



Jako všechny instrumentální metody je i XRF analýza metodou relativní, a tedy XRF analyzátor je nutno kalibrovat na základě analýzy standardů s přesně známými obsahy složek, jejichž kvantita má být analyzátorem stanovována (ve zvoleném módu). Tato tzv. tovární kalibrace je prováděna výrobcem. V případě použitého XRF analyzátoru DELTA-PREMIUM jsou parametry továrního nastavení 1× ročně kontrolovány a případně korigovány autorizovanou servisní organizací, jíž je BAS Rudice, s.r.o. (pro území ČR a též SR).

Výsledek XRF analýzy je zásadním způsobem ovlivněn povahou analyzovaného vzorku – např. jde o nerovnou plochu na horninovém vzorku, nabroušenou plochu nebo rozemletou horninu ("prášek"). V případě celistvých nebo jemnozrnných hornin lze získat reprezentativní údaje o chemickém složení XRF analýzou na rovné ploše (cca 1 cm<sup>2</sup>), avšak u hrubozrnnějších hornin (včetně granitoidů) je nutno k analýze využít homogenizované a rozemleté vzorky. V módu GEOCHEM je tovární kalibrace vhodná pro analýzy prováděné na povrchu pevných vzorků. Analyzujeme-li však rozemletý vzorek, neodpovídá výsledek analýzy realitě, sumy stanovených prvků (oxidů) jsou příliš nízké, avšak řada provedených testů naznačuje, že kvantitativní poměr mezi makroelementy je blízký skutečnosti. Správnost výsledků lze prověřit analýzou vzorků, jejichž chemismus byl spolehlivě stanoven jinými metodami. K tomuto účelu byla využita sada rozpráškovaných horninových vzorků, které byly v minulosti analyzovány metodou ICP-OES/MS v Acme Analytical Laboratories Ltd (Vancouver, uvedené laboratoře jsou nyní začleněny do společnosti Bureau Veritas). Nutno poznamenat, že autor neměl možnost z "prášků" zhotovit standardním způsobem pelety, a tak před měřením byly zhruba tři gramy "prášku" umístěny do středu kruhové podložky (fólie) z polyetylénu a pomocí válečku o průměru cca 25 mm byly tlakem ruky stlačeny do tablety, která byla i s PE-podložkou přemístěna na měřicí okénko přístroje. Tento způsob přípravy vzorku k analýze může být zdrojem chyb (proporce mezi prvky patrně výrazněji ovlivněny nejsou). Pomocí aplikace Excel byly na základě výsledků analýz provedených XRF analyzátorem DELTA-PREMIUM a údajů získaných metodou ICP-OES/MS odvozeny lineární rovnice, umožňující přepočet obsahů stanovených XRF analyzátorem na obsahy bližší realitě.

V tabulce 1 je provedeno srovnání výsledků získaných pomocí XRF analyzátoru DEL-TA-PREMIUM a metodou ICP-OES/MS. K analýzám byly využity dva vzorky homogenizovaného a rozemletého pegmatoidního granitu z Krčmaně. XRF analýza každého vzorku byla provedena 3×, vždy v délce 40 sekund. Výsledky XRF analýz byly přepočteny pomocí vztahů, které byly použity pro celý soubor hornin hodnocených v tomto článku, a následně byl proveden přepočet na sumu oxidů 94,38 hm. % (Krčmaň-1) a 95,42 hm. % (Krčmaň-2). Uvedené hodnoty byly odvozeny z výsledků analýz metodou ICP-OES/MS, kdy byl od sumy 99,89 a 99,85 hm. % (pro vzorky Krčmaň-1 a Krčmaň-2 v tomto pořadí), odečten stanovený obsah Na<sub>2</sub>O (4,31 a 3,43 hm. %) a LOI (1,20 a 1,00 hm. %). Do tabulky 1 byly zařazeny pouze prvky (oxidy) diskutované v tomto článku. V případě obou hlavních oxidů (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> a SiO<sub>2</sub>) lze konstatovat značnou podobnost mezi výsledky získanými XRF analýzou a metodou ICP-OES/MS. Obsahy  $K_2O$  stanovené XRF analýzou jsou výrazně vyšší než ty získané metodou ICP-OES/MS. Obsahy Rb, Sr, Y a Zr stanovené metodou XRF nebyly nijak normalizovány, srovnání s obsahy zjištěnými metodou ICP-OES/MS je z dat v tabulce 1 zřejmé. V případě yttria mohou být obsahy stanovené XRF analyzátorem DELTA-PREMIUM výrazně nadhodnocené (viz vzorek Krčmaň-1). Proto lze XRF analýzou stanovené vysoké koncentrace yttria v granitoidech novohrádeckého masivu považovat za nesprávné (viz komentář v kapitole "Výsledky a diskuze", bod 8). K otestování XRF analyzátoru v případě vysokých obsahů yttria neměl autor článku vhodné vzorky (v sadě "prášků" analyzovaných metodou ICP-OES/MS byl nejvyšší obsah Y jen 128 ppm). Absolutní hodnoty vysokých obsahů yttria v horninách novohrádeckého masivu lze sice snadno zpochybnit, avšak je zcela zřejmé, že obsahy yttria v granitoidech tohoto tělesa jsou anomálně vysoké, a lze je považovat za výjimečné v rámci granitoidních hornin celého Českého masivu.

Tabulka 1. Srovnání výsledků analýz provedených metodou XRF (pomocí analyzátoru DELTA-PREMIUM) a metodou ICP-OES/MS.

Vzensk	Matada	$SiO_2$	$Al_2O_3$	$K_2O$	FeO	Rb	Sr	Y	Zr
VZOICK	Metoda	hm. %	hm. %	hm. %	hm. %	ppm	ppm	ppm	ppm
	XRF, analýza 1	73,54	14,65	2,88	1,38	96	33	39	30
	XRF, analýza 2	73,75	14,46	2,88	1,37	95	34	43	29
Krčmaň-1	XRF, analýza 3	73,44	14,80	2,86	1,37	97	34	39	29
	XRF, průměr 1-3	73,58	14,63	2,87	1,37	96	34	40	29
	ICP-OES/MS	75,08	15,19	2,16	0,93	78,0	32,0	22,9	31,8
	XRF, analýza 1	71,28	16,69	4,69	1,54	154	24	18	16
	XRF, analýza 2	71,44	16,54	4,68	1,55	153	23	18	17
Krčmaň-2	XRF, analýza 3	71,19	16,81	4,66	1,55	152	23	17	16
	XRF, průměr 1-3	71,30	16,68	4,68	1,55	153	23	18	16
	ICP-OES/MS	74,04	16,36	3,40	1,05	129,3	23,9	14,7	19,7

 Table 1.
 Comparison of the results of analyses performed by the XRF method (using the DELTA-PREMIUM analyser) and the ICP-OES/MS method.

Na obrázcích 4 až 9 jsou porovnány výsledky analýz pomocí analyzátoru DELTA-PREMIUM s daty z laboratoří ACME. Jde o sadu 59 rozpráškovaných horninových vzorků, v níž jsou zastoupeny převážně granitoidy, aplity, pegmatity, karbonátové horniny a železné rudy. Autorem tohoto článku byla zmíněná sada vzorků analyzována v rámci testování přístroje DELTA-PREMIUM ve firmě URGA, s.r.o. v roce 2014. Analýzy byly provedeny v módu GEOCHEM na peletách připravených výše uvedeným způsobem. Vzhledem k tomu, že šlo o test využitelnosti přístroje a celého pracovního postupu byl zvolen relativně dlouhý čas analýzy – celkem 180 sekund (90 s pro "beam-1", 90 s pro "beam-2"). Test prokázal využitelnost analyzátoru DELTA-PREMIUM v laboratorních podmínkách a nutnost korekce (nebo alespoň kontroly) získaných dat na základě analýz vzorků známého složení. V sadě obrázků 4 až 9 jsou zastoupeny tři makroelementy přítomné v granitoidech (Si, K a Fe) a tři stopové prvky (Rb, Sr a Zr). Z obrázků je zřejmá výrazná pozitivní korelace mezi obsahy stanovenými analyzátorem DELTA-PREMIUM a daty z ACME – koeficient determinace ( $\mathbb{R}^2$ ) a lineární regrese jsou součástí každého z obrázků. Hodnota  $\mathbb{R}^2$  je u všech šesti prvků nad 0,98. Tyto obrázky dokládají, že (alespoň podle zkušeností autora s testovaným analyzátorem) s rostoucím atomovým číslem zpravidla roste přesnost i správnost stanovení daného chemického prvku. Z obrázku 5 je zřejmé, že v případě draslíku poskytl výstup z analyzátoru DELTA-PREMIUM zcela nesprávné hodnoty, a tedy přepočet naměřených hodnot pomocí rovnice uvedené v obrázku 5 je nezbytný. K rovnicím uvedeným v obrázcích 4 až 9 nutno poznamenat, že mají platnost jen při určitých parametrech nastavení přístroje a že po korekci těchto parametrů servisní organizací je nezbytné provést kontrolní analýzy vzorků známého složení a zpravidla odvodit rovnice nové.

Na závěr této stati je nutno jednoznačně odpovědět na otázku recenzenta, zda lze výsledky analýz horninových vzorků provedené XRF analyzátorem DELTA-PREMIUM považovat za správné. Správnost stanovení obsahu konkrétního prvku je významně ovlivněna firemním nastavením přístroje a jeho technickým stavem, povahou matrice i možnými spektrálními interferencemi píků jednotlivých prvků, představujícími pro software přístroje zásadní komplikaci, která může být příčinou chybných výsledků. Správnost výsledků analýz prováděných pomocí XRF analyzátoru DELTA-PREMIUM je nutno vždy ověřit analýzou vzorku známého složení a současně podobného chemismu (například společně se sadou studovaných granitoidů analyzovat alespoň jeden vzorek granitoidu se známým složením). Ke shodě mezi výsledkem provedené XRF analýzy a údajem o koncentraci daného prvku ve známém vzorku zpravidla nedojde, obvykle je rozdíl mezi oběma údaji podstatný. Proto je nezbytné z výsledků XRF analýz provedených analyzátorem DELTA-PRE-MIUM na sadě vzorků se známých chemismem odvodit regresní rovnici pro každý ze stanovovaných chemických prvků, a následné korigovat data, která jako výsledné koncentrace jednotlivých prvků poskytuje software využívaný XRF analyzátorem. Při použití tohoto postupu je pak odpověď na výše položenou otázku "víceméně ano". Využitelností téhož typu XRF analyzátoru k analýze hornin se zabývá podrobně NECHVÁTAL (2017), a dochází v podstatě ke shodnému závěru.



Obr. 4. Test XRF analyzátoru DELTA-PREMIUM: obsah SiO<sub>2</sub> v horninových vzorcích. Fig. 4. XRF analyser DELTA-PREMIUM test: Content of SiO<sub>2</sub> in rock samples.





Obr. 6. Test XRF analyzátoru DELTA-PREMIUM: obsah  $Fe_2O_3$  v horninových vzorcích. Fig. 6. XRF analyser DELTA-PREMIUM test: Content of  $Fe_2O_3$  in rock samples.



Obr. 7. Test XRF analyzátoru DELTA-PREMIUM: obsah rubidia v horninových vzorcích. Fig. 7. XRF analyser DELTA-PREMIUM test: Content of rubidium in rock samples.



Obr. 8. Test XRF analyzátoru DELTA-PREMIUM: obsah stroncia v horninových vzorcích. Fig. 8. XRF analyser DELTA-PREMIUM test: Content of strontium in rock samples.



Obr. 9. Test XRF analyzátoru DELTA-PREMIUM: obsah zirkonia v horninových vzorcích. Fig. 9. XRF analyser DELTA-PREMIUM test: Content of zirconium in rock samples.

## PETROGRAFICKÁ CHARAKTERISTIKA GRANITODŮ VE VÝCHODNÍ ČÁSTI LUGIKA - STRUČNÝ PŘEHLED NA ZÁKLADĚ JIŽ PUBLIKOVANÝCH ÚDAJŮ

Již na základě publikovaných údajů lze ve sledované části lugika vyčlenit dva petrograficky rozdílné typy granitoidních těles (viz obr. 1): Prvním typem isou malé masiyy a ve výchozu drobná tělesa tvořená granity nebo granodiority. Jejich reprezentantem je novohrádecký, olešnický, litický a javornický masiv a plošně méně významná tělesa, pojmenovaná podle katastrálního území, na němž vystupují (celá nebo převážně), jako Malý Uhřínov, Lukavice a Liberk. Druhým typem jsou tělesa tvořená horninami tonalitové suity, často označovanými jen jako "tonality". Nutno poznamenat, že ve starších klasifikacích plutonitů "před Streckeisenem" byl název tonalit užíván i pro křemenný diorit. Jak bude zřejmé z následujícího textu, při respektování Streckejsenovy klasifikace nejsou v tělesech tohoto typu dominantní tonality, ale převládají v nich granodiority, provázené hlavně granity a křemennými diority. Proto někteří autoři (např. MARTINEC 1977) označují tělesa tvořená touto horninovou asociací zjednodušeně jako "tělesa amfibolicko-biotitických granodioritů". I když toto pojmenování lépe vystihuje petrografickou povahu tonalitové suity, preferuje autor tohoto článku kratší název "tonality". Drobná tělesa "tonalitů" jsou v následujícím textu označena jako Javornice, Slatina nad Zdobnicí, Pěčín, Kunvald, Klášterec nad Orlicí, Nekoř, Mistrovice a Bystřec. Plošně významné "tonality" vystupují v zábřežské skupině mezi Dolními Heřmanicemi a Kláštercem. Mohutná žíla "tonalitu" probíhá staroměstskými pásmy od Bušína až po Vlčice. U Potštejna vystupují jak granity až granodiority, tak i "tonality". V následujících odstavcích je uvedena velmi stručná petrografická charakteristika granitoidů východní části lugika, zpracovaná na základě údajů dostupných v literatuře. Podrobnější údaje jsou zde uvedeny pouze v případě granitoidních těles, jimž je věnována zvýšená pozornost v části věnované diskuzi.

Novohrádecký masiv: DUDEK a FEDIUK (1956) vyčleňují dva horninové typy, jimi označované jako leukokratní albitický granodiorit a muskoviticko-biotitický albitický granodiorit. První z uvedených horninových typů je dominantní (95 % plochy), citovaní autoři v rámci něj rozlišují tři variety (všesměrně zrnitá, slabě usměrněná a výrazně usměrněná). Podle výsledků planimetrických analýz (DUDEK a FEDIUK 1956) jsou živce v obou typech hornin zastoupeny jen K-živcem a albitem An<sub>03-05</sub>. Ve Streckeisenově klasifikaci tedy horniny odpovídají alkalicko-živcovému granitu, s poznámkou, že povaha živců je výsledkem velmi silné albitizace, popisované citovanými autory. Charakteristiku hornin novohrádeckého masivu uvádí i DOMEČKA a OPLETAL (1974) a OPLETAL *et al.* (1980), z okrajové zóny masivu při styku s jeho pláštěm zmiňují přítomnost "leukokratního albitického křemenného dioritu". Podle hodnocení KLOMÍNSKÉHO *et al.* (2010), založeného na údajích v již citovaných publikacích, je novohrádecký masív tělesem tvořeným leukokratním alkalicko-živcovým granitem (ve třech varietách lišících se stavbou) s úzkým lemem leukokratního křemenného dioritu.

*Olešnický masiv:* Takto je označována nejjižnější část kudowsko-olešnického masivu, vybíhající na území České republiky. Kudowsko-olešnický masiv je složenou intruzí. Centrální část tohoto tělesa je tvořena porfyrickým biotitickým granodioritem (stáří 360 ± 18 Ma, K-Ar datování na biotitu), v okrajové části intruze vystupuje mladší leukokratní granodiorit až granit (stáří 344 ± 17 Ma, K-Ar datování na biotitu) – viz DOMEČKA a OPLETAL (1974), OPLETAL *et al.* (1980). Starší část intruze je v novější literatuře někdy označována jako "olešnický granodiorit", mladší jako "kudowský granodiorit". Na našem území Do-MEČKA a OPLETAL (1974) a OPLETAL *et al.* (1980) rozlišují oba hlavní horninové typy: biotitický granodiorit (vystupuje v severní části olešnického masivu, jde o "olešnický granodiorit") a leukokratní granodiorit (v jižní části olešnického masivu, jde o "kudowský granodiorit"). Kyselejší leukokratní granodiorit je prokazatelně mladší. Ve Streckeisenově klasifikaci horniny olešnického masivu podle OPLETAL *et al.* (1980) odpovídají granodioritu, někdy hornině na rozhraní granit/granodiorit, v případě bazičtějších typů hornině na

rozhraní granodioritu a křemenného monzodioritu (Streckeisenův parametr Q = 20). BACH-LIŃSKI (2007) charakterizuje celý kudowsko-olešnický masiv jako těleso tvořené monzogranitem, granodioritem a tonalitem, méně alkalicko-živcovým granitem. K údajům o radiometrickém stáří granitoidů kudowsko-olešnického masivu nutno poznamenat, že BACHLIŃSKI a HAŁAS (2002) a BACHLIŃSKI (2007) uvádí 275 až 338 Ma (7 vzorků, K-Ar datování na biotitu) a 331 ± 11 Ma (Rb-Sr datování na celé hornině).

*Malý Uhřínov:* Těleso leukokratního granodioritu až adamellitu, silně kataklasticky postiženého (OPLETAL *et al.* 1980).

*Lukavice:* Převažuje amfibolicko-biotitický albitický granodiorit (bazicita plagioklasu je  $An_{06-08}$ ), místy je přítomen křemenný diorit (DOMEČKA a OPLETAL 1974, OPLETAL *et al.* 1980); ve Streckeisenově klasifikaci jde o granodiorit a křemenný diorit.

*Liberk:* Granitoidní těleso DOMEČKOU a OPLETALEM (1974) a OPLETALEM *et al.* (1980) označované jako Rampuše – Prorubky, tvořené podle citovaných autorů leukokratními mikrogranity až granodiority (slabě kataklasticky postiženými) a kataklazovanými leukokratními granity. Výsledky modálních analýz uváděných citovanými autory odpovídají granitu v duchu Streckeisenovy klasifikace.

*Litický masiv:* MARTINEC (1997) granitoidní horninu označuje jako biotitický granodiorit litického typu s poznámkou, že plagioklas v něm pouze mírně převažuje nad draselným živcem. Je tedy pravděpodobné, že podle Streckeisenovy klasifikace jde buď o granit nebo horninu na přechodu granit/granodiorit.

Javornický masiv: Těleso tvořené hlavně biotitickým granitem, tonalitem, v menší míře amfibolickým granodioritem (MAZUR *et al.* 2007). Další údaje uvádí BIAŁEK a WERNER (2002, 2004). Horniny vystupující na území ČR naši mapující geologové (SKÁCELOVÁ *et al.* 1992) označují společným názvem "javornický granodiorit". KLOMÍNSKÝ *et al.* (2010) javornický granodiorit charakterizuje na základě již dříve publikovaných dat jako kataklastický středně zrnitý až jemnozrnný biotitický leukogranodiorit.

*Potštejn:* Podle geologické mapy v měřítku 1 : 50 000 (ČECH *et al.* 1996) u Potštejna vystupují biotitické granodiority, jejichž území je relativně širokým pruhem migmatitizovaných pararul rozděleno na dvě části. V severní části se v mapě střídají úzké pásy biotitických granodioritů a migmatitizovaných pararul. V následující kapitole je doloženo, že granitoidy severní části náleží ke skupině "granit-granodiorit", horniny jižní části již při makroskopickém hodnocení odpovídají typickým "tonalitům". Tento poznatek se promítá i do obrázku 1, v němž jsou u Potštejna vyznačena dvě petrograficky rozdílná tělesa.

Javornice, Slatina nad Zdobnicí, Pěčín, Kunvald, Klášterec nad Orlicí, Nekoř, Mistrovice, Bystřec: Relativně malé výchozy hornin tonalitové suity, podle DOMEČKY a OPLETALA (1974) a OPLETALA et al. (1980) tvořené granodiority (biotitickými, amfibolicko-biotitickými a biotiticko-amfibolickými), které silně převládají nad křemennými diority (zpravidla amfibolicko-biotitickými, biotiticko-amfibolickými a pyroxenicko-biotitickými). Modální složení uváděné citovanými autory odpovídá ve Streckeisenově klasifikaci převážně granodioritu nebo granitu, někdy křemennému dioritu nebo křemennému monzodioritu, mafické uzavřeniny křemennému syenitu. Kromě již citovaných prací se petrografickými poměry zabývá MARTINEC (1977).

Dolní Heřmanice – Klášterec, Bušín – Staré Město pod Králickým Sněžníkem a Kunčice pod Králickým Sněžníkem – Vlčice: Jde o tři území, ve východním lugiku reprezentující naprostou většinu plochy, na níž vystupují horniny tonalitové suity (obr. 1, úseky 16, 17 a 18). V prostoru Dolní Heřmanice – Klášterec "tonality" pronikají horninami zábřežské skupiny (úsek 16), ve zbývajících dvou úsecích (17 a 18) horninami staroměstských pásem, mocnost tzv. velké tonalitové žíly dosahuje až 280 m (KLOMÍNSKÝ *et al.* 2010). Údaje o petrografické povaze uvádí např. OPLETAL *et al.* (1980) a KOPA (1984) – první z citovaných prací je zaměřena na "tonality" v zábřežské skupině, druhá na nejsevernější část "tonalitové" intruze na území Rychlebských hor (Vlčice, Petrovice, Skorošice, Nýznerov). Modálním složením odpovídají "tonality" vystupující na těchto třech územích hlavně křemennému dioritu, granodioritu a křemennému monzodioritu, ojediněle tonalitu, monzodioritu nebo granitu. Podle Reného (1998) lze uvedené horniny geneticky přiřadit ke granitům I-typu. Citovaný autor se vyjadřuje i k obsahům U a Th v těchto horninách, hodnotí je jako nízké. Přirozenou radioaktivitou hornin tonalitové suity v zábřežské skupině a ve staroměstských pásmech na mapových listech 14-23 Králíky, 14-41 Šumperk, 14-21 Travná a 14-22 Jeseník se zabývá ZIMÁK (2013, 2014, 2016, 2018).

#### VÝSLEDKY A DISKUZE

V tabulce 2 jsou sumarizovány vypočtené hodnoty hmotnostní aktivity ekvivalentu  $^{226}$ Ra ( $a_m$ ) a dávkového příkonu záření gama (D) pro horniny jednotlivých těles granitoidů východní části lugika nebo jejich úseků. Hodnoty  $a_m$  a D uvedené v tabulce 2 jsou založeny na výsledcích gamaspektromerického stanovení obsahu K, U a Th v souboru 758 horninových vzorků, z něhož byl vyřazen vzorek "tonalitu" z k.ú. Vyšehoří s anomálně vysokými obsahy uranu (9,0 ppm eU) a zejména thoria (58,7 ppm eTh), jenž není dále diskutován. Obsahy uranu a thoria v horninách granitoidních těles sumarizuje tabulka 3. Výsledky všech provedených XRF analýz (celkem 223 vzorků) jsou shrnuty v tabulkách 4 a 5. Do tabulky 5 byly začleněny i údaje o gamaspektrometricky stanovených obsazích thoria a uranu, připojena je i vypočtená hodnota  $a_m$  (na základě gamaspektrometrického stanovení K, U a Th v identickém souboru vzorků). Významné či zajímavé poznatky jsou komentovány v následujících odstavcích:

1. Z výsledků gamaspektrometrických analýz je zřejmé, že horniny skupiny granity+ granodiority vykazují o něco vyšší přirozenou radioaktivitu než horniny tonalitové suity (tab. 2): vypočtené hodnoty a<sub>m</sub> pro celý soubor granity+granodiority (n = 379) jsou 155 Bq.kg<sup>-1</sup> (median) a 160 Bq.kg<sup>-1</sup> (průměr), hodnoty  $a_m$  pro všechny horninové vzorky reprezentující tonalitovou suitu (n = 378) jsou 143 Bq.kg<sup>-1</sup> (median) a 148 Bq.kg<sup>-1</sup> (průměr). Na základě průměrných hodnot am lze přirozenou radioaktivitu granitoidů východní části lugika považovat za relativně nízkou. To je zřejmé ze srovnání výše uvedených hodnot  $a_m$  s hodnotami vypočtenými z průměrných obsahů K, U a Th v zemské kůře (tj. klarků). V literatuře uváděné klarky pro konkrétní chemický prvek se často výrazně liší. 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 2 vypočtená  $a_m$  179 Bq.kg<sup>-1</sup> (D =  $\hat{87}$  nGy.h<sup>-1</sup>). RUDNICK a GAO (2005) pro svrchní část zemské kůry kontinentálního typu uvádí 2,80 hm. % K<sub>2</sub>O (= 2,32 hm. % K), 2,7 ppm U a 10,5 ppm Th. Tomu odpovídá  $a_m$  150 Bq.kg<sup>-1</sup> (D =  $7\overline{4}$  nGy.h<sup>-1</sup>). Z klarků vypočtených jinými autory (přehled poskytuje např. RUDNICK a GAO 2005) lze samozřejmě odvodit jiné hodnoty a<sub>m</sub> a D. Průměrná hodnota globálního D je odhadována na 55 nGy.h<sup>-1</sup> (UNSCEAR 1988, MANOVÁ a MATOLÍN 1995), střední hodnota D pro území ČR je 65,6 ± 19.0 nGv.h<sup>-1</sup> (MANOVÁ a MATOLÍN 1995).

- Tabulka 2. Vypočtené hodnoty hmotnostní aktivity ekvivalentu  ${}^{226}$ Ra ( $a_m$ ) a dávkového příkonu záření gama (D); n = počet vzorků, x = průměr.
- Table 2. Calculated values of mass activity of  $^{226}$ Ra equivalent ( $a_m$ ) and gamma radiation dose rate (D); n = number of samples, x = average.

ý zomí			a <sub>m</sub> (B	q.kg <sup>-1</sup> )			D (n	Gy.h <sup>-1</sup> )	
uzenn	п	min.	max.	med.	x	min.	max.	med.	x
Granity + granodiority									
novohrádecký masiv	99	100	237	152	153	52	117	77	77
olešnický masiv	117	75	220	147	141	37	104	71	70
Malý Uhřínov	15	82	157	115	116	40	78	57	58
Lukavice	14	181	306	237	238	88	150	115	116
Liberk	23	72	166	118	119	35	83	60	60
litický masiv	34	113	259	187	186	57	126	92	91
javornický masiv	66	125	287	186	191	62	139	91	93
Potštejn	11	151	250	195	198	75	121	96	98
horniny tonalitové suity									
Potštejn	18	66	266	173	175	32	126	82	84
Javornice	7	184	246	223	220	90	119	107	106
Slatina nad Zdobnicí	6	112	205	138	146	54	100	68	72
Pěčín	6	119	263	177	184	59	125	85	89
Kunvald	2	157	194	175	175	76	94	85	85
Klášterec nad Orlicí	17	116	208	170	165	58	100	84	80
Nekoř	5	171	257	196	200	84	124	94	97
Mistrovice	11	118	200	157	159	59	101	78	79
Bystřec	10	77	131	113	109	39	67	56	54
Dolní Heřmanice - Klášterec	124	64	257	152	151	32	120	76	74
Bušín - Staré Město p. K. S.	95	71	236	138	139	34	106	68	68
Kunčice p. K. S Vlčice	77	53	246	130	134	27	122	65	67

1000000000000000000000000000000000000	Tabulka 3.	Obsah uranu (	eU	) a thoria (	(eTh)	v horninách: $n = poo$	čet vzorků, x = průměr.
---------------------------------------	------------	---------------	----	--------------	-------	------------------------	-------------------------

Table 3. Content of uranium (eU) and thorium (eTh) in rocks; n = number of samples, x = average.

ý manu l			eU (	ppm)		eTh (ppm)				
uzemi	п	min.	max.	med.	х	min.	max.	med.	х	
Granity + granodiority										
novohrádecký masiv	99	<1,5	3,7	1,5	1,5	4,8	23,6	11,2	11,5	
olešnický masiv	117	<1,5	7,0	2,9	2,8	2,5	15,4	7,6	7,6	
Malý Uhřínov	15	<1,5	2,7	<1,5	1,5	6,8	10,5	7,7	8,3	
Lukavice	14	2,8	5,8	4,7	4,3	14,4	24,7	18,7	19,1	
Liberk	23	<1,5	2,0	<1,5	<1,5	5,3	11,9	7,5	7,8	
litický masiv	34	1,5	6,4	2,9	3,0	5,4	22,2	14,0	13,4	
javornický masiv	66	2,1	8,7	3,8	3,9	4,3	27,3	13,0	13,5	
Potštejn	11	1,5	5,0	3,6	3,5	8,1	18,7	11,6	12,4	
horniny tonalitové suity										
Potštejn	18	1,5	8,2	3,4	4,0	3,6	34,1	10,4	12,6	
Javornice	7	2,9	6,2	5,3	4,9	14,2	16,9	15,6	15,4	
Slatina nad Zdobnicí	6	2,0	4,1	2,7	2,9	6,2	16,4	7,7	9,1	
Pěčín	6	3,0	8,7	4,2	4,9	4,2	14,8	11,1	10,8	
Kunvald	2	2,5	4,0	3,3	3,3	13,2	14,2	13,7	13,7	
Klášterec nad Orlicí	17	1,9	6,0	3,2	3,5	4,5	15,2	12,2	11,5	
Nekoř	5	2,4	4,8	3,9	3,6	12,3	26,5	13,4	15,8	
Mistrovice	11	<1,5	3,1	2,4	2,3	8,6	13,0	9,6	10,2	
Bystřec	10	<1,5	2,8	1,9	1,8	4,1	10,5	6,0	6,3	
Dolní Heřmanice - Klášterec	124	<1,5	8,6	2,4	2,6	2,2	21,6	10,4	10,3	
Bušín - Staré Město p. K. S.	95	<1,5	14,3	2,1	2,4	1,5	15,7	9,8	9,9	
Kunčice p. K. S Vlčice	77	<1,5	4,6	1,7	1,8	1,5	20,8	8,4	9,0	



Obr. 10. Korelace  $SiO_2$  versus  $a_m$  v obou skupinách hornin. Fig. 10. Silica versus  $a_m$  correlation in both groups of rocks.

2. Rozdílnému modálnímu složení hornin obou skupin odpovídají rozdíly v obsazích některých makroprvků stanovených metodou XRF (tab. 4). Obrázek 10 dokumentuje vysokou variabilitu obsahů SiO<sub>2</sub>. V případě souboru "granity+granodiority" (115 vzorků) jsou obsahy SiO<sub>2</sub> v rozpětí 62,04-75,21 hm. % (median 70,26 hm. %, průměr 69,78 hm. %) – jde tedy převážně o kyselé horniny, pouze pět vzorků (tj. cca 4 %) z tohoto souboru náleží k intermediárním (obsah SiO<sub>2</sub> pod 63 hm. %). Bazicita hornin tonalitové suity (analyzováno 108 vzorků) je v průměru výrazně vyšší, obsahy SiO<sub>2</sub> vykazují vysokou variabilitu v rozpětí 49,04-73,05 hm. % (median 58,40 hm. %, průměr 58,79 hm. %), zcela v souladu s petrografickou pestrostí této horninové asociace – většina analyzovaných vzorků (85 %) náleží k intermediárním horninám, výrazně méně jsou zastoupeny kyselé horniny (12 %), ojedině-le bazické s obsahy SiO<sub>2</sub> pod 52 hm. % (zbývající 3 % vzorků). Nutno poznamenat, že spíše výjimečnou součástí tonalitové suity jsou horniny, které lze již makroskopicky považovat za gabroidy, případně za ultramafity (hornblendity), avšak tyto horniny vzhledem k zaměření práce studovány nebyly. Z obrázku 10 je zřejmá i již výše komentovaná velmi podobná úroveň přirozené radioaktivity obou hodnocených souborů horninových vzorků.

Obsahy draslíku jsou ve vzorcích souboru granity+granodiority o něco vyšší než v horninách tonalitové suity. To je zřejmé z obrázku 11 i z mediánových obsahů  $K_2O$  v tabulce 4. Soubor granity+granodiority má metodou XRF stanovené obsahy  $K_2O$  v rozpětí <0,05-6,02 hm. % (median 4,88 hm. %, průměr 4,58 hm. %, n = 115). K uvedenému rozpětí obsahů  $K_2O$  nutno poznamenat, že všechny obsahy pod mezí stanovitelnosti a relativně nízké obsahy do 2 hm. % (viz obr. 11) byly zjištěny ve vzorcích albitizovaného granitoidu z jižní části novohrádeckého masivu (podrobně v bodě 8 této kapitoly). Obsahy  $K_2O$  v horninách tonalitové suity jsou v rozpětí 1,89-6,20 hm. % (median 4,35 hm. %, průměr 5,20 hm. %, n = 108) – tyto hodnoty jsou v souladu s výše zmiňovanou převahou granodioritů a granitů. Množství Ca a Fe (viz tab. 4, obr. 12) je výrazně vyšší v bazičtějších granitoidech, které jsou součástí tonalitové suity (vazba na plagioklas, amfibol, biotit, příp. pyroxen).



Obr. 11. Korelace K<sub>2</sub>O versus thorium v obou skupinách hornin. Fig. 11. Correlation K<sub>2</sub>O versus thorium in both groups of rocks.

Tabulka 4. Hlavní chemické složky granitoidů (XRF analýza, hodnoty medianu jsou uvedeny v hm. %, n = počet vzorků, celkové železo uvedeno jako FeO).

 Table 4.
 Major element geochemistry of granitoids (XRF analysis, median values are presented in wt. %, n = number of samples, total iron is presented as FeO).

území	n	$SiO_2$	TiO <sub>2</sub>	$Al_2O_3$	FeO	CaO	$K_2O$
granity+granodiority							
novohrádecký masiv	41	71,96	<0,06	11,67	1,88	0,66	4,99
olešnický masiv	16	69,09	0,28	13,56	2,19	1,62	4,70
Malý Uhřínov	2	74,90	0,11	10,50	1,60	0,61	3,44
Lukavice	2	63,07	0,83	13,58	5,77	1,97	5,24
Liberk	9	72,98	0,18	11,49	1,78	0,67	4,65
litický masiv	16	69,44	0,32	12,65	2,21	1,36	4,89
javornický masiv	21	67,39	0,38	13,03	3,13	2,10	4,80
Potštejn	8	72,45	<0,06	10,47	1,86	0,62	5,30
horniny tonalitové suity							
Potštejn	12	56,43	1,00	13,95	7,72	7,24	3,50
Javornice	5	60,05	0,85	12,79	6,89	5,42	4,79
Slatina nad Zdobnicí	3	59,41	1,06	13,73	7,05	6,28	3,56
Pěčín	5	59,66	0,89	12,48	6,45	6,31	4,46
Kunvald	1	59,97	0,83	13,21	6,32	5,70	4,61
Klášterec nad Orlicí	9	58,84	0,89	12,65	6,67	6,21	4,14
Nekoř	2	58,84	0,86	12,88	6,98	6,81	4,19
Mistrovice	5	59,80	0,92	13,32	6,98	5,35	5,04
Bystřec	6	57,08	1,01	13,68	7,65	5,59	3,41
Dolní Heřmanice – Klášterec	29	58,21	1,03	13,44	7,21	6,00	4,55
Bušín – Staré Město p. K. S.	16	57,27	0,99	14,16	7,24	6,25	3,95
Kunčice p. K. S Vlčice	15	57,43	1,04	13,89	7,51	6,55	4,10



Obr. 12. Korelace FeO versus Sr v obou skupinách hornin; jako FeO je uvedeno celkové železo. Fig. 12. FeO versus Sr correlation in both groups of rocks; total iron is presented as FeO.

3. Z průměrných obsahů K, U a Th v obou skupinách granitoidů lze odvodit, že se na přirozené radioaktivitě těchto hornin (vyjádřené jako  $a_m$ ) a též na kalkulovaném dávkovém příkonu záření gama (D) podílí zhruba stejnou měrou K a Th (každý z obou prvků zhruba 40 %), příspěvek U je podstatně menší (cca 20 % z vypočtených hodnot  $a_m$  nebo D).

4. Ze sumárních údajů v tabulce 2 jsou zřejmé rozdíly v radioaktivitě jednotlivých granitoidních těles. Nejvyšší radioaktivitu vykazuje těleso Lukavice, kde je průměrná hodnota  $a_m 238 \text{ Bq.kg}^1$  (vzorek s nejvyšší  $a_m$  má 306 Bq.kg<sup>1</sup>), a to díky relativně vysokým obsahům všech tří sledovaných prvků, zejména však Th (tab. 3). V případě "tonalitů" ve třech rozlišovaných úsecích v prostoru zábřežské skupiny a staroměstských pásem je zřejmé, že nejnižší přirozenou radioaktivitu vykazují horniny nejsevernějšího z úseků (Kunčice p. K. S. – Vlčice) vlivem celkově nižších obsahům U a Th (viz tab. 2 a 3).

- Tabulka 5. Vybrané stopové prvky v granitoidech (median, ppm) a vypočtené hodnoty a<sub>m</sub> (median, Bq.kg<sup>1</sup>); n = počet vzorků.
- Table 5. Selected trace elements in granitoids (median, ppm) and calculated  $a_m$  values (median, Bq.kg<sup>-1</sup>); n = number of samples.

území	n	Zn	Rb	Sr	Y	Zr	Pb	eTh	eU	am
granity+granodiority	-	-								-
novohrádecký masiv	41	141	266	14	234	201	22	11,5	1,9	149
olešnický masiv	16	40	243	304	<10	123	62	8,3	2,6	137
Malý Uhřínov	2	<10	81	138	97	181	18	7,6	1,6	105
Lukavice	2	82	299	720	<10	163	117	16,5	3,9	217
Liberk	9	15	132	74	85	174	10	7,5	1,5	128
litický masiv	16	41	263	616	<10	143	59	13,9	2,8	187
javornický masiv	21	57	280	567	<10	166	85	12,8	3,7	176
Potštejn	8	19	306	41	79	73	43	11,5	3,6	192
horniny tonalitové suity										
Potštejn	12	107	166	915	<10	161	39	8,6	2,9	145
Javornice	5	100	273	905	<10	179	51	15,6	5,3	223
Slatina nad Zdobnicí	3	127	248	675	<10	210	34	7,6	3,0	141
Pěčín	5	93	212	697	<10	167	42	10,9	4,1	172
Kunvald	1	94	254	693	<10	172	52	13,2	4,0	194
Klášterec nad Orlicí	9	102	205	666	<10	177	40	11,2	4,4	175
Nekoř	2	104	213	787	<10	195	41	13,4	3,6	183
Mistrovice	5	113	233	705	<10	181	40	10,1	2,6	157
Bystřec	6	115	198	683	<10	205	31	5,6	1,9	108
Dolní Heřmanice – Klášterec	29	106	225	738	<10	183	44	6,9	1,8	119
Bušín – Staré Město p. K. S.	16	125	208	767	<10	197	40	9,9	1,9	138
Kunčice p. K. S Vlčice	15	117	200	785	<10	197	39	7,8	1,7	124

5. XRF analýzy prokázaly existenci výrazných rozdílů v obsazích Sr (tab. 5, obr. 12). V horninách tonalitové suity jde vždy o relativně vysoké koncentrace, medianové hodnoty pro jednotlivá tělesa nebo úseky jsou v rozpětí 666–915 ppm Sr. Soubor "granity+granodiority" se jeví jako výrazně nestejnorodý: v horninách některých těles jsou medianové hodnoty Sr jen velmi nízké (novohrádecký masiv 14 ppm Sr, granit-granodiorit z Potštejna 41 ppm Sr, Liberk 74 ppm Sr), v jiných naopak relativně vysoké, podobně jako v horninách tonalitové suity (tab. 5). Z diagramu na obrázku 12 jsou zřejmé obsahy Sr v jednotlivých analyzovaných vzorcích, obsah FeO v zásadě vyjadřuje míru bazicity hornin. V diagramech Rb versus Sr na obrázku 13 jsou rozlišeny horninové vzorky z jednotlivých těles či úseků. Již výše zmíněné rozdíly v rámci skupiny "granity+granodiority" jsou z obrázku 13 zcela zřejmé. Mohou souviset se stupněm frakcionace – u hornin vzniklých z více frakcionovaných magmat lze očekávat nižší koncentrace Sr (a současně vyšší koncentrace Rb).



Obr. 13. Korelace rubidium versus stroncium v obou skupinách hornin. Fig. 13. Rubidium versus strontium correlation in both groups of rocks.

6. Výsledky provedených analýz dokládají podobnost granitoidů Malý Uhřínov a Liberk (tab. 2 až 5, obr. 13). I vzhledem k jejich blízkosti je možné, že jsou součástí jednoho tělesa.

7. Na geologické mapě 14-13 Rychnov nad Kněžnou (ČECH *et al.* 1996) je u Potštejna vyznačeno území, na němž vystupují biotitické granodiority. Pruhem migmatitizovaných pararul je toto území rozděleno na severní a jižní část. Ve vysvětlivkách k předmětnému mapovému listu (ČECH *et al.* 1999) je uvedeno, že "u Potštejna a Litic se vyskytují biotitické granity až granodiority, které se zde těží v několika lomech". V případě Potštejna jde o dosud činný lom v severní části území. V tomto lomu jsou odkryty perlové a migmatitizované pararuly, jimiž probíhají ložní intruze granitoidů, které lze již na základě makroskopického hodnocení zařadit do skupiny "granity+granodiority" (patrně dominuje granit). Granitoidy tohoto charakteru a periplutonicky metamorfované horniny tvoří podle názoru autora článku celou severní část území, zatímco v jižní (plošně významnější) vystupují typické horniny tonalitové suity. Granitoidy skupiny "granity+granodiority" vykazují o něco vyšší radioaktivitu ve srovnání s "tonality", a to vlivem vyšších obsahů zejména K a Th, ale i U (viz data

v tab. 2 až 4). Rozdílná povaha granitoidů severní a jižní části je zřejmá i ze sumarizovaných výsledků XRF analýz (tab. 4 a 5). Výrazný rozdíl je v obsazích Rb a Sr a také v poměru Rb/Sr (obr. 13). V horninách skupiny "granity+granodiority" ze severní části území bylo stanoveno 252–359 ppm Rb (průměr 314 ppm Rb) a 29–97 ppm Sr (průměr 48 ppm Sr), hodnota poměru Rb/Sr vypočtená z průměrných obsahů je 6,54. Vzorky hornin tonalitové suity z jižní části území obsahují 116–239 ppm Rb (průměr 175 ppm Rb) a 257–1095 ppm Sr (průměr 832 ppm Sr), hodnota poměru Rb/Sr je 0,21. Vysokou hodnotu poměru Rb/Sr lze v případě hornin skupiny "granity+granodiority" od Potštejna interpretovat jako projev vyššího stupně frakcionace magmatu (ve srovnání s taveninami, z nichž se formovaly "tonality").

8. Na základě chemismu horninových vzorků odebraných na ploše novohrádského masivu lze v tomto tělese rozlišit dva typy granitoidů. Prvním typem je plošně výrazně dominantní granitoid, odpovídající leukokratnímu alkalicko-živcovému granitu (tak horninu klasifikuje KLOMÍNSKÝ *et al.* 2010 na základě již dříve publikovaných údajů o modálním složení), druhým typem silně albitizovaný granitoid. Je překvapením, že se silná albitizace hornin novohrádeckého masivu popisovaná v literatuře (např. DUDEK a FEDIUK 1956) neprojevuje podstatným snížením obsahů K v granitoidech celého tělesa nebo v jeho podstatných úsecích. Pouze lokálně jsou v novohrádeckém masivu přítomny granitoidy s obsahy draslíku pod mezí detekce obou analytických metod (pod 0,5 hm. % K v případě gamaspektrometrie, pod 0,05 hm. % K<sub>2</sub>O v případě XRF analýzy) – v této práci jsou tyto horniny dále označovány jako "albitický granit". Podle výsledků XRF analýz obsahují granitoidy novohrádeckého masivu <0,05 až 5,57 hm. % K<sub>2</sub>O (průměr 4,33, median 4,99, n = 41). Vzorky s nejnižšími obsahy draslíku pochází z nejjižnější části masivu, z území se středem cca 400 m sv. od kostela sv. Petra a Pavla v Novém Hrádku.

Tabulka 6. Hlavní chemické složky granitoidů novohrádeckého a olešnického masivu (XRF analýza, hodnoty jsou uvedeny v hm. %, n = počet vzorků, celkové železo uvedeno jako FeO).

	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	CaO	K <sub>2</sub> O
albitický gra	anit jižní části r	novohrádeckého	masivu (n = 7)			
min.	62,58	<0,06	21,87	1,26	0,61	<0,05
max.	67,17	0,07	26,70	1,73	0,76	3,66
median	64,04	<0,06	23,23	1,47	0,64	<0,05
průměr	64,24	<0,06	23,84	1,47	0,68	0,99
ostatní gran	itoidy novohrá	deckého masivu	(n = 34)			
min.	69,88	<0,06	9,75	0,75	0,59	4,33
max.	73,69	0,16	13,08	2,97	0,75	5,57
median	72,12	<0,06	11,54	1,95	0,66	5,06
průměr	71,98	0,07	11,48	2,01	0,68	5,02
olešnický gr	anodiorit olešn	nického masivu (	n = 6)			
min.	64,57	0,27	13,55	1,69	1,43	3,45
max.	68,59	0,61	14,53	4,54	3,19	5,08
median	65,64	0,48	13,93	3,42	2,82	4,34
průměr	66,23	0,45	14,00	3,29	2,62	4,33
kudowský gr	ranodiorit oleši	nického masivu (	(n = 10)			
min.	68,35	<0,06	12,05	0,87	0,65	4,18
max.	71,55	0,34	14,19	2,79	1,80	5,70
median	70,05	0,27	12,72	1,95	1,38	4,73
průměr	70,01	0,24	12,92	1,88	1,30	4,78

 Table 6.
 Major element geochemistry of granitoids of the Nový Hrádek Stock and the Olešnice Massif (XRF analysis, values are presented in wt. %, n = number of samples, total iron is presented as FeO).

Tabulka 7. Vybrané stopové prvky v granitoidech novohrádeckého a olešnického masivu (ppm) a vypočtené hodnoty a<sub>m</sub> (Bq.kg<sup>-1</sup>); n = počet vzorků.

 Table 7.
 Selected trace elements in granitoids of the Nový Hrádek Stock and the Olešnice Massif (ppm) and calculated a<sub>m</sub> values (Bq.kg<sup>-1</sup>); n = number of samples.

	Zn	Rb	Sr	Y	Zr	Pb	eTh	eU	am	
albitický granit jižní části novohrádeckého masivu ( $n=7$ )										
min.	42	10	<10	180	214	15	13,7	1,9	113	
max.	106	167	<10	2001	267	20	21,3	3,7	168	
median	48	23	<10	265	229	18	16,5	2,2	143	
průměr	66	77	<10	564	236	18	16,9	2,5	141	
ostatní granitoidy novohrádeckého masivu ( $n = 34$ )										
min.	40	209	<10	121	145	<10	5,0	<1,5	121	
max.	289	338	45	632	257	44	23,6	2,8	229	
median	152	276	16	224	195	27	10,8	1,5	151	
průměr	149	273	20	246	196	25	11,3	1,6	156	
olešnický granodiorit olešnického masivu (n = 6)										
min.	18	136	344	<10	119	46	8,2	1,7	138	
max.	95	243	555	<10	250	104	13,1	4,8	195	
median	75	226	521	<10	205	85	12,5	3,3	179	
průměr	66	212	494	<10	191	77	11,7	3,4	170	
kudowský	grano	diorit o	lešnick	ého mas	ivu (n	= 10)			-	
min.	<10	207	85	<10	54	45	3,1	<1,5	84	
max.	61	246	332	<10	162	149	10,6	3,6	170	
median	31	257	278	<10	115	56	5,5	2,2	124	
průměr	30	284	244	<10	109	73	6,1	2,1	122	

Údaje o chemismu a přirozené radioaktivitě obou rozlišených typů granitoidů v novohrádeckém masivu jsou obsaženy v tabulkách 6 a 7. Albitický granit má ve srovnání s dominantním typem granitoidu výrazně nižší nejen obsah  $K_2O$ , ale také SiO<sub>2</sub>, naopak výrazně vyšší obsah  $Al_2O_3$  (viz tab. 6). Přirozená radioaktivita albitického granitu je při srovnání obou horninových typů nepatrně nižší, a to díky nízkému obsahu draslíku, i když obsahy U a Th jsou v albitickém granitu o něco vyšší než v dominantním granitoidu novohrádeckého masivu (tab. 7). Je možné, že albitizace zde byla provázena přínosem Th, jehož nadprůměrné koncentrace byly zaznamenány právě v horninách s nízkým obsahem K a také relativně nízkým obsahem SiO<sub>2</sub> (viz obr. 14). Ve vzorcích albitického granitu jsou výrazně nižší obsahy Rb (tab. 7, obr. 14), což lze interpretovat jako výnos Rb v průběhu sodné metasomatózy. Horniny novohrádeckého masivu se od všech ostatních granitoidních těles ve východní části lugika na území ČR liší vysokými obsahy yttria (viz tab. 5 a 7), stanovenými pro celý novohrádecký masiv v rozpětí 121 až 2001 ppm Y (median 234 ppm Y, průměr 300 ppm Y).

V kapitole 2 tohoto článku bylo k takto vysokým obsahům yttria poznamenáno, že použitý XRF analyzátor neposkytuje správné údaje o koncentraci tohoto prvku a že uvedené obsahy mohou být nadhodnocené. Přítomnost vysokých koncentrací yttria v horninách novohrádeckého masivu je však dle názoru autora nezpochybnitelná, výši těchto koncentrací je nutno ověřit jinou metodou. V rámci variských i prevariských granitoidů Českého masivu jsou koncentrace yttria stanovené v horninách novohrádeckého masivu zcela anomální – BREITER a SOKOL (1997) zjistili nejvyšší průměrné obsahy yttria ve chvaletickém granitu (77 ppm Y), z variských granitoidů studovaných citovanými autory mají nejvyšší průměrné obsahy yttria granity východní části Krušných hor (Cínovec 53 ppm Y, Preiselberg 51 ppm Y). Pro tonality Orlických hor BREITER a SOKOL (1997) uvádí průměr 32 ppm Y, pro granity Orlických hor 15 ppm Y (granitoidy novohrádeckého masivu nebyly studovány).



Obr. 14. Korelace  $SiO_2$  versus  $a_m$ , thorium a yttrium v granitoidech novohrádeckého masivu. Fig. 14. Silica versus  $a_m$ , thorium, and yttrium correlation in granitoids of the Nový Hrádek Stock.

V albitickém granitu novohrádeckého masivu jsou obsahy yttria o něco vyšší než v dominantním typu granitoidu (tab. 7, obr. 14), nejvyšší obsah (2001 ppm Y) byl stanoven ve vzorku albitického granitu z lomu u Nového Hrádku. Nelze vyloučit, že zvýšení obsahu yttria souvisí s jeho přínosem během albitizace, jíž mohl být postižen celý masiv (viz DU-DEK a FEDIUK 1956), avšak jejíž intenzita (ve smyslu objemu metasomatického albitu v hornině) mohla být s výjimkou nejjižnějšího výběžku tělesa jen slabá, dostatečná však pro přínos yttria.

9. Obě petrograficky rozdílné části olešnického masivu (olešnický granodiorit a kudowský granodiorit) se liší chemismem a úrovní přirozené radioaktivity (tab. 6 a 7). Starší olešnický granodiorit vystupující v severní části olešnického masivu je výrazně bazičtější než mladší kudowský granit, tvořící jižní část olešnického masivu (tab. 6, obr. 15). Olešnický granodiorit má ve srovnání s kudowským výrazně vyšší obsahy U a Th (a současně nepatrně nižší obsahy K), a následně vyšší přirozenou radioaktivitu (tab. 6 a 7, obr. 15 a 16). Obrázek 16 ukazuje variabilitu obsahů Fe (vyjádřeného jako FeO<sup>tot.</sup>) a Th. Relativně nízké obsahy železa v kudowském granodioritu (tab. 6, obr. 16) jsou v souladu s leukokratním charakterem této horniny (viz například data shromážděná KLOMÍNSKÝM *et al.* 2010). Oba horninové typy olešnického masivu se liší i obsahy Sr a Zr (tab. 7, obr. 17). Vyšší koncentrace obou prvků jsou vždy v olešnickém granodioritu, což je v souladu s nižším stupněm frakcionace ve srovnání s mladším kudowským granodioritem.



Obr. 15. Korelace  $SiO_2$  versus  $a_m$  v granitoidech olešnického masivu. Fig. 15. Silica versus  $a_m$  correlation in granitoid rocks of the Olešnice Massif.



Obr. 16. Korelace FeO versus thorium v granitoidech olešnického masivu; jako FeO je uvedeno celkové železo. Fig. 16. Correlation FeO versus thorium in granitoid rocks of the Olešnice Massif; total iron is presented as FeO.



Obr. 17. Korelace rubidium versus stroncium a zirkonium v granitoidech olešnického masivu.

Fig. 17. Rubidium versus strontium and zirconium correlations in granitoid rocks of the Olešnice Massif.

## ZÁVĚR

Ve východní části lugika na území České republiky vystupují dva petrograficky rozdílné typy granitoidních těles. Prvním typem jsou malé masivy (olešnický, novohrádecký, litický a javornický) a plošně méně významná tělesa, označená jako Malý Uhřínov, Lukavice, Liberk a Potštejn. Tělesa tohoto typu jsou tvořena granitem nebo granodioritem. Horniny těchto těles v průměru obsahují 2,6 ppm U a 10,8 ppm Th, průměrná hodnota hmotnostní aktivity ekvivalentu <sup>226</sup>Ra ( $a_m$ ) je 160 Bq.kg<sup>-1</sup>, průměrná hodnota dávkového příkonu záření gama (D) 79 nGy.h<sup>-1</sup> (379 analyzovaných vzorků). Mezi jednotlivými tělesy mohou existovat značné rozdíly jak v celkovém chemismu hornin, tak v jejich přirozené radioaktivitě. Výrazné rozdíly mohou být i v rámci jednoho tělesa – příkladem je složená intruze kudowsko-olešnického masivu (na území ČR označovaná jen jako olešnický masiv).

Druhým typem jsou tělesa tvořená horninami tonalitové suity ("tonality"), vystupující na malých územích společně s metamorfity zábřežské skupiny z podloží křídových sedimentů v podhůří Orlických hor (Potštejn, Javornice, Slatina nad Zdobnicí, Pěčín, Kunvald, Klášterec nad Orlicí, Nekoř, Mistrovice, Bystřec) a také na relativně velkých plochách mezi Dolními Heřmanicemi a Klášterecm (též v horninovém prostředí zábřežské skupiny) a v nesouvislém pruhu mezi Bušínem a Vlčicemi (ve staroměstských pásmech). Modální složení těchto hornin odpovídá hlavně granodioritu, křemennému dioritu a křemennému monzodioritu. Horniny tonalitové suity v průměru obsahují 2,6 ppm U a 10,2 ppm Th,  $a_m = 148$  Bq.kg<sup>1</sup>, D = 73 nGy.h<sup>1</sup> (378 analyzovaných vzorků). Rozdíly v chemismu mezi jednotlivými horninovými typy zde samozřejmě existují, stejně jako rozdíly mezi jednotlivými lokalitami či úseky.

Přirozenou radioaktivitu granitoidů ve východní části lugika lze hodnotit jako nízkou, víceméně odpovídající průměrné radioaktivitě zemské kůry kontinentálního typu. Granitoidní těleso s nejvyšší přirozenou radioaktivitou vystupuje u Lukavice (na Rychnovsku), průměrná a<sub>m</sub> vypočtená pro granitoidy tohoto tělesa je 238 Bq.kg<sup>-1</sup>, vzorek s nejvyšší a<sub>m</sub> má 306 Bq.kg<sup>-1</sup>. Přirozená radioaktivita granitoidů ve východní části lugika nepředstavuje žádné zdravotní riziko.

Ze zajímavých poznatků, které se přímo netýkají radioaktivity horniny, lze uvést tři následující:

- Výchozy granitoidů označované jako Malý Uhřínov a Liberk jsou patrně součásti jediného tělesa.
- 2. U Potštejna vystupují dvě granitoidní tělesa. Jižní je tvořeno horninami typickými pro tonalitovou suitu (při makroskopickém hodnocení), severní granitem nebo granodioritem. Jejich vzájemný kontakt nebyl zjištěn, území s výchozy těchto těles jsou oddělena migmatitizovanými rulami zábřežské skupiny.
- 3. Obsahy U a Th v granitoidech novohrádeckého masivu jsou patrně ovlivněny albitizací, která je doložena petrografickým studiem DUDKA a FEDIUKA (1956). V rámci hodnocení přirozené radioaktivity tohoto tělesa nebylo možno provést analytické stanovení obsahů Na, a zhodnotit tak rozsah albitizace v jeho různých úsecích. Na základě gamaspektrometrických dat a XRF analýz lze však konstatovat, že se albitizace významně projevuje (výnosem K) patrně jen v jeho nejjižnější části (na okraji městysu Nový Hrádek). Granitoidy celého novohrádeckého masivu mají na základě výsledků XRF analýz zvýšené obsahy yttria, ve zmíněné nejjižnější části extrémně vysoké (stanoveno až 2001 ppm Y). Přítomnost vysokých koncentrací yttria v horninách novohrádeckého masivu je dle názoru autora nezpochybnitelná, výši těchto koncentrací je však nutno ověřit jinou metodou.

## PODĚKOVÁNÍ

Autor děkuje editorce (Mgr. Eva Víšková, Ph.D.) a oběma recenzentům (prof. RNDr. Jaromír Leichmann, Dr. rer. nat. a RNDr. Karel Breiter, Ph.D.) za kritické pročtení rukopisu a připomínky, které vedly k jeho zkvalitnění.

#### LITERATURA

- BACHLIŃSKI, R., 2007: Kudowa-Olešnice granitoid massif. In: Kozłowski, A., Wiezniewska, J.: Granitoids in Poland. Archivum Mineralogiae Monograph No. 1, 275-286. Warszawa.
- BACHLIŃSKI, R., HAŁAS, S., 2002: K-Ar dating of biotite from the Kudowa Zdrój granitoids (Central Sudetes, SW Poland). - Bulletin of the Polish Academy of Sciences, Earth Sciences, 50, 2, 113-116. Warszawa.
- BENCKO, V., NOVÁK, J., SUK, M. et al., 2011: Zdraví a přírodní podmínky (medicína a geologie). DOLIN, s.r.o., Praha.
- BERETKA, J., MATTHEW, P. J, 1985: Natural radioactivity of Australian building materials, industrial wastes and byproducts. - Health Physics, 48, 87-95.
- BIAŁEK, D., WERNER, T., 2002: AMS and deformation patterns in the Jawornickie granitoids, Rychlebske hory preliminary data. – Geolines, 14, 14–15.
- BIALEK, D., WERNER, T., 2004: Geochemistry and geochronology of the Javornik granodiorite and its geodynamic significance in the Eastern Variscan belt. - Geolines, 17, 22–23.
- BOUŠKA, V., JAKEŠ, P., PAČES, T., POKORNÝ, J., 1980: Geochemie. Academia Praha.
- BREITER, K., SOKOL, A., 1997: Chemistry of the Bohemian granitoids: Geotectonic and metallogenic implications. - Sborník geologických věd, Ložisková geologie, mineralogie, 31, 75-96.
- ČECH, S., SEKYRA, J., OPLETAL, M., 1996: Geologická mapa ČR. List 14-13 Rychnov nad Kněžnou. Český geologický ústav, Praha.
- ČECH, S., HOLÁSEK, O., OPLETAL, M., 1999: Geologie území. In: Müller, V. ed.: Vysvětlivky k souboru geologických a ekologických účelových map přírodních zdrojů v měřítku 1 : 50 000. List 14-13 Rychnov nad Kněžnou, 7–19. Český geologický ústav, Praha.
- DOMEČKA, K., OPLETAL, M., 1974: Granitoidy západní části orlicko-kladské klenby. Acta Universitatis Carolinae, Geologica, 1974, 1, 75-109.
- DUDEK, A., FEDIUK, F., 1956: Příspěvek k charakteristice novohrádeckého masivu v Orlických horách. Přírodovědecký sborník Ostravského kraje, 17, 349-357.
- EŠTOKOVÁ, A., PALAŠČÁKOVÁ, L., 2013: Study of natural radioactivity of Slovak cements. Chemical Engineering Transactions, 32, 1675-1680.
- KLOMÍNSKÝ, J., JARCHOVSKÝ, T., RAJPOOT, G. S., 2010: Atlas of plutonic rocks and orthogneisses in the Bohemian Massif: 4. Lugicum. - Czech Geological Survey, Prague.
- KLOMÍNSKÝ, J., JARCHOVSKÝ, T., RAJPOOT, G. S., 2016: Atlas of plutonic rocks and orthogneisses in the Bohemian Massif: Classification diagrams and chemical data. – Czech Geological Survey, Prague.
- KOPA, D., 1984: Petrografie granitoidů a některých dalších eruptivních hornin staroměstských pásem v Rychlebských horách. - Časopis Slezského muzea, Série A - vědy přírodní, 33, 241-261.
- MANOVÁ, M., MATOLÍN, M., 1995: Radiometrická mapa České republiky 1 : 500 000. Český geologický ústav, Praha.
- MARTINEC, P., 1977: Geologické poměry. In: Roček, Z. et al.: Příroda Orlických hor a Podorlicka, 105-215. Státní zemědělské nakladatelství, Praha.
- MATOLÍN, M., CHLUPÁČOVÁ, M., 1997: Radioaktivní vlastnosti hornin. In: Kobr, M. et al.: Petrofyzika, 109-126. Vydavatelství Karolinum, Praha.
- MAZUR, S., ALEKSANDROWSKI, P., TURNIAK, K., AWDANKIEWICZ, M., 2007: Geology, tectonic evolution and Late Palaeozoic magmatism of Sudetes - an overview. - In: Kozłowski, A., Wiezniewska, J.: Granitoids in Poland. Archivum Mineralogiae Monograph No. 1, 59-87. Warszawa.
- NECHVÁTAL, M., 2017: Možnosti využití příručního RTG-fluorescenčního spektrometru k analýze hornin a roztoků. – Diplomová práce. PřF UP Olomouc.
- 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.
- OPLETAL, M., DOMEČKA, K., ČECH, S., ČUTA, M., FAJST, M., HOLUB, V., KAČURA, G., LÍBALOVÁ, J., POŠMOURNÝ, K., SEKYRA, J., STŘÍDA, M., ŠALANSKÝ, K., ŠULCEK, Z., TÁSLER, R., VALEČKA, J., 1980: Geologie Orlických hor. – Ústřední ústav geologický, Praha.
- RENÉ, M., 1998: Evolution of a tonalite suite in the northeastern part of the Bohemian Massif. Geolines, 6, 53.
- 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.
- SKÁCELOVÁ, D., SKÁCEL, J., SEKYRA, J., 1992: Geologická mapa ČR. List 04-43 Bílý Potok. Český geologický ústav, 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.

- ΖΙΜΑΚ, J., 2013: Přirozená radioaktivita metamorfovaných a magmatických hornin na mapovém listu 14-23 Králíky. - Geologické výzkumy na Moravě a ve Slezsku, 20, 157-161.
- ZIMÁK, J., 2014: Přirozená radioaktivita metamorfitů, magmatitů a předkenozoických sedimentů na mapovém listu 14-41 Šumperk. - Acta Musei Moraviae, Scientiae geologicae, 99, 2, 85-94.
- ZIMÁK, J., 2016: Přirozená radioaktivita metamorfitů a magmatitů na mapovém listu 14-21 Travná. Geologické výzkumy na Moravě a ve Slezsku, 23, 1-2, 121-124.
- ZIMÁK, J., 2018: Přirozená radioaktivita metamorfitů a magmatitů na mapovém listu 14-22 Jeseník. Acta Musei Moraviae, Scientiae geologicae, 103, 2, 63-79.
- 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.