

ILMENIT A BADDELEYIT Z METAGABRA ZE ŠPIČÁKU U DEŠTNÉ V ORLICKÝCH HORÁCH, ČESKÁ REPUBLIKA

ILMENITE AND BADDELEYITE IN METAGABBRO FROM ŠPIČÁK NEAR DEŠTNÉ
IN ORLICKÉ HORY, CZECH REPUBLIC

IVANA MOKRÁ, LENKA LOSERTOVÁ, DAVID BURIÁNEK & JINDŘICH ŠTELCL

Abstract

Mokrý, I., Losertová, L., Buriánek, D., Štelcl, J., 2015: Ilmenit a baddeleyit z metagabra ze Špičáku u Deštné v Orlických horách, Česká republika. - Acta Mus. Moraviae, Sci. geol., 100, 1, 31-42.

Ilmenite and baddeleyite in metagabbro from Špičák near Deštné in Orlické hory, Czech Republic

Two types of metagabbro from Špičák near Deštné in Orlické hory were studied. The metagabbro formed in the upper crust - based on the amphibole barometer and thermometer the pressure about 3 kbar and temperature 880 °C are assumed. The rock had low oxygen fugacity ΔQFM -0.7. The primary assemblage of pyroxene, amphibole, plagioclase and ilmenite was significantly affected by the late alteration event (500 °C). Accessory minerals include ilmenite, apatite, titanite, pyrrhotite, zircon, sphalerite, baddeleyite, rutile and cobaltite. The main accessory mineral is ilmenite (9-12 % vol.), often rimmed by younger titanite. Light coarse grained metagabbro contains baddeleyite with unusual content of Sr (1.65-2.05 wt. % SrO), the baddeleyite from dark medium grained metagabbro does not contain Sr. Based on recognized conditions of metagabbro formation and evolution, the baddeleyite is assumed to be a primary mineral of the magmatic origin.

Key words: baddeleyite, ilmenite, accessory minerals, chemical composition, metagabbro, Špičák near Deštné in Orlické hory, Bohemian Massif.

Ivana Mokrý, Lenka Losertová, Jindřich Štelcl - Institute of Geological Sciences, Masaryk University, Kotlářská 2, 611 37 Brno, Czech Republic. e-mail: iva.mokra@gmail.com, lena.los@seznam.cz, stelcl@sci.muni.cz

David Buriánek - Czech Geology Survey, Leitnerova 22, 658 59, Czech Republic. e-mail: david.burianek@geology.cz

1. ÚVOD

Minerální asociace obsahující baddeleyit (monoklinický ZrO_2) jsou typické hlavně pro alkalické syenity, kimberlity a karbonatity. Tento minerál se však také vyskytuje v lunárních horninách, meteoritech a vzácně v některých bazických terestrických horninách (ANTHONY *et al.* 2011). Baddeleyit může být stabilní při nízkých i vysokých teplotách a tlacích ve spodní kůře a ve svrchním plášti (LUMPKIN 1999).

Nový nález baddeleyitu v minerální asociaci metagaber z tělesa ze Špičáku v Orlických horách naznačuje, že jeho výskyt v bazických terestrických horninách je daleko častější, než se doposud předpokládalo. Tento článek shrnuje údaje o minerální asociaci ilmenitu a baddeleyitu v metagabrech ze Špičáku u Deštné v Orlických horách.

2. GEOLOGICKÁ POZICE

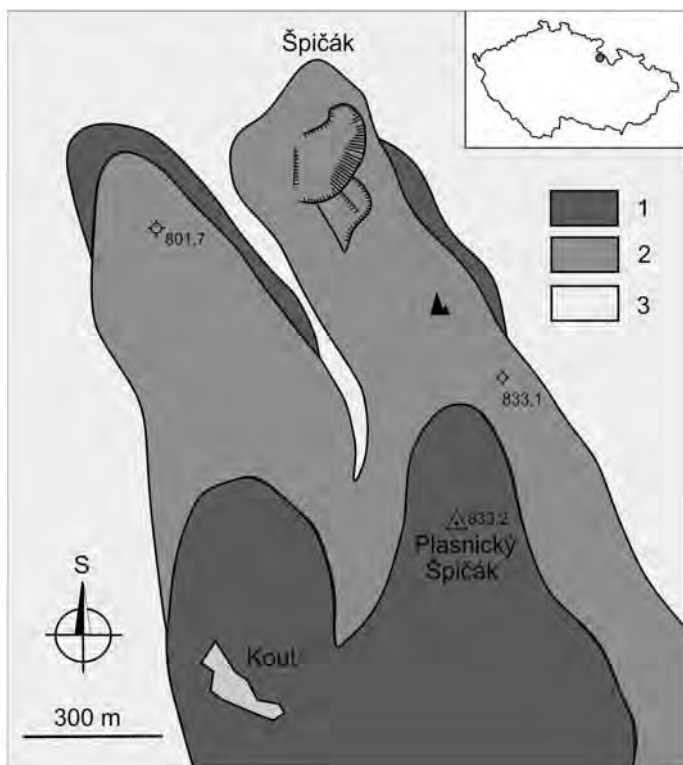
Těleso slabě metamorfovaných metagaber o velikosti $4 \times 0,5$ km je součástí novoměstské skupiny orlicko-sněžnického krystalinika. V okolí tělesa vystupují hlavně metamorfova-

né muskoviticko-biotitické fylity až pararuly, amfibolity až zelené břidlice. Z hlediska regionální metamorfózy je těleso situováno mezi chlorit-biotitovou a granát-biotitovou metamorfnní zónu (OPLETAL *et al.* 1980). Podle OPLETALA *et al.* (1980) intrudovalo gabro až po hlavní fázi regionální metamorfózy. Terénní pozorování naznačují, že bylo poté postiženo slabou pozdně variskou metamorfózou a deformací.

3. CHARAKTERISTIKA LOKALITY A PŘEHLED PŘEDCHOZÍCH VÝZKUMŮ

Studovaná lokalita se nachází přibližně 2 km sz. od obce Deštné v Orlických horách, na ssz. svahu vrcholu Špičák. Jedná se o třietážový lom založený v tělese metagabra a amfibolitu s výjimečně vysokým obsahem ilmenitu (obr. 1). Počátek těžby spadá do roku 1938, v průběhu let byl lom opětovně těžen podle potřeby. Ukončení těžby proběhlo v 90. letech 20. století. Lom byl využíván pro těžbu kameniva při stavbě místních komunikací, především za druhé světové války (ULRYCH a LANGROVÁ 1979, VOCILKA 1980).

První a největší zájem o těžbu projevil V. Čech v roce 1949, který se snažil využít surovinu s ilmenitem jako titanovou rudu. Později, v letech 1952 a 1957, bylo opět metagabro analyzováno s ohledem na obsahy titanu. Proběhly zde i podrobnější geologické průzkumy, ale z důvodu nerentabilnosti zásob byly práce ještě v průběhu průzkumu zastaveny (MACEVIČ *et al.* 1958, VOCILKA 1980). V letech 1960–1961 byl opět projevěn zájem o těžbu, tentokrát za účelem těžby metagabra jako drceného kameniva, zároveň byla zkoumána i rudní problematika. Surovina sloužila na výrobu lomového kamene, drceného kameniva a pro dekoráční účely. Posléze probíhaly ještě další podrobnější geologické průzkumy. Celkovou problematiku zpracoval VOCILKA (1980).



Obr. 1. Geologická situace lomu Špičák u Deštné v Orlických horách, upraveno podle VOCILKY (1980). Legenda: 1 - jemně až středně zrnitý amfibolit, 2 - jemně až hrubě zrnité metagabro, 3 - fylity.

Fig. 1. Geology of the quarry Špičák near Deštné in Orlické hory, modified after VOCILKA (1980). Legend: 1 - fine- to medium-grained amphibolite, 2 - fine- to coarse-grained metagabbro, 3 - phyllite.

4. METODIKA

Z lomové stěny, ve spodní etáži lomu Špičák v Orlických horách, byly v roce 2012 odebrány vzorky různých strukturálních typů metagaber pro bakalářskou práci I. Mokré. Z těchto vzorků byly zhotoveny leštěné výbrusy, které byly podrobeny mikroskopickému a analytickému zkoumání na pracovišti ÚGV PrF MU a ČGS v Brně. Minerály byly analyzovány metodou EDS na skenovacím elektronovém mikroskopu JEOL-JMS-6490LV při urychlovacím napětí 15 keV, průměr svazku 5 μm . Celkem bylo analyzováno 30 zrn akcesorických minerálů, které byly normalizovány na sumu 100 % a přepočteny v programu MS Excel 2007.

Vlastní analýzy ilmenitů ze Špičáku u Deštné v Orlických horách i převzaté analýzy ilmenitů z literatury byly jednotně přepočteny na 3 kyslíky. Zastoupení Fe^{3+} bylo aproximačně stanoveno na nábojovém základě. Analýzy baddeleyitu byly přepočteny na 2 kyslíky.

5. PETROGRAFICKÁ CHARAKTERISTIKA METAGABER

Po stránce mineralogické je celé studované těleso metagaber poměrně homogenní. Hlavními minerály jsou lištovité plagioklas a hypautomorfní až xenomorfní amfiboly nebo agregáty jehličkovitých amfibolů aktinolitického složení. Jednotlivé subtypy metagaber se ale liší zrnitostí a variabilitou poměru mezi plagioklasem a amfibolem. Přes tuto jednoduchou petrografickou charakteristiku se v literatuře objevují různá pojmenování těchto hornin. Jednotliví autoři se přiklání k označení horniny jako diorit, gabrodiorit, pyroxen-amfibolické gabro nebo gabro (DOMEČKA a OPLETAL 1976, ULRYCH a LANGROVÁ 1979, VOCILKA 1980, HAVELKOVÁ 2013). DOMEČKA a OPLETAL (1976) označili horninu jako diorit až gabrodiorit, ULRYCH a LANGROVÁ (1979) jako pyroxen-amfibolické gabro a VOCILKA (1980) se přiklání k určení horniny jako gabro. Podle nejnovějšího výzkumu HAVELKOVÉ (2013) lze horninu považovat za diorit na základě bazicity plagioklasu.

Z vyhodnocení starších chemických analýz (OPLETAL *et al.* 1980) však plyne, že hornina spadá v klasifikaci COX *et al.* (1979) do pole gaber ($\text{SiO}_2 = 45,50\text{--}49,40$; $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} = 3,70\text{--}4,90$). Hlavním problémem při interpretaci těchto hornin je nízká bazicita plagioklasů ($\text{An}_7\text{--}\text{An}_{48}$), kterou zjistila HAVELKOVÁ (2013). Nízká bazicita plagioklasů však může souviset s výběrem vzorků a s faktem, že středy mnoha plagioklasů jsou postizeny sekundárními přeměnami (mnozí autoři totiž uvádí, že plagioklas má na základě optických vlastností složení až labradoritu a bytownitu; např. ULRYCH a LANGROVÁ 1979, VOCILKA 1980, OPLETAL *et al.* 1980).

Amfiboly mají v mikroskopu obvykle poměrně složitou stavbu. Středy zrn jsou často tvořeny jemnozrnnými jehlicovitými agregáty aktinolitu (nově určila HAVELKOVÁ 2013). Převážná část zrna má pak složení magneziohornblendu, ferrohornblendu, tschermakitu až ferrotschermakitu. Okraje odpovídají ferrotschermakitu (HAVELKOVÁ 2013). Tato zónalnost indikuje komplikovaný vývoj těchto hornin. Středy zrn jsou patrně produktem přeměny diopsidických a rombických pyroxenů, které někteří autoři v těchto horninách uvádějí (ULRYCH a LANGROVÁ 1979, VOCILKA 1980, HAVELKOVÁ 2013). Z akcesorických minerálů byl zjištěn ilmenit, titanit, allanit, apatit, pyrit a chalkopyrit (ULRYCH a LANGROVÁ 1979).

Typickými produkty sekundárních přeměn jsou minerály epidotové skupiny, chlorit a karbonáty (ULRYCH a LANGROVÁ 1979). Ilmenit má často kostrovitý vývin a patří mezi nejstarší magmatické minerály. Nejvíce zrn ilmenitu se nachází v amfibolech, méně v pyroxenech a nejméně mezi lištami plagioklasu. Jediným produktem rozpadu ilmenitu je titanit (ULRYCH a LANGROVÁ 1979). Hornina má místy kumulátovou stavbu, což se projevuje pásy s vysokým obsahem plagioklasu nebo naopak tmavých minerálů. Místy se může také kumulovat ilmenit (MACEVIČ *et al.* 1958, VOCILKA 1980).

6. VÝSLEDKY

Pro podrobnější studium byly zvoleny dva texturní typy metagaber: světlejší hrubozrnné metagabro a tmavší středně zrnité metagabro.

Světlejší hrubozrnné metagabro

Minerální asociace světlejšího hrubozrnného metagabra zahrnuje plagioklas, Ca-amfibol, pyroxen a biotit. Zkoumaný vzorek podlehl značné přeměně. Skoro všechny lišty plagioklasu jsou saussuritizovány a přeměněny na sekundární směs sericitu, minerálů epidotové skupiny a karbonátů. Rozpadem amfibolu a pyroxenu vzniká aktinolit (ve starší literatuře označovaný jako „uralit“). Mezi další sekundární minerály patří chlorit, titanit, který vznikl leukoxenizací ilmenitu. K akcesorickým minerálům lze zařadit hojně zastoupený ilmenit, apatit, dále titanit, zirkon, sfalerit, baddeleyit, rutil a kobaltin. V celé hornině převládají světlé minerály 60 obj. % nad tmavými, ilmenit tvoří 9 obj. %. Podle objemového zastoupení by měl ilmenit patřit spíše k hlavním minerálům metagabra, ale v tomto příspěvku je přiřazen k akcesorickým minerálům.

Makroskopicky viditelná zrna šedočerného *ilmenitu* o velikosti 1–12 mm asociují s lištami světlého plagioklasu a zeleného amfibolu. Ilmenit byl zastižen ve formě shluků zrn nerovnoměrně rozmístěných v hornině. Mikroskopicky je ilmenit obklopen zrny amfibolu, pyroxenu a méně často plagioklasu. Tvoří hypautomorfně omezená opakní zrna o velikosti 0,10–4,80 mm, často s kostrovitým vývinem (obr. 2). Většina zrn pyroxenu byla již přeměněna na amfiboly. Velmi zřídka se v ilmenitu vyskytují zrna rutilu o velikosti 0,08–0,25 mm. Při pozorování v odraženém světle byly patrné přeměny ilmenitu („leukoxenizace“) na titanit. Ilmenit uzavírá drobné inkluze zirkonu, titanitu, sfaleritu a baddeleyitu.



Obr. 2. Opakní kostrovitá zrna ilmenitů s tenkými lemy titanitu v saussuritizovaném plagioklasu a přeměněném amfibolu; pozorované bez analyzátoru.

Fig. 2. Photomicrograph of opaque skeletal grains of ilmenite with thin rims of titanite inside of saussuritized plagioclase and altered amphibole; plane-polarized light.

Tabulka 1. Chemické složení ilmenitu z lokality Špičák u Deštné v Orlických horách, analýzy 1-4 (světlý hrubozrnný typ metagabra) a 5-9 (tmavý středně zrnitý typ metagabra).

Table 1. Chemical composition of ilmenite from Špičák by Deštné in Orlické hory, analyses 1-4 (light coarse grained metagabbro) and 5-9 (dark medium-grained metagabbro).

| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
|---------------------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| TiO ₂ | 52,79 | 52,80 | 53,04 | 52,58 | 52,36 | 52,23 | 52,03 | 51,88 | 51,36 |
| FeO _{tot.} | 45,84 | 45,56 | 44,77 | 46,13 | 46,24 | 46,51 | 46,51 | 46,69 | 47,28 |
| MnO | 1,37 | 1,64 | 1,33 | 1,29 | 1,39 | 1,26 | 1,47 | 1,43 | 1,36 |
| CaO | n.d. | n.d. | 0,87 | n.d. | n.d. | n.d. | n.d. | n.d. | n.d. |
| total | 99,99 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 |
| Fe ²⁺ | 0,967 | 0,961 | 0,942 | 0,975 | 0,980 | 0,980 | 0,990 | 0,990 | 1,006 |
| Mn ²⁺ | 0,029 | 0,035 | 0,028 | 0,028 | 0,030 | 0,030 | 0,030 | 0,030 | 0,029 |
| Ca ²⁺ | 0,000 | 0,000 | 0,023 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 |
| total | 0,996 | 0,996 | 0,994 | 1,002 | 1,010 | 1,010 | 1,020 | 1,020 | 1,035 |
| Ti ⁴⁺ | 1,002 | 1,002 | 1,003 | 0,999 | 1,000 | 0,990 | 0,990 | 0,990 | 0,982 |
| Fe ³⁺ | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,020 | 0,000 | 0,000 | 0,000 |
| total | 1,002 | 1,002 | 1,003 | 0,999 | 1,000 | 0,990 | 0,990 | 0,990 | 0,982 |
| O ₂ | 3,000 | 3,000 | 3,000 | 3,000 | 3,000 | 3,000 | 3,000 | 3,000 | 3,000 |

V rámci chemického složení převládá podíl ilmenitové složky 94–97 % (44,77–46,13 hm. % FeO) nad pyrofanitovou 3–4 % (1,29–1,64 hm. % MnO), geikielitová složka nebyla detekována. Analyzovaný bodový profil v ilmenitu s lemem titanitu prokázal, že obsah FeO se snižuje směrem k okrajům a zároveň roste obsah TiO₂ a MnO. U ilmenitu z obou typů metagaber se vzrůstajícím obsahem železa klesá obsah titanu. Obsah manganu zůstává téměř konstantní.

Drobná zrna *baddeleyitu* byla nalezena společně s ilmenitem nebo v něm tvořila inkluze. V jednom případě byla zrna baddeleyitu zastřižena na trhlíně ilmenitu společně s titanitem (obr. 3). U baddeleyitu v ilmenitu byl naměřen vyšší obsah titanu (0,72–2,32 hm. % TiO₂), stroncia (1,65–2,05 hm. % SrO) a železa (0,78–1,37 hm. % FeO) (tab. 2).

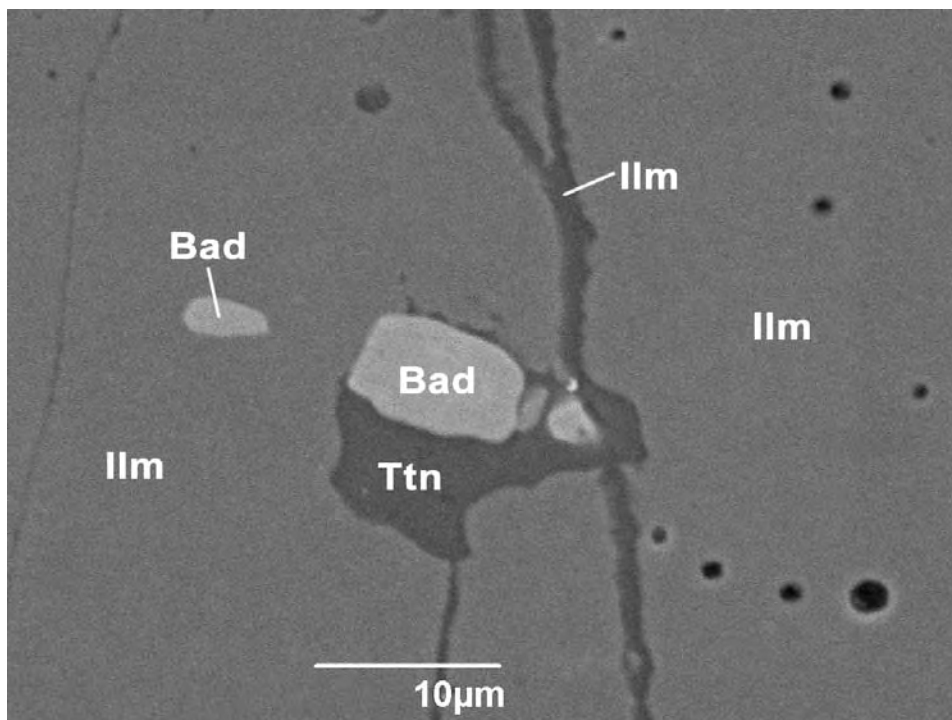
Poměrně hojný *apatit* tvoří drobná sloupečkovitá automorfně omezená zrna v plagioklasech. *Titanit* se nejčastěji vyskytuje při hranici zrn ilmenitu, kde tvoří tenké souvislé lemy, 0,01–0,8 mm široké, spolu s relikty zatlačovaného ilmenitu. Také vyplňuje drobné pukliny v ilmenitu o velikosti 0,01 mm. V jednom případě bylo nalezeno samostatné zrn titanitu s hojnými inkluzemi ilmenitu. U obou výskytů se jednalo o téměř čistý titanit s nepatrným obsahem hliníku (0,04 apfu Al).

Z dalších akcesorických minerálů byl pozorován *zirkon* v zrně saussuritizovaného plagioklasu, obklopený pleochroickým

Tabulka 2. Chemické složení baddeleyitu z lokality Špičák u Deštné v Orlických horách, analýza 10 a 11 pochází ze světlejšího hrubozrnného typu metagabra a 12 z tmavě středně zrnitého typu metagabra.

Table 2. Chemical composition of baddeleyite from Špičák by Deštné in Orlické hory, analyses 10 and 11 are from light coarse grained metagabbro and 12 is from dark medium-grained metagabbro.

| | 10 | 11 | 12 |
|------------------|--------|--------|--------|
| ZrO ₂ | 93,92 | 95,85 | 95,29 |
| TiO ₂ | 2,32 | 1,20 | 2,51 |
| FeO | 1,71 | 1,00 | 2,20 |
| SrO | 2,05 | 1,95 | n.d. |
| total | 100,00 | 100,00 | 100,00 |
| Zr ⁴⁺ | 0,940 | 0,960 | 0,940 |
| Ti ⁴⁺ | 0,040 | 0,020 | 0,040 |
| Fe ²⁺ | 0,030 | 0,020 | 0,040 |
| Sr ²⁺ | 0,020 | 0,020 | 0,000 |
| total | 1,030 | 1,020 | 1,020 |
| O ₂ | 2,000 | 2,000 | 2,000 |



Obr. 3. Několik zrn baddeleyitu (Bad) společně s titanitem (Ttn) na puklině v ilmenitu (Ilm). Foto v sekundárních elektronech.

Fig. 3. Grains of baddeleyite (Bad) and titanite (Ttn) at fissure in ilmenite (Ilm). Secondary electron image.

dvůrkem. Zrno zirkonu v plagioklasu o velikosti 0,1 mm mělo zvýšený podíl skandia (1,68 hm. % Sc_2O_3) a titanu (0,81 hm. % TiO_2). Další analyzovaná zrna nalezená společně s ilmenitem se blížila svému ideálnímu složení. U zirkonu nebyl zjištěn žádný vztah k baddeleyitu ani jeho zatlačování.

V ilmenitu byla identifikována drobná zrna *sfaleritu* o velikosti 0,1–0,5 mm, která byla zastížena společně s titanitem a zirkonem. Sfalerit obsahoval zvýšený obsah železa (3,75–8,08 hm. % FeO) a titanu (0,66–0,74 hm. % TiO_2), což však může být způsobeno měřeným pozadím ilmenitu.

Zrna *rutilu* o velikosti 0,08–0,25 mm byla nalezena v ilmenitu. Z chemického hlediska odpovídal rutil svému ideálnímu vzorci.

Posledním nalezeným akcesorickým minerálem byl *kobaltin*, který se vyskytuje společně s ilmenitem. Tvoří zrna 0,1 mm velká společně se sfaleritem v titanitovém lemu ilmenitu. V kobaltinu bylo zastoupeno v podstatné míře železo (2,75 hm. % FeO).

Tmavší středně zrnité metagabro

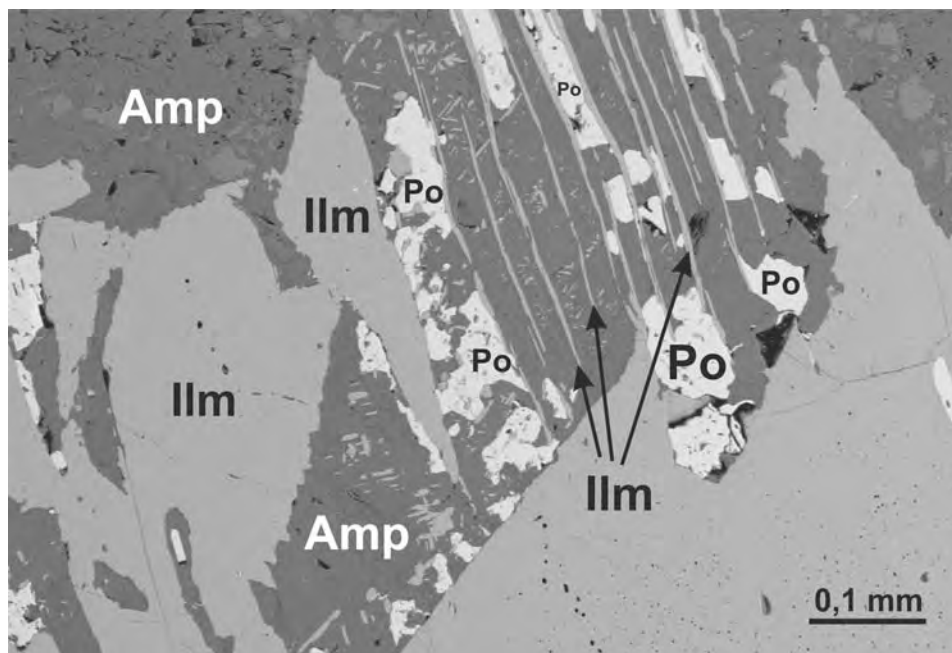
V tmavším středně zrnitém matagabru je přítomna následující asociace minerálů: Ca-amfibol, plagioklas, pyroxen a biotit. Tento typ metagabru podlehl silné alteraci a je zde mnohem častější výskyt sekundárního jehlicovitého aktinolitu než u předchozího typu. Mezi sekundární minerály patří především minerály epidotové skupiny, karbonáty, sericit a chlorit, které vznikly přeměnou plagioklasů, amfibolů a pyroxenů. Z akcesorických minerálů byl nalezen pouze ilmenit, pyrhotin, apatit a baddeleyit. Ilmenit zaujímá v hornině až 12 obj. %.

Makroskopicky viditelná **ilmenitová** zrna jsou mnohem méně patrná, i přes jejich hojně zastoupení. Jejich velikost se pohybuje v rozmezí 1–3 mm.

Mikroskopicky pozorovaná opakní hypautomorfně až kostrovitě omezená zrna **ilmenitu** jsou často obklopena jehličkami zeleného aktinolitu, který zatlačuje primární klinopyroxen a amfibol. Dále se vyskytují společně s nealterovaným amfibolem a plagioklasem, zřídka se dají nalézt v listách plagioklasu. Kostrovitá zrna ilmenitu dosahují velikosti 0,05–2,35 mm a obsahují inkluze pyrhotinu a baddeleyitu. Ilmenity z tohoto typu metagabra nepodléhají leukoxenizaci. Z chemického hlediska byla v menším množství prokázána přítomnost pyrofanitové složky do 3 % (1,26–1,47 hm. % MnO), geikielitová složka nebyla detekována. Bodový profil zrnem ilmenitu prokázal, že obsah TiO_2 a Fe^{2+} klesá směrem k okrajům zrna. Celkový obsah Fe se však zvyšuje díky růstu obsahu Fe^{3+} .

Baddeleyit tvoří velmi drobné inkluze v ilmenitu o velikosti do prvních desítek mikrometrů. Chemické složení bylo obdobné jako u baddeleyitu ve světlejších typu metagabra se zastoupením titanu (2,51 hm. % TiO_2) a železa (2,2 hm. % FeO), ale bez stroncia. Ani v tomto typu nebylo prokázáno zatlačování baddeleyitu zirkonem.

Ilmenit obsahuje rovněž inkluze **pyrhotinu** o velikosti 0,02 mm nebo s ním srůstá (obr. 4). Pyrhotin se také vyskytuje v agregátech jehlicovitého aktinolitu společně s ilmenitem, kde tvoří drobnější inkluze. V pyrhotinu nebyla prokázána významnější přítomnost dalších prvků.



Obr. 4. Lištovitá zrna ilmenitu (Ilm) společně s inkluzemi pyrhotinu (Po) v amfibolu (Amp), BSE foto.
Fig. 4. Laths of ilmenite (Ilm) together with pyrrhotite (Po) in amphibole (Amp), BSE photo.

7. MINERÁLNÍ ASOCIACE ILMENITU A BADDELEYITU

Baddeleyit se vyskytuje hlavně v horninách chudých křemíkem a to ve společnosti dalších akcesorických minerálů jako jsou: zirkon, titanit, rutil a zirkonolit (ALLEN a ELLIS 1996). V ultramafických a mafických horninách se baddeleyit vyskytuje společně s amfibol-

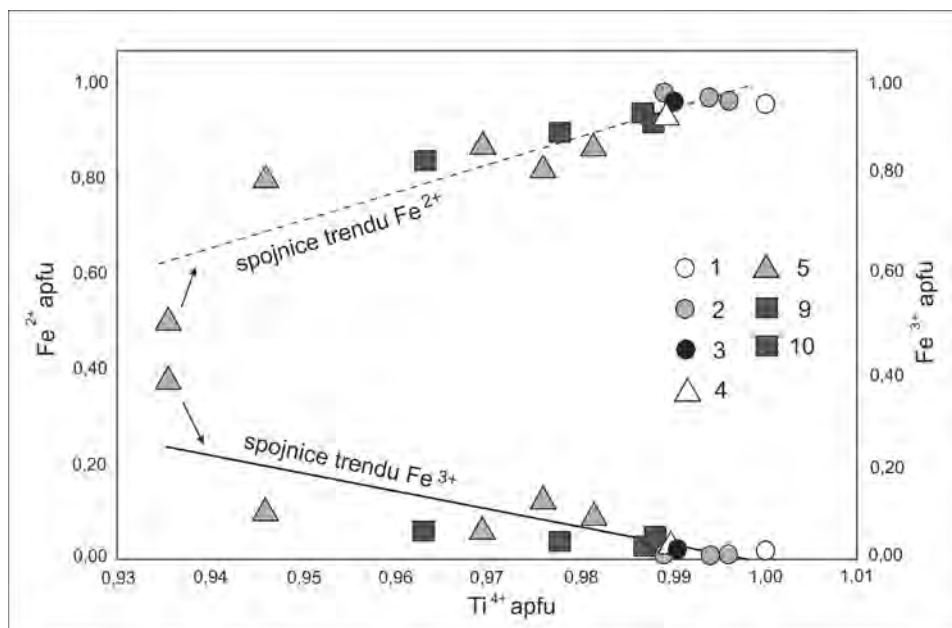
lem, biotitem, chloritem, křemenem, živcem, apatitem, ilmenitem, spinelem, chalkopyritem, zirkonem a zirkonolitem (LUMPKIN 1999).

Ilmenit a baddeleyit na Špičáku u Deštné v Orlických horách se vyskytuje v asociaci s amfibolem, plagioklasem, pyroxenem, apatitem, titanitem, biotitem, pyrrhotinem, zirkonem, sfaleritem, muskovitem (sericitem), minerály epidotové skupiny, karbonáty, rutilem a kobaltinem.

Dominantním akcesorickým minerálem je vždy ilmenit. Při srovnání světlejšího hrubozrnného a tmavšího středně zrnitého typu metagabra jsou patrné jisté rozdíly v zastoupení, velikosti i formách ilmenitu. Světlejší hrubozrnný typ obsahuje větší zrna ilmenitu téměř s idiomorfním omezením o velikosti 1–12 mm, oproti tmavšímu středně zrnitému typu metagabra, v němž jsou zrna menší 1–3 mm, ale zato v hojnějším počtu. Variace zastoupení ilmenitu potvrzují analýzy OPLETALA *et al.* (1980), který uvádí obsahy 4,22 % TiO_2 v tmavém a 3,64–3,70 % TiO_2 ve světlém typu metagabra.

Zajímavý je rozdíl v chemismu ilmenitu. Ve světlejším hrubozrnném typu metagabra od středu k okraji stoupá obsah TiO_2 a MnO a obsah FeO klesá. V tmavším středně zrnitém typu je zonálnost opačná a obsah FeO roste směrem od středu k okraji, zatím co obsah TiO_2 klesá (tab. 1). To potvrzuje starší zjištění ULRYCHA a LANGROVÉ (1979).

V ilmenitu byla prokázána pouze přítomnost pyrofanitové složky (3–4 hm. % MnO), což je v souladu s výsledky ULRYCHA a LANGROVÉ (1979) a KOTÍKA (2009). Ilmenit v tmavším středně zrnitém typu metagabra má nízký obsah trojmocného železa. Z grafu na obr. 5 je zřejmé, že s rostoucím obsahem Ti^{4+} klesá obsah Fe^{3+} a roste obsah Fe^{2+} . Z toho lze usuzovat na přítomnost substituce $\text{Fe}^{2+} + \text{Ti}^{4+} = 2 \text{Fe}^{3+}$. Tato substituce byla zjištěna pouze v tmavším středně zrnitém typu horniny, což potvrzují i analýzy ULRYCHA a LANGROVÉ (1979) a KOTÍKA (2009).



Obr. 5. Substituční trend $\text{Ti}^{4+}/\text{Fe}^{3+}$ a Fe^{2+} v ilmenitu ze Špičáku u Deštné v Orlických horách. Symboly stejně jako na obr. 6.

Fig. 5. Substitution trend of $\text{Ti}^{4+}/\text{Fe}^{3+}$ and Fe^{2+} in the ilmenite from Špičák by Deštné in Orlické hory. Symbols as in Fig. 6.

Ternární diagram byl zhotoven z vlastních měření i analýz z literatury (obr. 6). Složení ilmenitu v dioritu tvoří poměrně jednoznačný trend po linii Mn-Fe, téměř bez přítomnosti Mg. Chemismus ilmenitů z gaber tvoří dva trendy po liniích Mn-Fe a Mg-Fe.

8. PTX PODMÍNKY VZNIKU METAGABER

Pro výpočet PTX podmínek geneze metagaber ze Špičáku u Deštné byly použity analýzy amfibolů a plagioklasů z práce HAVELKOVÉ (2013). Z těchto dat bylo možné rekonstruovat některé důležité etapy vývoje těchto hornin. Některé plagioklasy mají magmatickou oscilační zonálnost v rozpětí bazicit An_{37-48} . Řada plagioklasových zrn však vykazuje nižší bazicitu (An_{22-31}), tato zrna jsou obvykle ve střední části zonálních jedinců postižena sekundárními přeměnami (součástí produktů těchto přeměn je albit). Albit se také často podílí na tvorbě mladších lemů kolem některých plagioklasových zrn (An_{8-14}) a bývá obklopen mladším jehlicovitým ferohornblendem až ferotschermakitem (HAVELKOVÁ 2013). Pro tyto okraje zrn amfibolu byly zjištěny teploty metamorfni reequilibrace (438–497 °C, pro tlak 3 kbar) pomocí amfibol-plagioklasového termometru (HOLLAND a BLUNDY 1994).

Magmatický amfibol má složení, které většinou neumožňuje výpočet PTX podmínek, přesto se podařilo z jedné analýzy vypočítat poměrně reálná data na základě amfibolového termometru a barometru (RIDOLFI *et al.* 2010). Podle těchto údajů krystaloval magmatický amfibol za teploty 880 °C a tlaku 3 kbar. Pro tyto podmínky byla zjištěna nízká fugacita kyslíku $\text{Log } fO_2 = -12,6$ (ΔQFM je -0,7).

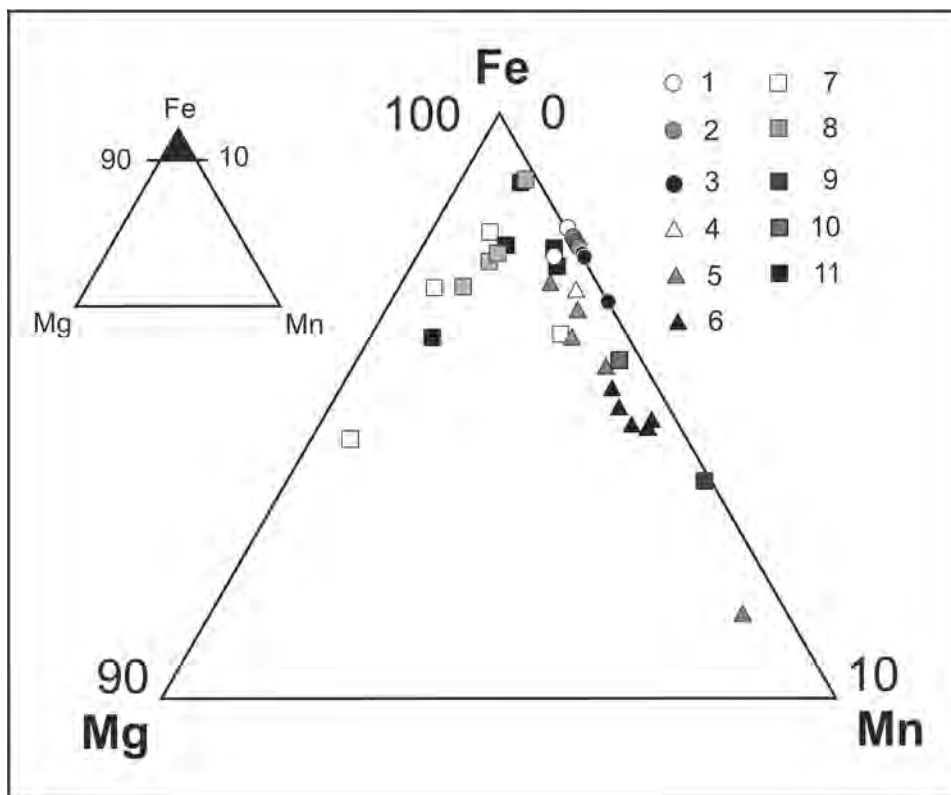
9. DISKUZE

Relikty magmatických staveb a minerálů nalezené v metagabru jsou produktem magmatické krystalizace v podmínkách svrchní kůry (zjištěné tlaky kolem 3 kbar odpovídají hloubce krystalizace cca 10 km). Z počátku krystalovaly klinopyroxeny, avšak v závěrečných fázích magmatické krystalizace se v magmatu zvýšila aktivita H_2O a začal krystalovat amfibol (množství vody v magmatu bylo vypočteno na 7 hmot. %; RIDOLFI *et al.* 2010). Nejprve z magmatu krystaloval rutil, který však byl nahrazen ilmenitem, což potvrzuje i nález zrn rutilu uzavřených v ilmenitu.

Na všech lokalitách, vynesných do ternárního diagramu (obr. 6), se vyskytuje ilmenit v asociaci s apatitem (MOTOYOSHI 1981, KÄRKKÄINEN a APPELQVIST 1999, HERMANN *et al.* 2001, KÄRKKÄINEN a BORNHORST 2003), magnetitem (KÄRKKÄINEN a APPELQVIST 1999, KÄRKKÄINEN a BORNHORST 2003, SAMUEL *et al.* 2014), pyrotinem (KÄRKKÄINEN a APPELQVIST 1999, MOTOYOSHI 1981) a pyritem (KÄRKKÄINEN a APPELQVIST 1999). Všechny výše uvedené minerály (až na pyrit a arzenopyrit) a ještě některé další byly zastiženy také na Špičáku v Orlických horách. Taková minerální asociace indikuje redukční prostředí s poměrně nízkou aktivitou kyslíku. Tuto skutečnost potvrzuje také výpočet fugacity kyslíku z chemického složení amfibolu (RIDOLFI *et al.* 2010). Zjištěná nízká fugacita kyslíku $\Delta QFM -0,7$ je podobná hodnotám uváděným pro vznik baddeleyitu v martanském meteoritu (HERD a MCCOY 2011).

V podmínkách subsolidu docházelo k rekrystalizaci gaber a vzniku sekundárních minerálů (včetně aktinolitického amfibolu na úkor pyroxenů). Tuto domněnku dokládají nízké teploty vypočtené pro vznik některých ilmenitů (~500 °C, ULRYCH a LANGROVÁ 1979). Tyto procesy mohou souviset s chladnutím gabrového tělesa v podmínkách svrchní kůry (autometamorfóza) nebo jde o výsledek pozdější slabé regionální metamorfózy.

V *baddeleyitu* je podle LUMPKINA (1999) rozpětí zastoupení ZrO_2 mezi 87–99 hm. %. V baddeleyitu je zastoupen TiO_2 (0,1–8,0 hm. %), HfO_2 (0,9–2,6 hm. %) a FeO (0,0–2,2 hm. %). Baddeleyit na Špičáku v Orlických horách také obsahuje Ti (0,72–2,52 hm. % TiO_2) a Fe (0,78–2,2 hm. % FeO). Zvýšený obsah stroncia (1,65–2,05 hm. % SrO) v bad-



Obr. 6. Ternární diagram chemického složení ilmenitu ze Špičáku u Deštné v Orlických horách a dalších výskytů ilmenitů v gabrech a dioritech. Legenda: **kolečka** - Špičák v Orlických horách 1 - ULRYCH a LANGROVÁ (1977), 2 - KOTÍK (2009), 3 - tato práce; **trojúhelníčky** - diority 4 - Bracia komplex, Itálie (HERMANN *et al.* 2001), 5 - plutonický komplex Horoman, Japonsko (MOTOYOSHI 1981), 6 - oblast Sheikh El-Arab, Egypt (SAMUEL *et al.* 2014); **čtverečky** - gabbro 7 - Bracia komplex, Itálie (HERMANN *et al.* 2001), 8 - Kuahajärvä, Finsko (KÄRKKÄINEN a APPELQVIST 1999), 9 - oblast Sheikh El-Arab, Egypt (SAMUEL *et al.* 2014), 10 - Žichovice (VRÁNA 2004), 11 - Koivusaarenneva, Finsko (KÄRKKÄINEN a BORNHORST 2003).

Fig. 6. Ternary plot of chemical composition of ilmenite from Špičák near Deštné in Orlické hory and other occurrences of ilmenite in gabbros and diorites. Legend: **circles** - Špičák in Orlické hory 1 - ULRYCH a LANGROVÁ (1977), 2 - KOTÍK (2009), 3 - this paper; **triangles** - diorites 4 - Bracia complex, Italy (HERMANN *et al.* 2001), 5 - plutonic complex Horoman, Japan (MOTOYOSHI 1981), 6 - area of Sheikh El-Arab, Egypt (SAMUEL *et al.* 2014); **squares** - gabbro 7 - Bracia complex, Italy (HERMANN *et al.* 2001), 8 - Kuahajärvä, Finland (KÄRKKÄINEN a APPELQVIST 1999), 9 - area of Sheikh El-Arab, Egypt (SAMUEL *et al.* 2014), 10 - Žichovice, Czech Republic (VRÁNA 2004), 11 - Koivusaarenneva, Finland (KÄRKKÄINEN a BORNHORST 2003).

deleyitu ve světlejším hrubozrnném typu metagabra nebyl zatím objasněn. Většina baddeleyitů v literatuře obsahovala především Hf, Si, Al a REE (Y, Er, Yb, Eu, Nb), ani v jediném případě nebyl zjištěn obsah Sr (LORAND a COTTIN 1987, HEAMAN a LeCHEMINANT 1993, LUMPKIN 1999, HURAIHOVA *et al.* 2011). Chemické složení baddeleyitů je výrazně závislé na chemickém složení horniny.

Přítomnost Ti a Fe ve struktuře baddeleyitu rozšiřuje jeho pole stability na úkor zirkonu (LUMPKIN 1999). Relativně vysoké koncentrace obsahů Fe a Ti jsou typické u magmatických baddeleyitů z vysoce diferenciovaných bazických až ultrabazických hornin. Domníváme se tedy, že baddeleyit vznikl krystalizací z magmatu a nikoli přeměnou zirkonu.

Jednou z posledních transformací je přeměna ilmenitu na titanit, což je časově svázáno se saussuritizací živců a přeměnou amfibolů a pyroxenů na aktinolit. Přeměna zrn ilmenitu na titanitové lemy je typickým jevem popsaným např. na lokalitách Kaní hora (tonality) a Černá Voda (pegmatity) v žulovském masivu (ŠIMČÍKOVÁ 2002), dále v amfibolitech v oblasti Bamble v jižním Norsku (NIJLAND a VISSER 1995), na lokalitě Val Strona v severní Itálii (HARLOW a FÖRSTER 2002) a v rakouských Alpách (TROPPER a HOINKES 1996). Ilmenit se nejčastěji rozkládá na titanit a rutil v důsledku slabé metamorfózy při vyšší aktivitě CO_2 (ŠIMČÍKOVÁ 2002).

10. ZÁVĚR

Metagabro ze Špičáku u Deštné v Orlických horách krystalizovalo ve svrchní kůře a na základě amfibolového barometru a termometru byl spočten tlak 3 kbar a teplota 880 °C. Hornina měla nízkou fugacitu kyslíku $\Delta\text{QFM} -0,7$. Původní minerální asociace s pyroxeny, plagioklasy, amfiboly a ilmenitem podlehlá výrazné alteraci. Došlo k saussuritizaci živců, uralitizaci pyroxenů a amfibolů a leukoxenizaci ilmenitu. Jednalo se buď o autometamorfózu metagabra během tuhnutí anebo o projevy slabé metamorfózy; zjištěné údaje naznačují teplotu okolo 500 °C.

Akcesorické minerály ve studovaných vzorcích metagaber zahrnují ilmenit, apatit, titanit, pyrrhotin, zirkon, sfalerit, baddeleyit, rutil a kobaltin. Hlavním akcesorickým minerálem je ilmenit, který obvykle tvoří 9–12 obj. % horniny. Ilmenit je charakteristický přítomností pyrofanitové složky (3–4 hm. % MnO), přítomnost geikielitové složky nebyla prokázána. Obsah MnO v ilmenitech je stabilní, zatímco obsah FeO a TiO_2 od středu k okraji klesá (světlejší hrubozrnný typ) anebo roste (tmavší středně zrnitý typ). Z vývoje chemického složení lze odvodit substituci $\text{Fe}^{2+} + \text{Ti}^{4+} = 2 \text{Fe}^{3+}$.

Ve světlejším hrubozrnném typu metagabra byl nalezen baddeleyit s anomálním obsahem stroncia (1,65–2,05 hm. % SrO), v tmavším středně zrnitém typu byl zastížen pouze baddeleyit blízký se svému ideálnímu složení. S ohledem na zjištěné podmínky vzniku a zvýšený obsah Ti a Fe je baddeleyit zřejmě magmatického původu a nevzniká přeměnou zirkonu v průběhu pozdějších metamorfních přeměn.

Poděkování

Autoři by rádi poděkovali Mgr. Z. Buřivalovi, RNDr. V. Vávrovi, Ph.D., a RNDr. S. Houzarovi, Ph.D. za rady a připomínky při tvorbě této práce. Dále by rádi poděkovali recenzentům za konstruktivní připomínky k tomuto příspěvku. Analytické práce byly finančně podpořeny prostředky specifického výzkumu ÚGV PřF MU.

LITERATURA

- ALLEN, C. M., ELLIS, D. J., 1996: A theoretical analysis of the stability and phase relations involving zirconolite in the $\text{CaO-ZrO}_2\text{-TiO}_2\text{-SiO}_2\text{-CO}_2$ system under crustal and upper mantle conditions. - A report for ANSTO, Department of Geology, The Australian National University, Canberra, p. 28.
- ANTHONY, J. W., BIDEAUX, R. A., BLADH, K. W., NICHOLS, M. C., (ed.) 2011: "Baddeleyite". Handbook of Mineralogy. III (Halides, Hydroxides, Oxides). - Mineralogical Society of America, Chantilly, US. ISBN 0962209724.
- BERNARD, J. H., 2000: Minerály České republiky - stručný přehled. - Academia, Praha.
- COX, K. G., BELL, J. D., PANKHURST, R. J., 1979: The Interpretation of Igneous Rocks. George Allen & Unwin, p. 450.
- DOMEČKA, K., OPLETAL, M., 1977: Přehled geologie krystalinika západního křídla orlicko-kladské klenby. - Výzkumné práce Ústředního ústavu geologického, 16, 1-17.

- HARLOW, D. E., FÖRSTER, H. J., 2002: High-grade fluid metasomatism on both a local and regional scale: the Seward Peninsula, Alaska and the Val Srona di Omegna, Ivrea - Verbano Zone, northern Italy: Part I. Petrography and silicate mineral chemistry. - *Journal of Petrology*, 43, 5, 769-799.
- HAVELKOVÁ, B., 2013: Texturní typy gabrových hornin v lomu Špičák v Orlických horách. - *MS*, bakalářská práce, PřF MU, Brno.
- Heaman, L. M., LeCheminant, A. N., 1993: Paragenesis and U-Pb systematics of baddeleyite (ZrO_2). - *Chemical Geology*, 110, 1-3, 95-126.
- HERD, C. D. K., MCCOY, T. J., 2011: Baddeleyite occurrences in martian meteorites and the potential for in situ geochronology of Zagami. - 74th Annual Meeting of the Meteoritical Society, held August 8-12, 2011 in London, UK. - *Meteoritics and Planetary Science Supplement*.
- HERMANN, J., MÜNTENER, O., GÜNTHER, D., 2001: Differentiation of mafic magma in a continental crust-to-mantle transition zone. - *Journal of Petrology*, 42, 1, 189-206.
- HOLLAND, T., BLUNDY, J., 1994: Non-ideal interactions in calcic amphiboles and their bearing on amphibole-plagioclase thermometry. - *Contrib. Mineral. Petrol.*, 116, 433-47.
- HURAI, M., HURAI, V., KONEČNÝ, P., 2011: Nález baddeleyitu (ZrO_2) v bazaltovom maare pri Hajnáčke (južné Slovensko). - *Mineralia Slovaca*, 43, 255-262.
- KÄRKKÄINEN, N., APPELQVIST, H., 1999: Genesis of a low-grade apatite-ilmenite-magnetite deposit in the Kauhajärvi gabbro, western Finland. - *Mineralium Deposita*, 34, 754-769.
- KÄRKKÄINEN, N. K., BORNHORST, T. J., 2003: The Svecofennian gabbro-hosted Koivusaarenneva magmatic ilmenite deposit, Kälviä, Finland. - *Mineralium Deposita*, 38, 169-184.
- KOTÍK, P., 2009: Hypogenní a supergenní alterace ilmenitu. - *MS*, diplomová práce, PřF MU, Brno.
- LORAND, J. P., COTTIN, J. Y., 1987: A new natural occurrence of zirconilite ($CaZrTi_2O_7$) and baddeleyite (ZrO_2) in basic cumulates: the Laouni layered intrusion (Southern Hoggar, Algeria). - *Mineralogical Magazine*, 51, 671-676.
- LUMPKIN, G. R., 1999: Physical and chemical characteristics of baddeleyite (monoclinic zirconia) in natural environments: an overview and case study. - *J. Nuclear Materials*, 274, 206-217.
- MACEVIČ, V., TAUCHMAN, J., TYLOVÁ, V., 1958: Závěrečná zpráva o vyhledávacím průzkumu na lokalitě Špičák (TiO_2). - *MS*, Geologický průzkum, Praha.
- MOTOYOSHI, Y., 1981: Fe-Ti oxide minerals in the Horoman plutonic complex of the Hidaka metamorphic belt, Hokkaido. - *Jour. Fac. Sci., Hokkaido univ.*, 20, 1, 87-94.
- NIJLAND, T. G., VISSER, D., 1995: The provenance of Bamble amphibolites, Norway. - *Proceedings of the Royal Netherlands Academy of Arts and Sciences*, 98, 1, 69-88.
- OPLETAL, M., DOMEČKA, K., ČECH, S., ČUTA, M., FAJST, M., HOLUB, V., KAČURA, G., LÍBALOVÁ, J., POŠMOURNÝ, K., SEKÝRA, J., STRÍDA, M., ŠALANSKÝ, K., ŠULCEK, Z., TÁSLER, R., VALEČKA, J., (1980): Geologie Orlických hor. - ÚÚG, Praha. 208 stran.
- RIDOLFI, F., RENZULLI, A., PUERINI, M., 2010: Stability and chemical equilibrium of amphibole in calc-alkaline magmas: an overview, new thermobarometric formulations and application to subduction related volcanoes. - *Contrib. Mineral. Petrol.*, 160, 45-66.
- SAMUEL, M. D., GHABRIAL, D. S., MOUSSA, H. E., ALI-BIK, M. W., 2014: The petrogenesis of late Neoproterozoic gabbro/diorite intrusion at Sheikh El-Arab area, central Sinai, Egypt. - *Arab J. Geosci.*, DOI: 10.1007/s12517-014-1652-z.
- ŠIMÍČKOVÁ, M., 2002: Minerály titanu v paragenezích žulovského masivu. *MS*, diplomová práce, PřF MU, Brno.
- TROPPER, P., HOINKES, G., 1996: Geothermobarometry of Al_2SiO_5 -bearing metapelites in the western Austroalpine Ötztal-basement. - *Mineral. Petrol.*, 58, 145-170.
- ULRYCH, J., LANGROVÁ, A., 1979: Ilmenit z gabra ze Špičáku u Deštné (Orlické hory). - *Čas. Mineral. geol.*, 24, 2, 201-205.
- VOCILKA, M., 1980: Geologický průzkum Velkého a Malého Špičáku v Orlických horách. - *Sborník GPO*, 21, 37-47.
- VRÁNA, S., 2004: Late Variscan Sušice dyke swarm (Moldanubium zone): quartz micromonzodiorite dykes and their pyroxene gabbro xenoliths. *Bulletin of Geosciences*, 79, 4, 221-229.