

MINERALOGIE TITANITOVÝCH NODULÍ Z BIOTITICKÉHO GRANITU TÁBORSKÉHO PLUTONU (MOLDANUBIKUM, KAMENOLOM DRAŽIČKY U TÁBORA, STŘEDNÍ ČECHY)

MINERALOGY OF TITANITE-RICH NODULES FROM BIOTITE GRANITE OF TÁBOR PLUTON (MOLDANUBICUM, DRAŽIČKY NEAR TÁBOR QUARRY, CENTRAL BOHEMIA)

DAVID BURIÁNEK, STANISLAV HOUZAR

Abstract

Buriánek, D., Houzar, S., 2022: Mineralogie titanitových nodulí z biotitického granitu táborského plutonu (moldanubikum, kamenolom Dražičky u Tábora, střední Čechy). – Acta Musei Moraviae, Scientiae geologicae, 107, 1, 41–51 (with English summary).

Mineralogy of titanite-rich nodules from biotite granite of Tábor Pluton (Moldanubicum, Dražičky near Tábor quarry, Central Bohemia)

The elongated body of biotite granite with titanite-rich nodules is situated on the contact of amphibole-biotite and amphibole-pyroxene melasyenites of the Tábor pluton. Titanite-rich nodules are spherical, 1 to 3 cm in diameter and consists of a dark core (titanite + quartz + K-feldspar + plagioclase) surrounded by a leucocratic rim (quartz + K-feldspar + plagioclase ± phlogopite). Titanite, with an elevated Al (~ 0.07–0.11 *apfu*) and low F (0.039–0.069 *apfu*), forms subhedral poikilitic grains with abundant inclusions of euhedral to subhedral crystals of K-feldspar, plagioclase (An_{5–25}) and anhedral quartz. The presence of titanite-rich nodules indicates intrusion of the felsic melt into the mafic system. This process led to the destabilization of biotite (amphibole) and the formation of titanium-rich melt, which was incorporated by the incoming felsic melt. The occurrence of isolated patches of poikilitic titanite rimmed by leucocratic rim indicates that Ti-rich melt flowed along with the felsic melt as a separate immiscible phase.

Key words: titanite, nodule, granite, magma mixing, Tábor Pluton, Central Bohemia, Czech Republic

David Buriánek, Czech Geological Survey, Leitnerova 22, 659 37 Brno, Czech Republic, e-mail: david.burianek@geology.cz

Stanislav Houzar, Department of Mineralogy and Petrography, Moravian Museum, Zelný trh 6, 659 37 Brno, Czech Republic

1. ÚVOD

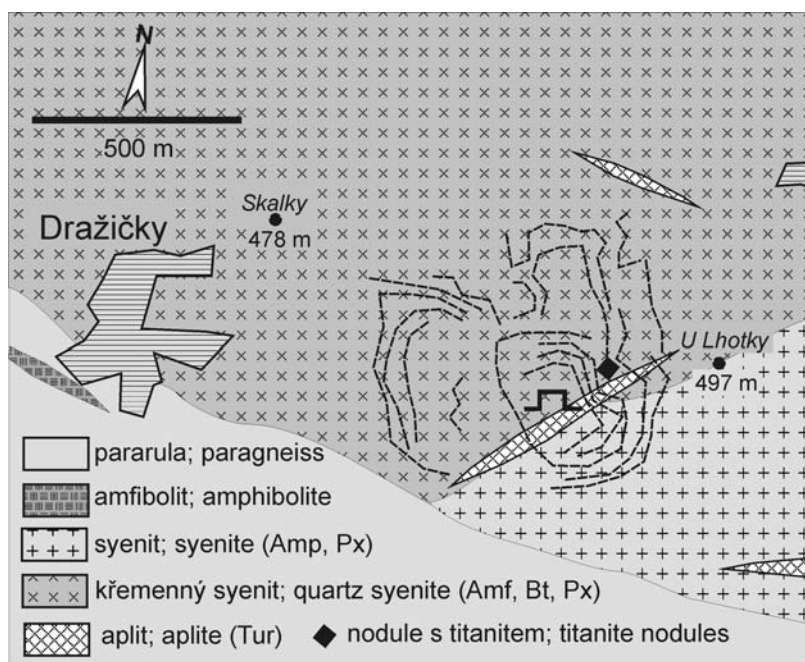
Plutonické a žilné granitoidní horniny obsahují na některých lokalitách oválné útvary milimetrové až centimetrové velikosti, jež bývají tvořeny dvěma až třemi podstatnými minerály. Hojná a často popisovaná je např. asociace křemen-turmalín v nodulárních granitech a aplitech (BURIÁNEK a NOVÁK 2004; BURIÁNEK *et al.* 2016).

Naopak relativně vzácné jsou asociace titanit-křemen-ortoklas-plagioklas (GOGOI *et al.* 2017, ZIMÁK 2018) a titanit-plagioklas (BAXTER a FEELY 2002, VEGAS *et al.* 2011). Tyto oválné útvary se v literatuře označují jako nodule nebo ocelli. Je pro ně charakteristický úzký leucokratický lem, jež je odděluje od okolí magmatické horniny s obsahem biotitu, místy amfibolu nebo i pyroxenu. Novému nálezu titanitových nodulí v kamenolomu Dražičky u Tábora (táborský pluton, středočeský plutonický komplex) je věnována předkládaná práce.

2. GEOLOGICKÁ SITUACE

Studovaná minerální asociace vystupuje při jv. okraji *táborského plutonu*, jenž tvoří v širším okolí drobně zrnitý amfibol-biotitický melasyenit až melagranit, a při okraji amfibolicko-pyroxenický melasyenit (durbachity). Táborský pluton je variského stáří ($336,9 \pm 0,6$ Ma) a diskordantně proráží biotitické pararuly a migmatity s vložkami amfibolitů, mramorů a kvarcitů moldanubika (ŽÁK *et al.* 2005, JANOUŠEK *et al.* 2019).

Přímo v *kamenolomu Dražičky* je odkryt kontakt křemenného amfibol-biotitického (\pm pyroxen) melasyenitu s amfibol-pyroxenickým melasyenitem. Obě horniny jsou prostoupeny žilami turmalinického aplitu. *Hornina s titanitovými nodulemi* byla zjištěna na horní etáži kamenolomu při jeho východním okraji, u kontaktu výše zmíněných dvou typů syenitu (obr. 1). Kontakt obou hornin byl relativně ostrý, avšak v detailu nebyl vzhledem k zasutění výchozu zřetelný. Na kontaktu je patrná přítomnost biotitického granitu s hojnými oválnými nodulemi.



Obr. 1. Topograficko-geologická situace kamenolomu Dražičky na jižním okraji durbachitů táborského masivu; střední Čechy (upraveno podle geologické mapy České geologické služby 1:50 000; www.geology.cz).

Fig. 1. Topographic-geological situation of Dražičky quarry at southern contact of melasyenite (durbachite) of the Tábora Massif, Central Bohemia. (Modified after map of Czech Geological Survey 1:50 000; www.geology.cz).

3. METODIKA

Struktura nodulí a vzájemní vztahy v minerální asociaci titanitu byly studovány polarizačním mikroskopem v procházejícím (PPL a XPL) i odraženém světle.

Chemismus minerálů byl stanoven na elektronové mikrosondě Cameca SX100 (Laboratoř elektronové mikroskopie a mikroanalýzy, společné pracoviště MU a České geologické služby, Brno). Analýzy byly provedeny ve vlnově disperzním módu (WDX) za těchto podmínek: urychlovací napětí 15 keV, proud svazku 20 nA, průměr svazku 2 μ m, načítací čas 10–30 s.

Jako standardy byly použity syntetické fáze a dobře definované minerály (v závorce jsou uvedeny použité linie): albit ($\text{NaK}\alpha$), andradit a almandin ($\text{FeK}\alpha$), andalusit ($\text{AlK}\alpha$), baryt ($\text{BaL}\alpha$), anatas-Hardangervida ($\text{TiK}\alpha$), cín ($\text{SnL}\alpha$), columbit-Ivigut ($\text{NbL}\alpha$), CrTa_2O_6 ($\text{TaL}\alpha$), sanidin (K a $\text{AlK}\alpha$), gahnit ($\text{ZnK}\alpha$), Mg_2SiO_4 a pyrop ($\text{MgK}\alpha$), chromit ($\text{CrK}\alpha$), Ni_2SiO_4 ($\text{NiK}\alpha$), Rb-leucit ($\text{RbL}\alpha$), spessartin ($\text{MnK}\alpha$), SrSO_4 ($\text{SrL}\alpha$), ScVO_4 ($\text{ScK}\alpha$), ThO_2 ($\text{ThM}\alpha$), titanit ($\text{SiK}\alpha$), topaz ($\text{FK}\alpha$), vanadinit ($\text{ClK}\alpha$, $\text{VK}\alpha$), wollastonit ($\text{CaK}\alpha$), UO_2 ($\text{UM}\alpha$), YAG ($\text{YL}\alpha$), zirkon ($\text{ZrL}\alpha$) a fosfáty REE ($\text{REEL}\beta$). Změřená data byla upravena PAP korekcí podle POUCHOU a PICHOU (1985). Zkratky minerálů jsou uváděny podle doporučení IMA (WARR 2021).

4. VÝSLEDKY

Charakteristika minerální asociace

Nodule mírně oválného tvaru o rozměrech 1–3 cm jsou uloženy v biotitickém granitu, který tvořil asi 1–2 metry mocnou zónu v navětralém biotiticko-amfibolickém syenitu (v něm se nodule nevyskytovaly). Mají zonální stavbu, kdy uprostřed převládá hnědý agregát zrn titanitu a světlý lem složený z draselného živce, albitu, menšího množství křemene a ojedinělého biotitu (obr. 2).

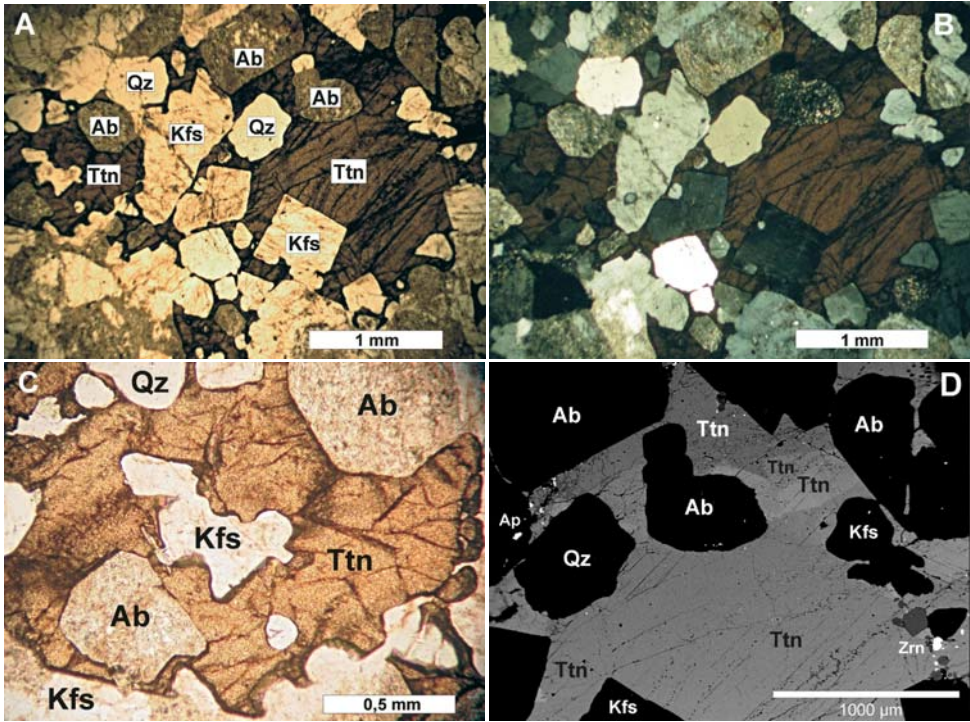


Obr. 2. Zonální nodule ve středu s titanitem a křemen-živcovým lemem v biotitickém granitu. (foto J. Toman, šířka záběru 4 cm).

Fig. 2. Zonal nodules with titanite in core and quartz-feldspars margin in biotite granite (photo J. Toman, photo width 4 cm).

Titanit

Tvoří anhedrální (až silně laločnatá) hnědá zrna milimetrové velikosti se slabým hnědým pleochroismem (obr. 3a; 4a, b). Mají převážně poikilitický charakter kdy uzavírají zrna křemene, albitu a draselného živce (obr. 3a, b, c). Nebylo zjištěno zatlačování jiných, Ti bohatých minerálů (např. ilmenitu) titanitem. Titanit je nevýrazně zonální, kdy objemově převažuje titanit s mírně vyšším obsahem Al ($\sim 2,6$ hm. % Al_2O_3 ; 0,11 *apfu* Al) oproti titanitu na okrajích s nižším obsahem hliníku ($\sim 1,7$ hm. % Al_2O_3 ; 0,07 *apfu* Al); výraznější zóny patrné pouze v BSE jsou ojedinělé a nepravidelné (obr. 3d). Obsahy ostatních prvků jsou kolísavé a relativně nízké (Fe, Nb), nebo pod hranici stanovení mikrosondou (např. Sn, Ba, Ta). Za zmínku stojí relativně nízké obsahy fluoru, 0,37–0,66 hm. %; 0,039–0,069 *apfu* F (tab. 1).



Obr. 3. Titanit v minerální asociaci nodulí, a) centrum nodule (titanit + K-živec + albit + křemen), PPL lineárně polarizované světlo; b) totéž, XPL příčně polarizované světlo; c) detail zrna titanitu, PPL; d) zonálnost titanitu, zpětně odražené elektrony.

Fig. 3. Titanite in mineral assemblage of nodules, a) nodule centre (titanite + K-feldspar + albite + quartz); PPL plane polarized light; b) dttó, XPL, crossed polarized light; c) detail image of titanite grain, PPL; d) titanite zonation, BSE image.

Tabulka 1. Reprezentativní analýza titanitu.

Table 1. Representative analyses of titanite.

	48	49	45	46	47	50*	51*
Nb ₂ O ₅	0,13	b.d.	0,19	0,23	0,19	0,07	0,12
SiO ₂	29,90	30,21	29,80	29,14	29,67	29,59	29,5
TiO ₂	35,14	35,28	36,67	35,42	35,47	36,55	36,67
Al ₂ O ₃	2,69	2,57	1,97	2,06	2,17	1,65	1,77
V ₂ O ₃	0,17	0,14	0,09	0,01	0,08	0,14	0,12
Y ₂ O ₃	0,48	0,45	0,58	0,62	0,59	0,29	0,28
Ce ₂ O ₃	0,66	0,70	0,91	0,97	0,90	0,93	1,11
La ₂ O ₃	0,21	0,16	0,07	0,13	0,15	0,17	0,21
Sm ₂ O ₃	0,24	0,13	0,31	0,25	0,14	b.d.	0,10
Nd ₂ O ₃	0,63	0,65	0,81	0,94	0,84	0,65	0,79
Pr ₂ O ₃	0,13	0,07	0,19	0,11	0,17	0,2	0,16
Gd ₂ O ₃	0,21	0,25	0,22	0,36	0,18	0,13	0,09
Dy ₂ O ₃	0,03	0,24	0,06	0,19	0,07	b.d.	0,09
FeO	0,62	0,60	0,62	0,57	0,61	0,42	0,58
MnO	0,12	0,12	0,09	0,10	0,11	0,09	0,07
CaO	27,21	27,40	27,14	26,62	26,91	27,29	27,14
MgO	0,04	0,03	0,02	0,01	0,02	0,03	0,03
Na ₂ O	0,02	0,07	0,05	0,04	0,04	0,03	0,05
F	0,61	0,66	0,41	0,40	0,46	0,40	0,37
O=F	-0,26	-0,28	-0,17	-0,17	-0,19	-0,17	-0,16
suma	98,98	99,45	100,03	98,00	98,58	98,46	99,09
Nb ⁵⁺	0,002	–	0,003	0,004	0,003	0,001	0,002
Si ⁴⁺	0,990	0,995	0,984	0,984	0,991	0,988	0,982
Ti ⁴⁺	0,875	0,874	0,910	0,899	0,891	0,918	0,918
Al ³⁺	0,105	0,100	0,077	0,082	0,085	0,065	0,069
V ³⁺	0,005	0,004	0,002	–	0,002	0,004	0,003
Y ³⁺	0,008	0,008	0,010	0,011	0,010	0,005	0,005
Ce ³⁺	0,008	0,008	0,011	0,012	0,011	0,011	0,014
La ³⁺	0,003	0,002	0,001	0,002	0,002	0,002	0,003
Sm ³⁺	0,003	0,001	0,004	0,003	0,002	–	0,001
Nd ³⁺	0,007	0,008	0,010	0,011	0,010	0,008	0,009
Pr ³⁺	0,002	0,001	0,002	0,001	0,002	0,002	0,002
Gd ³⁺	0,002	0,003	0,002	0,004	0,002	0,001	0,001
Dy ³⁺	–	0,003	0,001	0,002	0,001	–	0,001
ΣA	2,010	2,007	2,017	2,015	2,012	2,005	2,010
	1,018	1,012	1,030	1,027	1,018	1,016	1,026
Fe ²⁺	0,017	0,017	0,017	0,016	0,017	0,012	0,016
Mn ²⁺	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,002
Ca ²⁺	0,966	0,967	0,960	0,963	0,963	0,976	0,968
Mg ²⁺	0,002	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
Na ⁺	0,001	0,004	0,003	0,003	0,003	0,002	0,003
ΣB	0,989	0,992	0,984	0,986	0,987	0,994	0,990
F ⁻	0,064	0,069	0,043	0,043	0,049	0,042	0,039
O ²⁻	4,907	4,902	4,935	4,930	4,925	4,935	4,935
CATSUM	3	3	3	3	3	3	3
AN SUM	4,971	4,97	4,978	4,973	4,974	4,977	4,974

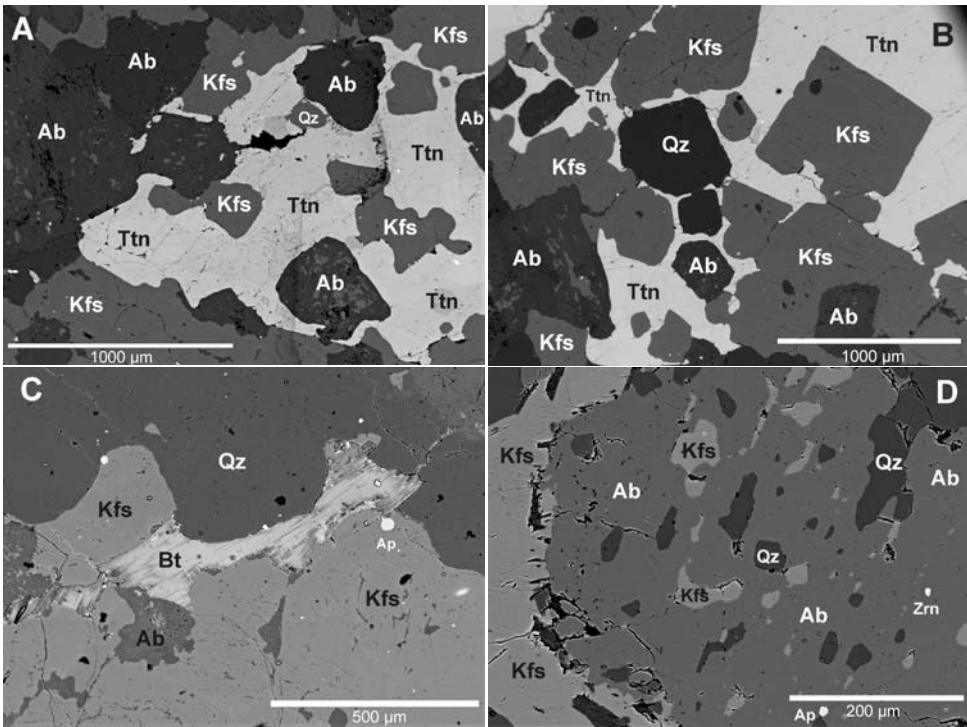
* titanit z intergranulár; titanite from intergranulars

b.d. pod mezi stanovení; below detection limit

Křemen a živec

Křemen a živec jsou součástí titanitové nodule, avšak tvoří také samostatný leukokratický lem nodule (obr. 4c). Křemen tvoří anhedrálně omezená zrna místy s undulózním zřášením. Podobně omezená jsou drobná zrna plagioklasu, zatímco draselný živec (s mírně zvýšeným Ba a Na; tab. 2) je subhedrální a má tendenci až k euhedrálnímu vývoji (obr. 3a).

Anhedrálně omezená zrna plagioklasu v leukokratickém lemu odpovídá svým složením albitu (An_{5-7}). V titanitové noduli je chemické složení plagioklasů komplexnější. Zrna albitu až oligoklasu (An_{7-25}), v asociaci s titanitem (tab. 2), mohou být částečně obrůstána K-živcem nebo naopak uzavírají jeho relikty a drobná zrna křemene (obr. 4d).



Obr. 4. Minerální asociace nodulí s titanitem, a) a b) tenké proniky na okraji zrna titanitu do okolní křemen-živcové matrix; c) minerální asociace na okraji nodulí (křemen + K-živec + biotit + albit); d) zrna albitu obrůstaná K-živcem a naopak uzavírající křemen a reliktní K-živec, zpětně odražené elektrony.

Fig. 4. Titanite-bearing mineral assemblage of nodules, a) and b) thin penetrations along the margin of a single grain of titanite into a surrounding quartz-feldspar matrix; c) mineral assemblage on the margin of nodules; d) albite grain overgrown by K-feldspar and, on the contrary, with closed quartz and K-feldspar relicts, BSE image.

Tabulka 2. Reprezentativní analýza živců.
Table 2. Representative analyses of feldspars.

	41	42	43	44	39	40
	Kfs+Ttn	Kfs+Ttn	Ab+Ttn	Kfs+Ttn+Ab (inkluzie v Ab)	Kfs+Qz+Ab±Bt lem nodule	
P ₂ O ₅	0,02	0,01	0,07	b.d.	b.d.	b.d.
SiO ₂	64,22	64,60	61,19	64,05	64,43	64,81
Al ₂ O ₃	18,98	19,06	24,71	19,05	19,16	23,64
CaO	0,09	0,08	5,69	0,11	0,08	1,43
SrO	0,13	0,06	0,23	0,18	0,11	0,08
BaO	0,64	0,69	b.d.	0,62	0,84	0,01
Na ₂ O	1,75	1,62	8,76	1,49	1,48	9,93
K ₂ O	13,86	13,89	0,29	14,19	14,01	1,69
Rb ₂ O	b.d.	b.d.	0,18	b.d.	b.d.	0,07
suma	101,03	100,01	101,12	99,69	100,11	101,66
p ⁵⁺	0,001	–	0,003	–	–	–
Si ⁴⁺	2,945	2,975	2,702	2,966	2,969	2,822
Al ³⁺	1,026	1,034	1,286	1,040	1,041	1,213
ΣT	3,971	4,009	3,988	4,006	4,010	4,035
Ca ²⁺	0,005	0,004	0,269	0,005	0,004	0,067
Sr ²⁺	0,003	0,002	0,006	0,005	0,003	0,002
Ba ²⁺	0,012	0,012	–	0,011	0,015	–
Na ⁺	0,156	0,145	0,750	0,134	0,132	0,838
K ⁺	0,811	0,816	0,016	0,838	0,824	0,094
Rb ⁺	–	–	0,005	–	–	0,002
ΣX	0,987	0,979	1,046	0,993	0,978	1,003
CATSUM	5,024	4,988	5,037	5,000	4,988	5,038
O	8	8	8	8	8	8

b.d. pod mezí stanovení; below detection limit

Biotit

Biotit se vyskytuje pouze na vnějším okraji nodule v asociaci s křemenem a živci (obr. 3d). Tvoří lištvité zprohýbané lupínky s výrazným hnědým pleochroismem. Jde o **železnatý flogopit** relativně bohatý ^{IV}Al (~ 1,25 *apfu*), Fe (18,50–4,63 hm. % FeO; 1,172–1,187 *apfu* Fe_{tot}) a Ti (4,38–4,63 hm. % TiO₂; 0,253–0,264 *apfu* Ti). Za zmínku stojí zvýšené obsahy Ba a Zn (tab. 3).

Akcesorické minerály

Akcesorické minerály zastupují velmi drobná zrna (~ 5–10 μm) zirkonu a hlavně fluorapatitu s obvyklým chemickým složením blízkým teoretickému (zirkon s 1,42 hm. % HfO₂ a 0,12 hm. % UO₂ a fluorapatit s 0,19 hm. % MnO a 3,42 hm. % F); ostatní prvky jsou na hranici stanovení mikrosondou). Z opakních minerálů byl zjištěn pouze vzácně ilmenit.

5. DISKUSE

5.1. Geneze sféroidických struktur ve vyvěřelých horninách

Při výzkumu vyvěřelých hornin se využívá celá řada pojmů, které popisují různé typy sféroidických (oválných) struktur, které vznikají v průběhu magmatické krystalizace či procesů v podmínkách raného subsolidu. Níže uvádíme definice hlavních názvů těchto struktur: (a) nodulární, (b) orbikulární, (c) ocellární, (d) variolitická, (e) sférolitická struktura.

(a) Nodulární struktura je obecný název, který se využívá pro popis kulovitých útvarů v sedimentárních i vyvěřelých horninách. V granitických horninách se tento pojem často vy-

užívá pro popis oválných akumulací turmalínu obklopených leukokratním lemem. Tato struktura pravděpodobně vzniká v důsledku krystalizace drobných kapes bórem bohaté taveniny obklopených taveninou s nízkým obsahem bóru (např. BURIÁNEK *et al.* 2016, a citace obsažené v této práci).

(b) Orbikulární struktura je termín používaný pro horniny, které obsahují sféroidické útvarů obklopené krystalickou základní hmotou. Využívá se zejména při popisu oválných a kulovitých tvarů, které vznikají při rychlé krystalizaci v magmatickém krbu v důsledku drastické změny P-T-X podmínek během krystalizace (například LINDH a NÄSSTRÖM 2006). V takovém případě je krystalizační centrum (například krystal amfibolu, cordieritu nebo agregát zrn) je obaleno oválnou často mono- nebo biminerální koncentricky zonální vrstvou. Termín orbikulární struktura se však také používá pro xenolity, které byly výrazně modifikovány během krystalizace hostitelského magmatu. Tato modifikace spočívala v částečném natavení xenolitů a vzniku hydratované železem a hořčíkem bohaté taveniny v okolí xenolitu (Ai *et al.* 2020).

Tabulka 3. Reprezentativní analýza biotitů.

Table 3. Representative analyses of biotites.

	36	37	38
SiO ₂	36,43	36,23	35,89
TiO ₂	4,63	4,53	4,38
Al ₂ O ₃	14,49	14,73	14,33
V ₂ O ₃	0,08	0,10	0,07
FeO	18,49	18,64	18,5
MnO	0,13	0,13	0,14
MgO	11,84	11,84	11,92
BaO	0,26	0,31	0,29
ZnO	0,11	0,03	0,14
K ₂ O	9,60	9,38	9,20
Na ₂ O	0,10	0,12	0,12
H ₂ O*	3,66	3,67	3,63
F	0,54	0,52	0,52
CL	0,17	0,14	0,13
O=F	-0,23	-0,22	-0,22
O=CL	-0,04	-0,03	-0,03
suma	100,26	100,12	99,01
Si ⁴⁺	2,761	2,748	2,754
^{IV} Al	1,239	1,252	1,246
ΣT	4,000	4,000	4,000
Ti ⁴⁺	0,264	0,258	0,253
^{IV} Al (okt.)	0,055	0,065	0,050
V ³⁺	0,005	0,006	0,004
Fe ²⁺	1,172	1,182	1,187
Mn ²⁺	0,008	0,008	0,009
Mg ²⁺	1,338	1,339	1,364
ΣX	2,578	2,600	2,614
Ba ²⁺	0,008	0,009	0,009
Zn ²⁺	0,006	0,002	0,008
K ⁺	0,928	0,908	0,901
Na ⁺	0,015	0,018	0,018
H ⁺	1,849	1,857	1,857
F ⁻	0,129	0,125	0,126
Cl ⁻	0,022	0,018	0,017
O ²⁻	11,849	11,857	11,857
CATSUM	7,798	7,795	7,802
AN SUM	12	12	12

* vypočteno ze stechiometrie; determined by stoichiometry

b.d. pod mezí stanovení; below detection limit

(c) Ocellární struktura (ROSENBUSCH 1877) se nejčastěji vyskytuje v alkalických a mafických horninách. Jedná se o světlý minerál (foid, křemen), který je lemován tmavými minerály (např. amfibol). V dioritech a granitoidech jsou ocellární stavby interpretovány jako důkaz minglingu a mixingů mezi kyselým a mafickým magmatem (ANGUS 1962).

(d) Variolitická struktura (JOHANSEN 1938) je to název pro sférickou nebo globulární stavbu typickou pro jemnozrnné mafické horniny. Ve středu je tmavý minerál, který je obklopen světlým lemem. Jednotlivé varioly mají rozměry od několika mm do několika cm a mohou, ale nemusí mít sférolitickou vnitřní stavbu.

(e) Sférolitická struktura je typická pro felzické jemnozrnné vyvřelé horniny. Pro tuto strukturu jsou typické kulovité útvary s radiálně paprscitou nebo vláknitou stavbou. Sféroality se obvykle skládají ze dvou minerálů a to křemen a živce. Na rozdíl od dendritů nejsou sféroality rozvětveným monokrystalem ale agregátem samostatných krystalů, které rostou ze společného centra. Sféroality se tvoří během devitrifikace vulkanických skel a mohou také růst ve viskózní silikátové tavenině (LOFGREN 1971, 1974). Krystalizace obvykle začíná na drobném krystalu, který působí jako nukleační centrum.

Z předchozího přehledu je jasné, že sféroidické struktury v granitech obvykle vznikají v důsledku prudké změny chemického složení systému (míšení magmat) a/nebo teplotních a tlakových podmínek. Akumulace titanitu, obklopené leukokratním lemem bývají typické pro mafické horniny ovlivněny interakcí s kyselým magmatem (HIBBARD 1991, BAXTER a FEELY 2002, GOGOI *et al.* 2017). Pro tuto strukturu se většinou používá termín titanit-plagioklasové ocelli (např. GOGOI *et al.* 2017), nicméně geneze a stavba těchto struktur naznačují, že vznikly krystalizací Ti-bohaté taveniny. Proto považujeme za vhodnější termín pro pojmenování této struktury nodule. Tato titanit-plagioklasová struktura (HIBBARD 1991, BAXTER a FEELY 2002), se obvykle vyskytuje v dioritech. Zmíněné nodule obsahují ve středu titanit, který je obklopen felzickou zónou sestávající z K-živce + křemene + plagioklasu (HIBBARD 1995). Jejich vznik je vysvětlován dvoufázovým míšením magmatu: (a) během první fáze mixingů došlo v podchlazeném mafickém magmatu ke krystalizaci srůstů plagioklasu a titanitu. Během míšení magmat vznikl světlý lem složený z plagioklasu, draselného živce a křemene. Během druhé fáze míšení došlo k desintegraci částečně krystalované mafické horniny. Toto druhé míšení vedlo ke krystalizaci biotitu podél okraje leukokratního lemu (HIBBARD 1991).

5.2. Vznik studovaných titanitových nodulí

Titanit tvoří dominantní minerální komponentu centrální části nodule. Poikilitická zrna titanitu uzavírají automorfní až hypautomorfní krystaly draselného živce, plagioklasu a hypautomorfní až xenomorfní krystaly křemene. Tyto tvary inkluzí naznačují, že titanit začal růst v průběhu magmatické krystalizace a během růstu nedocházelo ke konzumaci již existujících krystalů. Během růstu titanitu byly krystaly živců a křemene obklopeny Ti-bohatou taveninou. Podobné struktury vznikají při míšení mafického a felzického magmatu (HIBBARD 1991, BAXTER a FEELY 2002, GOGOI *et al.* 2017). Intruze felzické taveniny do mafického systému může vést k destabilizaci amfibolu a biotitů a vzniku titanem bohaté taveniny (GOGOI *et al.* 2017). To že zdrojem Ti mohly být biotity z okolních durbachitů naznačuje vysoký obsah Ti v tomto minerálu ($Ti = 0,127-0,225 \text{ apfu}$; $TiO_2 = 2,28-3,97 \text{ hmot. \%}$; Janoušek *et al.* 2020). Titanem bohatá tavenina pak může být asimilována felzickým magmatem a chovat se jako nemisitelná fáze (VEGAS *et al.* 2011). Pokud krystalují dvě nemisitelné taveniny v jednom systému je poměrně běžné, že vznikají orbikule, které mají minerální složení odlišné od svého okolí (např. BURIÁNEK *et al.* 2016, FONSECA *et al.* 2021). Orbikule přitom tvoří tavenina s nižší teplotou solidu, která vytváří sférické „ubuliny“ v dominantní granitové tavenině (např. BURIÁNEK *et al.* 2016).

Kolem titanem bohatého centra je přítomen leukokratní lem, který neobsahuje žádné biotity. Obvykle vzniká v závěrečných fázích magmatické krystalizace nebo v podmínkách raného subsolidu (BURIÁNEK *et al.* 2016). Leukokratní lem kolem titanem bohatého

jádra je produktem interakce titanem bohaté zbytkové taveniny s okolním granitem (VEGAS *et al.* 2011). V důsledku krystalizace titanitu byl v okolí nodule nedostatek Fe pro vznik biotitu. Malé množství biotitu, které v okolí nodule vzniklo, je Ti bohatší než většina biotitu v okolních durbachitech ($\text{TiO}_2 = 4,38\text{--}4,63$ hmot. %)

5.3. Stáří granitových žil

Výskyty durbachitů v moldanubiku jsou často proráženy žilami muskovit-biotitických až turmalinických granitů. Kontakty těchto žil s okolními durbachity jsou ostré a k intruzi tedy pravděpodobně došlo až po utužení durbachitů (BURIÁNEK *et al.* 2016). Nicméně na kontaktu durbachitů s okolními migmatity jsou patrné známky parciálního tavení a vzniku peraluminických tavenin (např. BUBENÍČEK 1968). Existence titanem bohatých nodulí naznačuje, že muselo docházet k interakci mezi granitovou taveninou a částečně vykrystalovanou taveninou durbachitovou. Studovaný granit s titanitovými nodulemi tedy pravděpodobně představuje peraluminickou taveninu generovanou během vmístění durbachitů v jejich kontaktní aureole.

6. ZÁVĚRY

Při kontaktu dvou typů syenitů (durbachitů) táboorského plutonu proniklého granitickou horninou byly zjištěny několik cm velké zonální nodule bohaté titanem, s okrajovým leukokratickým lemem. Titanit, s mírně zvýšeným obsahem Al a chudý F, tvoří dominantní minerální komponentu centrální části nodule, naopak na vnějším okraji nodulí je zastoupen železnatý flogopit ($\text{TiO}_2 = 4,38\text{--}4,63$ hmot. %). Tyto nodule jsou produktem interakce granitové a durbachitové taveniny. Poikilitická zrna nezonálního titanitu uzavírají euhedrální až subhedrální krystaly draselného živce, plagioklasu (An_{7-25}) a anhedrální zrna křemene. Tyto tvary inkluzí naznačují, že titanit začal růst v průběhu magmatické krystalizace. Krystaly živců a křemene byly inkorporovány do prostředí Ti-bohaté taveniny, která vykazovala nízkou mísitelnost s okolní granitovou taveninou. Tímto způsobem vznikly oválné akumulace titanitu lemované leukokratickým lem ochuzeným o biotit. Vznik Ti-bohaté taveniny patrně souvisí s interakcí felzické korové taveniny, která intrudovala do mafického systému, což vedlo k destabilizaci amfibolu a biotitů, které byly zdrojem Ti při vzniku titanem bohaté taveniny.

7. PODĚKOVÁNÍ

Odborný článek vznikl na základě institucionální podpory dlouhodobého koncepčního rozvoje výzkumné organizace poskytované Ministerstvem kultury (DKRVO, MK000094862) (S. H.) a za finanční podpory projektu České geologické služby číslo 321180 (DKRVO/ČGS 2018-2022). Děkujeme oběma recenzentům, J. Leichmannovi a K. Kropáčovi za pročetí rukopisu práce a vyjasnění některých odborných i formálních problémů.

LITERATURA

- AI, J., LU, X., LI, Z., WU, Y., 2020: Genesis of the graphite orbicules in the Huangyangshan graphite deposit, Xinjiang, China: Evidence from geochemical, isotopic and fluid inclusion data. - *Ore Geology Reviews*, 122, 103505. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2020.103505>
- ANGUS, N. S., 1962: Ocellar hybrids from the Tyrone Igneous Series, Ireland. - *Geological Magazine*, London, 99, 9-26.
- BAXTER, S., FEELY, M., 2002: Magma mixing and mingling textures in granitoids: examples from the Galway Granite, Connemara, Ireland. - *Mineralogy and Petrology*, 76, 63-74. DOI 10.1007/s00710-001-0178-8
- BUBENÍČEK, J., 1968: Geologický a petrografický vývoj třebíčského masivu. - *Sborník geologických věd*, řada G, sv. 13, 133-161.

- BURIÁNEK, D., DOLNÍČEK, Z., NOVÁK, M., 2016: Textural and compositional evidence for a polyphase saturation of tourmaline in granitic rocks from the Třebíč Pluton (Bohemian Massif). - *Journal of Geosciences*, 61, 4, 309-334.
- BURIÁNEK, D., NOVÁK, M., 2004: Morphological and compositional evolution of tourmaline from nodular granite at Lavičky near Velké Meziříčí, Moldanubicum, Czech Republic. - *Journal of the Czech Geological Society* 49, 1-2, 81-90.
- FONSECA, R. O. C., MICHELY, L. T., KIRCHENBAUR, M. *et al.*, 2021: Formation mechanisms of macroscopic globules in andesitic glasses from the Izu-Bonin-Mariana forearc (IODP Expedition 352). - *Contributions Mineralogy and Petrology*, 176, 2, <https://doi.org/10.1007/s00410-020-01756-3>
- GOGOI, B., SAIKIA, A., AHMAD, M., 2017: Titanite-centered ocellar texture: A petrological tool to unravel the mechanism enhancing magma mixing. - *Periodico di Mineralogia*, 86, 247-276.
- HIBBARD, M. J., 1991: Textural anatomy of twelve magma-mixed granitoid systems. - In: *Enclaves and Granite Petrology 13* (eds): J. Didier and B. Barbarin, *Developments in Petrology*, Elsevier, Amsterdam, 431-444.
- HIBBARD, M. J., 1995: *Petrography to Petrogenesis*. - Prentice Hall, New Jersey, 587 p.
- JANOUSEK, V., HANŽL, P., SVOJTKA, M., HORA, J. M., KOCHERGINA, Y. V. E., GADAS, P., HOLUB, F. V., GERDES, A., VERNER, K., HRDLÍČKOVÁ, K., DALY, J. S., BURIÁNEK, D., 2020: Ultrapotassic magmatism in the heyday of the Variscan Orogeny: the story of the Třebíč Pluton, the largest durbachitic body in the Bohemian Massif. - *Int. J. Earth. Sci. (Geol Rundsch)*. 109, 1767-1810. <https://doi.org/10.1007/s00531-020-01872-2>
- JANOUSEK, V., HOLUB, F. V., VERNER, K., ČOJPAKOVÁ, R., GERDES, A., HORA, J. M., KOŠLER, J., TYRRELL, S. (2019): Two-pyroxene syenitoids from the Moldanubian Zone of the Bohemian Massif: Peculiar magmas derived from a strongly enriched lithospheric mantle source. - *Lithos*, 342-343, 239-262. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2019.05.028>
- JOHANNSEN, A., 1938: *A Descriptive Petrography of the Igneous Rocks*. - Volume 4, Part I, The Feldspathoid Rocks and Part II, The Peridotites and Perknites. The University of Chicago Press, Chicago, Illinois, 523 p.
- LINDH, A., NÄSTRÖM, H., 2006: Crystallization of orbicular rocks exemplified by the Slättemossa occurrence, southeastern Sweden. - *Geological Magazine*, 143, 5, 713-722. doi:10.1017/S001675680600210X
- LOFGREN, G., 1971: Spherulitic textures in glassy and crystalline rocks. - *Journal of Geophysical Research*, 76, 23, 5635-5648. doi:10.1029/JB076i023p05635.
- LOFGREN, G., 1974: An experimental study of plagioclase crystal morphology; isothermal crystallization. - *American Journal of Science*, 274, 3, 243-273. doi:10.2475/ajs.274.3.243.
- POUCHOU, J. L., PICHOU, F., 1985: „PAP“ (Z) procedure for improved quantitative microanalysis. - In: Armstrong, J. T., ed.: *Microbeam Anal.* - San Francisco Press, San Francisco, California, 104-106.
- ROSENBUSCH, H., 1877: Die stieger schiefer und ihre contact zone en dan granititen von Barr- Andlau und Hohwald. - *Abh Geol Specialkarte Elsass-Lothringen, Strassburg*.
- VEGAS, N., RODRIGUEZ, J., CUEVAS, J., SIEBEL, W., ESTEBAN, J. J., TUBÍA, J. M., BASEI, M., 2011: The sphenocentered ocellar texture: An effect of grain-supported flow and melt migration in a hyperdense magmamush. - *Journal of Geology*, 119, 143-157.
- WARR, L. N., 2021: IMA-CNMNC approved mineral symbols. - *Mineralogical Magazine*, 85, 3, 291-320. DOI: <https://doi.org/10.1180/mgm.2021.43>
- ŽÁK, J., HOLUB, F. V., VERNER, K., 2005: Tectonic evolution of a continental magmatic arc from transpression in the upper crust to exhumation of mid-crustal orogenic root recorded by episodically emplaced plutons: the Central Bohemian Plutonic Complex (Bohemian Massif). - *International Journal of Earth Sciences*, 94, 385-400. DOI 10.1007/s00531-005-0482-3
- ZIMÁK, J., 2018: Mineralogie ocellárních křemenných monzodioritů žulovského plutonu. - *Acta Musei Moraviae, Scientiae Geologicae*, 103, 1, 43-58.