

Akcesorické minerály jako indikátor geochemické frakcionace v tělesech turmalinických granitů na jihozápadním okraji třebíčského masivu

Accessory minerals as an indicator of geochemical fractionation in the bodies of tourmaline granite on the south-western margin of the Třebíč massif

DAVID BURIÁNEK¹⁾ A PETR GADAS²⁾

¹⁾ Česká geologická služba, Leitnerova 22, 658 59 Brno

²⁾ Ústav geologických věd, Přírodovědecká fakulta, Kotlářská 2, 611 37 Brno

BURIÁNEK D., GADAS P. (2010): Akcesorické minerály jako indikátor geochemické frakcionace v tělesech turmalinických granitů na jihozápadním okraji třebíčského masivu. - *Bull. mineral.-petrolog. Odd. Nár. Muz. (Praha)* 18/1, 97-105. ISSN: 1211-0329.

Abstract

The peraluminous granite dykes and small bodies on the south-western margin of the Třebíč pluton consist of variable proportions of quartz, K-feldspar, sodic plagioclase (An_{1-7}), disseminated tourmaline ($X_{Fe} = 0.60 - 0.92$, $Al = 6.57 - 7.10$ apfu, $Na = 0.32 - 0.63$ apfu), muscovite and common annite. Also, uncommon cordierite, sillimanite and garnet are present. Accessory zircon, fluorapatite, monazite, uraninite, cassiterite ($Nb+Ta = 0.01 - 0.15$ apfu), ferrocolumbite [$X_{Ta} = 0.04 - 0.45$, $X_{Mn} = 0.22 - 0.67$], ferrowodginite ($X_{Ta} = 0.54 - 0.69$, $X_{Mn} = 0.30 - 0.36$), rutile ($Nb = 0.01 - 0.07$ apfu) occur in the studied granites. The individual dykes differ in fractionation degree reflected in different contents of Rb, Sr, W, Sn and Ta. Paragenetic, textural, and chemical characteristics of the individual occurrences confirmed the different degree of magmatic fractionation and diversity in oxygen fugacities of their magmas.

Key words: ferrocolumbite, ferrowodginite, tourmaline, S-type peraluminous granite, Moravia, Czech Republic

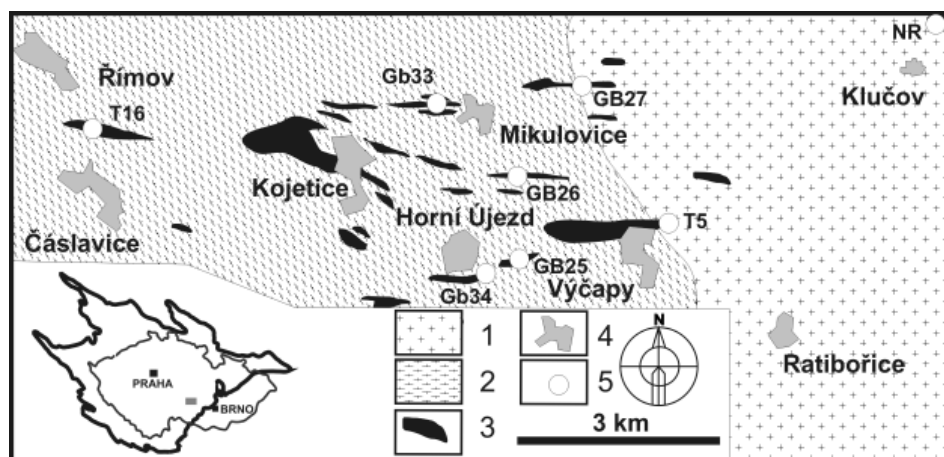
Úvod

Chemické složení akcesorických minerálů je poměrně dobrým indikátorem geochemické frakcionace peraluminických tavenin (např. Černý et al. 1985; Chudík et al. 2008; London 2005; Masau et al. 2000). Na západním okraji třebíčského masivu se vyskytuje velké množství drobných granitových těles a žil s odlišným zastoupením akcesorických minerálů. Granity pochází ze stejného zdroje, což dokládá chemické složení těchto hornin a jejich geologická pozice (Buriánek 2004). Takové granity jsou vhodné pro studium vývoje chemického složení minerálů v průběhu frakcionace granitové taveniny.

V třebíčském masivu nacházíme různé typy peraluminických granitů. Podle texturní pozice turmalínu rozlišujeme granity s rozptýleným turmalínem a granity s turmalínem koncentrovaným do nodulí (Buriánek, Novák 2007). Mezi doposud málo studované horniny patří granity s rozptýleným turmalínem. Jejich drobná tělesa a žíly se koncentrují hlavně na jz. okraji třebíčského masivu a bývají orientovány ve směru V - Z (obr. 1). Proráží

durbachity či metamorfované horniny jako jsou biotitické migmatity a cordierit-biotitické migmatity (někdy se sillimanitem). Kontakt turmalinických granitů s okolními horninami bývá ostrý.

V této práci byly studovány vzorky turmalinických granitů s rozptýleným turmalínem, z lokalit u obcí Římov, Kojetice, Mikulovice, Čáslavice, Výčapy, Horního Újezd a Klučov (tab. 1). V granitech se často i v rámci jednoho tělesa mění velikost zrna, avšak zastoupení hlavních horninotvorných minerálů je poměrně stálé. Po petrografické stránce zde převažují muskovit-turmalinické grani-



Obr. 1 Zjednodušená geologická mapa jihozápadního okraje třebíčského masivu (upraveno podle Pelíška et al. 1999). Legenda: 1 - durbachity; 2 - migmatizované biotitické pararuly s cordieritem a sillimanitem; 3 - turmalinické granity; 4 - obce; 5 - lokality.

Tabulka 1 Přehled studovaných vzorků

číslo	lokality	hlavní minerály	akcesorické minerály	inkluze v turmalínu
T5	Výčapy I	Qtz, Ab, Kfs, Tur, Ms, Bt	Ap, Xtm, Mnz, Cst	Thr
T16	Čáslavice	Qtz, Ab, Kfs, Tur, Ms, Bt	Ap, Xtm, Zrn	Thr
GB25	Výčapy II	Qtz, Ab, Kfs, Tur, Ms, Bt	Ap, Xtm, Mnz, Cst, Wodg	Ilm
GB26	Mikulovice I	Qtz, Ab, Kfs, Tur, Ms, Bt (Chl), Cdr (Chl), Sil	Ap, Xtm, Zrn, Cst	
GB27	Mikulovice II	Qtz, Ab, Kfs, Tur, Ms, Bt (Chl), Cdr (Chl)	Ap, Xtm, Zrn, Cst, Col	Rt
GB33	Mikulovice II	Qtz, Ab, Kfs, Tur, Ms, Bt	Ap, Mnz, Xtm, Zrn, Cst, Lo	Rt, Ilm, Urn
GB34	Horní Újezd	Qtz, Ab, Kfs, Tur, Ms, Bt	Ap, Xtm, Mnz, Zrn, Cst, Wodg	Rt, Urn, zirkonolit
NR	Klučov	Qtz, Ab, Kfs, Tur, Ms	Ap, Xtm, Mnz, Zrn, Col, Grt, Ghn	

Tabulka 2 Reprezentativní horninové analýzy turmalinických granitů (oxidy v hm. %, ostatní v ppm).

vzorek	GB33	GB34	GB25
SiO ₂	74.2	75.02	74.25
TiO ₂	0.05	0.06	0.06
Al ₂ O ₃	14.81	14.53	14.83
Fe ₂ O ₃	0.89	0.93	0.75
MnO	0.05	0.04	0.02
Cr ₂ O ₃	0.003	0.001	0.001
MgO	0.13	0.11	0.1
CaO	0.6	0.26	0.4
Na ₂ O	3.8	3.39	3.56
K ₂ O	4.65	4.52	4.5
P ₂ O ₅	0.25	0.15	0.26
Suma	100.03	100.01	99.52
LOI	0.6	1	0.8
Ba	113.8	147.7	165.3
Rb	369.3	445.5	441.2
Sr	50.8	46.2	58
Sn	48	53	65
Zn	16	8	7
As	62.7	1.3	2.1
U	21.8	3.9	3.5
Nb	13	22.5	16.8
Y	9.9	6.6	7.9
Zr	27.1	22.9	25.4
Pb	8.2	15.3	11.4
Cs	115.6	252.9	127.6
Th	4.5	4.4	5.7
Ta	5.5	11.2	11.4
Hf	1.1	1.2	1.6
Sc	3	3	3
Sb	0.7	0.2	0.1
Tl	0.2	0.2	0.2
Bi	3.9	4.9	4
W	4.1	7.2	6.2
Ga	20.2	23.7	22.4
La	4.2	3.9	4.3
Ce	8.6	7.4	8.5
Pr	0.94	0.86	0.94
Nd	3.6	3.6	2.4
Sm	0.9	0.7	0.9
Eu	0.39	0.28	0.19
Gd	1.12	0.85	1.15
Tb	0.2	0.18	0.19
Dy	1.65	1.05	1.03
Ho	0.31	0.19	0.27
Er	0.91	0.69	0.65
Tm	0.16	0.11	0.12
Yb	0.85	0.58	0.6
Lu	0.12	0.09	0.12

ty s biotitem. Jednotlivá tělesa a žíly se ale liší stupněm geochemické frakcionace, což se projevuje v zastoupení akcesorických minerálů. Výsledky jejich studia podává tato práce.

Metodika

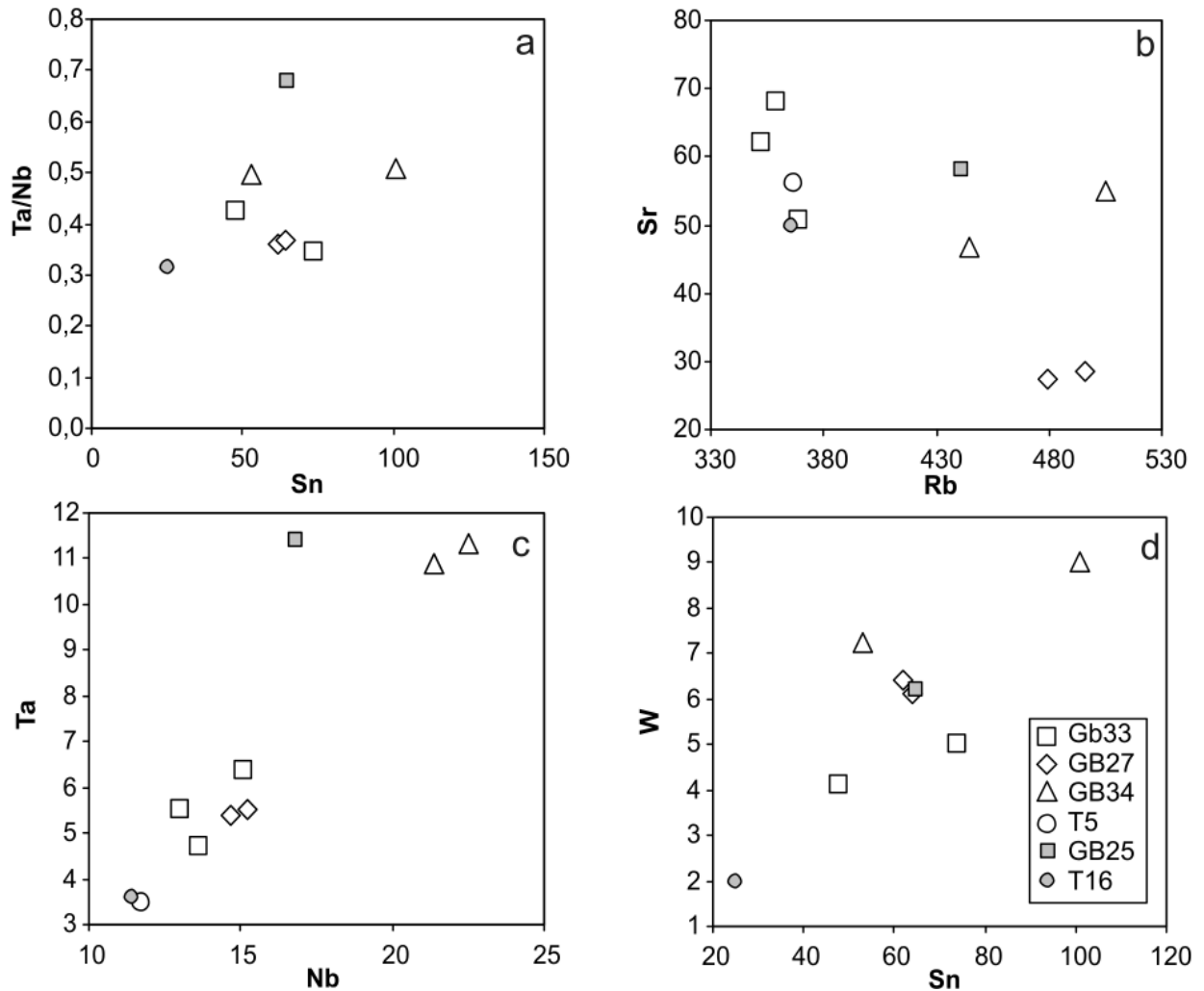
Část chemických analýz hornin je převzata z práce (Buriánek 2004), zbytek byl proveden v laboratořích Acme Analytic Laboratories Ltd., Vancouver, Kanada. Obsahy oxidů hlavních prvků byly stanoveny metodou ICP-ES, stopové prvky a prvky skupiny vzácných zemin byly stanoveny metodou ICP-MS.

Leštěné výbrusy byly studovány metodou zpětně odražených elektronů (BSE) a chemické složení jednotlivých minerálů bylo zjišťováno vlnově-disperzní elektronovou mikroanalýzou ve společné laboratoři elektronové mikroskopie a mikroanalýzy ÚGV Brno a ČGS na Přírodovědecké fakultě MU Brno. Bodové analýzy probíhaly při urychlovacím napětí 15 kV, proudu 10 - 20 nA a průměru elektronového svazku 1 - 5 μm za použití přírodních a syntetických standardů. Detekční limity se pro jednotlivé prvky pohybovaly mezi 100 - 1000 ppm, statistická chyba (1σ) v závislosti na koncentraci konkrétního prvku mezi 0.02 - 0.4 hm. %. Naměřené hodnoty byly normalizovány PAP korekcí (Pouchou, Pichoir 1985).

Krystalochemické vzorce živců byly přepočteny na 8 atomů kyslíku. Vzorce granátu byly přepočteny na 12 O, Fe²⁺ a Fe³⁺ bylo rozpočteno na základě stechiometrie (Si+B-pozice = 5). Krystalochemické vzorce slíd byly vypočteny na 20 O + 4 (OH + F) a vzorec turmalínu na 31 aniontů přičemž ze stechiometrie byly doloženy bór (B = 3) a voda (OH+F = 4). Kasiterit byl přepočten na 2 O, ilmenit na 6 O a apatit na 13 O. Krystalochemický vzorec columbitu byl spočten na bázi 3 kationů a 6 O a wodginitu na 32 O. Poměr Fe³⁺/Fe²⁺ byl v obou případech stanoven na základě valenčního vyrovnání. Na 4 O byly vypočteny krystalochemické vzorce zirkonu. Zkratky minerálů jsou uvedené podle Kretze (1983) a Whitney a Evans (2010). V textu jsou použity zkratky pro některé poměry atomů prvků na vzorcovou jednotku v minerálech X_{Fe} = Fe/(Fe + Mg), X_{Mn} = Mn/(Fe + Mn) a X_{Ta} = Ta/(Ta + Nb).

Chemické složení granitů

Turmalinické granity (tab. 2) ve studované oblasti mají poměrně úzké rozpětí obsahu SiO₂ (73 - 75 hm. %). Tyto vápenatoalkalické vysoce draselné (K₂O = 4.2 - 4.7 hm. %) granity jsou peraluminické A/(CNK) = 1.1 až 1.3. Mají nízké obsahy F (300 - 870 ppm) a vyšší obsahy P₂O₅ (0.15 - 0.34 hm. %). V binárních diagramech vykazují některé hlavní i stopové prvky lineární trendy (obr. 2a-d). Se vzrůstajícím obsahem SiO₂ klesá obsah CaO



Obr. 2 Diagramy Sn vs. Ta/Nb, Rb vs. Sr, Ta vs. Nb a Sn vs. W zobrazující chemické složení studovaných granitů. Hodnoty jsou uvedeny v ppm.

(0.26 - 0.66 hm. %), U (2 - 21 ppm), Zr (18 - 41 ppm), Ba (71 - 229 ppm), Sr (27 - 68 ppm) a naopak roste obsah Rb (352 - 505 ppm) a Nb (11 - 23 ppm). Vzrůstající obsah Nb (obr. 2c) poměrně dobře koreluje s obsahem Ta (3 - 11 ppm) a s rostoucím obsahem Sn (25 - 110 ppm) roste obsah W (2 - 9 ppm, obr. 2 a, d). Granity lze rozdělit na skupinu s vyššími (441 - 505 ppm) a nižšími (352 - 369 ppm) obsahy Rb. Celkové obsahy REE (tab. 2) jsou nízké (11 - 28 ppm) a charakteristické jsou ploché křivky HREE (normováno na chondrit podle Boyntona (1984)) s mírným nabožením v oblasti LREE ($La_N/Yb_N = 2.5 - 4.8$). Někdy je patrná nevýrazná záporná a vzácně kladná Eu anomálie ($Eu_N/Eu_N^* = 1.2 - 0.6$).

Petrografie

Po petrografické stránce jsou studovaná tělesa poměrně homogenní. Převažují zde středně, místy až hrubě zrnité muskovit-turmalinické granity s biotitem. Obsahují 33 - 35 mod. % křemene, 32 - 44 mod. % draselného živce, 15 - 23 mod. % plagioklasu, 2 - 7 mod. % turmalínu, 4 - 6 mod. % muskovitu a 0 - 4 mod. % biotitu.

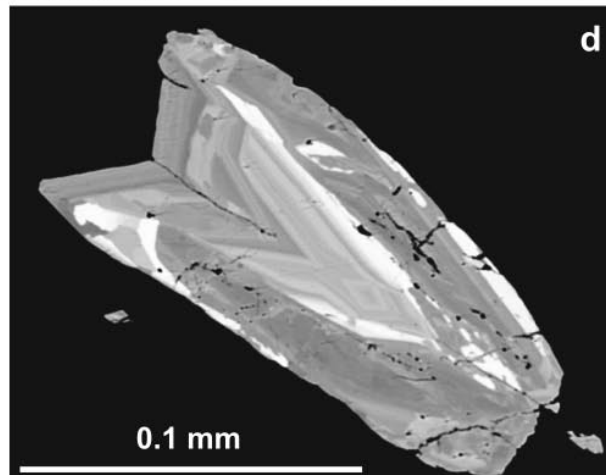
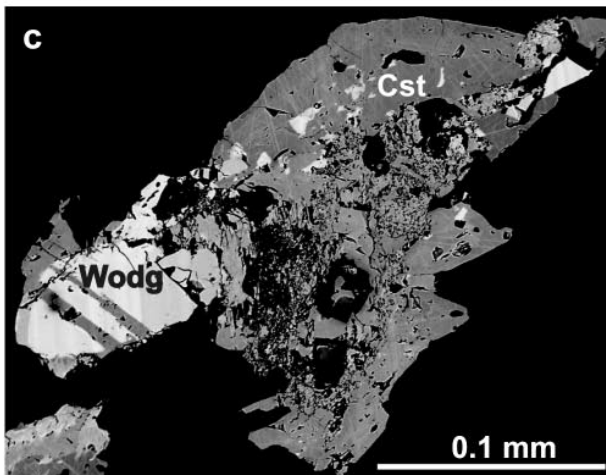
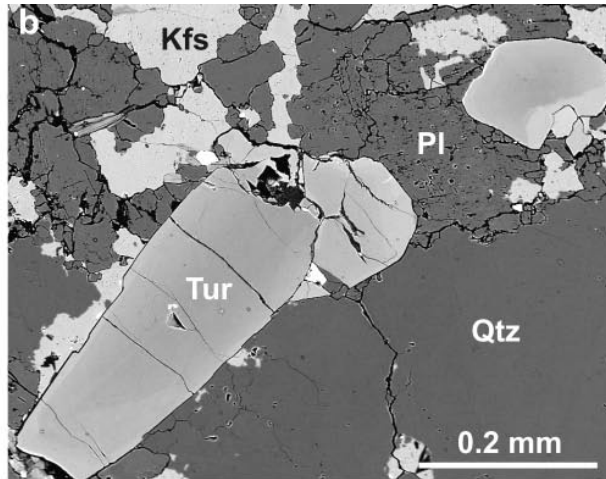
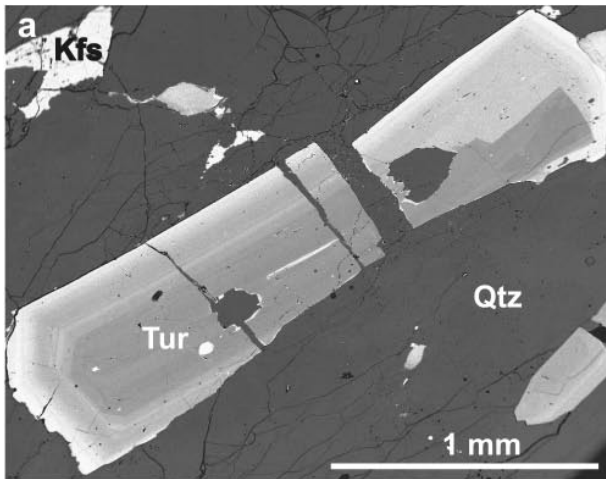
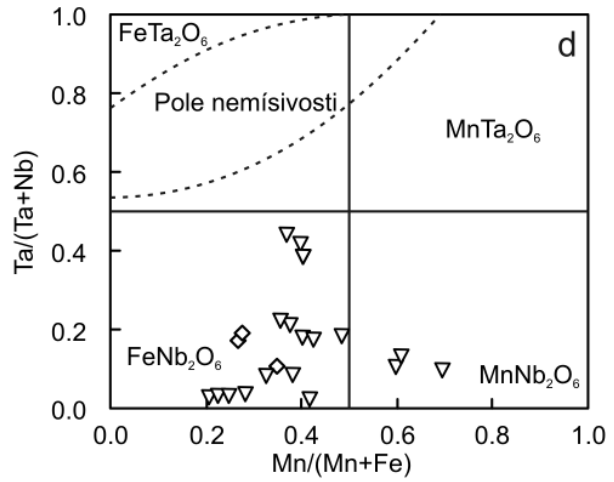
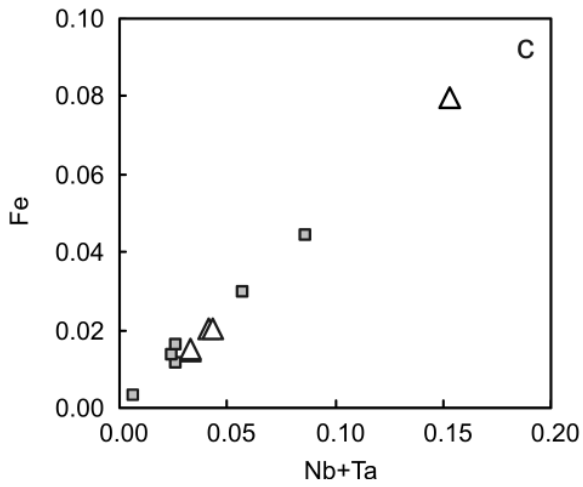
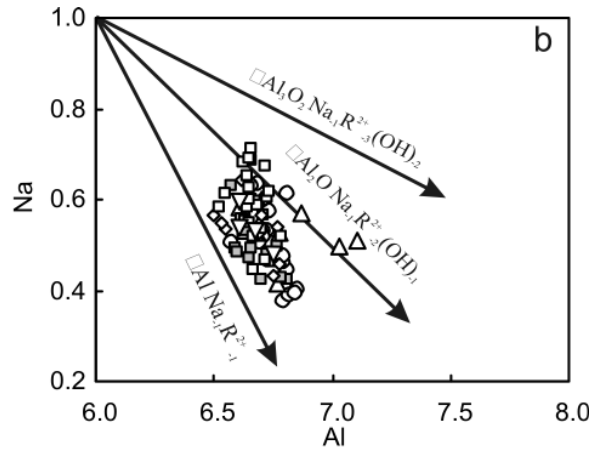
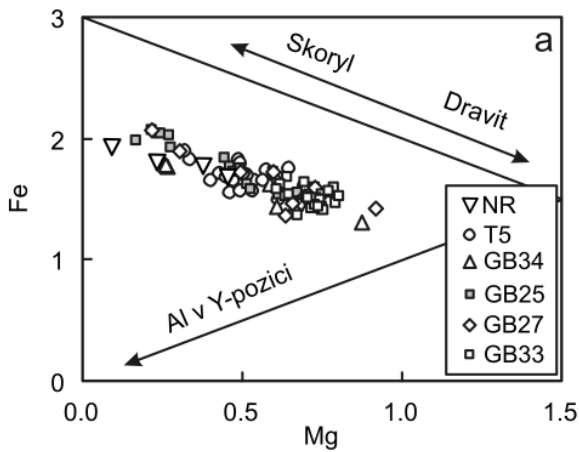
Křemen je xenomorfní a téměř vždy undulózně zháší, nebo se dokonce rozpadá na shluky drobných zrn.

Plagioklas je vesměs nezonální, slabě až středně intenzivně sericitizovaný a velmi často polysynteticky zdvojitý (An_{1-7}). Draselný živce obsahuje místy per-

thity a bývá jednoduše zdvojitý. Je slabě až středně intenzivně sericitizovaný, často též zakalený jílovými minerály. V některých případech (Klučov) vykazuje K-živce zvýšený obsah P_2O_5 (do 1.06 hm. %), zejména v neperthitických partiích.

Turmalín tvoří až 2 cm dlouhé sloupce, které jsou často opticky zonální. Automorfní krystaly turmalínu mají v optickém mikroskopu zřetelnou zonálnost v odstínech žlutozelené až sytě hnědozelené barvy, která ale ne vždy koresponduje se zonálností chemickou (změna barvy je patrně způsobena rozdílnými obsahy Fe^{3+} ve struktuře turmalínu (London, Manning 1995)). Všechny studované turmalíny (obr. 3a-b) lze označit jako hliníkem bohatý skoryl až foitit (tab. 3; $X_{Fe} = 0.60 - 0.92$, Al = 6.57 - 7.10 apfu, Na 0.32 - 0.63 apfu). Typické jsou nízké obsahy F (0.02 - 0.32 apfu). Poměrně často mají zrna vyvinutou oscilační zonálnost (obr. 4a), která se projevuje v kolísání obsahu Mg a Al. Avšak obecně v těchto turmalínech můžeme pozorovat růst obsahu F, Fe a Na směrem k okrajům zrna. Tento vývoj bývá doprovázen poklesem Mg a v některých případech Al. Často jsou patrné železem bohaté okraje (obr. 4a,b). Turmalíny obsahují četné pleochroické dvůrky kolem drobných inkluzí akcesorických minerálů (monazit, uraninit).

Muskovit (Al = 5.24 - 5.54 apfu, Na = 0.11 - 0.19 apfu) tvoří až 5 mm dlouhé, často deformované krystaly, někdy též shluky drobných lupínků. Na okrajích zrn může mus-



Tabulka 3 Reprezentativní analýzy turmalínu

vzorek	GB25_1	GB25_2	GB25_3	GB27_8	T4_1	T4_8	NR	NR
SiO ₂	35.24	35.32	34.88	35.52	35.32	35.80	35.79	36.01
TiO ₂	1.03	0.54	0.37	0.82	1.02	0.54	0.67	0.28
B ₂ O ₃ *	10.37	10.46	10.22	10.50	10.42	10.47	10.50	10.48
Al ₂ O ₃	33.36	34.64	32.80	34.32	33.73	34.10	33.95	34.52
V ₂ O ₃	0.00	0.00	0.03	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00
FeO	12.59	11.05	14.31	10.62	10.48	10.40	12.44	13.21
MgO	1.84	2.58	0.91	2.77	2.87	2.95	1.88	0.92
CaO	0.24	0.24	0.09	0.35	0.28	0.25	0.11	0.03
MnO	0.07	0.04	0.32	0.02	0.02	0.02	0.20	0.22
ZnO	0.04	0.08	0.18	0.07	0.00	0.00	0.13	0.13
Na ₂ O	1.51	1.33	1.91	1.64	1.71	1.61	1.88	1.51
K ₂ O	0.05	0.01	0.06	0.04	0.04	0.02	0.06	0.05
F	0.21	0.17	0.64	0.17	0.29	0.21	0.46	0.50
Cl	0.02	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00
H ₂ O *	3.47	3.53	3.22	3.54	3.46	3.51	3.41	3.38
O=F	0.09	0.07	0.27	0.07	0.12	0.09	0.19	0.21
Suma	100.03	99.98	99.94	100.44	99.63	99.89	101.48	101.24
<i>(apfu)</i>								
Si ⁴⁺	5.908	5.869	5.933	5.877	5.893	5.940	5.922	5.973
Al ³⁺	0.092	0.131	0.067	0.123	0.107	0.060	0.078	0.027
Suma T	6.000	6.000	6.000	6.000	6.000	6.000	6.000	6.000
B ³⁺	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000
Al ³⁺	6.000	6.000	6.000	6.000	6.000	6.000	6.000	6.000
Mg ²⁺	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Suma Z	6.000	6.000	6.000	6.000	6.000	6.000	6.000	6.000
Ti ⁴⁺	0.500	0.654	0.507	0.570	0.525	0.609	0.544	0.722
Al ³⁺	0.130	0.067	0.048	0.102	0.128	0.067	0.083	0.035
V ³⁺	0.000	0.000	0.004	0.005	0.000	0.000	0.000	0.000
Fe ²⁺	1.765	1.535	2.036	1.469	1.462	1.443	1.722	1.833
Mg ²⁺	0.461	0.639	0.231	0.684	0.714	0.730	0.464	0.228
Mn ²⁺	0.010	0.006	0.047	0.003	0.003	0.003	0.028	0.031
Zn ²⁺	0.005	0.010	0.023	0.008	0.000	0.000	0.016	0.016
Suma Y	2.870	2.911	2.894	2.842	2.832	2.852	2.856	2.864
Ca ²⁺	0.044	0.043	0.015	0.062	0.050	0.044	0.020	0.005
Na ⁺	0.491	0.429	0.628	0.526	0.553	0.518	0.603	0.486
K ⁺	0.010	0.003	0.014	0.009	0.009	0.004	0.013	0.011
vak	0.455	0.526	0.343	0.403	0.388	0.433	0.365	0.498
Suma X	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
OH	3.885	3.912	3.654	3.906	3.847	3.890	3.759	3.738
F ⁻	0.109	0.087	0.346	0.090	0.153	0.110	0.241	0.262
Cl ⁻	0.006	0.000	0.000	0.004	0.000	0.000	0.000	0.000

*dopočteno na základě stechiometrie

← ←
↑**Obr. 3** Chemické složení vybraných minerálů: a-b - turmalín; c - kasiterit; d - columbit. Hodnoty jsou uvedeny v apfu.**Obr. 4** Typické minerály studovaných granitů v BSE: a - oscilačně zonální turmalín z lokality Mikulovice (GB27); b - sloupce turmalínů s železem bohatými okraji z lokality Výčapy (GB25); c - ferowodginít (Wodg) uzavřený v kasiteritu (Cst) z lokality Výčapy (GB25); d - columbit z lokality Klučov (NR).

← ←

Tabulka 4 Reprezentativní analýzy ferocolumbitu, manganocolumbitu a wodginitu

vzorek	Fcl				Mcl		Wodg	
	NR	NR	GB27	GB27	NR	GB25	GB34	GB34
WO ₃	3.15	4.16	4.21	3.01	0.60	5.94	4.04	6.76
Nb ₂ O ₅	32.43	62.05	61.92	53.81	63.28	14.53	16.51	20.96
Ta ₂ O ₅	44.26	10.46	12.18	20.87	14.74	49.50	48.93	41.33
ZrO ₂	0.12	0.14	0.10	0.13	0.02	0.73	0.43	0.68
SnO ₂	0.00	0.00	0.15	0.44	0.00	10.60	9.19	8.93
TiO ₂	0.96	1.99	2.12	2.21	0.73	2.85	5.51	5.53
Fe ₂ O ₃ *	2.14	1.27	0.00	0.00	1.38	3.55	2.62	3.45
Y ₂ O ₃	0.10	0.16	0.11	0.16	0.19	0.00	0.00	0.00
Sc ₂ O ₃	1.66	0.84	0.08	0.11	1.38	0.03	0.00	0.00
FeO	8.58	12.16	12.78	13.57	6.48	6.71	7.33	7.30
MnO	6.42	6.46	6.77	5.11	11.66	4.24	4.66	4.81
PbO	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.05	0.09	0.10
Suma	99.82	99.69	100.42	99.42	100.46	98.67	99.23	99.74
(apfu)								
W ⁶⁺	0.056	0.063	0.064	0.048	0.009	0.602	0.398	0.641
Nb ⁵⁺	0.999	1.652	1.654	1.503	1.684	2.571	2.834	3.467
Ta ⁵⁺	0.820	0.167	0.196	0.351	0.236	5.269	5.052	4.113
Zr ⁴⁺	0.004	0.004	0.003	0.004	0.001	0.139	0.079	0.122
Sn ⁴⁺	0.000	0.000	0.004	0.011	0.000	1.654	1.391	1.302
Ti ⁴⁺	0.049	0.088	0.094	0.103	0.032	0.839	1.573	1.521
Fe ³⁺	0.110	0.056	0.000	0.000	0.061	1.054	0.752	0.956
Y ³⁺	0.004	0.005	0.003	0.005	0.006	0.000	0.000	0.000
Sc ³⁺	0.099	0.043	0.004	0.006	0.071	0.010	0.000	0.000
Fe ²⁺	0.489	0.599	0.631	0.701	0.319	2.213	2.336	2.244
Mn ²⁺	0.371	0.322	0.339	0.267	0.581	1.406	1.500	1.492
Pb ²⁺	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.006	0.009	0.010
Suma kat.	3.001	2.999	2.992	2.999	3.000	15.764	15.923	15.867

*rozpočteno na základě stechiometrie

Tabulka 5 Reprezentativní analýzy zirkonu

vzorek	GB33	GB34	GB 27	NR	NR	NR
SiO ₂	32.33	31.69	31.91	31.36	31.41	30.90
ZrO ₂	64.58	62.32	63.89	56.98	56.48	57.22
HfO ₂	1.52	2.69	2.31	9.28	9.57	8.89
WO ₃	0.10	0.20	0.01	0.03	0.00	0.02
P ₂ O ₅	0.38	0.92	0.64	1.10	0.93	1.47
As ₂ O ₅	0.06	0.07	0.07	0.33	0.30	0.26
ThO ₂	0.04	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00
UO ₂	0.26	1.05	0.70	0.15	0.09	0.15
Y ₂ O ₃	0.37	0.41	0.37	0.00	0.00	0.00
Sc ₂ O ₃	0.08	0.53	0.26	1.16	0.93	1.32
Yb ₂ O ₃	0.14	0.23	0.11	0.00	0.00	0.00
FeO	0.34	0.13	0.22	0.03	0.06	0.08
Suma	100.20	100.26	100.49	100.42	99.77	100.31
(apfu)						
Si ⁴⁺	0.992	0.978	0.981	0.980	0.989	0.966
Zr ⁴⁺	0.966	0.938	0.958	0.868	0.867	0.872
Hf ⁴⁺	0.013	0.024	0.020	0.083	0.086	0.079
W ⁶⁺	0.001	0.002	0.000	0.000	0.000	0.000
P ⁵⁺	0.010	0.024	0.017	0.029	0.025	0.039
As ⁵⁺	0.001	0.001	0.001	0.005	0.005	0.004
Th ⁴⁺	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
U ⁴⁺	0.002	0.007	0.005	0.001	0.001	0.001
Y ³⁺	0.006	0.007	0.006	0.000	0.000	0.000
Sc ³⁺	0.002	0.014	0.007	0.032	0.026	0.036
Yb ³⁺	0.001	0.002	0.001	0.000	0.000	0.000
Fe ²⁺	0.009	0.003	0.006	0.001	0.002	0.002
suma kat.	2.004	2.000	2.002	2.000	2.000	1.999

kovit tvořit symplektické srůsty s křemenem (Horní Újezd). Biotit se svým chemickým složením blíží koncovému členu annitu ($X_{\text{Al}^{\text{IV}}} = 1.86 - 2.11$ apfu, $X_{\text{Fe}} = 0.95 - 0.10$). Ve vzorcích méně frakcionovaného granitu jsou však biotity zcela chloritizovány. Někdy je patrná zonálnost, přičemž okraje zrn jsou bohatší železem. Většinou tvoří tenké lupinky, které často srůstají s muskovitem, nebo jsou jím dokonce obrůstány. Vzácně se objevují oválná zrna zcela pinitizovaného cordieritu a jehlicovitý sillimanit.

Granity jsou vždy více či méně postiženy deformací, která se projevuje undulózním zhašením křemene, deformací muskovitu, rozlámáním živců a usměrněním a budinází sloupcovitých krystalů turmalínů. Mezery mezi jednotlivými segmenty sloupců turmalínu většinou vyplňuje křemen.

Z akcesorických minerálů se běžně setkáváme s ferowodginitem, kasiteritem, ferocolumbitem až manganocolumbitem, fluorapatitem, monazitem, xenotimem, zirkonem. Na lokalitě Klučov je také přítomen almandin-spessartinový granát a spinel o složení gahnit-hercynit. Jako inkluze v jiných minerálech (hlavně v turmalínu) se objevují ilmenit, rutil, uraninit, thorit, zirkon a xenotim (o velikosti 10 až 15 μm). Zrna zirkonu, kasiteritu a ferowodginitu (10 až 200 μm) jsou nejčastěji vázány na slidy.

Drobná zrna kasiteritu vykazují většinou nevýraznou oscilační zonálnost v některých zrnech jsou patrná jádra bohatá Fe, na jiných zase Fe bohaté okraje a v zónách se mění obsah Nb+Ta (0.01 - 0.15 apfu). Také chemické složení jednotlivých zrn (obr. 3c) se odlišuje v obsazích Fe (0.003 - 0.045 apfu).

V některých vzorcích byl nalezen ferowodginit ($X_{\text{Ta}} = 0.54 - 0.69$, $X_{\text{Mn}} = 0.30 - 0.36$). Ve vzorcích z lokalit Mikulovice (GB27, obr. 3d) a Klučov (NR, obr. 4d) se vyskytuje columbit ($X_{\text{Ta}} = 0.04 - 0.45$, $X_{\text{Mn}} = 0.22 - 0.67$). Na lokalitě Mikulovice jsou columbity příliš malé pro studium zonálnosti. Granity z lokality Klučov obsahují dva typy columbitu (tab. 4). První typ je relativně homogenní a tvoří zprohybané

lišty o velikosti do 0.5 mm. Jeho složení se vyznačuje nižším $X_{Ta} = 0.04 - 0.09$ a $X_{Mn} = 0.22 - 0.33$ s mírně zvýšeným obsahem TiO_2 (2.00 - 2.96 hm. %) ve srovnání s druhým typem, který je ve formě sloupečkovitých, silně nehomogenních a nepravidelně oscilačně zonálních krystalů (obr. 4d) o složení $X_{Ta} = 0.04 - 0.45$, $X_{Mn} = 0.22 - 0.67$. Obsah TiO_2 se v těchto zrnech pohybuje v rozmezí 0.73 - 2.4 hm. %. Obsah Sc dosahuje u prvního typu hodnot 0.03 - 0.04 apfu, zatímco u druhého, nehomogenního typu se pohybuje v rozmezí 0.03 - 0.18 apfu. První typ má v porovnání s druhým také mírně vyšší obsahy WO_3 (průměrně 4.11 hm. % vs. 2.06 hm. %). Ferowodginit vykazuje jednoduchou zonálnost a vyznačuje se relativně vysokými obsahy W (0.08 - 0.13 apfu). Jádra jsou lemována ferowodginitem (tab. 4) s vyšším obsahem Fe^{3+} . Zrna tohoto minerálu bývají často uzavírána v kasiteritu (obr. 4c), zatímco columbit se vyskytuje jako inkluze v živcích.

Pouze ve vzorcích z Klučova byl identifikován granát a gahnit. Granát je přítomen ve formě automorfních, relativně homogenních krystalů o velikosti do 0.1 mm. Střední část krystalů má složení $Alm_{49-57} Sps_{50-42}$, okraje jsou mírně bohatší o Mn se složením $Alm_{47-51} Sps_{50-53}$. Obsahy ostatních koncových členů jsou zanedbatelné. Granáty mají mírně zvýšený obsah P_2O_5 (0.18 - 0.34 hm. %).

Gahnit tvoří hypautomorfní až xenomorfní izometrická zrna o velikosti do 50 μm . Je homogenní a obsahuje kolem 52 mol. % gahnitové, 46 mol. % hercynitové a do 2 mol. % magnetitové komponenty.

Ilmenit se vyskytuje v asociaci s turmalínem většinou jako drobná zrna bez zřetelné zonálnosti. Chemické složení ilmenitů z jednotlivých těles se odlišuje obsahy Mn (0.20 - 0.36 apfu) a Zn (0.00 - 0.29 apfu). Rutil s proměnlivým zastoupením W, Nb a Ta ($W = 0.00 - 0.04$ apfu, $Nb + Ta = 0.02 - 0.22$ apfu) bývá uzavřený v živcích, turmalínu nebo ve ferowodginitu. Zirkon tvoří drobná automorfní zrna s proměnlivým obsahem HfO_2 (0.05 - 9.8 hm. %, tab. 5) a na lokalitě Klučov i s mírně zvýšeným obsahem Sc_2O_3 (do 1.32 hm. %) a P_2O_5 (do 1.48 hm. %). Vzácně se objevují nepravidelná zrna löllingitu. Xenomorfní a místy velmi hojně fluorapatity (tab. 6) bývají uzavírány v živcích, křemenu a muskovitu (30 až 500 μm) a jsou v některých případech (především lokalita Klučov) poměrně značně obohaceny o Mn (do 0.67 apfu) a zde také mírně obohaceny o Cl (do 0.2 apfu).

Diskuse

Studované granity nepatří mezi extrémně frakcionované granitoidy (Buriánek 2004). Metagranity z Příbyslavic (Povondra, Pivec 1987) obsahují většinou vyšší hodnoty Rb (421 - 757 ppm), Sn (50 - 2200 ppm) a nižší hodnoty Ba (1 - 46 ppm). Také variský granit typu Homolka (Brei-

Tabulka 6 Reprezentativní analýzy apatitu

vzorek	GB27	GB25	GB34	T5	NR	NR	NR
P_2O_5	40.87	40.16	41.82	41.69	40.32	39.65	40.15
SiO_2	0.00	0.00	0.05	0.03	0.02	0.01	0.02
CaO	55.04	52.05	54.27	55.83	50.17	47.36	47.46
Ce_2O_3	0.00	0.02	0.06	0.09	0.05	0.02	0.09
Y_2O_3	0.00	0.00	0.00	0.17	0.00	0.08	0.00
FeO	2.34	0.26	0.39	0.03	0.68	0.94	1.22
MnO	0.42	3.11	3.06	1.45	6.87	9.00	8.52
F	3.77	3.36	3.76	3.70	1.62	1.79	1.50
Cl	0.01	0.00	0.00	0.01	0.57	0.69	1.25
H_2O^*	0.00	0.13	0.01	0.04	0.83	0.69	0.70
Suma	102.45	99.09	103.42	103.04	101.13	100.23	100.91
O=F,Cl	1.59	1.41	1.58	1.56	0.81	0.91	0.91
Suma	100.86	97.68	101.84	101.48	100.32	99.32	100.00
(apfu)							
P^{5+}	2.927	2.959	2.956	2.950	2.932	2.931	2.947
Si^{4+}	0.000	0.000	0.004	0.003	0.002	0.001	0.002
Ca^{2+}	4.988	4.853	4.855	5.000	4.617	4.430	4.409
Ce^{3+}	0.000	0.001	0.002	0.003	0.002	0.001	0.003
Y^{3+}	0.000	0.000	0.000	0.008	0.000	0.004	0.000
Fe^{2+}	0.166	0.019	0.027	0.002	0.049	0.069	0.088
Mn^{2+}	0.030	0.229	0.216	0.103	0.500	0.666	0.626
Suma kat.	8.111	8.061	8.060	8.069	8.102	8.102	8.075
F	1.009	0.925	0.993	0.978	0.440	0.494	0.411
Cl	0.001	0.000	0.000	0.001	0.083	0.102	0.184
OH	0.000	0.075	0.007	0.020	0.477	0.404	0.405

*dopočteno na základě stechiometrie

ter, Scharbert 1995) je podstatně více frakcionovaný (Rb = 400 - 1500 ppm, Li = 250 - 700 ppm, Sn = 30 - 300 ppm). Přesto některé žíly studovaných granitů obsahují minerály typické pro vysoce frakcionované horniny (columbit, ferowodginit, kasiterit, spessartin, gahnit, Mn-fluorapatit). Rozdíly v chemickém a minerálním složení granitů ze studovaných lokalit v západní části třebíčského masivu můžeme v mnoha případech poměrně dobře vysvětlit odlišným stupněm frakcionace. Většina vzorků vykazuje zřetelné frakcionační trendy Rb/Sr (5 - 18), Ta/Nb (0.29 - 0.68), Zr/Hf (42 - 16). Některé analýzy se od tohoto trendu odlišují (obr. 2a-d) což naznačuje že během frakcionace mateřské taveniny docházelo k oddělení části taveniny, která se pak vyvíjela samostatně. Kontaminace taveniny materiálem z okolí nebyla prokázána.

Studované granity proráží durbachity třebíčského masivu. Geneticky však tyto taveniny patrně s durbachity třebíčského masivu nesouvisí. Primární tavenina byla generována parciálním tavením metapelitů (Buriánek 2004; Buriánek, Novák 2007). Vztah k vysoce frakcionovaným granitům moldanubického plutonu (typ Homolka) se prozatím nepodařilo prokázat. Granity typu Homolka jsou mladší než durbachity a obsahují ferocolumbit, kasiterit a Nb-Ta rutil (Breiter, Scharbert 1995). Tyto granity se však liší od studovaných granitů svým chemickým složením (např. vyšší obsahy P, Rb, F nebo výrazná Eu anomálie).

Columbit-tantalit, ferowodginit a kasiterit jsou minerály typické pro vysoce frakcionované pegmatity (Černý et al. 1985; Chudík et al. 2008; London 2005; Masau et al. 2000) nebo jsou vázány na topazové postkolizní granity (Kesraoui, Nedjari 2002; Breiter et al. 2007). Ve většině případů jde o mineralizaci vzniklou krystalizací z vysoce

frakcionované taveniny bohaté Li, Rb, B, Ta, Hf. Navíc velmi často hrála důležitou roli postmagmatická hydrotermální fluida (Kesraoui, Nedjari 2002). Naproti tomu popisovaná mineralizace je vázána na podstatně méně frakcionované horniny s nízkým obsahem Li a F (Buriánek 2004; Buriánek, Novák 2007). Vzárustající obsahem Fe v kasiteritu poměrně dobře koreluje se vzrůstajícím obsahem Nb a Ta (obr. 3c), což je typické pro kasiterit vzniklý magmatickou krystalizací (Tindle, Breaks 1998).

Výrazný vliv frakční krystalizace na vývoj granitové taveniny dokládají změny v chemickém složení turmalínu a biotitu. U těchto tmavých minerálů pozorujeme růst X_{Fe} směrem k okraji zrna. V turmalínech je chemické složení řízeno hlavně substitučními vektory $X_{Al}^{3+}Y_{Al_3}^{3+}W_{O_2}^{2-}X_{Na_1}^{+}Y_{R^{2+}}^{2+}Z_{OH}^{1-}$, $X_{Al}^{3+}Y_{Al}^{3+}X_{Na_1}^{+}Y_{R^{2+}}^{2+}$, Fe Mg₋₁. Obsahy F jsou nízké ale i přesto je v okrajových partiích turmalínu patrná substituce $X_{Na}^{+}Y_{R^{2+}}^{2+}W_{O_2}^{2-}X_{Al}^{3+}Y_{Al}^{3+}Z_{OH}^{1-}$. Zonalita turmalínů indikuje frakcionaci taveniny během růstu krystalů (Buriánek 2004; Buriánek, Novák 2007). Horniny s nižším stupněm frakcionace (GB 33) obsahují turmalín s méně výraznou zonálností než horniny intenzivněji geochemicky frakcionované (obr. 3a-b).

Studovaný granitový systém je bohatý železem a chudý hořčíkem (v granitech se poměr $FeO_{tot}/(MgO+FeO_{tot})$ pohybuje v rozmezí 0.83 - 0.89).

Některé vzorky jsou obohacené o Sn, W, Nb, Ta. Vzhledem k jednoduché mineralogii studovaných granitů jsou zvýšená zastoupení těchto prvků přímo závislá na obsahu akcesorických minerálů jako je kasiterit, ferowodginit, a columbit. V horninách s vysokým obsahem Ta a Sn se vedle sebe vyskytuje ferowodginit a kasiterit, přičemž ferowodginit je starší než kasiterit. Vzácně se společně s nimi vyskytuje rutil, ovšem jen jako inkluze v turmalínu nebo ve ferowodginitu. V ostatních horninách se vyskytuje buď kasiterit společně s ferocolumbitem nebo pouze kasiterit či columbit, případně mohou všechny tyto minerály chybět. Skutečnost, že se na jednom místě vyskytují žíly s minerální asociací kasiterit a columbit nebo ferowodginit a kasiterit může souviset zvýšenou aktivitou Sn a Ti nebo odlišnou fugacitou kyslíku v tavenině (Černý, Ercit 1989; Galliski et al. 2008). Obsahy Sn a Ti v obou typech žil jsou srovnatelné a proto je pravděpodobné, že žíly granitů obsahující ferowodginit krystalovaly za podmínek vyšší fugacity kyslíku. Wodginit totiž v porovnání s minerály skupiny columbit-tantalit obsahuje ve struktuře více trojmocného železa (Černý, Ercit 1989; Ercit et al. 1992).

Přítomnost inkluzí ilmenitu a rutilu v horninách s ferowodginitem dokazuje změny ve složení akcesorických minerálů během krystalizace. V prvních fázích krystalizace vznikal rutil nebo ilmenit a během pokračující frakcionace začal místo nich vznikat ferowodginit a ferocolumbit.

Oba minerály mají většinou relativně nízký poměr Mn/(Mn+Fe) a columbit navíc nízký poměr Ta/(Ta+Nb). V pegmatitech přitom obecně platí že tyto poměry rostou s narůstajícím stupněm frakcionace (Černý et al. 1989; Linnen, Keppler 1997; Van Lichtervelde et al. 2007). Pouze v columbitu z lokality Klučov jsou okrajové partie obohacené o Mn. (obr. 3d). Zajímavé jsou zde také zvýšené obsahy Sc a W (tab. 4). Obsah obou prvků v columbitech totiž roste se stupněm frakcionace granitové taveniny (např. Breiter et al. 2007). Zmíněná žíla tedy patrně patří mezi nejvýrazněji frakcionované granity ve studované oblasti. Tuto skutečnost dokládá také přítomnost Hf-bohatého zirkonu (9.8 hm. % HfO₂), Mn-bohatého fluorapatitu a úplná absence biotitu.

Závěr

Granitové žíly na jihozápadním okraji třebečského masivu jsou produktem krystalizace S-typové bórem bohaté granitové taveniny. Jejich minerální složení je poměrně jednoduché: křemen, draselný živec, kyselý plagioklas, turmalín, muskovit a většinou také biotit. V některých žilách se může objevit cordierit, sillimanit a granát. Jako akcesorické minerály se mohou vyskytnout ferowodginit, columbit, ilmenit, rutil, kasiterit, uraninit, thorit, fluorapatit, xenotim, monazit, zirkon a gahnit. Granity mají vysoký poměr FeO/MgO, což ovlivňuje chemické složení některých minerálů (turmalín, biotit).

Jednotlivé žíly vykazují různý stupeň geochemické frakcionace. Granity obsahují turmalíny, jejichž okraje se svým chemickým složením blíží skorylu a jádra mají spíše foititové složení. V geochemicky méně frakcionovaných vzorcích je přítomen turmalín s méně výraznou zonálností a s nižším poměrem X_{Fe} . Žíly s nejvyšším stupněm frakcionace obsahují atypické akcesorické minerály jako je columbit, ferowodginit a kasiterit. Zjištěná diverzita ve složení akcesorických minerálů je způsobena různými podmínkami během krystalizace (především fugacita kyslíku). Chemické složení granitů a jednotlivých minerálů dokazuje nižší stupeň geochemické frakcionace ve srovnání s jinými vysoce frakcionovanými peraluminickými granity v moldanubiku.

Poděkování

Autoři děkují P. Uherovi a J. Cempírkovi za kritické pročení rukopisu. Práce byla vypracována s finanční podporou projektu ČGS 390008 (Základní geologické mapování Brněnska v měřítku 1:25 000).

Literatura

- Boynton W. V. (1984): Cosmochemistry of the rare earth elements: meteorite studies. - In: Henderson P. E. (Ed.), Rare Earth Element Geochemistry, 63-114. Elsevier, Amsterdam.
- Breiter K., Scharbert S. (1995): The Homolka magmatic centre: An example of late Variscan ore-bearing magmatism in the Southbohemian Batholith (southern Bohemia, northern Austria). - *Jb. Geol. Bundesanst.* **138**, 9-25.
- Breiter K., Škoda R., Uher P. (2007): Nb-Ta-Ti-W-Sn-oxide minerals as indicators of a peraluminous P- and F-rich granitic system evolution. - Podlesí, Czech Republic. - *Mineral. Petrol.* **91**, 225-248.
- Buriánek D. (2004): Turmalinické granity moldanubika a saxothuringika - příklad využití turmalínu jako petrogenetického indikátoru. - MS, disertační práce, 1-256. PřF MU, Brno.
- Buriánek D., Novák M. (2007): Compositional evolution and substitutions in disseminated and nodular tourmaline from leucocratic granites: Examples from the Bohemian Massif, Czech Republic. - *Lithos* **95** (1-2), 148-164.
- Černý P., Meintzer R. E., Anderson A. J. (1985): Extreme fractionation in rare-element granitic pegmatites; selected examples of data and mechanisms. - *Can. Mineral.* **23** (3), 381-421.
- Černý P., Ercit T. S. (1989): Mineralogy of niobium and tantalum: crystal chemical relationships, paragenetic aspects and their economic implications. - In: Möller P., Saupé. F. (Ed.) Lanthanides, Tantalum and Niobi-

- um, 27-79, Springer-Verlag, Berlin, Germany.
- Černý P., Chapman R., Chackowsky L. E., Ercit T. S. (1989): A ferrotantalite-ferrotapiolite intergrowth from Spittal a.d. Drau, Carinthia, Austria. - *Mineral. Petrol.* **41** (1), 53-63.
- Ercit T. S., Černý P., Hawthorne F. C., McCammon C. A. (1992): The wodginite group. II. Crystal chemistry. - *Can. Mineral.* **30**, 613-631.
- Galliski M. A., Marquez-Zavalía M. F., Černý P., Martínez V. A., Chapman R. (2008): The Ta-Nb-Sn-Ti oxide-mineral paragenesis from La Viquita, a spodumene-bearing rare-element granitic pegmatite, San Luis, Argentina. - *Can. Mineral.* **46** (2), 379-393.
- Chudík P., Uher P., Kohút M., Bačík P. (2008): Accessory columbite to tantalite, tapiolite and zircon: products of extreme fractionation in highly peraluminous pegmatitic granite from the Povazsky Inovec Mountains, Western Carpathians, Slovakia. - *J. Geosci.* **53** (3-4), 323-334.
- Kesraoui M., Nedjari S. (2002): Contrasting evolution of low-P rare metal granites from two different terranes in the Hoggar area, Algeria. - *J. Afr. Earth Sci.* **34** (3-4), 247-257.
- Kretz R. (1983): Symbols for rock-forming minerals. - *Am. Mineral.* **68**, 277-279.
- Linnen R. L., Keppler H. (1997): Columbite solubility in granitic melts: consequences for the enrichment and fractionation of Nb and Ta in the Earth's crust. - *Contrib. Mineral. Petrol.* **128** (2-3), 213-227.
- London D. (2005): Granitic pegmatites: an assessment of current concepts and directions for the future. - *Lithos* **80** (1-4), 281-303.
- London D., Manning D. A. C. (1995): Chemical variation and significance of tourmaline from Southwest England. - *Econ. Geol.* **90** (3), 495-519.
- Masau M., Černý P., Chapman R. (2000): Exsolution of zirconian-hafnian wodginite from manganoan-tantalian Casiterite, Annie Claim #3 granitic pegmatite, southeastern Manitoba, Canada. - *Can. Mineral.* **38** (3), 685-694.
- Pelíšek A., Štěpánek P., Nehyba S., Opletal M., Skácelová D. (1999): Geologická mapa ČR 1 : 50 000, list 23 - 44 Moravské Budějovice. - ČGÚ, Praha.
- Pouchou J. L., Pichoir F. (1985): "PAP" (ρ - ρ -Z) procedure for improved quantitative microanalysis. - In: *Microbeam Analysis* (Armstrong J. T. Ed.). San Francisco Press, 104-106.
- Povondra P., Pivec E. (eds.) (1987): Příbyslavice peraluminous granite. - *Acta Univ. Carol., Geol.* **3**, 183-283.
- Tindle A. G., Breaks F. W. (1998): Oxide minerals of the Separation Rapids rare-element granitic pegmatite group, northwestern Ontario. - *Can. Mineral.* **36** (2), 609-635.
- Van Lichtervelde M., Salvi S., Beziat D., Linnen R. L. (2007): Textural features and chemical evolution in tantalum oxides: magmatic versus hydrothermal origins for Ta mineralization in the Lower Tanco pegmatite, Manitoba, Canada. - *Econ. Geol.* **102** (2), 257-276.
- Whitney D. L., Evans B. W. (2010): Abbreviations for names of rock-forming minerals. - *Am. Mineral.* **95** (1), 185-187.