TURMALINITY JIŽNÍ ČÁSTI SVRATECKÉHO KRYSTALINIKA

TOURMALINITES FROM THE SOUTHERN PART OF SVRATKA CRYSTALLINE COMPLEX

RENATA ČOPJAKOVÁ, DAVID BURIÁNEK, RADEK ŠKODA & STANISLAV HOUZAR

Abstract:

Čopjaková, R., Buriánek, D., Škoda, R., Houzar, S., 2007: Turmalinity jižní části svrateckého krystalinika. Acta Mus. Moraviae, Sci. geol., 92, 111-130.

Tourmalinites from the southern part of Svratka Crystalline Complex

Tourmalinites from the southern part of the Svratka Crystalline complex form stratiform layers hosted in mica schist. They probably represent a part of metamorphosed volcano-sedimentary complex primary rich in F and B. Whole rock composition of tourmalinites is close to the surrounding mica schists. P-T conditions 600-630 °C and 5-6 kbar calculated from associated mica schist were interpreted as retrograde metamorphism. Chemical composition of tourmaline strongly varies from high X-site vacant Al-rich schorl to dravite which indicate tourmaline growths over a range of P-T-X conditions. Tourmaline shows three distinct compositional domains (zone I, II, III): chemically inhomogeneous broken core (zone I), volumetrically minor zone II overgrown the core and volumetrically dominant outer zone III, chemically relatively homogeneous. Tourmaline type I correspond to Al-rich schorl with high vacancy and relatively low F (≤ 0.35 apfu) and it is interpreted as older, low temperature hydrothermal tourmaline. Tourmaline type II is dravite rich in F (≤ 0.5 apfu) and corresponds to prograde metamorphism. Tourmaline I overgrown by tourmaline II is usually enclosed in other minor minerals (kyanite, muscovite, biotite, garnet). Tourmaline III - Al-rich schorl-dravite formation probably occurred during retrograde metamorphism. Variability of all three tourmaline types is controlled mainly by the substitutions $^{X}_{\Box}^{Y}$ Al WOH $^{X}Na_{\perp}$ Y (Mg,Fe)_1 WF_1 and $^{Y}Fe^{Y}Mg_1$.

Key words: tourmalinite, schorl-dravite, boron, fluorine, metamorphism, mica schist, Svratka Crystalline Complex, Czech Republic.

Renata Čopjaková, Radek Škoda, Institute of Geological Sciences, Masaryk University and Czech Geological Survey, Kotlářská 2, 611 37 Brno, Czech Republic, e-mail: copjakova@sci.muni.cz, rskoda@sci.muni.cz

David Buriánek, Czech Geological Survey, Leitnerova 23, Brno, e-mail: Burianek@cgu.cz

Stanislav Houzar, Department of Mineralogy and Petrography, Moravian Museum, Zelný trh 6, 659 37 Brno, e-mail: shouzar@mzm.cz

1. Úvod

Horniny s podstatným zastoupením turmalínů skoryl-dravitové řady, označované většinou jako turmalinity (turmalínovce), tvoří ojedinělou součást metamorfovaných komplexů. V těchto komplexech představují horniny anomálně bohaté B, jejichž studium může mít význam nejen pro poznání režimu metamorfogenních a/nebo magmatických B-bohatých fluid, ale mohou sloužit i pro litostratigrafické korelace (SLACK *et al.* 1983, HENRY a DUTROW 1997).

Turmalinity jsou ve světě známé z řady metamorfovaných terénů a jejich vznik se vysvětluje několika základními způsoby:

- interakcí metapelitů s bórem bohatými hydrotermálními fluidy produkovanými magmatickými nebo metamorfními procesy (PLIMER 1988, SLACK et al. 1993);
- metamorfózou bórem bohatých exhalitů nebo evaporitů (ABRAHAM *et al.*, 1972, SLACK *et al.*, 1984, FRIMMEL a JIANG 2001);
- metamorfózou akumulací detritického turmalínu vzniklých v důsledku sedimentace klastického materiálu derivovaného z oblastí bohatých na turmalinické horniny, např. na bórem bohaté granity a greiseny (HENRY a DUTROW 1996, 1997).

Ve svrateckém krystaliniku zaznamenal lokality turmalinitů VESELÝ (1969), výsledky však nepublikoval. Přehledně je charakterizovali KEBRT *et al.* (1984), který obsah B pokládá za premetamorfní a turmalinity vzhledem k metamorfóze označuje za syngenetické, bez jakéhokoliv vztahu k turmalinickým metagranitům jižní části svrateckého krystalinika. Turmalinity, resp. turmalinické kvarcity této oblasti byly také předmětem geologického průzkumu na bóronosné suroviny, zahrnujícího hlavně jejich terénní revizi. Bylo zjištěno, že tvoří protáhlé až čočkovité ložní polohy ve svorech. Vystupují v pruhu, táhnoucím se od Litavy (na jihu) přes Pernštejn až k Lesoňovicím na vzdálenost 15 km, při mocnosti jednotlivých těles max. několik m (PAŠA a HRANÁČ *et al.* 1994). Podle podrobnějšího výzkumu chemické složení turmalínu z turmalinitů od Pernštejna odpovídá dravitu-skorylu, místy s většími vakancemi v X-pozici; mírně zvýšený je obsah F. Nebyl zjištěn významnější rozdíl mezi složením turmalínu z turmalinitu a turmalín-křemenných segregací, vzniklých za podmínek P >3-4 kbar a T >400-500 °C při hranici stability kyanit-andalusit (HOUZAR *et al.* 1997, 1998).

Geologická situace

Studovaná oblast je situovaná v jižní a střední části svrateckého krystalinika blízko hranice s okolními geologickými jednotkami (moldanubikum, moravikum a poličské krystalinikum). Oblast je budována převážně střídajícími se polohami svorů a svorových rul, migmatitů až metagranitů, místy s polohami Sn-F metagreisenů, vzácněji i mramorů, amfibolitů a ultrabazik (NEMEC 1979, 1986, MELKA *et al.* 1992, HOUZAR *et al.* 1997). Pro celou oblast je charakteristický hojný výskyt turmalínu (PERTOLDOVÁ 1986, NOVOTNÁ 1987). Turmalín tvoří izolovaná zrna ve svorech a rulách nebo je přítomen v migmatitech^{*}; je často koncentrován do poloh a nodulí. Turmalinity se vyskytují hlavně v jižní části krystalinika jako polohy v granát-muskovitických a muskovitických svorech.

Metamorfní vývoj svrateckého krystalinika můžeme rozdělit do několika fází (BURIÁ-NEK *et al.* 2006). Relikty nejstarší vysokotlaké a výšeteplotní metamorfózy (M1) (~ 12 kbar) jsou zachovány ve skarnech (PERTOLDOVÁ *et al.* 1998, BLAŽKOVÁ 2005). V jihovýchodní části svrateckého krystalinika byly vrcholné podmínky metamorfózy pro tyto horniny vypočteny PERTOLDOVOU (1986) na 600 °C a 6–9 kbar. Tato etapa patrně souvisí s exhumací hlubších částí orogenního kořene. Následná metamorfóza v PT podmínkách amfibolitové facie (M2) ve většině případů stopy starší metamorfózy setřela. Svory svrateckého krystalinika indikují nejméně dvě metamorfní etapy vývoje, což poměrně dobře souhlasí se závěry Pitry a Guirauda (1996). Produktem starší metamorfózy (M2) je synkinematická (D2) minerální asociace: Ms + Bt + Grt + Ky + St. Mladší minerální asociace je typická pro většinu metapelitů a má složení: Ms + Bt + Grt + Sil. Nově vzniklý sillimanit a slídy rostou podél mladší foliace (D3). PT podmínky vypočtené pro metamorfní fázi M3 se pohybují v rozmezí 580–650 °C a 6 kbar. Nově bylo zjištěno stáří této metamorfní etapy 330 ±8,3 Ma (BURIÁNEK *et al.* 2006) metodou CHIME (datování monazitu

^{*} termín migmatit je v této práci použit jako popisný termín na základě textury horniny (srv. BURIÁNEK et al. 2006). V případě jižní části svrateckého krystalinika zahrnuje i některé turmalinické metagranity včetně greisenových asociací (srv. např. NĚMEC 1979, MELKA et al. 1992)

metodou U/Pb pomocí elektronové mikrosondy). V nejmladší fázi vznikaly retrográdní chlority na úkor biotitu a granátu.

2. Metodika

Práce vychází z terénní revize lokalit ve svrateckém krystaliniku a při studiu byly využity i některé vzorky a nepublikované analýzy M. Nováka (Ústav geol. věd, PřF MU Brno). Analýzy minerálů byly provedeny na elektronové mikrosondě Cameca SX100 v Brně (Laboratoř elektronové mikroskopie a mikroanalýzy, Společné pracoviště Ústavu geologických věd PřF MU a České geologické služby) ve vlnově disperzním módu. Analýzy minerálů byly provedeny při urychlovacím napětí 15kV, proudu svazku 10 nA (turmalín, živce, slídy) a 20 nA (granáty), velikosti svazku 5 μ m (turmalín, živce, slídy) a <1 μ m (granáty). Použité standardy: Si, Al – sanidin, Mg – olivín, Fe – almandin, Ca – andradit, Mn – rhodonit, Ti – Ti-hornblend, Cr – chromit, Na – albit, K – ortoklas, P – apatit, F – topaz, Cl – vanadinit, Zn – gahnit, V – vanadinit, Cu–Cu, Y – YAG. Hlavní prvky byly načítány 10–20 s, stopové 30–50 s. Obsahy prvků byly přepočteny PAP korekcí (POUCHOU a PICHOIR 1985).

Turmalín má obecný vzorec XY₃Z₆T₆O₁₈(BO₃)₃V₃W. V následujícím přehledu jsou uvedeny hlavní prvky, které vstupují do jednotlivých pozic: X = Na, Ca, □, K; Y = Mg, Fe²⁺, Al, Fe³⁺, Li, Mn, Ti⁴⁺, Cr³⁺, Zn, V³⁺; Z = Al, Mg, Fe³⁺, Cr³⁺, V³⁺; T = Si, Al, B; B = B; V = OH, O; W = OH, F, O. Turmalíny byly přepočteny na 31 anionů, veškeré Fe bylo uvažováno jako Fe²⁺ a dopočten byl obsah OH + F = 4 a B = 3. Slídy byly přepočteny na 12 anionů, veškeré Fe bylo uvažováno jako Fe²⁺ a obsah vody byl dopočten OH + F + Cl = 2. Granáty byl přepočteny na 12 O, Fe²⁺ a Fe³⁺ byly rozpočteny podle stechiometrie (Si + B-pozice = 5). Zkratky minerálů byly použity podle KRETZE (1983).

Při výpočtech PT podmínek metamorfózy pro minerální asociace studovaných hornin byl použit program THERMOCALC 2.7. Aktivitní koeficienty byly vypočteny programem AX (HOLLAND and POWELL 1998). Nově byly analyzovány tři vzorky turmalinitů s jednoduchou minerální asociací turmalín a křemen (bez granátu, s vedlejším muskovitem a vzácně biotitem). Chemické analýzy hornin byly provedeny v laboratořích Acme Analytic Laboratories Ltd. ve Vancouveru v Kanadě metodou ISP-ES a ICP-MS. Horninové analýzy byly vyhodnoceny pomocí programu GCDkit (JANOUŠEK *et al.*, 2006).

3. Geologická pozice a petrografická charakteristika turmalinitů

Turmalinity tvoří nesouvislý pás táhnoucí se přibližně směrem S-J. Výskyty (obr. 1) jsou vázány hlavně mezi obcemi Pernštejn a Kozlov a pokračuje izolovanou lokalitou u obce Jimramov nedaleko hranice s poličským krystalinikem. Prozatím byl nalezen pouze jeden výskyt na hranici s moldanubikem u obce Rožná. Vzorky z většiny lokalit pochází ze suti ve svahovinách, vzácněji byly turmalinity nalezeny na výchozech (Rožná, Nedvědicesever, Ujčov). Na základě pozorování v terénu bylo zjištěno, že výskyty turmalinitů jsou tvořeny řadou drobných stratiformních poloh několik centimetrů až 1 metr mocných uvnitř svorů nebo svorových rul. Na lokalitě Ujčov byly polohy turmalinitu od okolního svoru oddělené polohami leukosomu. Nejmocnější polohy turmalinitů byly nalezeny v oblasti Pernštejna a Nedvědice. Směrem k severu se jejich mocnost a četnost výskytů snižuje. Přímý vztah k metagranitům a migmatitům nelze z terénních pozorování vyvodit, ale migmatity s turmalínem se vyskytují v blízkosti turmalinitů. Na lokalitách Ujčov a Kozlov byly svory s polohami turmalinitů v bezprostřední blízkosti výchozů metagranitů. Z pohledu litologické pozice turmalinitů je zajímavá i skutečnost, že všechny studované výskyty na východním okraji svrateckého krystalinika jsou prostorově svázané s nedvědickými mramory, vystupujícími v sekvenci metapelitů v jejich dnešním podloží.



Obr. 1. Schematická geologická mapa s vyznačenými místy odběrů studovaných vzorků.

Fig. 1. Schematic geological map with samples location.

Turmalinity mají jednoduchou minerální asociaci. Jsou tvořeny převážně přednostně uspořádaným černohnědým turmalínem a křemenem. Z vedlejších minerálů je přítomen zejména muskovit a granát, v některých vzorcích i biotit, kyanit, sillimanit, plagioklas a draselný živec. Živce jsou většinou vázány na drobné pegmatoidní čočky (Qtz + Kfs + Pl + Ms) společně s nimi se vyskytují segregace křemene s muskovitem, kyanitem a andalusitem (± Tur a Rt). Z akcesorií dominuje apatit, rutil a ilmenit, dále je vzácně přítomen zirkon a monazit. Minerální asociace v jednotlivých studovaných vzorcích je uvedena v tab. 1.

Polohy turmalinitů jsou obklopeny středně až hrubě zrnitými svory až svorovými rulami s výraznou foliací. Převážně se jedná o dvojslídné, méně též muskovitické svory, které běžně obsahují turmalín a granát. Jako akcesorický minerál se objevuje sillimanit a vzácně se spolu s ním vyskytuje kyanit nebo staurolit. Svorové ruly se od svorů odlišují vyšším obsahem plagioklasu a většinou absencí granátu. Lokálně obsahují křemenné pásky, čočkovité segregace (Qtz ± Ky, And, Ilm) a živcové pásky (leukosom) o mocnosti až několik cm. Leukosom, který na lokalitě Ujčov odděluje polohy turmalinitů od okolních svorů, je tvořen převážně křemenem a albitem, dále je zde přítomen biotit, turmalín, muskovit a ojediněle draselný živec, akcesoricky rutil a ilmenit.

Obr. 2. Turmalinity v BSE obraze; a) turmalíny z lokality Kozlov; b) turmalíny z lokality Kovářová; c) detail na turmalíny obsahující drobná reliktní jádra Rožná; d) turmalíny bez jader z lokality Rožná; e) velké zrno turmalínu s vyznačením jednotlivých zón I-III; f) Cedníkovitý granát uzavírající četná zrna křemene a turmalínu z lokality Nedvědice jih; g, h) zaoblená zrna turmalínu uzavřená v kyanitech, Nedvědice, jih.

Fig. 2. Turmalinites in BSE images; a) tourmaline from locality Kozlov; b) tourmaline from locality Kovářová; c) detailed photo of small relict cores in tourmaline from Rožná; d) tourmaline without cores from locality Rožná; e) large tourmaline with highlighted tourmaline zone I-III; f) garnet enclosing quartz and tourmaline from locality Nedvědice, South; g, h) rounded tourmaline grains enclosed in kyanite, Nedvědice, South.



číslo vz.	lokalita	hornina	minerální asociace
H172	Borovnice	svor	Qtz+Ms+Bt+Grt+Sill+Pl
DB333	Jimramov	turmalinit	Tu+Qtz+Grt+Bt+Ms
8TUb	Kozlov	turmalinit	Tu+Qtz+Ms+Bt+Grt+Ky+Pl
6TUa	Ujčov	turmalinit	Tu+Qtz+Bt
KovTU	Kovářová	turmalinit	Tu+Qtz+Grt+Ms+Bt
1TUc	Nedvědice sever	turmalinit	Tu+Qtz+Grt+Ms (Ms+Lim+Chl pseudomorf. po Grt)
1TUa	Nedvědice sever	svor	Qtz+Ms+Bt+Tu
1TUb	Nedvědice sever	svor	Qtz+Ms+Tu
5TUa	Nedvědice jih	turmalinit	Tu+Qtz+Grt+Bt+Ky+Sill
2TUc	Pernštejn	turmalinit	Tu+Qtz+Ms+Ky
2TUa	Pernštejn	svor	Qtz+Ms+Bt+Grt+Sill+Pl
2TUb	Pernštejn	svor	Qtz+Ms+Bt+Grt+Sill
RTU	Rožná	turmalinit	Tu+Qtz+Ms+Bt+Pl+Kfs

Tabulka 1. Seznam studovaných vzorků s uvedenou minerální asociací na jednotlivých lokalitách.Table 1.The list of studied samples with mineral assemblages for all localities.

4. Mineralogie a chemické složení turmalinitů

4.1. Turmalíny

Turmalín tvoří automorfně až hypautomorfně omezená zrna běžně uzavírána v granátu, biotitu, muskovitu i kyanitu. Turmalín v granátu a biotitu je omezen ostrou hranicí mezi turmalínem a uzavírajícím minerálem. Zrna uzavřená v kyanitu jsou zaoblená a hranice mezi turmalínem a okolním kyanitem je neostrá (obr. 2h).

V optickém mikroskopu i BSE obraze jsou v turmalínech patrná jádra s komplikovanou vnitřní stavbou. Jádra mají v optickém mikroskopu výrazný pleochroismus (E - světle zelenomodrá barva, O - tmavě modrošedá barva). Množství a velikost těchto jader je nejvyšší na severnějších lokalitách (Jimramov, Kozlov, Ujčov, Kovářová) (obr. 2a, b), směrem k jihu a západu (k hranici s moldanubikem) se jejich velikost zmenšuje a četnost klesá. Na lokalitě Pernštejn jsou sice ještě relativně hojná, avšak pouze drobnější; na lokalitě Rožná jsou již naprosto ojedinělá (obr. 2c, d). Jádra jsou xenomorfní, bez pravidelného omezení, hojně rozpraskaná a vyhojená mladším turmalínem, který jádra někdy zřetelně obrůstá. Tento typ turmalínu má slabý pleochroismus (E - světle okrová, O - světle zelenohnědá. Směrem k okraji jsou potom turmalíny výrazně pleochroické (E - světle hnědá až O - středně hnědá), s homogenní stavbou.

4.1.1. Chemické složení turmalínu

Obdobně jako v optickém mikroskopu můžeme i podle chemického složení rozlišit ve studovaných turmalínech tři zóny, které jsou patrné na všech studovaných lokalitách. Jádro (zóna I, modrošedý pleochroismus v optickém mikroskopu), lem jádra (zóna II, světle hnědý pleochroismus) a vnější zóna (III, hnědý pleochroismus). Drobné turmalíny tvořené skorylovým jádrem lemované dravitovým turmalínem (zóna I a II) tvoří hojné inkluze uzavírané převážně v kyanitech a granátech. Detailní foto turmalínu v BSE obraze s velkým jádrem a vyznačením jednotlivých zón I-III je znázorněno na obr. 2e. Reprezentativní složení turmalínu ze všech zón na jednotlivých lokalitách je uvedeno v tab. 2a veškeré analýzy jsou znázorněny v trojúhelníkových diagramech na obr. 3.

Turmalín – zóna I

Jádra turmalínu (zóna I) jsou chemicky značně nehomogenní, avšak bez jasného trendu ve vývoji zonálnosti. Detailní stavba velkého jádra je patrná z obr. 2e. Složení turmalínu v jádrech odpovídá Al-bohatému skorylu s vysokou vakancí v pozici X. Pozice Z je



Obr. 3. Chemické složení turmalínu z turmalinitů v trojúhelníkových diagramech Al-Al₅₀Mg₅₀-Al₅₀Fe₅₀ a vakance v pozici X-Na-Ca. Použité symboly: kolečka - zóna I, kosočtverce - zóna II, trojúhelníky - zóna III.

Fig. 3. Chemical composition of turmaline from tourmalinites plotter in triangular Al-Al₅₀Mg₅₀-Al₅₀Fe₅₀ a X-site vacancy-Na-Ca diagram. Used symbols: circle - zone I, rhombus - zone II, triangle - zone III.

Tahle 2	Cher	nical co	mnositic	in of to	urmalin.	e from t	ilemino	nites.	-3 Tim	ramov 4	4-6 Koz	1-7 Vol	s Hičov	9-11 k	Zovářové	10-13	Nedvě.	dice N	14-15	Vedvědi	Sec
	16-1	8 Pernšt	tejn, 19-	-21 Roži	ıá.											: : :					<u>.</u>
	1	2	3	4	5	9	7	8	6	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
	typ I	typ II	typ III	typ I t	typ II t	typ III t	yp I t	yp III t	yp I t	yp II t	yp III ty	vp I tr	yp III t	/pI t	yp III t	yp I t	yp II t	yp III t	yp I ty	/p II ty	'p III
SiO_2	36,04	37,36	36,16	35,09	37,77	37,08	34,55	36,73	35,59	37,19	36,42	35,22	36,67	35,98	36,94	35,52	36,01	36,23	36,35	37,36	36,54
TiO_2	0,70	0,46	0,64	0,49	0,22	0,84	0,70	0,81	0,88	0,54	0,81	0,88	0,53	0,56	0,59	0,38	0,47	0,64	0,07	0,13	0,67
Al_2O_3	33,05	32,11	32,25	31,57	31,60	31,91	35,11	31,37	33,55	32,99	33,58	33,98	32,83	32,46	32,44	35,67	32,86	33,48	32,53	33,25	32,64
Cr_2O_3	0,00	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,06	0,07	0,00	0,03	0,04	0,00	0,04	0,00	0,00	0,00
V_2O_3	na	na	na	0,09	0,00	0,07	0,00	0,10	0,05	0,04	0,04	0,10	0,05	0,00	0,06	0,05	0,04	0,09	0,00	0,00	0,00
FeO	10,93	8,61	14,08	9,62	4,53	6,44	10,92	7,07	12,48	7,26	7,78	10,31	7,98	13,77	9,08	9,40	7,88	8,52	11,07	4,88	6,18
MgO	4,13	6,05	2,14	5,79	8,93	7,28	2,78	7,15	2,19	6,44	5,39	3,37	5,54	1,78	5,45	3,58	6,08	5,10	3,44	7,49	7,06
MnO	0,00	0,00	0,10	0,06	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,04	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,05	0,00	0,00
CaO	0,64	0,19	0,08	2,59	0,05	0,34	0,53	0,37	0,30	0,06	0,48	0,85	0,32	0,04	0,13	0.52	0,33	0, 29	0,03	0,10	0,26
Na_2O	1,95	2,29	2,06	1,18	2,72	2,43	1,99	2,34	1,60	2,41	1,95	1,44	1,92	1,55	2,13	1,56	2,10	2,05	2,03	2,41	2,51
K_2O	0,03	0,04	0,04	0,04	0,03	0,02	0,04	0,00	0,03	0,03	0,05	0,05	0,05	0,06	0,13	0,05	0,06	0,05	0,00	0,00	0,04
ц	0.59	0,84	0,45	0,38	0,51	0,34	0, 14	0,37	00'0	0,16	0,13	0,15	0,27	0,21	0,47	0.50	0.94	0,76	0,31	0,50	0,45
G	na	na	na	0,00	00'0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02	0,00	0,00	0,00	00'0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
$B_2O_3 *$	10,60	10,70	10,46	10,46	10,75	10,70	10,52	10,60	10,46	10,76	10,67	10,50	10,60	10,35	10,66	10,65	10,57	10,63	10,41	10,74	10,66
$H_2O *$	3,38	3,29	3,40	3,42	3,46	3,53	3,56	3,48	3,61	3,64	3,62	3,55	3,53	3,47	3,45	3,44	3,20	3,31	3,44	3,47	3,46
0=CI	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0=F	-0,25	-0,35	-0,19	-0,16	-0,21	-0,14	-0,06	-0,16	0,00	-0,07	-0,05	-0,06	-0,11	-0,09	-0,20	-0,21	-0,40	-0,32	-0,13	-0,21	-0,19
Total	101,79	101,62	101,67	100,65	100,37	100,84	100,88	100,24	100,76	101,49	100,87 1	100,41	100,25	100,15	101,36	101,14	100,14	100,87	99,60	00,12	00,28

Tabulka 2. Chemické složení turmalínu z turmalinitů; 1-3 Jimramov, 4-6 Kozlov, 7-8 Ujčov, 9-11 Kovářová, 12-13 Nedvědice s., 14-15 Nedvědice j., 16-18 Pernštejn, 19-21 Rožná.

T site												•				•					
${f Si}^{4+}$	5,91	6,07	6,01	5,83	6,11	6,02	5,71	6,02	5,91	6,01	5,93	5,83	6,01	6,04	6,02	5,80	5,92	5,93	6,07	6,05	5,96
\mathbf{Al}^{3+}	0,09	0,00	0,00	0,17	0,00	0,00	0,28	0,00	0,09	0,00	0,07	0,17	0,00	0,00	0,00	0,20	0,08	0,08	0,00	0,00	0,04
Y Z site																					
$A1^{3+}$	6,29	6,15	6,32	6,01	6,02	6,11	6,56	6,06	6,48	6,28	6,38	6,46	6,34	6,42	6,24	6,66	6,29	6,38	6,40	6,34	6,23
${\rm Ti}^{4+}$	0,09	0,06	0,08	0,06	0,03	0,10	0,09	0,10	0,11	0,07	0,10	0,11	0,07	0,07	0,07	0,05	0,06	0,08	0,01	0,02	0,08
Cr^{3+}	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,00	0,00	0,01	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00
\mathbf{V}^{3+}	na	na	na	0,01	0,00	0,01	0,00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00
${\rm Fe}^{2+}$	1,50	1,17	1,96	1,34	0,61	0,87	1,51	0,97	1,73	0,98	1,06	1,43	1,09	1,93	1,24	1,28	1,08	1,17	1,55	0,66	0,84
${\rm Mg}^{2+}$	1,01	1,47	0,53	1,43	2,15	1,76	0,69	1,75	0,54	1,55	1,31	0,83	1,35	0,45	1,33	0,87	1,49	1,24	0,86	1,81	1,72
Mn^{2+}	0,00	0,00	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00
ΣY+Z X site	8,89	8,84	8,90	8,86	8,81	8,85	8,84	8,89	8,87	8,89	8,85	8,85	8,87	8,87	8,88	8,88	8,93	8,88	8,82	8,83	8,88
Ca^{2+}	0, 11	0,03	0,01	0,46	0,01	0,06	0,09	0,07	0,05	0,01	0,08	0,15	0,06	0,01	0,02	0,09	0,06	0,05	0,01	0,02	0,05
\mathbf{Na}^+	0,62	0,72	0,66	0,38	0,85	0,77	0,64	0,74	0,52	0,76	0,62	0,46	0,61	0,51	0,67	0,49	0,67	0,65	0,66	0,76	0,79
$\mathbf{K}^{\scriptscriptstyle +}$	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00	0,01	0,00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,03	0,01	0,01	0,01	0,00	0,00	0,01
vak	0,26	0,24	0,31	0,15	0,13	0,17	0,26	0, 19	0,43	0,23	0, 29	0,38	0,32	0,48	0,28	0,41	0,26	0, 29	0,34	0,23	0,15
-																					
₽	3,69	3,57	3,76	3,80	3,74	3,83	3,93	3,81	4,00	3,92	3,93	3,92	3,86	3,89	3,76	3,74	3,51	3,61	3,84	3,74	3,77
Ŀц	0,31	0,43	0,24	0,20	0,26	0,18	0,07	0, 19	0,00	0,08	0,07	0,08	0,14	0,11	0,24	0,26	0,49	0, 39	0,16	0,26	0,23
CL ⁻	na	na	na	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
\mathbf{B}^{3+}	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00
0^{2-}	30,69	30,57	30,76	30,80	30,74	30,83	30,93	30,81	31,00	30,92	30,93	30,92	30,86	30,89	30,76	30,74	30,51	30,61	30,84	30,74	30,77
catsum	18,63	18,67	18,59	18,71	18,79	18,70	18,59	18,72	18,45	18,67	18,56	18,47	18,56	18,44	18,63	18,47	18,67	18,59	18,55	18,65	18,72
ansum	31,00	31,00	31,00	31,00	31,00	31,00	31,00	31,00	31,00	31,00	31,00	31,00	31,00	31,00	31,00	31,00	31,00	31,00	31,00	31,00	31,00

Tabulka 2. Pokračování. Table 2. Continued. * dopočteno ze stechiometrie, veškeré Fe uvažováno jako FeO

Obsahy Cl, Zn, Cr, Mn, Cu a P byly ve všech tří zónách turmalínu obvykle pod mezí detekce elektronové mikrosondy

Contents of Cl, Zn, Cr, Mn, Cu and P were usually bellow the detection limit of electron microprobe in all three zones * calculated from stoichiometry, total Fe as FeO



Obr. 4. Jednoduché binární diagramy použité pro ověření substitucí. Ve všech grafech jsou použité hodnoty v apfu.

Fig. 4. Simple binary diagrams used for testing subtitutions. Values in apfu are presented.

plně obsazena Al. Hliník vstupuje částečně i do pozice Y, obvykle v rozmezí 0,21-0,66 apfu. Pouze v jednom z jader na lokalitě Kozlov, které bylo charakteristické vysokým obsahem Ca, byl obsah Al v pozici Y téměř nulový. Dominantním kationem v pozici Y je Fe. Obsah Fe je zde nejvyšší ze všech tří zón, kolísá v rozmezí 1,15-1,93 apfu a X_{Mg} ($X_{Mg} = Mg/Mg + Fe$) turma-línu v jádrech je 0,15-0,53. Obsah Ti je střední 0,3-1,0 hm. % (0,01-0,16 apfu). V pozici X dominuje obvykle Na, ale s významnou vakancí (obvykle 0,25-0,46 pfu). Obsah Ca v jádrech kolísá, často je mírně zvýšený 0,5-0,9 hm. % CaO (0,09-0,15 apfu), na lokalitě Kozlov v jednom jádře dosahuje obsah až 2,6 hm. % CaO (≤0,46 apfu). Obsahy F v Fe bohatých jádrech jsou ≤0,35 apfu, avšak v některých případech jsou až pod mezí detekce EMP.

Turmalín - zóna II

Turmalín odpovídající zóně II tvoří lem kolem jader s komplikovanou vnitřní stavbou a výplně prasklin v těchto jádrech. Tyto lemy zaujímají plošně nejmenší podíl v turmalínech (vyjma lokality Rožná, kde jádra téměř chybí) a zejména v jemnozrnných turmalínech jsou tyto zóny příliš úzké na to, aby se daly analyzovat pomocí EMP. Nejlépe jsou vyvinuty ve větších zrnech turmalínů, tedy v relativně hrubozrnnějších turmalinitech, zejména na lokalitách Kozlov, Jimramov a Rožná. Tato zóna turmalínu složením odpovídá dravitu. Ačkoli má nejnižší obsahy Al ze všech tří zón, stále má ve většině případů pozici Z plně obsazenou Al. V pozici Y dominuje Mg (1,29-2,15 apfu), přičemž X_{Mg} kolísá od 0,51 do 0,78, a vstupuje tam i malé množství Al ≤0,37 apfu. Obsah Ti je nízký, v průměru kolem 0,4 hm. % TiO_2 (0,05 apfu). V pozici X vždy dominuje Na a ze všech tří zón mají nejnižší vakanci (0,10-0,28 pfu) a nejnižší obsah Ca (obvykle do 0,3 hm. % CaO, 0,06 apfu). Tato zóna má v rámci každé lokality nejvyšší obsahy F (až do 0,5 apfu).

Turmalín - zóna III

Vnější zóny turmalínu jsou v rámci každé lokality tvořeny relativně homogen-

Tabulka 3. Chemické složení slíd z turmalinitů: 1 Jimramov, 2 Kozlov, 3 Nedvědice, 4 Pernštejn, 5 Rožná, 6 Jimramov, 7 Kozlov, 8 Nedvědice, 9 Rožná. Chemické složení slíd ze svorů: 10 Kozlov, 11-12 Nedvědice.

Table 3.	Chemical composition of mica from tourmalinites: 1 Jimramov, 2 Kozlov, 3 Nedvědice, 4 Pernštejn,
	5 Rožná, 6 Jimramov, 7 Kozlov, 8 Nedvědice, 9 Rožná. Chemical composition of mica from mica-
	schists: 10 Kozlov, 11-12 Nedvědice.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
	Ms	Ms	Ms	Ms	Ms	Bt	Bt	Bt	Bt	Ms	Ms	Bt
SiO ₂	47,36	46,45	46,48	46,81	46,48	35,43	35,36	35,24	35,22	46,81	47,12	35,19
TiO ₂	0,64	0,00	0,83	0,77	1,37	1,56	1,83	2,11	2,75	0,40	0,66	2,32
Al_2O_3	34,28	36,83	34,99	33,29	34,66	18,54	19,41	19,18	19,44	30,63	35,09	18,68
Cr_2O_3	0,00	0,00	0,05	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
FeO	2,01	0,88	1,64	1,45	1,02	26,30	21,95	24,27	19,36	4,32	0,77	21,60
MgO	0,88	0,42	0,75	1,38	0,84	4,82	8,16	6,04	8,39	1,08	0,97	7,58
MnO	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00	0,20	0,09	0,00	0,29	0,08	0,00	0,00
BaO	0,11	0,12	0,20	0,20	0,11	0,13	0,00	0,00	0,13	0,00	0,15	0,11
K_2O	9,68	8,56	9,31	9,93	9,66	8,81	8,91	8,84	9,42	10,65	9,67	9,27
Na ₂ O	0,79	1,95	1,10	0,79	0,79	0,18	0,36	0,41	0,27	0,38	0,77	0,27
F	1,24	0,19	0,34	1,28	0,44	1,69	0,51	0,64	0,74	2,36	1,54	1,41
Cl	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,04	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
$H_2O *$	3,94	4,46	4,36	3,87	4,30	3,04	3,69	3,59	3,58	3,26	3,80	3,21
O=Cl	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
O=F	-0,52	-0,08	-0,14	-0,54	-0,19	-0,71	-0,21	-0,27	-0,31	-0,99	-0,65	-0,59
lotal	100,44	99,78	99,90	99,24	99,48	100,09	100,06	100,09	99,28	98,98	99,90	99,05
Si^{4+}	3,13	3,06	3,09	3,14	3,09	2,76	2,69	2,71	2,69	3,20	3,12	2,72
Ti ⁴⁺	0,03	0,00	0,04	0,04	0,07	0,09	0,11	0,12	0,16	0,02	0,03	0,14
Al^{3+}	2,67	2,86	2,74	2,63	2,72	1,70	1,74	1,74	1,75	2,47	2,74	1,70
Cr^{3+}	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Fe^{2^+}	0,11	0,05	0,09	0,08	0,06	1,71	1,40	1,56	1,24	0,25	0,04	1,40
Mg^{2+}	0,09	0,04	0,07	0,14	0,08	0,56	0,93	0,69	0,95	0,11	0,10	0,87
Mn^{2^+}	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,00	0,02	0,01	0,00	0,00
Ba^{2+}	0,00	0,00	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
K^+	0,82	0,72	0,79	0,85	0,82	0,88	0,87	0,87	0,92	0,93	0,82	0,91
Na^+	0,10	0,25	0,14	0,10	0,10	0,03	0,05	0,06	0,04	0,05	0,10	0,04
F ⁻	0,26	0,04	0,07	0,27	0,09	0,42	0,12	0,16	0,18	0,51	0,32	0,34
Cl	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
H^+	1,74	1,96	1,93	1,73	1,91	1,58	1,88	1,84	1,82	1,49	1,68	1,66
O ²⁻	11,74	11,96	11,93	11,73	11,91	11,58	11,88	11,84	11,82	11,49	11,68	11,66
catsum	6,96	6,99	6,97	6,98	6,94	7,75	7,79	7,76	7,76	7,03	6,94	7,78
ansum	12,00	12,00	12,00	12,00	12,00	12,00	12,00	12,00	12,00	12,00	12,00	12,00

ním skoryl-dravitem (zóna III), avšak průměrné X_{Mg} je pro jednotlivé lokality dosti odlišné. Tato zóna je z pohledu modálního zastoupení nejdominantnější. Ve všech diagramech znázorňující chemické složení spadá složením mezi turmalíny zón I a II (obr. 3, 4). Pozice Z je ve velké většině analýz plně obsazena Al. Část Al vstupuje i do pozice Y v množství 0,00-0,45 apfu. V pozici Y obvykle Mg mírně převažuje nad Fe, X_{Mg} kolísá v rozmezí 0,44-0,71. Obsah Ti je střední a blízký obsahům v jádrech (0,18-0,91 hm. % TiO₂, 0,02-0,11 apfu). V pozici X vždy dominuje Na a je zde střední vakance (0,10-0,39 apfu). Obsah Ca je do 0,13 apfu. Obsahy F jsou střední 0,05-0,46 apfu. V rámci této zóny směrem k okraji zrn mírně klesá X_{Mg} a s rostoucím obsahem Fe klesá obsah Mg v téže pozici a roste vakance v pozici X na úkor Na.

4.1.2. Substituční trendy

Ačkoli chemické složení turmalínu kolísá v širokém rozmezí – převážně od Al bohatého skorylu až po dravit, jsou v rámci všech studovaných vzorků patrné shodné trendy společné pro všechny tři zóny turmalínu. Ve všech třech zónách turmalínu s klesajícím obsahem Al v pozici Y klesá vakance v pozici X a Fe v pozici Y, a zároveň roste Na v pozici X a Mg v pozici Y (obr. 4). Charakteristickým rysem turmalínu jsou zvýšené obsahy F v pozici W ($\leq 0, 5$ apfu), přičemž s rostoucím obsahem Fe obsah F klesá. Na všech lokalitách je tedy nejvyšší v částech těsně kolem jader (zóna II) a nejnižší v jádrech. Dále je nápadná negativní korelace mezi obsahem Fe a Mg v pozici Y (obr. 4). Významně se tedy v turmalínech uplatňují dva substituční vektory, substituce $X \square YA1^WOHXNa_{.1}$ $Y(Mg,Fe)_{.1} WF_{.1}$ a dále homovalentní substituce $YFe^YMg_{.1}$.

Pro turmalíny z většiny lokalit platí, že obsahy Ca jsou nejvyšší v jádrech, nejnižší u zóny II a mírně vyšší opět v zóně III. Někdy se jádra chovají odlišně (např. na lokalitě Jimramov), kde okraje zrn obsahují až 0,11–0,13 apfu Ca a středy pouze 0,01–0,02 apfu. V okrajových zónách je patrná pouze negativní korelace mezi obsahem Ca a Na. V jádrech obsah Ca pozitivně koreluje s obsahem Mg a negativně s obsahem Fe, Na a vakancí. U jednoho jádra z lokality Kozlov, kde byly obsahy Ca nápadně vysoké (\leq 0,47 apfu), je patrná ještě negativní korelace mezi obsahem Ca a ^YAl. Fungující substituční vektory se však vzhledem k poměrně nízkým obsahům Ca nepodařilo identifikovat.

Celkově lze shrnout, že mezi složením vnitřních jader a obou vnějších zón nejsou patrné významné odlišné trendy ve vývoji chemického složení a fungujících substitucí vyjma rozdílných substitučních mechanismů, při nichž se zabudovává Ca do struktury turmalínu zón I a III.

4.2. Slídy

Světlá slída z turmalinitů odpovídá muskovitu s relativně vysokým podílem paragonitové (NaAl₂ (Si₃Al)O₁₀(OH)₂, obvykle 10-26 %) a fengitové komponenty (8-23 %).



Obr. 5. Binární diagramy versus Mg + Fe and Na versus F pro světlé slídy. Plné kosočtverce – turmalinity, prázdné čtverce – svory.

Obr. 5. Binary diagrams Na versus Mg + Fe and Na versus F for white micas. Full rhombus - tourmalinites, open square - mica-schists.

Fengitové slídy představují isomorfní směs muskovitu KAl₂ (Si₃Al)O₁₀(OH)₂, ferro-aluminoceladonitu KAl (Fe, Mg)Si₄O₁₀(OH)₂, aluminoceladonitu KAl (Mg,Fe)Si₄O₁₀(OH)₂ a uplatňuje se v nich tedy tschermakitová substituce ^TAl^OAl^TSi-1^O(Fe,Mg)₋₁. Obsah F v muskovitech kolísá od 0,17 do 0,46 hm. % (do 0,27 apfu), přičemž v turmalinitech, v nichž jsou přítomné obě slídy (muskovit i biotit), jsou obsahy F v muskovitu vždy nižší než v asociujících biotitech. Obsah F pozitivně koreluje s obsahem fengitové komponenty a negativně s obsahem paragonitové komponenty (obr. 5). V rámci jednoho zrna jsou světlé slídy obvykle homogenní.



Obr. 6. Diagram znázorňující chemické složení granátu (Sps-Alm-Prp a Sps-Grs-Prp) z turmalinitů (A) a zonálnost zrn granátu ze dvou vybraných vzorků turmalinitů (B).

Fig. 6. Diagram showing chemical composition of garnets (Sps-Alm-Prp a Sps-Grs-Prp) from tourmalinites (A) and garnet zonation patterns from two selected samples tourmalinites (B).

Tabulka 4. Chemické složení granátu z turmalinitů: 1-2 Jimramov, 3-4 Kozlov, 5-6 Kovářová, 7-8 Nedvědice. Chemické složení granátu ze svorů: 9-11 Pernštejn.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
SiO ₂	36,54	36,47	36,65	36,83	36,67	36,87	36,80	36,46	36,54	36,74	36,77
TiO ₂	0,02	0,02	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,04	0,00	0,00	0,04
Al_2O_3	20,66	20,47	20,74	20,90	20,79	21,08	20,72	20,33	20,95	20,87	20,99
Cr ₂ O ₃	0,02	0,00	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Fe ₂ O ₃	0,34	0,69	1,02	0,68	0,52	0,09	0,68	0,71	0,09	0,30	0,37
FeO	36,72	37,77	36,63	36,51	38,12	38,15	39,95	40,49	38,51	37,83	37,19
MnO	3,17	1,36	0,69	0,92	0,43	0,29	0,20	0,30	1,41	0,78	0,47
MgO	0,93	1,21	3,63	3,50	2,51	2,68	2,25	1,49	1,84	2,59	3,14
CaO	1,95	2,23	0,85	0,98	0,74	0,82	0,41	0,37	0,59	0,66	0,92
Na ₂ O	0,02	0,00	0,02	0,00	0,07	0,00	0,00	0,02	0,02	0,00	0,00
P_2O_5	0,05	0,03	0,09	0,00	0,20	0,09	0,00	0,07	0,07	0,15	0,11
Y_2O_3	0,00	0,05	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00
Total	100,40	100,31	100,36	100,35	100,04	100,09	101,06	100,31	100,03	99,92	99,99
Si	2,98	2,98	2,95	2,97	2,97	2,98	2,98	2,98	2,98	2,98	2,97
Р	0,00	0,00	0,01	0,00	0,01	0,01	0,00	0,01	0,00	0,01	0,01
Ti	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
T site	2,99	2,98	2,96	2,97	2,99	2,99	2,98	2,99	2,98	2,99	2,98
Al	1,99	1,97	1,97	1,98	1,99	2,01	1,97	1,96	2,01	2,00	2,00
Cr	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Fe ³⁺	0,02	0,04	0,06	0,04	0,03	0,01	0,04	0,04	0,01	0,02	0,02
Ti	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Y	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
B site	2,01	2,01	2,03	2,02	2,02	2,02	2,02	2,01	2,02	2,01	2,02
Fe ²⁺	2,51	2,58	2,47	2,46	2,59	2,58	2,70	2,77	2,63	2,57	2,51
Mn	0,22	0,09	0,05	0,06	0,03	0,02	0,01	0,02	0,10	0,05	0,03
Mg	0,11	0,15	0,44	0,42	0,30	0,32	0,27	0,18	0,22	0,31	0,38
Ca	0,17	0,20	0,07	0,08	0,06	0,07	0,04	0,03	0,05	0,06	0,08
Na	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
A site	3,01	3,02	3,03	3,03	3,00	3,00	3,02	3,01	3,00	2,99	3,00
Almandine	83	85	81	81	87	86	89	92	88	86	84
Andradite	1	2	2	2	2	0	1	1	0	1	1
Grossular	5	4	0	1	1	2	0	0	1	1	2
Pyrope	4	5	15	14	10	11	9	6	7	11	13
Spessartine	7	3	2	2	1	1	0	1	3	2	1

 Table 4.
 Chemical composition of garnet from tourmalinites: 1-2 Jimramov, 3-4 Kozlov, 5-6 Kovářová, 7-8 Nedvědice. Chemical composition of garnet from mica-schists: 9-11 Pernštejn.

Based on 12 oxygens and with Fe2+/Fe3+ calculated assuming full site occupancy

Si + B-site 5

Obdobné chemické složení a substituční trendy vykazují i světlé slídy ze svorů asociujících s turmalinity (zatím byly studovány pouze dva vzorky). V těchto slídách byly obsahy F ještě vyšší než ve slídách z asociujících turmalinitů a dosahovaly hodnot 0,73–2,36 hm. %, což odpovídá 0,16–0,51 apfu F. Vyšší obsahy F souvisí i s vyšším podílem fengitové komponenty (15–36 %), což ve svrateckém krystaliniku zmiňuje již NĚMEC (1980); negativní je vztah k podílu paragonitové komponenty (6–22 %) (obr. 5).

Tmavá slída z turmalinitů i svorů spadá až na výjimky do pole annitu, poměr Mg/(Mg + Fe) kolísá v rozmezí 0,25-0,51. V rámci jednoho zrna je jejich složení obvykle homogenní. Obsah F v biotitech z turmalinitů je 0,40-0,75 hm. %, což odpovídá 0,10-0,18 apfu. V dvojslídném svoru z lokality Pernštejn byly jeho obsahy kolem 1,4 hm. % (0,34 apfu).

O = 12

4.3. Granáty

Granáty tvoří většinou izometrická zrna o velikosti až 2 cm. Velmi často mají charakter poikiloblastů až cedníkovitých granátů (obr. 2f) s četnými inkluzemi křemene a turmalínu a vzácně muskovitu, biotitu a plagioklasu. Všechny studované granáty vykazují výraznou převahu almandinové komponenty. Chemické složení granátu (obr. 6) z většiny lokalit je podobné (Alm₇₉₋₉₂ Prp₆₋₁₅ Sps₀₋₅ Grs₀₋₄ Adr₀₋₃), pouze u turmalinitu z nejsevernější lokality Jimramov se granáty poněkud odlišují (Alm₈₀₋₈₈ Sps₂₋₁₃ Prp₃₋₅ Grs₂₋₄ Adr₁₋₂). Granáty z jižní části krystalinika vykazují poměrně homogenní chemické složení bez výrazné zonálnosti, pouze na okrajích je zřetelný pokles Mg a Ca provázený nárůstem Mn a Fe/(Fe + Mg). Tato zonálnost je směrem k severu výraznější (nejlépe je vyvinuta na lokalitách Kozlov a Jimramov).

4.4. Chemické složení turmalinitů

Bylo studováno chemické složení turmalinitů z lokalit Rožná, Pernštejn a Nedvědice a svoru od Pernštejna. Avšak pouze u třech vzorků turmalinitů (vždy po jednom z každé lokality) a u vzorku svoru byly stanoveny kompletní stopové prvky včetně REE. Chemické složení turmalinitů vykazuje vysokou podobnost s chemismem okolního svoru, až na některé menší rozdíly (obr. 7). Chemické analýzy turmalinitů isou oproti chemickému složením svoru z Pernštejna nabohaceny o MgO (1,15-4,60 hm. %), Fe₂O₃ (2,05-12,87 hm.%) a většinou také o TiO₂ (0,10-2,03 hm.%) a Sn (3-37 ppm), naopak jsou ochuzeny o CaO (0,07-1,47 hm.%), Na₂O (0,03-2,19 hm.%) K₂O (0,00-2,32 hm.%), Ba (16-280 ppm), Sr (13-110 ppm) (obr. 7a). Křivky REE (Σ REE = 93-236 ppm) turmalinitů (obr. 7b) jsou charakterizovány zápornou Eu anomálií (Eu/Eu* = 0,4-0,6) plochou křivkou pro HREE ($Gd_N/Yb_N = 1,0-1,5$) a nabohacením na LREE ($Ce_N/Sm_N = 2,7-3,3$). Svor z lokality Pernštejn vykazuje oproti turmalinitům mírné nabohacení o HREE a vyšší Eu anomálii (Eu/Eu* = 0,2). Obsahy P₂O₃ (0,02-1,01 hm.%), Zr (21-780 ppm) a Y (10-150 ppm) jsou podobné jako obsahy těchto prvků ve svoru. Obsahy B a F vykazují poměrně široký rozptyl hodnot (6402-30464 a 1340-9600 ppm) přičemž platí, že současně s růstem obsahu B roste obsah F.

4.5. P-T podmínky metamorfózy

Svory z okolí obklopující turmalinity mají v celé oblasti podobnou minerální asociaci (Qtz + Ms + Bt \pm Pl \pm Grt \pm Sill \pm Ky \pm St \pm Tu). Téměř vždy platí, že svory s granátem





Fig. 7. Chemical composition tourmalinite: A) selected oxides and elements normalized by chemical composition of mica schists from Pernštejn, B) chondrite-normalized (BOYNTON, 1984) REE patterns from tourmalinites and mica schists.

obsahují jen vzácně plagioklas a naopak v horninách s vyšším obsahem plagioklasu bývá běžně obsažen turmalín, ale chybí granát. Studované svory obsahovaly granáty bez výrazné zonálnosti a inkluze uvnitř granátu byly tvořeny křemenem, proto byly prozatím vypočteny PT podmínky pouze z okrajů zrn granátu. PT podmínky ze svorů v jižní části krystalinika byly určeny pomocí programu THERMOCALC 2.7 na 625 ±43 °C a 5,3 ±1,8 kbar (Pernštejn), ve střední části krystalinika poskytly svory PT podmínky 598 ±27 °C a 5,7 ±1,2 kbar (Jimramov).

5. Diskuse

5.1. Vývoj turmalínu

Turmalín v turmalinitech ve srovnání s granátem vykazuje složitou zonálnost. Poměrně homogenní a podobné složení všech tří zón turmalínů na studovaných lokalitách naznačuje, že ve všech případech probíhaly v turmalinitech podobné procesy. Turmalín představuje nejstarší minerál v asociaci, v žádném ze vzorků nebyly v turmalínech pozorovány uzavřeniny jiného minerálu než křemene, naopak turmalín byl hojně uzavírán ve většině ostatních minerálů, v granátu, biotitu, muskovitu i kyanitu. Turmalín je tedy patrně z velké části produktem procesů, které proběhly před vznikem granátu. Tedy během vrcholných podmínek metamorfózy nebo dokonce během starší prográdní metamorfózy. Vysoké obsahy Al jsou charakteristické pro turmalín z Al-bohatých metapelitů koexistujících s kyanitem či andalusitem (HENRY a GUIDOTTI 1985). Turmalín v turmalinitech stejně tak jako v okolních metapelitech je nejhořečnatější minerál. Ve všech vzorcích, kde se vyskytují společně v asociaci turmalín a biotit, má vždy turmalín v srovnání s biotitem vyšší průměrné X_{Mg} . Variabilita X_{Mg} v turmalínu i biotitu na jednotlivých lokalitách je zřejmě odrazem poměru Mg/(Mg+Fe) v hornině.

Obsahy F v turmalínech, biotitech i muskovitech jsou vyšší než v běžných metapelitech z jiných světových lokalit, například TORRES-RUIZ *et al.* (2003) uvádějí pro turmalinity obsahy mezi 0,13–0,15 hm. % F a pro okolní metapelity 0,07–0,13 hm.% F. Zvýšené obsahy F jsou charakteristické pro turmalín, biotit i muskovit jak z turmalinitů, tak z turmalin-obsahujících svorů jižní části svrateckého krystalinika (NĚMEC 1979). Kolísání obsahu F v turmalínech může odrážet krystalostrukturní vlastnosti turmalínu či P-T-X vývoj hornin.

Hliníkem bohaté skoryly s vysokou vakancí a relativně nízkým obsahem F, často se zvýšenými obsahy Ca (zóna I) představují nejstarší turmalíny a jejich chemické složení je běžné např. pro nízkoteplotní hydrotermální turmalíny z křemen-turmalínových hornin vzniklých na oceánském dně (SLACK 1996). Nízké obsahy F v těchto skorylových jádrech lze vysvětlit nejspíše krystalochemicky, kdy do struktury turmalínů s vysokou vakancí nevstupuje ve větším množství F (HENRY a DUTROW 1996).

Naše pozorování nepotvrdilo, že by tato jádra mohla představovat metamorfované akumulace detritického turmalínu. Proti detritickému původu jader hovoří dva hlavní argumenty: (i) Plynulé trendy ve vývoji chemického složení turmalínu na každé lokalitě v rámci všech zón a stejná dominantní substituce uplatňující se v jádrech i vnějších zónách turmalínů na všech lokalitách. (ii) vysoké koncentrace detritických turmalínů jsou charakteristické pro ultrastabilní asociace těžkých minerálů, pro které je charakterická obvykle vedle turmalínu přítomnost zirkonu, monazitu a rutilu. Ovšem zirkon a monazit je v turmalinitech zcela ojedinělý a ani rutily, které tvoří xenomorfní zrna vmezeřená mezi ostatní silikáty, nevykazují detritický původ. Přítomnost jader s komplikovanou stavbou v turmalínech ukazuje na složitý multifázový vývoj těchto hornin.

Dravity bohaté F a Na a chudé vakancí (zóna II), které obrůstají nebo zatlačují skorylová jádra (zóna I), by mohly odrážet růst turmalínu během prográdní metamorfózy. Vysoké P-T podmínky stabilizují vysoké obsahy F a Na v turmalínech a rovněž vysoké X_{Mg} je typické pro turmalíny z metapelitů metamorfovaných v amfibolitové facii (GREW *et al.* 1990, HENRY a DUTROW 1996, 1997). Železem bohatá jádra (zóna I) lemovaná turmalíny s převahou dravitové složky (zóna II) jsou běžně uzavírány v kyanitech, musely tedy být v hornině přítomné před růstem kyanitu. Během této fáze prográdní metamorfózy patrně došlo i k parciálnímu tavení hornin svrateckého krystalinika a patrně krystalovaly i asociující peraluminické migmatity, resp. granity, které většinou také obsahují F-bohatý turmalín (NĚMEC 1979, MELKA *et al.* 1992, NOVÁK *et al.* 1998). Mohly tedy představovat další zdroj bórem a fluórem bohatých fluid.

Nižší P-T podmínky ~ 600-630 °C a 5-6 kbar vypočtené pro svory z jižní a střední části krystalinika jsou interpretované jako výsledek retrográdní metamorfózy, při níž ve svorech téměř zcela vymizel kyanit a staurolit a vznikla většina porfyroblastů granátu často v asociaci se sillimanitem. Granáty vykazují plochou difúzní zonálnost, která je charakteristická pro horniny metamorfované ve vyšší amfibolitové facii. Granát je pravděpodobně produktem reakce konzumující staurolit (St + Ms + Qtz = Grt + Sill + Bt + H₂O). Pozorovaná zonálnost indikuje, že granát rostl za podmínek snižujícího se tlaku a teploty (SPEAR *et al.*, 1995). Relativně homogenní vnější partie turmalínu z řady skoryl-dravit (zóna III), charakteristické mírným poklesem X_{Mg} a F směrem k okraji zrna, mohou představovat produkt růstu během retrográdní fáze metamorfózy doprovázené přínosem B bohatých fluid. Pokles obsahu F současně s Na naznačuje přítomnost substitučního vektoru $^{X}Na^{Y}R^{2+W}F X_{-1}^{Y}Al_{-1}WOH_{-1}$. Indikuje kolísání přínosu F do systému během metamorfózy, což může souviset s některými metamorfními reakcemi např. rozpadem staurolitu, kdy dochází k částečné konzumaci slíd.

Okraje turmalínů z lokality Jimramov mají relativně vysoké obsahy Ca (0,104–0,138 apfu). Také granát z této lokality vykazuje ve srovnání s granátem z ostatních turmalinitů poměrně vysoké obsahy Ca (0,12–0,17 apfu). Tato skutečnost může souviset s odlišným chováním fluid během metamorfózy. Jako zdroje Ca mohly patrně sloužit živce v okolních rulách, které byly během retrográdní metamorfózy postiženy deformací. Díky tomu se obnažila Ca bohatá jádra plagioklasů, která sloužila jako zdroj tohoto prvku pro růst granátu a okrajových zón turmalínu.

Vzhledem k významné migmatitizaci ve studované oblasti bylo zvažováno chování turmalínu během dehydratačního tavení. Složení leukosomu (křemen, albit, turmalín, biotit, muskovit) v okolí turmalinitu na lokalitě Ujčov, charakteristické nepřítomností draselného živce, hovoří proti vzniku taveniny dehydratačním tavením slíd. Přítomnost turmalínu v leukosomu ukazuje, že tavenina obsahovala zvýšené množství B. Turmalíny v leukosomu vykazují oscilační zonálnost. Původ B v tavenině lze vysvětlit dehydratačním tavením, jehož se účastnil turmalín. Blízko P-T podmínek, kdy dochází k dehydratačnímu tavení turmalínu se v turmalínech navíc významně uplatňuje vstup Ca do struktury turmalínu (KAWAKAMI 2001), který je zvýšený i v jádrech našich turmalínů. Tavení turmalínu a muskovitu v relativně ranných stádiích parciálního tavení metapelitů za podmínek 650-800 °C a 4-6 kbarů popsal KAWAKAMI a KOBAYASHI (2005). Rozpad turmalínu vede k uvolňování B do fluidní fáze a přítomnost B ve fluidní fázi snižuje teplotu solidu hornin (PICHAVANT 1981) a viskozitu vznikající taveniny (DINGWELL et al. 1992). Procesy migmatitizace v blízkosti turmalinitů byly však pozorovatelné pouze na lokalitě Ujčov a Rožná, avšak vývojové trendy ve složení turmalínu z turmalinitů na všech lokalitách isou podobné, což hovoří pro jejich stejnou genezi a tedy proti dehydratačnímu tavení turmalínu.

5.2. Turmalinity

Turmalinity ze studovaných lokalit mají podobné chemické složení a podobnou geologickou pozici. Odlišnosti v chemickém složení mezi svory a turmalinity dobře odráží mineralogické rozdíly mezi těmito horninami. Značná podobnost chemického složení včetně REE křivek turmalinitů a svoru hovoří pro obdobný protolit svorů i turmalinitů. Většina prvků odráží minerální změny, které provází přechod ze svorů až svorových rul k turmalinitům. Úbytek Ca, Na, K, Ba a Sr je možné poměrně dobře vysvětlit úbytkem slíd a živců, stejně tak jako nárůst Mg, Fe a Ti souvisí s rostoucím zastoupením turmalínu. Vysoké obsahy paragonitové komponenty v muskovitech odráží pravděpodobně chemické složení turmalinitů. Vzhledem k tomu, že slídy představují minerál vznikající či reekvilibrovaný během retrográdní fáze metamorfózy, čili ve středním stupni metamorfózy, nelze předpokládat, že vysoké obsahy paragonitové komponenty mohou souviset se vysokým tlakem během metamorfózy.

Infiltrace veškerého F a B bohatých fluid, derivovaných pouze z okolních těles migmatitů, je málo pravděpodobná, vzhledem k chybějícímu jasnému prostorovému vztahu těles turmalinitů a migmatitů a metagranitů. Na většině lokalit není možné prokázat závislost mezi migmatity a distribucí turmalínu nebo fluorovou anomálií ve svorech a svorových rulách (NEMEC 1979, 1980).

Pravděpodobnější se jeví varianta, že protolit turmalinitů a asociujících metapelitů představovaly sedimentární horniny již primárně bohaté B, příp. F a Fe (exhality), jak uvažuje již KEBRT *et al.* (1984). Litostratigraficky je výskyt turmalinitů poměrně dobře omezený na sekvenci v nadloží nedvědických mramorů. To rovněž svědčí pro názor, že turmalínem bohaté horniny mohly vzniknou současně se sedimentací, resp. diagenezí pelitů, které představovaly protolit pro okolní svory. Zda ojedinělá lokalita na okraji moldanubika – Rožná – reprezentuje poněkud výše metamorfovaný turmalinit (minimálně zachovalá Fezóna I), litostratigraficky náležející k samostatné sekvenci, nebo zda výskyt náleží ještě ke svrateckému krystaliniku, nelze bez možnosti studia kvalitního výchozu rozhodnout.

6. Závěry

Turmalinity jsou součástí metamorfovaného vulkanosedimentárního komplexu svrateckého krystalinika. Vystupují společně s metapelity, které jsou ve srovnání s průměrnou kontinentální kůrou relativně bohaté B, příp. i F. Turmalíny odpovídají fluorem bohatým skorylům až dravitům, lokálně se zvýšeným obsahem Ca a vakancí v pozici X. Chemická zonálnost turmalínů naznačuje jejich polyfázový vývoj. Během první metamorfní (předmetamorfní ?) etapy vznikla jádra některých turmalínových zrn. Další růst turmalínu byl produktem vrcholné metamorfózy a během retrogradní metamorfózy byl vývoj turmalínu dokončen. Litologická pozice turmalinitů, stejně jako jejich chemické složení a chemické složení minerálů, naznačují jejich předmetamorfní vznik. Jako nejpravděpodobnější se jeví scénář, podle kterého turmalinity vznikly reakcí relativně nízkoteplotních hydroterm s metapelity v původním sedimentačním bazénu.

Poděkování

Autoři děkují prof. Milanu Novákovi za kritické pročtení rukopisu a jazykové korekce abstraktu. Práce byla vypracována s finanční podporou projektu MŽP 6352: "Korelace litologicky kontrastních hornin v jednotkách krystalinika při sv. okraji moldanubika" a institucionálního záměru MK 00009482601.

LITERATURA

ABRAHAM, K., MIELKE, H., POVONDRA, P., 1972: On the enrichment of tourmaline in metamorphic sediments of the Arzberg Series, W. Germany (NE Bavaria). - *Neu. Jb. Mineral. Mh.* 5, 209-219.

BOYNTON, W. R. 1984. Cosmochemistry of the rare earth elements meteorite studies. In: Hendereson, P. (ed). Rare Earth Element Geochemistry, 63-114.

- BURIÁNEK, D., BŘÍZOVÁ, E., ČECH, S., ČURDA, J., FÜRYCH, V., HANŽL, P., KIRCHNER, K., LYSENKO, V., ROŠTÍNSKÝ, P., RÝDA, K., SKÁCELOVÁ, D., SKÁCELOVÁ, Z., VERNER, K., VÍT, J., 2006: Vysvětlivky k základní geologické mapě ČR 1 : 25 000 24-112 Jedlová. – MS, Výzkumná zpráva, MS MŽP, Archiv ČGS, 89 s..
- DINGWELL, D. B., KNOCHE, R., WEBB, S. L., PICHAVANT, M., 1992: The effect of B₂O₃ on the viscosity of haplogranitic liquids. - Amer. Mineralogist, 77, 457-461.
- FRIMMEL, H. E., JIANG, S.-Y., 2001: Marine evaporites from an oceanic island in the Neoproterozoic Adamastor ocean. - Precam. Res., 105, 57-71.
- GREW, E. S., CHERNOSKY, J. V., WERDING, G., ABRAHAM, K., MARQUEZ, N., HINTHORNE, N. J., 1990: Chemistry of kornerupine and associated minerals, a wet chemical, ion microprobe, and X-ray study emphasizing Li, Be, B and F contents. - J. Petrol. 31, 1025-1070.
- HOLLAND, T. J. B., POWELL, R., 1998: An internally consistent thermodynamic data set for phases of petrological interest. - J. Metamorph. Geol., 16, 309-343.
- HENRY, D. J., DUTROW, B. L., 1996. Metamorphic tourmaline and its petrologic applications. in Grew, E., Anovitz, L., (eds.): Boron: Mineralogy, Petrology, and Geochemistry in the Earth's Crust. - *Reviews in Mine*ralogy, 33, 503-557.
- HENRY, D. J., DUTROW, B. L., 1997: Tourmaline in sedimentary and metamorphic rocks. Inter. Symp. "Tourmaline 1997", Abstract, 36-37.
- HENRY. D., GUIDOTTI, V. Ch., 1985: Tourmaline as a petrogenetic indicator mineral: an example from the staurolite-grade metapelites of NW Maine. - Amer. Mineralogist, 70, 1-15.
- HOUZAR, S., NOVÁK, M., SELWAY, J. B., 1997. Pernštejn near Nedvědice Metamorphosed tourmalinites in mica schists. Tourmaline minerals: dravite, schorl. – Inter. Symp. "Tourmaline 1997", Field Trip Guidebook, 71–83.
- HOUZAR, S., NOVÁK, M., SELWAY, J. B., 1998. Compositional variation in tourmaline from tourmalinite and quartz segregations at Pernštejn near Nedvědice (Svratka Unit, western Moravia, Czech Republic). – J. Czech Geol. Soc., 43, 1–2, 53–58.
- JANOUŠEK, V., FARROW, C. M. & ERBAN, V., 2006. Interpretation of whole-rock geochemical data in igneous geochemistry: introducing Geochemical Data Toolkit (GCDkit). - J. Petrology, 47, 1255-1259.
- KAWAKAMI, T., 2001: Boron depletion controlled by the breakdown of turmaline in the migmatite zone of the Aoyama Area, Ryoke metamorphic belt, Southwestern Japan. - Canad. Mineralogist, 39, 1529-1546.
- KAWAKAMI, T., KOBAYASHI, T., 2006: Trace element composition and degree of partial melting of pelitic migmatites from the Aoyama Area, Ryoke metamorphic belt, SW Japan: Implications for the source region of tourmaline leucogranites. - Gondwana Research, 9, 1-2, 176-188.
- KEBRT, M., LHOTSKÝ, P., PERTOLD, Z., ADAM, J., 1984: Turmalinity a turmalinické kvarcity v krystaliniku Českého masivu. – Sbor. "Korelace proterozoic. paleozoic. stratiformních ložisek", 85–101, ÚÚG a GÚ UK Praha.
- Kretz, R., 1983: Symbols for rock-forming minerals. Amer. Mineralogist, 68, 277-279.
- Melka, R., Schulmann, K., Schulmannová, B., Hrouda, F., LOBKOWICZ, M., 1992: The evolution of perpendicular linear fabrics in synkinematically emplaced tourmaline granite (central Moravia-Bohemian Massif). J. struct. Geol., 14, 5, 605–620.
- NEMEC, D., 1979: Zinnbringende Orthogneise im Süden der Antiklinale von Svratka (nordwestlich Brno) und ihre Erzmineralisierung. - Z. geol. Wiss., 12, 1437-1447.
- NEMEC, D., 1980: Fluorine phengites from tin-bearing orthogneisses of the Bohemian-Moravian Heights, Czechoslovakia. - Neu. Jb. Mineral., Abh., 139, 155-169.
- NEMEC, D., 1986: Distinction of reionally metamorphosed greisens from metapelitic mica schists. Geol. Rdsch., 75, 3, 685-692.
- NOVÁK, M., SELWAY, J. B., HOUZAR, S., 1998: Potassium-bearing, fluorine-rich tourmaline from metamorphosed fluorite layer in leucocratic orthogneiss at Nedvědice, Svratka Unit, western Moravia. – J. Czech Geol. Soc., 43, 1–2, 37–44.
- NOVOTNÁ, B., 1987: Petrostrukturní analýza metamorfovaných hornin v okolí skarnového tělesa u Věchnova. *MS*, Dipl. práce, PřF UK. Praha.
- PÁŠA, J., HRANÁČ, P. et al., 1994: Turmalínové horniny Závěrečná zpráva úkolu 29 90 2301, MS, Geomin Jihlava, 72 p.
- PERTOLDOVÁ, J., 1986: Podmínky vzniku skarnů na ložiskách Pernštejn, Županovice a Nové Město pod Smrkem.
 MS, Kandidátská disertační práce, PřF UK, Praha, 86 p.
- PERTOLDOVÁ, J., PERTOLD, Z., PUDILOVÁ, M., 1998: Metamorphic Development of Skarns at Pernštejn, Svratka Crystalline Complex, Bohemian Massif. - J. Czech geol. Soc., 43, 3:191-202.
- PICHAVANT, M., 1981: An experimental study of the effect of boron on a water saturated haplogranite at 1 kbar vapour pressure. - Contrib. Mineral. Petrology, 76, 430-439.

- PLIMER, I. R., 1988: Tourmalinites Associated with Australian Proterozoic Submarine Exhalative Ores. In Friedrich, G. H., Herzig, P. M. (eds): Base Metal Sulphide Deposits, 255-283.
- POUCHOU, J. L., PICHOIR, F., 1985: "PAP" procedure for improved quantitative microanalysis. Microbeam Analysis, 20, 104-105.
- SLACK, J. F., HERRIMAN, N., BARNES, R.G., PLIMER, I. R., 1984. Stratiform tourmalinites in metamorphic terranes and their geologic significance. - *Geology*, 12, 713-716.
- SLACK, J. F., PALMER, M. R., STEVENS, B. P. J., BARNES, R. G., 1993. Origin and significance of tourmaline-rich rocks in the Broken Hill district, Australia. - *Econ. Geol.* 88, 505-541.
- SLACK, J. F., 1996. Tourmaline associations with hydrothermal ore deposits. In: Grew, E. S. and Anovitz, L. M. (eds). Boron: Mineralogy, Petrology and Geochemistry. - MSA Reviews in Mineralogy, 33, 559-644.
- SPEAR, F. S., KOHN, M. J., PAETZOLD, S., 1995: Petrology of the regional sillimanite zone, west-central New Hampshire, U.S.A. with implications for the development of inverted isograds. - Amer. Mineralogist, 80, 361-376.
- TORRES-RUIZ, J., PESQUERA, A., GIL-CRESPO, P. P. and VELILLA, N., 2003. Origin and petrogenetic implication of tourmaline-rich rocks in the Sierra Nevada (Betic Cordillera, southeastern Spain). - Chem. Geol., 197, 55-86.
- VESELÝ, J., 1969: Závěrečná zpráva úkolu č. 512 115 020 Svratecká antiklinála. MS, Geoindustria n. p. Praha.