

## TURMALÍNY ZE SVORŮ SVRATECKÉHO KRYSTALINIKA

TOURMALINE FROM THE MICA SCHIST OF THE SVRATKA CRYSTALLINE COMPLEX

DAVID BURIÁNEK, RENATA ČOPJAKOVÁ

### *Abstract*

Buriánek, D., Čopjaková, R., 2008: Turmalíny ze svorů svrateckého krystalinika. *Acta Mus. Moraviae, Sci. geol.*, 93, 61-79.

### *Tourmaline from the mica schist of the Svatka Crystalline Complex*

Tourmaline is a typical accessory mineral for most of micaschists in the Svatka Crystalline Complex. Based on petrographic and chemical data, two main generations of tourmaline have been distinguished. The first generation (tourmaline cores) corresponds to the prograde metamorphic event characterised by mineral assemblage Ms+Bt+Tu±Ky±St. The second generation of tourmaline (tourmaline rims) formed during exhumation of the Svatka Crystalline Complex, simultaneously with decompression breakdown of staurolite. Microprobe analyses of tourmalines reveal a compositional variation between Al-rich schorl-dravite to dravite ( $X_{Fe}$  0.22-0.61; Al 5.88-6.77 apfu; Na 0.45-0.91 apfu). Tourmaline rims are typically enriched in Fe, usually enriched in Al and depleted in Mg, Na, Si relative to tourmaline cores.

*Key words:* tourmaline, schorl-dravite, boron, metamorphism, mica schist, Svatka Crystalline Complex, Czech Republic.

David Buriánek, Czech Geological Survey, Leitnerova 23, Brno, e-mail: david.burianek@geology.cz

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

## 1. Úvod

Svratecké krystalinikum je budováno hlavně svory, rulami, migmatity a metagranity, vzácně jsou přítomna drobná tělesa skarnů, amfibolitů a mramorů. Pro celou oblast je charakteristický hojný výskyt turmalínu (PERTOLDOVÁ 1986, NOVOTNÁ 1987). Turmalín je běžný minerál migmatitů, metagranitů, různých typů svorů až rul a turmalinitů, které tvoří stratiformní polohy různé mocnosti (1 cm - 1 m) v okolních svorech až svorových rulách. V minulosti byly turmalíny ze staurolitických svorů studovány například HENRYM a GUIDOTTIM (1985). Podle zmíněných autorů můžeme v turmalínech z těchto hornin nalézt zonálnosti, které souvisí s progradní metamorfózou v amfibolitové facii. Avšak zonálnosti jsou často nepravidelné a mnohé turmalíny žádnou zonálnost nemají, případně obsahují starší detritická jádra. Protože turmalín nepatří mezi minerály, které se účastní běžných metamorfických reakcí a je stabilní ve velmi širokém rozsahu metamorfických podmínek (HENRY a DUTROW 1996), je poměrně složité interpretovat jeho zonálnost. Růst turmalínu během metamorfózy není v mnoha ohledech dořešen. Svratecké krystalinikum představuje vhodné místo pro studium chování turmalínu za podmínek metamorfózy při horní hranici stability staurolitu v metapelitech za středních tlaků (kolem 600 °C a 5-7 kbar). Studium turmalínu z těchto svorů může přispět k upřesnění jejich metamorfního vývoje.

## 2. Metodika

Analýzy minerálů byly provedeny na elektronové mikrosondě Cameca SX-100 (Laboratoř elektronové mikroskopie a mikroanalýzy, Ústav geologických věd PřF MU a Česká geologická služba). Měření probíhalo ve vlnově disperzním módu za následujících analytických podmínek: urychlovací napětí 15 kV; průměr elektronového svazku <1 μm pro granát, 5 μm pro turmalín a slidy; proud svazku 10 nA pro turmalín a slidy a 20 nA pro granát; načítací čas 10–20 s pro hlavní prvky, 20–60 s pro stopové prvky; operátor R. Čopjaková. Byly použity tyto standardy: Si, Al – sanidín, Mg – olivín, Fe – almandín, 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. Obsahy prvků byly přepočteny PAP korekcí (POUCHOU a PICHOU 1985).

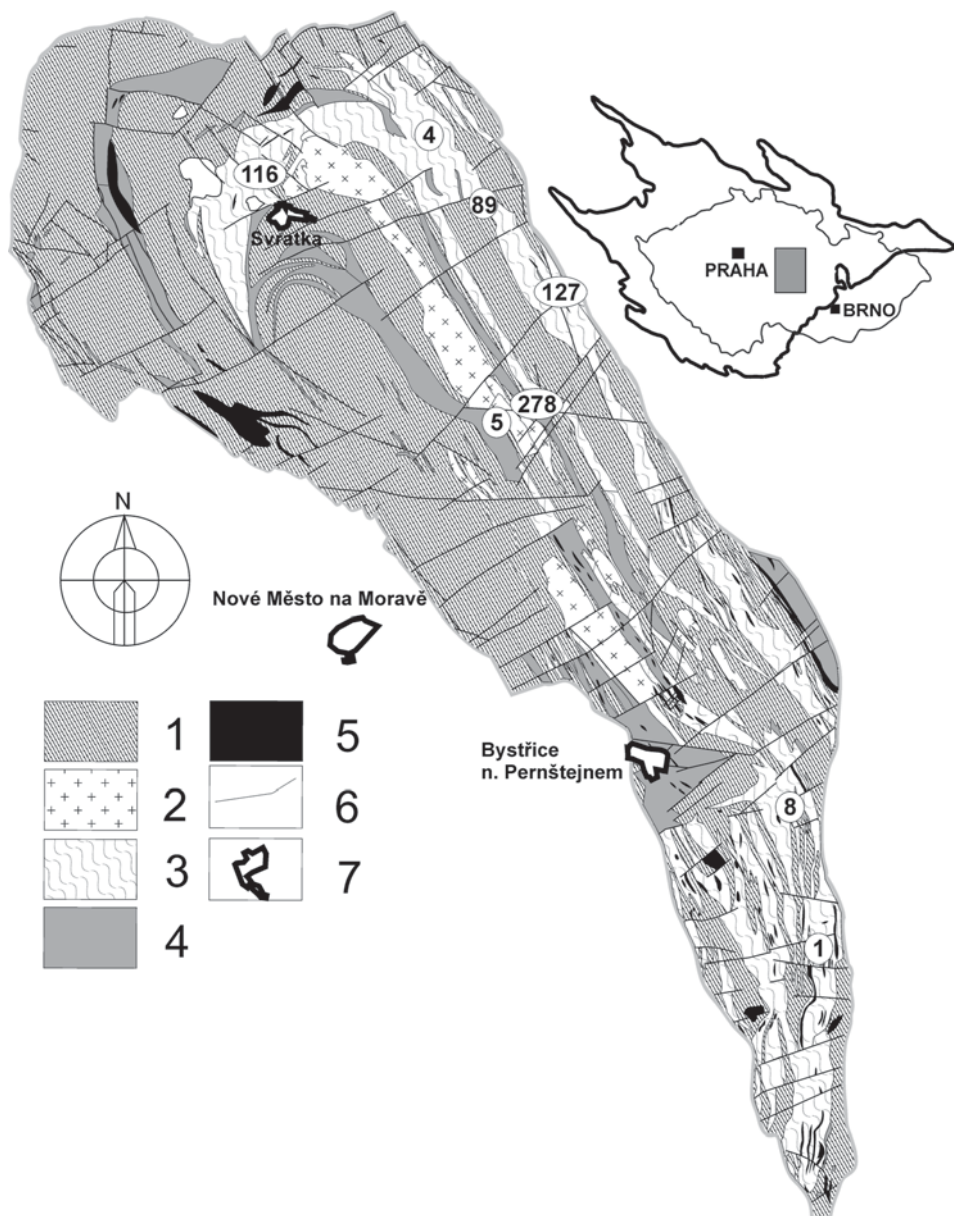
Turmalín má obecný vzorec  $XY_3Z_6T_6O_{18}(BO_3)_3V_3W$ . V následujícím přehledu jsou uvedeny hlavní prvky, které vstupují do jednotlivých pozic: X = Na, Ca, □, K; Y = Mg, Fe<sup>2+</sup>, Al, Fe<sup>3+</sup>, Li, Mn, Ti<sup>4+</sup>, Cr<sup>3+</sup>, Zn, V<sup>3+</sup>; Z = Al, Mg, Fe<sup>3+</sup>, Cr<sup>3+</sup>, V<sup>3+</sup>; T = Si, Al, B; B = B; V = OH, O; W = OH, F, O. Turmalíny byly přepočteny na 31 anionů, veškeré Fe bylo uvažováno jako Fe<sup>2+</sup> a dopočten byl obsah OH+F = 4 a B = 3. Krystalochemické vzorce slíd jsou vypočteny na 20O+4(OH+F). Granáty byly přepočteny na 12O, Fe<sup>2+</sup> a Fe<sup>3+</sup> bylo rozpočteno na základě stechiometrie (Si+B-pozice = 5). Použité zkratky minerálů jsou podle KRETZE (1983). V textu jsou dále používány zkratky pro minerály  $X_{Fe} = Fe/(Fe+Mg)$  a pro horniny  $X_{FeO} = FeO/(FeO+MgO)$ . Větší část horninových analýz byla provedena metodou ICP-MS v laboratořích Acme Analytic Laboratories Ltd., Vancouver, Kanada. Do souboru geochemických dat byly zahrnuty vzorky svorů, které byly shromážděny během projektu č. 6352 a 6438 a navazujících mapovacích prací D. Buriánka a P. Hanzla.

Při výpočtech vrcholných PT podmínek metamorfózy pro minerální asociace studovaných hornin byl použit program THERMOCALC 2.7. Aktivitní koeficienty byly vypočteny programem AX (HOLLAND a POWELL 1998).

## 3. Geologická charakteristika a metamorfní vývoj svrateckého krystalinika

Svratecké krystalinikum je součástí kutnohorsko-svratecké oblasti. Svratecké krystalinikum (obr. 1) můžeme charakterizovat jako střídání hornin vulkano-sedimentárního komplexu zřejmě proterozoického stáří s migmatity a metagranity kambro-ordovického stáří (SCHULMANN *et al.*, 2005). Vulkanosedimentární komplex je tvořen hlavně svory až svorovými rulami s drobnými tělesy erlánů, skarnů, mramorů, kvarcitů, turmalinitů a amfibolitů. Většina hornin tvoří v geologické mapě pruhy převážně orientované ve směru SZ–JV. V tektonickém podloží svrateckého krystalinika leží strážecké moldanubikum a v tektonickém nadloží jsou horniny poličského krystalinika (bohemikum).

Variská orogeneze se ve svrateckém krystaliniku projevila naloženou metamorfózou a deformací. Během ní patrně došlo i ke sblížení krystalinika svrateckého, poličského a moldanubika. Hranice mezi svrateckým krystalinikem a strážeckým moldanubikem na jedné straně a poličským krystalinikem na straně druhé je lemována tělesy amfibolitů. Tělesa amfibolitů mají charakter relativně dlouhých souvislých pruhů, nebo nesouvislých pruhů složených z drobných těles a budin. Jejich geochemické charakteristiky naznačují, že se patrně jedná o reliktů oceánské kůry. Kontakt s poličským krystalinikem je navíc modifikován tektonicky a má charakter horizontálních přesmyků a poklesů. Rovněž kontakt s hlineckou zónou na severozápadě a s moravikem na jihovýchodě je tektonický. Hranice s moldanubikem je definována metamorfně (ZRŮSTEK 1967). Pro svratecké krystalinikum je charakteristická rozsáhlá muskovitizace migmatitů, rul a metagranitů, která přesahuje i do okolních geologických jednotek.



Obr. 1. Zjednodušená geologická mapa svrateckého krystalinika s vyznačenou lokalizací studovaných vzorků (upraveno podle: MELICHAR *et al.* 2004, MRÁZOVÁ a OTAVA 2005, HANŽL a VÍT 2005, HANŽL *et al.* 2006, BURIÁNEK *et al.* 2006, STÁRKOVÁ a MACEK 1994): (1) migmatity; (2) metagranity; (3) svory; (4) pararuly; (5) amfibolity, skarny, vápenatosilikátové horniny a mramory; (6) hlavní zlomy; (7) město.

Fig. 1. Simplified geological map of the Svatka Crystalline Complex with sample locations (modified from: MELICHAR *et al.*, 2004, MRÁZOVÁ and OTAVA 2005, HANŽL a VÍT 2005, HANŽL *et al.* 2006, BURIÁNEK *et al.* 2006, STÁRKOVÁ and MACEK 1994): (1) migmatites; (2) metagranites; (3) mica schists; (4) gneisses; (5) amphibolites, skarns, calc-silicate rocks and marbles; (6) faults; (7) city.

Metamorfni vývoj svrateckého krystalinika můžeme rozdělit do několika fází (BURIÁNEK *et al.* 2006). Relikty nejstarší vysokotlaké metamorfózy (M1) (kolem 12 kbar) jsou zachovány pouze ve skarnech (BLAŽKOVÁ 2005). Dobře je dokumentována závěrečná fáze M1 ve skarnech jihovýchodní části svrateckého krystalinika, kde byly podmínky metamorfózy 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 metamorfni etapy vývoje (M2 a M3), což poměrně dobře souhlasí se závěry PITRY a GUIRAUDA (1996). Produktem starší metamorfózy (M2) je synkinematická (D2) minerální asociace: Ms+Bt+Grt+Ky+St (~640–670 °C a 7–8 kbar). Mladší minerální asociace je typická pro většinu metapelitů a má složení: Ms+Bt+Grt+Sil (M3). Nově vzniklý sillimanit a slidy rostou podél mladší foliace (D3). PT podmínky vypočtené pro metamorfni fázi M3 se pohybují v rozmezí 580–650 °C a 6 kbar. Pomocí elektronové mikrosondy bylo zjištěno stáří této metamorfni etapy 330 ± 8 Ma metodou CHIME (BURIÁNEK *et al.* 2006). V nejmladší fázi vznikaly retrogradní chlority na úkor biotitu a granátu (M4).

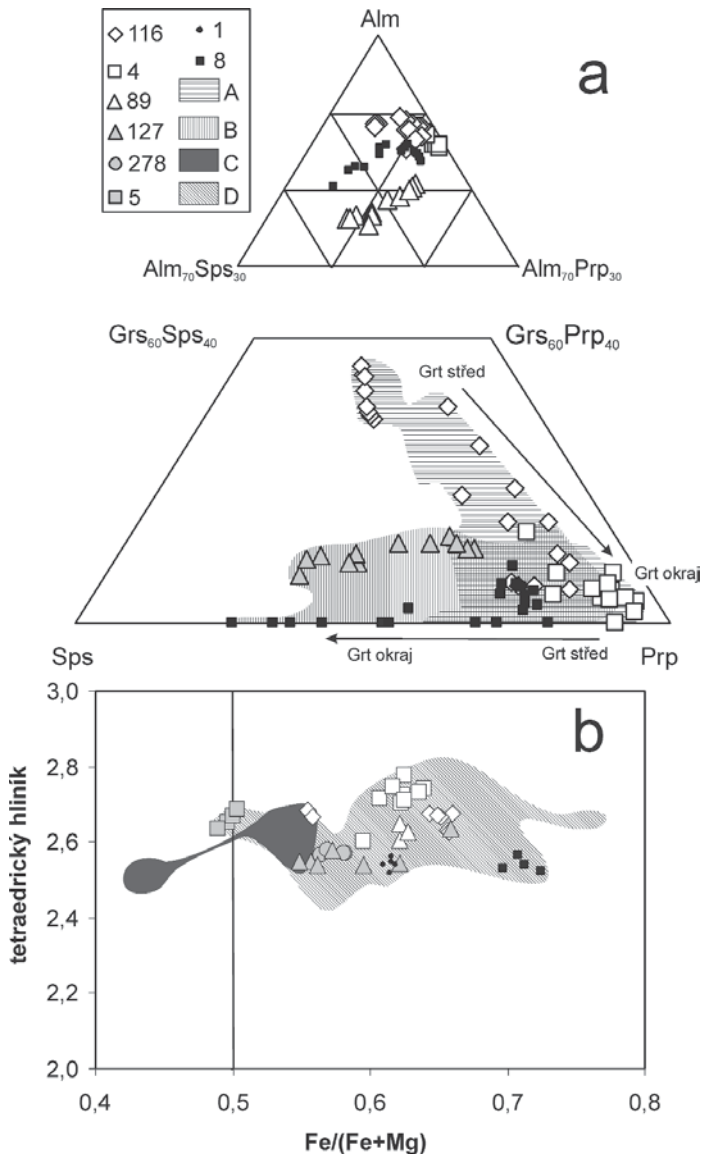
#### 4. Petrografická charakteristika svorů

Studované hrubě zrnité dvojslidné svory až živcové svory s turmalínem tvoří pruhy, které se táhnou celým krystalinikem. Délka jednotlivých pruhů se pohybuje od několika stovek metrů do několika km až desítek km. Šířka kolísá v rozmezí od desítek metrů do několika km. Hrubě zrnitý dvojslidný svor až živcový svor s turmalínem nacházíme jako pruhy sledující uzávěr antiklinály svrateckého krystalinika mezi Pustou Rybnou, Čachnovem, Svratouchem a Herálcem. Dále pokračují v podobě sz–jv orientovaných různě širokých pruhů ve střední části krystalinika. Typické lokality se nachází v údolí Svratky sz od Borovnice. V jižní části svrateckého krystalinika mají pruhy menší mocnost a stáčí se ve směru ssz–jjv. Zde jsou svory velmi dobře odkryty při východním okraji krystalinika v pásu, který se táhne od Nedvědice až ke Kozlovu. Vzorky svorů byly odebrány ze všech částí krystalinika (viz. Obr. 1). Pro svory celého svrateckého krystalinika je charakteristická podobná stavba a minerální asociace (Qtz+Ms±Bt±Grt±Sill±Ky±Pl±Tu±St). Kontakty s rulami jsou litologické, přechodné, s migmatity ostré a obvykle sledují metamorfni foliaci. Někdy jsou se svory svázána drobná tělesa turmalinitů.

Na základě petrografie můžeme ve svorech vyčlenit několik subtypů: dvojslidné svory se sillimanitem a granátem, dvojslidné svory se staurolitem a dvojslidné svory s plagioklasem.

##### 4. 1. Dvojslidné svory se sillimanitem a granátem

Tento subtyp je typický pro celé krystalinikum. Minerální asociace těchto svorů je Qtz+Bt+Ms+Sill+Grt±Ky±Pl±Chl±Tu±St. Jde o středně až hrubě zrnité porfyroblastické horniny se základní lepidogranoblastickou matrix. Biotit často převládá nad muskovitem, avšak někdy tomu bývá i naopak. Obě slidy se koncentrují do mírně zvrásněných pásků uložených souhlasně s foliací. V některých vzorcích jsou patrné mladší střížné zóny lemované jemnozrnným křemenem, živci a často také muskovitem. Biotit ( $^{IV}Al$  2,53–2,82 apfu;  $X_{Fe}$  0,64–0,77) v základní hmotě tvoří dlouze lišovitě krystaly. Sillimanit tvoří většínou shluky jehlicovitých agregátů, které jsou orientovány souhlasně s foliací, nebo bývá uzavírán v podobě drobných agregátů a jehlic ve slidách. Domény tvořené převážně slidami a sillimanitem se střídají s podobně mocnými doménami tvořenými hlavně křemenem a plagioklasem. Plagioklas odpovídá albitu ( $An_{6-8}$ ) a nevykazuje žádnou zřetelnou zonálnost. Zastoupení plagioklasu v jednotlivých vzorcích může být značně proměnlivé. Porfyroblasty tvořené granátem, nebo plagioklasem vystupují hlavně v křemen-plagioklasových



Obr. 2. Sps-Alm-Prp a Sps-Grs-Prp trojúhelníkové diagramy pro granáty (a) a  $Fe/(Fe+Mg)$  vs.  $Al^{IV}$  diagram pro biotity (b) ze svorů: skupiny IA (116-Svratouch, 4-Pustá Rybná); IB (89-Pustá Rybná); IIA (127-Borovnice); IIB (278-Javorek, 5-Dolní Lišná); IIIA (8-Kozlov); IIIB (1-Nedvědice); A - granát ze svorů s minerální asociací Ms+Bt+Grt+St; B - granát ze svorů s minerální asociací Ms+Bt+Grt; C - biotit jako inkluze uvnitř granátu ve svorech s minerální asociací Ms+Bt+Grt+St; D-biotit v matrix svorů.

Fig. 2. Sps-Alm-Prp and Sps-Grs-Prp diagrams for garnet (a) and  $Fe/(Fe+Mg)$  vs.  $Al^{IV}$  diagram for biotite (b) from mica schists: group IA (116-Svratouch, 4-Pustá Rybná); IB (89-Pustá Rybná); IIA (127-Borovnice); IIB (278-Javorek, 5-Dolní Lišná); IIIA (8-Kozlov); IIIB (1-Nedvědice); A - garnet from mica schist with the mineral assemblage Ms+Bt+Grt+St; B - garnet from mica schist with the mineral assemblage Ms+Bt+Grt; C - biotite as inclusion in the garnet from mica schist with the mineral assemblage Ms+Bt+Grt+St; D-biotite in the matrix of mica schist.

Tabulka 1. Seznam studovaných vzorků s uvedenou minerální asociací na jednotlivých lokalitách.

Table 1. The list of studied samples with mineral assemblages for the individual localities.

number	locality	group	mineral assemblage
1	Nedvědice	IIIB	Qtz+Pl+Bt+Ms+Sill+Tu
4	Pustá Rybná	IA	Qtz+Ms+Bt+Pl+Grt+St+Ky+Sill+Tu
5	Dolní Lišná	IIB	Qtz+Pl+Ms+Bt+Sill+Tu+Rt
8	Kozlov	IIIA	Qtz+Pl+Bt+Ms+Sill+Grt+Tu
89	Pustá Rybná	IB	Qtz+Ms+Bt+Pl+Sill+Tu+Rt
116	Svratouch	IA	Qtz+Ms+Bt+Grt+St+Sill+Tu
127	Borovnice	IIA	Qtz+Pl+Bt+Ms+Grt+Sill+Tu
278	Javorek	IIB	Qtz+Pl+Bt+Ms+Sill+Tu

doménách. Granát dosahuje velikosti až 1 cm a bývá často rotovaný. Vyskytuje se v podobě oválných zrn s cednikovitou strukturou s hojnými uzavřeními křemene, muskovitu a biotitu. Vzácně pak může ve střední části krystalinika obsahovat inkluze staurolitu, rutilu a drobné vějířovité agregáty chloritu. V jižní části krystalinika obsahují granáty inkluze křemene, rutilu, ilmenitu a biotitu. Vzácně je ve svorech jižní části krystalinika přítomen xenomorfní staurolit ( $Mg/(Fe+Mg)$  0,13–0,15), který bývá částečně nebo zcela uzavřen v křemenu. Staurolit bohatý zinkem se v jižní části krystalinika vyskytuje rovněž v křemenných peckách ve svorech, kde tvoří až několik cm mocné akumulace a polohy (Věchnov). Staurolit se v křemenných peckách vyskytuje společně s biotitem a vzácně i granátem a gahnitem. V jižní části krystalinika je staurolit ve svorech poměrně vzácný a nikdy není v asociaci s muskovitem. V granátech převažuje almandinová komponenta (obr. 2) a je pro ně typické poměrně homogenní složení ( $Alm_{72-88} Prp_{6-13} Sps_{1-15} ADr_{0-3} Grs_{0-4}$ ). Porfyroblasty granátu jsou ve střední části zrna chemicky homogenní, při okraji zrna je patrný pokles Mg, někdy i mírný pokles Ca, který je provázen nárůstem obsahu Mn a někdy Fe. V tlakových stínech granátu se většinou objevuje křemen, ale místy se tu koncentruje fibrolitický sillimanit. V některých vzorcích byl nalezen i listový kyanit, obvykle v podobě reliktů částečně zatlačovaných slídamí případně sillimanitem. Nejčastěji se s kyanitem setkáváme v sekrečních ččkách křemene. V polohách bohatých slídamí se vzácně objevují automorfní až hypautomorfní porfyroblasty turmalínu o délce až 1 cm. Ve svorech v blízkosti turmalinitů může být turmalín hojný a někdy tvoří sloupce dlouhé až 5 cm. Turmalín vzácně uzavírá oválná zrna křemene. Běžným akcesorickým minerálem je apatit a zirkon.

#### 4. 2. Dvojslídne svory se staurolitem

V severní části krystalinika v okolí Herálce, Rychnova, Chlumětina, Svratouchu a Pusté Rybné se vyskytují svory se staurolitem. Minerální asociace těchto hornin je  $Qtz+Ms+Bt+St+Grt+Ky\pm Sill\pm Pl\pm Chl\pm Tu$ . Xenomorfní staurolit ( $Mg/(Fe+Mg)$  0,12–0,21) bývá podél puklin zatlačován chloritem. Jednotlivá zrna nevykazují výraznou zonálnost, pouze bývá patrný mírný pokles  $Mg/(Fe+Mg)$  směrem k okraji. Sillimanit tvoří drobné shluky či jehlice, často uzavřené uvnitř slíd, nebo obklopující reliktu staurolitu. Izometrická zrna granátu někdy vykazují nevýraznou zonálnost (obr. 2), avšak často jsou homogenizována difuzí ( $Alm_{73-87} Prp_{5-17} Sps_{1-7} Grs_{0-13} ADr_{0-3}$ ). Zonální zrna granátu vykazují od středu k okraji pokles Mn, Ca a růst obsahu Fe a mírně také Mg. Někdy je na okraji zrn patrný tenký lem charakterizovaný poklesem Mg a nárůstem Fe a Mn. Granát obsahuje inkluze křemene, muskovitu a biotitu. Inkluze v granátu, někdy i ve staurolitu, bývají mnohdy esovitě uspořádané. Biotit v základní hmotě (obr. 2) má ve všech studovaných

vzorcích podobné chemické složení ( $^{IV}Al$  2,44–2,78 apfu;  $X_{Fe}$  0,57–0,65). Vzácně jsou přítomné automorfní až hypautomorfní porfyroblasty turmalínu o délce až 0,8 cm.

#### 4. 3. Dvojslídne svory s plagioklasem

Množství plagioklasu ve svorech může výrazně kolísat, takže se často setkáváme s jejich pozvolnými přechody do slídnatých pararul. Některé svory obsahují hojné porfyroblasty plagioklasu. Tyto horniny jsou středně až hrubě zrnité s granolepidoblastickou až lepidogranoblastickou strukturou. Porfyroblasty plagioklasu uzavírají inkluze křemene, slídků, rutilu a turmalínu a bývají většinou výrazně postiženy sekundárními přeměnami (jilové minerály, méně sericit). V porfyroblastech plagioklasů jsou zrna rutilu hojná, zatímco v základní hmotě jsou vzácná. Lupínky slídků jsou orientovány souhlasně s foliací. Muskovit v těchto svorech místy dokonce převažuje nad biotitem ( $^{IV}Al$  2,64–2,80 apfu;  $X_{Fe}$  0,49–0,66). Biotit ve svorech (obr. 2) ze severní části krystalinika u Pusté Rybné vykazuje nižší  $X_{Fe}$  (0,49–0,50) než ve střední části krystalinika u Lišné ( $X_{Fe}$  = 0,62–0,66). Turmalín tvoří až 5 mm dlouhé sloupce. Někdy se v hornině objevuje v malém množství jehličkovitý sillimanit zarostlý do slídků. Běžným akcesorickým minerálem je apatit a někdy se objevuje monazit.

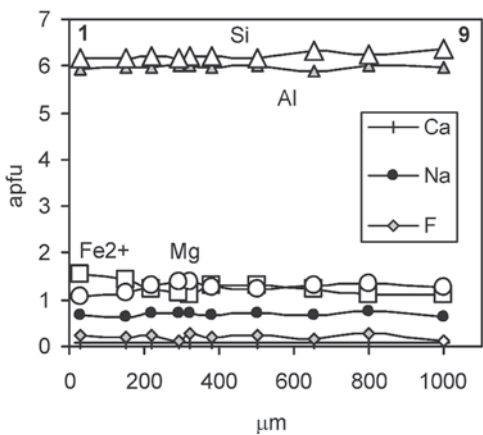
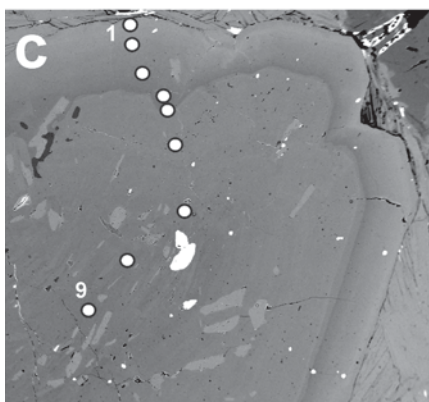
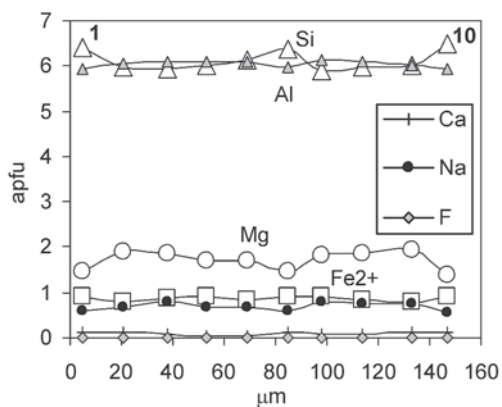
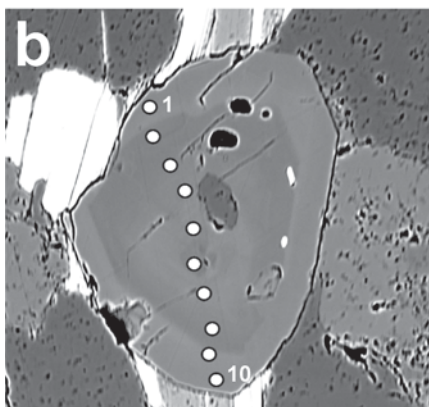
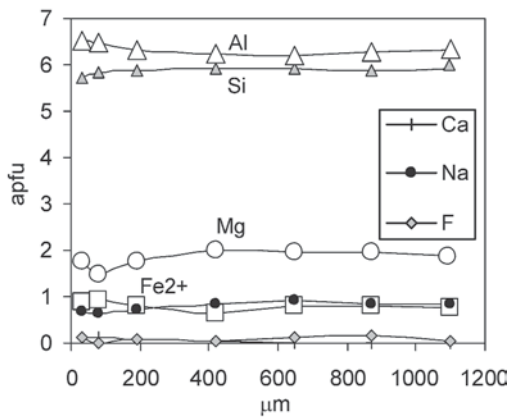
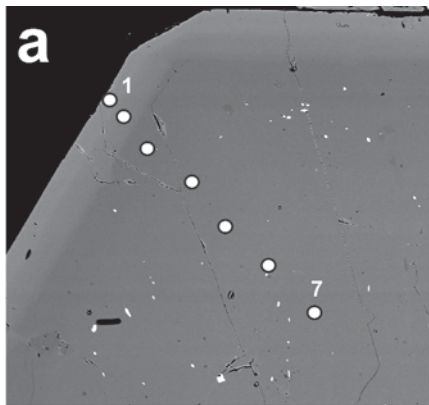
#### 5. Chemické složení turmalínu

Turmalín tvoří ve svorech automorfní sloupce dlouhé obvykle 0,2 až 1,5 cm, ojediněle však až 5 cm. Většinou jsou uloženy souhlasně s foliací. Sukcesní vztahy k ostatním minerálům nejsou zcela jasné. Turmalín bývá uzavírán ve slídkách, ale nebývá přítomen jako inkluze v granátech a staurolitech. Výjimkou jsou polohy turmalinitů ve svorech, kde granáty obvykle ve svém středu uzavírají hojné inkluze turmalínu (ČOPIJKOVÁ *et al.* 2007).

Turmalíny byly rozděleny do několika skupin podle minerální asociace svorů, v nichž se vyskytují. První skupinu tvoří turmalín v asociaci se svory ve staurolitové metamorfní zóně: (IA) turmalín v minerální asociaci s  $Ms+Bt+Grt+St+Ky\pm Sill$  (vzorky 4 a 116), (IB) turmalín v minerální asociaci s  $Ms+Bt+Sill\pm Ky$  (vzorek 89). Druhou skupinu tvoří turmalín v asociaci se svory v sillimanitové metamorfní zóně: (IIA) turmalín v minerální asociaci s  $Ms+Bt+Grt+Sill$  (vzorek 127) a (IIB) turmalín v minerální asociaci s  $Ms+Bt+Sill$  (vzorky 5 a 278). Třetí skupinu představuje turmalín ve svorech v okolí turmalinitů, a to (IIIA) turmalín v minerální asociaci s  $Ms+Bt+Sill+Grt$  (vzorek 8) a (IIIB) turmalín v minerální asociaci s  $Ms+Bt+Sill$  (vzorek 1). Tyto dvě poslední skupiny v podstatě zastupují turmalín ve svorech východní části svrateckého krystalinika.

Všechny turmalíny můžeme označit jako skoryl-dravity a hliníkem bohaté skoryl-dravity (obr. 3). Pozice Z bývá většinou plně obsazena Al. Výjimku tvoří pouze střední části některých zrn (vz. 127, 278), kde obsah Al v pozici Z může být nižší (až 5,88 apfu) a do této pozice zřejmě vstupuje Mg, avšak maximálně do hodnoty 0,12 apfu. Hliník proto vstupuje i do pozice Y a to v rozmezí 0,0–0,6 apfu, přičemž nejvyšší obsahy bývají na okrajích zrn. Dominantním kationem v pozici X je Na. Typické jsou nízké obsahy Ca (0,01–0,14 apfu), Ti (0,03–0,14 apfu), K (0,00–0,05 apfu) a většinou také F. Obsahy Cl, Zn, Cr, Mn, Cu a P byly ve všech vyčleněných zónách turmalínu obvykle pod mezí detekce elektronové mikrosondy.

Turmalíny skupiny IA odpovídají Al-bohatému dravitu ( $X_{Fe}$  0,24–0,39; Al 6,22–6,55 apfu; Na 0,65–0,91 apfu). Obsahy F jsou nízké (0,00–0,20 apfu). Pro skupinu IA je typická zonálnost charakterizovaná poklesem obsahu Na a Mg a růstem Al a Fe od pří okrajů zrna. Některá zrna mají na okrajích vyvinutou oscilační zonálnost. Většinou se střídají tenké zóny bohatší a chudší Mg. Turmalíny skupiny IB jsou bez zonálnosti, nebo vykazují nevýraznou zonálnost, která je podobná jako v předchozí skupině. Turmalíny této skupiny odpovídají Al-bohatému dravitu ( $X_{Fe}$  0,36–0,43; Al 6,28–6,48 apfu; Na 0,64–0,73 apfu). Obsahy F jsou velmi nízké (0,00–0,01 apfu).



Obr 3. Turmalíny ve svorech (BSE obrázky a chemická zonalita): (a) turmalín z lokality Svratouch - IA; (b) turmalín z lokality Javorek - IIB; (c) turmalín z lokality Kozlov - IIIA.

Fig 3. Tourmalines in mica schist (BSE images and chemical zonation): (a) tourmaline from locality Svratouch - IA; (b) tourmaline from locality Javorek - IIB; (c) tourmaline from locality Kozlov - IIIA.



Tabulka 2. Chemické složení turmalínu ze svorů: 1-Nedvědice, 4-Pustá Rybná, 5-Dolní Lišná, 8-Kozlov, 89-Pustá Rybná, 116-Svratouch, 127-Borovnice, 278-Javorek.

Table 2. Chemical composition of tourmaline from mica schists: 1-Nedvědice, 4-Pustá Rybná, 5-Dolní Lišná, 8-Kozlov, 89-Pustá Rybná, 116-Svratouch, 127-Borovnice, 278-Javorek.

Sk. Lok.	IA 4	IA 116	IA 116	IIA 127	IIA 127	IIA 278	IIIA 8	IB 89	IB 89	IIB 5	IIB 5	IIIB 1
SiO <sub>2</sub>	36,25	36,00	36,27	37,58	37,43	36,86	36,70	36,70	36,38	35,43	35,80	35,75
TiO <sub>2</sub>	0,46	0,51	0,24	0,85	0,77	0,99	0,81	0,79	0,79	0,92	0,71	0,74
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	34,11	32,14	32,86	31,14	31,47	33,71	32,25	33,55	33,74	34,91	34,49	34,27
V <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,05	0,00	0,06	0,00	0,00	0,00	0,00	0,07
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,08	0,02	0,01	0,02	0,10	0,04	0,01	0,03	0,03	0,07	0,02	0,03
FeO	6,77	5,82	5,62	4,81	4,43	6,68	8,19	6,67	7,35	5,38	5,38	8,26
MgO	5,81	7,99	7,78	8,48	8,41	6,12	5,71	5,80	5,57	6,72	6,55	4,87
CaO	0,25	0,06	0,05	0,46	0,31	0,69	0,35	0,23	0,20	0,73	0,55	0,35
MnO	0,00	0,01	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02	0,03	0,02	0,00	0,04
Na <sub>2</sub> O	2,28	2,85	2,71	2,85	2,82	1,94	2,26	2,15	2,13	1,95	2,06	1,77
K <sub>2</sub> O	0,05	0,03	0,04	0,03	0,02	0,06	0,04	0,04	0,02	0,06	0,01	0,06
F	0,32	0,26	0,04	0,07	0,14	0,00	0,52	0,00	0,00	0,14	0,04	0,44
H <sub>2</sub> O*	3,53	3,53	3,65	3,67	3,63	3,73	3,42	3,68	3,68	3,63	3,67	3,45
B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> *	10,67	10,59	10,64	10,74	10,72	10,80	10,62	10,68	10,67	10,73	10,68	10,61
O=F	0,13	0,11	0,02	0,03	0,06	0,00	0,22	0,00	0,00	0,06	0,02	0,19
Celkem	100,44	99,69	99,92	100,68	100,25	101,60	100,73	100,34	100,60	100,62	99,94	100,53
<b>T site</b>												
Si <sup>4+</sup>	5,904	5,911	5,924	6,079	6,068	5,933	6,007	5,973	5,926	5,738	5,826	5,853
Al <sup>3+</sup>	0,096	0,089	0,076	0,000	0,000	0,067	0,000	0,027	0,074	0,262	0,174	0,147
<b>Z site</b>												
Al <sup>3+</sup>	6,000	6,000	6,000	5,938	6,000	6,000	6,000	6,000	6,000	6,000	6,000	6,000
Mg <sup>2+</sup>	0,000	0,000	0,000	0,062	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
<b>Y site</b>												
Ti <sup>4+</sup>	0,056	0,063	0,029	0,104	0,093	0,119	0,100	0,097	0,097	0,112	0,087	0,091
Al <sup>3+</sup>	0,453	0,129	0,249	0,000	0,011	0,328	0,221	0,408	0,403	0,402	0,443	0,466
Cr <sup>3+</sup>	0,010	0,002	0,001	0,003	0,013	0,006	0,001	0,004	0,004	0,009	0,003	0,004
V <sup>3+</sup>	0,000	0,000	0,000	0,000	0,006	0,000	0,008	0,000	0,000	0,000	0,000	0,009
Fe <sup>2+</sup>	0,922	0,799	0,767	0,650	0,601	0,899	1,121	0,908	1,001	0,728	0,733	1,131
Mg <sup>2+</sup>	1,412	1,954	1,894	1,982	2,032	1,468	1,393	1,407	1,354	1,623	1,590	1,188
Mn <sup>2+</sup>	0,000	0,001	0,003	0,000	0,000	0,000	0,000	0,002	0,004	0,003	0,000	0,005
<b>X site</b>												
Ca <sup>2+</sup>	0,044	0,010	0,008	0,079	0,054	0,119	0,061	0,041	0,034	0,126	0,095	0,061
Na <sup>+</sup>	0,718	0,908	0,859	0,895	0,885	0,605	0,717	0,678	0,674	0,611	0,650	0,563
K <sup>+</sup>	0,009	0,006	0,009	0,007	0,005	0,012	0,008	0,009	0,005	0,012	0,002	0,013
vak	0,228	0,076	0,125	0,019	0,055	0,263	0,213	0,272	0,287	0,251	0,253	0,364
OH	3,835	3,865	3,979	3,965	3,929	4,000	3,731	4,000	4,000	3,926	3,980	3,770
F <sup>-</sup>	0,165	0,135	0,021	0,035	0,071	0,000	0,269	0,000	0,000	0,074	0,020	0,230
B <sup>3+</sup>	3,000	3,000	3,000	3,000	3,000	3,000	3,000	3,000	3,000	3,000	3,000	3,000
catsum	18,624	18,873	18,818	18,798	18,769	18,556	18,639	18,554	18,576	18,626	18,602	18,531
ansum	31,000	31,000	31,000	31,000	31,000	31,000	31,000	31,000	31,000	31,000	31,000	31,000

\* dopočteno ze stechiometrie, veškeré Fe uvažováno jako FeO

\* calculated from stoichiometry, total Fe as FeO

Turmalín ze svorů skupiny IIA odpovídá dravitu až Al-bohatému dravitu ( $X_{Fe}$  0,22–0,38; Al 5,94–6,47 apfu; Na 0,66–0,89 apfu). Obsahy F jsou velmi nízké (0,03–0,10 apfu). Turmalín je charakterizován relativně jednoduchou zonalitou. Na okraji je asi 50  $\mu$ m mocná zóna, která je oproti středu obohacena Fe, Al a ochuzena Mg, Na. Podobnou zonalnost jako skupina IIA vykazují také některé turmalíny v blízkosti turmalinitů skupiny IIIA a IIIB.

Turmalín ze svorů skupiny IIB odpovídá Al-bohatému dravitu až dravitu ( $X_{\text{Fe}}$  0,29–0,40; Al 5,88–6,77 apfu; Na 0,56–0,79 apfu). Obsahy F jsou velmi nízké (0,00–0,08 apfu). Některá zrna jsou téměř homogenní bez zřetelné zonálnosti. Jedno zrno obsahuje jádro, jehož chemické složení se blíží složení okrajů zrna. Avšak jádro nutně nemusí tvořit střed zrna. Protože studovaný řez je poblíž vrcholu turmalinového sloupce. Okraje mají oproti převážné části turmalinového zrna vyšší obsahy Al a nižší obsahy Mg a Na.

Turmalíny skupiny IIIA a IIIB mají na okraji vyvinutu asi 200  $\mu\text{m}$  mocnou zónu, která je oproti středu obohacena Fe, někdy také Al a ochuzena Mg a někdy Na. Tyto turmalíny odpovídají Al-bohatému skoryl-dravitu, případně foititu ( $X_{\text{Fe}}$  0,34–0,61; Al 6,18–6,70 apfu; Na 0,45–0,77 apfu). Obsahy F jsou relativně vysoké oproti ostatním skupinám (0,13–0,39 apfu). Porfyroblasty turmalínu těchto dvou skupin mohou tvořit až 5 cm dlouhé sloupce o průměru až 1 cm a uzavírají inkluze jiných minerálů, zejména muskovitu dále i biotitu, granátu a křemene. Strukturální vztahy naznačují, že převážná část těchto turmalinových zrn je mladší než ostatní turmalíny ve svorech svrateckého krystalinika. Ve střední části některých porfyroblastů bývají přítomna starší jádra bez inkluzí, případně s inkluzemi křemene. Tato jádra jsou chemicky homogenní a odpovídají Al-bohatému dravitu ( $X_{\text{Fe}}$  0,23–0,25; Al 6,09–6,26 apfu, Na 0,72–0,82 apfu) s nízkým obsahem F (do 0,08 apfu) a velmi nízkým obsahem Ca (do 0,02 apfu). Svým chemickým složením jsou velmi blízké turmalínu IIA. Ve srovnání s okolním mladším turmalínem (IIIA) jsou tato jádra bohatší Mg a Na a chudší F, Fe a Ca.

Většina turmalínů vykazuje podobné substituční vektory. Chemické složení střední části zrn vzorků ze skupin IA, IIA, IIB, IIIA je výrazně ovlivněno substitučním vektorem  $X_{\square}\text{Al}_2\text{ONa}_1\text{Mg}_2(\text{OH})_1$  (obr. 4). Substituce  $X_{\square}\text{Al}_3\text{O}_2\text{Na}_1\text{Mg}_3(\text{OH})_2$  je přítomna v okrajových částech zrn skupiny IIB. Substituce  $X_{\square}\text{Al Na}_1\text{Mg}^{2+}_1$  se vyskytuje v některých zrnech skupiny IA (vz. 116) a ve skupině IB. Homovalentní substituce  $\text{FeMg}_1$  je typická pro turmalíny skupiny IIIA, IIIB a někdy se může projevit také v ostatních studovaných skupinách. V turmalínech skupiny IIIB bývá přítomna substituce  $X_{\square}\text{Al Na}_1\text{Fe}^{2+}_1$ . Přestože je zastoupení Ti a Ca nízké, funguje zde v některých vzorcích skupin IA, IIA a IIIA (vzorky 4, 5, 8 a 116) nevýrazná substituce  $\text{CaMgTiO}_2 \text{Na}_1\text{Al}_2(\text{OH})_1$ .

## 6. Metamorfní zóny a zonálnost minerálů

V oblasti svrateckého krystalinika můžeme vyčlenit staurolitovou izográdu, která probíhá středem krystalinika zhruba na linii Herálec, Křížánky, Pustá Rybná. Dále směrem na jihovýchod se staurolit vyskytuje jen vzácně a to většinou jako inkluze v granátu a křemenu, nebo tvoří samostatné polohy v křemenných čočkách. Vždy je přítomen staurolit v minerální asociaci bez muskovitu.

Starší metamorfní asociace se staurolitem (M2) patrně zachovává PT podmínky blízké termálnímu vrcholu metamorfózy ve svrateckém krystaliniku ( $\sim 640\text{--}670\text{ }^\circ\text{C}$  a 7–8 kbar). PT podmínky zjištěné pro minerální asociaci se staurolitem v severní části krystalinika jsou poněkud vyšší na západě v okolí obce Svatouch ( $669 \pm 47\text{ }^\circ\text{C}$  a  $8,1 \pm 2,1$  kbar) než poblíž kontaktu s poličským krystalinikem u Pusté Rybné ( $637 \pm 32\text{ }^\circ\text{C}$  a  $6,6 \pm 1,5$  kbar). V některých zrnech granátu bývá zachována růstová zonálnost. Klesající obsahy Mn, Ca a stoupající obsahy Mg, Fe indikují růst v podmínkách klesajícího tlaku, nebo stoupající teploty. Staurolity i granáty indikují synkinematický růst. Vznik foliace S2 zachované pouze v těchto porfyroblastech souvisí se starší deformací D2 (důkazy nejstarší deformace fáze D1 se zachovaly pouze v tělesech skarnů a vápenatoslíkatových hornin BURIÁNEK *et al.* 2006). Biotit v základní hmotě svorů se staurolitem je chemicky relativně homogenní ( $^{IV}\text{Al}$  2,44–2,78 apfu;  $X_{\text{Fe}}$  0,57–0,65) a má nízké obsahy F (0,01–0,26 apfu). Inkluze biotitu v granátu ve svorech se staurolitem vykazují nižší  $X_{\text{Fe}}$  (0,43–0,44), ale mají podobný obsah  $^{IV}\text{Al}$  (50–2,54 apfu) jako biotit v základní hmotě. Staurolit nevyka-

Tabulka 3. Chemické složení biotitu ze svorů: 1-Nedvědice, 4-Pustá Rybná, 5-Dolní Lišná, 8-Kozlov, 89-Pustá Rybná, 116-Svratouch, 127-Borovnice, 278-Javorek.

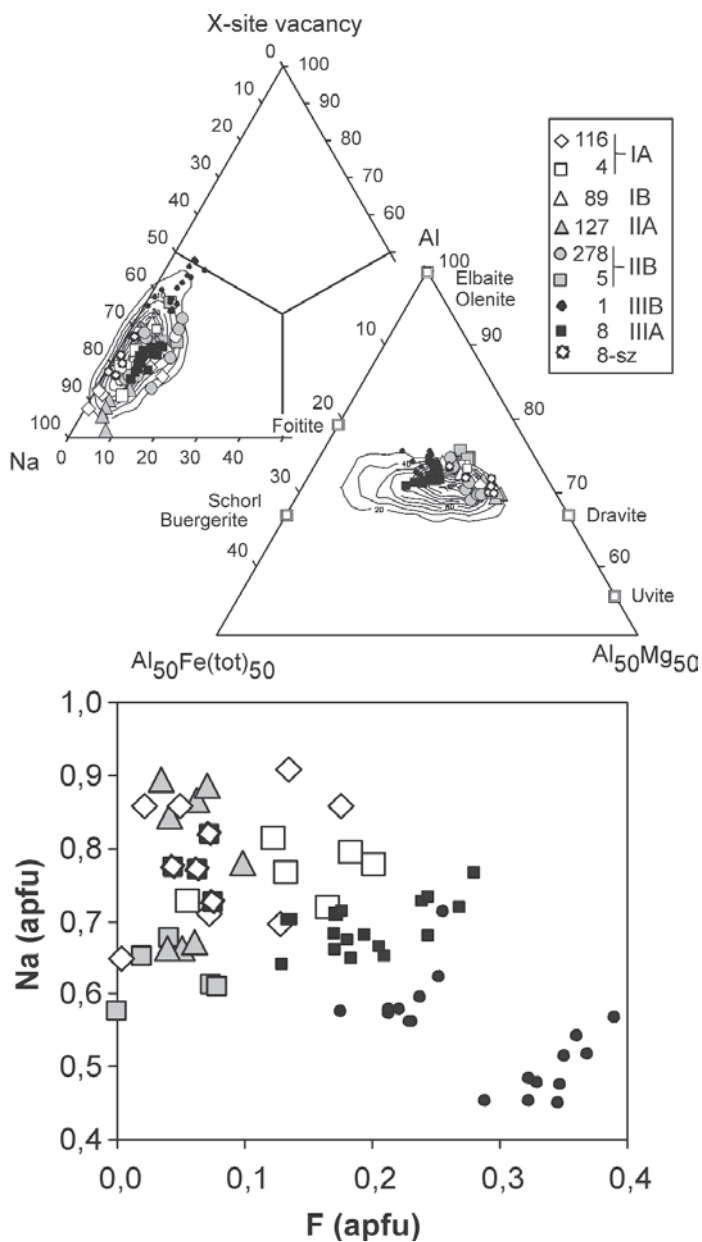
Table 3. Chemical composition of biotite from mica schists: 1-Nedvědice, 4-Pustá Rybná, 5-Dolní Lišná, 8-Kozlov, 89-Pustá Rybná, 116-Svratouch, 127-Borovnice, 278-Javorek.

Sk. Lok.	IA 116	IA 116	IA 4	IA 4	IIA 127	IB 89	IIB 5	IIB 5	IIB 278	IIIA 8	IIIA 8	IIIB 1
SiO <sub>2</sub>	35,42	34,77	34,25	34,82	36,01	35,36	35,20	35,40	35,81	35,16	35,05	35,19
TiO <sub>2</sub>	2,57	1,46	1,55	1,84	2,25	2,76	3,07	3,02	3,43	1,94	2,11	2,32
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	20,20	19,78	19,79	20,67	19,80	19,35	19,43	19,37	18,54	18,94	18,46	18,68
FeO	19,87	23,36	23,09	22,02	18,90	22,35	18,22	17,72	20,36	24,65	24,58	21,60
MnO	0,09	0,01	0,04	0,02	0,15	0,06	0,14	0,09	0,26	0,29	0,30	0,00
MgO	8,97	6,88	7,82	7,47	8,46	7,43	10,11	10,09	8,25	5,70	5,25	7,58
Na <sub>2</sub> O	0,52	0,30	0,34	0,36	0,24	0,35	0,29	0,30	0,15	0,27	0,16	0,00
K <sub>2</sub> O	8,78	8,90	8,82	9,02	9,51	8,65	8,99	9,19	9,20	9,14	9,38	9,27
F	0,01	0,56	0,53	0,33	0,33	0,00	0,37	0,68	0,00	1,30	1,15	1,41
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,01	0,03	0,05	0,00	0,02	0,03	0,03	0,03	0,00	0,05	0,02	0,00
H <sub>2</sub> O*	3,99	3,62	3,64	3,78	3,80	3,95	3,80	3,65	3,96	3,26	3,29	3,21
O=F	0,00	0,24	0,22	0,14	0,14	0,00	0,16	0,29	0,00	0,55	0,49	0,59
Celkem	100,42	99,43	99,69	100,19	99,35	100,28	99,48	99,25	99,96	100,32	99,33	98,93
Si <sup>4+</sup>	5,315	5,368	5,275	5,297	5,453	5,373	5,310	5,345	5,429	5,435	5,479	5,440
Al <sup>IV</sup>	2,685	2,632	2,725	2,703	2,547	2,627	2,690	2,655	2,571	2,565	2,521	2,560
Al <sup>VI</sup>	0,888	0,967	0,868	1,004	0,987	0,838	0,764	0,791	0,742	0,886	0,881	0,842
Ti <sup>4+</sup>	0,291	0,170	0,180	0,211	0,256	0,316	0,348	0,343	0,391	0,225	0,248	0,270
Cr <sup>3+</sup>	0,001	0,003	0,006	0,000	0,003	0,003	0,003	0,003	0,000	0,006	0,002	0,000
Fe <sup>2+</sup>	2,494	3,016	2,975	2,801	2,394	2,840	2,299	2,237	2,581	3,186	3,213	2,792
Mg <sup>2+</sup>	2,006	1,583	1,796	1,693	1,909	1,683	2,274	2,272	1,864	1,313	1,224	1,747
Mn <sup>2+</sup>	0,011	0,002	0,005	0,002	0,019	0,008	0,018	0,012	0,034	0,038	0,040	0,000
K <sup>+</sup>	1,681	1,752	1,732	1,749	1,838	1,677	1,730	1,771	1,778	1,802	1,870	1,827
Na <sup>+</sup>	0,152	0,089	0,100	0,106	0,071	0,103	0,086	0,087	0,044	0,081	0,049	0,000
F <sup>-</sup>	0,004	0,273	0,259	0,160	0,160	0,000	0,177	0,327	0,000	0,635	0,570	0,688
OH*	3,996	3,727	3,741	3,840	3,840	4,000	3,823	3,673	4,000	3,365	3,430	3,312
catsum	15,524	15,581	15,662	15,566	15,476	15,467	15,521	15,516	15,435	15,538	15,527	15,478
ansum	24,00	24,00	24,00	24,00	24,00	24,00	24,00	24,00	24,00	24,00	24,00	24,00

zuje žádnou výraznou zonálnost (Mg/(Fe+Mg) 0,12–0,21; Zn 0,06–0,20 apfu; Al 17,5–18,5 apfu).

Vznik sillimanitu ve svrateckém krystaliniku souvisí s metamorfózou M3. Tato metamorfóza postihla hlavně střední a jihovýchodní část krystalinika. Ve střední části krystalinika v okolí vesnice Krásné byly pro svory vypočteny podobné PT podmínky (603 ±32 °C a 4,7 ±1,3 kbar) jako pro svory při hranici s poličským krystalinikem u vesnice Borovnice (598 ±27 °C a 5,7 ±1,2 kbar). V jižní části krystalinika vykazují svory u Pernštejna PT podmínky 625 ±43 °C a 5,3 ±1,8 kbar. Zjištěné zonálnosti granátu ze svorů ze sillimanitem ukazují na růst granátu během exhumace k povrchu. Vypočtené PT podmínky ~600–630 °C a 5–6 kbar pro svory jižní a střední části krystalinika nepředstavují vrcholné PT podmínky metamorfózy, ale dokumentují právě zmiňovanou exhumaci svrateckého krystalinika. Proces exhumace byl spojen s vymizením metamorfní asociace obsahující kyanit a staurolit a vznikem dekompresní minerální asociace s granátem a sillimanitem. Granát je pravděpodobně produktem reakce konzumující staurolit  $St+Ms+Qtz = Grt+Sill+Bt+H_2O$ . U většiny granátů je zonálnost výrazně modifikovaná difúzí. Okraje ukazují pokles Ca a Mg a nárůst  $X_{Fe}$ , Fe a Mn. Minerální asociace se sillimanitem je z hlediska foliace S3 prekynematická. Mladší deformační fáze D3 souvisí se vznikem převažující foliace S3 ve svrateckém krystaliniku.

Biotit (obr. 2) v základní hmotě svorů se sillimanitem a granátem má relativně homogenní složení a oproti staurolitickým svorům se vyznačuje vyšším  $X_{Fe}$  (0,64–0,77). Obsahy <sup>IV</sup>Al (2,53–2,82 apfu) a F (0,02–0,17 apfu) jsou podobné jako u staurolitických svo-



Obr. 4. Chemické složení turmalínu v trojúhelníkových diagramech Al-Al<sub>50</sub>Mg<sub>50</sub>-Al<sub>50</sub>Fe<sub>50</sub>, X-site vacancy-Na-Ca a v diagramu Na-F, isolinie ukazují chemické složení turmalínu z tourmalinitů: skupiny IA (116-Svratouch, 4-Pustá Rybná); IB (89-Pustá Rybná); IIA (127-Borovnice); IIB (278-Javorek, 5-Dolní Lišná); IIIA (8-Kozlov; 8 sz - Kozlov, střed zrna); IIIB (1-Nedvědice).

Fig. 4. Chemical composition of tourmaline in triangular plots Al-Al<sub>50</sub>Mg<sub>50</sub>-Al<sub>50</sub>Fe<sub>50</sub> and X-site vacancy-Na-Ca and in Na-F diagram, isolines showing chemical composition of tourmalines from tourmalinites: group IA (116-Svratouch, 4-Pustá Rybná); IB (89-Pustá Rybná); IIA (127-Borovnice); IIB (278-Javorek, 5-Dolní Lišná); IIIA (8-Kozlov; 8 sz - Kozlov, grain core); IIIB (1-Nedvědice).

Tabulka 4. Chemické složení granátu ze svorů: 116-Svratouch, 127-Borovnice, 8-Kozlov.

Table 4. Chemical composition of garnet from mica schists: 116-Svratouch, 127-Borovnice, 8-Kozlov.

Sk.	IA	IA	IA	IIA	IIA	IIIA	IIIA	IIIA	IIIA	IIIA
Lok.	166	166	166	127	127	8	8	8	8	8
SiO <sub>2</sub>	36,97	37,08	37,32	38,05	38,35	36,83	36,39	36,21	36,24	36,23
TiO <sub>2</sub>	0,03	0,00	0,01	0,01	0,02	0,01	0,02	0,06	0,48	0,07
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	21,07	21,00	21,08	21,57	21,73	20,60	20,72	20,58	20,30	20,54
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,02	0,01	0,01	0,01	0,04	0,00	0,01	0,03	0,02	0,03
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,18	0,00	0,00	0,00	0,00	0,97	1,02	1,10	0,85	0,91
FeO	37,86	35,29	34,01	32,50	34,06	36,91	36,47	36,85	36,59	36,81
MnO	0,62	2,40	2,39	6,01	2,87	1,62	1,47	1,78	2,62	2,92
MgO	2,46	1,26	1,20	2,27	3,30	2,50	2,77	2,47	1,92	1,86
Na <sub>2</sub> O	0,09	0,10	0,15	0,01	0,00	0,04	0,01	0,05	0,02	0,07
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,00	0,00	0,00	0,03	0,02	0,07	0,06	0,10	0,11	0,11
Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00
CaO	1,28	3,06	3,91	1,35	1,45	1,34	1,52	1,14	1,08	0,87
<b>Celkem</b>	<b>100,57</b>	<b>100,19</b>	<b>100,09</b>	<b>101,81</b>	<b>101,83</b>	<b>100,89</b>	<b>100,44</b>	<b>100,39</b>	<b>100,21</b>	<b>100,41</b>
Si	2,981	3,001	3,008	3,007	3,007	2,970	2,946	2,942	2,955	2,953
P	0,000	0,000	0,000	0,002	0,001	0,005	0,004	0,007	0,007	0,008
Ti	0,002	0,000	0,000	0,000	0,001	0,001	0,001	0,004	0,029	0,004
<b>T site</b>	<b>2,983</b>	<b>3,001</b>	<b>3,008</b>	<b>3,009</b>	<b>3,009</b>	<b>2,976</b>	<b>2,951</b>	<b>2,953</b>	<b>2,992</b>	<b>2,965</b>
Al	2,002	2,003	2,003	2,009	2,008	1,958	1,977	1,970	1,951	1,973
Cr	0,001	0,000	0,001	0,001	0,002	0,000	0,001	0,002	0,001	0,002
Fe <sup>3+</sup>	0,011	0,000	0,000	0,000	0,000	0,059	0,062	0,067	0,052	0,056
Ti	0,000	0,000	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Y	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
<b>B site</b>	<b>2,015</b>	<b>2,004</b>	<b>2,004</b>	<b>2,010</b>	<b>2,011</b>	<b>2,016</b>	<b>2,040</b>	<b>2,040</b>	<b>2,004</b>	<b>2,031</b>
Fe <sup>2+</sup>	2,553	2,398	2,314	2,180	2,266	2,489	2,469	2,504	2,495	2,509
Mn	0,042	0,165	0,163	0,402	0,191	0,111	0,101	0,122	0,181	0,201
Mg	0,296	0,152	0,145	0,268	0,386	0,301	0,334	0,299	0,234	0,225
Ca	0,110	0,265	0,338	0,114	0,122	0,116	0,132	0,099	0,094	0,076
Na	0,021	0,025	0,036	0,003	0,001	0,010	0,002	0,013	0,005	0,017
<b>A site</b>	<b>3,022</b>	<b>3,004</b>	<b>2,995</b>	<b>2,968</b>	<b>2,965</b>	<b>3,027</b>	<b>3,037</b>	<b>3,038</b>	<b>3,009</b>	<b>3,029</b>
Alm	85	80	78	74	76	82	81	82	83	83
Adr	1	0	0	0	0	3	3	3	3	2
Grs	3	9	11	4	4	1	1	0	0	0
Prp	10	5	5	9	13	10	11	10	8	8
Sps	1	6	6	14	6	4	3	4	6	7

rů. Poměr  $X_{Fe}$  v biotitech tvořících inkluze uvnitř granátu (0,53–0,56) je nižší než v biotitech v základní hmotě svorů a dokonce je nižší než v biotitech v základní hmotě staurolitických svorů. Obsah <sup>IV</sup>Al (2,62–2,67) je podobný jako u většiny biotitů ze svorů ve svrateckém krystaliniku. Obsah Ti se pohybuje v rozmezí 0,08–0,30 apfu. Tyto hodnoty jsou relativně nízké ve srovnání s biotity ze svoru s plagioklasem, kde se obsah Ti pohybuje v rozmezí 0,34–0,35 apfu.

Xenomorfní zrna staurolitu, uzavřená zcela, nebo částečně v křemeni, se vyskytují velmi vzácně při východním okraji krystalinika a svým chemickým složením se příliš neliší od staurolitů v severní části krystalinika (Al 17,4–17,7 apfu). Mají průměrně spíše ni-

žší obsahy Mg/(Fe+Mg) (0,13–0,15) a hodnoty Zn se naopak blíží horní hranici hodnot ze svorů v severní části krystalinika (0,11–0,12 apfu). Vzácné inkluze staurolitu v granátu ve svorech ze střední části krystalinika mají podobné složení jako staurolity ze staurolitických svorů severní části krystalinika (Mg/(Fe+Mg) 0,21; Zn 0,06 apfu; Al 18,1 apfu). Staurolity v křemenných peckách ve střední části krystalinika mají podobné chemické složení (Mg/(Fe+Mg) 0,14–0,17; Al 17,3–17,8 apfu), avšak liší se vysokými obsahy Zn (0,65–0,70 apfu).

Porfyrblasty granátu ve staurolitických svorech většinou vykazují směrem k okrajům růst poměru Mg/Ca. Pro granáty ze svorů se sillimanitem je naopak typický růst poměru Mn/Mg (obr. 2).

Často je ve svorech přítomen retrográdní chlorit zatlačující granát nebo biotit. Vzácně je granát zatlačován limonitem a běžná je sericitizace plagioklasů. Tyto procesy souvisí s nejmladší metamorfózou M4.

## 7. Diskuze

### 7. 1. Srovnání turmalínu ze svorů s turmalíny v turmalinitech

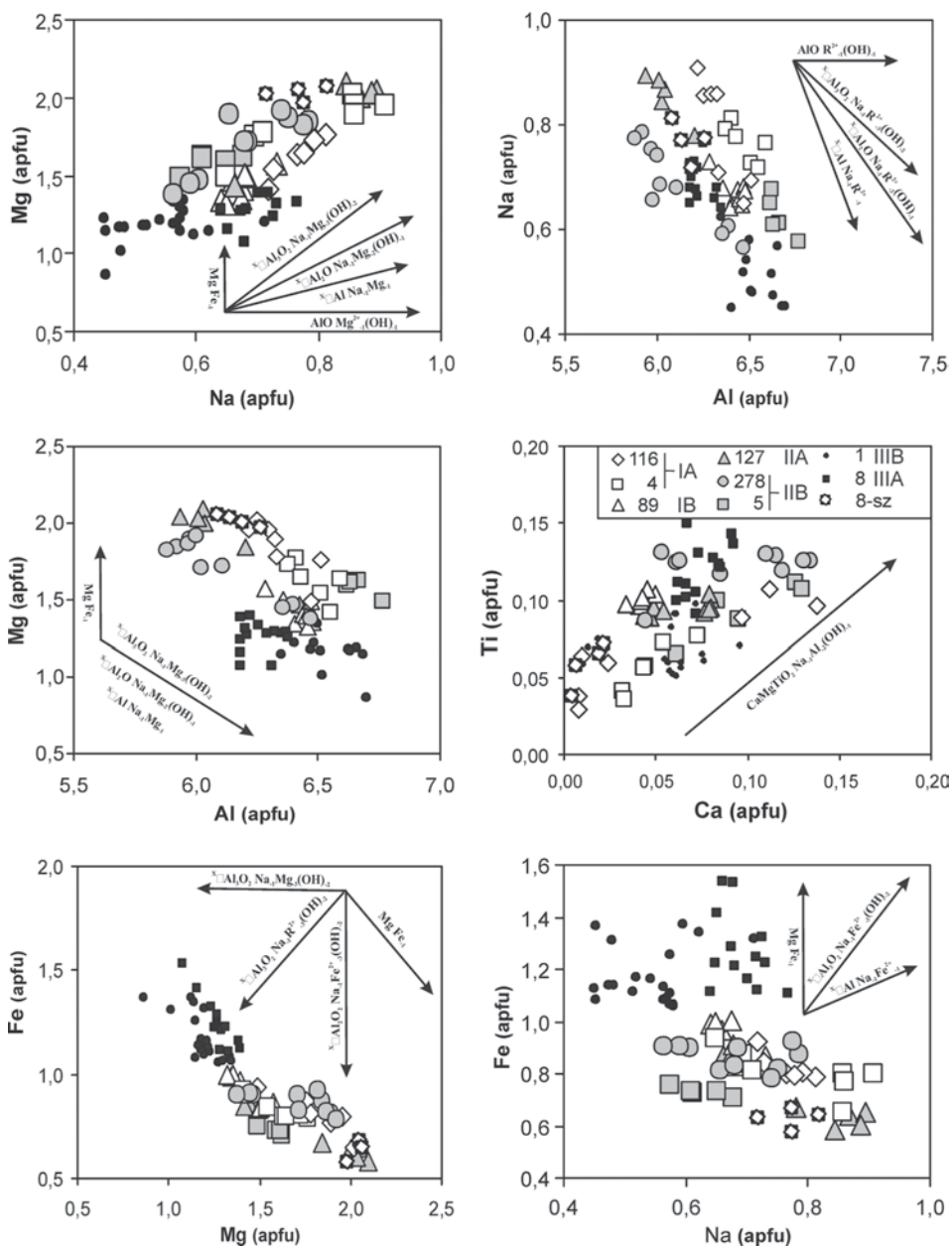
Chemické složení turmalínu ze svorů a chemické složení turmalínu z turmalinitů je si blízké. Stejně jako většina turmalínů v turmalinitech (obr. 5) mají turmalíny ve svorech v pozici X převahu Na a naprostá většina zrn má pozici Z plně obsazenou Al. U podstatné části turmalínu také převažuje Mg nad Fe.

V turmalínech z turmalinitů se podařilo vyčlenit tři zóny, které jsou patrné na všech studovaných lokalitách (ČOPIJKOVÁ *et al.* 2007). Vždy lze rozlišit jádro (I), lem jádra (II) a vnější zónu (III), která je objemově dominantní. Jádra turmalínu (zóna I) jsou chemicky značně nehomogenní a bez jasného trendu ve vývoji zónálnosti. Chemické složení turmalínu v jádrech odpovídá Al-bohatému skorylu až skoryl-dravitu ( $X_{\text{Fe}}$  0,47–0,85) s vysokou vakancí v pozici X. Hliník vstupuje částečně i do pozice Y, obvykle v rozmezí 0,21–0,66 apfu. Obsah Ti je střední (0,01–0,16 apfu), Ca se pohybuje obvykle do 0,15 apfu, ojediněle až 0,46 apfu a obsahy F mohou být vyšší (až 0,35 apfu). Turmalín tvořící lem kolem jader (zóna II) odpovídá dravitu ( $X_{\text{Fe}}$  0,22–0,49). Ve většině případů má pozici Z plně obsazenou Al, ale obsahy Al v pozici Y jsou nižší (do 0,37 apfu). Má ze všech zón nejvyšší obsahy F a to až 0,5 apfu. Vnější zóny (III) turmalínu jsou tvořeny homogenním skoryl-dravitem, avšak na jednotlivých lokalitách se průměrné  $X_{\text{Fe}}$  dosti liší (0,29–0,56). Pozice Z je ve velké většině analýz plně obsazena Al a část jej vstupuje do pozice Y (0,00–0,45 apfu). Obsahy F jsou střední 0,05–0,46 apfu. Významně se turmalínech z turmalinitů (ve všech rozlišených zónách) uplatňují dva substituční vektory ( $X_{\text{Al}} \square \text{OH Na}_1(\text{Mg, Fe})_{-1}\text{F}_{-1}$  a  $Y_{\text{Fe}} \text{Mg}_{-1}$ ).

Střední část zrna turmalínu ve svorech můžeme do určité míry přirovnat k zóně II v turmalinitech a okraje turmalínů ve svorech pak k okrajové zóně III v turmalinitech (ČOPIJKOVÁ *et al.* 2007). Avšak turmalíny z turmalinitů mají oproti turmalínům ze svorů obvykle vyšší obsahy F. Určitou výjimku tvoří pouze turmalíny ze svorů v blízkosti turmalinitů, které mají obsahy F blízké turmalínům z turmalinitů. Také obsahy Ca mohou být vyšší než ve svorech. Chemické složení turmalínu ve svorech je také řízeno poněkud jinými substitučními vektory než v turmalinitech. Strukturní vztahy také dokládají, že objemově dominantní turmalín (zóna III) z turmalinitů je mladší než většina zrn turmalínů ve svorech.

### 7. 2. Vliv chemického a minerálního složení svorů na chemické složení turmalínu

Okraje turmalínu jsou v chemické rovnováze s ostatními minerály v matrix svorů (HENRY a GUIDOTTI 1985). Ve středně metamorfovaných metapelitech platí, že  $X_{\text{Fe}}$  pro



Obr. 5. Rozsah chemického složení turmalínu (stejně symboly jako u obr. 4). Šipky reprezentují substituční vektory.

Fig. 5. Chemical variation of tourmaline from mica schists (the same symbols as in fig. 4). Arrows represent exchange vectors.

jednotlivé minerály je nejvyšší v granátu a v souladu s uvedeným pořadím v ostatních minerálech jeho hodnota klesá  $\text{Grt} > \text{St} > \text{Bt} > \text{Tu}$  (HENRY a GUIDOTTI 1985). Tato závislost byla pozorována i u našich studovaných vzorků (obr. 6). Avšak rozdíly mezi  $X_{\text{Fe}}$  biotitu a turmalínu ve skupině IA s minerální asociací  $\text{Grt}+\text{St}+\text{Ky}$  (0,13–0,14) a ve skupinách IIA a IIIA s minerální asociací  $\text{Grt}+\text{Sil}$  (0,03–0,06) mají odlišnou velikost. Rozdíl ve skupinách IB (0,03), IIB (0,02–0,06) a IIIB (0,01) je již méně patrný. Vývoj zonálnosti v turmalínu a granátu je v mnoha ohledech odlišný, avšak určité podobné znaky existují. V granátech i turmalínech skupin IA a IIIA směrem k okrajům Mg klesá a u skupiny IIA stoupá. Zonálnost Fe v granátu se chová stejně nebo opačně jako v turmalínu. U všech zrn turmalínů můžeme pozorovat střední část zrna, která je více nebo méně zřetelně ohraničena vůči zóně okrajové. Na okraji zrn je často pozorovatelná oscilační zonálnost. Složení okraje se oproti střední části zrna liší vyššími obsahy Fe a někdy také Al. Většinou mají okraje také nižší obsahy Mg, Na a Si. Rozdíly mezi turmalíny jednotlivých skupin nejsou příliš výrazné. Turmalín v minerální asociaci s granátem ve skupině I a II mívá ve střední části zrna vyšší obsahy Mg a Na. Turmalíny v asociaci se staurolitem mají poněkud vyšší obsahy Ti a Ca. Inkluze biotitu uvnitř granátu dokazují, že během růstu granátu se měnilo složení biotitu. Tyto inkluze mají oproti biotitu v matrix nižší  $X_{\text{Fe}}$  (0,43–0,56 vs 0,57–0,77).

Chemické složení turmalínu může poměrně dobře odrážet chemické složení okolní horniny (HENRY a GUIDOTTI 1985). Na základě srovnání chemického složení ze vzorků svorů svrateckého krystalinika s chemickým složením turmalínu se ukázalo, že toto nemusí vždy platit. Vzorky, z nichž byly provedeny celohorninové analýzy reprezentují typické svory svrateckého krystalinika. Obsahy  $\text{Al}_2\text{O}_3$  se pohybují kolem středních hodnot zjištěných ve svrateckém krystaliniku (16,3–20,8 hm. %) a poměry  $X_{\text{FeO}} = 6,9\text{--}8,0$  odpovídají průměrným hodnotám, nebo jsou nižší než průměrné hodnoty zjištěné ve svorech (obr. 6). Poměry  $X_{\text{FeO}}$  a  $X_{\text{Fe}}$  v hornině a turmalínu vykazují u svorů s minerální asociací  $\text{Ms}+\text{Bt}+\text{Tu}\pm\text{Ky}\pm\text{Grt}\pm\text{Sil}$  poměrně dobrou pozitivní korelaci. Avšak svor s minerální asociací  $\text{Ms}+\text{Bt}+\text{Tu}+\text{Ky}+\text{Grt}+\text{Sil}+\text{St}$  má v turmalínu nižší poměr  $X_{\text{Fe}}$ , než by odpovídalo poměru  $X_{\text{FeO}}$  v hornině (obr. 6).

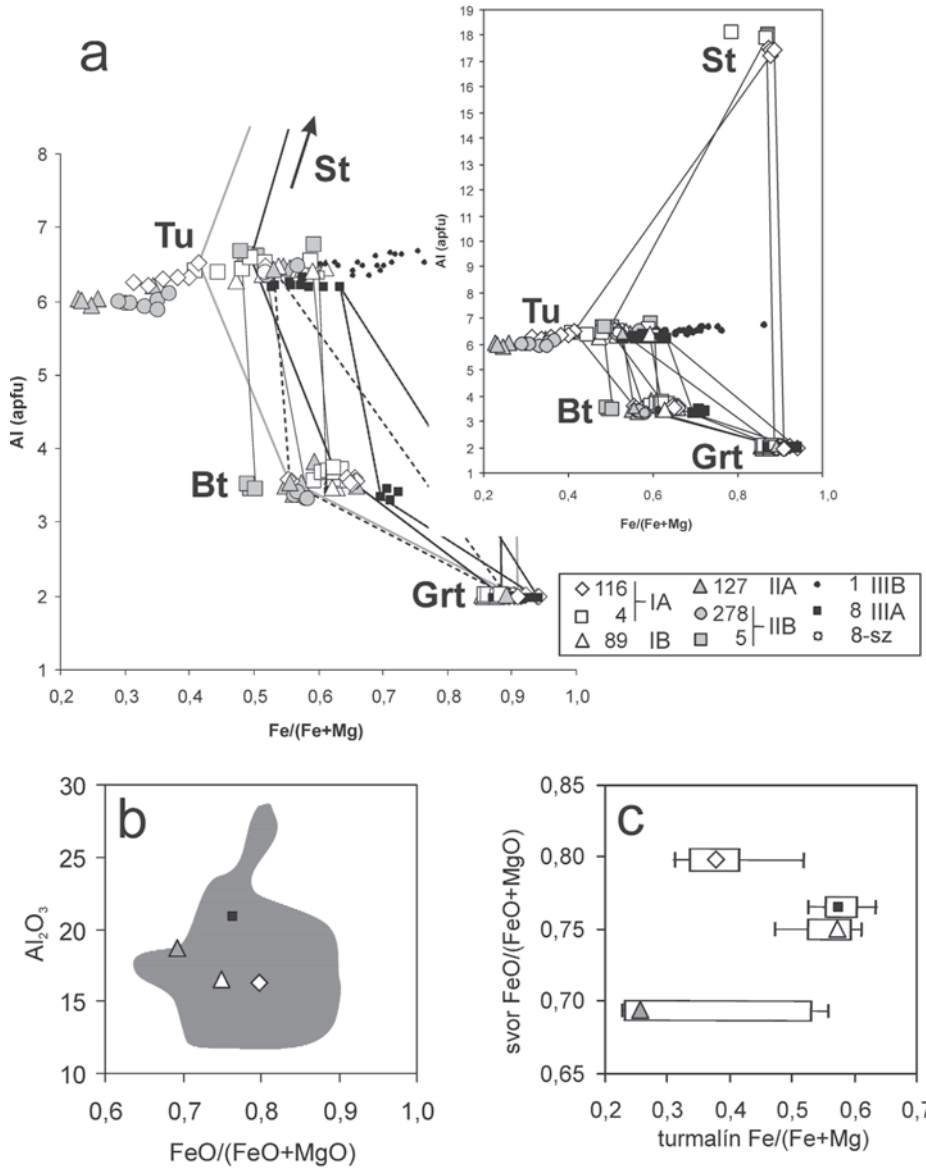
### 7. 3. Vznik a vývoj turmalínu ve svorech

Chemické složení turmalínu je do určité míry závislé na stupni metamorfózy. Střední část zrn turmalínu je patrně produktem progradní metamorfózy svorů. Jejich chemické složení se blíží složení turmalínu z metapelitů postížených metamorfózou v amfibolitové facii (HENRY a GUIDOTTI 1985). Změny v chemickém složení okrajů turmalínů ve svorech patrně souvisí s dekompresním rozpadem staurolitu během exhumace svrateckého krystalinika. Tato reakce konzumovala část muskovitu, což mohlo vést k uvolnění malého množství bóru (SCHREYER 2000).

Turmalinity vznikly metamorfózou B a F bohatého protolitu, který byl součástí původní vulkano-sedimentární série (ČOPIJKOVÁ *et al.* 2007). Jedním z hlavních důkazů je jejich sepětí s nedvědicími mramory. Výrazná zonálnost turmalínů ale nasvědčuje, že turmalinity prošly během metamorfózy relativně složitým vývojem. Anomální složení některých zón v turmalínu z turmalinitů a složení slíd v jejich okolí (vysoké obsahy F) může být důsledek interakce hornin na východním okraji svrateckého krystalinika s fluidy atypického složení (B a F bohaté). Anomální přítomnost velkého množství fluid s vysokým  $X_{\text{H}_2\text{O}}$  dokládá i minerální asociace samotných nedvědicích mramorů (HOUZAR *et al.* 2006). Na druhou stranu zdrojem B a F pro většinu svorů ve svrateckém krystaliniku byly patrně původní jílové minerály, slídy či případně detritické borosilikáty (HENRY a DUTROW 1996).

Turmalíny ze svorů a turmalíny z turmalinitů mají odlišný původ. Dobře je tato skutečnost patrná na svorech poblíž turmalinitů. Turmalíny v těchto svorech jsou produktem polyfázové krystalizace. Kolem staršího jádra roste mladší turmalín geneticky svázaný





Obr. 6. Chemické složení vybraných minerálů ze svorů a chemické složení svorů: (a) diagram Al vs. Fe/(Fe+Mg) pro vybrané minerály ze svorů; (b) chemické složení svorů v diagramu Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> - FeO<sub>total</sub>/(FeO<sub>total</sub>+MgO); (c) diagram znázorňující vusaté krabičky pro rozsah Fe/(Fe+Mg) v turmalínech vs. FeO/(FeO+MgO) v horninových analýzách ze svorů (stejně symboly jako u obr. 4).

Fig. 6. Chemical composition of selected minerals from mica schist and chemical composition of mica schist: (a) plot Al vs. Fe/(Fe+Mg) for selected minerals from mica schist; (b) chemical composition of mica schist in plot Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> - FeO<sub>total</sub>/(FeO<sub>total</sub>+MgO); (c) box whisker plot for Fe/(Fe+Mg) variation in tourmaline vs. FeO/(FeO+MgO) in whole rock analysis from mica schists (the same symbols as in fig. 4).

s turmalinity. Tato pozorování potvrzují údaje zjištěné v turmalinitech (ČOPIJKOVÁ *et al.* 2007). Starší skorylová jadra patrně reprezentují původní složení turmalinů před variskou metamorfózou (M3). Během metamorfózy však došlo k uvolnění velkého množství B a F bohatých fluid. Tato fluida mohou souviset s intruzí granitů (dnes metatexitů a diatexitů), nebo s rozpadem B a F bohatých minerálů v původní minerální asociaci turmalinitů (např. slíd). Tato fluida ovlivnila vývoj hornin podél celého východního okraje svrateckého krystalinika. Proto se patrně chemické složení turmalínu ze svorů při východním okraji svrateckého krystalinika (svory v okolí turmalinitů skupiny III) poněkud liší od složení turmalínu z ostatních svorů této jednotky. Rozdíly v obsazích F jsou patrné nejen v turmalínech, ale i v biotitech. Obsahy F v biotitech ze svorů různých částí svrateckého krystalinika jsou relativně nízké (0,01–0,69 hm. %) oproti biotitu ze svorů v okolí turmalinitů (0,06–1,42 hm. %) a samotných turmalinitů (již NĚMEC 1979).

## 8. Závěry

Přítomnost turmalínu v řadě horninových typů svrateckého krystalinika ukazuje, že B se účastnil většiny důležitých metamorfních i magmatických procesů při formování této jednotky. Zdrojem bóru byly patrně hlavně původní sedimenty, ale nemůžeme vyloučit ani další zdroje. Turmalíny ze svorů ve větší části svrateckého krystalinika a turmalíny z turmalinitů a svorů v jejich blízkosti vykazují rozdílnou zonálnost. Geneze obou skupin turmalinů je různá. Turmalíny ze svorů v okolí turmalinitů jsou výrazně ovlivněny mladšími fluidy, která se výrazně podílela na formování turmalinitů.

Chemické složení turmalínu výrazně závisí na minerální asociaci, s níž je v rovnováze. Studované turmalíny z celého krystalinika vykazují různé typy zonálností, které však zároveň vykazují řadu podobných znaků. Jádra většiny studovaných turmalinů jsou produktem progradní metamorfózy, při níž ve svorech vznikla minerální asociace  $Ms+Bt+Tu \pm Ky \pm St$ . Složení okraje se oproti střední části zrna liší vyššími obsahy Fe a velmi často také Al a jsou většinou ochuzeny Mg, Na, Si. Tato zonálnost patrně souvisí s exhumací a decompresním rozpadem staurolitu.

## PODĚKOVÁNÍ

Autoři děkují M. Novákovi za kritické přečtení rukopisu. Práce byla vypracována s finanční podporou projektu MŽP 6352: „Korelace litologicky kontrastních hornin v jednotkách krystalinika při sv. okraji moldanubika“ a záměru MK 00009482601.

## LITERATURA

- BLAZKOVÁ, Š., 2005: Metamorfní a strukturní vývoj skarnů v okolí Věcova. – *MS, PřF MU diplomová práce*, p 37, Brno.
- BURIÁNEK, D., 1999: Metamorfní charakteristika poličského krystalinika. – *MS, PřF MU diplomová práce*, p 67, Brno.
- BURIÁNEK, D., BRÍZOVÁ, E., ČECH, S., ČURDA, J., FŮRYCH, V., HANZL, 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, MŽP, Archiv ČGS*, p 89.
- BURIÁNEK, D., ČECH, S., VÍT, J., 2006: Základní geologická mapa České republiky 1:25 000, 24-112 Jedlová. – *MS, MŽP, Archiv ČGS*.
- ČOPIJKOVÁ, R., BURIÁNEK, D., ŠKODA, R., HOUZAR, S., 2007: Turmalinity jižní části svrateckého krystalinika. – *Acta Mus. Moraviae, Sci. geol.*, 92, 111–130.

- HANZL, P., HRDLÍČKOVÁ, K., VÍT, J., 2006: Základní geologická mapa České republiky 1:25 000, 24-132, Dalečín. - *MS, MŽP, Archiv ČGS.*
- HANZL, P., VÍT, J., 2005: Základní geologická mapa České republiky 1:25 000, 14-333, Svatka. - *MS, MŽP, Archiv ČGS.*
- 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 Mineralogy*, 33, 503-557.
- HENRY, D., GUIDOTTI, V. Ch., 1985: Tourmaline as a petrogenetic indicator mineral: an example from the staurolite-grade metapelites of NW Maine. - *Amer. Mineral.*, 70, 1-15.
- HOLLAND, T. J. B., POWELL, R., 1998: An internally consistent thermodynamic data set for phases of petrological interest. - *J. Metam. Geol.*, 16, 309-343.
- HOUZAR, S., NOVÁK, M., DOLEŽALOVÁ, H., HRAZDIL, V., PFEIFEROVÁ, A., 2006: Přehled mineralogie, petrografie a geologie nedvědicových mramorů, svratecké krystalinikum. - *Acta Musei Moraviae, Sci. geol.*, 91, 3-77.
- KRETZ, R., 1983: Symbols for rock-forming minerals. - *Amer. Mineral.*, 68, 277-279.
- MELICHAR, R., HANZL, P., VÍT, J., 2004: Základní geologická mapa České republiky 1:25 000, 24-111, Sněžné. - *MS, MŽP, Archiv ČGS.*
- MŘÁZOVÁ, Š., OTAVA, J., 2005: Základní geologická mapa České republiky ČR 1:25 000 list 13-444 Hlinsko. - *MS, MŽP, Archiv ČGS.*
- NĚMEC, D., 1979: Zinnbringende Orthogneise im Suden der Antiklinale von Svatka (nordwestlich Brno) und ihre Erzmineralisierung. - *Z. Geol. Wiss.*, 12, 1437-1447.
- NOVOTNÁ, B., 1987: Petrostrukturní analýza metamorfovaných hornin v okolí skarnového tělesa u Věchnova. - *MS, Diplomová práce, PřF UK, Praha.*
- PERTOLDOVÁ, J., 1986: Podmínky vzniku skarnu na ložiscích Pernštejn, Županovice, Nové Město pod Smrkem. - *MS, PhD Thesis, UK, p 86, Praha.*
- PITRA, P., GUIRAUD, M., 1996: Probable anticlockwise P-T evolution in extending crust: Hlinsko region, Bohemian Massif. - *J. Metam. Geol.*, 14, 49-60.
- POUCHOU, J. L., PICHOR, F., 1985: „PAP“ procedure for improved quantitative microanalysis. - *Microbeam Analysis*, 20, 104-105.
- SCHREYER, W., 2000: Is the partitioning of boron between tourmaline and muscovite dependent on the crystallization environment? - *J. Czech Geol. Soc.*, 45, 1-2, 13-20.
- SCHULMANN, K., KRÖNER, A., WENDT, I. J., HEGNER, E., KONOPÁSEK, J., LEXA, O., ŠTÍPSKÁ, P., 2005: Chronological constraints on the Palaeozoic evolution of the Variscan orogenic root system in the eastern Moldanubian zone of the Bohemian Massif. - *Amer. J. Sci.*, 305, 407-448.
- STÁRKOVÁ, I., MACEK, J., 1994: Geologická mapa ČR 1:50000, 24-13 Bystřice nad Pernštejnem. - ČGS, Praha
- ZRŮSTEK, V., 1967: Závěrečná zpráva o podrobném geologickém mapování v širším okolí Nového Města na Moravě (mezi Bystřicí nad Pernštejnem a Škrdlovicemi) za rok 1965-66. - *MS, Geofond Praha, P 21 993.*

