

MAFICKÉ ENKLÁVY V DIATEXITICKÝCH MIGMATITECH SVRATECKÉHO KRISTALINIKA

MAFIC ENCLAVES FROM THE DIATEXITE MIGMATITES
IN THE SVRATKA CRYSTALLINE COMPLEX

DAVID BURIÁNEK

Abstract

Buriánek, D., 2008: Mafické enklávy v diatexitických migmatitech svrateckého krystalinika, *Acta Mus. Moraviae, Sci. geol.*, 93, 137-150.

Mafic enclaves from the diatexite migmatites in the Svatka crystalline complex

Metatexite and diatexite migmatites are widespread in the Svatka crystalline complex (SCC). Their geochemical character is close to melts that originated by a dehydration melting of micas. Petrological and geochemical (Rb, X_{FeO} , W, Be, Sn) variations are result of fractional crystallization of the melt and variable degrees of melt-restite separation. Two distinct types mafic enclaves can be distinguished: (1) Biotite-rich enclaves with muscovite characterized by high content of REE, Y, Th, U, Zr, Hf, P and (2) Biotite to muscovite-biotite enclaves sometime with garnet or tourmaline characterized by low content of REE, Y, Th, U, Zr, Hf, P. Occurrence of the biotite-rich enclaves is in a good agreement with assumptions, that anatexis occurred principally through muscovite dehydration melting locally accompanied by biotite dehydration melting. The degree of melting during anatexis SCC based on the mineralogy and chemical composition of the metasedimentary rocks (especially Ti content in biotite). During exhumation SCC has been produced small amount of younger B-rich melt, which formed veinlets and small melt pockets in migmatites. These late stage partial melting is less effective then previous migmatitization and did not produce any significant restitic enclaves.

Key words: anatexis, restite, diatexite, dehydration melting, Svatka crystalline complex

David Buriánek, Česká geologická služba, Leitnerova 22, 658 59, Brno; david.burianek@geology.cz

1. Úvod

Otázka geneze migmatitů svrateckého krystalinika zůstávala po dlouhou dobu opomíjeným problémem. Někteří autoři tyto horniny označují jako ortoruly (NOVÁK *et al.* 1998), jiní se přiklání k názvu migmatity (MELICHAR *et al.* 2004). Tato rozpolcenost v terminologii je dána rozdílným charakterem těchto hornin na jednotlivých výchozech. Dokonce i v rámci jednoho výchozu mohou horniny této skupiny vypadat makroskopicky rozdílně. Někdy nacházíme střídání poloh, které můžeme označit jako melanosom a poloh odpovídajících leukosomu. Jindy je celý výchoz tvořen leukokratní horninou bez výrazného usměrnění („ortorulou“). Právě tyto migmatity někdy obsahují mafické enklávy. Vznik a pozice enkláv nebyly doposud studovány.

2. Geologická pozice

Svratecké krystalinikum je tvořeno pruhy migmatitů a metagranitů, které se střídají s pruhy svorů a pararul. Drobná tělesa amfibolitů, vápenatosilikátových hornin a mramorů jsou přítomna jen podružně. Svratecké krystalinikum představuje velmi vyvárou kontinentální kůru. Lze v něm rozlišit intruze granitů a starší metamorfní komplex. Obě tyto součásti byly postiženy metamorfózou a deformací během variské orogeneze. Typickým znakem tohoto komplexu je hojná přítomnost turmalínu.

Relikty nejstarší HP (kolem 12 kbar) metamorfózy (M1) se zachovaly v tělesech skarnů (PERTOLDOVÁ 1986). Poté následovala metamorfóza (M2) v PT podmínkách amfibolitové facie, která postihla všechny horniny svrateckého krystalinika a setřela většinu informací o starším metamorfním vývoji (MELICHAR *et al.* 2004). Nově vzniklý silimanit a slídy ve svorech jsou produktem metamorfózy M3 související s exhumací svrateckého krystalinika. PT podmínky vypočtené pro metamorfní fázi M3 se pohybují v rozmezí 580–650 °C a 6 kbar (BURIÁNEK *et al.* 2006).

Metagranity byly postiženy variskou orogenezí (M2). Magmatický původ horniny dokládá téměř automorfní omezení vyrostlic křemene a živců nápadně zejména v málo deformovaných partiích, dále výskytu tmavých xenolitů, četné autolity jemnozrnnějších variet, žilné proniky metagranitů do okolních hornin a jejich apliticko-pegmatitový žilný doprovod. Radiometrickým datováním (U-Pb) zirkonu ze silně deformovaných metagranitů bylo zjištěno stáří 515 ±9 a 1932 ±7 mil. let, z nichž první je interpretováno jako magmatické stáří intruze (SCHULMANN *et al.*, 2005). Většina těles metagranitů ve svrateckém krystaliniku je protažena souhlasně s jeho dominantní foliací směru SZ-JV.

Středně zrnité leukokratní až dvojslidné migmatity jsou charakteristickou horninou svrateckého krystalinika. Tvoří převážně deskovitá tělesa o různé mocnosti od prvních jednotek do stovek metrů mocná. Tělesa vystupují v celém svrateckém krystaliniku. Hranice s ostatními horninami jsou zpravidla ostré, ale lokálně jsou kontakty mezi metagranity a migmatity výrazně setřeny deformací. Strukturální vztahy naznačují že hrubozrnné metagranity intrudovaly do migmatitů (MELICHAR a HANŽL 2003). Avšak stáří migmatitů bylo určeno na 470 ±30 mil. let (SCHULMANN *et al.*, 2005) což je s těmito závěry v rozporu. Tento rozpor je patrně dán rozdílným stářím jednotlivých subtypů migmatitů. Jednotlivé vzorky migmatitů si jsou po stránce petrografického složení velmi podobné, avšak výrazně se liší po stránce texturní. Můžeme vedle sebe nalézt vzorky relativně bohaté biotitem s výrazným páskováním a leukokratní vzorky bez páskování v nichž je biotit zastoupen v obsazích do několika modálních %. Právě v těchto leukokratních horninách se vyskytují mafické enklávy.

Někdy je na výchozech patrné že do starších migmatitů intrudovala mladší borem bohatá tavenina. Dnes na výchozech tvoří drobné často jen několik dm velké leukokratní žilky a smouhy metagranitů s turmalínem.

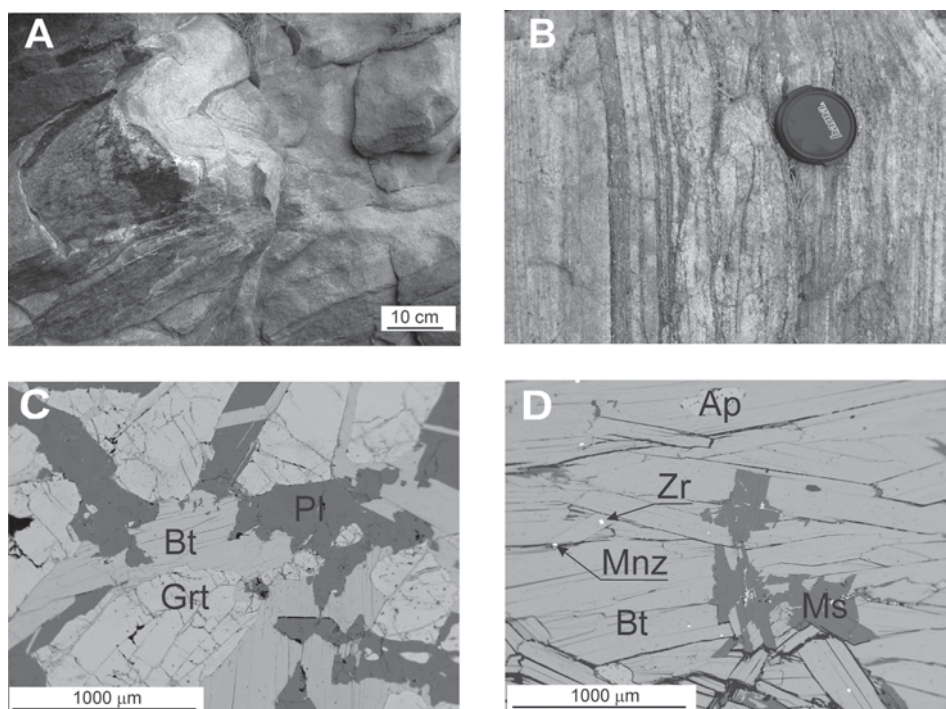
3. Metodika

Analýzy minerálů byly provedeny na elektronové mikrosondě Cameca SX-100 na Ústavu geologických věd PrF MU v Brně. Měření probíhalo ve vlnově disperzním módu za následujících podmínek: urychlovací napětí 15 kV, průměr elektronového svazku 5 μm, proud 30 nA, načítací čas 20 sekund, operátor R. Čopjaková. Jako standardu bylo užito (Ka X-ray linie): augit (Si, Mg), ortoklas (K), jadeit (Na), chromit (Cr), almandin (Al), andradit (Fe, Ca), rodonit (Mn), TiO (Ti). Empirické vzorce živců byl přepočteny na 8 atomů kyslíku. Krystalochemické vzorce slíd jsou vypočteny na 20O + 4OH + F, krystalochemický vzorec turmalínu na 31 aniontů přičemž ze stechiometrie byl dopočten B = 3, OH+F = 4 a krystalochemický vzorec granátu byl vypočten na 12O. Použité zkratky minerálů jsou podle KRETZE (1983). Větší část horninových analýz byla provedena metodou

ICP-MS v laboratořích Acme Analytic Laboratories Ltd., Vancouver, Kanada. Geochemická data byla přepočtena pomocí programu GCDkit (JANOŮSEK *et al.*, 2003). Do souboru geochemických dat byly zahrnuty vzorky ortorul a migmatitů, které byly shromážděny během projektu č. 6352 a 6438 a navazujících mapovacích prací D. Buriánka a P. Hanzla.

4. Petrografie

Hornina je převážně leukokratní a vytváří až několik m mocné polohy oddělené většími neprůběžnými pásy nebo čočkami tvořenými převážně biotitem a muskovitem o mocnosti maximálně několik dm. Někdy nejsou tyto enklávy a polohy přítomny a hornina má pak charakter leukokratních ortoruly. Takové horniny můžeme označit jako leukokratní diatexity (obr. 1A). Diatexity byly definovány jako horniny u nichž byla smazána stavba horniny před migmatitizací (BROWN 1997). Někdy se na výchozech střídají leukokratní pásy s nízkým obsahem biotitu s pásy, které mají vysoký obsah slíd. Pásy mají mocnost od několika mm po několik cm. Pásy se mohou lišit od leukosomu jen o několik modálních procent biotitu, nebo slídy převažují (melanosom). V takovém případě mluvíme o metatexitech (obr. 1B) tedy horninách, které si zachovaly strukturní znaky z období před migmatitizací (BROWN 1997).



Obr. 1. Stavba migmatitů a enkláv: (A) biotitové enklávy v diatexitu z lokality Malinská skála, (B) metatexit z lokality Trhonice, (C) BSE obrázek granátu, který je částečně zatlačován biotitem (enkláva v diatexitu z lokality Milovské Perničky), (D) BSE obrázek biotitické enklávy s velkým množstvím inkluzí akcesorických minerálů z lokality Malinská skála.

Fig. 1. Migmatite and enclave fabric: (A) biotite rich enclaves in diatexite from locality Malinská skála, (B) metatexite from locality Trhonice, (C) BSE image of garnet partially replaced by biotite (enclave in diatexite from locality Milovské Perničky), (D) BSE image of a biotite rich enclave with abundant accessory mineral inclusions from locality Malinská skála.

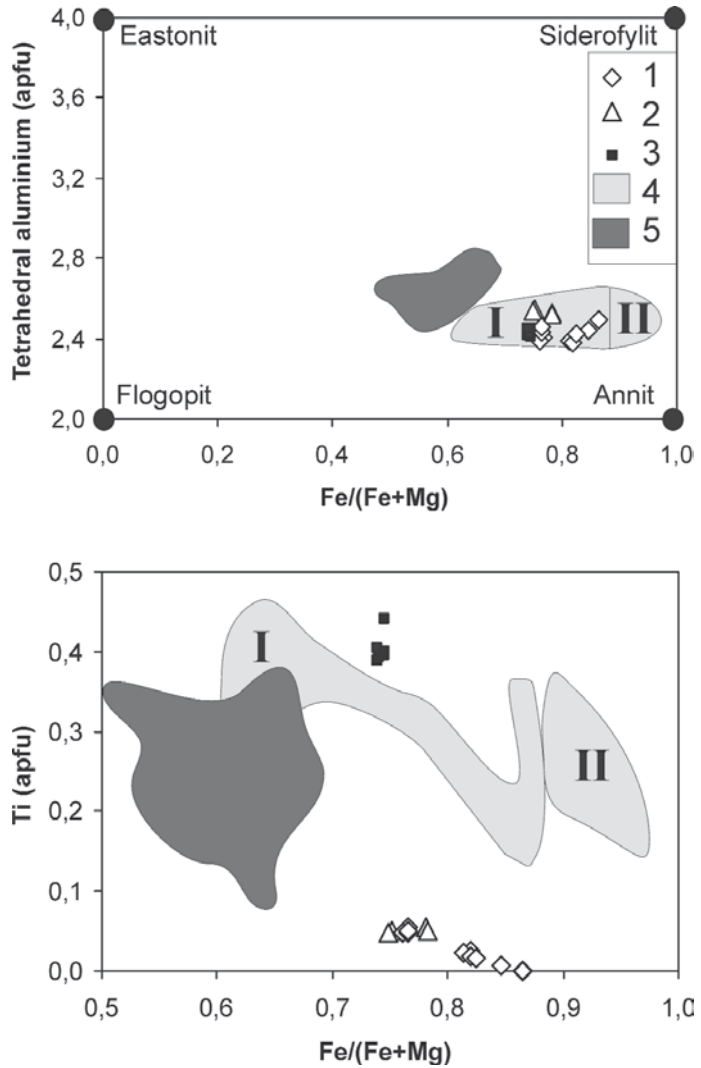
4.1 Diatexity

Diatexity jsou drobnozrné až středně zrnité. Struktura je granoblastická a přednostní orientace je nevýrazná nebo zcela chybí. Výrazně převažují světlé součásti nad tmavými (podíl tmavých součástí je většinou do 5 %). Křemen vytváří xenomorfní, většinou izometrická zrna. V některých vzorcích je patrné drcení a undulózní zhášení. Hypauto-morfní plagioklasy převládají nad xenomorfními draselnými živci. Plagioklasy odpovídají albitu (An_{1-11}) a obsahují až 0,03 apfu Ba. Vzácně bývají oscilačně zonální, ale většinou je na okraji vyvinuta tenká zóna téměř čistého albitu An_2 , která lemuje střední část zrna o bazicitě An_{6-11} . Střed zrna se vyznačuje oscilační nebo kontinuální zonálností s klesající bazicitou směrem k okraji této zóny. Plagioklasy bývají polysynteticky lamelované a většinou slabě zakalené jílovými minerály. Perthitické draselné živce mívají vyvinuto mikroklinové mřížkování. Draselné živce ($Or_{97-86} Ab_{3-14}$) obsahují až 0,15 apfu Ba. Některá zrna jsou poikiloblastická a uzavírají drobná oválná zrna křemene. Slídy jsou zastoupeny muskovitem a biotitem zhruba ve stejném poměru. Tvoří buď tenké lupínky ne-

Tabulka 1. Chemické složení biotitu v enklávách z lokalit: MP - Milovské Perničky a MS - Malinská skála.
Table 1. Chemical composition of biotite in enclaves from localities: MP - Milovské Perničky a MS - Malinská skála.

číslo	3MP	3MP	1MP	1MP	1MP	1MS	1MS
SiO ₂	35,12	35,04	35,34	35,52	34,79	35,67	35,52
TiO ₂	0,46	0,42	0,47	0,40	0,06	3,34	3,74
Al ₂ O ₃	19,30	18,66	17,77	18,17	19,02	16,47	16,64
FeO	26,53	26,36	27,13	26,44	28,09	25,36	25,21
MnO	0,27	0,40	0,37	0,37	0,53	0,25	0,29
MgO	4,17	4,96	4,65	4,65	2,86	4,86	4,84
CaO	0,01	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Na ₂ O	0,28	0,20	0,36	0,22	0,18	0,14	0,00
K ₂ O	9,39	9,23	9,32	9,36	9,39	9,36	9,49
F	1,30	1,49	-	-	-	-	-
H ₂ O*	3,20	3,10	3,79	3,80	3,75	3,82	3,83
O=F, Cl	0,55	0,63	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Celkem	99,49	99,25	99,19	98,94	98,68	99,27	99,57
Si	5,520	5,521	5,592	5,610	5,560	5,595	5,555
^{iv} Al	2,480	2,479	2,408	2,390	2,440	2,405	2,445
^{vi} Al	1,096	0,988	0,907	0,991	1,143	0,639	0,621
Ti	0,055	0,049	0,055	0,048	0,008	0,394	0,440
Fe	3,487	3,474	3,590	3,492	3,754	3,327	3,298
Mn	0,036	0,054	0,050	0,049	0,072	0,033	0,039
Mg	0,978	1,166	1,097	1,094	0,681	1,137	1,128
Ca	0,002	0,005	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Na	0,086	0,061	0,111	0,069	0,056	0,043	0,000
K	1,883	1,855	1,880	1,885	1,914	1,873	1,892
Σ Cat	15,622	15,651	15,691	15,629	15,627	15,447	15,418
OH*	3,352	3,260	4,000	4,000	4,000	4,000	4,000
F	0,648	0,740	-	-	-	-	-
O	20,000	20,000	20,000	20,000	20,000	20,000	20,000

Obr. 2. $^{IV}Al-Fe/(Fe+Mg)$ a $Ti-Fe/(Fe+Mg)$ diagram pro biotity v enklávách z diatexitů (1 a 2 - Milovské Perničky, 3 - Malinská skála), (4 I) v metatexitech až (4 II) diatexitech a (5) ve svorech a pararulách. Fig. 2. The $^{IV}Al-Fe/(Fe+Mg)$ diagram for biotite from enclaves in diatexites (1 and 2 - Milovské Perničky, 3 - Malinská skála), (4 I) metatexitos to (4 II) diatexitos, (5) mica schists and paragneisses.



bo jsou tlustě tabulkovité. Biotit (tab. 1) podle klasifikace TISCHENDORFA *et al.* (1997) chemicky odpovídá (obr. 2.) siderofylitu a hořečnatému siderofylitu (Al^{VI} 2,44–2,66 apfu; X_{Fe} 0,89–0,98). Některé geochemicky vysoce frakcionované vzorky mají relativně vysoké obsahy F (1,1–1,2 apfu). Muskovit X_{Fe} (0,74–0,85) většinou tvoří drobné lupínky. Turmalín často tvoří automorfní až hypautomorfní poikiloblasty o délce až několik mm, která uzavírají drobná zrnka křemene a živců (plagioklasu a draselného živce). Jindy se může koncentrovat do drobných nodulů o průměru až 2 cm nebo žilek. Nodule se skládají z hypautomorfního až xenomorfního turmalínu dále bývá přítomno proměnlivé množství živců a křemene. Turmalín (obr. 3B) odpovídá hliníkem bohatému skorylu (X_{Fe} = 0,93–0,96; Al = 6,39–6,51 apfu; Na = 0,67–0,83 apfu). Obsahy F se pohybují v rozmezí 0,2–0,3 apfu. Běžným akcesorickým minerálem je fluorapatit (F 0,8 apfu). V diatexitech nebyl na rozdíl od metatexitů nalezen granát (vyskytuje se pouze v enklávách).

4.2 Metatexity

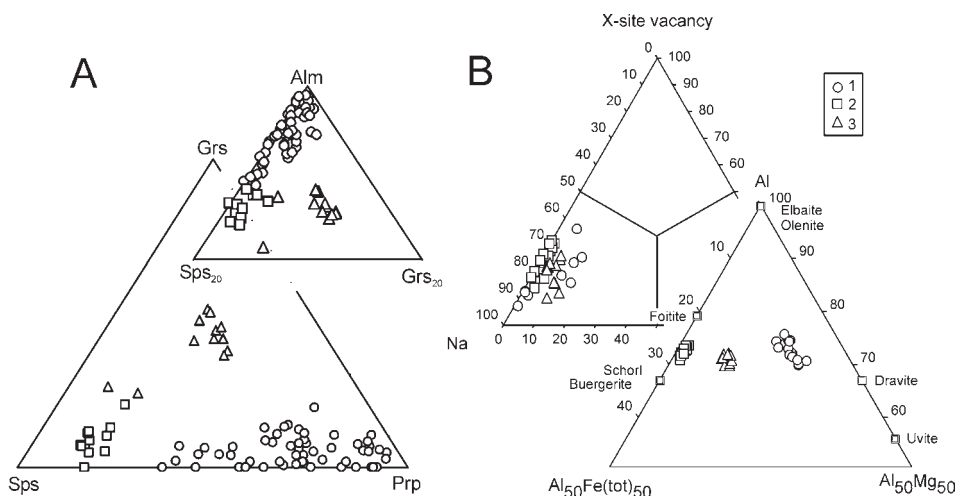
Metatexity jsou drobnozrnné až středně zrnité páskované horniny. Texturně tvoří na mnoha místech přechody do diatexitů. Struktura je granoblastická s výraznou přednostní orientací v slídami bohatých polohách. Křemen vytváří xenomorfní, většinou izometrická často undulózně zhášeující zrna. Hypautomorfní kyselé plagioklas (An₃₋₁₁) převládají nad xenomorfními draselnými živci. Většina zrn je oscilačně nebo kontinuálně zonální s klesající bazicitou směrem k okraji této zóny. Plagioklas bývají polysynteticky lamelované a slabě zakalené jílovými minerály, někdy sericitizované. Méně geochemicky frakcionované metatexity mohou obsahovat i plagioklas s bazicitou kolem An₁₆. Perthitické draselné živce (Or₉₇₋₈₆ Ab₃₋₁₄) mívají vyvinuto mikroklinové mřížkování. Muskovit a biotit tvoří izolované lupínky nebo dlouze lupenité agregáty. Biotit (tab. 1) podle klasifikace TISCHENDORFA *et al.* (1997) chemicky odpovídá (obr. 2.) siderofylitu a hořečnatému siderofylitu (Al^{VI} 2,43–2,64 apfu; X_{Fe} 0,62–0,87). Muskovit má poměrně široký rozsah X_{Fe} (0,43–0,72) v závislosti na stupni geochemické frakcionace. Turmalín je poměrně hojným akcesorickým minerálem v některých typech metatexitů. V metatexitech tvoří granát (Alm₈₀₋₈₃ Grs₁₋₃ Sps₁₀₋₁₄ Prp₂₋₃ Adr₂₋₃) drobná až 0,3 cm velká izometrická zrna, většinou situovaná ve slídami bohatých páscích (melanosom).

4.3. Enklávy

V diatexitech se často setkáváme s neprůběžnými protáhlými smouhami, šliry a enklávami tvořenými hlavně slídami. Jejich mocnost většinou nepřesahuje 50 cm a délka se pohybuje od několika dm po desítky metrů. Rozložení enkláv v diatexitech je značně nepravidelné. Nacházíme výchozy, kde se vyskytuje řada drobných enkláv, nebo naopak pouze jedna protáhlá enkláva. Na mnoha výchozech enklávy zcela chybí. Slídami bohaté enklávy v diatexitech byly studovány na dvou lokalitách Malínská skála (vzorky označené MS) a Milovské Perničky (vzorky označené MP) v obou případech jsou studované vzorky značně podobné. Obě lokality leží na geologické mapě 1:25000 list 24-111 Milovy (MELICHAR, *et al.* 2004). Tyto lokality leží východně a jihovýchodně od obce Křížánky a jsou součástí dvou těles migmatitů, které jsou odděleny pruhem svorů a pararul. Enklávy z obou lokalit jsou velmi podobné a skládají se hlavně z tlusté tabulkovitého biotitu (až 50 mod. %), muskovitu a křemene. Slídy jsou přednostně orientovány ve směru foliace a většinou výrazně převažuje biotit nad muskovitem. Někdy je na lokalitě Malínská skála střed enklávy s převahou biotitu lemován až několik cm mocným slidovým lemem s převahou muskovitu. Biotit (^{VI}Al 2,38–2,55 apfu; X_{Fe} 0,74–0,86) uzavírá rudní minerály, rutil, apatit a zirkon. Křemen tvoří xenomorfní převážně izometrická zrna. Hypautomorfní plagioklas je polysynteticky lamelovaný a bývá postižen sericitizací. Enklávy z obou lokalit se liší pouze obsahy vedlejších a akcesorických minerálů.

Enklávy z lokality Milovské Perničky někdy obsahují automorfní až hypautomorfní turmalín (X_{Fe} = 0,66–0,71; Al = 6,17–6,40 apfu; Na = 0,67–0,75 apfu) o velikosti až několika cm. Muskovit má poměrně homogenní složení X_{Fe} (0,60–0,61). Zcela vzácně byly nalezeny porfyroblasty granátu o velikosti až 2 cm. Tato zrna se jsou rozpraskány a prostory mezi jednotlivými segmenty granátu vyplňují žilky tvořené draselným živcem, plagioklasem a v podružném množství křemenem a biotitem (obr. 1C). Jednotlivé segmenty granátu jsou bez výrazné chemické zonálnosti (Alm₇₈₋₈₂ Grs₄₋₉ Sps₅₋₁₃ Prp₂₋₆ Adr₁₋₄). Biotit vyplňující prostor mezi segmenty granátu má vyšší X_{Fe} (0,82–0,86) než biotit v okolním restitu (X_{Fe} = 0,76–0,77).

Enklávy z lokality Malínská skála se podobají enklávám z lokality Milovské Perničky, avšak mají většinou poněkud vyšší obsahy muskovitu a neobsahují granát ani turmalín. Muskovit je oproti předchozí lokalitě charakterizován poněkud nižším X_{Fe} (0,55–0,58) stejně jako biotit (X_{Fe} = 0,74–0,75). Charakteristické je také vyšší zastoupení inkluzí akcesorických minerálů v biotitu (obr. 1D).



Obr. 3. (A) trojúhelníkové diagramy pro granát SpS₂₀-Alm-GrS₂₀, SpS-GrS-Prp a (B) trojúhelníkové diagramy pro turmalin vakance v pozici X-Na-Ca, Fe₅₀-Al-Mg₅₀ pro (1) svory až pararuly svrateckého krystalinika, (2) diatexity svrateckého krystalinika, (3) enklávy v diatexitu z lokality Milovské Perničky.

Fig. 3. (A) triangular plots of garnets SpS₂₀-Alm-GrS₂₀, SpS-GrS-Prp, and (B) X-Na-Ca, Fe₅₀-Al-Mg₅₀ for (1) mica schists and paragneisses SCC, (2) diatexite from SCC, (3) enclaves in diatexite from locality Milovské Perničky.

5. Geochemie migmatitů až ortorul a restitických enkláv

V klasifikaci Q-ANOR a Q-P odpovídají granitům až alkalicko-živcovým granitům (SiO₂ 71–78 %). Chemicky jde o středně draselné až šošonitické horniny s poměrem K₂O/Na₂O = 1–3. Ve srovnání s hodnotami uváděnými pro svrchní kůru (TAYLOR a McLENNAN, 1995) jsou metatexity a diatexity obohaceny o Ba, Sr, Ta, Nb, La, Ce, Zr, Ti a naopak obohaceny o Cs, Rb, K, P, Y, Tb, Tm, Yb (tab. 2). V Harkerových diagramech je patrná negativní korelace SiO₂ s Al₂O₃, MgO, TiO₂, CaO, FeO, Ba, Sr, Zr, Hf, Y, La, Ce (obr. 4). Obsahy REE se pohybují od 32 do 142 ppm. Trendy REE normalizované na chondrit (Boynton 1984) ukazují značnou podobnost u všech vzorků. Křivky REE jsou v oblasti HREE relativně ploché a vykazují zřetelnou frakcionaci LREE (La_n/Yb_n = 1–9). Typická je negativní europiová anomálie (Eu/Eu* = 0,1–0,9). U naprosté většiny vzorků se obsahy Sn pohybují v rozmezí 1–12 ppm. Obecně platí že s poklesem K/Rb rostou obsahy Sn, W a klesá obsah Ba, Sr, Y, REE.

Biotitem bohaté enklávy mají oproti migmatitům odlišné složení a vyznačují se hlavně vysokými obsahy MgO (2–4 hm. %), FeO (5–22 hm. %), K₂O (6–10 hm. %), Rb (1022–1515 ppm) a nízkými obsahy Na₂O (0,2–0,9 hm. %). Trendy REE (obr. 4) ukazují značnou podobnost s okolními metatexity (celkové obsahy REE jsou 20–40 ppm) pouze vzorek z lokality Malinská skála vykazuje podstatně vyšší obsahy REE (328 ppm) a výraznější obohacení o LREE (La_n/Yb_n = 8). Tento vzorek je také charakterizován oproti okolním metatexitům vysokými obsahy Zr, Nb, Y, U, Th, REE, P což je podle MEHNERTA a BÜSCHE (1982) typické pro restity. Pro všechny vzorky je typická záporná europiová anomálie (Eu/Eu* = 0,1–0,4).

6. Vztah mezi chemickým složením horniny a chemickým složením vybraných minerálů

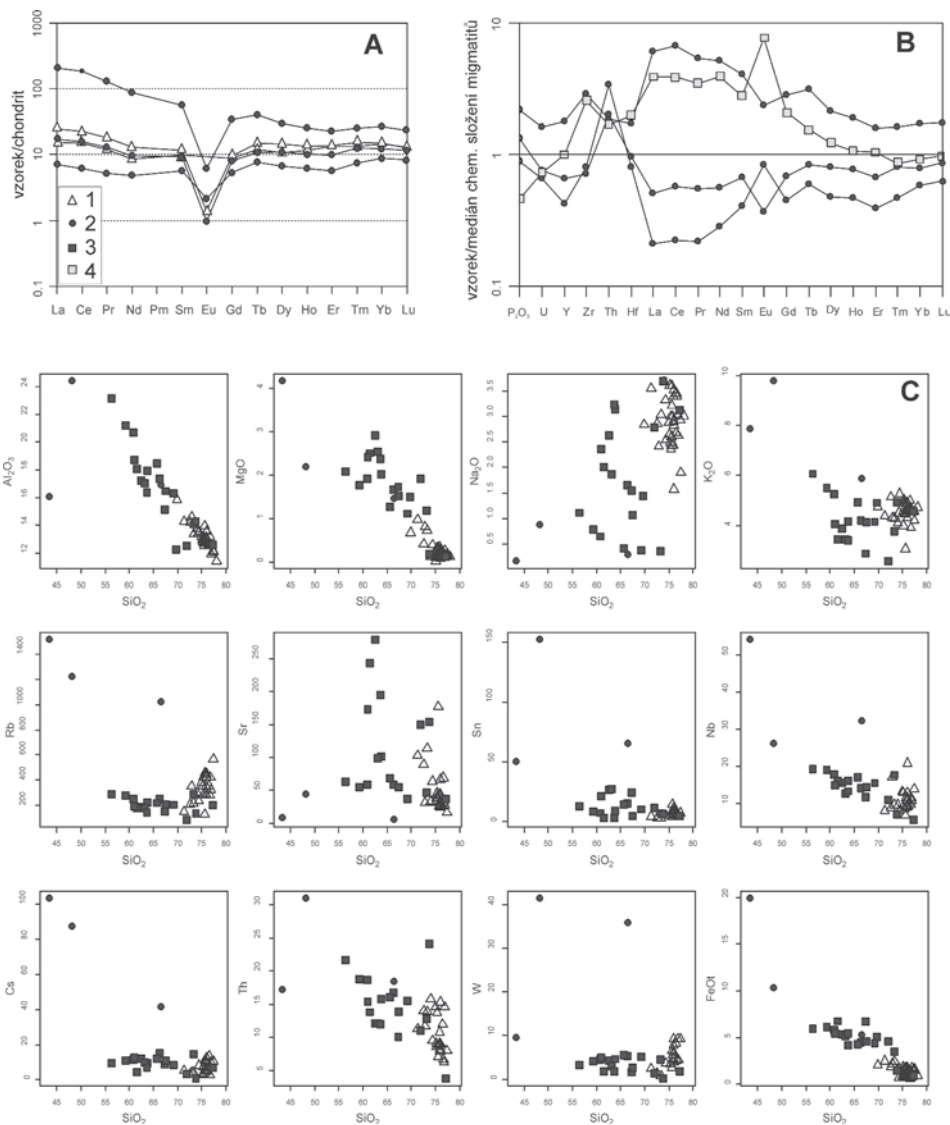
U studovaných vzorků migmatitů byly zjištěna poměrně dobrá korelace mezi klesajícím obsahem Ba a vzrůstajícím obsahem Rb a FeO_t/(FeO_t+MgO) v hornině a stoupa-

Tabulka 2. Chemické složení studovaných hornin.

Table 2. Bulk-rock chemical compositions of the investigated samples.

lokalita číslo hornina	Malínská skála		Milovské Perničky		
	2MS diatexit	1MS enkláva	5MP diatexit	1MP enkláva	2MP enkláva
SiO ₂	75,96	43,44	76,00	48,27	66,59
TiO ₂	0,10	3,57	0,09	0,19	0,10
Al ₂ O ₃	13,07	16,05	13,09	24,37	16,88
Fe ₂ O ₃	1,47	22,13	1,41	11,45	5,78
MgO	0,16	4,17	0,09	2,19	1,45
CaO	0,51	0,50	0,44	0,24	0,36
Na ₂ O	2,92	0,16	3,52	0,87	0,29
K ₂ O	4,73	7,88	4,59	9,78	5,86
P ₂ O ₅	0,28	0,51	0,26	0,21	0,31
Celkem	99,20	98,41	99,49	97,57	97,62
Ba	55,3	165,9	80,0	364,2	66,7
Ni	1,4	47,7	1,4	3,8	2,9
Rb	350,4	1515,8	448,1	1221,8	1022,5
Sr	29,0	8,6	24,6	43,6	4,8
V	5	310	> 5,00	11	11
Sn	9	50	11	152	65
Zn	17	225	24	112	111
U	4,5	9,1	5,8	3,7	4,2
Nb	10,7	54,1	11,4	26,1	32,1
Y	30,4	56,0	22,7	13,2	20,4
Zr	59,0	216,1	56,7	59,6	53,4
Pb	0,9	38,0	0,5	2,4	2,2
Cs	7,1	103,3	12,4	87,4	41,6
Th	8,1	17,1	7,9	31,0	18,4
Ta	0,9	5,9	2,1	6,0	9,0
Hf	2,6	5,6	2,9	2,6	3,1
Sc	4	28	4	12	13
Tl	0,4	5,8	0,4	3,4	1,5
W	4,8	9,4	9,3	41,5	35,9
Ga	22,6	57,7	21,5	56,6	45,9
La	7,7	64,1	4,7	2,2	5,3
Ce	18,2	150,1	12,2	5,0	12,7
Pr	2,21	15,73	1,47	0,64	1,6
Nd	7,8	52,7	5,2	2,9	5,7
Sm	2,3	11,1	1,9	1,1	1,8
Eu	0,1	0,45	> 0,05	0,16	0,07
Gd	2,48	8,84	2,29	1,38	2,12
Tb	0,7	1,92	0,56	0,36	0,51
Dy	4,65	9,57	3,42	2,13	3,57
Ho	0,97	1,82	0,84	0,44	0,73
Er	2,88	4,82	2,79	1,19	2,05
Tm	0,5	0,82	0,43	0,24	0,41
Yb	3,11	5,57	3,01	1,87	2,55
Lu	0,41	0,76	0,42	0,27	0,37

jícím X_{Fe} v biotitu (X_{Fe} 0,62-0,98). Se růstem X_{Fe} klesá množství Ti, roste F v biotitu a obsahy tetraedrického hliníku se příliš nemění. V jednotlivých vzorcích pozorujeme, že obsah fluoru se vzrůstajícím X_{Fe} systematicky klesá. Chemické složení biotitů v metatexi-



Obr. 4. Chemické složení (1) diatexitů a metatexitů, (2) enklav v diatexitech, (3) svorů a pararul, (4) medián hodnot chemického složení 19 vzorků svorů ze svrateckého krystalinika: (A) chondritem normalizované REE křivky (BOYNTON, 1984) pro diatexitu a asociované enklávy, (B) obsah vybraných prvků, normalizovaných obsahem těchto prvků v metatexitech a diatexitech (medián z 42 vzorků), (C) harkerovy diagramy hm. % SiO₂ vs. Al₂O₃, MgO, Na₂O, K₂O, FeO_{total} (hm. %) a Rb, Sr, Sn, Nb, Cs, Th, W (ppm).

Fig. 4. Chemical compositions (1) diatexites and metatexites from SCC, (2) enclaves in diatexites, (3) mica schists and paragneisses, (4) median for 19 samples mica schists and paragneisses: (A) chondrite-normalized REE patterns (BOYNTON, 1984) for diatexites and associated enclaves, (B) abundance of selected elements, normalized to abundance in diatexites and metatexites (median for 42 samples), (C) Harker's variation diagrams wt. % SiO₂ vs. Al₂O₃, MgO, Na₂O, K₂O, FeO_{total} (wt. %) and Rb, Sr, Sn, Nb, Cs, Th, W (ppm).

tech, diatexitech a enklávách je řízeno substitucemi Fe Mg₁ a TiR Al₂, ale není zde přítomna tschermakitová substituce AlAl Mg₁Si₁.

Biotity v enklávách (^{VI}Al 2,38–2,55 apfu; X_{Fe} 0,74–0,86; Ti 0,00–0,44 apfu) se svým chemickým složením blíží spíše biotitům z okolních metatexitů a diatexitů (^{VI}Al 2,38–2,66 apfu; X_{Fe} 0,60–0,98; Ti 0,15–0,45 apfu) než biotitům ze svorů svrateckého krystalinika (^{VI}Al 2,44–2,82 apfu; X_{Fe} 0,49–0,69; Ti 0,37–2,09 apfu). Biotity ze slídamí bohatých enkláv s granátem mají nižší obsahy Ti než biotity z diatexitů. Právě v těchto enklávách byly nalezeny až několik cm dlouhé sloupce turmalínu. Enkláva bez reliktní granátu měla biotit s obsahy Ti a Al srovnatelné s metatexitu. Obsahy F v biotitech z enkláv se pohybují v rozmezí 1,3–1,5 hm. %. Tyto obsahy jsou vyšší než metatexitech, ale nedosahují hodnot nejvýrazněji geochemicky frakcionovaných vzorků diatexitů (F = 0,2–2,4 hm. %.).

Granáty z biotitem bohatých enkláv je poměrně vzácný, pokud je přítomen tvoří až několik cm velká izometrická zrna částečně zatlačovaná biotitem. Od granátu ze svorů svrateckého krystalinika (Alm_{79–87} Grs_{0–3} Sps_{1–12} Prp_{7–17} Adr_{0–3}) se liší nižším obsahem Mg a vyšším obsahem Ca (obr. 3A). Granát z enkláv se také liší od granátu v metatexitech a to vyššími obsahy Ca a nižšími obsahy Mn.

Turmalín se vyskytuje v diatexitech stejně jako v biotitických enklávách a je také běžným akcesorickým minerálem v mnoha svorech. Chemické složení těchto turmalínů se liší. Turmalín v biotitických enklávách je skoryl s X_{Fe} mezi 0,66 až 0,71. Toto složení neodpovídá hořčíkem bohatým turmalínům ze svorů ani železem bohatými turmalíny z diatexitů (obr. 3B). Obsahy hliníku a sodíku v turmalínech z enkláv jsou srovnatelné s obsahy těchto prvků v obou jmenovaných skupinách. Turmalín tvoří někdy automorfní sloupce, nebo vějířovité agregáty a nevykazuje žádnou výraznou chemickou zonálnost. Jeho chemické složení naznačuje že vznikl v důsledku reakce mezi magmatickými fluidy z diatexitů a minerály tvořícími enklávu.

7. Geneze biotitem bohatých enkláv

Studované metatexity a diatexity jsou peraluminické, což indukuje přítomnost turmalínu a granátu v některých vzorcích. Svým geochemickým charakterem se blíží taveninám vzniklým dehydratačním tavením slíd a na základě poměrů CaO/Na₂O a Al₂O₃/TiO₂ (SYLVESTER, 1998) odpovídají taveninám vzniklým převážně z metapelitů. Poměry Rb/Sr v metatexity a diatexity mohou kolísat mezi 1–18, s mediánem hodnot kolem 8, vzácně s anomální hodnotou 36 z lokality Odranec (jde o výrazně geochemicky frakcionovanou horninu). Zjištěné poměry Rb/Sr >5 jsou většinou typické pro taveniny vzniklé dehydratačním tavením muskovitu (INGER, HARRIS, 1993).

Ve studované skupině migmatitů pozorujeme známky nepříliš výrazné geochemické frakcionace. Tuto skutečnost můžeme vysvětlit rozdílným stupněm oddělení taveniny od restitické fáze během dehydratačního tavení a frakční krystalizací výsledné taveniny (SAWYER, 1996; HARRIS a INGER, 1992, MILORD *et al.* 2001).

Chemické složení biotitem bohatých enkláv a okolních diatexitech bylo studováno na dvou lokalitách: Milovské Perničky a Malinská skála. V obou případech jsou uloženy v leukokratních diatexitech (do 10 modálních % biotitu). Mají velmi podobnou mineralogii a i chemické složení. Oproti okolním diatexitům jsou enklávy obohaceny na Fe, Ti, Al, Mn, Mg, K, Rb, Sn, W, Nb, Cs, Th, Ta. Zvýšené obsahy většiny těchto prvků souvisí s vysokým obsahem biotitu v enklávách. Oproti okolním diatexitům jsou tyto horniny ochuzeny o Na a často také Sr. Tuto skutečnost můžeme vysvětlit nízkým obsahem živců zejména plagioklasů. Chemické složení popisovaných enkláv je velmi podobné chemickému složení restitů, mafických slírů a diatexitů, které vznikají během parciálního tavení metapelitů (MILORD *et al.* 2001, GÓMEZ a ALONSO 2000)

Přestože studované enklávy mají podobné petrografické složení, najdeme mezi nimi řadu odlišností v chemickém složení. Některé rozdíly v obsazích Si, Al, Fe, Mg, K, Ba, Sr a Cs mezi enklávami z Milovských Perníček (MP1 a 2) můžeme vysvětlit rozdílným poměrem mezi obsahem slíd, plagioklasu a křemene. Avšak odlišnosti v chemickém složení enkláv mezi jednotlivými studovanými lokalitami takto vysvětlit nelze. V enklávě z lokality Malínská skála se koncentrují akcesorické minerály jako je zirkon, xenotim a monazit. Tato skutečnost se projevuje zvýšenými obsahy P, Zr, Hf, Th Y REE. Velmi zajímavé jsou také vysoké obsahy Ni (48 ppm) a V (310 ppm). V enklávách z Milovských Perníček jsou obsahy těchto prvků podobné, nebo jen mírně zvýšené oproti hodnotám z okolních diatexitů.

Ve srovnání se svory a pararulami svrateckého krystalinika má enkláva z lokality Malínská skála vyšší obsahy K, Al, Fe, Mg, P, a většiny REE. Obsahy těchto prvků v enklávách z Milovských Perníček jsou vyšší nebo srovnatelné s obsahy ve svorech a pararulách svrateckého krystalinika. Obsahy Rb a Nb, Ta, Sn, W jsou ve všech studovaných enklávách vyšší než ve svorech až pararulách svrateckého krystalinika. Také chemické složení granátů z enkláv je jiné než ve svorech nebo pararulách. Enklávy tedy rozhodně nemůžeme vysvětlit jako xenolity okolních svorů.

Odlišné chemické složení enkláv ze dvou studovaných lokalit naznačuje, že jejich geneze je rozdílná. Všechny enklávy mají oproti většině okolních metasedimentů i metatexitů a diatexitů vysoké poměry K/Na, Rb/Sr Th, Sn, W, Nb, Cs, Ta. Avšak pouze enkláva z lokality Malínská skála (1MS) má zároveň vysoké obsahy Ti, Zr, Hf, Y, P, REE. Tyto charakteristiky jsou typické pro restity vzniklé dehydratačním tavením slíd (BEA 1996, ZENG et al. 2005), avšak podobné horniny mohou vznikat i jako magmatické kumuláty (DORAIS et al. 1997). Biotit v této enklávě má chemické složení, které se blíží chemickému složení biotitu z metatexitů (relativně vysoké obsahy Ti, Al a nízké obsahy Mn). Tato enkláva tedy patrně vznikala v souvislosti s dehydratačním tavením muskovitu (muskovit + plagioklas + křemen = sillimanit + draselný živec + biotit + tavenina; THOMPSON a TRACY 1979). Draselný živec a sillimanit během regionální metamorfózy reagovaly za vzniku muskovitu.

Poněkud odlišné chemické složení mají enklávy z lokality Milovské Perničky u kterých jsou obsahy REE, U, Y, Zr nižší než medián hodnot obsahů v metatexitech a diatexitech. Chemické složení biotitu z těchto enkláv se od biotitů z okolních metatexitů liší pouze nižším obsahem Ti. Relikty granátů mají oproti granátům z metatexitů i granátům ze svorů až pararul zvýšené obsahy Grs komponenty. Enklávy by tedy mohly původně reprezentovat granátem bohatý restit. Pravděpodobně tato hornina vznikla jako produkt rozpadu biotitu ($Bt+Pl+Sil+Qtz = Kfs\pm Grt\pm Cdr+Pl+tavenina$, STEVENS et al. 1997). Pokud by ve výsledném restitu převažoval granát, měl by mít zvýšené obsahy Y a HREE (BEA 1996). Avšak tato skutečnost se nepotvrdila. Restit byl patrně z velké části tvořen cordieritem a sillimanitem, které mají obsahy REE, Y, U a Th nízké (BEA 1996). Cordieritem bohaté restity jsou typické pro tavení metapelitů za nízkých tlaků, s vysokým obsahem Al a poměrem $Mg/(Mg+Fe)$ (STEVENS et al. 1997). Biotit patrně vznikl v důsledku reakce restitických minerálů s okolní taveninou, nebo během regionální metamorfózy v amfibolitové facii. Skutečnost, že biotit zde vznikal na úkor dvou různých minerálů potvrzuje i jeho chemické složení (dvě skupiny biotitů, které se liší obsahem X_{Fe} a Ti). Granát a biotity neobsahují žádné inkluze akcesorických minerálů, které by byly nositeli REE nebo Y. Právě akcesorické minerály jsou tím nejpodstatnějším faktorem, kontrolujícím obsahy REE a Y v restitech (BEA 1996, GÓMEZ a ALONSO 2000).

Enklávy ze dvou různých lokalit reprezentují produkty různého stupně dehydratačního tavení během regionální migmatitizace hornin svrateckého krystalinika. Během kambria až ordoviku prodělala tato jednotka výraznou regionální metamorfózu spojenou s intenzivním dehydratačním tavením. Tento proces nebyl v celém krystaliniku stejně intenzivní. Kromě reakcí produkujících taveninu v důsledku rozpadu muskovitu tu proběhly i dehydratační reakce konzumující biotit. Avšak často nebyl rozpad biotitu úplný v dů-

sledku stabilizace tohoto minerálu vyššími obsahy některých stopových prvků jako je například Ti (STEVENS et al. 1997). Proto vznikaly restitické enklávy (viz. tab. 2, MS) bohaté biotitem (\pm Kfs, \pm Sill). Tento biotit obsahoval četné inkluze akcesorických minerálů jako je zirkon, monazit a další. Tak byly tyto akcesorické minerály izolovány od taveniny a výsledný restit je bohatý na REE, Y, Th, U.

Na druhé studované lokalitě (viz. tab. 2, MP) bylo dehydratační tavení intenzivnější a vznikly restity typické pro dehydratační tavení biotitu. Tyto restity tvořené původně převážně cordieritem a granátem měly oproti okolním diatexitům stejné, nebo dokonce nižší obsahy REE Y, Th, U. Během rozpadu biotitu při dehydratačním tavení totiž tavenina absorbovala i akcesorické minerály uzavřené v biotitech z původních metapelitů. Výsledné restity mají oproti okolním diatexitům poněkud nižší obsahy REE (zejména LREE) což souvisí s přítomností granátu v těchto horninách.

Presto, že metatexity a diatexity představují geochemicky relativně homogenní skupinu hornin, nejsou produktem jednoho procesu. Svědčí o tom nejen jejich texturní rozrůzněnost, ale někdy můžeme rozpoznat nejméně dvě generace těchto hornin. Na některých výchozech totiž pozorujeme neostrý intruzivní kontakt mezi drobnými žilkami a ččkami turmalinických ortorul (mladší bórem bohaté taveniny) a staršími muskovit-biotitickými metatexity a diatexity. Tyto výskyty dokládají, že k parciálnímu tavení hornin svrateckého krystalinika došlo nejméně dvakrát. Mladší fáze parciálního tavení patrně proběhla během exhumace hornin svrateckého krystalinika. V důsledku dekomprese a možná také přínosu bórem bohatých fluid se z hornin uvolnilo jen malé množství taveniny. Tento proces nevyprodukoval enklávy s restitickým složením. Protože tato tavenina bohatá bórem měla poměrně nízkou viskozitu vznikaly tak drobné žilky nebo smouhy (často v tlakovém stínu) turmalinických granitů. Tyto horniny byly stejně jako okolní migmatity postiženy deformací.

8. Závěry

Metatexity a diatexity představují hlavní horninový typ v svrateckém krystaliniku. Geochemicky a petrograficky je tato horninová skupina poměrně homogenní. Terénní pozorování však potvrzují, že vznikly polyfázově a to nejméně během dvou etap vývoje svrateckého krystalinika. Během starší fáze byla větší část hornin této jednotky postížena parciálním tavením. Během mladší fáze vzniklo menší množství bórem bohaté taveniny. Geochemický charakter naznačuje, že většina studovaných migmatitů je produktem muskovitového dehydratačního tavení, avšak část dosáhla dokonce podmínek biotitového dehydratačního tavení metapelitů. Parciální tavení během kambria a ordoviku tedy nepostihlo celé krystalinikum stejně intenzivně. Intenzita tavení mimo jiné závisela i na složení protolitu (např. obsahy Ti v biotitu). Metatexity a diatexity nesou známky geochemické frakcionace, která se projevuje růstem obsahu SiO_2 , Rb, X_{FeO} , W, Be a Sn a zároveň poklesem obsahu Ba, Sr, Mg, Ca. Tuto skutečnost patrně můžeme vysvětlit procesy během segregace a krystalizace peraluminické taveniny. Biotitem bohaté enklávy představují restity po dehydratačním tavení. Na základě odlišností v chemickém složení můžeme vyčlenit dva typy enkláv s odlišnou genezí. První skupinu tvoří muskovit-biotitické enklávy charakterizované vysokými obsahy REE, Y, Th, U, Zr, Hf, P, které jsou produktem dehydratačního tavení muskovitu. Druhou skupinu tvoří biotitické až muskovit-biotitické enklávy, někdy s granátem nebo turmalinem, pro něž jsou typické naopak nízké obsahy REE, Y, Th, U, Zr, Hf, P. Tyto enklávy patrně vznikly jako restity bohaté cordieritem, granátem a sillimanitem a to v důsledku dehydratačního tavení biotitu. Teprve později byla větší část minerální asociace této druhé skupiny restitů nahrazena biotitem. Rozdílný stupeň parciálního tavení na dvou velmi podobných lokalitách, které se nachází velmi blízko sebe patrně ne-

můžeme vysvětlit odlišnými PT podmínkami. Pravděpodobně je výsledkem odlišnosti v mineralogii a to zejména v chemickém složení biotitu (především obsahy Ti).

Během mladší fáze parciálního tavení vznikaly lokálně v migmatitech drobné žilky a kapsy taveniny bohaté borem. Toto tavení ale neprodukovalo restitické enklávy.

PODĚKOVÁNÍ

Autor děkuje I. Broskovi za kritické pročtení rukopisu. Práce byla vypracována s finanční podporou projektu MŽP 6352: Korelace litologicky kontrastních hornin v jednotkách krystalinika při sv. okraji moldanubika a grantového úkolu GAČR 205/05/P223: Geneze peraluminických granitů moldanubika.

LITERATURA

- BEA, F., 1996: Residence of REE, Y, Th and U in granites and crustal protoliths; implications for the chemistry of crustal melts. - *J. Petrol.*, 37, 521-552.
- BOYNTON, W. V. 1984: Cosmochemistry of the rare earth elements: meteorite studies. Rare Earth Element Geochemistry. - *Developments in Geochemistry 2* (Henderson, R., ed.), 89-92, Elsevier, Amsterdam.
- BURIÁNEK, D., BRÍZOVÁ, E., ČECH, S., ČURDA, J., FÜRYCH, V., HANŽL, P., KIRCHNER, K., LYSENKO, V., ROŠTÍNSKÝ, P., RÝDA, K., SKÁČELOVÁ, D., SKÁČELOVÁ, Z., VERNER, K., VÍT, J. 2006: Vysvětlivky k základní geologické mapě ČR 1:25 000 24-112 Jedlová. - MŽP, Archiv ČGS.
- DORAIS, M. J., LIRA, R., CHEN, Y., TINGEY, D., 1997: Origin of biotite-apatite-rich enclaves, Achala batholith, Argentina. - *Contrib. Mineral. Petrol.*, 130, 31-46.
- DORAIS, M. J., LIRA, R., CHEN, Y., and TINGEY, D., 1997: Origin of biotite-apatite-rich enclaves, Achala batholith, Argentina. - *Contrib. Mineral. Petrol.*, 130, 31-46.
- GOMEZ, M. D. P., ALONSO, M. D. R., 2000: Duality of cordierite granites related to melt-restite segregation in the Pena Negra anatectic complex, central Spain. - *Canad. Mineralogist*, 38, 1329-1346.
- HARRIS, N. B. W., INGER, S., 1992: Trace element modelling of pelite-derived granites. - *Contrib. Mineral. Petrol.*, 110, 46-56.
- INGER, S., HARRIS, N., 1993: Geochemical constraints on leucogranite magmatism in the Langtan Valley, Nepal Himalaya. - *J. Petrol.*, 34, 345-368.
- JANOUSEK, V., FARROW, C. M., ERBAN, V., 2003: GCDkit: new PC software for interpretation of whole-rock geochemical data from igneous rocks. - *Geochim. Cosmochim. Acta* 67: 186.
- MEHNERT, K. R., BÜSCH, W., 1982: The initial stage of migmatite formation. - *N. Jb. Mineral. Abh.* 145: 211-238.
- MELICHAR, M., HANŽL, H., 2003: Stop 5 - Svatka. - *Geology without frontiers - Excursion Guide*, 55-59.
- MELICHAR, R., BURIÁNEK, D., BRÍZOVÁ, E., BURIÁNKOVÁ, K., ČURDA, J., FÜRYCH, V., HANŽL, P., KIRCHNER, K., LYSENKO, V., MRNKOVÁ, J., ROŠTÍNSKÝ, P., RÝDA, K., SKÁČELOVÁ, Z., VÍT, J., 2004: Vysvětlivky k základní geologické mapě ČR 1:25 000, 24-111 SNĚŽNÉ. - p 63, MS, Český geologický ústav, Praha.
- MILORD, I., SAWYER, E. W., BROWN, M., 2001: Formation of diatexite migmatite and granite magma during anatexis of semi-pelitic metasedimentary rocks: an example from St. Malo, France. - *J. Petrol.*, 42, 487-505.
- NOVÁK, M., SELWAY, J. B., HOUZAR, S., 1998: Potassium-bearing, fluorine-rich tourmaline from metamorphosed fluorite layer in leucocratic orthogneiss at Nedvedice, Svatka Unit, western Moravia. - *J. Czech Geol. Soc.*, 43, 37-44.
- PERTOLDOVÁ, J., 1986: Podmínky vzniku skarnů na ložiskách Pernštejn, Županovice a Nové Město pod Smrkem. - MS, PhD thesis, Charles University.
- SAWYER, E. W., 1996: Melt-segregation and magma flow in migmatites: implications for the generation of granite magmas. - *Transactions of the Royal Society of Edinburgh: Earth Sciences*, 87, 85-94.
- SCHULMANN, K., KRÖNER, A., WENDT, I. J., HEGNER, E., KONOPÁSEK, J., LEXA, O., ŠTÍPŠKÁ, 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.*, in revision.
- SYLVESTER, P. J., 1998: Post-collisional strongly peraluminous granites. - *Lithos*, 45, 29-44.
- TAYLOR, S. R., MCLENNAN, S. M., 1995: The geochemical evolution of the continental crust. - *Reviews in Geophysics* 33: 241-265

- THOMPSON, A. B., TRACY, R. J., 1979: Model systems for anatexis of pelitic rocks. II. Facies series melting and reaction in the system CaO-KAlO₂-NaAlO₂-Al₂O₃-SiO₂-H₂O. - *Contrib. Mineral. Petrol.*, 70, 429-438.
- TISCHENDORF, G., FORSTER, H. J., GOTTESMANN B., 1997: Minor- and trace-element composition of trioctahedral micas: a review - *Mineral. Mag.* 65 (2): 249-276.
- ZENG, L., ASIMOW, P. D., SALEEBY, J. B., 2005: Coupling of anatexis reactions and dissolution of accessory phases and the Sr and Nd isotope systematics of anatexis melts from a metasedimentary source. - *Geochim. Cosmochim. Acta*, 69, 14, 3671-3682.