ISSN 1211-8796

Acta Mus. Moraviae, Sci. geol.
LXXXIX (2004): 67–79, 2004

CORDIERIT – SEKANINAIT Z KONTAKTNÍ AUREOLY ŽULOVSKÉHO PLUTONU

CORDIERITE – SEKANINAITE FROM THE CONTACT AUREOLE OF THE ŽULOVÁ GRANITE PLUTON, EASTERN VARISCAN FRONT, CZECH REPUBLIC

VLADIMÍR ŽÁČEK

Abstract

Žáček, V., 2004: Cordierit – sekaninait z kontaktní aureoly žulovského plutonu. Acta Mus. Moraviae, Sci. geol., 67–79.

Cordierite – sekaninaite from the contact aureole of the Žulová granite pluton, eastern Variscan front, Czech Republic

Migmatites related to the periplutonic HT/LP-MP metamorphism of the Žulová pluton (eastern Variscan front) carry the assemblage: quartz + plagioclase + K-feldspar + biotite + garnet + sillimanite + cordierite + ilmenite. Cordierite displays wide compositional variability ranging between 6.83–13.68 wt. % FeO^{tot}, 4.72–9.28 wt. % MgO, and 0.0–0.77 wt. % MnO corresponding to 30–62 mol. % of sekaninaite (Fe-cordierite) and 38–70 mol. % of cordierite (Mg-cordierite). This paper brings new data showing relative abundance of Fe-cordierite along with chemical compositions of associated minerals.

Key words: cordierite, sekaninaite, garnet, biotite, ilmenite, periplutonic metamorphism, Žulová Pluton, Silesicum, Variscides, Bohemian Massif

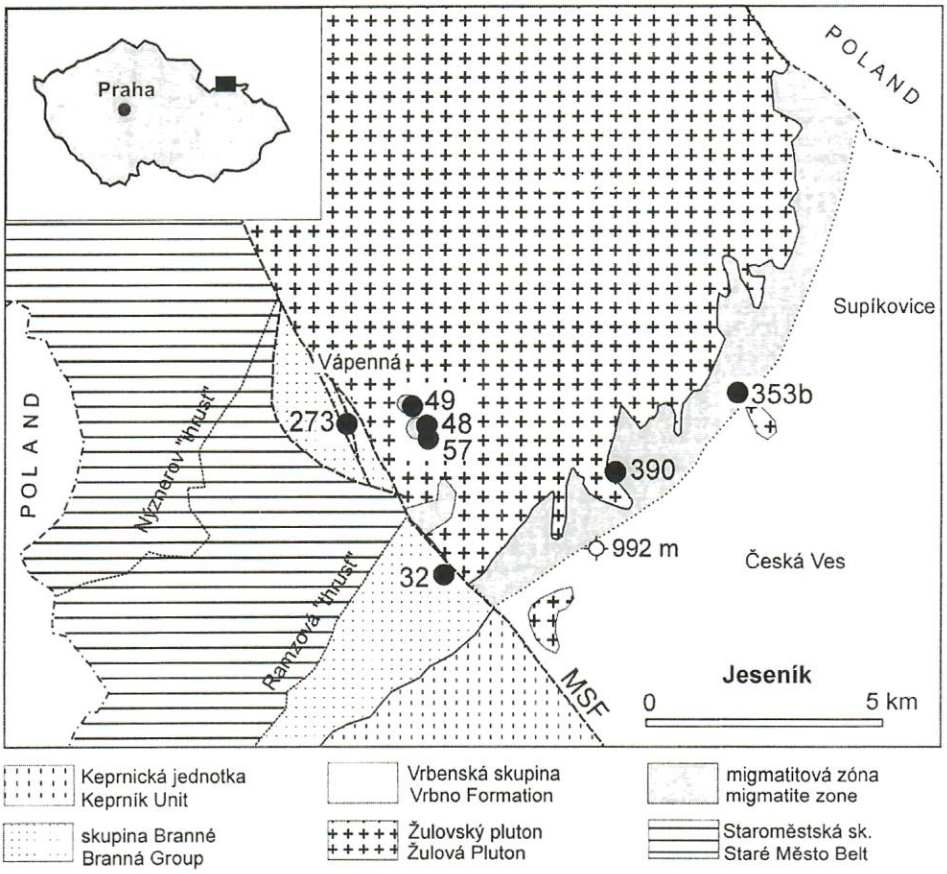
Vladimír Žáček, Czech Geological Survey, P.O. BOX 85, Klárov 3, 118 21 Praha 1, E-mail: zacek@cgu.cz

Úvod

Výskyt cordieritu v migmatitech pláště žulovského plutonu uvádí jako první STAŇKOVÁ (1975), bez podrobnějších údajů zmiňují cordierit také ROZKOŠNÝ a SOUČEK (1989). Během terénního mapování České geologické služby v měřítku 1:25 000 byla odebrána také řada petrografických vzorků s cordieritem (mapové listy 14-224 Jeseník a 14-223 Lipová Lázně). Tato práce přináší nové údaje o chemismu cordieritu / sekaninaitu a doprovodných minerálů hornin kontaktní aureoly žulovského plutonu.

Geologická stavba

Žulovský pluton představuje apikální část rozsáhlejšího granitického tělesa variského stáří situovaného v severní (sz.) části Silesika (SCHULMANN a GAYER 2000, ZACHOVALOVÁ et al. 2002). Jeho sedimentární plášť je odkryt pouze podle východního okraje, zatímco na severu a na sz. je spolu s částí plutonu skryt pod sedimenty kvartérního



Obr. 1. Zjednodušená geologická mapa studované oblasti s vyznačením lokalit studovaných vzorků (podle Žáčka 1997).

Fig. 1. Simplified geological map of the area studied with sampling points (following Žáček 1997).

a terciérního stáří. Na jihu (jz.) je pluton tektonicky omezen okrajovým sudetským zlomem (obr. 1). Východní odkrytá část pláště žulovského plutonu je tvořená metasedimenty devonského stáří, které představují výše metamorfovaný ekvivalent paleontologicky datovaných sedimentů vrbenské skupiny (CHLUPÁČ 1989, CHÁB a ŽÁČEK 1994). Přehled geochemie a petrologie hornin pláště žulovského plutonu podali ROZKOŠNÝ a SOUČEK (1989). Pluton je v šířce 0,5–1,5 km lemován pásmem periplutonických migmatitů stromatitového, méně často nebulitového či oftalmitového typu. Přistupují drobné vložky nečistých vápenců až vápenato-silikátových hornin, kvarcitických a grafitických rul a amfibolitů.

Geograficky tvoří plášť plutonu samostatné, asi 10 km dlouhé horské pásmo „Sokolský hřbet" směru SSV–JJZ, s nejvyšší kótou Studniční vrch (992 m), které se směrem k severu postupně snižuje. Kontakt je intruzívní, diskordantní, charakteristický nepravidelnými jazykovitými intruzemi granitoidů do pláště i výskytem řady menších i větších oddělených intruzí (viz CHÁB a ŽÁČEK 1994, ŽÁČEK 1997). Metamorfní obraz pláště plutonu je výsledkem starší variské regionální metamorfózy, která dosáhla vyšší amfibolitové facie a na-

ložené periplutonické metamorfózy. Vývoj minerálních asociací a vypočtené P-T podmínky ukazují (směrem od kontaktu na východ) pokles metamorfózy z migmatitové zóny, přes zónu sillimanitovou, staurolitovou (andalusit – staurolitovou) až po zónu granátovou, resp. biotitovou v oblasti Zlatých Hor (SOUČEK 1978, CHÁB a ŽÁČEK 1994, ŽÁČEK 2003).

Metodika

Minerály byly analyzovány v leštěných nábrusech napařených uhlíkem na elektronové mikrosondě Link-eXL, v laboratořích České geologické služby v Praze pod vedením J. Frýdy a I. Vavřína. Analytické podmínky: 20 kV, 3 nA, čas načítání 80s, kobalt jako kalibrační prvek. Jako standardy byly použity: křemen (Si), syntetický TiO, korund (Al), wollastonit (Ca), albit (Na), ortoklas (K), a syntetické olivíny pro Mg, Fe a Mn (forsterit, fayalit, tefroit). Naměřené koncentrace byly přepočítány podle modelu ZAF.

Petrografie

Vybraných 6 vzorků migmatitů (z nichž ve čtyřech byl zastižen cordierit) bylo podrobeno studiu na elektronové mikrosondě. Další dva vzorky „exotické" horniny s cordieritem pocházejí od Vápenné. Studované migmatity (vzorky 48, 48a, 49, 57, 353b, 390) se skládají ze 20–30 % křemene*, 20–35 % plagioklasu + K-živce, 15–35 % biotitu, 0–10 % granátu, 5–8 % fibrolitického sillimanitu a 0–25 % cordieritu, podružné jsou ilmenit (0,X–1%), sekundární muskovit (0–2 %) a chlorit, akcesorické jsou apatit, zirkon, a turmalín. ROZKOŠNÝ a SOUČEK (1989) uvádějí navíc spinel, rutil, monazit a pyrit. Minerální asociace jednotlivých studovaných vzorků jsou shrnuty v tabulce 1.

Tabulka 1. Minerální asociace[A] studovaných vzorků.
Table 1. Mineral assemblages[A] of samples studied.

vzorek – sample	hornina – rock	Qtz	Plg+Kf	Bt	Sil	And	Grt	Crd	St	Ms	Chl	Ilm	další – others
48a / 14-223	Grt-Bt migmatit	M	M	M	x		M			*	*	*	Zrn
48a1 / 14-223	Grt-Sil sekrece	x		x	M		M			x	*	*	Ap, Zrn
49 / 14-223	Bt-Crd migmatit	M	M	M	x	*	x	M		*	*	*	Ap, Zrn, Tur
57 / 14-223	Grt-Bt migmatit	M	M	M	x	*	M	x		*	*	*	Ap, Zrn
353b / 14-224	Grt-Bt migmatit	M	M	M	x		M	x		*	*	*	Zrn, Tur
390 / 14-224	Bt migmatit	M	M	M	x			x		*	*	*	Zrn
273a / 14-223	Bt rula /gneiss	M	M	M	*	x	x	*	x	x	*	*	Sp, Ap
273b / 14-223	St-Bt rula /gneiss	M	M	M	*	x	*	x	M	x	*	*	Tur

[A]podíl minerálu/mineral abundances: M hlavní/major, x vedlejší/minor (1–10 %), * akcesorický/accessory
48a, 48a1 – výchoz u kóty 680 m, 300 m jv. od kóty 654 m – Zelená hora; **49** – výchozy na kótě 654 m – Zelená hora u Vápenné; **57** – výchoz 160 m jjv. od 48; **353b** – Bílé Kameny, 675 m, z. od Písečné; **390** – výchoz na průseku, 600 m vsv. od kóty 967 m Sokolí; **273a, b** – rozpadlý výchoz u Vápenné, hřbítek 300 m jjz. od soutoku Polky a Vidnávky

Netypický migmatit s podílem granátu až 25 % vystupuje ve velké migmatitové kře obklopené granitem na Zeleném vrchu u Vápenné (vzorek 57, foto 1, 2). Tento výrazně stromatitický migmatit s převahou biotitem bohatého melanosomu obsahuje neobvykle velké porfyroblasty granátu (až 4 cm), hojný sillimanit a cordierit. Metatekt je hrubozrnný, pegmatitický a místy obsahuje černý turmalín ve sloupcích 1–2 cm dlouhých a také

* Odhady mineralogického složení odpovídají složení horniny zastižené ve výbrusech. Podíl křemene v celé hornině může být výrazně vyšší, protože není zahrnut křemen četných sekrečních čoček.

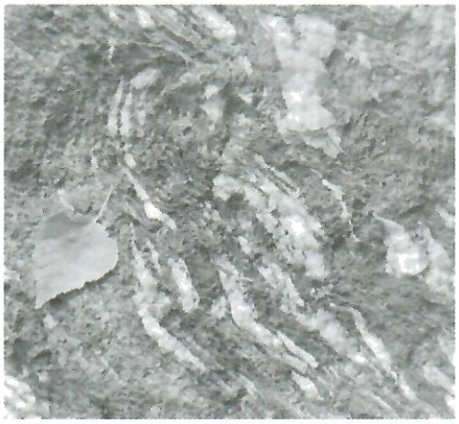


Foto 1. Stromatitický migmatit z lokality 57. Foto 1–7 V. Žáček.

Photo 1. Stromatitic migmatite from locality 57. Photo 1–7 V. Žáček.

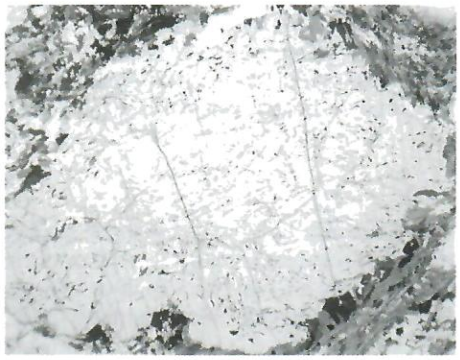


Foto 2. Porfyroblast granátu (3 cm dlouhý) s tenkým cordieritovým lemem s četnými drobnými uzavřeninami ilmenitu z Grt-Bt-Sil-Crd migmatitu (lokalita 57, viz také foto 5).

Photo 2. Large garnet porphyroblast (3 cm long) with numerous tiny ilmenite inclusions and thin cordierite rim, Grt-Bt-Sil-Crd migmatite (locality 57, see also photo 5).

Foto 3. Sillimanitová sekreční poloha v migmatitu s idiomorfními porfyroblasty granátu, (vzorek 48a1).

Photo 3. The sillimanite seggregation with garnet porphyroblasts enclosed in migmatite (sample 48a1).

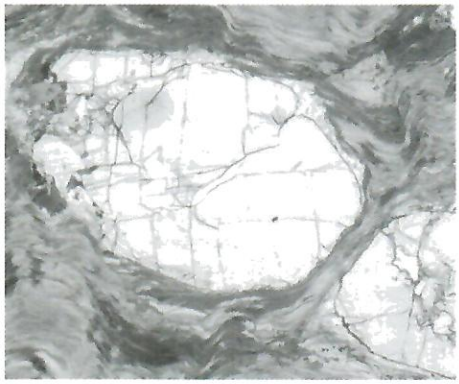


Foto 4. Porfyroblasty granátu (průměr asi 2 mm) v sillimanitu (vzorek 48a1).

Photo 4. Garnet porphyroblasts (2 mm across) grown in sillimanite (sample 48a1).

andalusit. Vzorek 48a1 představuje pásek fibrolitického sillimanitu o mocnosti 3 cm přeplněný porfyroblasty granátu tvořící ojedinělou sekreční polohu v migmatitu (lokalita 48a, foto 3, 4). Migmatit z lokality 353b je silně duktilně deformovaný a paralelně usměrněný a vzácně obsahuje v metatektu andalusit.

Vzorky 273 a, b (list 14-223 Lipová Lázně) byly odebrány z rozpadlého výchozu ve Vápenné, ze hřbítku 300 m jjz. od soutoku Polky a Vidnávky. Hornina je drobnozrnná biotitická rula, která kromě sporadického cordieritu obsahuje neobvyklou minerální asociaci Qtz+Plg+Bt+St+And+Ms+Grt+Sil+Zn-bohatý hercynit+ilmenit. Širší geologické souvislosti ukazují, že tato hornina představuje tektonický relikt mezi dvěma větvemi okrajového sudetského zlomu (ŽÁČEK 2003).

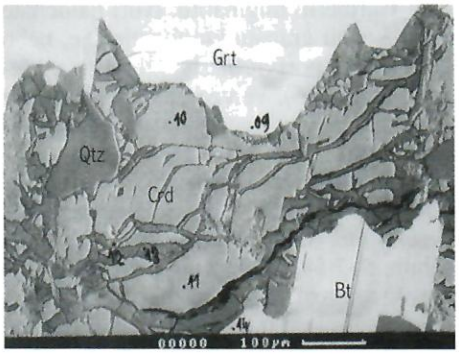


Foto 5. Cordierit v lemu velkého granátového porfyroblastu ze vzorku 57. Cordierit je protkán sítivem žilek sekundárního chloritu.

Photo 5. Anhedral cordierite in the rim of large garnet porphyroblast from sample 57. Cordierite contains network of secondary chlorite.

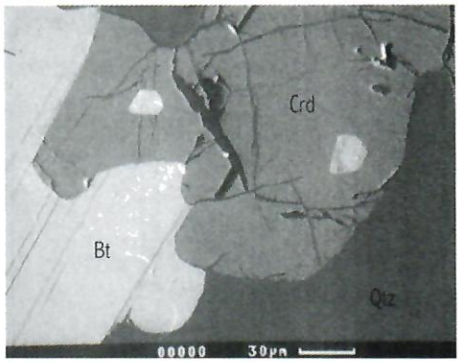


Foto 6. Nepravidelný agregát cordieritu zatlačující biotit (vzorek 49).

Photo 6. Anhedral cordierite replacing biotite (sample 49).

Foto 7. Pseudomorfózy chloritu po pravděpodobném cordieritu (5–7 mm dlouhé) z křemen – živec – andalusitové nodule z biotitického fylitu skupiny Branné (lokalita 32).

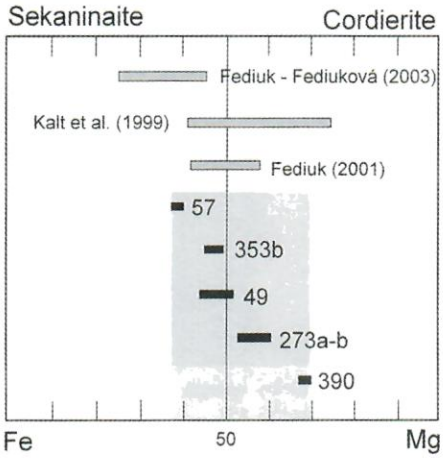
Photo 7. Pseudomorphs of chlorite after probable cordierite (5–7 mm long) from quartz – andalusite – feldspar nodule from biotite phyllite of the Branná Group (sample 32).

Pravděpodobný cordierit se vyskytl jako součást 5 cm velké sekrece tvořené vedle křemene andalusitem, živcem, apatitem a podružným muskovitem. Místo nálezu je výchoz biotitického fylitu skupiny Branné situovaný na západním úpatí kóty 568 asi 3 km jv. od Vápenné (dokumentační bod 32/14-223). Pravděpodobný cordierit (pseudomorfóza) tvoří skupinu šestibokých krátce až dlouze prismatických krystalů 5–20 mm dlouhých, které jsou kompletně zatlačeny rentgenograficky potvrzeným chloritem (foto 7). Vzorek nebyl studován ve výbrusu; EDX analýza separovaného zrna chloritu poskytla: 29 hm. % SiO_2, 23.5 hm. % Al_2O_3, 22 hm. % FeO, 15.5 hm. % MgO, 1 hm. % MnO.

Mineralogie

Cordierit – Sekaninait

Cordierit se vyskytuje v pásu migmatitů a v reliktech pláště (migmatitech) uzavřených v plutonu (obr. 1). V horninách nižších metamorfních stupňů (směrem dále k východu) nebyl cordierit zjištěn, i když na horninách sousední sillimanitové zóny je také zřetelný vliv žulovského plutonu – blastéza plagioklasu a vznik perlových rul. Výjimkou jsou dva výše zmíněné „exotické“ výskyty cordieritu mimo migmatitovou zónu.



Obr. 2. Chemické složení cordieritu / sekaninaitu studovaných vzorků (stínováno), pro srovnání jsou zařazena složení Fe-bohatých cordieritů z migmatitů Bavorského lesa (KALT et al. 1999), z „ostrovní zóny" středočeského plutonu (FEDIUK 2001) a z jihočeských granulitů (FEDIUK a FEDIUKOVÁ 2003).

Fig. 2. Chemical composition of the cordierite / sekaninaite studied (shaded), compared with Fe-rich cordierites from migmatites of the Bavarian Forest (KALT et al. 1999), from the "islet zone" of the Central Bohemian Pluton (FEDIUK 2001) and from South Bohemian granulites (FEDIUK and FEDIUKOVÁ 2003).

Cordierit migmatitů tvoří laločnaté lemy kolem granátu který zatlačuje, nebo červíkovité porfyroblasty v biotitu a křemeni (foto 5, 6). Ve vzorcích 273 a,b tvoří laločnatá zrna v matrix kolem andalusitu a staurolitu.

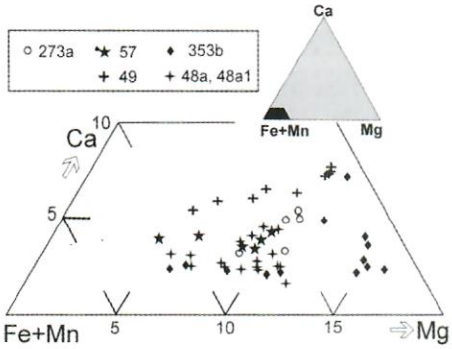
Velikost zrn a agregátů cordieritu se pohybuje nejčastěji v rozmezí od několika desetin mm do 2 mm, podíl v hornině dosahuje 5–7 %, výjimečně je vyšší (až 25 %). V mikroskopu je bezbarvý, podobný plagioklasu, jen u některých zrn je patrné dvojčatění, často je těžko identifikovatelný. Podle sítiva jemných trhlin dochází k pinitizaci (chloritizaci) cordieritu, ale jeho převážná část zůstává nepřeměněná (foto 5). Chemická variabilita cordieritu různých vzorků je výrazná, ale v rámci téhož vzorku jsou relativně malé rozdíly v chemismu a kromě toho je cordierit prakticky nezonální: FeO = 6.83–13.68 hm. %, MgO = 4.72–9.28 hm. %, z minoritních oxidů MnO = 0.0–0.77 hm. %, Na_2O = 0.10–0.59 hm. %, většinou 0.3 hm. %, oxidy Ti, Cr, Ca, K jsou pod mezí detekce (tab. 2). Variabilita chemického složení ve smyslu koncových členů je následující (viz také obr. 2): cordierit 38–70 mol. %, sekaninait = 30–62 mol. %, Mn-

Tabulka 2. Chemické složení cordieritu / sekaninaitu.
Table 2. Chemical composition of cordierite / sekaninaite.

No.	308	311	3010	3026	3050	663	4054	3842	608	611
sample	57	57	353b	353b	49	49	273	273	390	390
SiO_2	47,01	47,05	46,48	46,94	47,30	47,49	47,87	49,12	48,51	48,83
Al_2O_3	31,41	31,46	30,61	31,13	31,23	32,33	32,68	33,34	33,32	33,09
FeO^{tot}	13,64	12,95	11,80	11,24	11,69	11,10	9,63	8,59	7,15	6,97
MnO	n.d	0,18	0,33	0,49	0,71	0,47	0,76	0,48	0,12	0,15
MgO	4,72	4,74	5,66	5,95	5,63	6,25	6,61	7,52	9,01	9,19
Na_2O	0,50	0,32	0,25	0,27	0,10	0,17	0,30	0,59	0,34	0,11
SUM	97,28	96,70	95,11	96,02	96,66	97,80	97,85	99,64	98,45	98,34
Si	5,023	5,039	5,044	5,034	5,048	4,990	4,999	5,008	4,968	4,997
Al	3,955	3,971	3,914	3,934	3,928	4,004	4,022	4,006	4,021	3,990
Fe	1,219	1,160	1,071	1,008	1,043	0,975	0,841	0,733	0,612	0,596
Mn	0,000	0,016	0,030	0,044	0,064	0,042	0,067	0,042	0,010	0,013
Mg	0,752	0,757	0,915	0,951	0,896	0,979	1,029	1,143	1,375	1,401
Na	0,104	0,066	0,052	0,056	0,021	0,035	0,061	0,116	0,068	0,022
total	11,052	11,009	11,025	11,027	10,999	11,025	11,020	11,047	11,055	11,019
XMg	0,382	0,392	0,454	0,475	0,447	0,490	0,531	0,596	0,688	0,697
XMn	0,000	0,008	0,015	0,022	0,032	0,021	0,035	0,022	0,005	0,006
XFe	0,618	0,600	0,531	0,503	0,521	0,488	0,434	0,382	0,306	0,297

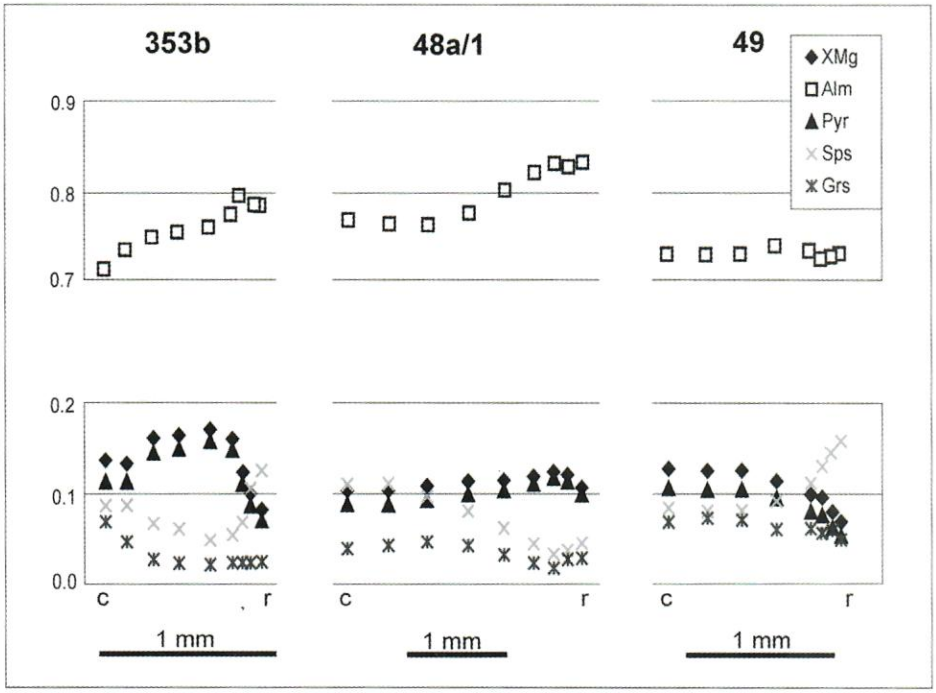
n.d. – pod mezí detekce /analyzed but not detected; oxides Ti, Cr, Ca, K below detection limit

cordierit (hypotetický) = 0–3.5 mol. %. Cordierit ze vzorků 273 a, b se chemicky neliší od cordieritu migmatitů, XMg se pohybuje v rozmezí 0.55–0.58 (tj. obsahuje 42–45 mol. % sekaninaitové komponenty). Cordierit z biotitického fylitu ze skupiny Branné by měl obsahovat 44 mol. % sekaninaitové komponenty, pokud byl ovšem zachován poměr Fe/Mg ve složení sekundárního chloritu.

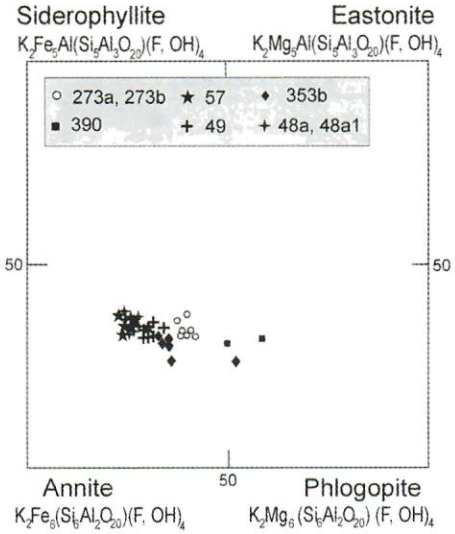


Obr. 3. Klasifikační diagram granátu.
Fig. 3. Classification diagram of garnet.

Granát tvoří okrouhlé hypidiomorfně až nepravidelně omezené porfyroblasty, často silně korodované o velikosti nejčastěji 3–15 mm (foto 2, 4). Jeho podíl v hornině obvykle nepřesahuje 15 %. Granát uzavírá hojně ilmenit, křemen a plagioklas, méně často biotit, turmalín a sillimanit. Je charakteristický vysokými obsahy almandinové komponenty (70–87 mol. %), při poměrně vysoké koncentraci komponenty pyropové (5–16 mol. %), a nízké koncentraci komponenty grossularové 2–8 mol. %, XMg = 0.05–0.17 (obr. 3). Podíl spessartinové složky kolísá od 1 do10 (16) mol. %, koncentrace oxidů Ti a Cr jsou pod detekčním limitem. Zonálnost je nevýrazná „plochá" ale zřetelně prográdní – od centra k okraji roste Fe, Mg, XMg; klesá Ca a Mn. Při okrajích zrn je několik desítek až set



Obr. 4. Zonálnost granátu z migmatitové zóny.
Fig. 4. Zoning profiles of garnet from the migmatite zone.



Obr. 5. Klasifikační diagram biotitu.
Fig. 5. Classification diagram of biotite.

mikronů široká „retrográdní" zóna mírně obohacená Mn (na úkor Fe a Mg), obr. 4. Příklady chemického složení granátu uvádí tabulka 3.

Biotit je tmavě skořicově hnědý, silně pleochroický a vykazuje v rámci jednotlivých vzorků malé rozdíly v chemismu. Je charakteristický převahou annitové komponenty (obr. 5), XMg = 0.23–0.41, ^{IV}Al = 1.26–1.39 pfu a vysokými koncentracemi TiO_2 většinou v rozmezí 2.76–4.62 hm. % (tab. 4). Nízké jsou koncentrace MnO (u migmatitů většinou do 0.14 hm. %, u vzorků rul 273 a, b až 0.37 hm. %) a Na_2O (0.0–0.4 hm. %). Biotit ze vzorku migmatitu 390 je stejně jako ostatní minerály z tohoto vzorku bohatší železem (XMg = 0.50–0.58) a spadá už do pole flogopitu (obr. 5).

Plagioklas migmatitů je většinou andezín An_{31-47}, ojediněle oligoklas An_{16} či albit An_6. Bytownit An_{83-88} byl zjištěn jako inkluze v granátu ve vzorku 49. Zonalita je málo výrazná, většina zrn je téměř nezonální, případně dochází k nepatrnému růstu bazicity od centra k okraji (rozdíl 2–3 mol. % anortitové komponenty). Plagioklas uzavíraný v granátu vykazuje naopak pokles ba-

Tabulka 3. Chemické složení granátu, ilmenitu, staurolitu, andalusitu a turmalínu.
Table 3. Chemical composition of garnet, ilmenite, staurolite, andalusite and tourmaline.

No.	327	2977	2997	3031	3047	3067	3064	4033	3830	4052
mineral	Grt	Grt	Grt	Grt	Grt	Grt	Ilm	St	And	Tur
sample	57	48a/1	48a	353b	49	49	49	273b	273a	273b
SiO_2	37,15	36,65	36,83	37,13	36,87	36,81	0,20	27,48	36,70	35,95
TiO_2	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	54,07	0,83	n.d.	1,12
Al_2O_3	20,58	20,23	20,10	20,51	20,25	20,32	0,14	54,71	62,59	34,41
FeO^{tot}	38,27	34,46	37,90	34,91	32,70	32,62	44,02	13,62	0,33	7,28
MnO	0,98	4,93	1,50	2,42	6,61	4,11	0,74	0,66	n.d.	n.d.
MgO	1,62	2,20	2,61	3,74	1,65	2,68	0,68	1,34	n.d.	5,57
CaO	1,41	1,48	0,88	0,82	2,08	2,71	n.d.	n.d.	n.d.	0,71
Na_2O	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	*0.28	n.d.	1,71
SUM	100,01	99,94	99,84	99,53	100,16	99,26	99,86	98,92	99,63	86,75
oxygens	12	12	12	12	12	12	3	48	5	**31
Si	3,024	2,993	3,006	3,006	3,007	3,001	0,005	7,892	0,996	5,825
Ti	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	1,013	0,179	0,000	0,136
Al	1,974	1,947	1,934	1,957	1,946	1,952	0,004	18,517	2,001	6,571
Fe	2,605	2,354	2,587	2,363	2,230	2,224	0,917	3,271	0,007	0,986
Mn	0,068	0,341	0,104	0,166	0,456	0,284	0,016	0,161	0,000	0,000
Mg	0,197	0,268	0,318	0,451	0,200	0,326	0,025	0,574	0,000	1,345
Ca	0,123	0,129	0,077	0,071	0,182	0,237	0,000	0,000	0,000	0,123
Na	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,156	0,000	0,537
total	7,989	8,033	8,027	8,015	8,021	8,023	1,980	30,749	3,004	22,524
XMg	0,070	0,102	0,109	0,160	0,082	0,128	0,027	0,149		0,577

n.d. – pod mezí detekce /analyzed but not detected; oxides Cr, K below detection limit
* ZnO, ** including 3B, 4H

Tabulka 4. Chemické složení slíd (přepočet na 12 O+OH).
Table 4. Chemical composition of micas (O+OH = 12).

No.	320	2993	3003	661	3015	4047	605	3005	3016	4048
mineral	Bt	Bt	Bt	Bt	Bt	Bt	Bt	Ms	Ms	Ms
sample	57	48a/1	48a	49	353b	273b	390	48a	353b	273b
SiO_2	33,70	33,44	33,46	34,29	34,03	34,09	35,45	45,52	44,40	45,41
TiO_2	4,00	4,62	3,07	4,45	2,38	2,28	4,32	0,17	0,15	0,47
Al_2O_3	18,95	17,94	19,06	19,22	19,11	20,54	18,71	34,74	34,41	36,76
FeO^{tot}	24,63	25,84	24,65	22,04	22,15	20,55	16,81	1,40	1,56	0,94
MnO	n.d.	0,11	n.d.	n.d.	n.d.	0,37	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
MgO	4,30	4,39	5,14	5,58	6,07	7,35	9,33	0,45	0,55	0,57
Na_2O	0,35	0,23	0,33	0,26	0,28	0,38	0,34	0,74	0,57	0,65
K_2O	9,67	9,57	9,51	9,95	9,42	9,60	10,04	10,32	9,21	10,86
H_2O_{calc}	3,83	3,82	3,81	3,88	3,80	3,90	3,95	4,41	4,32	4,52
SUM	99,43	99,96	99,02	99,67	97,24	99,06	98,95	97,74	95,16	100,18
Si	2,640	2,625	2,631	2,645	2,688	2,624	2,687	3,094	3,083	3,014
Ti	0,236	0,273	0,182	0,258	0,141	0,132	0,246	0,009	0,008	0,023
Al	1,749	1,660	1,767	1,748	1,778	1,864	1,671	2,783	2,816	2,876
Fe	1,613	1,697	1,621	1,422	1,463	1,323	1,065	0,079	0,090	0,052
Mn	0,000	0,007	0,000	0,000	0,000	0,024	0,000	0,000	0,000	0,000
Mg	0,502	0,514	0,602	0,641	0,714	0,844	1,054	0,046	0,057	0,056
Na	0,053	0,035	0,050	0,039	0,043	0,057	0,050	0,097	0,076	0,084
K	0,966	0,958	0,954	0,979	0,949	0,943	0,971	0,894	0,816	0,920
OH_{calc}	2,001	2,000	1,999	1,997	2,002	2,003	1,997	1,999	2,001	2,001
total	9,760	9,769	9,805	9,730	9,779	9,813	9,740	9,002	8,947	9,027
XMg	0,237	0,232	0,271	0,311	0,328	0,389	0,497	0,366	0,386	0,519

n.d. pod mezí detekce / analyzed but not detected; oxides Cr, Ca below detection limit

zicity směrem k okraji (An_{86-83}). V rulách vzorků 273 je oligoklas-kyselý andezín An_{19-32}, na okrajích zrn je kyselejší člen. Plagioklas migmatitů často obsahuje zvýšené koncentrace FeO (až 0.7 hm. %), MgO (až 0.3 hm. %) a K_2O (až 0.5 hm. %); koncentrace BaO je pod mezí detekce. Draselný živec obsahuje zvýšené koncentrace Na_2O (0.5–1.3 hm. %), které odpovídají 6–11 mol. % albitové komponenty (klesá k okraji zrn) a BaO do 1.2 hm. %.

Ilmenit je v migmatitech vedle ojedinělého pyritu prakticky jediným zástupcem rudních minerálů (až 1 %). Tvoří inkluze nepravidelného nebo červíkovitého tvaru o velikosti několika desítek mikronů uzavřené v matrix nebo v granátových porfyroblastech (foto 2). Obsahuje nízké koncentrace MnO, nejvýše 2.53 hm. % (0–5.4 mol. % pyrofanitové komponenty). Ilmenit uzavřený v granátech (vzorky 49, 353b) obsahuje zvýšené koncentrace MgO (0.35–0.68 hm. %; 1.3–2.7 mol. % geikilitové komponenty, tab. 3), zatímco koncentrace MgO v ilmenitech z matrix jsou nízké (0.0–0.18 hm. %).

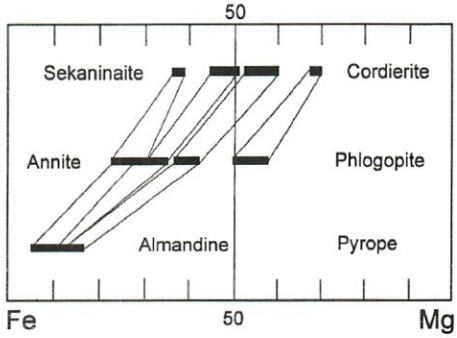
Muskovit je v migmatitech podružným až akcesorickým minerálem a vznikal v pozdních etapách petrogeneze v retrográdních podmínkách. Má nízkou fengitickou substituci (Si = 3.07–3.09 apfu a XMg = 0.39–0.43. Obsahuje následující koncentrace minoritních oxidů: TiO_2 = 0.15–0.89 hm. %, FeO = 1.01–1.56 hm. %, MgO = 0.34–0.52 hm, % a Na_2O = 0.57–1.05 hm. %; oxidy Cr, Mn pod mezí detekce (tab. 4). Muskovit ze vzorků rul (273a, b) má ještě nižší koncentrace minoritních oxidů i fengitickou substituci (Si = 3.00–3.03 pfu) a je relativně bohatší Mg (XMg = 0.45–0.52).

Ostatní analyzované minerály – staurolit, andalusit, sillimanit, spinel, turmalín pocházejí (vyjma sillimanitu) pouze ze vzorků „exotické" biotitické ruly (273a, 273 b). Staurolit tvoří milimetrové porfyroblasty zatlačované andalusitem. Je chudý MgO (1.08–1.60 hm. %, XMg = 0.12–0.18) a obsahuje zvýšené koncentrace TiO_2 (0.43–0.70 hm. %), MnO

Tabulka 5. P-T podminky studovaných hornin.
Table 5. P-T conditions of rocks studied.

vzorek	hornina / rock	metoda /method	T (°C)	P (Kb)	citace / reference
353b	Bt-Grt-Sil-Crd migmatit	Grt-Bt**	720–925	(4–5)	Žáček (2003)
48, 49	Bt-Grt-Sil (Crd) migmatit	Grt-Bt**	773–947	(4–5)	Žáček (2003)
273a, b	Bt-St-And rula/ gneiss	Grt-Bt**, PT-grid*	568–690	<3	Žáček (2003)
32	Bt-And-Crd ve fylitu (in phyllite)	PT-grid*	450–550	<2	Žáček (2003)
	migmatit, rula /gneiss	Grt-Bt	650–680	5	Souček (1987)
	erlan / calc-silicate rock	izotopy C	560–730	3–5	Losos et al. (1988)

*Spear - Cheney (1989), ** více metod / several calibrations
údaje o tlaku v závorkách nebyly vypočteny, ale pouze použity pro výpočet teplot
bracketed values of pressures were not calculated or inferred but only taken for calculation of temperatures



Obr. 6. Relace Fe-Mg mezi cordieritem, biotitem a granátem.
Fig. 6. Fe-Mg relations of associated cordierite, biotite and garnet.

(0.43–0.83 hm. %) a ZnO (do 0.5 hm. %), viz tab. 3. Spinel je lahvově zelený, velmi drobný, zarostlý hlavně v muskovitu a odpovídá Fe a Zn bohatému hercynitu (XMg = 0.12–0.15), obsah ZnO se pohybuje mezi 2–4 hm. %. Empirický vzorec spinelu kolísá v rozmezí: $Fe_{0.80–0.86}$ $Mg_{0.12–0.14}$ $Mn_{0.01–0.02}$ $Cr_{0.01}$ $Zn_{0.10–0.20}$ $Al_{1.95–1.98}$ O_4. Akcesorický drobný turmalín je Ca a Fe bohatý dravit (XMg= 0.58, Na = 0.54–0.57 apfu, Ca = 0.12–0.14 apfu, Xvak = 0.27–0.23 pfu), viz tab. 3. Andalusit a sillimanit (fibrolit) jsou téměř stechiometrické Al_2SiO_5, podíl oxidů Fe, Mn, Mg nepřevyšuje několik desetin hm. %.

Příklady chemických analýz andalusitu, staurolitu a turmalínu jsou uvedeny v tabulce 3.

Diskuse a závěr

Cordierit, který vznikl v souvislosti s tepelným účinkem žulovského plutonu se vyskytuje v zóně migmatitů (zóna K-živec – cordieritová) lemující v šířce 0.–1.5 km východní okraj plutonu, v „exotické“ rule v tektonické šupině u Vápenné a v biotitickém fylitu skupiny Branné.

Cordierit má v závislosti na protolitu pestré chemické složení vyjádřené zjednodušeným empirickým vzorcem:

$(Fe_{0.59–1.22}Mg_{0.75–1.41}Mn_{0.00–0.07}Na_{0.00–0.12})$ $(Si_{4.96–5.06}Al_{3.90–4.04})$ $O_{18}.nH_2O$.
Podíl sekaninaitové komponenty kolísá v rozmezí 30–62 mol. % (obr. 2). Koncentrace Na_2O se pohybují v rozmezí 0.10–0.59 hm. % (většinou kolem 0.3 hm. %).

Minerální asociace (Bt+Grt+Kf+Sil+Crd) a chemické složení horninotvorných minerálů migmatitové zóny svědčí pro krystalizaci těchto hornin za vysokých teplot a poměrně nízkých tlaků v podmínkách na rozhraní amfibolitové a nízkotlaké granulitové facie. Minerální asociace a texturní vztahy migmatitů indikují následující možné reakce vzniku cordieritu:

$$Ms+Bt+Qtz=Crd+Kf+H_2O$$
$$Grt+Sil+Qtz=Crd$$
$$Bt+Sil+Grt+Qtz=Crd+Kf+H_2O$$

$$Grt+Kf+H_2O=Crd+Bt+Qtz \quad \text{(DEER et al. 1997).}$$

Pro vysoké teploty svědčí vznik pokročilých stromatitických anatektitů, vysoké koncentrace pyropové komponenty v granátu (až 16 mol. %) a TiO_2 v biotitu (až 4.62 hm. %) a zvýšený obsah MgO v ilmenitu uzavřeném v granátu (až 0.68 hm. %) a také zvýšené koncentrace Na_2O v cordieritu (0.10–0.59 hm. %). Nízké tlaky dokumentuje absence kyanitu, nízký obsah grossularové komponenty v granátech (2–8 mol. %) versus vysoká bazicita plagioklasu (inkluze v granátu až 88 An, plagioklas v matrix 31–47 An), přítomnost Fe-bohatého cordieritu a andalusitu v metatektu.

„Exotická" Bt-Ms-St-And rula s cordieritem od Vápenné (vzorek 273) představuje svrchní plášť žulovského plutonu zachovaný jako tektonický relikt mezi dvěma větvemi okrajového sudetského zlomu. Tato hornina se jinde v plášti žulovského plutonu nezachovala, resp.byla denudována při výzdvihu krystalinických formací. Cordierit a spinel této horniny mohly být formovány celou řadou reakcí, například:

$$Bt+Sil+Qtz=Crd+Hc+ \text{ opakní minerál} \quad \text{(DEER et al. 1997).}$$

Výskyt cordieritu v biotitickém fylitu skupiny Branné (vzorek 32) svědčí pro možný teplotní vliv žulovského plutonu jz.od okrajového sudetského zlomu. Petrogeneze horniny s andalusitem a cordieritem mohla probíhat podle rovnice:

$$Ms+Chl+Qtz=Crd+And+Bt+H_2O \quad \text{(DEER et al. 1997).}$$

Kvantifikace P-T podmínek pomocí termometrů a barometrů pláště žulovského plutonu je zatížena značnou chybou z důvodu nerovnovážných asociací, zejména párů granát – biotit, jak ukazuje velký rozptyl naměřených dat (viz tab. 5). Hodnoty 700–800 °C jsou realistické pro vrchol periplutonické metamorfózy spjaté s parciální anatexí. S určením tlaku jsou ještě větší problémy, s ohledem na jeho citlivost na stanovení teploty; jeho přímé určení na 3–5 Kb uvádí pouze LOSOS et al (1988). S ohledem na výše uvedená fakta se autor přiklání spíše k nižším stanoveným hodnotám tlaku. Cordierit krystalizoval v retrográdních podmínkách při P-T podmínkách nižších než teplotní uváděné maximum. Poměr Fe/Mg v cordieritu odráží chemismus protolitu a není zde zřetelná závislost na metamorfních podmínkách (obr. 6). V Českém masívu se cordierit kontaktně (periplutonicky) metamorfovaných hornin vyskytuje hojně v aureolách variských intruzív, zejména pak centrálního moldanubického plutonu v České republice (např. FEDIUK 1971) i v Bavorském Lese v Německu (KALT et al. 1999). Reliktní cordierit byl zjištěn také v kontaktních aureolách předvariských granitoidů – lestkovského a polomského masivu v tepelském krystaliniku (XMg = 0.68–0.70, ŽÁČEK et al. 1993). Převážná většina těchto cordieritů odpovídá Mg-členu, tj. Mg/(Mg+Fe) >0.5. Výskyt sekaninaitu, (XMg = 0.13–0.42) byl dosud uváděn hlavně z pegmatitů (ČERNÝ a POVONDRA 1966, STANĚK a MIŠKOVSKÝ 1975). V monografii Rock-forming minerals (DEER et al. 1997) mají pouze 3 z 35 publikovaných analýz metamorfních cordieritů převahu Fe-komponenty, mezi nimi cordierit z bavorského Steinachu má XMg=0.48 (OKRUSCH 1971). Nová podrobná studie migmatitů Bavorského lesa potvrdila výskyt chemicky variabilních cordieritů, ojediněle i členů s převahou sekaninaitové komponenty (XMg = 0.41–0.74, KALT et al. 1999). Na výskyt metamorfních cordieritů s vysokým podílem sekaninaitové komponenty (42–58.3 mol. %) v kontaktních rohovcích „ostrovní zóny" středočeského plutonu upozornil FEDIUK (2001). Nejnověji byl sekaninait zjištěn v plášti žulovského plutonu (až 62 mol. % sekaninaitové komponenty, tato práce), v jihočeských granulitech (XFe = 0.55–0.73, FEDIUK a FEDIUKOVÁ 2003) a v tanvaldském granitu (XFe = 0.66–0.67, FEDIUK et al., 2003), v leukokrátních migmatitech při kontaktu třebíčského masivu (XFe = 0.60, HOUZAR 2003) a ve valounu migmatitu z myslejovického souvrství, v hornině, kde sekaninait (XFe = 0.63) tvoří asi 60 % objemu vedle granátu, biotitu, sillimanitu, ilmenitu, K-živce a vzácného hercynitu (Prof. M. NOVÁK, MU Brno, ústní sdělení).

Nejnovější nálezy Fe-bohatého cordieritu různých metamorfovaných horninách českého masivu ukazují, že Fe-dominantní cordierit, tj. sekaninait je oproti dřívějším údajům častým minerálem nejen v pegmatitech, ale také v metamorfovaných horninách.

PODĚKOVÁNÍ

Autor děkuje Dr. J. Frýdovi a Dr. I. Vavřínovi z České geologické služby za metodické vedení při práci na elektronové mikrosondě. Dík patří prof. M. Novákovi (Masarykova universita Brno) za kritickou revizi rukopisu a také Dr. S. Houzarovi (Moravské muzeum, Brno) a prof. F. Fediukovi (Geolhelp, Praha) za cenné doplňující údaje.

SUMMARY

The mantle of the Žulová Pluton (eastern Variscan front, Czech Republic, Fig. 1), is formed by a Devonian volcano-sedimentary complex, with characteristic periplutonic HT/LP-MP metamorphism continuously decreasing toward the east (SOUČEK, 1978, CHÁB and ŽÁČEK 1994). The zone of contact migmatitization with cordierite is 0.5–1.5 km wide but the lower-grade periplutonic aureole (Bt+Grt+Sil+St+Ms) is several times wider. Migmatites typically show the assemblage: quartz + plagioclase (An_{31-47})+K-feldspar+Ti-rich annite-dominant biotite (XMg = 0.23–0.41, ^{IV}Al = 1.26–1.39 apfu) + garnet (Alm_{72-85} Prp_{6-16} Sps_{1-16} Ca-Grt_{2-8}, XMg = 0.06–0.17) + sillimanite + cordierite (XMg = 0.38–0.70) + ilmenite. Besides "normal" HT migmatites a peculiar MT/LP gneiss carrying Qtz+Plg+Bt+St+And+Ms+ Grt+Sil+Ilm+Zn-rich hercynite (not reported till now from the Žulová Pluton Area) was found as tectonic relict preserved at the Marginal Sudetic Fault. Quartz – feldspar– andalusite – cordierite nodule was found in the greenschist facies (LT/LP) biotite phyllite of the Branná Group close to the Marginal Sudetic Fault. Both these lower-grade rocks are also related to the periplutonic metamorphism of the Žulová Pluton (Žáček 2003). Temperatures calculated for rocks of migmatite zone (Grt–Bt) show a wide range of values (720–947 °C) but the temperatures ranging between 720 and 800 °C are most frequent and realistic (at 3–5 kbar). For P-T conditions of all described rocks see Tab. 6.

Cordierite displays a wide compositional variability ranging between 6.83–13.68 wt. % FeO^{tot}, 4.72–9.28 wt. % MgO, and 0.0–0.77 wt. % MnO, corresponding to 30–62 mol. % of sekaninaite (Fe-cordierite), 38–70 mol. % of Mg-cordierite and up to 3.5 mol. % of hypothetical Mn-cordierite, Na_2O content reaches up to 0.59 wt. %. The amount of sekaninaite component corresponds rather to bulk chemistry than to the peak of metamorphism (see Figs. 2, 6). Mg-cordierite is shown in the literature as a prevailing cordierite mineral in metamorphic rocks and Fe-cordierite (sekaninaite) as a mineral typical for pegmatites and some unusual rocks (DEER et al. 1997). New study of rock-forming cordierites from Bohemian Massif (this paper, KALT et al. 1999, FEDIUK 2001, FEDIUK and FEDIUKOVÁ 2003, FEDIUK et al. 2003, HOUZAR 2003, etc.) indicates, that Fe-dominant cordierite (i. e. after the I.M.A. rules mineral sekaninaite) is relatively abundant even in the assemblages of metamorphic rocks.

LITERATURA

DEER, W. A., HOWIE, R. A., ZUSSMAN, J., 1997: Rock-Forming Minerals, Vol. 1B – Disilicates and Ring Silicates, 629 pp. – *The Geological Society*, London.

ČERNÝ, P., POVONDRA, P., 1966: Beryllian cordierite from Věžná: (Na, K) + Be=Al. – *N. Jb. Miner.*, Mh., 36–44.

FEDIUK, F., 1971: Cordierite in the Moldanubian gneisses. – *Krystalinikum,* 7: 183–204. Praha.

FEDIUK, F., 2001: Sekaninaite / cordierite compositional oscillation in some Bohemian hornfelses. – *Krystalinikum,* 27: 51–66. Praha.

FEDIUK, F., FEDIUKOVÁ, E., 2003: Sekaninaite and fingerprint hercynite in south Bohemian granulites. – *Acta Montana IRSM AS CR*, Series A, 23 (124): 1–2. Praha.

FEDIUK, F., SCHOVÁNEK, P., KLOMÍNSKÝ, J. 2003: Sekaninait už i v severních Čechách. – *Bull. min-petr.* Odd. Nár. Muz. v Praze, 11: 148–150.

HOUZAR, S., 2003: Minerální asociace leukokrátních migmatitů na kontaktu třebíčského masivu v Třebíči - „U Kostelíčka". – *Minerál*, 11, 5: 334–336.

CHÁB, J., ŽÁČEK, V., 1994: Geology of the Žulová pluton mantle (Bohemian Massif, Central Europe). – *Bull. Czech Geol. Surv.*, 69, 4: 1–12.

CHLUPÁČ, I., 1989: Fossil communities in the metamorphic Lower Devonian of the Hrubý Jeseník Mts, Czechoslovakia. – *N. Jb. Paläont. Abh.*, 177, 3: 367–392. Stuttgart.

KALT, A., BERGER, A., BLÜMEL, P., 1999: Metamorphic evolution of cordierite-bearing migmatites from the Bayerische Wald, Variscan Belt, Germany. – *Jour. Petrol.*, 40, 4: 601–627.

LOSOS, Z., HLADÍKOVÁ, J., 1988: Isotopic composition of graphites and carbonates from the Žulová pluton mantle – applications for thermometry. – Scr. Univ. Purkyn. Brun., *Geol.*, 18, 7: 261–272. Brno. (in Czech)

OKRUSCH, M., 1971: Garnet – cordierite – cordierite equilibria in the Steinach aureole, Bavaria. – *Contr. Mineral. Petrol.*, 32: 1–23.

ROZKOŠNÝ I., SOUČEK, J., 1989: Contribution to the petrology of the Žulová massif mantle. – *Acta Univ. Carol., Geol.*, 2: 165–197.

SCHULMANN, K., GAYER, R., 2000: A model for a continental accretionary wedge developed by oblique collision. – the NE Bohemian Massif. – *Jour. Geol. Soc., London*, 157: 401–416.

SOUČEK, J., 1978: Metamorphic zones of the Vrbno and Rejvíz Series, the Hrubý Jeseník Mountains, Czechoslovakia. – *Tschermaks Min. Petr. Mitt.* TMPM 25: 195–217.

SPEAR, F. S., CHENEY, J. T., 1989: A petrogenetic grid for pelitic schists in the system SiO_2–Al_2O_3–FeO–MgO –K_2O–H_2O. – *Contrib. Mineral. Petrol.*, 101:149–164.

STANĚK, J., MIŠKOVSKÝ, J., 1975: Sekaninaite, a new mineral of the cordierite series, from Dolní Bory, Czechoslovakia. – *Scripta Fac. Sci, Nat. UJEP Brunensis, Geologia* 1, 5: 21–30. Brno.

STAŇKOVÁ, J., 1975: Výskyt cordieritu v plášti žulovského plutonu. – *Sborník GPO*, 9: 144–145. Ostrava.

ZACHOVALOVÁ, K., LEICHMAN, J., ŠVANCARA, J., 2002: Žulová batholith: extensional, fractionated ilmenite-allanite I-type granite. – *Jour. Czech Geol. Soc.*, 47: 35–44.

ŽÁČEK, V., 1997: Základní geologická mapa České republiky 1:50 000, list 14–22 Jeseník. Český geologický ústav. Praha.

ŽÁČEK, V., 2003: Thermal effects of the Žulová Granite Pluton, Silesicum, eastern Variscan front. – *Miner. Soc. of Poland, spec. pap.*, Vol. 23: 185–188. Wroclaw.

ŽÁČEK, V., CHÁB, J., SLABÝ, J., 1993: Metamorfní vývoj krystalinika Tepelské plošiny. – Dílčí závěrečná zpráva úkolu 2100, *MS,* Archiv České geologické služby. Praha.