

Allanit-(Ce) v horninách suity Tetčice (brněnský masiv)

Allanite-(Ce) in the rocks of the Tetčice suite (Brno Massif)

DAVID BURIÁNEK

Česká geologická služba, Leitnerova 22, 658 59 Brno; e-mail: david.burianek@geology.cz

BURIÁNEK D. (2013) Allanit-(Ce) v horninách suity Tetčice (brněnský masiv). *Bull. mineral.-petrol. Odd. Nár. Muz. (Praha) 21, 1, 29-36. ISSN 1211-0329.*

Abstract

Allanite-(Ce) is a relatively rare accessory mineral in the Brno Massif, typically found associated with three contrasting rock types from the western part this unit (especially Tetčice and Hlína suites). This paper is focused on the rocks Tetčice suite: (1) amphibole-biotite granodiorites to tonalites, (2) pegmatites and (3) calc-silicate rock (xenoliths). In amphibole-biotite granodiorites to tonalities is allanite-(Ce) formed by processes of mixing and mingling of magmas. Some pegmatites reacts with the Ca-rich wall rocks (mainly calc-silicate rock and marbles) and this contamination is accompanied with the precipitation of allanite-(Ce), An-rich plagioclase (An_{30}), hastingsite and sometime diopside. The presence of the allanite-(Ce) in the calc-silicate rocks is intimately associated with metasomatic and/or metamorphic process during contact metamorphism or pegmatite emplacement. Chemical composition of allanite-(Ce) in pegmatites is similar as in the calc-silicate rocks, but slightly differs from grains in the amphibole-biotite granodiorites to tonalites. Most grains from the igneous and metamorphic rocks in the Brno Massif show oscillatory zonation especially in contents of Fe^{2+} (0.74 to 1.19 apfu), Al (1.47 to 2.05 apfu), Ca (0.98 to 1.29 apfu), La (0.17 to 0.33 apfu), Th (0.00 to 0.05 apfu). The contents of Mn, Mg, U are relatively low.

Key words: allanite-(Ce), microchemistry, pegmatite, calc-silicate rocks, granitoids, Brno Massif, Czech Republic
Obdrženo: 9. ledna 2013; přijato: 17. května 2013

Úvod

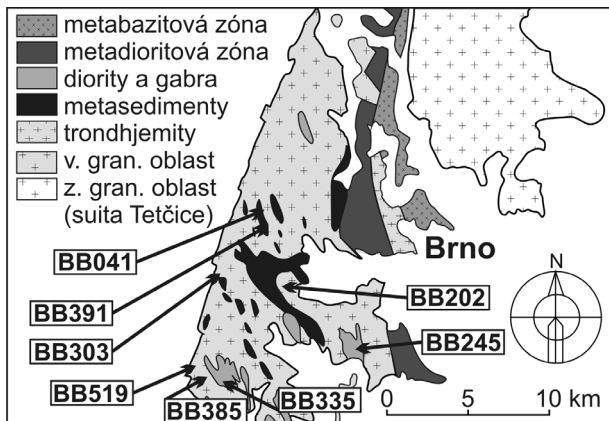
Allanit je sorosilikát, ze skupiny epidotu, který obsahuje podstatné množství REE a Y ($\sum REE + Y > 0.5$ apfu). Jeho obecný vzorec je $A_1A_2M_1M_2M_3(SiO_4)(Si_2O_7)(O,F)(OH)$, kde $A_1 = Ca, Sr, Pb^{2+}, Mn^{2+}$; $A_2 = REE^{3+}, Y, Th, U$ a Ca ; $M = Al, Fe^{3+}, Fe^{2+}, Mn^{3+}, Mn^{2+}, Mg, Cr^{3+}$, a V^{3+} (Deer et al. 1997; Armbruster et al. 2006). Podskupina allanitu se dělí na mnoho koncových členů podle zastoupení prvků v pozici A a M přičemž v této práci jsou diskutovány především dva hlavní koncové členy allanit-(Ce) = $Ca(REE)^{3+}AlFe^{2+}OOH$ a ferriallanit-(Ce) = $CaCe^{3+}Fe^{3+}AlFe^{2+}OOH$ (Armbruster et al. 2006).

V mnoha fosforem chudých granitoidech je allanit jedním z hlavních akcesorických minerálů, které koncentrují lehké vzácné zeminy (LREE). Naproti tomu v peraluminických fosforem bohatých horninách jsou LREE vázány zejména v monazitu (Bea 1996; Deer et al. 1997). Allanit je typický zejména v metaluminických až slabě peraluminických I a A-typových granitoidech, které krystalovaly v podmínkách vysoké fugacity kyslíku a vysoké aktivity vody v tavenině (Petřík, Broska 1994; Deer et al. 1997; Gieré, Sorensen 2004). Běžně se také objevuje jako akcesorický minerál v metamorfovaných horninách zejména ve skarnech (Deer et al. 1997).

V brněnském masivu se allanit ve vyskytuje v několika parageneticky odlišných vyvěřelých i metamorfovaných horninách. Jeho chemické složení nebylo prozatím detailněji studováno. Cílem příspěvku je porovnat chemické složení allanitu z jednotlivých horninových typů a pokusit se interpretovat jeho genezi.

Metodika

Analýzy minerálů byly provedeny na elektronové mikroskopě Cameca SX100 v Ústavu geologických věd PřF MU v Brně. Měření probíhalo ve vlnově disperzním módu za následujících podmínek: urychlovací napětí 15 kV, průměr elektronového svazku 2 μm , proud 20 nA, operátoři Š. Benedová a P. Gadas. Jako standardu bylo použito: augit (Si, Mg), ortoklas (K), jadeit (Na), chromit (Cr), almandin (Al), andradit (Fe, Ca), rodonit (Mn), TiO (Ti), topaz (F), benitoit (Ba), YAG (Y), $LaPO_4$ (La), $CePO_4$ (Ce), $NdPO_4$ (Nd), SmF_3 (Sm), PrF_3 (Pr), $DyPO_4$ (Dy), $ErPO_4$ (Er), $GdPO_4$ (Gd), Topaz (F), $YbPO_4$ (Yb), PbS (Pb), zirkon (Zr). Vzorce minerálů epidotové skupiny jsou přepočteny na 3 Si. Při normalizaci na 8 kationtů se totiž u většiny analýz allanitu pohybovaly obsahy Si nad 3.05 (Armbruster et al. 2006). Obsahy Fe^{3+} a Fe^{2+} v krystalochemickém vzorci nebyly stanoveny a proto je všechno Fe přepočteno jako dvojmocné. Většina analyzovaných allanitů totiž nese známky sekundárních přeměn což se projevuje především proměnlivými obsahy SiO_2 a nižšími celkovými sumami oxidů u řady analýz. Stanovit hranici mezi allanitem postiženým sekundárními přeměnami a bez známek alterace je velmi problematické (z původních 36 analýz byla nakonec při interpretaci použita pouze polovina). Z tohoto důvodu nebylo Fe^{3+} vypočteno ze stochiometrie (Droop 1987), ale pouze odhadnuto pomocí metody Petříka et al. (1995). Empirický vzorec amfibolů byl přepočten na 23 kyslíků a poměr Fe^{2+}/Fe^{3+} byl odhadnut metodou 13 eCNK (Schumacher 1996). Pyroxeny byly přepočteny na 6 O. Použité zkratky minerálů jsou podle práce Whitneyové a Evanse (2010).



Obr. 1 Zjednodušená geologická mapa střední části brněnského masivu s vyznačením pozice studovaných lokalit. Geologická mapa upravena podle schematické mapy, kterou publikovali Mitrenga a Rejl (1993).

Geologická pozice

Brněnský masiv (obr. 1) je od Z k V členěn na západní granodioritovou oblast, centrální bazický pás a východní granodioritovou oblast (Hanžl, Melichar 1997; Jelínek, Dudek 1993). Centrální bazický pás je ve své západní části tvořen různými typy slabě metamorfovaných mafických až ultramafických hornin a ve východní části dominují slabě metamorfované kyselé a bazické vulkanické a vulkanoklastické horniny. Granodiority a granity (I, S, A typy) dyjského teránu jsou dominantními horninami v západní části brněnského masivu (např. Finger et al. 1995). V období kolem 600 Ma (Finger et al. 1995; van Breemen et al. 1982) intrudovaly tyto granitoidy do metamorfovaného vulkanosedimentárního komplexu a hornin dioritové zóny. Východní granodioritovou oblast budují méně diferenciované I-typové granodiority až tonality patřící k slavkovskému teránu (Hanžl, Melichar 1997).

Západní část brněnského masivu se dělí na granitoidy suity Tetčice, Réna a Hlína (Leichmann, Höck 2008):

Tetčická suita reprezentuje komplex převážně S-typových granitů až granodioritů mezi nimiž můžeme rozlišit různé texturní typy, které vznikly v důsledku kombinace více faktorů jako je magmatické diferenciacce, asimilace a míšení magmat. Granitoidy obsahují poměrně hojné zbytky metamorfního pláště tvořeného hlavně rulami až migmatity, bazickými horninami a vápenatosilikátovými horninami až amfibolity.

Suitu Réna budují amfibol-biotitické až biotitické I-typové granity a granodiority (Leichmann, Höck 2008).

Biotitické granity často s granátem a magnetitem, které vykazují A-typové geochemické charakteristiky byly vyčleněny jako suita Hlína. Tyto granity tvoří drobná tělesa a žíly v granitech a granodioritech suity Réna a méně často také v horninách suity Tetčice (Leichmann, Höck 2008).

Horniny obsahující allanit-(Ce)

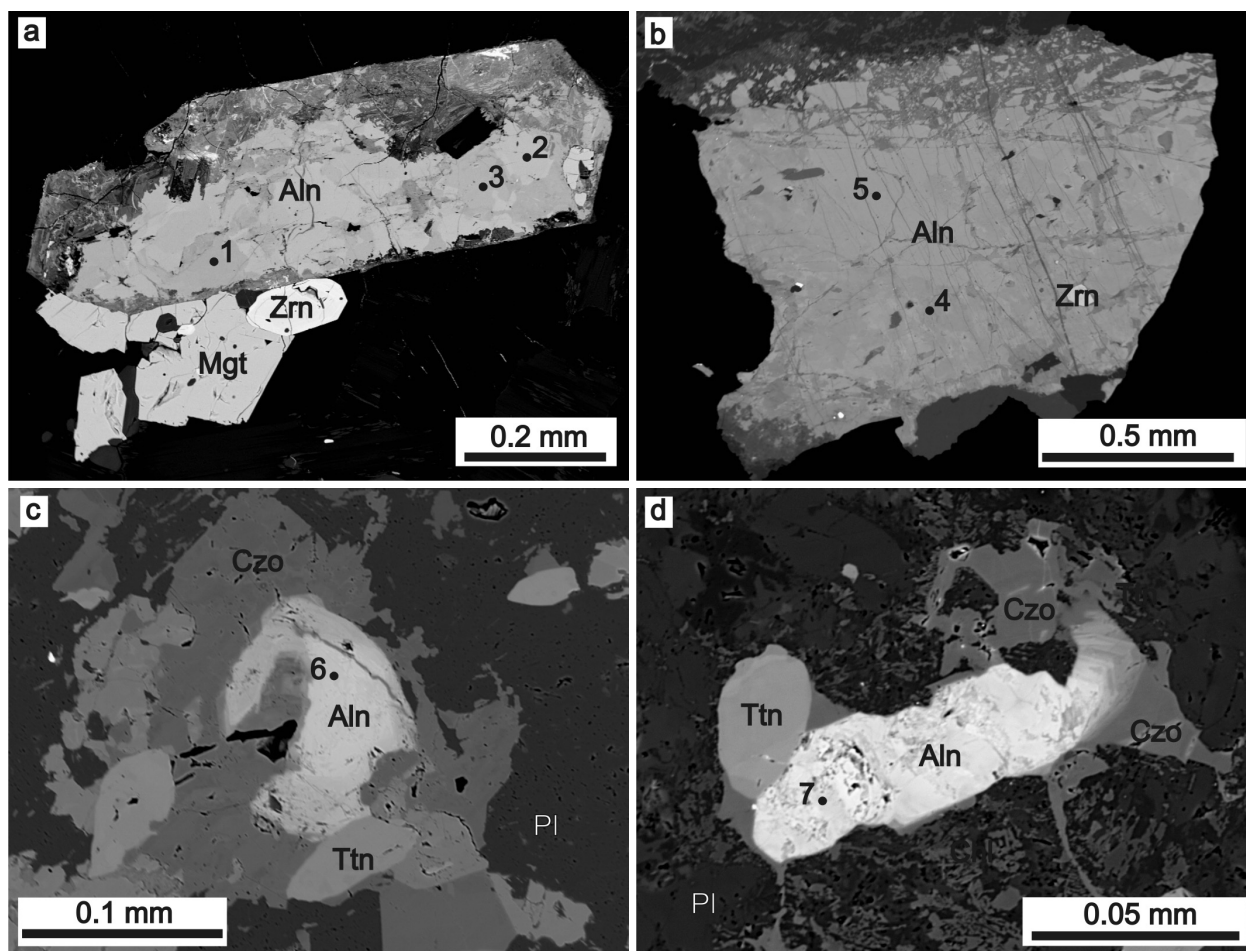
V brněnském masivu se allanit-(Ce) vyskytuje poměrně vzácně (Kruťa 1966). Prozatím byl tento minerál zjištěn hlavně v západní části této jednotky a to v horninách suity Hlína a Tetčice (Hönig et al. 2010; Buriánek 2013a). Tento článek se věnuje horninám suity Tetčice (obr. 1), kde se allanit-(Ce) vyskytuje ve třech hlavních paragenezích (tab.1): 1) amfibol-biotitické granodiority až tonality, 2) pegmatity a 3) vápenatosilikátové horniny.

Amfibol-biotitické granodiority až tonality

Amfibol-biotitické granodiority jsou středně zrnité šedobílé až narůžovělé horniny. Většinou vytvářejí v převažujících biotitických granitech tělesa nepravidelného tvaru o velikosti několik desítek až stovek metrů. Často obsahují enklávy dioritů a gaber a vzácně také xenolity metamorfovaných hornin. Draselný živec tvoří hypautomorfní a xenomorfní zrna až 5 mm velká ($Or_{98-87}Ab_{02-03}$). Většina granodioritů obsahuje středně bazický plagioklas, který je z velké části nahrazený albitem (An_{2-6}). Amfiboly ($Fe/(Fe+Mg) = 0.43 - 0.50$; $Si = 6.65 - 7.26$ apfu) tvoří hypautomorfní zrna, často srůstající s biotitem. Chemické složení středů zrn amfibolů odpovídá tšermakitu, paragasitu až edenitu a okraje mají složení magneziohornblendu. Chloritizovaný biotit v sobě uzavírá akcesorické minerály jako je apatit a zirkon. Poměrně často se také vyskytuje titanit. Allanit-(Ce) se v těchto horninách objevuje jen vzácně, zejména v blízkosti větších enkláv gaber, případně v žilách monzonitu až tonalitů prorážejících enklávy gaber a dioritů. Mnohdy jsou jeho zrna nehomogenní a nesou známky sekundárních alterací. V nealterovaných částech zrn je místy patrná oscilační zonálnost, avšak většinou mají zrna zonálnost sektorovou. Allanit-(Ce) občas uzavírá sloupcovité krystaly apatitu (obr. 2a) a někdy

Tabulka 1 Přehled studovaných vzorků (lokalizace X a Y uvedena souřadném systému S-JTSK)

hornina	č.vzorku	lokality	X	Y	minerální složení
skarnoid-erlan	BB041	Kývalka	-1159529.000	-609183.000	Cpx, Pl, Kfs, Amp, Ttn, Zo, Aln, Prh
skarnoid-erlan	BB391	Kývalka	-1161165.646	-609389.789	Cal, Cpx, Pl Czo, Zo, Aln, Qtz, Ttn
mramor	BB519	Ivančice	-1167955.726	-614897.117	Grt, Cpx, Cal, Pl, Kfs, Ttn, Aln, Brt
erlan-pegmatit	BB303	Tetčice	-1165291.296	-611519.451	Cpx, Pl, Kfs, Amp, Ttn, Aln
pegmatit	BB385	Ivančice	-1168162.053	-614729.404	Qtz, Pl, Kfs, Bt, Amp, Aln, Chl
Amp-Bt granodiorit	BB202	Omice	-1163795.714	-608896.582	Qtz, Pl, Kfs, Bt, Amp, Aln, Ttn, Chl, Mgt
Amp-Bt granodiorit	BB245	Anenský mlýn	-1166789.552	-604356.636	Qtz, Pl, Kfs, Bt, Amp, Ttn, Aln, Chl, Mgt
Amp-Bt tonalit	BB335	Hlína	-1168589.116	-611529.834	Qtz, Pl, Kfs, Bt, Amp, Ttn, Aln Chl



Obr. 2 Fotografie allanitu v BSE (Aln = allanit, Czo = klnozoisit, Mgt = magnetit, Pl = plagioklas Ttn = titanit, Zrn = zirkon): (a) částečně alterovaný allanit se sektorovou zonálností v amfibol-biotitickém granodioritu, Anenský mlýn (BB 245); (b) allanit z pegmatitu, Ivančice (BB385); (c) reliktní drobného zrna allanitu uzavřeného v klnozoisitu na kontaktu pegmatitu s erlanem, Tetčice (BB303); (d) oscilačně zonální zrno allanitu uzavřené v klnozoisitu, Kývalka (BB041). Čísla označují analýzy v tabulce 2.

bývá obrůstán magnetitem (vzácně byly drobné inkluze magnetitu objeveny v okrajových zónách allanitu) nebo titanitem.

Pegmatity

Většina pegmatitů v brněnském masivu má poměrně jednoduché minerální složení: kyselý plagioklas (dominantní), draselný živec, křemen, v menším množství je pak přítomen biotit případně také muskovit, granát, andalusit a turmalín (Buriánek 2010a). Z akcesorických minerálů pak bývá uváděn apatit, zirkon titanit, magnetit, hematit, pyrit, epidot a allanit (Štelcl, Weiss 1986). Pegmatity s allanitem obvykle tvoří žíly o mocnostech od 2 cm do několika dm. Skládají se z hrubě až středně zrnitého pegmatitu s granitickou stavbou. Jejich kontakt s okolím je ostrý, přičemž žíly mají velmi nepravidelný tvar a často prorážejí páskování vápenatosilikátových hornin.

Přestože pegmatity prorážejí granitoidy, bazické či metamorfované horniny, jedná se vesměs o mineralogicky a geochemicky velmi podobné žíly. Výjimku tvoří pegmatity prorážející tělesa vápenatosilikátových hornin, které se od ostatních pegmatitů liší svou specifickou minerální asociací. Obsahují totiž amfibol, allanit a někdy dokonce monoklinické pyroxeny (nebyly po chemické

stránce studovány, ale podle optických vlastností se pravděpodobně jedná o diopsid).

Pro studium byly zvoleny dvě žíly, z nichž jedna pochází od Popůvek a druhá od Ivančic. Tyto žíly jsou asi 2 - 14 cm mocné a obě prorážejí vápenatosilikátové horniny. Skládají se z xenomorfního až hypautomorfního draselného živce (Ab_6) a hypautomorfního plagioklasu bez zřetelné zonálnosti (An_{30}). Plagioklas bývá postižen mnohem více sericitizací než draselný živec. Pegmatity obsahují až 3 cm dlouhé sloupcovité krystaly hastingsitu ($Si = 6.26 - 6.40 \text{ apfu}$, $X_{Fe} = 0.90 - 0.89$). Okraje vyrostlíc amfibolů obsahují drobné inkluze biotitu. Některé drobnější žilky o mocnosti několik cm obsahují z tmavých minerálů pouze biotit. Ten je někdy zcela chloritizován a v štěpných trhlinách nacházíme drobné větvenité agregáty zrn prehnitu.

Žíla z Ivančic obsahuje allanit-(Ce), který je alterován pouze na okrajích zrna (obr. 2b). Místy je patrná nevýrazná sektorová zonálnost a někdy obsahuje inkluze zirkonu. Ve vzorku z Popůvek byl allanit-(Ce) zcela alterován a nahrazen směsí sekundárních minerálů (klnozoisit, parisit, apatit, rabdofán; tyto fáze ale nebyly detailně studovány). Nealterovaný allanit-(Ce) se ale zachoval na kontaktu erlanu s pegmatitem na lokalitě Tetčice a to pravděpodobně díky tomu, že byl uzavřen v klnozoisitu (obr. 2c).

Vápenatosilikátové horniny

Vápenatosilikátové horniny vystupují jako xenolity uvnitř granitoidů, které dosahují velikosti od několika metrů do stovek metrů. Většina vápenatosilikátových hornin je jemně až středně zrnitá a páskovaná. Světlé (plagioklas ± pyroxen) a tmavé pásy (plagioklas + amfibol ± pyroxen) mají mocnost až několik cm. Méně časté jsou varianty tvořené pouze plagioklasem a pyroxenem. Diopsid až Mg bohatý hedenbergit ($X_{Fe} = 0.47 - 0.60$) je charakterizován nevýraznou oscilační zonálností. Chemické složení xeno-

morfních až hypautomorfních plagioklasů může v jednotlivých páscích mírně kolísat (An_{46-58}). Zastoupení draselného živce v různých částech horniny mění a ve světlých páscích nemusí být přítomen vůbec. Xenomorfní draselný živec ($Or_{95-96}Ab_{4-5}$) obvykle vyplňuje intergranulární prostor mezi plagioklasy. Amfibol bývá hypautomorfní a někdy uzavírá drobné inkluze plagioklasu. Svým chemickým složením odpovídá hastingsitu až feroedenitu ($X_{Fe} = 0.63 - 0.65$, $Si = 6.28 - 6.69$ apfu).

Místy se objevují polohy mramorů, které jsou středně zrnité. Skládají se z kalcitu, plagioklasu (An_{0-15}), draselné-

Tabulka 2 Reprezentativní analýzy allanitu-(Ce), krystalochemický vzorec je normalizován na 3 Si (H_2O^* dopočítáno ze stechiometrie). Název horniny, lokalita a minerální asociace horniny viz tabulka 1 (čísla v závorce za číslem vzorku viz obr. 2).

vzorek	BB245A(1)	BB245A(2)	BB245A(3)	BB385B(4)	BB385B(5)	BB303(6)	BB041(7)	BB202A	BB391A	BB391A
SiO ₂	32.36	31.96	32.43	32.85	31.96	34.47	32.40	30.32	32.06	32.69
TiO ₂	0.96	1.46	1.29	1.18	1.31	0.22	0.71	0.92	0.44	0.15
ThO ₂	0.43	0.89	0.75	2.03	1.29	0.64	0.08	0.77	0.03	0.05
Al ₂ O ₃	13.98	13.27	13.94	15.89	15.73	18.75	17.34	13.85	17.55	18.93
Y ₂ O ₃	0.00	0.00	0.00	0.15	0.07	0.00	0.00	0.10	0.14	0.05
La ₂ O ₃	6.59	7.48	6.48	5.83	6.78	7.44	5.34	5.93	5.19	4.88
Ce ₂ O ₃	10.73	11.87	10.68	9.28	9.50	7.35	10.40	10.66	11.20	9.60
Pr ₂ O ₃	0.96	1.06	0.99	0.80	0.66	0.39	0.96	0.93	1.19	0.88
Nd ₂ O ₃	2.53	2.82	2.79	2.34	2.19	1.04	3.29	2.76	4.39	3.36
Sm ₂ O ₃	0.21	0.14	0.22	0.28	0.24	0.14	0.33	0.37	0.57	0.41
Gd ₂ O ₃	0.13	0.00	0.00	0.10	0.00	0.00	0.00	0.13	0.18	0.10
FeO	14.86	14.72	14.61	11.15	11.24	8.96	11.99	12.51	11.19	10.70
MnO	0.82	0.91	0.82	0.28	0.16	0.14	0.14	0.65	0.12	0.23
MgO	0.89	1.24	0.97	0.64	0.70	0.30	0.53	0.93	0.53	0.55
CaO	11.48	9.94	11.07	11.67	11.44	13.75	12.66	9.28	11.70	13.15
PbO	0.00	0.00	0.00	0.07	0.00	0.00	0.00	0.14	0.00	0.00
Na ₂ O	0.00	0.00	0.00	0.04	0.02	0.07	0.00	0.05	0.00	0.00
F	0.10	0.11	0.07	0.25	0.27	0.32	0.00	0.39	0.00	0.00
H ₂ O*	1.57	1.54	1.59	1.52	1.47	1.57	1.62	1.33	1.60	1.63
O=F,Cl	0.04	0.05	0.03	0.11	0.11	0.13	0.00	0.17	0.00	0.00
celkem	98.60	99.41	98.68	96.35	95.03	95.55	97.77	92.00	98.08	97.38
Si	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000
Ti	0.067	0.103	0.090	0.081	0.092	0.014	0.049	0.069	0.031	0.010
Th	0.009	0.019	0.016	0.042	0.028	0.013	0.002	0.017	0.001	0.001
Al	1.528	1.468	1.519	1.710	1.740	1.923	1.893	1.615	1.935	2.047
Y	0.000	0.000	0.000	0.006	0.003	0.000	0.000	0.005	0.006	0.002
La	0.225	0.259	0.221	0.196	0.235	0.239	0.182	0.216	0.179	0.165
Ce	0.364	0.408	0.362	0.310	0.326	0.234	0.352	0.386	0.384	0.322
Pr	0.033	0.036	0.033	0.027	0.023	0.012	0.032	0.034	0.041	0.029
Nd	0.084	0.095	0.092	0.076	0.073	0.032	0.109	0.097	0.147	0.110
Sm	0.007	0.004	0.007	0.009	0.008	0.004	0.010	0.012	0.018	0.013
Gd	0.004	0.000	0.000	0.003	0.000	0.000	0.000	0.004	0.006	0.003
Fe ²⁺	1.152	1.156	1.130	0.852	0.882	0.652	0.929	1.035	0.876	0.821
Mn	0.064	0.073	0.064	0.022	0.013	0.010	0.011	0.054	0.010	0.018
Mg	0.124	0.173	0.134	0.087	0.098	0.039	0.072	0.136	0.073	0.076
Ca	1.141	1.000	1.098	1.142	1.151	1.282	1.256	0.984	1.173	1.293
Pb	0.000	0.000	0.000	0.002	0.000	0.000	0.000	0.004	0.000	0.000
Na	0.000	0.000	0.000	0.007	0.004	0.012	0.000	0.010	0.000	0.000
Kat.(celk.)	7.802	7.798	7.771	7.572	7.678	7.470	7.900	7.681	7.879	7.912
H	0.971	0.967	0.980	0.928	0.920	0.912	1.000	0.877	1.000	1.000
F	0.029	0.033	0.020	0.072	0.080	0.088	0.000	0.123	0.000	0.000

ho živce ($\text{Or}_{98-99}\text{Ab}_{1-2}$), hedenbergitu ($X_{\text{Fe}} = 0.57 - 0.62$) a granátu ($\text{Adr}_{3-88}\text{Grs}_{8-97}\text{Alm}_{0-2}\text{Sps}_{0-4}\text{Prp}_{0-1}$). V akcesorickém množství je přítomen allanit-(Ce), apatit, titanit a baryt.

Skarnoidy tvoří polohy o mocnosti od několika dm až do několik desítek metrů uvnitř erlanů. Většinou jsou páskované a skládají se z pásků s různým obsahem granátu ($\text{Grs}_{80-88}\text{Adr}_{11-17}\text{Alm}_{0-4}\text{Sps}_{0-1}\text{Prp}_{0-1}$), vesuvianu, klinopyroxenu, klinozoisitu (Ps_{9-21}), plagioklasu (An_{58}) a kalcitu.

Allanit-(Ce) tvoří ve všech třech zmíněných horninových typech automorfní až hypautomorfní oscilačně zonální zrna, která často srůstají se zirkonem. Často je starší allanit lemován mladším klinozoisitem (obr. 2d).

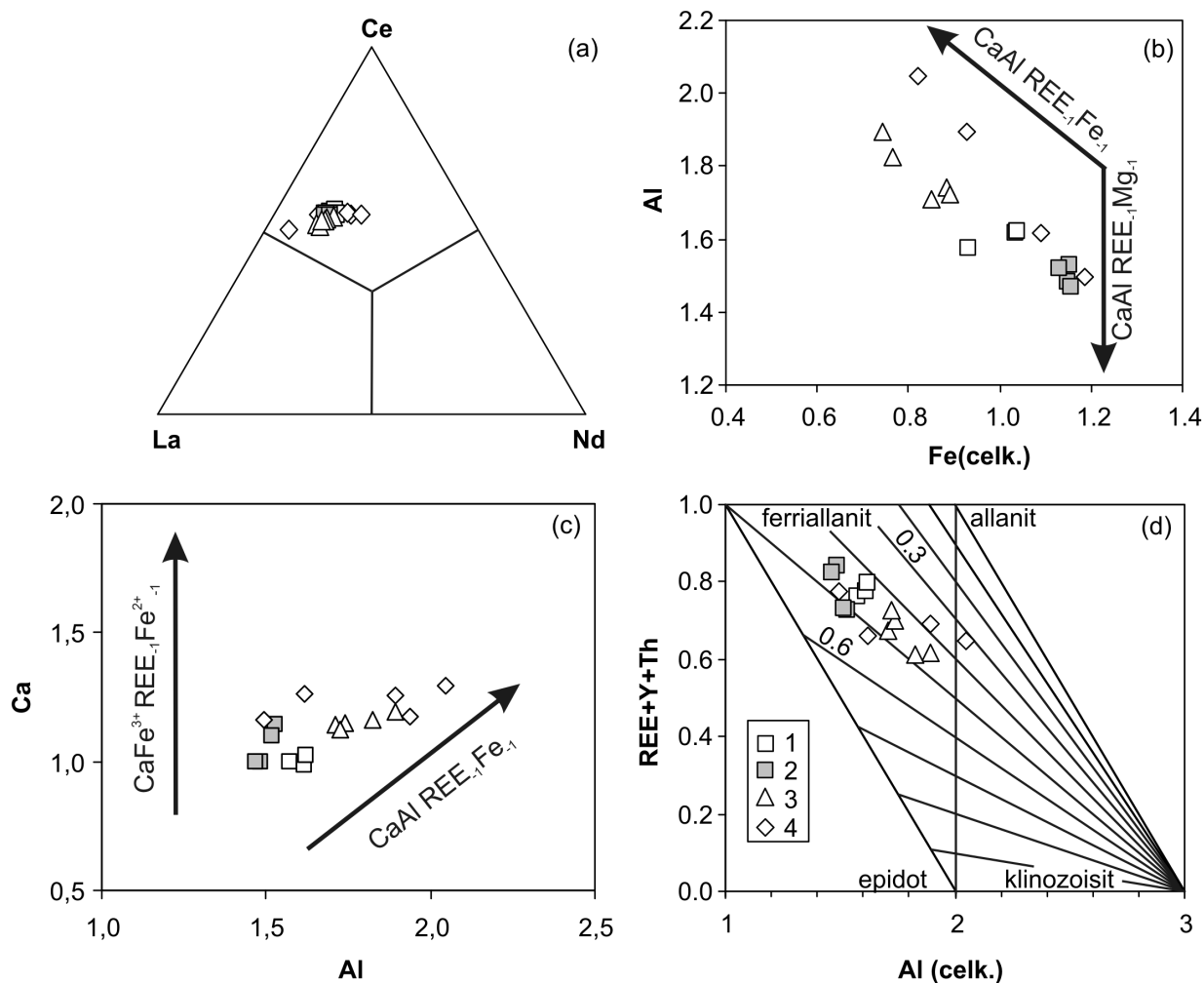
Chemické složení allanitu

Všechna studovaná zrna můžeme klasifikovat jak allanit-(Ce) (obr. 3a; $\text{Ce} = 0.23 - 0.42 \text{ apfu}$). Některá zrna jsou však postižena sekundárními alteracemi a proto byly pro podrobnější studium vybrány pouze analýzy, jejichž krystalochemický vzorec vykazuje při přepočtu na 3 Si obsazení pozice A 1.9 - 2.0 *apfu* a pozice M 2.7 - 3.0 *apfu* (tab. 2). Jednotlivá zrna někdy vykazují oscilační zonálnost především v obsazích $\text{Fe}^{2+}_{\text{celk}}$ (0.74 - 1.19 *apfu*), Al

(1.47 - 2.05 *apfu*), Ca (0.98 - 1.29 *apfu*) a Mn (0.01 - 0.08 *apfu*). Celkové obsahy REE kolísají v rozmezí 0.48 - 0.83 *apfu* avšak tvary křivek REE normalizované chondritem se příliš neliší. Charakteristické je výrazné obohacení na LREE (např. La 0.17 - 0.34 *apfu*), zatímco obsahy HREE jsou pod detekčním limitem. Obsahy Mg se pohybují v rozmezí 0.03 - 0.18 *apfu*. Allanit z jednotlivých horninových typů se liší hlavně v obsazích Fe^{2+} a Al.

Největší variabilitu v obsazích Fe^{2+} a Al vykazuje allanit z vápenatosilikátových hornin ($\text{Fe}^{2+}_{\text{celk}} = 0.82 - 1.19$, Al = 1.49 - 2.05 *apfu*). Zonálnost je obvykle oscilační a v okrajových částech bývá patrný úbytek $\text{Fe}^{2+}_{\text{celk}}$ a REE (přechod do REE bohatého epidotu až klinozoisitu). Tato variabilita může souviset s proměnlivou minerální asociací (tab. 1) hostitelských hornin (často i v rámci jednoho výbrusu se střídají pásy s různým obsahem amfibolu a plagioklasu). Allanit v těchto horninách obvykle vystupuje v asociaci s klinopyroxenem, bazickým plagioklasem, titanitem a často je také přítomen amfibol, draselný živec, případně kalcit. Ve skarnech se navíc allanit může vyskytovat společně s granátem.

Pegmatity prorážející vápenatosilikátové horniny obsahují allanit, který má relativně homogenní chemi-



Obr. 3 Chemické složení allanitu v diagramech La - Nd - Ce (a); Fe (celkové) vs. Al (b); Al vs. Ca (c); Al (celkové) vs. REE+Y+Th, linie vycházející z koncového členu klinozoisitu umožňují odhadnout poměr $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}_{\text{celk}}$ (Petřík et al. 1995) (d). V diagramech jsou zobrazeny vzorky: (1) amfibol-biotitický granodiorit z lokality Omice (BB202); (2) amfibol-biotitický granodiorit z lokality Anenský mlýn (BB245); (3) pegmatity (BB303, BB385); (4) erlany a mramory (BB041, BB391, BB519).

ké složení ($Fe^{2+}_{celk} = 0.74 - 0.89$, $Al = 1.71 - 1.89$ apfu). Pegmatity mají poměrně jednoduchou minerální asociaci (tab. 1) tvořenou obvykle křemenem, kyselým až středně bazickým plagioklasem, draselným živcem, amfibolem a občas biotitem a titanitem.

Ve srovnání s pegmatity vykazuje allanit z granodioritů až tonalitů nižší Al ($1.47 - 1.62$ apfu) a vyšší Fe^{2+}_{celk} ($0.93 - 1.62$ apfu). Tyto horniny jsou relativně bohaté na mafické minerály jako je amfibol a biotit (minerální asociace má obvykle složení Qtz + Pl + Kfs + Amp + Bt ± Ttn ± Mgt).

U většiny studovaných zrn allanitu-(Ce) je patrná negativní korelace mezi Fe a Al. Protože Al zároveň pozitivně koreluje s Ca, stejně jako Fe s REE, můžeme předpokládat, že hlavním substitučním vektorem je $REE_1Fe^{2+}_1Ca_{-1}Al_{-1}$ (allanitový substituční vektor; obr. 3b, c). Někdy může být kombinován s vektorem $Ca_1Fe^{3+}_1REE_{-1}Fe^{2+}_{-1}$. Poměrně dobrá korelace mezi REE a Mg také indikuje přítomnost složené substituce: $REE_1Mg_1Ca_{-1}Al_{-1}$. Vzhledem k nízkému obsahu Mg ($0.03 - 0.18$ apfu) je však její význam zanedbatelný.

Allanit-(Ce) z granodioritů a tonalitů se zastoupením prvku REE podobá ostatním allanitům z granitoidů (např. Wood, Ricketts 2000 nebo Gieré, Sorensen 2004). Zvláště v allanitu-(Ce) z tonalitů jsou však substituční vektory často maskovány sekundárními přeměnami (takové analýzy mají většinou nižší celkové sumy). Hlavně v granodioritech je allanit-(Ce) na okrajích zrn silně nehomogenní. Často je tvořen nepravidelně rozloženými fázemi s různými obsahy SiO_2 , CaO, Al_2O_3 a REE_2O_3 . Na okrajích zrn také pozorujeme obohacení Th ($0.00 - 0.06$ apfu), které patrně způsobilo metamiktizaci. Obsahy U (do 0.003 apfu) a Y (do 0.007 apfu) jsou u všech studovaných vzorků velmi nízké. Okrajové metamiktické lemy allanitu-(Ce) patrně podlely interakcí s mladšími fluidy. Sekundární přeměny často postihly i centrální část zrna, kde jsou v BSE obzvláště patrné tmavší žilky a šmouhy tvořené allanitem-(Ce) s poněkud nižším obsahem kationtů ($6.64 - 7.44$ apfu). Tento typ sekundární přeměny postihuje zejména allanit-(Ce) v granodioritech a pegmatitech (obr. 2a, b).

Množství Fe^{3+} je možné u nealterovaného allanitu-(Ce) odvodit na základě klasifikačního diagramu (obr. 3d) pro minerály epidotové skupiny (Petřík et al. 1995), který umožňuje odhadnout poměr Fe^{3+}/Fe^{2+}_{celk} . Tento poměr se u většiny studovaných hornin pohybuje mezi 0.4 až 0.5.

Diskuse

Vznik allanitu-(Ce) v granodioritech a tonalitech

Allanit-(Ce) se vyskytuje v amfibol-biotitických granodioritech, které tvoří drobná tělesa uvnitř biotitických granitů až granodioritů. Bazické horniny (gabra až diority) se pak vyskytují jako drobná tělesa, nebo enklávy uvnitř amfibol-biotitických granodioritů. Některé z dioritových a gabrových enkláv jsou proráženy žilami amfibol-biotitických až amfibolických tonalitů až monzonitů. Allanit-(Ce) se vyskytuje také v těchto žilách. V amfibol-biotitických granodioritech až tonalitech je allanit-(Ce) hlavním nositelem LREE (Buriánek 2013). Naproti tomu v biotitických granitech až granodioritech a v gabrech až dioritech jsou LREE vázány v apatitu a případně také v titanitu (např. Bea 1996; Storkey et al. 2005).

Amfibol-biotitické granodiority až tonality jsou produktem míšení bazického (gabra a diority) a kyselého (biotitické granity) magmatu (Leichmann, Höck 2008). Výskyt allanitu-(Ce) je prostorově vázán právě na oblasti kde do-

chází k mixingů a minglingu. Amfibol-biotitické granodiority s allanitem-(Ce) totiž často obsahují enklávy bazického magmatu. Právě na takových místech byl patrně v metaluminické tavenině vhodné podmínky (tedy hlavně dostatek vápníku a REE) pro krystalizaci allanitu-(Ce). Tento minerál vznikl patrně již během magmatické krystalizace, protože bývá obklopen biotitem. Magnetit na druhou stranu často vytváří větší zrna, která obrůstají ostatní akcesorické minerály (zirkon, apatit) a vznikl tedy patrně až v pozdních fázích magmatické krystalizace, nebo dokonce v subsolidovém stádiu vývoje horniny. V okrajových partiích allanitu nacházíme inkluze magnetitu, takže oba minerály krystalovaly společně. Je velmi pravděpodobné, že přinejmenším část magnetitu vznikala subsolidovou reakcí anorit + draselný živec + titanomagnetit + H_2O = titanit + muskovit + magnetit + křemen (Broska et al. 2007). Jemnozrnný muskovit (sekundární sericit) je totiž v granodioritech poměrně běžný. V těchto výrazně oxidačních podmínkách mohl vznikat také allanit (Broska et al. 2007). To však patrně platilo pouze pro Th bohaté okraje allanitových zrn.

Vznik allanitu-(Ce) ve vápenatosilikátových horninách

V erlanech, mramorech a skarnoidech brněnského masivu je allanit-(Ce) poměrně vzácný. Ve skarnoidech bývá vázán hlavně na granátem a vesuvianem bohaté polohy a v erlanech, nebo mramorech se často vyskytuje poblíž kontaktu s žilami pegmatitů. Allanit-(Ce) je většinou obklopen plagioklasem a obrůstán mladším klinozoisitem. Allanit-(Ce) je tedy starší než variské sekundární alterace a vznikl současně s okolním bazickým plagioklasem, granátem a vesuvianem. Polize a paragenese, v níž se allanit-(Ce) vyskytuje, dokládají jeho vznik v důsledku metasomatických procesů spojených s kontaktní metamorfózou (vazba na skarnové polohy), nebo intruzí mladších pegmatitů (vazba na okraje pegmatitových žil).

Vznik pegmatitů s allanitem-(Ce)

Minerální asociace pegmatitů (křemen, plagioklas, allanit-(Ce), hastingsit, biotit a případně také diopsid) je v brněnském masivu známa pouze z pegmatitů prorážejících vápenatosilikátové horniny. Ostatní pegmatity jsou totiž biotitické nebo muskovit-biotitické a většinou také peraluminické. Občas dokonce obsahují kromě biotitu a muskovitu také turmalín, granát nebo dokonce andalusit. Také bazická plagioklasu je poněkud vyšší ve srovnání s dominantními pegmatity a žilnými peraluminickými granity (An_{30} vs. An_{14-22} ; Buriánek 2010a).

Pegmatity prorážející vápenatosilikátové horniny tvoří nezonální hrubě zrnité žíly nevelké mocnosti (často pouze několik cm až dm). Jejich minerální složení potvrzuje, že se jedná o metaluminické horniny, které můžeme na základě klasifikace Černého a Ercita (2005) zařadit mezi pegmatity s NYF signaturou. Minerální asociace studovaných pegmatitů je velmi podobná řadě pegmatitů ve skarnech a mramorech (například v moldanubiku; Novák 2005). Toto specifické minerální složení bývá vysvětlováno kontaminací taveniny některými prvky z okolí vápenatosilikátových a karbonátových hornin (např. Novák 2005; Žáček 1985, 1997). Jedná se hlavně o Mg, Fe a Ca. Allanit-(Ce) se vyskytuje přímo v pegmatitu, nebo na jeho kontaktu s okolními erlany. Oba tyto typy se chemickým složením blíží allanitu-(Ce) z vápenatosilikátových hornin. Allanit-(Ce) vázaný amfibol-biotitické granodiority a tonality se od něj chemicky poněkud odlišuje (např. nižší obsahy Ca a Al; viz obr. 3).

Postmagmatické procesy

Přeměna biotitu na chlorit spojená se vznikem prehnitu je ale mladší a velmi pravděpodobně souvisí s variskou metamorfózou a deformací. Prehnit se totiž vyskytuje také v paleozoických subvulkanických bazických žilách, které brněnský masiv proráží. Na základě jejich studia se pak podařilo odhadnout teploty variské metamorfózy na 200 - 300 °C (Buriánek 2010b). Přítomnost prehnitu v choritizovaném biotitu indikuje poměrně výraznou aktivitu fluid, která umožnila migraci Ca. Tento proces byl provázen sericitizací plagioklasů a patrně také sekundárními přeměnami allanitu-(Ce). Nejintenzivněji byly těmito přeměnami postiženy metamiktizované okraje zrn, protože metamiktizace mněním zastoupení některých prvků a zvyšuje se množství vody ve struktuře allanitu (Deer et al. 1997). Tento proces výrazně usnadňuje rozpad allanitu-(Ce) na sekundární minerály jako jsou hematit, klinozoisit, epidot, jílové minerály, parisit, apatit, rabdofán apod. Také střední části zrna nesou známky sekundárních přeměn, které však působily nerovnoměrně (žilky, šmouhy). Tyto přeměny se projeví drobnými odlišnostmi ve složení allanitu (např. vyšší obsahy SiO₂). Díky těmto přeměnám má řada analýz poněkud větší rozptýl chemického složení (Fe²⁺_{celk} = 0.59 - 1.21 apfu, Al = 1.36 - 2.14 apfu), Ca = 0.81-1.74 apfu a La 0.15 - 0.34 apfu). V důsledku sekundárních přeměn bývá allanit přednostně ochuzen o Ca, REE a Fe²⁺ se oxiduje na Fe³⁺ (Gieré, Sorensen 2004). Ve vápenatosilikátových horninách byl allanit-(Ce) někdy uchráněn před alterací díky tomu, že jej uzavřel mladší klinozoisit.

Závěr

Allanit-(Ce) se v suitě Tetčice (západní část brněnského masivu) vyskytuje v několika horninových typech: (1) amfibol-biotitické granodiority až tonality, (2) pegmatity a (3) vápenatosilikátové horniny. V amfibol-biotitických granodioritech až tonalitech vznikl allanit-(Ce) v důsledku míšení magmat. V pegmatitech indikuje kontaminaci magmatu vápníkem z okolních metasedimentů (hlavně erlanů a mramorů) a ve vápenatosilikátových horninách vznikl allanit-(Ce) v důsledku kontaktní metamorfózy spojené místy i s metasomatózou (někdy jsou tyto procesy spojeny s intruzí pegmatitů). Chemické složení allanitu-(Ce) v pegmatitech je podobné allanitu-(Ce) v okolních vápenatosilikátových horninách, avšak poněkud se liší od allanitu-(Ce) v amfibol-biotitických granodioritech až tonalitech. Většina studovaných zrn vykazuje oscilační zonálnost především v obsazích Fe²⁺_{celk} (0.74 - 1.19 apfu), Al (1.47 - 2.05 apfu), Ca (0.98 - 1.29 apfu), La (0.17 - 0.33 apfu), Th (0.00 - 0.05 apfu). Obsahy Mn, Mg, U jsou poměrně nízké. Většina zrn allanitu-(Ce) je postižena sekundárními přeměnami, které postihují hlavně okraje zrn s vyšším obsahem Th.

Poděkování

Autor děkuje I. Petříkovi a R. Škodovi za kritické pročtení rukopisu. Práce byla vypracována s finanční podporou projektu ČGS 390003 (Základní geologické mapování Brněnska v měřítku 1:25 000).

Literatura

- Armbruster T., Bonazzi P., Akasaka M., Bermanec V., Chopin C., Gieré R., Heuss-Assbichler S., Liebscher A., Menchetti S., Pan Y., Pasero, M. (2006) Recommended nomenclature of epidote-group minerals. *Eur. J. Mineral.* 18, 551-567.
- 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.
- Broska I., Harlov D., Tropper P., Šiman P. (2007) Formation of magmatic titanite and titanite-ilmenite phase relations during granite alteration in the Tribeč Mountains, Western Carpathians, Slovakia. *Lithos* 95, 58-71.
- Buriánek D. (2010a) Turmalín v pegmatitech, aplitech a granitech ze západní granodioritové zóny brněnského masivu. *Bull. mineral.-petrol. Odd. Nár. Muz. (Praha)* 18, 2, 112-118.
- Buriánek D. (2010b) Variská metamorfóza velmi nízkého stupně bazaltových a ryolitových žil v brněnském masivu. *Zpr. geol. Výzk. v R.* 2009, 22-26.
- Buriánek D. (2013) Mineralogie Th-bohatých granitů a granodioritů na východním okraji dyského terénu brunovistulika (brněnský batolit). *Acta Mus. Moraviae, Sci. geol.* 98, 1, 65-78.
- Černý P., Ercit T. S. (2005) The classification of granitic pegmatites revisited. *Can. Mineral.* 43, 2005-2026.
- Deer W. A., Howie R. A., Zussman J. (1997) Rock-forming Minerals, 2B, Double-Chain Silicates. 1-764, London.
- Droop G. T. R. (1987) A general equation for estimating Fe³⁺ concentration in ferromagnesian silicates and oxides from microprobe analyses. *Mineral. Mag.* 51, 431-435.
- Finger F., Frasl G., Dudek A., Jelínek E., Thöni M. (1995) Cadomian plutonism in the Moravo-Silesian basement. In: R. D. Dallmayer, W. Franke, K. Weber (Eds.): *Tectonostratigraphic evolution of the central and eastern European orogens*, 495-507. Springer, Berlin, Heidelberg, New York.
- Gieré R., Sorensen S. S. (2004) Allanite and other REE-rich epidote-group minerals. In: A. Liebscher, G. Franz (Eds.): *Epidotes. Rev. Mineral. Geochem.* 56, 431-493.
- Hanžl P., Melichar R. (1997) The Brno Massif: A section through the active continental margin or a composed terrane? *Krystalinikum* 23, 33-58.
- Hönl S., Leichmann J., Novák M. (2010) Unidirectional solidification textures and garnet layering in Y-enriched garnet-bearing aplite-pegmatites in the Cadomian Brno Batholith, Czech Republic. *J. Geosci.* 55, 113-129.
- Jelínek E., Dudek A. (1993) Geochemistry of subsurface Precambrian plutonic rocks from the Brunovistulian complex in the Bohemian massif, Czechoslovakia. *Precamb. Res.* 62, 103-125.
- Kruťa T. (1966) Moravské nerosty a jejich literatura 1940-1965. 1-379, Moravské muzeum, Brno.
- Leichmann J., Höck V. (2008) The Brno Batholith: an insight into the magmatic and metamorphic evolution of the Cadomian Brunovistulian Unit, eastern margin of the Bohemian Massif. *J. Geosci.* 53(3-4), 281-305.
- Mitřenga P., Rejl L. (1993) Brněnský masiv. In: A. Přichystal, V. Obstová, M. Suk (Eds.): *Geologie Moravy a Slezska. Morav. zem. muz.*, 9-14.

- Novák M. (2005) Granitické pegmatity Českého masívu (Česká republika); mineralogická, geochemická a regionální klasifikace a geologický význam. *Acta Mus. Moraviae, Sci. geol.* 90, 1/2, 3-74.
- Petrík I., Broska I. (1994) Petrology of two granite types from the Tribeč Mountains, Western Carpathians: an example of allanite (+magnetite) versus monazite dichotomy. *Geol. J.* 29, 59-78.
- Petrík I., Broska I., Lipka J., Šiman P. (1995) Granitoid Allanite - (Ce) Substitution Relations, Redox Conditions and REE Distributions (on an Example of I-Type Granitoids, Western Carpathians, Slovakia). *Geol. Carpath.* 46, 2, 79-94.
- Schumacher J. C. (1996) The estimation of the proportion of ferric iron in the electron-microprobe analysis of amphiboles. *Can. Mineral.* 34, 238-246.
- Storkey A. C., Hermann J., Hand M., Buick I. S. (2005) Using In Situ Trace-Element Determinations to Monitor Partial-Melting Processes in Metabasites. *J. Petrol.* 46(6), 1283-1308.
- Štelcl J., Weiss J. eds. (1986) Brněnský masív. 1-255, Masarykova univerzita. Brno.
- Van Breemen O., Aftalion M., Bowes D. R., Dudek A., Mišáň Z., Povondra P., Vrána S. (1982) Geochronological studies of the Bohemian massif, Czechoslovakia, and their significance in the evolution of central Europe. *Transactions of the Royal Society of Edinburgh, Earth Sciences* 73, 2, 89-108.
- Whitney D. L., Evans B. W. (2010) Abbreviations for names of rock-forming minerals. *Am. Mineral.* 95(1), 185-187.
- Wood S. A., Ricketts A. (2000) Allanite-(Ce) from the eocene Často Granite, Idaho: Response to hydrothermal alteration. *Can. Mineral.* 38, 81-100.
- Žáček V. (1985) Mineralogie skarnu u Vlastějovic. MS, Diplomová práce, PřF UK, Praha.
- Žáček V. (1997) Compositional evolution of garnet in the regionally metamorphosed skarn, Vlastějovice, evidence of the preservation of early stages pre-dating regional metamorphism. *Bull. Czech Geol. Surv.* 72, 1, 37-48.