Amfiboly ultradraselných žilných hornin v oblasti středočeského plutonického komplexu a jejich vztahy ke složení a vývoji magmat

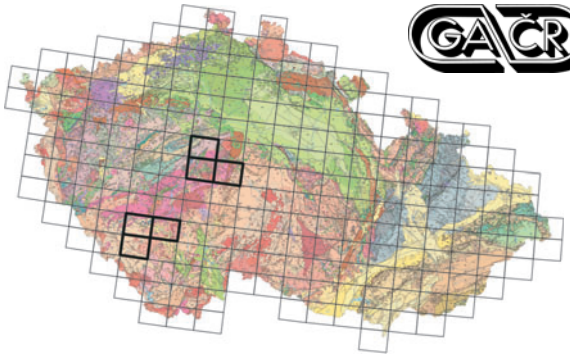
Amphiboles in ultrapotassic dyke rocks from the area of the Central Bohemian Plutonic Complex and their relations to magma composition and evolution

František V. Holub

Ústav petrologie a strukturní geologie, Přírodovědecká fakulta, Univerzita Karlova v Praze, Albertov 6, 128 43 Praha 2; frholub@natur.cuni.cz

Key words: *Central Bohemian Plutonic Complex, ultrapotassic rocks, lamprophyre dykes, minette, amphibole, richterite, magnesio-arfvedsonite*

Abstract: Ultrapotassic dyke rocks of Variscan age (minettes, melasyenite to melagranite porphyries, karlsteinite) from the Central Bohemian Plutonic Complex and adjacent parts of the Bohemicum (to N) and Moldanubicum (to S) contain various types of amphibole. Common is the presence of Mg-rich actinolite replacing the original olivine phenocrysts and also pyroxenes and, therefore, being of post-magmatic origin. Some quartz melasyenite porphyries, however, contain also euhedral amphibole phenocrysts compositionally corresponding to the magnesiohornblende/actinolite boundary (about 7.5 Si p.f.u.). Minettes with increased $(Na_2O + K_2O)/Al_2O_3$ (i.e., the NK/A > 0.8) frequently contain small amounts of late-crystallized richteritic amphiboles. Rare subaluminous varieties approaching the boundary of peralkaline rocks (NK/A ~ 1) may have also accessory magnesio-arfvedsonite. Karlsteinite (strongly peralkaline quartz microsyenite) has magnesio-arfvedsonite as the major mafic mineral. As any correlation between the NK/A and the degree of magma fractionation is missing, the increased NK/A values in some lamprophyric magmas are interpreted as primary features reflecting the nature of enriched mantle sources similar to sources of lamproites. Crystallization of alkali-rich amphiboles in magmas with NK/A < 1 is facilitated by preceding crystallization of abundant phlogopite causing a small exces of alkalis in the residual melt.



(12-42 Zbraslav, 12-43 Týnec nad Sázavou, 12-43 Benešov, 22-32 Strakonice, 22-34 Vimperk, 22-41 Písek)

Žilné roje variského stáří v oblasti středočeského plutonického komplexu (SPK) se v rámci evropských variscid vyznačují abnormálně velkým plošným rozšířením, vysokou hustotou výskytů žil a jejich variabilitou. Podle látkového složení lze žíly rozdělit do několika hlavních skupin a řady podskupin, zahrnujících horniny vápenato-alkalické, šošonitické a ultradraselné. Mezi ultradraselnými žílami jsou nejrozšířenější minety, které se vyskytují i v horninách svrchního proterozoika a spodního paleozoika barrandienské oblasti severně od SPK a spolu s melasyenitovými až melagranitovými porfyry jsou rozšířené také v části šumavského moldanubika na jižní periferii SPK.

Přestože ultradraselné žilné horniny mají řadu chemických rysů společnou (vysoké obsahy K_2O v silné převaze nad Na_2O, vysoké obsahy MgO, vysoké koncentrace většiny inkompatibilních stopových prvků), míra jejich alkalinity, vyjádřená jako molární poměr $(Na_2O + K_2O)/Al_2O_3$ a označovaná symbolem NK/A, je velmi rozdílná. Alkalinita se může velmi výrazně odlišovat i v případech, kdy mají některé vzorky podobné petrografické rysy a geochemicky zcela jednoznačně patří do společné skupiny. Horniny s NK/A > 1 označujeme jako peralkalické, s poměrem blízkým jedné subaluminní, při NK/A < 1 metaluminní; teoreticky by při NK/A < 1 a A/CNK > 1 (kde C znamená CaO) mohly být i peraluminní, ale takový případ mezi studovanými horninami nenastal.

Početné žíly křemenných melasyenitových až melagranitových porfyrů svým složením navazují na minety a v nejacidnějších varietách mají kolem 65 hmot. % SiO_2. I při tak vysokých obsazích SiO_2 mají abnormálně vysokou hořečnatost. Vždy jsou to horniny metaluminní, v některých případech blízké hranici peraluminních hornin a nikdy se u nich neprojevuje tendence k peralkalickému složení. Mezi mafity převažuje flogopit až Mg-bohatý biotit, obvykle jsou přítomny také Ca-amfiboly, které zčásti zjevně nahrazují starší mafity, někdy se však vyskytují také jako dobře individualizované krystaly povahy vyrostlic. Podobně jako v minetách i v těchto horninách se objevují pilitické pseudomorfózy po olivínu, které jsou však v porfyrech podstatně vzácnější.

Minety jsou vůbec nejrozšířenější mafické žilné horniny celého sledovaného území. Ve srovnání s celosvětovým

Tabulka 1. Reprezentativní mikrosondové analýzy (hmot. %) a preferované varianty rozpočtů krystalochemických vzorců amfibolů ultradraselných žilných hornin ze středočeského plutonického komplexu a jeho okolí

	1	2	3	4	5	6	7	8
SiO_2	52,72	53,17	57,75	51,22	50,77	53,02	53,84	55,00
TiO_2	0,39	0,06	0,03	0,59	4,22	4,95	3,90	1,02
Al_2O_3	4,97	3,31	0,60	0,17	0,38	0,20	0,20	0,14
FeO	9,69	14,05	4,22	17,26	19,31	16,45	12,09	16,70
MnO	0,29	0,40	0,26	0,33	0,35	0,28	0,24	0,33
MgO	17,05	14,61	23,02	14,87	10,59	11,70	15,67	14,20
CaO	10,11	11,53	11,29	6,12	3,04	1,94	0,85	0,61
Na_2O	1,36	0,42	0,10	3,86	6,82	7,29	7,25	7,05
K_2O	0,40	0,22	0,15	1,96	2,60	3,37	3,62	3,41
Cr_2O_3	0,02	0,07	0,20	0,00	0,00	0,00	0,74	0,05
NiO	–	–	0,15	–	–	–	–	–
součet	97,00	97,84	97,74	96,38	98,08	99,20	98,40	98,51
Si	7,491	7,670	7,944	7,626	7,626	7,796	7,719	7,911
Al(IV)	0,509	0,330	0,056	0,030	0,068	0,035	0,034	0,024
Ti(IV)	–	–	–	0,066	0,306	0,169	0,247	0,065
Fe^{3+}(IV)	–	–	–	0,278	–	–	–	–
T	8,000	8,000	8,000	8,000	8,000	8,000	8,000	8,000
Al(VI)	0,324	0,233	0,041	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Ti(VI)	0,042	0,007	0,003	0,000	0,171	0,379	0,173	0,045
Cr	0,002	0,008	0,022	0,000	0,000	0,000	0,084	0,006
Fe^{3+}(VI)	0,241	0,086	0,000	0,446	0,264	0,340	0,495	0,859
Fe^{2+}	0,810	1,609	0,475	1,425	2,161	1,683	0,954	1,150
Mn	0,035	0,049	0,030	0,041	0,045	0,035	0,029	0,040
Mg	3,612	3,142	4,721	3,300	2,372	2,563	3,350	3,045
Ni	–	–	0,002	–	–	–	–	–
suma C	5,066	5,134	5,294	5,212	5,013	5,000	5,085	5,145
C - 5	0,066	0,134	0,294	0,212	0,013	0,000	0,085	0,145
Ca	1,539	1,781	1,664	0,976	0,489	0,305	0,131	0,094
Na (B)	0,295	0,085	0,027	0,812	1,498	1,695	1,784	1,761
suma B	2,000	2,000	1,995	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000
Na (A)	0,080	0,033	0,000	0,302	0,463	0,383	0,231	0,204
K	0,073	0,041	0,026	0,372	0,497	0,632	0,662	0,626
suma A	0,073	0,074	0,026	0,674	0,960	1,015	0,893	0,830
počet kationtů	15,153	15,074	15,315	15,674	15,960	16,015	15,893	15,830
kladné náboje	46,000	46,000	46,000	46,000	46,000	46,380	46,000	46,000
$Mg/(Mg+Fe^{2+})$	0,799	0,661	0,907	0,698	0,523	0,604	0,778	0,726

1 – magneziohornblend (při Fe^{3+}_{min} aktinolit), vyrostlice v melagranitovém porfyru, Nihošovice; 2 – aktinolit nahražující pyroxen v olivinické minetě, Brloh; 3 – tremolit (těsně u hranice aktinolitu) v pseudomorfóze po olivínu, Brloh; 4 – draslíkem a titanem bohatý richterit velmi blízký magnezio-arfvedsonitu z minety, Krhanice; 5 – draslíkem a titanem bohatý richterit u hranice s titanem bohatým draselným magnezio-arfvedsonitem z minety, Štěchovice; 6 – draselný titano-magnezio-arfvedsonit v minetě, Štěchovice; 7 – titanem bohatý draselný magnezio-arfvedsonit z karlsteinitu, Jemnice; 8 – draselný magnezio-arfvedsonit z karlsteinitu, Jemnice.
Hodnota *mg* = 100 Mg/(Mg + Mn + Fe)

průměrným složením minet (Rock 1991) jsou relativně bohaté SiO_2, ale silně hořečnaté a chudé CaO (srov. např. Němec 1974; Holub – Lantora 1999). Mají také nadprůměrné obsahy řady pro plášť inkompatibilních prvků, zejména Rb, Cs, Th a U, někdy také Zr. Naprostá většina z nich má metaluminní charakter, některé však mají zvýšené hodnoty

NK/A (0,8–0,9) a ojedinělé případy jsou subaluminní nebo i mírně peralkalické (NK/A kolem 1, u peralkalické minety od Štěchovic až do 1,1). Dominantním mafickým minerálem je flogopit, většinou doprovázený diopsidem a pilitickými pseudomorfózami po olivínu, zcela ojediněle se zachovalým olivínem a také ortopyroxenem.

Karlsteinit, nalezený a popsaný Machartem (1979), tvoří ojedinělou žílu u Jemnice z. od Písku. Odpovídá amfibolickému alkalickoživcovému křemennému mikrosyenitu až mikrogranitu povahy abnormálně světlého lamproitu. Je to hornina výrazně peralkalická (NK/A = 1,30–1,35), velmi blízká karlsteinitům z klasických lokalit ve Waldviertelu, např. typové lokality z. od Karlsteinu (srov. Hackl – Waldmann 1935). Svými obsahy některých inkompatibilních prvků se překrývá s částí minet, ale charakteristické jsou pro ni abnormálně vysoké koncentrace např. Zr a Th i zvýšené obsahy Nb a Ta.

Složení amfibolů

Analýzy byly provedeny pomocí elektronové mikrosondy Cameca SX100 ve vlnově disperzním modu (Universität Wien). Zjištěné variace ve složení amfibolů jsou značně široké. Vybrané reprezentativní analýzy a rozpočty krystalochemických vzorců ukazuje tab. 1, kde jsou uvedena i úplná jména amfibolů podle klasifikace IMA včetně příslušných „povinných“ předpon a dalšího upřesnění (Leake et al. 1997). Předpony titano- a potassic-, vyjadřující obsahy příslušných prvků větší než 0,5 atomů na vzorcovou jednotku, jsou u českých názvů převedeny odlišně: předpona titano- je ponechána v originální formě, namísto předpony potassic- je použito adjektivum draselný. V upřesňujících výrazech jsou přeložena adjektiva potassian a titanian slovním spojením draslíkem, resp. titanem bohatý.

Vzorce většinou vycházejí z aritmetického průměru počtu kationtů mezi variantou s minimálním Fe^{3+} (tj. s maximalizovaným počtem kationtů při zachování stechiometrie a počtu 46 kladných nábojů) a variantou s maximálním Fe^{3+} (tj. s minimalizovaným počtem kationtů při stejných zásadách). Ve skutečnosti však není žádný důvod předpokládat obsah Fe^{3+} právě průměrný mezi oběma výpočty a jde o nezbytný kompromis, který umožňuje amfiboly pojmenovat na základě nějakého sjednocujícího principu. V případě analýzy 3 je teoretické $Fe^{3+} = 0$, což je patrně blízké skutečnosti, neboť jde o pseudomorfózu po olivínu v hornině s velmi nízkým oxidačním stupněm železa. V případě analýzy 6 s výrazně zvýšeným obsahem TiO_2 rozpočet na 46 kladných nábojů vede nejen k nulovému Fe^{3+} (v tomto případě zcela nepřijatelnému), ale dokonce i k deficitu počtu kationtů v pozici C. Tento amfibol musel proto být rozpočten zcela odlišně (blíže viz Diskuse).

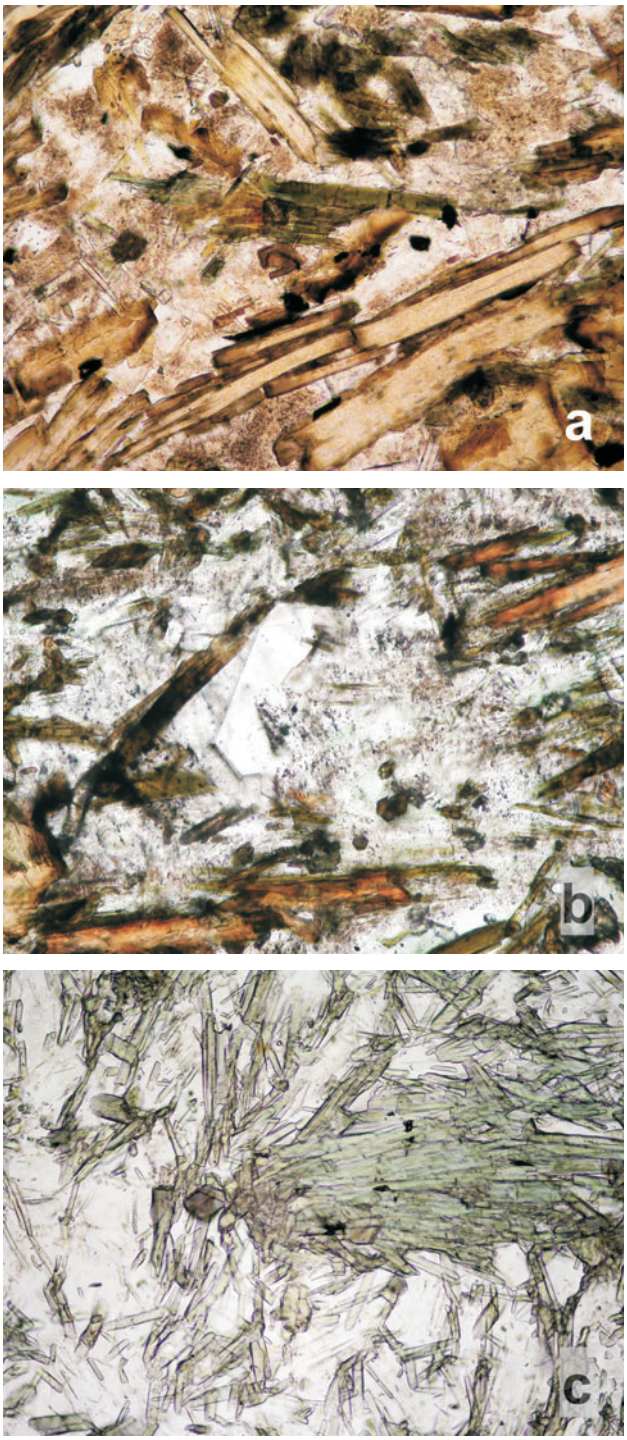
V metaluminních a subaluminních horninách jsou značně rozšířené silně hořečnaté aktinolity s velmi nízkými obsahy Al, v pilitických pseudomorfózách po olivínu se jejich hořečnatost někdy dokonce dotýká hranice tremolitu (analýza 3). V některých melagranitových porfyrech jsou však přítomny také vyrostlice vápenatých amfibolů, spadajících do blízkého okolí klasifikační hranice mezi magneziohornblendem a aktinolitem (tzn. s počtem Si kolem 7,5 atomů na vzorcovou jednotku, viz analýza č. 1 v tab. 1). Horniny subaluminního až mírně peralkalického složení sice mohou rovněž obsahovat silně hořečnatý aktinolit v pilitických pseudomorfózách po olivínu nebo nahrazující pyroxeny, ale objevují se v nich také amfiboly ze skupin sodnovápenatých (richterity) a případně i sodných amfibolů (magnezio-arfvedsonity).

Richteritické amfiboly jsou pozdní a pro své malé rozměry snadno přehlédnutelné minerály v minetách se zvýšeným NK/A (obvykle nad 0,8), více se objevují v minetách subaluminních. Přítomnost amfibolu s pleochroismem v hnědých barvách zmínil už Rosický (1901) v detailním popisu minety od Žampachu a podle jeho charakteristiky se muselo jednat o richteritický amfibol bohatý Ti. Podobné amfiboly (viz obr. 1) se vyskytují v řadě minetových žil v nejsevernější části SPK a přilehlé části barrandienského svrchního proterozoika (např. Krhanice, Zbořený Kostelec, Štěchovice). Nejvyšší alkalinitu (NK/A = 1 ± 0,1) má mezi studovanými minetami hornina od Štěchovic, která má v některých partiích tolik jehliček richteritu, že se lokálně již petrograficky blíží raabsitu z Waldviertelu (ve smyslu dnešní platné klasifikace spadajícího mezi lamproity). V subaluminních až velmi mírně peralkalických minetách je richteritický amfibol obvykle doprovázen malým množstvím draselného magnezio-arfvedsonitu s různým obsahem Ti. Oba amfiboly mají velmi variabilní hořečnatost (tab. 1, analýzy 4–6). Amfibol v karlsteinitu z Jemnice, který je naprosto dominantním mafitem této silně peralkalické horniny (obr. 1c), odpovídá draselnému magnezio-arfvedsonitu (tabulka 1, analýzy 7 a 8). Jeho obsahy TiO_2 se pohybují v intervalu 0,6–3,9 % a zčásti jej lze označit jako titanem bohatý.

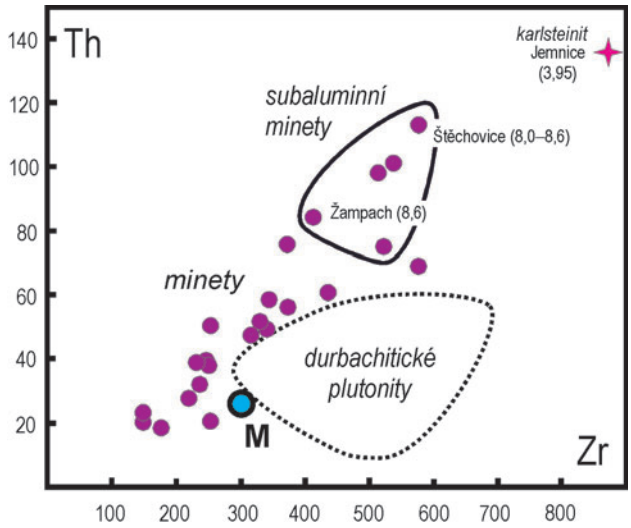
Diskuse a závěr

V metaluminních ultradraselných horninách mají amfiboly složení normálních vápenatých amfibolů, většinou aktinolitu a ojediněle až tremolitu evidentně postmagmatického původu. Pro dobře individualizované amfiboly, které mají povahu vyrostlic v jemnozrnné základní hmotě melagranitových až křemenných melasyenitových porfyrů (např. z Nihošovic, analýza 1), je však obtížné přijmout postmagmatický původ, protože jejich tvary neodpovídají pseudomorfózám po pyroxenu. Zdá se proto, že Al-chudé magneziohornblendy až aktinolity s Si kolem 7,50 atomů na vzorcovou jednotku nemusely vznikat v subsolidu a mohou ještě být produktem pozdní magmatické krystalizace nebo alespoň reakce mezi primárními pyroxeny a zbytkovou taveninou. Experimentálně možnost magmatického vzniku Mg-bohatých aktinolitů podpořili Lledo a Jenkins (2008).

Richterity a magnezio-arfvedsonity ze subaluminních a slabě peralkalických minet i silně peralkalického karlsteinitu připomínají amfiboly některých lamproitů (srov. Mitchell – Bergman 1991). S přepočtem mikrosondových analýz na krystalochemické vzorce jsou u takových amfibolů problémy kvůli variabilní míře obsazení krystalochemické



Obr. 1. Mikrofotografie alkáliemi bohatých amfibolů z ultradraselných žilných hornin: a – richterit (hnědozelené jehličky a sytě hnědé příčné řezy mezi tabulkami flogopitu hlavně uprostřed snímku) v minetě, Krhanice; b – draselný richterit až draselný titano-magnezio-arfvedsonit (hojné hnědozelené až tmavě hnědé jehličky, zčásti v agregátu kalcitu s křemenem a při okrajích snímku obrůstající tabulky flogopitu) v minetě (raabsitu), Štěchovice; c – magnezio-arfvedsonit v karlsteinitu, Jemnice. Všechny snímky v polarizovaném světle, delší strana odpovídá 0,9 mm.



Obr. 2. Variace obsahů Zr a Th (ppm) v minetách a karlsteinitu z oblasti středočeského plutonického komplexu a jeho okolí. Pole subaluminních minet zahrnuje horniny s výskytem richteritických amfibolů, případně i (draselného) magnezio-arfvedsonitu. Čísla v závorkách za názvem vybraných lokalit odpovídají obsahům MgO v horninových analýzách. Pro srovnání je vynesen světový průměr minet (M) podle Rocka (1991) a rozptylové pole durbachitických plutonitů.

pozice A, nejistotě v poměru Fe^{2+} a Fe^{3+} a velmi často nedostatku Si + Al pro plné obsazení tetraedrické pozice. Oberti et al. (1992) prokázali zásadní význam tetraedrického Ti v richteritických amfibolech lamproitů, někteří autoři v případě sodno-vápenatých a sodných amfibolů tetraedrickou pozici doplňují Fe^{3+}. Pro analýzy v tab. 1 byl počet kationtů v tetraedrické pozici doplněn titanem, u analýzy č. 4 s nedostatkem Ti musela být použita i část Fe^{3+}. Titanem nejbohatší sodný amfibol analýzy 6 při zachování pravidel pro obsazování jednotlivých krystalochemických pozic vyžaduje rozpočet na více než 46 kladných nábojů a částečné zastupování skupiny (OH, F) kyslíkem podobně jako je to běžné v kaersutitu. Zdá se, že jeho složení zahrnuje jako významnou menšinovou komponentu obertiit, který jako samostatný člen amfibolové skupiny popsal a pojmenoval Hawthorne (2000). Pro sestavení krystalochemického vzorce byl zvolen počet kladných nábojů zvýšený o počet atomů oktaedrického Ti, umožňující nejen plně obsadit počty kationtů, ale také vyjádřit část Fe jako Fe^{3+} a pojmenovat tento amfibol jako draselný titano-magnezio-arfvedsonit. Tento vzorec je ale nutno chápat pouze jako ukázku jedné z možností, jak složení tohoto amfibolu rozpočítat.

Vznik různých variet alkáliemi bohatých a hliníkem velmi chudých amfibolů v minetách, které nejsou peralkalické, evidentně souvisí s předchozí krystalizací velkého množství flogopitu. Ten, přestože má proti nejběžnějším biotitům snížené obsahy Al_2O_3, odebíral z taveniny více Al než alkálií a zvyšoval tak poměr NK/A ve zbytkové intersticiální tavenině. Pokud mělo magma již primárně zvýšený poměr NK/A, přestože bylo metaluminního charakteru, v pozdně magmatických podmínkách mohla volatiliemi bohatá zbytková tavenina nabýt až peralkalického složení. Mohly proto krystalizovat pozdní richterity nebo i magnezio-arfvedsonity, které při deuterických reakcích také částečně zatlačovaly flogopit.

Minety se zvýšenými hodnotami NK/A jsou proti ostatním minetám ze studované oblasti bohatší K_2O a mají nižší obsahy Al_2O_3. Vyznačují se také nápadně zvýšenými koncentracemi řady pro plášť inkompatibilních prvků, např. Zr a Th (obr. 2). Svým složením však na „normální" minety navazují. Extrémem ve všech uvedených charakteristikách je karlsteinit, který je proti ostatním studovaným horninám ale chudší MgO.

Obecně nelze považovat studované subaluminní ani výrazně peralkalické ultradraselné horniny za produkty pokročilé frakcionace metaluminních magmat, protože jsou na to příliš hořečnaté a primitivní (Holub 1993). Subaluminní minety s richteritem nebo i magnezio-arfvedsonitem patří dokonce k vysoce hořečnatým (příklady obsahů MgO jsou uvedeny v obr. 2) a jejich *mg*-hodnoty se pohybují v rozpětí 74–79, tj. výrazně nad průměrem ostatních minet. Jejich geochemický charakter včetně zvýšené alkalinity je tudíž evidentně primární a odráží charakter silně modifikovaného plášťového zdroje, který obsahoval nejen flogopit jako zdroje běžných minet, ale patrně i malé množství richteritického amfibolu a blížil se tak zdrojům typických lamproitů.

Poděkování. Tento výzkum byl podpořen grantem 205/09/0630 Grantové agentury České republiky a částečně také Ministerstvem školství, mládeže a tělovýchovy České republiky (Výzkumný záměr MSM0021620855).

Literatura

HACKL, O. – WALDMANN, L. (1935): Ganggesteine der Kalireihe aus dem niederösterreichischen Waldviertel. – Jb. Geol. Bundesanst. (Wien) 85, 259–285.

HAWTHORNE, F. C. – COOPER, M. A. – GRICE, J. D. – OTTOLINI, L. (2000): A new anhydrous amphibole from the Eifel region, Germany: Description and crystal structure of obertiite, $NaNa_2(Mg_3Fe^{3+}Ti^{4+})Si_8O_{22}O_2$. – Amer. Mineralogist 85, 236–241.

HOLUB, F. V. (1993): Geochemie peralkalických žilných hornin moldanubické oblasti. – Zpr. geol. Výzk. v Roce 1991, 68–70.

HOLUB, F. V. – LANTORA, M. (1999): Žilné horniny v podzemním zásobníku plynu Háje. – Zpr. geol. Výzk. v Roce 1998, 133–135.

LEAKE, B. E. et al. (1997): Nomenclature of amphiboles: Report of the Subcomittee on Amphiboles of the International Mineralogical Association, Commision on New Minerals and Mineral Names. – Amer. Mineralogist 82, 1019–1037.

LLEDO, H. L. – JENKINS, D. M. (2008): Experimental investigation of the upper thermal stability of Mg-rich actinolite; implications for Kiruna-type iron deposits. – J. Petrology 49, 225–238.

MACHART, J. (1979): Alkalický mikrokvarcsyenit až mikrogranit (karlsteinit) z Jemnice u Strakonic. – Čas. Mineral. Geol. 24, 165–173.

MITCHELL, R. H. – BERGMAN, S. C. (1991): Petrology of Lamproites. – Plenum, New York.

NĚMEC, D. (1974): Petrochemistry of the dyke rocks of the Central Bohemian Pluton. – Neu. Jb. Mineral., Mh. 1974, 193–209.

ROCK, N. M. S. (1991): Lamprophyres. – Blackie, Glasgow-London; Van Nostrand Reinhold, New York.

ROSICKÝ, V. (1901): O dvou minetách a žule z okolí Jílového. – Věst. Král. Čes. Společ. Nauk, Tř. mat.-přírodověd. 1901, 1–38.