

Stopové prvky v křemenu z pegmatitu Věžná I (Česká Republika)

Trace-elements in quartz from the Věžná I-pegmatite (Czech Republic)

KAREL BREITER*¹⁾, MARTIN SVOJTKA¹⁾, LUKÁŠ ACKERMAN¹⁾, JANA ĎURIŠOVÁ¹⁾, ŠÁRKA MATOUŠKOVÁ¹⁾,
KATEŘINA ŠVECŮVÁ²⁾ A JAN LOUN²⁾

¹⁾ Geologický ústav AV ČR v.v.i., Rozvojová 269, 165 00 Praha 6; *e-mail: breiter@gli.cas.cz

²⁾ Ústav geologických věd, Přírodovědecká fakulta Masarykova univerzita, Kotlářská 2, 611 37 Brno

BREITER K., SVOJTKA M., ACKERMAN L., ĎURIŠOVÁ J., MATOUŠKOVÁ Š., ŠVECŮVÁ K., LOUN J. (2012) Stopové prvky v křemenu z pegmatitu Věžná I (Česká Republika). *Bull. mineral.-petrol. Odd. Nár. Muz. (Praha) 20, 2, 218-222. ISSN 1211-0329.*

Abstract

Internal texture and contents of trace elements Al, B, Ba, Be, Cr, Fe, Ge, Li, Mn, Nb, P, Pb, Rb, Sn, Sr and Ti in quartz from the granite, graphic and core zone of the Věžná I pegmatite (SW Moravia, Czech Republic) were studied using panchromatic cathodoluminescence (CL) and laser-ablation ICP-MS (LA-ICP-MS), respectively. Quartz from all textural zones of the pegmatite is homogeneous and exhibit no CL. Aluminum contents increase from the granite zone to the quartz core in range 52 - 252 ppm, while the Ti contents increase from the granite to the graphic zone (26 - 34 ppm → 35 - 46 ppm), and subsequently decrease to the core (→ 15 - 31 ppm). Boron, Ba, Be, Cr, Ge, Fe, Mn, Nb, Pb, Rb, Sn and Sr contents reach their maximum in the pegmatite core; distribution of Li and P is heterogeneous. In general, the chemical composition of quartz from Věžná I pegmatite is well comparable with published data from the primitive (barren) pegmatites in Norway and beryl-columbite pegmatites in Borborema, Brazil.

Key words: quartz, trace elements, pegmatite, Věžná locality, SW Moravia

Úvod

Obsah stopových prvků v křemenu může být spolehlivým indikátorem stupně frakcionace mateřské horniny, a to i v případech, kdy ostatní, alteracím méně odolné minerály, byly v postmagmatickém stádiu vývoje horniny silně přeměněny (Müller et al. 2010). Změny v obsazích stopových prvků v křemenu různých facií (díličích intruzí) v rámci plutonu odrážejí změny ve složení mateřské taveniny, jak prokázali např. Jacamon a Larsen (2009) v Norsku, Deans (2010) v Nevadě, Breiter a Müller (2009) v Krušných horách nebo Breiter et al. (submitted) v některých plutonech Českého masivu. Pegmatity svou zonální stavbou a strmým geochemickým gradientem od okrajové zóny do křemenného jádra představují z hlediska frakcionace granitové taveniny velmi zajímavé objekty. Chemickému složení pegmatitového křemene však byla zatím věnována spíše jen okrajová pozornost. Spolehlivá data o obsahu stopových prvků v pegmatitovém křemenu získaná dostatečně citlivými metodami jsou dosud vzácná (Larsen et al. 2000, 2004; Götze et al. 2004). Pravděpodobně jedinou prací sledující změny ve složení křemene v zonálních pegmatitech je studie Beurlen et al. (2011) o komplexních pegmatitech z oblasti Borborema v Brazílii.

V rámci systematického výzkumu chemického složení křemene v různých typech granitoidních hornin Českého masivu (Breiter et al. 2012; Breiter et al. submitted) byl analyzován křemen z různých zón beryl-kolumbitového pegmatitu Věžná I.

Geologická charakteristika pegmatitu a popis vzorků

Pegmatit Věžná I protíná těleso serpentinitu asi 1 km jižně od obce Věžná (49°26'52"N, 16°16'28"E). Širší okolí pegmatitu je tvořeno migmatizovanými rulami strážecského moldanubika. Zonálnost pegmatitu a jeho minerální složení detailně popsali Černý et al. (1984) a Novák et al. (2003). Pegmatitová žíla probíhá od výchozu na kraji nečinného serpentinitového lomu směrem na západ k hlavnímu výchozu žíly (viz souřadnice), oba jsou od sebe vzdáleny cca 100 metrů. Výchoz u lomu představuje přibližně 3 m mocná symetricky zonální žíla, kdy její střed je tvořen jemnozrnným biotitickým granitem a okrajové zóny (mocnost 20 - 30 cm) tvoří méně frakcionovaný pegmatit.

Symetricky zonální žíla v hlavním výchozu se skládá z (i) tenké středně až hrubě zrnité okrajové granitické zóny (Qtz+Kfs+Olig+Bt), (ii) převládající grafické zóny (Qtz+Kfs+Olig), (iii) zóny blokového K-živce, (iv) křemenného jádra a (v) hnízd s výskytem Li- a Be-minerálů v blízkosti křemenného jádra (Kfs+Ab+Qtz+polucit, lepidolit, beryl aj.). Zóny (ii), (iv) a zejména (iii) obsahují i cordierit, turmalín (skoryl a dravit), beryl a řadu dalších vzácných minerálů (Novák et al. 2003).

Pro tuto studii byly vybrány tři reprezentativní vzorky křemene:

- 1) křemen z granitické zóny z výchozu na okraji lomu - jemnozrnný biotitický granit, zrna do průměru 1 mm,
- 2) křemen z grafické zóny (ii) - drobnozrnný orientovaný agregát (grafický srůst) křemene a ortoklasu, zrna o průměru do 2 mm,
- 3) křemen z jádra pegmatitu (iv) - hrubozrnný agregát křemene s nedokonalými sloupcovitými krystaly bezbarvého berylu o průměru do 1 cm.

Metodika výzkumu

Před chemickou analýzou na hmotovém spektrometru byla zrna křemene studována pomocí panchromatické skenovací katodové luminiscence (CL) s cílem identifikovat případnou zonální stavbu krystalů. Luminiscence byla zachycena pomocí CL detektoru umístěného na elektronové mikrosondě Cameca SX100 na pracovišti elektronové mikrosondy na Ústavu geologických věd, Masarykovy univerzity v Brně. Použitá hodnota urychlovacího napětí svazku byla 15 kV, proud na katodě byl pak v hodnotách 40 - 60 nA.

Koncentrace stopových prvků v křemenu byly stanoveny na hmotovém spektrometru s vysokým hmotovým rozlišením (Thermo - Finnigan Element2) spojeném s laserovou ablací (New Wave UP-213) na pracovišti Geologického ústavu Akademie věd v leštěných výbrusech. Podmínky nastavení laseru pracujícího na vlnové délce 213 nm byly následující: obnovovací frekvence 20 Hz, energie laseru 8 - 10 J/cm², rozměry analyzované oblasti: 100 μm délka, 50 - 100 μm šířka, rychlost oblace 1 μm/s. Ablatovaný materiál z laserové komory byl do hmotového spektrometru unášen pomocí čistého He (99.9992 %) s průtokem 0.8 - 0.9 l/min, výplach mezi jednotlivými měřeními byl 90 s. V oblasti zavádění vzorku do plazmatu byl pro účely měření připojen desolvační nebulizér (Aridus II) pomocí skleněné T-spojky připojené na konec plazmového hořáku. Použití desolvačního nebulizéru umožňuje významně snížit produkci oxidů (< 0.5 %), lépe naladit hmotový spektrometr pomocí přísávaného kalibračního roztoku (¹¹⁵In, ²³⁸U) a také pomocí přísávaného roztoku

²⁰⁵Tl kontrolovat stabilitu signálu při ablací zrn. Měřené izotopy byly měřeny ve dvou hmotnostních rozlišeních v závislosti na možné přítomnosti izobarických interferencí u daných izotopů. V nízkém rozlišení (m/Δm = 300) byly měřeny izotopy ⁷Li, ⁹Be, ¹¹B, ⁷⁴Ge, ⁸⁵Rb, ⁸⁸Sr, ⁹³Nb, ¹³⁷Ba, ¹¹⁸Sn a ²⁰⁸Pb; zatímco izotopy ²⁷Al, ³¹P, ⁴⁷Ti, ⁵²Cr, ⁵⁵Mn a ⁵⁶Fe byly měřeny ve středním rozlišení (m/Δm = 4000). Jako externí standardy byly použity syntetická silikátová skla NIST SRM 612 a 1830, jako vnitřní standard pro korekci fluktuační signálu během analýzy byly použity ²⁹Si a ³⁰Si pro nízké a střední rozlišení s předpokladem, že analyzovaná zrna křemene obsahují 99.95 hm. % SiO₂. Jednotlivá měření, která byla pod detekčním limitem (IDL = 2.3*√(2B), B- celková hodnota pozadí v cps) byla ze studie vyloučena, relativní směrodatná odchylka (1σ) pro jednotlivá měření se pohybovala mezi 5 - 15 %. Přepočtené změřené dat na jednotlivé koncentrace byl proveden pomocí softwaru Glitter (van Achterbergh et al. 2001).

Výsledky

Katodová luminiscence

Studované vzorky z odlišných vývojových zón pegmatitu se v CL od sebe v zásadě neliší. Křemenná zrna jsou nepravidelného tvaru, zaoblená a často popraskaná. Prakticky nevykazují luminiscenci, jen ojediněle se objevují nepravidelně slabě luminiscentní oblasti/zóny. Některá z těchto světlejších míst jsou v blízkosti puklin. V případě pegmatitu Věžná I nebyla zjištěna souvislost mezi intenzitou luminiscence a obsahy Ti, která je často popisována v literatuře (Müller et al. 2010; Breiter et al. 2012).

Tabulka 1 Obsah stopových prvků v křemenu z pegmatitu Věžná I (ppm). Analýzy na šedě podbarvených řádcích s eratickými hodnotami některých prvků nejsou vyneseny v grafech, protože jde pravděpodobně o kontaminaci inkluzemi (viz diskuse v textu).

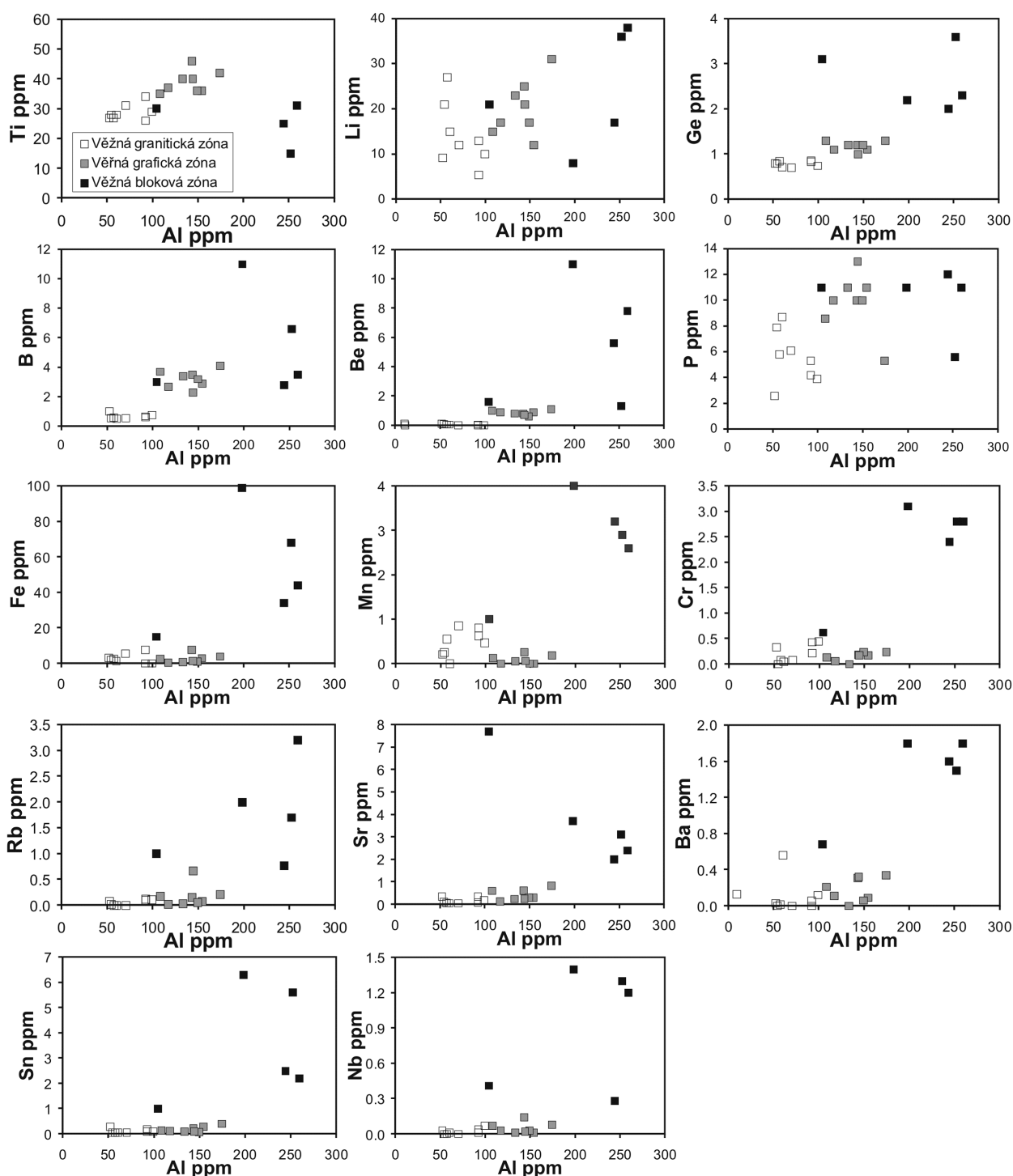
zrno	Li	Be	B	Ge	Rb	Sr	Nb	Sn	Ba	Pb	Al	P	Ti	Cr	Mn	Fe
granitová zóna																
A	13	0.05	0.67	0.86	0.12	0.35	0.04	0.19	0.12	0.04	92	5.3	26	0.43	0.62	-
A	10	<0.04	0.77	0.74	0.11	0.17	0.07	0.10	0.06	0.40	99	3.9	29	0.45	0.47	-
B	5.4	<0.04	0.60	0.83	0.10	0.09	0.01	0.10	0.03	0.01	92	4.2	34	0.22	0.80	7.7
B	9.2	0.10	1.00	0.80	0.08	0.34	0.03	0.28	0.56	0.04	52	2.6	27	0.33	0.21	3.1
C	15	0.05	0.50	0.71	<0.005	0.05	0.01	0.05	<0.006	0.00	60	8.7	28	0.05	<0.09	1.4
C	12	<0.04	0.54	0.70	<0.005	0.05	<0.001	0.06	0.015	<0.002	70	6.1	31	0.08	0.85	5.5
D	27	0.05	0.57	0.84	<0.005	0.06	0.00	0.05	<0.006	0.01	57	5.8	27	0.08	0.55	2.7
D	21	0.08	0.56	0.79	0.02	0.10	<0.001	0.06	0.13	0.01	54	7.9	28	<0.06	0.25	2.0
IDL	0.04	0.04	0.06	0.02	0.005	0.01	0.001	0.01	0.006	0.002	1	1.1	1	0.06	0.09	0.1
grafická zóna																
A	25	0.85	3.52	1.22	0.15	0.61	0.14	0.22	0.31	-	143	9.7	46	0.18	0.26	7.6
A	31	1.07	4.05	1.31	0.21	0.82	0.08	0.40	0.34	-	174	5.3	42	0.24	0.19	3.9
B	15	1.00	3.71	1.31	0.17	0.60	0.07	0.14	0.21	0.12	108	8.6	35	0.13	0.13	2.6
B	23	0.84	3.42	1.16	0.03	0.24	0.01	0.09	<0.03	0.17	133	10.9	40	<0.03	0.05	0.7
C	17	0.85	2.72	1.12	0.02	0.14	0.03	0.12	0.11	0.06	117	10.4	37	0.06	<0.05	0.4
C	12	0.91	2.92	1.06	0.07	0.31	0.01	0.28	0.09	0.05	154	11.1	36	0.17	<0.05	3.0
D	17	0.62	3.21	1.22	0.05	0.31	0.03	0.07	0.06	-	149	10.4	36	0.24	<0.05	1.0
D	21	0.68	2.31	1.02	0.67	0.26	0.02	0.09	0.32	0.05	144	13.1	40	0.17	0.06	1.4
IDL	0.04	0.10	0.10	0.04	0.01	0.02	0.002	0.02	0.03	0.004	2	1.7	0.4	0.03	0.05	0.1
jádro																
A	36	1.3	6.6	3.6	1.7	3.1	1.3	5.6	1.5	1.9	252	5.6	15	2.8	2.9	68
A	38	7.8	3.5	2.3	3.2	2.4	1.2	2.2	1.8	1.0	259	11	31	2.8	2.6	44
B	8	11	11	2.2	2.0	3.7	1.4	6.3	1.8	1.9	198	11	116	3.1	4.0	99
C	17	5.6	2.8	2.0	0.77	2.0	0.28	2.5	1.6	1.4	244	12	25	2.4	3.2	34
C	21	1.6	3.0	3.1	1.0	7.7	0.41	1.0	0.24	0.77	104	11	30	0.62	1.0	15
IDL	0.1	0.1	0.1	0.03	0.01	0.02	0.002	0.01	0.05	0.02	0.7	1.2	0.23	0.026	0.036	0.70

Chemické složení křemene

Výsledky chemických analýz křemene jsou obsaženy v tabulce 1 a graficky vyjádřeny na obrázcích 1 - 3. Zjištěné obsahy Al v křemenu výrazně rostou od granitické zóny pegmatitu do jeho křemenného jádra v rozmezí cca 52 → 99 ppm v granitické zóně, 108 - 174 ppm v grafické zóně a 198 - 252 ppm v jádru. Jednotlivé sukcesivní zóny pegmatitu tak jsou obsahem Al v křemenu dobře definovány. Obsahy řady dalších analyzovaných stopových prvků rostou týmž směrem, tedy od okraje do jádra pegmatitu: Fe od <1 do 68 ppm, Mn od <0.1 do 3.2 ppm, Ge od 0.8 do cca 3 ppm, B od 0.5 do 11 ppm, Be od <0.1 do 11

ppm, Sn od 0.05 do 6.3 ppm, Nb od 0.01 do 1.4 ppm, Cr od <0.1 do 2.8 ppm, Pb od <0.01 do 1.9 ppm, Rb od <0.01 do 3.2 ppm, Sr od 0.05 do 3.7 ppm a Ba od <0.01 do 1.8 ppm. U většiny z těchto prvků se složení granitické a grafické zóny liší výrazně méně než složení grafické zóny a jádra. Obsahy Ti od granitické zóny nejprve rostou do zóny grafické (26 - 34 ppm → 35-46 ppm), a potom do jádra klesají (→ 15 - 31 ppm). Obsahy prvků Li a P mají velký rozptyl bez zřetelného vývojového trendu.

Ojedinelá hodnota 116 ppm Ti v křemenu z jádra koinciduje s nejvyšším obsahem Fe (99 ppm), Mn (4 ppm) a Cr (3.1 ppm) a je pravděpodobně výsledkem zachycení



Obr. 1 Obsahy analyzovaných prvků v křemenu z pegmatitu Věžná I.

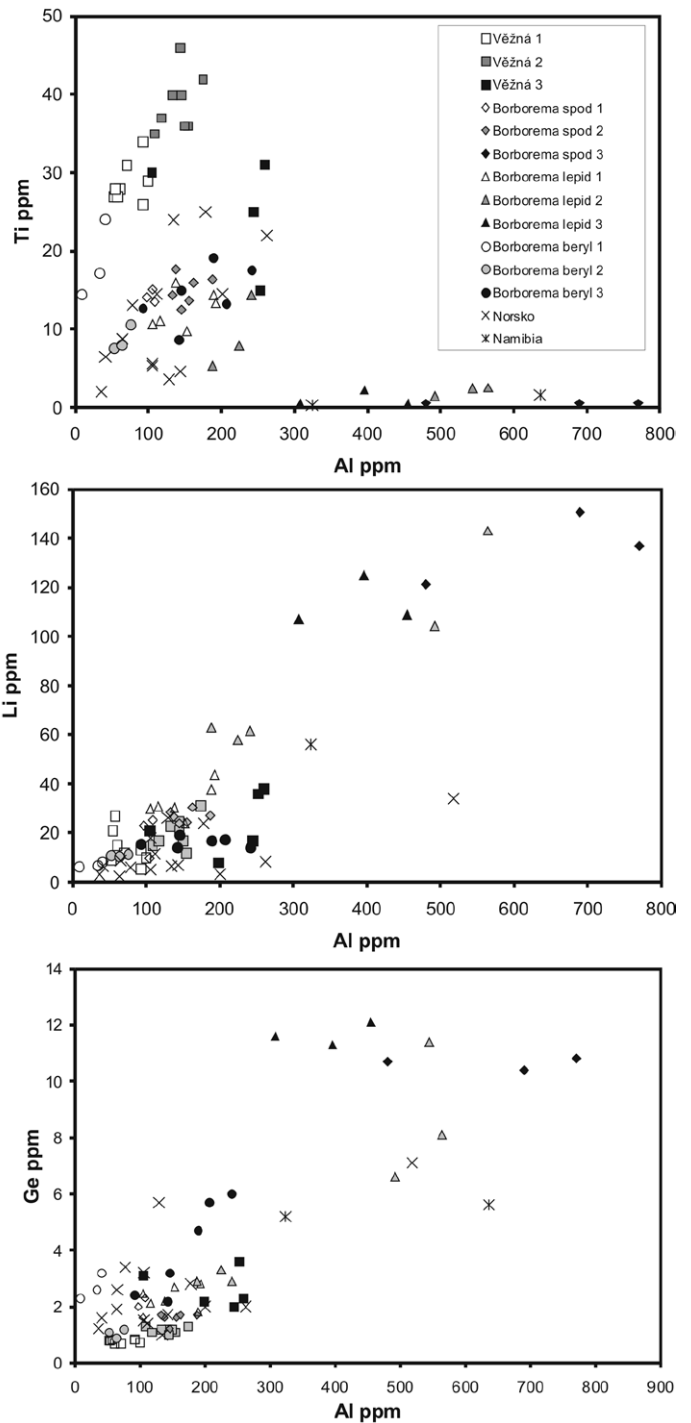
mikroinkluzie nějaké Ti-Fe fáze. Podobně ojedinělá hodnota pouze 104 ppm Al v křemeni z jádra koincidující s anomálními obsahy většiny analyzovaných prvků velmi pravděpodobně nereprezentuje původní magmatický křemen, ale je ovlivněna mladšími hydrotermálními procesy. Tyto dva body proto nejsou v grafech na obrázcích 1 - 3 vyneseny.

Diskuse a interpretace

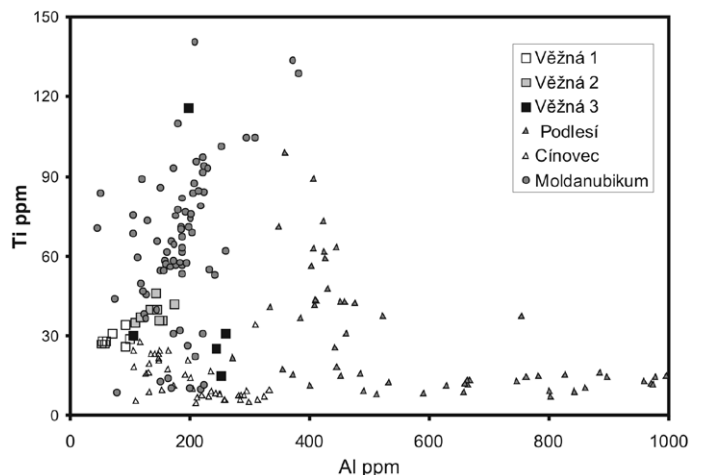
Růst obsahu Al a současný pokles obsahu Ti v křemeni je všeobecně považován za spolehlivý indikátor stupně frakcionace mateřské taveniny granitů (Breiter, Müller 2009; Müller et al. 2010) i pegmatitů (Beurlen et al. 2011). V křemeni z pegmatitu Věžná I byl zjištěn systematický vzrůst obsahu Al od granitické zóny pegmatitu do křemenného jádra, což je v souladu s očekáváním. Naproti tomu obsah Ti při přechodu z okrajové do grafické zóny roste. Při aplikaci Ti-in-Quartz termobarometru (Huang, Audétat 2011) na křemen z věženského pegmatitu dostaneme cca 650 °C a 4 kbar pro granitickou zónu a cca 670 °C a 3 kbar pro zónu grafickou. Tyto údaje je však třeba považovat za pouze orientační.

Srovnání obsahů Al a Ti v křemeni z Věžné s publikovanými daty pro pegmatitový křemen je znázorněno na obrázku 2. Pegmatit Věžná I je sice klasifikován jako „vzácnoprvkový“ ve smyslu klasifikace

Obr. 2 Srovnání obsahů Al, Ti, Li a Ge v křemeni z Věžné s křemenem z komplexních pegmatitů Borborema (spodumenový, lepidolitový a beryl-kolumbitový subtyp, Beurlen et al. 2011), z jednoduchých pegmatitů v Norsku (Götze et al. 2004) a Li-pegmatitu Rubicon mine, Namibie (Götze et al. 2004). Pegmatity Borborema a Věžná jsou reprezentovány vzorky z okrajové či granitické zóny (1), přechodné či grafické zóny (2) a křemenného jádra (3).



Obr. 3 Porovnání obsahů Al a Ti v křemeni z pegmatitu Věžná I s křemenem z některých granitových plutonů v Českém masivu (Breiter et al. submitted).



Černého a Ercita (2005), ale v rámci vzácnoprvkových pegmatitů patří k relativně nejméně frakcionovanému beryl-kolumbitovému typu. Minerály Li zde hrají jen zcela okrajovou roli. Tomu dobře odpovídá i chemické složení křemene. Při srovnání s publikovanými daty je patrná dobrá shoda křemene z Věžné s křemenem z jednoduchých pegmatitů v Norsku (Götze et al. 2004) a s křemenem z beryl-kolumbitových pegmatitů v oblasti Borborema (Beurlen et al. 2011).

Ve srovnání s jinými pegmatity má křemen z Věžné relativně vysoké obsahy Ti, což vzhledem ke geologickému okolí (serpentinitu) navozuje otázku možné kontaminace pegmatitové taveniny okolím. Přitom však obsahy Fe a Mn v křemeni z Věžné nijak nevybočují z obvyklých hodnot. Možným vysvětlením selektivního nabohacení Ti v křemeni může být zachycení ostatních kontaminantů (Fe a Mn) v anthofylitu, flogopitu a tremolitu v krajové zóně pegmatitu.

Publikované obsahy Sn v pegmatitovém křemeni jsou převážně pod 0.1 ppm (Götze et al. 2004), v tomto srovnání je 1 až 6.3 ppm v blokovém křemeni z Věžné velmi vysoká koncentrace. Stejně tak obsahy Nb v blokovém křemeni z Věžné (0.28 - 1.3 ppm) jsou podstatně vyšší než obsahy publikované (většinou pod 0.01 ppm, max. 0.12 ppm, Götze et al. 2004). Za pozornost rovněž stojí, že max. obsahy Fe (15 - 99 ppm) a Cr (0.62 - 3.1 ppm) byly zjištěny v křemeni z blokové zóny. Tato schopnost pozdně krystalujícího křemene jádra pegmatitu pojmout neobvykle vysoké obsahy řady stopových prvků by mohla podpořit hypotézu o vzniku tohoto typu křemene z křemenného gelu (Williamson et al. 1997). Dosud spíše hypotetické úvahy o možné úloze Si-gelu v závěru krystalizace pegmatitových tavenin podpořil nálezy inkluzí Si-gelu v křemeni z jednoduchého pegmatitu (Thomas, Davidson 2012).

Při srovnání křemene z pegmatitu ve Věžné s křemenem hlavních granitických plutonů Českého masivu v grafu Al vs. Ti (obr. 3) je patrné, že věženský pegmatit leží ve vývojové linii běžných peraluminických dvojslídnych granitů moldanubika. Obsahy Li, Ge, B a Be v křemeni okrajové zóny pegmatitu odpovídají též dvojslídnyh granitům moldanubika, zatímco obsahy všech těchto prvků v jádře pegmatitu jsou výrazně vyšší a blíží se křemeni z rudonosných granitů Krušných hor (Breiter et al. submitted).

Poděkování

Autoři děkují M. Novákovi a P. Uhrovi za inspirativní recenze, které pomohly zlepšit interpretaci výsledků. Výzkum byl podpořen grantem GAČR P210/10/1105 a RVO 67985831.

Literatura

- Beurlen H., Müller A., Silva D., Silva M. R. R. D. (2011) Petrogenetic significance of LA-ICP-MS trace-element data on quartz from the Borborema pegmatite province, northeast Brazil. *Miner. Mag.* 75, 2703-2719.
- Breiter K., Ackerman L., Svojtka M. (submitted) Behavior of trace elements in quartz from plutons of different geochemical signature: a case study from the Bohemian Massif, Czech Republic. *Lithos*.
- Breiter K., Müller A. (2009) Evolution of rare metal-specialised granite melt documented by quartz chemistry. *Eur. J. Mineral.* 21, 335-346.
- Breiter K., Svojtka M., Ackerman L., Švecová K. (2012) Trace element composition of quartz from the Variscan Teplice caldera (Krušné hory/Erzgebirge Mts., Czech Republic/Germany): Insights into the volcano-plutonic complex evolution. *Chem. Geol.* 326-327, 36-50.
- Černý P., Ercit T. S. (2005) The classification of granitic pegmatites revisited. *Can. Mineral.* 43, 2005-2026.
- Černý P., Smith J. V., Mason R. A., Delaney J. S. (1984) Geochemistry and petrology of feldspar crystallization in the Věžná pegmatite, Czechoslovakia. *Can. Mineral.* 22, 631-351.
- Deans J. R. L. (2010) Trace element and calculated temperature variation in quartz and titanite in the 36 Ma Harrison Pass pluton, Ruby Mountains NE Nevada. *PhD Thesis, Texas Tech. University*.
- Götze J., Plötze M., Graupner T., Hallbauer D. K., Bray C. J. (2004) Trace element incorporation into quartz: A combined study by ICP-MS, electron spin resonance, cathodoluminescence, capillary ion analysis, and gas chromatography. *Geochim. Cosmochim. Acta* 68, 3741-3759.
- Huang R., Audétat A. (2011) A critical look at the titanium-in-quartz (TitaniQ) thermobarometer. *Goldschmidt Conference Abstracts. Miner. Mag.* 75, 1065.
- Jacamon F., Larsen R. B. (2009) Trace element evolution of quartz in the charnockitic Kleivan granite, SW-Norway: The Ge/Ti ratio of quartz as an index of igneous differentiation. *Lithos* 107, 281-291.
- Larsen R. B., Henderson I., Ihlen P. M., Jacamon F. (2004) Distribution and petrogenetic behaviour of trace elements in granitic pegmatite quartz from South Norway. *Contr. Mineral. Petrol.* 147, 615-628.
- Larsen R. B., Polvé M., Juve G. (2000) Granite pegmatite from Evje-lveland: trace element chemistry and implications for the formation of high-purity quartz. *NGU Bulletin* 436, 57-65.
- Müller A., van den Kerkhof A. M., Behr H.-J., Kronz A., Koch-Müller M. (2010) The evolution of late-Hercynian granites and rhyolites documented by quartz - a review. *Earth Environ. Trans. Royal Soc. Edinburg* 100, 185-204.
- Novák M., Černý P., Povondra P., Škoda R. (2003) Věžná near Nedvědice Beryl pegmatite. In: Novák M. (ed): *LERM 2003 International symposium on light elements in rock forming minerals, Field trip guidebook*, 31-37. Brno.
- Thomas R., Davidson P. (2012) Evidence of a water-rich silica gel state during the formation of a simple pegmatite. *Miner. Mag.* 76, 2785-2801.
- van Achterbergh E., Ryan C. G., Jackson S. E., Griffin W. L. (2001) Data reduction software for LA-ICP-MS. In: P. Sylvester, ed. *Laser-ablation-ICPMS in the earth sciences: principles and applications*, 29, 239-243. *Mineralogical Association of Canada, Short Course*.
- Williamson B. J., Stanley C. J., Wilkinson J. J. (1997) Implications from inclusions in topaz for greisenisation and mineralisation in the Hensbarrow topaz granite, Cornwall, England. *Contr. Mineral. Petrol.* 127, 119-128.