Hydrotermální žíly v okolí Dukovan a jejich význam pro hodnocení subrecentní seizmické aktivity

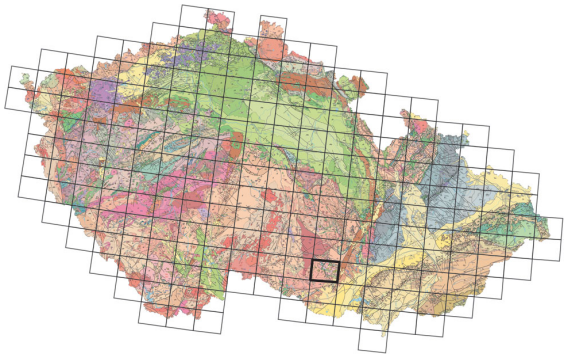
Hydrothermal veins near Dukovany and their implication to subrecent seizmic activity evaluation

Přemysl Pořádek [1] – Marek Slobodník [2]

[1] Česká geologická služba, Leitnerova 22, 658 69 Brno; premysl.poradek@geology.cz
[2] Přírodovědecká fakulta, Masarykova univerzita, Kotlářská 267/2, 611 37 Brno; marek@sci.muni.cz

Please cite this article as: Pořádek, P. – Slobodník, M. (2017): Hydrothermal veins near Dukovany and their implication to subrecent seizmic activity evaluation. – Geoscience Research Reports, 50, 203–206. (in Czech)

Key words: *Moldanubian zone, granulite, amphibolite, quartz veins, fluid inclusions, subrecent seizmic activity*



(24-33) Moravský Krumlov

Summary: Three samples of hydrothermal vein quartz were collected from sites near the Dukovany nuclear power plant; two samples are from amphibolite (boreholes), and one sample comes from granulite (outcrop). The objective of this study was to determine the P-T-X conditions of formation of quartz veins and to verify the evidence for subrecent seizmic events.

Both primary and secondary inclusions were observed in all three samples. Only primary inclusions were studied, while the secondary inclusions were not examined in detail due to their small size. Three types of primary (pseudo secondary) fluid inclusions were distinguished based on their phase compositions: (A) The first type is represented by monophase inclusions filled with liquid CO_2 and traces of CH_4. (B) The second and most common type of fluid inclusions contains two phases (aqueous solution and vapour; the vapour phase occupies about 10–20 vol. % exhibiting a chemistry of $H_2O^-NaCl \pm FeCl_2 \pm MgCl_2 \pm CaCl_2$, wide range of salinity from 1 to 18 wt. % NaCl equivalent, and Th = 140–260 °C (samples from amphibolite), Th = 300–400 °C (sample from granulite). (C) The third type of inclusions contains three phases – two immiscible liquids (aqueous solution and $CO_2 \pm CH_4$ mixture), and vapour with salinity of 2.5–4 wt. % NaCl equivalent.

Quartz veins in amphibolite are likely to have been formed from heterogeneous hydrothermal fluids (aqueous solutions and a mixture of CO_2-CH_4). These fluids are thought to have been derived mostly from surrounding rocks during tectonometamorphic events. The formation of quartz veins in granulite is likely to have been associated with high temperature fluids that is indicated by high homogenization temperatures. Only a few secondary fluid inclusions or their trails were identified and these inclusions usually show similar microthermometric data as the primary inclusions what implies that only insignificant number of deformations and seizmic events occurred after the formation of quartz veins.

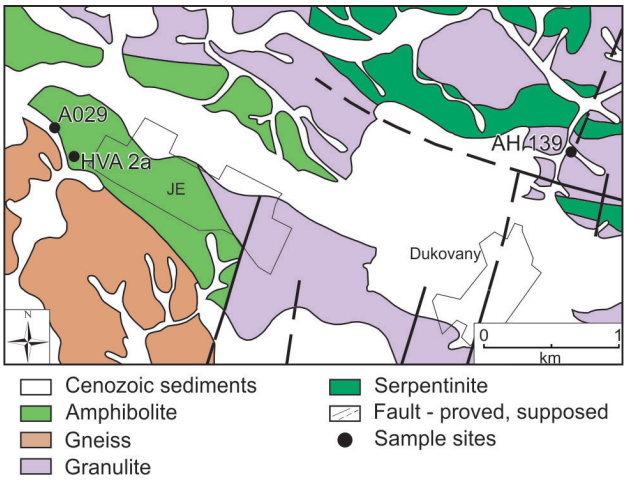
Fluidní inkluze (FI) vznikají během růstu krystalů nebo při vyhojování prasklin v krystalech. Vyskytují se ve všech přírodních krystalech jako důsledek defektů v růstu krystalové mřížky. V nich byly zachyceny roztoky a jejich složky, z nichž minerály krystalovaly. Inkluze také indikují procesy deformace celého horninového prostředí spojené s vyhojováním trhlin v horninách a minerálech a jsou tak přímým zdrojem údajů o složení a termodynamických vlastnostech fluid v zemské kůře v okamžiku jejich zachycení (Ďurišová – Hurai 1991). Mohou tedy nepřímo poskytnout informace o mobilitě fluid v důsledku seizmické aktivity na zlomových strukturách, pokud je na ně vázána hydrotermální mineralizace.

Geologická situace

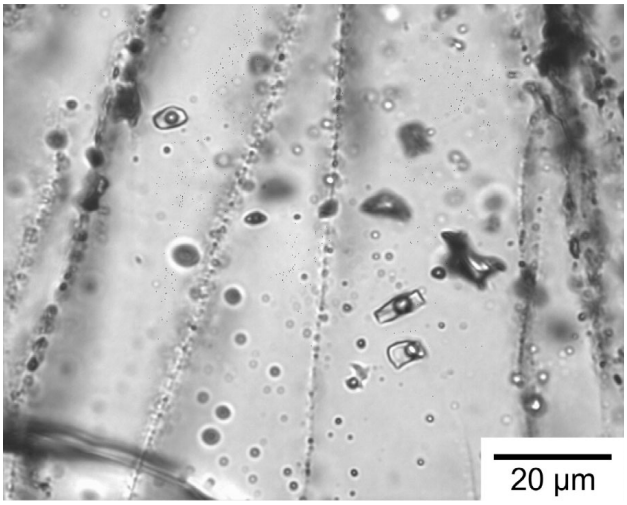
Zájmová oblast okolí jaderné elektrárny Dukovany spadá z regionálněgeologického hlediska do gföhlské jednotky moldanubika. Toto území je tvořené převážně parciálně tavenými ortorulami a pararulami (gföhlské ruly), ve kterých jsou tělesa granulitů, amfibolitů, eklogitů a granátických peridotitů (Kalášek et al. 1963).

V mapovaném území byly vybrány 3 lokality a na nich odebrány vzorky hydrotermálních žil pro mikrotermometrické studium fluidních inkluzí. Dva vzorky pocházejí z vrtů A029 (metráž 29,50 m) a HVA 2a (metráž 42,65 m) západně od jaderné elektrárny (obr. 1). Okolní horninou hydrotermálních křemenných žil v obou těchto vzorcích je amfibolit. Křemenné žíly mají masivní charakter, mocnost 2–3 cm a jsou strmě orientované. Třetí vzorek (AH 139) byl odebrán ze silicifikovaných a mylonitizovaných granulitů severně od obce Dukovany. Výchoz granulitů se nalézá v blízkosti mylonitové zóny směru SSV-JJZ (Hanžl et al. 2016). Žilky mají charakter krustifikační textury s palisádovým uspořádáním krystalů křemene až křišťálu narůstajících na stěny puklin. Mocnost těchto žilek je maximálně 2 mm.

DOI 10.3140/zpravy.geol.2017.41



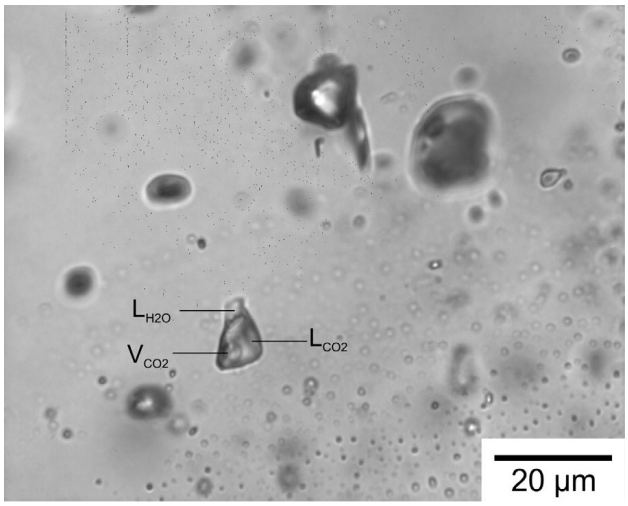
Obr. 1. Zjednodušená geologická mapa (upraveno podle ČGS 2014).
Fig. 1. Simplified geological map (modified after ČGS 2014).



Obr. 2. Primární inkluze spolu s traily sekundárních inkluzí. Vzorek AH 139.
Fig. 2. Primary fluid inclusions and trails of secondary inclusions. Sample AH 139.

Metodika

Vzorky byly laboratorně zpracovány v Ústavu geologických věd PřF MU v Brně za použití mikroskopu Nikon Eclipse 80i a termometrické komory LINKAM THMSG600. Petrografický popis inkluzí a odhad poměru zastoupených fází byl prováděn za laboratorní teploty 25 °C. Na FI byly měřeny následující parametry: $T_h$tot – teplota celkové homogenizace inkluze; $T_h CO_2$ – teplota homogenizace CO_2 (směsi CO_2-CH_4); $T_m CO_2$ – teplota tání pevného CO_2; T_e – eutektická teplota; $T_m$ice – teplota roztání poslední pevné fáze (ledu); $T_m$cla – teplota roztání hydrátů CO_2. Naměřená mikrotermometrická data byla před dalším zpracováním zkalibrována s využitím syntetických FI. Pro výpočet vlastností fluidních inkluzí (salinita, hustota, zastoupení jednotlivých složek) byly použity programy BULK (pouze vodné systémy; Bakker 2003) a ICE a NOSALT (systémy



Obr. 3. Inkluze obsahující dvě nemísitelné kapaliny (vodný roztok a CO_2) a plynou fázi. Vzorek HVA 2a.
Fig. 3. Fluid inclusion with two immiscible liquids (aqueous solution + CO_2) and vapor phase. Sample HVA 2a.

se směsí CO_2-CH_4; Bakker 1997). Pro výpočet izochor byly uvažovány mediánové hodnoty a byl použit program ISOC (Bakker 2003).

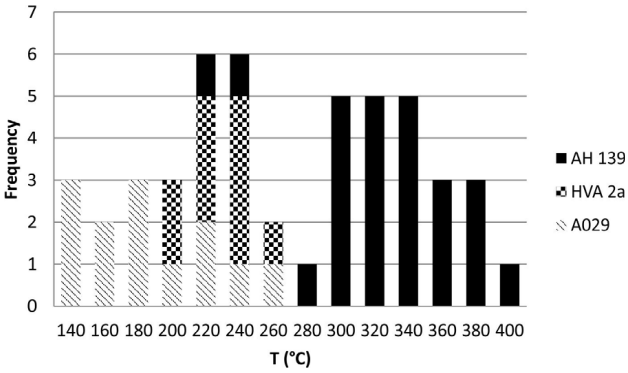
Cílem studia bylo určit P-T-X podmínky vzniku této mineralizace a z celé asociace fluidních inkluzí posoudit možnost subrecentního vlivu seizmických událostí na horninový masiv.

Studium fluidních inkluzí

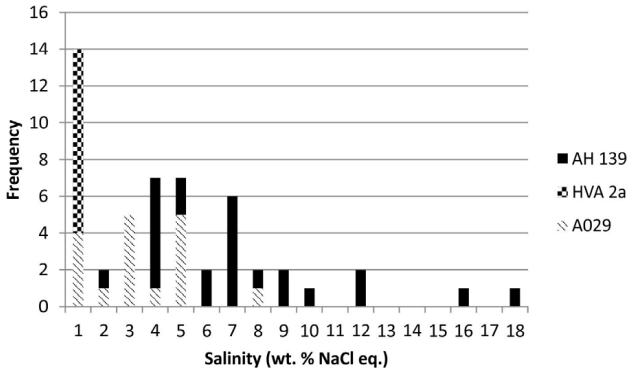
Ve všech vzorcích byly za pomoci mikrotermometrického měření studovány pouze primární (příp. pseudosekundární) inkluze. Sekundární inkluze nebyly pro jejich velikost (max. do 2 µm) detailněji studovány. Primární a pseudosekundární inkluze se vyskytovaly ve všech vzorcích jako malé prostorové skupiny, případně jako izolované inkluze nebo krátké „traily“ uvnitř jediného zrna. Sekundární inkluze byly ve formě delších řad – „trailů“, protínajících celé zrno, někdy i více zrn. Ve vzorcích z vrtů bylo zastoupení sekundárních inkluzí do 30 % a u vzorků z granulitu do 10 % z celkového počtu inkluzí.

Ve všech vzorcích se velikost primárních fluidních inkluzí pohybovala nejčastěji kolem 10–15 µm. Tvary inkluzí byly převážně jednoduché, výjimečně byly pozorovány náznaky negativních krystalů (zejména ve vzorku AH 139). Dle zastoupení jednotlivých fází (kapalina – L, plynná fáze – V, pevné fáze – S), byly rozlišeny tři různé typy inkluzí: (A) jednofázové (L), (B) dvoufázové s občas přítomnou pevnou fází (L+V±S; obr. 2) a (C) trojfázové (L_1+L_2+V; obr. 3). Ve vzorku AH139 se vyskytovaly pouze inkluze dvoufázové (L+V±S). Obsah kapaliny u dvoufázových inkluzí činil ve vzorcích obvykle 80–90 obj. %, méně často kolem 70 obj. %. U inkluzí trojfázových (L_1 + + L_2 + V) byl poměr jednotlivých fází přibližně 40/40/20. Těsně po homogenizaci se poměr fází výrazně nezměnil.

Na základě mikrotermometrického měření bylo v inklu-



Obr. 4. Diagram četnosti teplot homogenizace dvoufázových inkluzí.
Fig. 4. Frequency histogram of homogenization temperatures of two-phase inclusions.



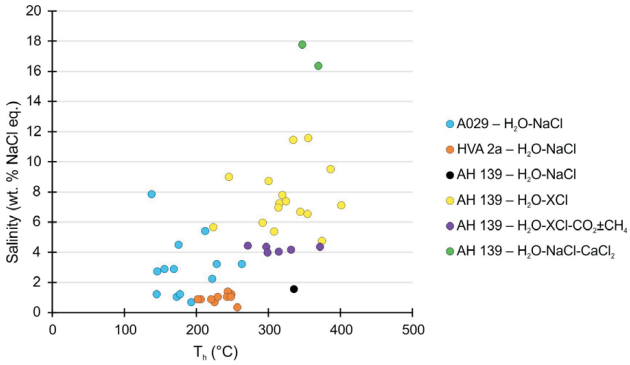
Obr. 5. Četnosti salinit v inkluzích s vodnými roztoky.
Fig. 5. Frequency histogram of salinities of inclusions with aqueous solutions.

zích rozlišeno několik chemických systémů, které korespondují s fázovým složením.

Typ A (jednofázové inkluze) uzavírá směs CO_2 a pravděpodobně CH_4. Tento typ byl nalezen pouze ve vzorku HVA 2a. T_mCO_2 se pohybovaly v rozmezí –57 až –58,5 °C a T_hCO_2 v rozsahu –4,4 až 28,3 °C. Všechny inkluze homogenizovaly na kapalinu. Množství příměsi CH_4 bylo stanoveno odečtením z grafů (Shepherd et al. 1985) na 3–10 mol. %.

Typ B (dvoufázové inkluze) uzavírá vodný roztok s chloridy. Ve vzorcích z vrtů (A029, HVA 2a; oba v prostředí rul a amfibolitů) byl zjištěn pouze systém H_2O-NaCl (odvozeno na základě $T_e \approx -21{,}4$ °C; Davis et al. 1990). Teploty homogenizace se pohybovaly v rozsahu 140 až 260 °C, přičemž inkluze homogenizovaly na kapalinu (obr. 4). Z $T_m$ice (–0,2 až –5 °C) byly vypočteny salinity vodných roztoků. Ty se pohybovaly nejčastěji v rozmezí 1–5 hm. % NaCl ekv. (obr. 5). Ve vzorku z vrtu AH139 byly rozlišeny vodné roztoky se třemi různými chemickými systémy. Nejčastější byly inkluze se směsí chloridů Mg, Na, Fe a K (odvozené z $T_e \approx -33$ až –37 °C; Borisenko 1977, Spencer et al. 1990). Jedna měřená inkluze obsahovala systém H_2O-NaCl ($T_e \approx -21$ °C; Davis et al. 1990) a dvě měřené inkluze obsahovaly vodný roztok s převahou $CaCl_2$ ($T_e \approx -50$ °C; Borisenko 1977, Spencer et al. 1990) Několik inkluzí obsahovalo i CO_2±CH_4. Přítomnost těchto složek naznačují hodnoty $T_m$cla (9,7 až 10,1 °C), a T_mCO_2 (–60,6 °C a –59,1 °C). T_hCO_2 se podařila změřit pouze u jediné inkluze, a to 13,2 °C, způsob homogenizace byl na kapalinu. Salinita těchto fluid se pohybovala ve velkém rozmezí 1,6–17,8 hm. % NaCl ekv ($T_m$ice $\approx -0{,}9$ až –14,1 °C) (obr. 5). Přičemž nejvyšší salinity vykazovaly inkluze s chloridy Ca. Teploty homogenizace (na kapalinu) byly nejčastěji mezi 300–400 °C (obr. 4).

V typu C (trojfázové inkluze) byl zjištěn chemický systém H_2O-CO_2±NaCl ($T_e \approx -21{,}4$ °C; $T_mCO_2 \approx -57$ °C; Davis et al. 1990). Salinity roztoků byly nízké v rozmezí 2,4–4,3 hm. % NaCl ekv. Teploty homogenizací inkluzí s obsahem CO_2±CH_4 nemohly být naměřeny, protože ve většině případů docházelo k jejich dekrepitaci již před celkovou homogenizací. Inkluze začínaly dekrepitovat při 200 °C.



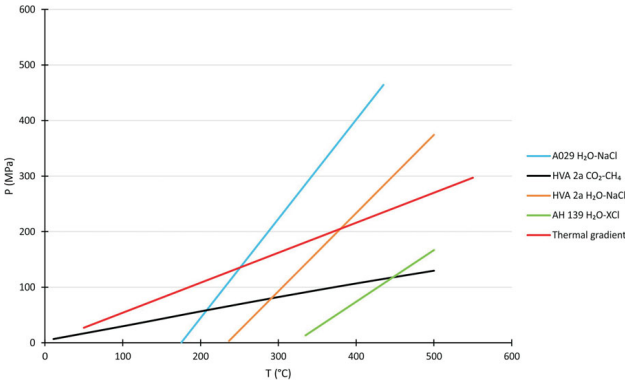
Obr. 6. Diagram zobrazující salinitu a teploty homogenizace FI s vodnými roztoky (XCl – směs chloridů Mg, Na, Fe a K).
Fig. 6. T_h-salinity plot for FI with aqueous solutions (XCl – a mixture of Mg, Na, Fe and K chlorides).

Sekundární inkluze nemohly být v důsledku jejich malé velikosti detailně studovány, avšak při mikrotermometrickém měření vykazovaly některé podobné změny fází jako inkluze primární a pseudosekundární.

Interpretace a závěr

Podle rozdílných salinit v rámci jednoho vzorku a jednoho chemického systému, ale i odlišného chemického složení uzavřených fluid (směs různých chloridů, přítomnost CO_2, CH_4; obr. 6) lze usuzovat na to, že tyto mineralizace vznikaly z fluid za podmínek homogenního zachycení, ale tyto roztoky měly různé chemické složení a variabilní salinitu. Ve vzorku HVA2a byly uzavřeny jednak samostatné vodné inkluze, jednak samostatné inkluze obsahující směs CO_2-CH_4. Ačkoliv byly oba typy inkluzí v primární pozici, není jistá jejich genetická souvislost.

Ve vzorku A 029 se budou teploty vzniku křemenných žil pohybovat maximálně kolem 250 °C za tlaků okolo 140 MPa (při litostatickém tlaku a termickém gradientu 50 °C). U vzorku HVA 2a budou maximální teploty vyšší, až kolem 380 °C při tlacích okolo 200 MPa. U vzorku AH139 je izochora posunuta do vyšších teplot, což dokládá vyšší teploty vzniku (obr. 7).



Obr. 7. Diagram kombinující izochory a termální gradient (50 °C/1 km; XCl – směs Mg, Na, Fe a K chloridů).
Fig. 7. Combination of isochores and thermal gradient (50 °C/1 km; XCl – a mixture of Mg, Na, Fe and K chlorides).

Hydrotermální mineralizace v amfibolitech (vzorky A029 a HVA2a) vznikala pravděpodobně z pozdně metamorfních, nízce salinních fluid s obsahem dvou nemísitelných složek, a to vodného roztoku s NaCl a směsi CO_2-CH_4.

Hydrotermální křemeny v granulitech (vzorek AH139) vznikaly za odlišných podmínek, než tomu bylo u předchozích vzorků. Vznik této mineralizace je s největší pravděpodobností ovlivněn pozdně magmatickou činností, kdy do okolních hornin intrudovala tělesa pegmatitových žil (Staněk 1981). Souvislost s pegmatity naznačují jednak vysoké teploty homogenizace (kolem 350–400 °C), jednak přítomnost CO_2 (např. Tomas et al. 2009).

Fyzikálně-chemické charakteristiky fluid v primárních a pseudosekundárních inkluzích ukazují na dominanci endogenních procesů patrně variského stáří ve sledovaném prostoru. Malé množství sekundárních inkluzí a indicie ukazující na příbuznost s primárními inkluzemi říkají, že etapy jejich uzavření nebudou od sebe příliš časově vzdálené. Z toho vyplývá, že intenzivnější subrecentní seizmická aktivita s migrací fluid exogenního/descendentního charakteru je málo pravděpodobná.

Poděkování. Výzkum byl finančně podpořen z prostředků státního rozpočtu prostřednictvím Státního úřadu pro jadernou bezpečnost. Publikování těchto dat je na základě souhlasu SÚJB. Autoři děkují recenzentům R. Skálovi a J. Zachariášovi za cenné připomínky, které pomohly ke zkvalitnění rukopisu.

Literatura

BAKKER, R. J. (1997): Clathrates: Computer programs to calculate fluid inclusion V-X properties using clathrate melting temperatures. – Comp. Geosci. 23, 1–18.

BAKKER, R. J. (2003): Package FLUIDS 1. Computer programs for analysis of fluid inclusion data and for modelling bulk properties. – Chem. Geol. 194, 3–23.

BORISENKO, A. S. (1977): Study of salt composition of fluid inclusions in minerals using cryometric technique. – Geol. Geofiz. 8, 16–27.

ČGS (2014): Geologická mapa 1 : 50 000. (online). Dostupné z http://mapy.geology.cz/geocr_50/. (cit. 10.2.2016)

DAVIS, D. W – LOWENSTEIN, T. K. – Spencer, R. J. (1990): Melting behavior of fluid inclusions in laboratory-grow halite crystals in the system NaCl-H_2O, NaCl-KCl-H_2O, NaCl-$MgCl_2$-H_2O and NaCl-$CaCl_2$-H_2O. – Geochim. Cosmochim. Acta 54, 591–601.

ĎURIŠOVÁ, J. – HURAI, V. (1991): Fluidní inkluze v minerálech. – Academia. Praha

HANŽL, P. – HRDLIČKOVÁ, K. – BUKOVSKÁ, Z. – BURIÁNEK, D. – DAŇKOVÁ, L. – DOSTALÍK, M. – SOEJONO, I. – HOŠEK, J. – HROCH, T. – KOPAČKOVÁ, V. – KUNCEOVÁ, E. – MIŠUREC, J. – PALEČEK, M. – PECKA, T. – SEDLÁČKOVÁ, I. – SKÁCELOVÁ, Z. – TOMANOVÁ PETROVÁ, P. – VÍT, J. – POŘÁDEK, P. – GRYGAR, R. (2016): Závěrečná zpráva úkolu Nezávislé zhodnocení tektonických poměrů v užší lokalitě Jaderné elektrárny Dukovany. Závěrečná zpráva, 145 str. – MS Čes. geol. služba, Praha.

KALÁŠEK, J., ed. (1963): Vysvětlivky k přehledné geologické mapě ČSSR, list M-33-XXIX Brno. – Ústř. úst. geol. Praha.

SHEPHERD, T. J. – RANBIN, A. H. – ALDERTON, D. H. M. (1985): A Practical Guide to Fluid Inclusion Studies. – 239 str. Blackie, Glasgow.

SPENCER, R. J. – MÖLLER, N. – WEARE, J. H. (1990): The prediction of mineral solubilities in natural waters: A chemical equilibrium model for the Na-K-Ca-Mg-Cl-SO_4-H_2O systems at the temperatures below 25 °C. – Geochim. Cosmochim. Acta 54, 575–590.

STANĚK, J. (1981): Pegmatity Moravy. In: BERNARD, J. H., ed.: Mineralogie Československa. 132–174. – Academia. Praha.

THOMAS, R. – DAVIDSON, P. – BADANINA, E. (2009): A melt and fluid inclusion assemblage in beryl from pegmatite in the Orlovka amazonite granite, East Transbaikalia, Russia: implications for pegmatite-forming melt systems. – Mineral. Petrol. 96, 129–140.