

Genetické aspekty vzniku křišťálů v sileziku, severní Morava

Genetic aspects of the origin of rock crystals in the Silesicum, northern Moravia

MAREK SLOBODNÍK¹⁾, ANTONÍN PŘICHYSTAL¹⁾, PETR GADAS¹⁾, MARTIN KONTÁR¹⁾
A ROSTISLAV MORÁVEK²⁾

¹⁾ Ústav geologických věd PřF MU, Kottlářská 2, 611 37 Brno

²⁾ Přírodovědný ústav, Vlastivědné muzeum v Olomouci, nám. Republiky 5, 771 73 Olomouc

SLOBODNÍK M., PŘICHYSTAL A., GADAS P., KONTÁR M., MORÁVEK R. (2010): Genetické aspekty vzniku křišťálů v sileziku, severní Morava. - *Bull. mineral.-petrolog. Odd. Nár. Muz. (Praha)* **18/2**, 32-42. ISSN: 1211-0239.

Abstract

Rock crystals occur at many sites in the Silesicum in various geological environments. An investigation of their genetic aspects has been carried out using fluid inclusion petrography, microthermometry and oxygen isotope investigations.

Results from fluid inclusions and stable oxygen isotopes suggested that some quartz veins are associated with pegmatite (Velká Kraš) or with metamorphic type of fluids („alpine-type paragenesis”: Krásné near Hraběšice, Vernířovice). These fluids are most likely a product of the Variscan magmatic or metamorphic events. They had higher temperatures indicated by T_h between 110 and 311 °C, aqueous fluids shown a lower salinity and CO₂ was a common component. The type of these parent fluids can be expressed as H₂O-NaCl-CO₂. The fluid isotopic composition of oxygen is rather positive between values of $\delta^{18}\text{O}$ from +1.9 to +3.6 ‰ V-SMOW.

The second group of samples comes from localities within metamorphic environment however their fluid inclusions provided data pointing to low temperature parent fluids. Rock crystals precipitated from solutions of H₂O - NaCl ± CaCl₂ ± KCl ± MgCl₂ ± FeCl₂ type under lower temperatures within a range of 107 - 194 °C. One of the younger aqueous hydrothermal systems contains also higher liquid hydrocarbons suggested by the light blue fluorescence. Isotopic composition of oxygen of that type of parent fluids was about values of $\delta^{18}\text{O}$ from -2.2 to 7.1 ‰ V-SMOW. The fluids are, with respect to microthermometric parameters and composition, interpreted as transformed sedimentary brines. Salinity of those fluids is largely between 10 and 25 wt. % of NaCl eq. In spite of a distinct rock environment in which the second type of fluids percolated they show a very similar nature at all sites. The differences are explained by fluid-rock interactions which resulted into alteration of rocks (albitization, kaolinization). Origin of these rock crystals is discussed in terms of deeply circulating sedimentary brines that were active possibly during Mesozoic.

Key words: rock crystal, fluid inclusions, oxygen isotope, genesis, Silesicum

Úvod a přehled výzkumů

V sileziku moravskoslezské oblasti je řada nalezišť křišťálů, která jsou již dlouhou dobu v zájmu především sběratelů minerálů. V publikacích zabývajících se topografickou mineralogií spadá do tohoto prostoru až několik desítek lokalit (např. Kruťa 1973). Tato studie se soustřeďuje na nejznámější a nejdůležitější výskyty křišťálů: Žulová - „Korálové jámy“ (Andělské Domky), Jegłowa, Česká Ves, Stará Červená Voda, Velká Kraš, Krásné u Hraběšic, Vernířovice, Mírotínec (obr. 1).

Některé z nich byly již dříve v centru pozornosti, protože z nich často pocházely pěkné ukázky krystalovaných křišťálů. Řada lokalit vykazuje typickou alpskou paragenézi s chloritem, albitem, prehnitem, epidotem, titanitem, apatitem, zeolity a kalcitem, např. Krásné u Hraběšic (Stánek 1997). Na některých lokalitách je minerální asociace velmi jednoduchá, křemen je dominantní fází. Dalšími minerály jsou kaolinit, chlorit nebo epidot. V řadě případů nemusí být informace úplné, jelikož vzorky pocházejí ze sběrů z eluvií, např. Česká Ves, kde výchozy žil v podstatě nejsou známy. Velmi typickým minerálem je na řadě lokalit právě kaolinit jako součást vlastních žil a je i v okolních alterovaných horninách (např. Novotný 1997; Sachanbinski et al. 2008). Běžně jej v asociaci těchto žil uvádí Kruťa (1973).

Práci, které se zabývají spíše geologickými aspekty, jako je geneze fluid, nebo širšími souvislostmi s geologickými - endogenními procesy, metamorfózou či deformací, je velmi málo (např. Szczepanski 2007; Grad et al. 2008). Některé vzorky ze Žulové byly již studovány dříve a pocházely z kopaných sond. Autoři z nich popisují fluidní inkluze s velmi pestrým složením fluid a uvádějí jejich termometrické charakteristiky (Novotný, Dobeš 1999). Tito badatelé uvádějí teploty homogenizace pro dvě žíly s rozsahy teplot 110 - 160 a 160 - 220 °C. Dále na základě salinity a eutektických teplot vymezují pět typů vodných fluid, v nichž jsou zastoupeny chloridy Na, Ca, K, Mg. Dobře vymezené jsou inkluze s relativně nižšími teplotami homogenizace okolo 140 °C a vyšší salinitou, které jsou dominantně zastoupeny na jedné ze studovaných žil. Další výraznou skupinou jsou fluida s nízkou salinitou v inkluzích, které vykazují vyšší teploty homogenizace.

Na polské straně jsou informace o mineralizacích s křemenem poměrně vzácné. Stručné geologické informace o prostoru Jegłowe a těžných kvarcitech jsou v práci Kozłowského (1986). Tento autor se podílel i na studiu pegmatitové paragenéze z prostoru strzelinského masívu (Kozłowski, Metz 2003). Je zde uvedena široká škála minerálů a jejich data ze studia fluidních inkluzí. V přehledu, kdy teploty homogenizace se pohybují v širokém

rozmezí od 100 do 570 °C, nejsou nijak zvlášť definovány mineralizační etapy ani generace jednotlivých minerálů. Je však pozoruhodné, že u souboru studovaných křišťálů udávají nejnižší teplotu homogenizace 120 °C a vysokou salinitu až 18 hm. % ekv. NaCl (celkový rozsah 1.5 - 18.0 hm. %). Na složení fluid se podílí kromě NaCl i CaCl₂ a částečně i KCl. CO₂ je zmíněn jako běžná složka většiny inkluzí ve studovaných minerálních fázích.

Tento příspěvek nemá ambice řešit podrobně genezi všech křišťálových výskytů v sileziku a jejich p-T parametry, na takovou interpretaci bylo zatím učiněno málo analýz, ale shrnuje současné poznatky a nová měření soustředěná na křišťály a jejich fluidní inkluze. Jedním z úkolů provedeného studia bylo rovněž sledování rozdílů genetických znaků křišťálů z jednotlivých lokalit. O některých z nich je známo (např. Jegłowa), že jejich křišťály byly v pravěku využívány na unikátní štipané nástroje a tyto informace pomohou definovat jejich provenienci. Obecně lze konstatovat, že výskyt křišťálů z Českého masivu představovaly rozhodující zdroj této suroviny během starší doby kamenné ve východní části střední Evropy (Přichystal 2009). V mladších obdobích pravěku, po ukončení zalednění Alp, převzaly tuto roli alpské zdroje.

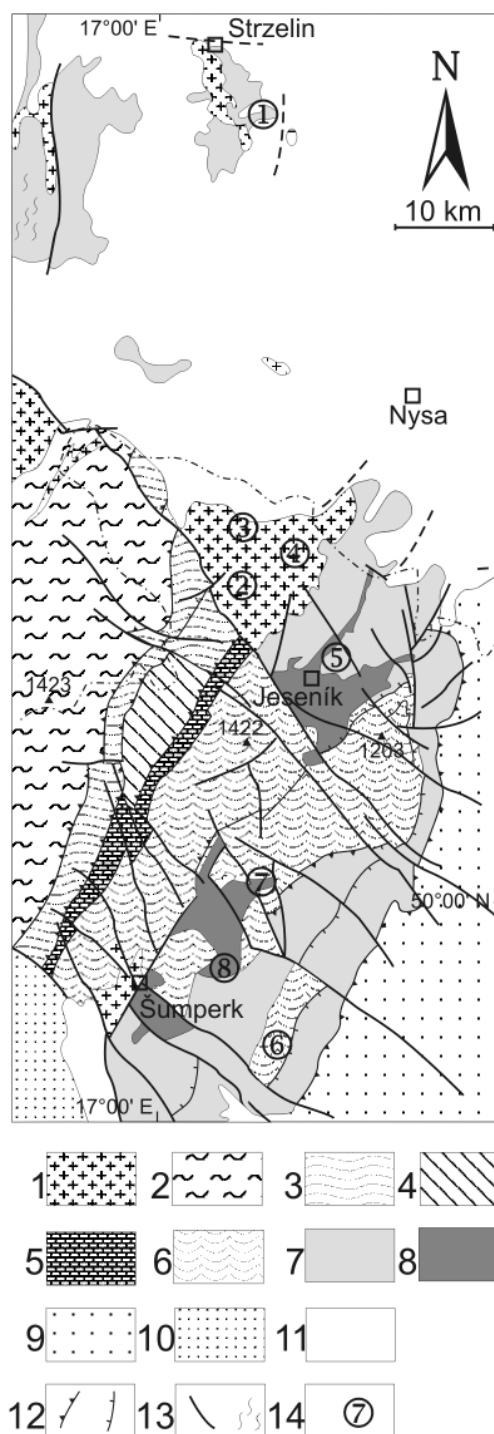
Metodika

Za účelem poznání mateřských fluid byly studovány primární a pseudosekundární fluidní inkluze v růstových zónách, krátkých řadách, skupinách a v izolovaných pozicích. Fluidní inkluze uspořádané podél dlouhých trhlin a obsahující mnohem mladší fluida (sekundární) než mateřské roztoky křišťálů jsou ve vzorcích velmi vzácné a pro cíle výzkumu nemají význam. Typy inkluzí byly stanoveny na základě petrografického studia s určením přítomnosti kapalných, plyných a pevných fází v inkluzích (L - liquid, V - vapor, S - solid) za laboratorní teploty. Další studium inkluzí bylo provedeno na zahřívací a chladicí komoře Linkam THMSG600 (instalované na mikroskopu Nikon Eclipse80i) v laboratoři na ÚGV PřF MU v Brně. Na kalibraci přístroje byly použity syntetické fluidní inkluze, přesnost měření se pohybovala v rozmezí 0.1 až 1.0 °C a podle kalibrace byly pak výsledky přepočteny. Na fluidních inkluzích byly měřeny následující parametry: teplota homogenizace inkluzí s dominantními vodnými fluidy ($T_{h,i}$), teplota celkové homogenizace v přítomnosti vodných roztoků a CO₂ ($T_{h,tot}$), teplota tání ledu ($T_{m,ice}$), teplota tání hydrohalitu ($T_{m,hh}$), eutektická teplota (T_e), teplota homogenizace CO₂ (T_{h,CO_2}), teplota tání CO₂ (T_{m,CO_2}), teplota tání klatrátu ($T_{m,clath}$). Salinita vodných roztoků byla počítána a aproximována podle Bodnara (1993). V ostatních případech byla salinita, hustoty fluid a složek počítány v programech FLUIDS 1 (ICE, ISOC, BULK) (Bakker 2003).

K detekci organických fluid byla využita fluorescenční mikroskopie na aparatuře s analyzátořem Nikon UV-2A, excitace: 330 - 380 nm, zrcadlo: 400 nm, bariera: 420 nm.

RTG analýzy byly provedeny v ÚGV PřF (V. Vávra) a VÚSTAH (D. Všianský). Rtg difraktometrická (XRD) analýza proběhla na aparatuře Bruker D8 Advance s Cu-anodou ($\lambda K\alpha = 0.15418\text{nm}$) a variabilními divergenčními clonami při konvenční Bragg-Brentano parafokusaci $\theta - \theta$ reflexní geometrii.

Epidot z lokality Stará Červená Voda byl analyzován na mikrosondě ve vlnově disperzním módu na přístroji Cameca SX100 ve společném pracovišti Ústavu geolo-



Obr. 1 Geologické schéma silezika a okolních geologických jednotek s pozicí studovaných lokalit. Upraveno podle Grocholského (ed.) (1969), Radleze et al. (eds.) (2000), Chába et al. (2007). 1 - variské granitoidy; 2 - metamorfity orlicko-sněžnického krystalinika; 3 - staroměstské krystalinikum; 4 - velkovrbenská skupina; 5 - skupina Branné; 6 - metamorfity keprnické a desenské skupiny; 7 - metamorfity vrbenské skupiny a jejich ekvivalentů; 8 - amfibolity, amfibolické horniny; 9 - klastika spodního karbonu; 10 - křídové sedimenty; 11 - kvarterní a neogenní sedimenty; 12 - hlavní a vedlejší násunové zlomy; 13 - zlomy, stříhy/mylonity; 14 - studované lokality. Lokality: 1 - Jegłowa; 2 - Žulová, Korálové jámy; 3 - Velká Kraš; 4 - Stará Červená Voda; 5 - Česká Ves; 6 - Mirošinec; 7 - Vernířovice; 8 - Krásné u Hraběšic.

gických věd Brno a České geologické služby na přírodovědecké fakultě MU Brno při urychlovacím napětí 15 kV, proudu svazku 20 nA a průměru svazku 2 μm . Použity byly přírodní a syntetické standardy.

Pro identifikaci zejména pevných fází v inkluzích byla aplikována Ramanova spektrometrie v laboratoři na Univerzitě v Leobenu (Lehrstuhl für Angewandte Geowissenschaften und Geophysik) a v Ústavu fyziky kondenzovaných látek PřF MU. Vzorky byly analyzovány na spektrometru HORIBA Jobin Yvon (laser Nd-YAG 532 nm, výkon 100 mW).

Ze vzorků křišťálů z několika lokalit byly provedeny izotopické analýzy. Vzorky pro analýzu stabilních izotopů kyslíku byly připraveny podrcením nejméně 3 mg křemene. Izotopické analýzy byly provedeny v Institute of Mineralogy and Geochemistry, University of Lausanne. Vzorky 0.5 - 2 mg materiálu byly rozkládány v prostředí čistého F_2 se zahříváním CO_2 -laserem. Separovaný O_2 byl koncentrován na molekulárním síti (5A) a následně analyzován na hmotovém spektrometru Finnigan MAT 253. Izotopická data jsou vyjádřena v promile (‰) odchylky od standardu V-SMOW. Opakované analýzy použitého standardu (NBS-28 křemen; $n = 4$) mají přesnost ± 0.1 ‰ pro $\delta^{18}\text{O}$.

K výpočtům hodnoty $\delta^{18}\text{O}$ fluid, z nichž křemeny krystalovaly, byla použita frakcionační rovnice křemen-voda (Zheng 1993), kde hodnoty $\delta^{18}\text{O}$ jsou v ‰ standardu V-SMOW a T je teplota vzniku (T_t - trapping temperature) v K.

Geologické prostředí výskytu křišťálů

Jegłowa

U Jegłowe v blízkosti Strzelina, zhruba 40 km jiv. od Wrocławu se nacházejí křišťály o délce až 20 cm, které jsou vázané na křemen-kaolínová hnízda či žíly v devonských kvarciticích břidlicích a kvarcitech. Ty jsou součástí krystalinického pláště strzelinského (respektive strzelinsko-žulovského) granitového masivu. Kvarciticke břidlice mají bělavou barvu (někdy s jemně nazelenalým odstínem) a výraznou plošně paralelní až stébelnatou texturu. Již makroskopicky je dále zřetelná porézní stavba, kde póry protažené s foliací jsou vyplněny kaolinitem. I mikroskopicky jsou nápadné dutinky protažené s foliací a vyplněné jemně krystalovaným kaolinitem, jehož uspořádání nerespektuje foliaci a tudíž tato výplň je evidentně mladší. Krystaly křišťálu se nacházejí v hornině v hnízdech a puklinách vyplněných kaolinitem (potvrzeno RTG analýzou). Menší krystaly jsou čiré, větší bývají v kořenové části často šedobílé (obr. 2a). Velikost dříve nalezených křišťálů přesahovala často i 10 cm.

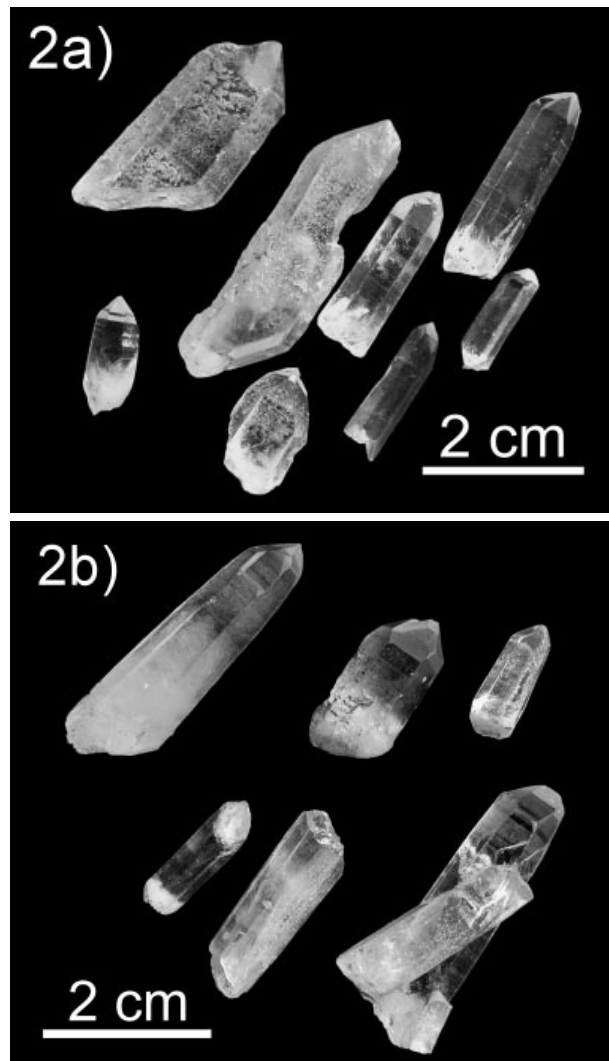
Žulová (Andělské domky, Korálové jámy)

Lokalita označovaná jako „Korálové jámy“ u Žulové je jedním z nejznámějších nalezišť krystalovaných křemenu a křišťálů v Slezsku. Zmínku o žilách najdeme v práci Rosiwala et al. (1931), kteří v místě popisují žíly křemene rovnoběžné s okrajovým zlomem lugika, to je směru SZ - JV. Později byla sledována technickými pracemi nepravdělná žíla o mocnosti až 5 m ve směru SSV - JJZ a krystaly křemene a křišťálu o velikosti až 10 x 2.5 cm byly v čočkovitých dutinách o délce až 1 m (Albrechtová et al. 1970). Nejčastěji je možné najít stejně velké krystaly podobné jako v Jegłowe (obr. 2b). Žíly jsou situovány v kaolinizovaných granitech, masivní křemen uzavírá i bloky kaolinizovaných hornin. Žíly jsou lemovány altero-

vanou zónou, v níž jsou granity vyběleny a albitizovány (albit, muskovit, illit). Podél kontaktu žil s horninou jsou místy patrné shluky zrnitého epidotu. Na puklinách hornin popisuje Novotný (1997) jehlice epidotu až 1.5 cm dlouhé. Nejnovější technické práce (šachtice) dosáhly skalního podloží se dvěma žilami směru SV - JZ a SZ - JV (Novotný 1997). Krystaly křišťálů obsahovala jen druhá žíla v asociaci s bělavým křemenem a šedým jílem. Některé křišťály měly nazelenalé zbarvení vtroušeným jemným chloritem. Němcová a Němec (1970) popisují jako uzavřeniny v křišťálu asbest, chlorit, sagenit a „limonit“. Výčet krystalografických studií uvádí např. Losos (1997).

Velká Kraš

Lokalita byla v minulosti známé ložisko křemene. Leží asi 2.5 km na J od obce Velká Kraš, na severním okraji lesní čtvrti Bažantnice, kde jsou rozsáhlé pozůstatky těžby z 19. a 20. století. Historie zdejšího dobývání křemene je však mnohem starší, první zmínka pochází již z roku 1509. Naleziště je proslulé z minulosti výskyty velkých krystalů křišťálu dosahující délky až 1 m, běžně od 10 do 50 cm (Kruťa 1973). Dnes křemenná žilovina vystupuje v rýhách a stěnách, křemen je spíše masivní, jen místy jsou vyvinuté krystaly až křišťálového charakteru. Velmi čisté křišťály jsou vzácné. S křemenem se vyskytují



Obr. 2 Volné jednotlivé krystaly křišťálů z lokality Jegłowa (2a) a Žulová (2b). Foto L. Plchová.

menší skupiny šupin muskovitu a na okraji žil živce. Již dříve, např. Staněk a Kalášek (1953), definovali žilu jako pegmatit s extrémně vyvinutou křemennou zónou. Žíla má směr SZ - JV. Okolní granitoidní horniny žulovského masivu jsou alterované. Křemen vykazuje makroskopicky patrné paralelní světlé smouhy (traily), tvořené řadami fluidních inkluzí menších rozměrů.

Stará Červená Voda

Okolí této lokality bylo dříve dokonce zahrnuto do vyhledávacího průzkumu na křemenné suroviny, ale pro nevhodnost z hlediska obsahu nečistot bylo z dalších prací vyloučeno (Mališ, Pavlík 1974). Dříve těžené ložisko - žíla měla směr 135° (Kruťa 1973). Výskyty krystalů křišťálu jsou známy z okolí Staré Červené Vody již z doby těžby křemene pro sklářské účely v 19. století (lokality Mokřiny) a v období 20. století zejména sběratelům minerálů z tratě Výhled (např. Gadas 2002; Zimák et al. 2003). Ta se nachází v oblasti pastvin cca 2.5 km vsv. od kostela ve Staré Červené Vodě. Volné, až 10 x 5 cm velké sloupcovité krystaly nebo jejich drúzy vyvětrávají z dutin v křemenných žilách a čočkách s délkou do 3 m. Žíly se směrem SZ - JV až S - J o mocnosti do 0.5 m protínají biotitový granit žulovského masivu při jeho východním okraji. Ten je na lokalitě kaolinizován tak, že jsou žíly uloženy většinou pouze v kaolínu a světle šedý kaolín také často vyplňuje dutiny a trhliny v žilách křemene, které mají ostrý kontakt s okolní horninou. Na reliktech biotitového granitu je patrná jeho světlá barva, způsobená nízkým obsahem tmavých minerálů (chloritizovaný biotit) a intenzivní kaolinizací a zřejmá je také plošně paralelní stavba.

Materiál subparalelních žil je tvořen především mléčně bílým a šedavým masivním křemenem, který směrem k dutinám přechází ve stébelnatý. Nepravidelné dutiny (až několik desítek dm³) obsahují volné, často oboustranně ukončené krystaly nebo drúzy až do velikosti 20 cm. Krystaly jsou bezbarvé a přecházejí od mléčně bílé barvy při bázi přes zakalený až po zcela čirý křišťál (obr. 3a). Výjimečně se vyskytly drobné, do velikosti 5 x 2 mm velké, krystalky světle zeleného epidotu podél růstové zóny mezi starší a mladší částí krystalů. Epidot v křišťálech je nehomogenní a sektorově zonální. Na základě mikroskopických analýz se obsah pistacitové komponenty pohybuje v rozmezí 15 - 29 mol. %. Na krystalech křišťálu převládají plochy prizmatu, často příčně rýhované, a plochy obou romboedrů, kdy je ve většině případů jeden převládající. Místa jsou krystaly nerovnoměrně vyvinuté s potlačením jednoho z romboedrů. Plochy trapezoedrů byly pozorovány zcela výjimečně.

Česká Ves

Na lokalitě Česká Ves se krystaly křemene a křišťálu vyskytují v deluviu ve směsi s bloky a balvany okolních metabazitů a metapelitů na ploše cca 50 x 50 m, vzdálené cca 400 m jv. od budovy bývalé hájenky, těsně pod lesní cestou. Na této ploše se nacházejí hojné zbytky křemenné žiloviny, tvořené šedobílým masivním až bílým stébelnatým křemenem přecházejícím lokálně do drúzovitých partií, na kterých je však většina krystalů značně poškozena. Spolu s nimi se objevují volné sloupcovité až jehlicovité krystaly obecného křemene, méně křišťálu, vzácně oboustranně ukončené, do velikosti 3 x 10 cm. Vzácně lze nalézt i jejich srostlice. Větší krystaly mají většinou matný až voštinový povrch, menší bývají lesklé a čerstvé (obr. 3b). Ojedinele se vyskytují krystaly se světle zeleně zabarvenými zakončeními vlivem přítomnosti inkluzí chlo-

ritu. Na krystalech byly pozorovány pouze plochy prizmat a obou romboedrů, víceméně v rovnováze. Během terénních prací bylo zjištěno, že křemenná žilovina spolu s krystaly křemene vyplňuje „kapsy“ v rozvětralých metamorfitech do hloubky maximálně 1 m, ale primární výskyt nalezen nebyl. Vzácně byly nalezeny úlomky a balvany pegmatitu, nikdy však ve spojení s křemennou žilovinou, lze tedy předpokládat, že nemají genetickou souvislost.

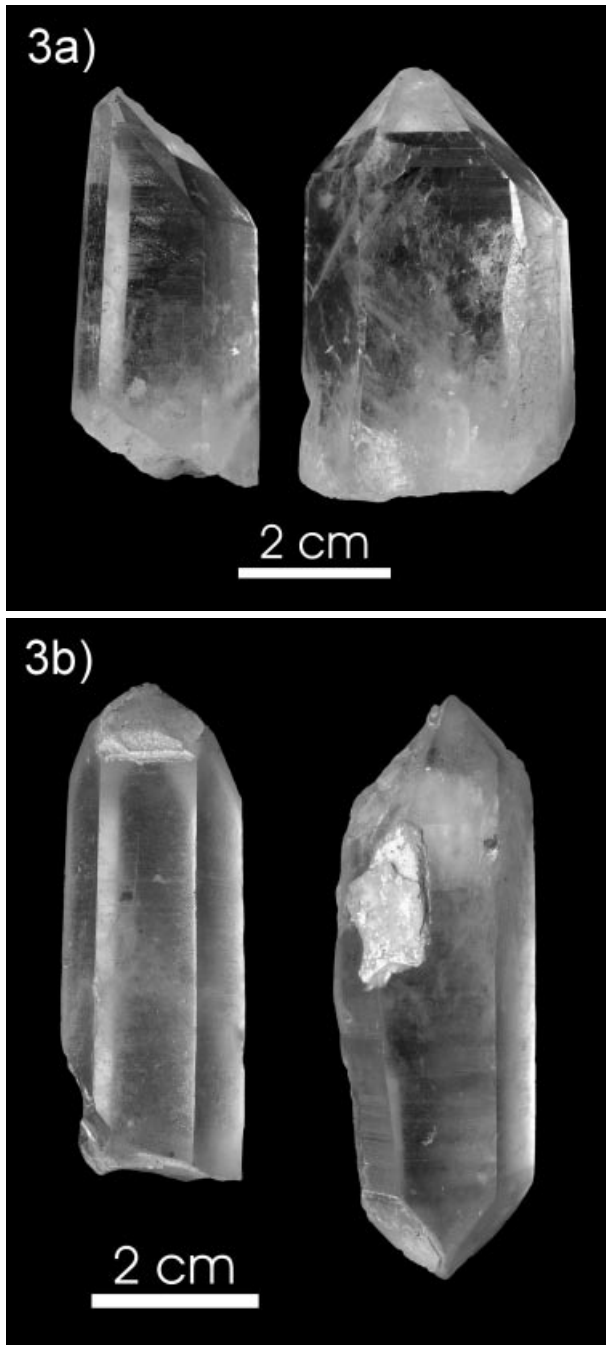
Mirotínek

Místo s výskytem křišťálu se nalézá asi 0.7 km z. od osady Mirotínek, 2.5 km jz. od obce Tvrdkov. Zde u silnice z Libiny do Rýmařova se nachází menší opuštěná pískovna založená v silně zvětřalém a částečně kaolinizovaném granodioritu. Jedná se o poměrně malé těleso prostorově svázané s intruzí šumperského granodioritového masivu. V centrální části pískovny byl v době jejího provozu odkrytý křemenný suk, v okrajových částech, zejména na jv. a sv. okraji pískovny bylo ve zvětřalém granodioritu odhaleno větší množství křemenných žil mocnosti od několika cm do 20 až 40 cm. V žilách byly drobné oválné až nízcé čočkovitě protažené dutiny bohatě porostlé většinou jehlicovitými, velmi čistými křišťály, méně mléčnými krystaly křemene. Velikost krystalů je od 1 cm do 5 cm, většinou s vývojem tenkých dlouhých hranolů, dokonale ukončených kombinací obou romboedrů (obr. 3c). Ojedinele zde byly nalezeny krystaly 7 až 10 cm dlouhé, k raritám zde patří nálezy typů tzv. žezlovitých krystalů, které tvoří širší „soudčkovité“ krystaly narostlé na krátkých hranolech. Vzorok z této lokality byly získány především v období 50. až 70. let 20. století. Přesto, že zde několik desetiletí probíhala těžba zvětřalého granodioritu a je možné tuto lokalitu z mineralogického a sběratelského hlediska hodnotit jako pozoruhodnou, nebyly geologie, mineralogie a jejich krystalografie nikdy studovány. Nejsou o ní žádné literární údaje a není zmíněna v regionálních mineralogických topografiích.

Vernířovice

Lokalita se nalézá asi 3 km na V až VSV od kostela ve Vernířovicích, na z. svahu Břidličné (1358 m), v místě zvaném Mísečky (dříve Hackschüssel), asi 250 m sv. od nově zbudované lovecké chaty, pod vrstevnicovou lesní cestou (tzv. Pytlácká stezka) vedoucí od sedla na Skřítku do údolí potoka Mertý a Vernířovic. V horninách sobotínského amfibolitového masivu a na puklinách v chloritových rulách zde byly nalezeny narostlé a volně uložené až 15 cm velké krystaly křišťálu. První nálezy křišťálů byly na odkrytých plochách na balvanech a blocích v suti pod cestou. Na těchto plochách byly nalézány četné drúzovité povlaky menších krystalů křišťálu, volně v púdě pak bylo nalezeno větší množství 12 - 15 cm velkých krystalů křišťálů. V roce 1895 zde F. Kretschmer zkoumal na skalním výchozu puklinu pokrytou krystaly křišťálu 2 - 7 cm velkými. Nálezy obdobného charakteru byly opakovaně objeveny i v pozdější době, prakticky až do současnosti, a to jak na místě původního nálezů, tak i v širším okolí lokality, na puklinách a plochách břidličnatosti hornin. Spolu s křišťálem z tohoto naleziště Sládek (1973) popisuje albit a jeho periklinové srostlice, tabulkovitý černo zelený chlorit a světle žluté krystaly titanitu o velikosti do 5 mm. V poslední době byly nalezeny i krychlové krystaly pyritu o velikosti až 2 cm. Studiu minerální asociace se podrobně věnovali Novotný a Zimák (2003).

Krystalografií křišťálu z této lokality se nejpodrobněji zabývala Saporová (1938), která naměřila na třiceti krys-



Obr. 3 Krystaly křemenů - křišťálů z lokalit v sileziku: 3a - Stará Červená Voda, 3b - Česká Ves, 3c - Mirotínek. Foto L. Plchová.

talech 19 horních pozitivních trapezoedrů a 1 horní negativní trapezoedr, 41 spodních negativních trapezoedrů, 3 trigonální pyramidy, 18 romboedrů a 1 prizma. Další studie Němce (1956) zkoumala změny krystalové morfologie křemene v závislosti na rozměrech krystalů.

Krásné u Hraběšic

Známým nalezištěm minerálů alpské parageneze je lom ležící na sv. okraji osady Krásné, asi 4.5 km v. až vsv. od Šumperka, situovaný ve svahu vpravo od silnice Šumperk - Hraběšice (obr. 1). Mnoho reprezentativních vzorků z této lokality je v muzejních sbírkách a pocházejí většinou z 30. a 60. let 20. století. Nejlepší ukázky byly vázány především na polohy amfibolitů sobotínského amfibolitového masivu a jejich kontakty s biotitovými rulami desenské skupiny. Základní mineralogickou charakteristiku lokality zpracoval Sládek (1973).

V současné době probíhá těžba především v hor-

ních částech lomového areálu. Zde jsou stěny tvořeny téměř výhradně biotitovými rulami, výskyt minerálů na puklinách a v dutinách je zde velmi sporadický, a pokud se již vyskytnou, tak jsou vyvinuty ve velmi drobných až jemných krystalech a jemnozrnných agregátech. Minerální asociaci tvoří většinou epidotové povlaky, titanit, pyrit, chalkopyrit, kalcit, žilný křemen a drobné krystalky křišťálu. Menší hnízda v amfibolitu jsou pak zcela vyplněna živcem a křemenem s epidotem, tmavozeleným až černým chloritem a vzácně prehnitem.

Starší nálezy jsou charakteristické přítomností křišťálu s adularem a prehnitem, drúzami krystalů epidotu s povlakem chloritu, prehnitem vyvinutým do hřebenovitých agregátů, albitem-periklinem, titanitem, apatitem a zeolity. Křišťál se zde vyskytoval až v 16 cm dlouhých a 4 cm širokých krystalech, některé krystaly měly povlak nebo rostlé chlority. Krystaly křišťálu se vyznačují příkrými klenci a výrazně vyvinutým tvarem (1121). Hlavním místem výskytu byla střední část lomové stěny s velkým množstvím mineralizovaných puklin a dutin (Sládek 1973). Přehlednou informaci o lokalitě publikoval Staněk (1997).

Studium fluidních inkluzí

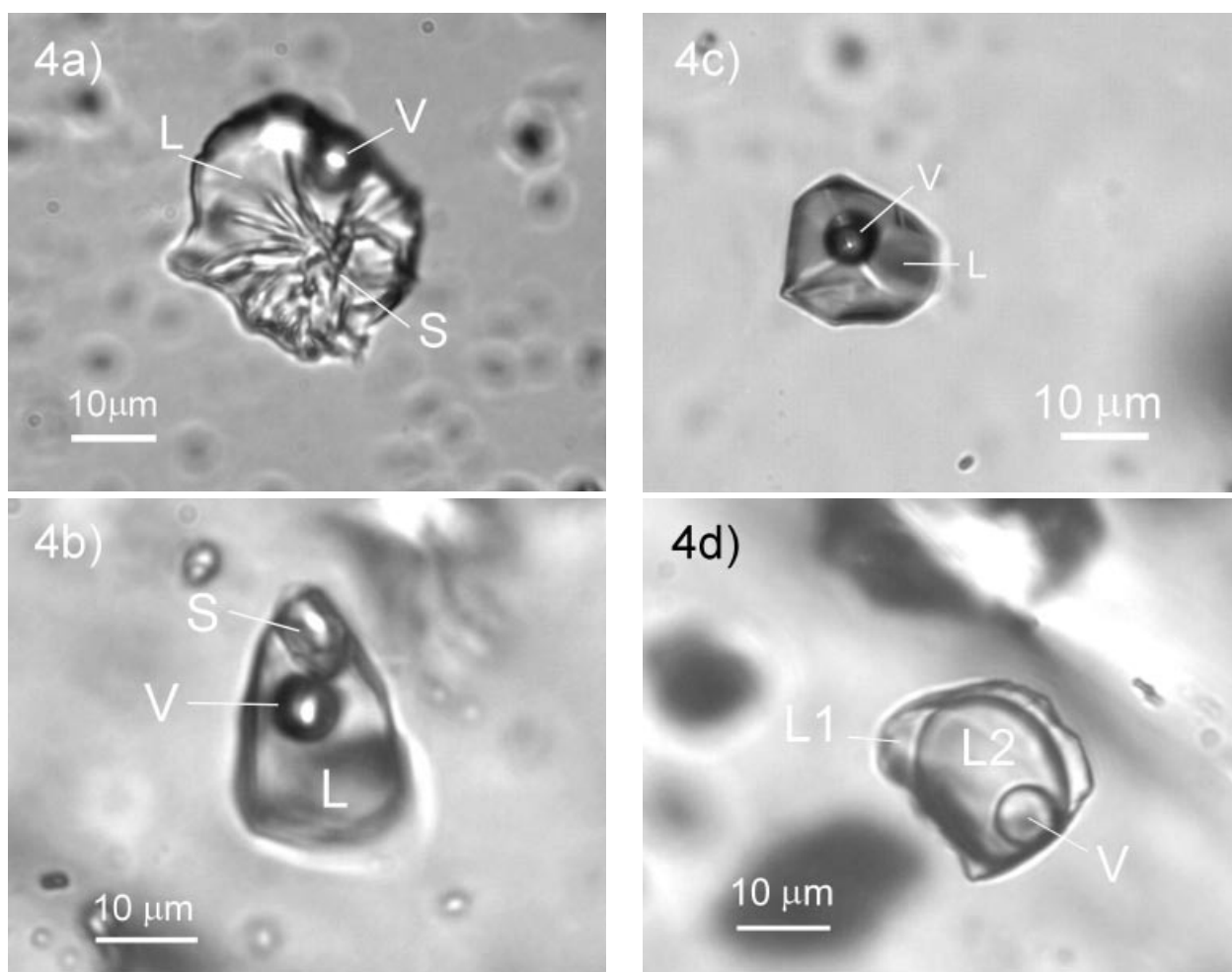
Jegłowa

Křišťály obsahují fluidní inkluze uspořádané do růstových zón, náhodně uspořádaných shluků nebo vystupují jako solitérní inkluze (primární). Inkluze uzavírají rozlišitelné dvou- až třífázové systémy (L + V ± S) (obr. 4a). Dominující kapalná fáze jsou vysokosalinní vodné roztoky, které mají velmi stabilní celkovou salinitu (salinita ~ 25 hm. % ekv. NaCl) se složením fluid typu $H_2O-NaCl-CaCl_2$. Chemický systém fluid je indikován eutektickými teplotami $T_e \sim 52^\circ C$ a metastabilní eutektickou $T \sim 70/68^\circ C$). Rozptyl hodnot mezi -56 až $-49^\circ C$ ukazuje na zastoupení dalších chloridů (K, Mg) (Borisenko 1977; Davis et al. 1990; Spencer et al. 1990). U hlavních chloridových složek ve vodní fázi kolísá zastoupení iontů Na a Ca, ale většinou převažuje NaCl (molární zlomek soustavy $NaCl-CaCl_2$ je $X_{NaCl} = 0.36 - 0.76$, Chi, Ni 2007) (tab. 1, obr. 5). Pro vzorky z Jegłowe je typické, že při zahřívání vymražených fluid nejdříve taje led (tab. 1, obr. 5) a ve vyšší teplotě hydrohalit ($T_{m, hh} = -27$ až $-12^\circ C$). Teploty homogenizace mají poměrně úzké rozpětí mezi 132 a $176^\circ C$. Pevné fáze mají podobu průsvitných drobných šupin s hexagonálním habitem nebo tvoří shluky (obr. 4a). Ramanova spektrometrie těchto fází ukázala velmi výrazný typický

pík v pozici 3627 cm^{-1} , charakteristický pro hydroxylovou skupinu (Frost 1995) a s největší pravděpodobností je v inkluzích uzavírán kaolinit. V uzavřené plynné fázi bylo stejnou metodou identifikováno i malé množství metanu (pík 2919 cm^{-1}).

Žulová - Korálové jámy

Krystaly křišťálů obsahují petrograficky pestré spojení fluidních inkluzí. Velikosti inkluzí se pohybují běžně mezi 5 a $30\ \mu m$ (maximálně až $62\ \mu m$) s jednoduchou i složitější morfologií. Kromě dvofázových jsou běžné i třífázové inkluze (L+V+S, vzácně L+V+S1+S2) s uzavřenými zachycenými pevnými fázemi. Lístkovitý a tabulkovitý habitus odpovídá kaolinitu a spíše izometrická a tyčinkovitá zrna (obr. 4b) poskytují ramanovo spektrum odpovídající kalcitu (hlavní pík v pozici 1087 , píky s menší intenzitou 725 a 265 cm^{-1}). Kromě určité variability ve fázovém složení inkluzí byla zaznamenána i variabilita celkové salinity, což je patrné na rozptylu dat v diagramu (obr. 5). Salinita se pohybuje od 10.7 do 29.9 hm. % ekv. NaCl. Eutektické teploty indikují přítomnost stejného chemického systému jako ve vzorcích z Jegłowe, čili typ $H_2O-NaCl-CaCl_2 \pm MgCl_2 \pm KCl$ (T_e je mezi -56 a $-48^\circ C$, metastabilní T_e od -76 až $-66^\circ C$). Zastoupení NaCl vůči $CaCl_2$ se mění v širokém rozmezí: $X_{NaCl} = 0.16/0.85$ (obr. 5, tab. 1). Teploty $T_{m, hh}$, důležité pro definici poměru Na/



Obr. 4 Příklady typických fluidních systémů v inkluzích studovaných křišťálů. 4a - třífázový systém L+V+S, Jegłowa; 4b - třífázový systém L+V+S, Žulová - „Korálové jámy“; 4c - dvofázový systém L+V v křišťálu, inkluze má pravidelný tvar s krystalovými plochami, Česká Ves; 4d - třífázový systém L1+L2+V se dvěma nemísitelnými kapalinami H_2O (L1) a CO_2 (L2), Vernířovice. Foto M. Slobodník.

Ca, jsou prakticky ve stejném rozsahu jako v Jeglowe a to mezi -27 a -12 °C a další podobnost je i u teplot homogenizace s rozsahem 124 - 177 °C.

Velká Kraš

V krystalech křemene je velké množství inkluzí menších rozměrů nejčastěji mezi 2 a 13 μm, které jsou často uspořádány do kratších nebo delších trailů (pseudosekundární inkluze). Inkluze jsou v laboratorní teplotě dvoufázové se dvěma nemísitelnými kapalinami (L1+L2), které reprezentuje vodný roztok a CO₂, které je u 85 % inkluzí zastoupeno 10 obj. %. Velmi vzácně mají inkluze pouze kapalnou fázi CO₂ (L). Teplota celkové homogenizace inkluzí se pohybuje v rozsahu 198 až 340 °C (n=7). Kromě téměř čisté fáze CO₂, což je patrné z teploty tání CO₂ (T_mCO₂) mezi -57.1 až -56.6 °C, je přítomen vodný roztok s nízkou průměrnou salinitou 4.5 hm. % ekv. NaCl. Množství CO₂ má v průměru hodnotu X_{CO₂} = 0.063 a hustota fáze CO₂ se pohybuje v hodnotách 0.93 až 0.77 g.cm⁻³ (počítáno z T_hCO₂ → L).

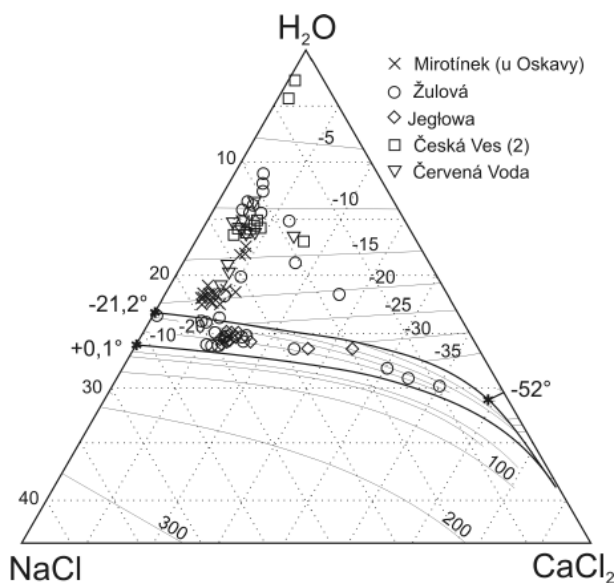
Stará Červená Voda

Bazální části krystalů většinou obsahují více fluidních inkluzí než jejich vrcholové čisté partie. V křišťálech jsou větší inkluze v růstových zónách nebo mají náhodné uspořádání. Přebírají inkluze dvoufázové L+V a poměrně hodně je i třífázových L+V+S. Pevné fáze (S) jsou nejčastěji vločkovitého habitu stejně jako ve vzorcích z Jeglowe. Vodní roztok je chloridový systém H₂O-NaCl-CaCl₂ indikovaný eutektickou teplotou -52 s variacemi mezi 49 až -55 °C (s metastabilní T_e ~ -72 °C). Poměr chloridů Na/Ca+Na se pohybuje v rozmezí od 0.48 do 0.81 (tab. 1). T_h ukazují na nejnižší možné teploty vzniku křemenu a ty se pohybují v rozmezí 152 - 169 °C.

Česká Ves

Rozmístění inkluzí v krystalech je makroskopicky více zřetelné než na ostatních lokalitách. Výraznější je koncentrace inkluzí v kořenových nebo spodních částech krystalů. Někdy dokonce jsou inkluze pouze v nich a svrchní část

je čirá a bez inkluzí. Inkluze mají buď nahodilou distribuci, jsou vyvinuty podél růstových zón nebo jsou solitérní, poměrně často zaujímají i pozici podél ploch (vyhojených prasklin) a trailů. Velikosti inkluzí jsou nejčastěji v rozmezí 5 - 30 μm, největší studované měly v protažení 66 μm. Kromě nejběžnějších typů dvoufázových inkluzí L+V (obr. 4c) bylo zjištěno i několik se zachycenou pevnou fází jako typ L+V+S. Plynná fáze je zastoupena do 10 obj. %.



Obr. 5 Projekce teplot tání hydrohalitu a ledu ve fázovém diagramu systému H₂O-NaCl-CaCl₂ (Janatieva 1946; Vanko et al. 1988; Williams et al. 1990; Oakes et al. 1990). Izotermy a teplotní údaje jsou ve °C, Česká Ves (2) jsou datové body vysokosalinních fluid.

Tabulka 1 Rozsahy mikrottermometrických dat z fluidních inkluzí v křišťálech ze slezilka

lokality	(n)	fluidní systém	T _h ^{tot} (°C)	T _h ^{CO₂} (°C) ^a	T _m ^{CO₂} (°C)	T _m ^{hh} (°C)	T _m ^{ice} (°C)	T _m ^{clat} (°C)	salinita (hm. % NaCl ekv.) ^b	X _{NaCl} ^c
Jeglowa	52	H ₂ O-NaCl-CaCl ₂	132/176			-26.5/8.0	-30.5/24.0		±24.0/26.5 ^d	0.36/0.76
Žulová	85	H ₂ O-NaCl-CaCl ₂	124/177			-27.0/5.8	-38.5/5.6		29.9/10.7	0.16/0.85
St. Č. Voda	13	H ₂ O-NaCl-CaCl ₂	152/169			-27.0/22.8	-17.9/9.8		21.0/13.8	0.48/0.81
Česká Ves	15	H ₂ O-NaCl-CaCl ₂	131/194			-27.0/21.5	-13.2/2.6		16.8/4.4	0.48/0.96
Česká Ves	48	H ₂ O-NaCl	165/213			-0.6/-0.1	-2.2/9.5/8		1.1/0.2	
Mirotínek	41	H ₂ O-NaCl-CaCl ₂	107/182			24.0/22.0	-22.9/5.8		23.5/9.0	0.69/0.90
Velká Kraš	23	H ₂ O-NaCl-CO ₂	198/340			-0.5/22.5(L)	-10.1/4.5		~ 4.5 ^d	
Vernířovice	25	H ₂ O-NaCl-CO ₂	220/360			28.0/31.4(L)	-3.0/1.0		6.3/10.9	2.5/4.1
Vernířovice	5	H ₂ O-NaCl-CaCl	106/133			15.4/14.9			18.9/18.5	n.d.
Krásné u H.	21	H ₂ O-NaCl-CO ₂	144/315			2.0/18.0(V)	-3.7/2.0		7.6/7.9	~ 3.3 ^d

^a homogenizace na kapalinu (L) a na plyn (V), ^b Chi, Ni (2007), mol. zlomek soustavy NaCl-CaCl₂, ^c odečet z diagramu (obr. 5), ^d průměrná hodnota, protože nejsou k dispozici odpovídající párové dvojice T_mice a T_mclat, n.d. - no data

V inkluzích křišťálů z České Vsi byly zjištěny dva různé fluidní systémy. První vykazují hodnoty T_e okolo $-22\text{ }^\circ\text{C}$, což je teplota ukazující na přítomnost jednoduššího systému $\text{H}_2\text{O-NaCl}$. Druhá skupina vodných fluid vykazují T_e v rozsahu -56 až $-34\text{ }^\circ\text{C}$, což indikuje komplexní chloridový fluidní systém s Mg, K, Fe (např. Davis et al. 1990). Rozdíl je patrný i u teplot homogenizace. První skupina inkluzí má vyšší teploty T_h mezi 165 a $213\text{ }^\circ\text{C}$ a salinity maximálně $1.1\text{ hm. \% ekv. NaCl}$, zatímco druhá mezi 131 a $194\text{ }^\circ\text{C}$ se salinitami 4.4 až $16.8\text{ hm. \% ekv. NaCl}$ (tab. 1). Vzhledem k tomu, že fluidní inkluze jsou v krystalech často nepravidelně rozmístěny a s nízkou frekvencí, není možné stanovit jejich vzájemný relativně časový vztah. Obě skupiny inkluzí se z hlediska zastoupení fází neliší a nemají ani jiné odlišující petrografické znaky.

Jedna z trojfázových inkluzí (L+V+S) s komplexním salinním roztokem ($T_{m, \text{hh}} = -24.2\text{ }^\circ\text{C}$, $T_{m, \text{ice}} = 12.7\text{ }^\circ\text{C}$, metastabilní $T_e = 73\text{ }^\circ\text{C}$) a $T_h = 179\text{ }^\circ\text{C}$ se objevila v blízkosti jiné dvoufázové inkluze (L<V), v které byla s použitím fluorescenční mikroskopie odhalena přítomnost lehkých kapalných uhlovodíků se světle modrou fluorescencí. Tato skutečnost naznačuje spojitost těchto uhlovodíkových fluid s nížetepelnými vodnými fluidy, v nichž jsou kapalně uhlovodíky stabilní a mohly by migrovat společně.

Mirotínek

Fluidní inkluze v krystalu čistého křemene byly zřetelně uspořádány do růstových zón, jinde vytvářely klastry, krátké traily nebo se vyskytovaly jako solitérní. Na okraji krystalu v růstové zóně převládaly menší inkluze ve větším množství, které byly hlavně jednofázové. Velikost studovaných inkluzí se pohybovala většinou v intervalu $4 - 32\text{ }\mu\text{m}$. Podle přítomnosti fází jsou zde přítomny tři typy inkluzí: L, L+V+S a převládající typ L+V. Obsah plynných složek nebyl mikrotermometricky identifikován. Jednofázové inkluze by mohly představovat uzavřené velmi nízkotepelné metastabilní systémy, v nichž nedošlo k nukleaci plynné fáze. Současně jde o skupinu inkluzí, které mají z celého souboru nejnižší salinity (tab. 1). Na této lokalitě také T_h zabíhají do nejnižších hodnot ze všech studovaných lokalit, přičemž celkový rozsah je $107 - 182\text{ }^\circ\text{C}$. Salinita fluid, které jsou opět typu $\text{H}_2\text{O-NaCl-CaCl}_2$ ($T_e = -49$ až $-52\text{ }^\circ\text{C}$, metastabilní $T_e = 68$ až $70\text{ }^\circ\text{C}$), je 9.0 až $23.5\text{ hm. \% ekv. NaCl}$. Poměr Na/Ca+Na je v rozsahu 0.69 až 0.90 a je prakticky stejný jako v tomto typu fluid u vzorků ze Staré Červené Vody nebo u většiny inkluzí ze Žulové. Typické je i to, že při zahřívání taje z pevných fází nejdříve hydrohalit a pak led (obr. 5). U fluid s nejnižší salinitou je NaCl dominantní chlorid a typ fluid pak odpovídá složení $\text{H}_2\text{O-NaCl}$ (T_e cca $20\text{ }^\circ\text{C}$).

Vernířovice

Fluidní inkluze v křišťálu z Vernířovic dosahují větších rozměrů, běžně do $60\text{ }\mu\text{m}$, občas i $80\text{ }\mu\text{m}$. Z hlediska přítomných fází byly zjištěny dva typy inkluzí typu L+V a L1+L2+V. Řidčeji je v inkluzích přítomna i malá pevná fáze. V inkluzích s CO_2 je významněji zastoupena kapalná fáze CO_2 (L1+L2+V, obr. 4d), která odhadem zaujímá 40 až 90 obj. \% .

První typ L+V se vyskytuje zřídka a obsahuje čistý vodný systém s chloridovými složkami ($\text{H}_2\text{O-NaCl-CaCl}_2$, indikováno podle T_e okolo $-52\text{ }^\circ\text{C}$). Toto složení společně s vyšší salinitou blízko hodnoty $19\text{ hm. \% ekv. NaCl}$ (tab. 1) ukazuje na příbuznost se salinními fluidy na ostatních lokalitách. Také T_h jsou s nimi srovnatelné ($106 - 133\text{ }^\circ\text{C}$).

Druhý typ inkluzí patří k systému $\text{H}_2\text{O-NaCl-CO}_2$. Salinita vodného roztoku je velmi nízká s hodnotami okolo 3 hm. \% NaCl (tab. 1). $T_{m, \text{ice}}$ se v přítomnosti klatrátu pohybuje mezi -3.0 a $-1.0\text{ }^\circ\text{C}$, $T_{m, \text{clat}} = 6.3$ až $10.9\text{ }^\circ\text{C}$. Hustota homogenizované fáze CO_2 je $0.65\text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ (pro průměrnou salinitu 3 hm. \% a objem vodné fáze 40 obj. \% , molární zlomek celkového složení $X_{\text{CO}_2} = 0.23$) a $T_h\text{CO}_2$ se pohybuje mezi $+28$ a $+31\text{ }^\circ\text{C}$ (tab. 1) s homogenizací na kapalinu. V plynné fázi je dominantní CO_2 , což naznačují teploty T_e mezi 56.6 až $57.5\text{ }^\circ\text{C}$. Přítomnost malého množství dalšího plynu, např. CH_4 , naznačuje i $T_{m, \text{clat}}$ větší než $+9.9\text{ }^\circ\text{C}$, až $+10.9\text{ }^\circ\text{C}$. Celková homogenizace ($T_{h, \text{tot}} \rightarrow \text{L}$) kolísá mezi 220 a $360\text{ }^\circ\text{C}$.

Krásné u Hraběšic

Na této lokalitě převládají v křišťálech dvoufázové inkluze L+V, třífázové s pevnou fází (zachycené minerály) jsou vzácné. Podíl plynné fáze kolísá přibližně mezi 5 a 40 obj. \% , běžně tvoří 10 obj. \% . V teplotách pod $20\text{ }^\circ\text{C}$ kondenzuje kapalnou CO_2 protože $T_h\text{CO}_2$ je mezi 2 a $18\text{ }^\circ\text{C}$ s homogenizací na plynnou fázi. Podle $T_m\text{CO}_2$, která je mezi 56.6 a $57.2\text{ }^\circ\text{C}$ jde jistě o velmi čistou složku, jejíž hustota homogenizované fáze je $0.140\text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ (počítáno pro salinitu vodného roztoku 4 hm. \% , objem vodné fáze 90 \% , $X_{\text{CO}_2} = 0.02$ z celkového složení). U řady inkluzí nebyla přítomnost CO_2 mikrotermometricky zjištěna. Vodný roztok bude poměrně čistý systém $\text{H}_2\text{O-NaCl}$, na což ukazují $T_e = -21$ až $-23\text{ }^\circ\text{C}$. Salinita vodného roztoku je nízká a pohybuje se v úzkém rozpětí. Teploty $T_{m, \text{ice}}$ mezi -3.7 a $-2.0\text{ }^\circ\text{C}$ představují salinitu 3 až $6\text{ hm. \% ekv. NaCl}$. Klatráty nebyly opticky pozorovány, pokud byly přítomny, pak je skutečná salinita spíše v nižších hodnotách. V mnoha inkluzích je přítomnost mikrotermometricky nezjistitelného množství CO_2 možné očekávat podle naměřených vyšších T_h ($T_{h, \text{tot}}$), jejichž rozsah se pohybuje od 144 až do $315\text{ }^\circ\text{C}$.

Výsledky studia izotopů kyslíku z křišťálů

Tabulka 2 shrnuje izotopické složení kyslíku křišťálů a výpočet izotopického složení kyslíku fluid z nichž mineral krystaloval. Rozsah hodnot $\delta^{18}\text{O}$ u křišťálů mimo „alpskou paragenezi“ je v nižších hodnotách celého souboru mezi $+8.4$ a $+11.8\text{ ‰ V-SMOW}$, „alpská parageneze“ (Vernířovice, Krásné u Hraběšic) vykazují hodnoty mezi $+10.9$ a $+12.7\text{ ‰ V-SMOW}$ a izotopické složení křišťálu z Velké Kraše poskytuje hodnotu $+9.4\text{ ‰ V-SMOW}$. Pro výpočty izotopického složení kyslíku fluid byly použity T_h a teploty odvozené z protínání izochor (Velká Kraš, Slobodník et al. 2010). Částečně se měnící poměry fází v inkluzích na lokalitách Vernířovice a Krásné u Hraběšic umožňují uvažovat o uzavření fluid okolo limitu rozpustnosti pro systém $\text{H}_2\text{O-CO}_2$ pro koncentraci 3 hm. \% NaCl a $X_{\text{CO}_2} = 0.2$. Za těchto podmínek zachycených v grafu (Bowers, Helgeson 1983) je aproximací zjištěna teplota $250\text{ }^\circ\text{C}$ (tab. 2). Vypočítané izotopické složení kyslíku ve fluidech rozděluje soubor na dvě skupiny, jedna má záporné hodnoty a druhá kladné hodnoty $\delta^{18}\text{O}$ (tab. 2). Každá z těchto skupin odpovídá určitému geologickému prostředí a minerální paragenezi.

Diskuse

Nalezené typy fluid v inkluzích křišťálů ze silezika jsou do jisté míry překvapením. Geologická pozice studované mineralizace původně vyvolávala očekávání krystalizace spíše z vysokotepelných, metamorfních hydrotermálních

roztoků spojených s metamorfózou a nebo z roztoků spjatých s magmatickými či vulkanickými procesy. Toto očekávání je splněno jen u lokalit Vernířovice, Krásné u Hraběšic a Velká Kraš. Vzorky z poslední lokality krystalovaly z fluid, která jsou velmi charakteristická pro pegmatity (např. Sirbescu, Nabelek 2003; Ackerman et al. 2007). Fluida typu $H_2O-NaCl-CO_2$ mají velmi nízkou salinitu a vzhledem k dalším lokalitám, Vernířovice a Krásné u Hraběšic, podstatně hustější fázi CO_2 . To může naznačovat vznik za vyšších tlaků. Přítomnost fluid se salinitou 4.5 hm% NaCl ekv. a nízkým obsahem CO_2 naznačují pozdější fázi pegmatitového procesu, v němž postupně dochází k růstu salinity a ke snižování obsahu CO_2 (např. Sirbescu, Nabelek 2003; Ackerman et al. 2007). V inkluzích ze žíly u Velké Kraše je množství CO_2 už velmi nízké a mohlo by to znamenat přechod k hydrotermálnímu stádiu, což naznačuje i stavba těchto žil, kde je velký podíl křemenné zóny a jen na okrajích jsou živce a slídy.

Vernířovice a Krásné u Hraběšic reprezentují již z geologického kontextu mineralizace s typickou alpskou paragenézí. Charakter primárních fluid jednoznačně potvrzuje, že jde o křišťály vykrystalované z metamorních fluid (např. Mullis et al. 1994). Pro tyto je také typické, že jsou tvořeny systémem $H_2O-NaCl-CO_2$ s nízkými salinitami vodné fáze a CO_2 má nízké hustoty.

Křišťály z ostatních lokalit mají petrografické a mikrotomometrické charakteristiky velmi podobné. Krystalovaly z fluid, která mají velmi malý rozptyl teplot homogenizace a vysokou celkovou salinitu. Řada ostatních parametrů je velmi blízká. Fluida patří k systému $H_2O-NaCl-CaCl_2$, v němž poměr Na/Ca+Na se pohybuje nejčastěji mezi hodnotami 0.40 až 0.90. Největší rozptyl je u lokality Žulová (0.16 - 0.85), který velmi pravděpodobně souvisí s různou intenzitou interakce s okolními horninami. Nejméně zřejmá alterace vedoucí k vybělení a albitizaci granitu směřují k vysokému obsahu Ca v hydrotermálním roztoku. Důsledkem této změny složení roztoků může být novotvořený epidot, který krystaloval hlavně okolo hranice horniny s křemennými žilami, a dále také přítomnost zrnec kalcitu jako pevné fáze ve fluidních inkluzích. Identifikovaný kalcit a kaolinit, jako častá součást uzavřených fluid, ukazují na genetickou souvislost s interakcí mezi hydrotermálními fluidy a horninami. Kaolinit je běžným produktem hydrotermální alterace granitoidů způsobené hydrotermálními s chloridy za teplot v blízkosti 160 °C (např. Merceron et al. 1992; Dekov et al. 2005). Tyto hodnoty jsou blízké našim podmínkám, při nichž byl zachycen námi studovaný fluidní systém.

Izotopické složení kyslíku fluid dosahuje nejnižších hodnot na lokalitě Žulová (ZAD 2, tab. 2). Negativní hodnoty izotopického složení kyslíku fluid by měly ukazovat na výraznější zastoupení meteorické vody v hydrotermálním roztoku. Přidání (míchání) vody bez rozpuštěných solí se však neslučuje s výslednou vysokou salinitou našich fluid. Podobné výsledky izotopických studií jsou známy z výzkumu povariských hydrotermálních fluid v Nízkém Jeseníku (např. Dolníček et al. 2003; Kučera et al.

2010), na žilách ve vápencích v Moravském krasu a na dalších lokalitách moravskoslezského paleozoika, kde tento typ fluid byl definován (Slobodník et al. 1999; Slobodník 2002). Analýzy (izotopické, crush-leach) těchto fluid ukazují, že základem je transformovaná mořská voda a k míchání s jinými typy vod dochází jen v menším měřítku.

Negativní hodnoty izotopického složení kyslíku fluid nejsou úplně v souladu s uvedenou interpretací. Tento nesoulad je zřejmě výsledkem komplexní frakcionace mezi fluidy, horninami a novotvořenými minerálními fázemi (Kloppmann et al. 2002) a zasloužil by si podrobnější studium. I když existují tyto nejasnosti, na základě zjištěných vlastností je možné vysokosalinní typ fluid interpretovat jako transformované sedimentární solanky. Chemický typ těchto fluid, poměr složek i termometrické parametry jsou podobné fluidním systémům v hlubších částech platformních jednotek a sedimentárních pánvích v jižních oblastech Polska (např. u Krakova, Schmidt Mumm, Wolfgramm 2004). Zjištěný charakter fluid je dobře srovnatelný i se staršími daty pocházejícími z moravskoslezského regionu a současně potvrzuje regionální charakter jejich rozšíření (např. Novotný, Dobeš 1999; Slobodník et al. 1999; Kučera 2002). Mladší než paleozoická aktivita tohoto typu fluid byla interpretována ze studia modelového stáří olava aplikovaného na žilné mineralizace na východním okraji Českého masívu (Slobodník et al. 2008).

Salinní fluida jsou s největší pravděpodobností povariská a křišťály z nich vykrystalované jsou mladší než ostatní studované vzorky. K variským pak jednoznačně patří vzorky z Vernířovic, Krásného u Hraběšic nebo Velké Kraše. Křišťály z České Vsi vznikaly také z vysokoteplotních roztoků, ale vzhledem k tomu, že v nich byly nalezeny i mladší nízkoteplotní vysokosalinní fluida a dokonce kapalné uhlovodíky, tak některé části krystalů, v nichž byly zjištěny, se musely tvořit později (mladší růstové zóny) v rámci povariské migrace salinních fluid. Typické mladší trailly se sekundárními inkluzemi zjištěny nebyly. Podobná situace je na lokalitě Vernířovice, kde v křišťálech byla též vzácně zjištěna vodná fluida chloridového složení v inkluzích, které neměly zřetelnou sekundární pozici.

Tabulka 2 Izotopické složení kyslíku křišťálů a jejich mateřských fluid z lokalit v síleziku

lokality	vzorek	křemen $\delta^{18}O$ ‰ V-SMOW	T^a (°C)	fluida $\delta^{18}O$ ‰ V-SMOW
Jeglůwa	JGL 1	+11.8	151	-3.6
Jeglůwa	JGL 3	+11.4	151	-4.0
Žulová	ZAD 1	+10.1	165	-4.1
Žulová	ZAD 2	+8.4	150	-7.1
Česká Ves	CV 1c – střed krystalu	+10.8	181/163	-2.2/-3.6
Česká Ves	CV1 r – okraj krystalu	+9.9	181/163	-3.1/-4.5
Vernířovice	VH-1	+12.7	250 ^b	+3.6
Krásné u H.	KRH-1	+10.9	250 ^b	+1.9
Velká Kraš	VKR-2	+9.4	320 ^c	+2.3

^a medián teplot homogenizace použitý ve frakcionační rovnici voda-křemen (Zheng 1993), u vzorku CV pro oba typy fluid (nízkosalinní a vysokosalinní)

^b odhad z limitů rozpustnosti pro systém H_2O-CO_2 a koncentraci NaCl 3 - 6 hm. % (Bowers, Helgeson 1983)

^c odvozeno z protínání izochor pro modelové systémy CO_2 a $H_2O-NaCl$ na dané lokalitě (Slobodník et al. 2010)

Závěr

Ze studia fluidních inkluzí v křišťálech z několika lokalit v síleziku (respektive východosudetském krystaliniku v polské regionálně-geologické terminologii) vyplývá, že na jejich vzniku se podílely tři základní typy fluid:

1. transformované sedimentární solanky (hydrotermální roztoky) (zastoupeny např. na lokalitě Jegłowa, Żulová, Stará Červená Voda, Česká Ves, Mirotíněk)
2. metamorfní hydrotermální fluida (např. na lokalitě Vernířovice, Krásné u Hraběšic, Česká Ves)
3. pozdně magmatická-pegmatitová/hydrotermální fluida (na lokalitě Velká Kraš)

První nejrozšířenější typ fluid má regionální charakter, je zastoupen na několika lokalitách a je povariského stáří. Výrazným doprovodným fenoménem aktivity těchto fluid je hydrotermální alterace hornin. Vlastnosti fluid uzavřených v inkluzích křišťálů umožňují interpretovat jejich původ jako transformované evaporované mořské solanky. Zřetelná příbuznost salinních fluid v křišťálech a povariských fluid známých z řady lokalit v moravskoslezském paleozoiku je evidentní. Transformace fluid souvisí s jejich interakcí s horninami fundamentu a jejich alterací. Protože zde existuje úzká vazba fluid na novotvořený kaolinit, umožňuje to spekulaci o vzniku kaolínu a o kaolinizaci jako o produktu hydrotermálního procesu. Je velmi pravděpodobné, že např. kaolínové ložisko Vidnava vzniklo v důsledku hydrotermální aktivity.

Povariská fluida jsou uzavírána v inkluzích i ve starších variských křišťálech. Mohou zde být v pozici primárních inkluzí a jsou součástí mladších zón a částí křišťálů narůstajících na starší krystaly.

Fluida ve studovaných křišťálech typických alpských paragenezí mají charakter metamorfních fluid v souladu se svým geologickým prostředím. Křišťály na žile ve Velké Kraši krystalovaly z fluid s charakterem pozdně pegmatitových až hydrotermálních roztoků.

Poděkování

Výzkum byl podporován projekty MSM0021622427, Kontakt 6-06-11.

Literatura

- Ackerman L., Zachariáš J., Pudilová M. (2007): P-T and fluid evolution of barren and lithium pegmatites from Vlastějovice, Bohemian Massif, Czech Republic. - *Int. J. Earth Sci. (Geol. Rundsch.)* **96**, 623-638.
- Albrechtová E., Klement K., Skácel J. (1970): Křišťály ze Žulové. - *Čas. Vlast. Spol. Muz. v Olomouci, Ř. přírod.* **60**, 1, 13-16. Olomouc.
- Bakker R. J. (2003): Package FLUIDS 1. Computer programs for analysis of fluid inclusion data and for modelling bulk fluid properties. - *Chem. Geol.* **194**, 3-23.
- Bodnar R. J. (1993): Revised equation and table for determining the freezing point depression of H₂O-NaCl solutions. - *Geochim. Cosmochim. Acta* **57**, 683-684.
- Borisenko A. S. (1977): Study of the salt composition of solutions in gas-liquid inclusions in minerals by the cryometric method. - *Soviet. geol. Geophys.* **18**, 11-19.
- Bowers T. S., Helgeson H. C. (1983): Calculation of the thermodynamic and geochemical consequences of nonideal mixing in the system H₂O-CO₂-NaCl on phase relations in geological systems: Equation of state for H₂O-CO₂-NaCl fluids at high pressures and temperatures. - *Geochim. Cosmochim. Acta* **47**, 1247-1275.
- Davis D. W., Lowenstein T. K., Spencer R. J. (1990): Melting behavior of fluid inclusions in laboratory-grown halite crystals in the system NaCl-H₂O, NaCl-KCl-H₂O, NaCl-MgCl₂-H₂O and NaCl-CaCl₂-H₂O. - *Geochim. Cosmochim. Acta* **54**, 591-601.
- Dekov V. M., Scholten J., Botz R., Garbe-Schönberg C.-D., Thiry M., Stoffers P., Schmidt M. (2005): Occurrence of kaolinite and mixed-layer kaolinite/smectite in hydrothermal sediments of Grimsey Graben, Tjörnes Fracture Zone (north of Iceland). - *Mar. Geol.* **215**, 3-4, 159-170.
- Dolníček Z., Zimák J., Slobodník M., Malý K. (2003): Mineralogy and formation conditions of the four types of hydrothermal mineralization from the quarry in Hrubá Voda (Moravo-Silesian Culm). - *Acta Univ. Palack. Olom., Geologica* **38**, 7-22. Olomouc.
- Frost R. L. (1995): Fourier transform Raman spectroscopy of kaolinite, dickite and halloysite. - *Clay. Clay Miner.* **43**, 2, 191-195.
- Gadas P. (2002): Křišťály z Velkých Kunětic. - *Minerál* **10**, 335-337.
- Grad M., Guterch A., Mazur S., Keller G. R., Špičák A., Hrubcová P., Geissler W. H. (2008): Lithospheric structure of the Bohemian Massif and adjacent Variscan belt in central Europe based on profile S01 from the SUDETES 2003 experiment. - *J. Geophys. Res.* **113**, B10304, doi:10.1029/2007JB005497.
- Grocholski W. (ed) (1969): Przewodnik geologiczny po Sudetach (1:500 000). - Wyd. geologiczne, Warszawa.
- Cháb J., Stráník Z., Eliáš M. (2007): Geologická mapa České republiky 1:500 000. - ČGS, Praha.
- Chi G. X., Ni P. (2007): Equations for calculations of NaCl/NaCl + CaCl₂ ratios and salinities from hydrohalite-melting and ice-melting temperatures in the H₂O-NaCl-CaCl₂ system. - *Acta Petrol. Sinica* **23**(1), 33-37.
- Janatieva O. K. (1946): Politermy rastvorimosti system CaCl₂-MgCl₂-H₂O and CaCl₂-NaCl-H₂O. - *Žurnal prikladnoj Chim.* **19**, 709-722.
- Kloppmann W., Girard J. P., Negrel, P. (2002): Exotic stable isotope compositions of saline waters and brines from the crystalline basement. - *Chem. Geol.* **184**, 1-2, 49-70.
- Kozłowski S. (1986): Surowce skalne Polski. - Wyd. geologiczne, Warszawa.
- Kozłowski A., Metz P. (2003): Post-magmatic mineralisation in the granitoids of the Strzelin Massif, SW Poland - a fluid inclusion study. - *Polskie Towarzystwo Mineralogiczne - Prace Specjalne, Mineralogical Society of Poland - Special Papers, Zeszyt 23*, Vol. **23**, 2003.
- Kruťa T. (1973): Slezské nerosty a jejich literatura. - MZM, Brno.
- Kučera J. (2002): Hydrotermální mineralizace na východním okraji kulmu Nízkého Jeseníku. - MS, diplomová práce, PřF MU, Brno.
- Kučera J., Mucchez Ph., Slobodník M., Prochaska W. (2010): Geochemistry of highly saline fluids in siliclastic sequences: genetic implications for post-Variscan fluid flow in the Moravosilesian Palaeozoic of the Czech Republic. - *Int. J. Earth Sci. (Geol. Rundsch.)* **99**, 2, 269-284.
- Losos Z. (1997): Křišťály z Žulovského masívu. - *Minerál* **5**, 1, 22-24. Brno.

- Mališ E., Pavlík J. (1974): Prospekce křemene pro čiré křemenné sklo na severní Moravě a v Orlických horách. - *Sborník GPO* **6**, 129-137. Ostrava.
- Merceron T., Vieillard Ph., Fouillac A.-M., Meunier A. (1992): Hydrothermal alterations in the Echassi res granitic cupola (Massif Central, France). - *Contrib. Mineral. Petrol.* **112**, 279-292.
- Mullis J., Dubessy J., Poty B. (1994): Fluid regimes during late stages of a continental collision- Physical, chemical, and stable isotope measurements of fluid inclusion in fissure quartz from a geotraverse through the Central Alps, Switzerland. - *Geochim. Cosmochim. Acta* **58**, 10, 2239-2267.
- Němec D. (1956): Statistisch-morphologische Untersuchung der Quarzkristalle von Vernířovice in Nordmähren. - *Spisy přír. fak. UJEP* **6**, 376. Brno.
- Němcová J., Němec F. (1970): Krystalované křemeny Rychlebských hor. - *Sborník prací PřF UP v Olomouci* **29**, *geografie-geologie X.*, 65-76. SPN Praha.
- Novotný P. (1996): Žulová - Korálové jámy. Část I. Dokumentační práce. - *Geol. výzk. Mor. Slez v R. 1995* **4**, 109-110. Brno.
- Novotný P. (1997): Žulová - Korálové jámy, ověřovací práce. - *Minerál* **5**, 1, 25-27.
- Novotný P., Dobeš P. (1999): Žulová - Korálové jámy. Část II. - výzkum fluidních inkluzí. - *Geol. výzk. Mor. Slez. v R. 1998*, 116-119. Brno.
- Novotný P., Zimák J. (2003): Puklinová mineralizace alpského typu na lokalitách „Mísečky“ a „Černý důl“ u Vernířovic. - *Acta Mus. Moraviae, Sci. geol.* **88**, 123-138.
- Oakes C. S., Bodnar R. J., Simonson J. M. (1990): The system NaCl-CaCl₂-H₂O. I: The ice liquidus at 1 atm total pressure. - *Geochim. Cosmochim. Acta* **54**, 603-610.
- Přichystal A. (2009): Kamenné suroviny v pravěku východní části střední Evropy. - 1-331, MU, Brno.
- Radlez R., Marek S., Pokorski J. (eds.) (2000): Mapa geologiczna Polski bez utworow Kenozoiku 1:1 000 000. - Panst. Instytut Geol., Warszawa.
- Rosival A., Gotzinger G., Finckh L., Juttner K. (1931): Geologische Karte des Reichensteiner Gebirges, des Nesselkuppenkammes und des Neissevorlandes (Blatt Jauernig-Ottmachau 1:75000). - Geologische Bundesanstalt. Wien.
- Sachanbinski M., Girulski R., Bobak D., Lydzba-Kopczynska B. (2008): Prehistoric rock crystal artefacts from Lower Silesia (Poland). - *J. Raman Spectrosc.* **39**, 1012-1017.
- Saparová J. (1938): Křemen od Vernířovic na severní Moravě. - *Čas. Mor. zem. Muz.* **30**. Brno.
- Schmidt Mumm A., Wolfram M. (2004): Fluid systems and mineralization in the north German and Polish basin. - *Geofluids* **4**, 315-328.
- Sirbescu M.-L. C., Nabelek P. I. (2003): Crystallization conditions and evolution of magmatic fluids in the Harney Peak Granite and associated pegmatites, Black Hills, South Dakota-Evidence from fluid inclusions. - *Geochim. Cosmochim. Acta* **67**, 13, 2443-2465.
- Sládek R. (1973): Nerosty alpských žil v Hrubém Jeseníku. - *Zprávy VÚO*, 161, 6 - 22. Olomouc.
- Slobodník M. (2002): Hydrotermální žilné mineralizace v Moravském krasu, Morava, ČR: pohled z hlediska charakteru fluid a P-T podmínek. - *Acta Mus. Moraviae, Sci. geol.* **87**, 113-136. Brno.
- Slobodník M., Jacher-Śtiwaczyńska K., Taylor M. C., Schneider J., Dolníček Z. (2008): Plumbotectonic aspects of polymetallic vein mineralization in Paleozoic sediments and Proterozoic basement of Moravia (Czech Republic). - *Int. J. Earth Sci. (Geol. Rundsch.)* **97**, 1, 1-18.
- Slobodník M., Muchez Ph., Dolníček Z., Žák L. (1999): Regional occurrence of saline, mineralising fluids at the eastern border of the Bohemian Massif. - In: Stanley C. J. (ed.): Mineral Deposits: Processes to Processing, 901-904. A. A. Balkema, Rotterdam.
- Slobodník M., Přichystal A., Morávek R. (2010): Geneze křemenných žil u Velké Kraše v sileziku. - *Geol. výzk. Mor. Slez.* **17**, 172-174. Brno.
- 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-SO₄-H₂O systems at the temperatures below 25°C. - *Geochim. Cosmochim. Acta* **54**, 575-590.
- Staněk J. (1997): Dvě významné lokality křišťálu na severní Moravě. - *Minerál* **5**, 1, 20-21.
- Staněk J., Kaláček J. (1953): O výskytech molybdenitu v žulovském plutonu. - *Věst. Ústř. Úst. geol.* **28**, 271-277.
- Szczepanski J. (2007): A vestige of an Early Devonian active continental margin in the East Sudetes (SW Poland) - evidence from geochemistry of the Jegłowa Beds, Strzelin Massif. - *Geol. Q.* **51**, 3, 271-284.
- Vanko D. A., Bodnar R. J., Sterner S. M. (1988): Synthetic fluid inclusions: VIII. Vapor-saturated halite solubility in part of the system NaCl-CaCl₂-H₂O, with application to fluid inclusions from oceanic hydrothermal systems. - *Geochim. Cosmochim. Acta* **52**, 2451-2456.
- Williams-Jones A. E., Samson I. M. (1990): Theoretical estimation of halite solubility in the system NaCl-CaCl₂-H₂O: Applications to fluid inclusions. - *Can. Mineral.* **28**, 299-304.
- Zheng Y.-F. (1993): Calculation of oxygen isotope fractionation in anhydrous silicate minerals. - *Geochim. Cosmochim. Acta* **57**, 1079-1091.
- Zimák J., Novotný P., Fojt B., Večeřa J., Losos Z., Vávra V., Večeřová V., Skácel J., Kopa D. (2003): Exkurzní průvodce po mineralogických lokalitách v okolí Javorníku, Jeseníku a Zlatých Hor. - Vyd. UP Olomouc.