

## VÝVOJ POVARISKÝCH FLUID V LOMECH U NEJDKU, JAKUBČOVIC A BOHUČOVIC V NÍZKÉM JESENÍKU

Evolution of the post-Variscan fluids in Nejdek, Jakubčovice and Bohučovice quarries, Nízký Jeseník Upland

Jan Kučera<sup>1</sup>, Walter Prochaska<sup>2</sup>, Philippe Muchez<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Ústav geologických věd PřF MU, Kotlářská 2, 611 37 Brno;

e-mail: kuca@sci.muni.cz

<sup>2</sup> Institut für Geowissenschaften, Montanuniversität, 8700 Leoben, Rakousko

<sup>3</sup> Afdeling Fysico-chemische geologie, K. U. Leuven, Celestijnenlaan 200C, B-3001, België

(15-34 Vítkov, 25-12 Hranice)

**Key words:** Nízký Jeseník Upland, fluid chemistry, fluid inclusions, stable isotopes

### Abstract

Two different types of fluid were described in studied post-Variscan vein mineralization from Nejdek, Jakubčovice and Bohučovice quarries. First high salinity (between 18 and 28 wt. % NaCl eq.) and low temperature (ranging from 50 to 140 °C) fluids of H<sub>2</sub>O-NaCl-CaCl<sub>2</sub> (±MgCl<sub>2</sub>) type, present in dolomite, sphalerite and calcite I, II, was originated from the highly evaporated seawater. Second low salinity (between 0 and 9 wt. % NaCl eq.) and low temperature (ranging from 40 to 80 °C) fluids of H<sub>2</sub>O-NaCl (±KCl) type, present in calcite III, was originated from the less evaporated seawater. Fluids represent moderate mixing with the sea or meteoric water and they also indicate slight to progressive interaction with the rocks (mainly illitization, dissolution of K-feldspar and albitization).

### Úvod

V horninách spodního karbonu Nízkého Jeseníku jsou poměrně hojné výskyty povariské žilné polymetalické mineralizace. Charakteristické jsou přítomností převládajícího dolomit-ankeritu a kalcitu nad křemenem, se vtroušeným sfaleritem, galenitem, chalkopyritem, pyritem a barytem. Hostitelskými horninami jsou zejména droby, méně pak prachovce, jílové a prachové břidlice či slepence. V minulých letech byl charakter fluid z této oblasti studován zejména z lokalit Hrabůvka (Slobodník – Dolníček 2001, Zimák et al. 2002) a Domašov nad Bystřicí (Slobodník et al. 1995, Zimák et al. 2002). Charakter fluid z několika dalších lokalit uvádí Zimák et al. (2002), Dolníček et al. (2003) a Kučera (2004).

Článek shrnuje výsledky studia stabilních izotopů a výluhů fluidních inkluzí v karbonátech a mikrotermometrie fluidních inkluzí v dolomitech, sfaleritech, kalcitech a barytech z lokalit Nejdek, Jakubčovice a Bohučovice.

### Metodika

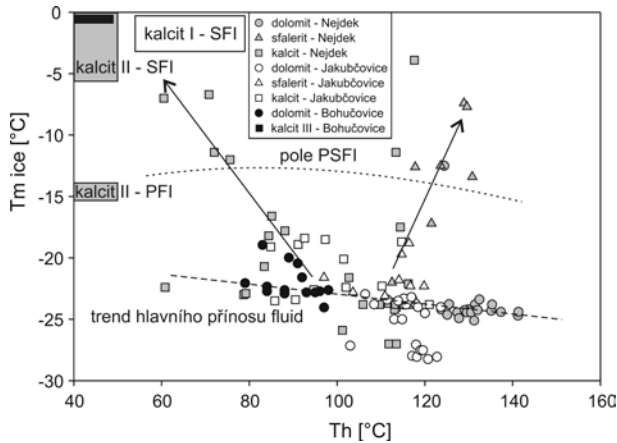
Mikrotermometrická měření byla prováděna na přístroji LINKAM THMSG 600 na Katholieke Universiteit Leuven. Aparatura byla kalibrována pro teploty mezi –56,6 až 374,1 °C pomocí syntetických fluidních inkluzí. Výluhy fluidních inkluzí byly analyzovány pomocí ionového chromatografu Dionex (DX-120, DX-500) na Montanuniversität Leoben. Izotopové složení uhlíku a kyslíku bylo stanoveno na hmotnostním spektrometru Finnigan MAT 251 v ČGS v Praze (analytik I. Jačková, K. Malý).

### Mikrotermometrie fluidních inkluzí (FI)

Mikrotermometricky byly studovány primární (P), primárně-sekundární (PS) a sekundární (S) dvoufázové fluidní inkluze (typu L+V, obsah plynné fáze okolo 5 obj. %) v dolomitu, sfaleritu, kalcitu a primární jednofázové inkluze (typu L) v kalcitu a barytu (celkem 11 vzorků). FI mají velikost 1–22 μm (dolomit, sfalerit) a 1–50 μm (kalcit, baryt). P a PS inkluze v dolomitu, sfaleritu a kalcitu I, II jsou charakterizovány eutektickými teplotami (Te) v rozpětí –40,6 až –58,3 °C s maximem okolo –50 °C, což indikuje přítomnost systému H<sub>2</sub>O-NaCl-CaCl<sub>2</sub> (±MgCl<sub>2</sub>) (Davis et al. 1990). S inkluze v kalcitu I a P inkluze v kalcitu III mají Te mezi –11,1 až –26,9 °C což indikuje přítomnost systému H<sub>2</sub>O-NaCl (±KCl) (Borisenko 1977). Teploty homogenizace (Th) jsou nejvyšší u dolomitů a klesají od Nejdku (114–141 °C) přes Jakubčovice (104–124 °C) až po Bohučovice (73–98 °C; obr. 1). Nižší Th byly zaznamenány ve sfaleritech z Nejdku a Jakubčovic v rozpětí 97 až 131 °C. Nejnižší Th v rámci fluid typu H<sub>2</sub>O-NaCl-CaCl<sub>2</sub> byly zaznamenány v P a PS inkluzích v kalcitu I, II z Nejdku (<50–118 °C) a Jakubčovic (80–121 °C). Fluida typu H<sub>2</sub>O-NaCl přítomná v S inkluzích v kalcitu I, II a v P inkluzích v kalcitu III ze všech tří lokalit se vyznačují velice nízkými Th mezi 37 až 79 °C, obvykle však pod 50 °C indikované jednofázovými FI. Jednofázové FI v barytech z Jakubčovic a Bohučovic indikují teploty vzniku pod 50 °C.

Nejvyšší salinity fluid mezi 21,8 až 28,4 hm. % NaCl ekv. (Bodnar 1993) byly zjištěny v dolomitech, na základě teploty tání ledu jako poslední pevné fáze (v rozsahu –19,2 až –29,6 °C; obr. 1). Nižší salinity fluid,

pohybující se mezi 11,0 až 24,6 hm. % NaCl ekv., byly zjištěny ve sfaleritech z Jakubčovic a Nejdku. Vysoké salinity jsou charakteristické i pro P a PS inkluze v kalcitech I, II v rozmezí 17,7 až 27,2 hm. % NaCl ekv. Pro S inkluze v kalcitu I, II a P inkluze v kalcitu III jsou charakteristické nízké salinity fluid v rozmezí 0,4 až 8,7 hm. % NaCl ekv. V barytech se salinitu nepodařilo zjistit.



Obr. 1 – Diagram hodnot Th a Tm z mikrotermometrických měření fluidních inkluzí v dolomitech, kalcitech a sfaleritech z Nejdku, Jakubčovic a Bohučovic. PFI – primární inkluze, PSFI – primárně-sekundární inkluze, SFI – sekundární inkluze.

Fig. 1 – Th-Tm plot of microthermometric measurements of fluid inclusions (dolomites, calcites and sphalerites from Nejdek, Jakubčovice and Bohučovice). PFI – primary inclusions, PSFI – primary-secondary inclusions, SFI – secondary inclusions.

### Analýzy výluhů fluidních inkluzí

Šest vzorků karbonátů bylo studováno pomocí analýzy výluhů fluidních inkluzí pro obsah Na, Cl, K, Li, Br a F ve fluidních inkluzích. Poměry těchto prvků nám mohou pomoci k přesnější interpretaci zdroje fluid a interakce fluid s okolními horninami. Koncentrace prvků byly přepočteny s pomocí průměrné salinity fluid. Nejnižší molární poměry Cl/Br mezi 242 až 269 (obr. 2) vykazují dolomity. Ty také leží přímo na linii evaporace mořské vody (McCaffrey et al. 1987). Vyšší mol. poměry Cl/Br mezi 378 až 447 mají kalcity I a nejvyšší mol. poměr (517) kalcit III. Tyto hodnoty, ležící vlevo od linie evaporace mořské vody (obr. 2), dokládají snížené obsahy Na ve fluidech. Hodnoty log Cl mezi 5,23 až 5,26 v dolomitech i kalcitech I odpovídají mixování výše salinních fluid s max. 5 % níže salinních fluid. Mol. poměry K/Cl mezi 0,0286 až 0,0360 indikují lehce snížené obsahy K ve fluidech z dolomitů (obr. 3) oproti linii evaporace mořské vody. Oproti tomu mol. poměry K/Cl v kalcitech I (0,0366 až 0,0528) a kalcitu III (0,1305) ukazují na zvýšené obsahy K ve fluidech. Mol. poměry Li/Cl u dolomitů (0,0010 až 0,0011), kalcitů I (0,0012 až 0,0017) a kalcitu III (0,0034) indikují výrazně zvýšené obsahy Li ve fluidech na rozdíl od linie evaporace mořské vody.

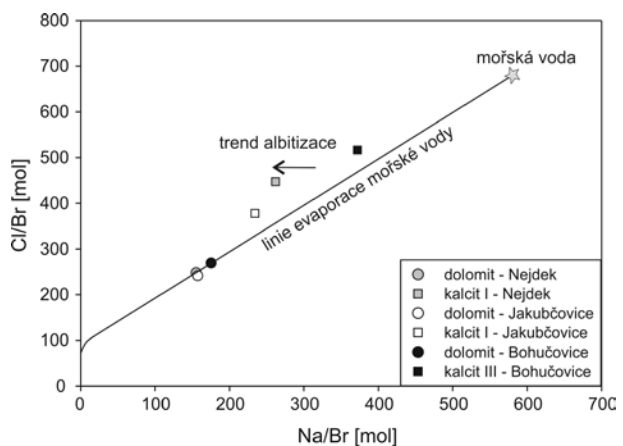
### Studium stabilních izotopů

Izotopové složení kyslíku a uhlíku bylo stanoveno v 18ti vzorcích dolomitů a kalcitů. Izotopové analýzy dolomitů

vykazují rozsah hodnot  $\delta^{18}\text{O}$  mezi 16,5 až 22,8 ‰ SMOW a  $\delta^{13}\text{C}$  mezi -5,6 až -3,0 ‰ PDB (obr. 4). U kalcitů se hodnoty  $\delta^{18}\text{O}$  pohybují mezi 14,9 až 22,1 ‰ SMOW (kalcit I, II) a 22,7 až 23,4 ‰ SMOW (kalcit III). Hodnoty  $\delta^{13}\text{C}$  se u kalcitů pohybují mezi -9,6 až -4,3 ‰ PDB (kalcit I, II) a -14,8 až -11,8 ‰ PDB (kalcit III).

Izotopová složení  $\delta^{18}\text{O}$  a  $\delta^{13}\text{C}$  matečných fluid byla vypočtena, s použitím Th primárních fluidních inkluzí, podle rovnic Zhenga (1999) a Ohmota – Rye (1979) pro dolomit a O'Neila et al. (1969) a Deinese et al. (1974) pro kalcit. Izotopová složení fluid z nichž krystalovaly dolomity vycházejí pro  $\delta^{18}\text{O}$  mezi +0,7 až +3,6 ‰ SMOW a pro  $\delta^{13}\text{C}$  mezi -11,1 až -7,4 ‰ PDB. Izotopová složení fluid z nichž krystalovaly kalcity I, II mají na rozdíl od dolomitů relativně širší rozsah hodnot  $\delta^{18}\text{O}$  (-2,5 až +4,6 ‰ SMOW) a  $\delta^{13}\text{C}$  (-11,2 až -5,8 ‰ PDB).

Kalcity III krystalovaly z izotopově „nejlehčích“ fluid s hodnotami  $\delta^{18}\text{O}$  mezi -2,7 až -0,6 ‰ SMOW a  $\delta^{13}\text{C}$  mezi -16,6 až -13,6 ‰ PDB.



Obr. 2 – Diagram Na/Br vs. Cl/Br fluid v dolomitech a kalcitech analyzovaných pomocí výluhů fluidních inkluzí. Linie evaporace mořské vody podle McCaffrey et al. (1987).

Fig. 2 – Na/Br vs. Cl/Br diagram of the composition of the fluids in dolomites and calcites determined from crush-leach analyses. Full line = seawater evaporation trend from McCaffrey et al. (1987).

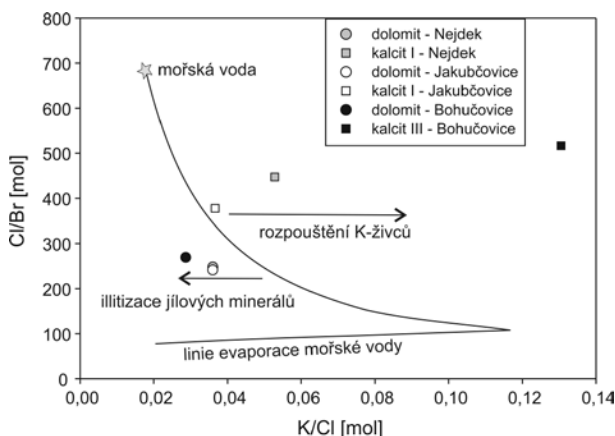
### Diskuse

Na studovaných lokalitách byly popsány dva odlišné typy fluid, z nichž krystalovaly hydrotermální minerály. Starší fluida typu  $\text{H}_2\text{O}-\text{NaCl}-\text{CaCl}_2$  ( $\pm\text{MgCl}_2$ ) byly zjištěny v P a PS inkluzích v dolomitu, sfaleritu a kalcitu I, II. Mladší fluida typu  $\text{H}_2\text{O}-\text{NaCl}$  ( $\pm\text{KCl}$ ) se objevují v S inkluzích v kalcitu I, II a v P inkluzích v kalcitu III.

Nejvyšší naměřené Th a salinity fluid byly zjištěny v **dolomitech**. Analýzy výluhů FI v nich provedené (obr. 2) ukazují na zdroj fluid ve vysoce evaporovaných mořských vodách, respektive pánevních solankách. Nižší obsahy K ve výlužích FI z dolomitů lze interpretovat jako illitizaci smektitu nebo kaolinitu během interakce fluid s okolními horninami. Izotopová složení uhlíku fluid ukazují na původ uhlíku z homogenizované zemské kůry a částečně i oxidované organické hmoty. Hodnoty log Cl ve výlužích FI ukazují na zanedbatelnou přítomnost níže

(pravděpodobně mořských vod). Krystalizace dolomitu mohla být způsobena patrně interakcí fluid s organickou hmotou (Spirakis – Heyl 1988). Rozdílné Th v dolomitech z jednotlivých lokalit (obr. 1) jsou patrně způsobeny výstupem fluid v odlišné vzdálenosti od jejich zdroje, blízko různě významných tektonických struktur a na různě mocných žilách. S ohledem na poměrně uniformní charakter fluid byla pomocí lineární regrese vypočtena rovnice závislosti teploty (Th) na izotopovém složení kyslíku dolomitu. Získaná rovnice:  $Th_{dolomitu} = -7,06 * \delta^{18}O_{dolomitu(SMOW)} + 247,62$  byla aplikována na dolomity z dalších 5 lokalit, které potvrdily přesnost této rovnice ( $\pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ ) vzhledem k naměřeným Th v dolomitech.

**Sfalerity** vykazují zhruba o 4–10 °C nižší Th a relativně nižší salinity než dolomity. PS inkluze v nich přítomné naznačují na rozdíl od P inkluzí nižší salinity, ale naopak vyšší Th. Tento efekt mohly pravděpodobně způsobit hluboce cirkulující meteorické vody namixované s vysoko salinními fluidy.



Obr. 3 – Diagram K/Cl vs. Cl/Br fluid v dolomitech a kalcitech analyzovaných pomocí výluhů fluidních inkluzí. Linie evaporace mořské vody podle McCaffrey et al. (1987).

Fig. 3 – K/Cl vs. Cl/Br diagram of the composition of the fluids in dolomites and calcites determined from crush-leach analyses. Full line = seawater evaporation trend from McCaffrey et al. (1987).

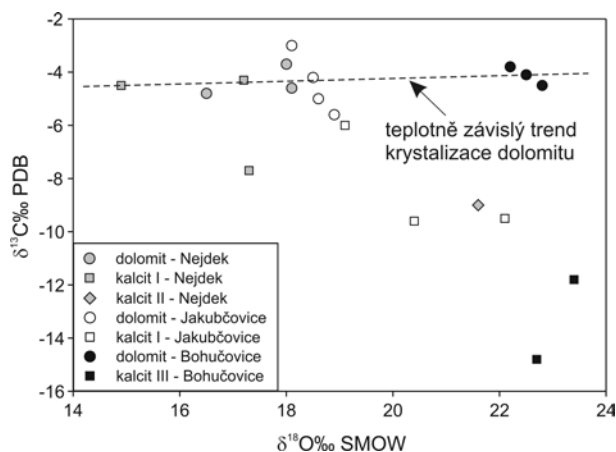
**Kalcity I** vykazují nižší Th a salinity s větším rozptylem, které jsou patrně způsobeny mixováním s níže salinními fluidy. Analýzy výluhů FI ukazují na zdroj fluid v níže evaporovaných mořských vodách než dolomity (obr. 1), či v evaporovaných mořských vodách namixovaných s menším množstvím fluid vzniklých rozpuštěním halitu. Vyšší obsahy K a nižší obsahy Na ve výlužích FI, oproti trajektorii evaporace mořské vody, lze interpretovat jako rozpuštění K-živce a albitizaci během interakce fluid s okolními horninami. Izotopová složení uhlíku fluid ukazují, stejně jako u dolomitu, na původ uhlíku v homogenizované zemské kůře a částečně i oxidované organické hmotě. Hodnoty log Cl ve výlužích FI ukazují na zanedbatelnou přítomnost meteorických vod, což dokládají i izotopová složení  $\delta^{18}O$  fluid.

**Kalcit II** vykazuje nižší salinity a Th než kalcit I a ze studovaných minerálů je nejmladším v prvním stádiu mine-

ralizace (starší fluida typu  $H_2O-NaCl-CaCl_2$ ). Hodnoty  $\delta^{13}C$  a  $\delta^{18}O$  jeho fluid naznačují obdobný charakter jako kalcit I.

**Kalcit III** a fluida uzavřená v SFI v kalcitu I a II jsou charakteristická nejnižšími naměřenými Th a salinitami. Analýzy výluhů FI ukazují na zdroj fluid v nejnižší evaporovaných mořských vodách (obr. 1), či v evaporovaných mořských vodách namixovaných s menším množstvím fluid obohacených o rozpuštěný halit. Nejvyšší obsahy K a nejnižší obsahy Na ve výlužích FI, oproti trajektorii evaporace mořské vody, lze interpretovat jako intenzivní rozpuštění K-živce a albitizaci během interakce fluid s okolními horninami. Hodnoty  $\delta^{13}C$  fluid ukazují na původ uhlíku v oxidované organické hmotě a  $\delta^{18}O$  fluid dokládá menší množství přítomných meteorických vod během krystalizace kalcitu III.

U **barytu** se nepodařilo zjistit jaký typ fluid uzavírá, ale vzhledem k jeho nízkým teplotám krystalizace ( $< 50 \text{ }^\circ\text{C}$ ) lze předpokládat, že krystaloval buďto na konci staršího stádia, nebo během mladšího stádia mineralizace. Studium sukcese na žilách bohužel nedovoluje přesnější zařazení.



Obr. 4 – Izotopové složení kyslíku a uhlíku dolomitů a kalcitů z Nejdku, Jakubčovic a Bohučovic. Nepublikovaná data, 1 analýza převzata ze Zimák et al. (2002).

Fig. 4 – Oxygen and carbon isotopic composition of dolomites and calcites from Nejdek, Jakubčovice and Bohučovice. Unpublished data, 1 analysis from Zimák et al. (2002).

**Závěry**

Obdobné minerální asociace i charakter fluid ze všech tří studovaných lokalit ukazují na obdobné mineralizační procesy, ke kterým docházelo během rozsáhlé migrace povariských fluid na východním okraji Českého masivu. Zdokumentovány byly dva odlišné typy fluid přítomné ve studovaných minerálech.

Starší fluida typu  $H_2O-NaCl-CaCl_2 (\pm MgCl_2)$ , z nichž krystaloval dolomit, sfalerit a kalcit I a II pocházejí z různě evaporovaných mořských vod. U kalcitů je možné brát v úvahu i mixování evaporovaných mořských vod s menším množstvím fluid obsahujících rozpuštěný halit. Tyto minerály vznikaly za teplot mezi 50 až 140 °C z vysoko salinních fluid (17,7 až 28,4 hm. % NaCl ekv.), které vykazují zanedbatelné mixování s nízkosalinními vodami (mořskou či meteorickou) a různý stupeň interakce mezi fluidy a horninou. U dolomitů je to zejména

illitizace jílových minerálů a u kalcitů rozpouštění K-živců a albitizace.

Mladší fluida typu  $H_2O-NaCl$  ( $\pm KCl$ ), zjištěná v SFI v kalcitu I, II a PFI v kalcitu III, pocházejí z nejnižší evaporovaných mořských vod. Jsou charakteristické

nízkými teplotami krystalizace (40 až 80 °C), nízkými salinitami (0 až 9 hm. % NaCl ekv.), vykazují malé mixování s meteorickými vodami a významnější interakci s horninami, zastoupenou zejména rozpouštěním K-živců a albitizací.

#### Poděkování

Tato práce vznikla díky podpoře grantů FRVŠ 584/2003 a GAČR 205/00/0356.

#### Literatura

- Bodnar, R. J. (1993): Revised equation and table for determining the freezing point depression of  $H_2O-NaCl$  solutions. – *Geochim. Cosmochim. Acta*, 57, 683-684.
- Borisenko, A. C. (1977): Determination of salt composition of the solutions of fluid inclusions in minerals using cryometry. – *Geology and Geophysics*, 8, 16-27.
- 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.
- Deines, P. – Langmuir, D. – Harmon, R.S. (1974): Stable carbon isotope ratios and the existence of a gas phase in the evolution of carbonate ground waters. – *Geochim. Cosmochim. Acta*, 38, 1147-1164.
- 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., Fac. Rer. Nat., Geol.* 38, 7-22. Olomouc
- Kučera, J. (2004): Hydrotermální mineralizace v břidlicových souvrstvích spodního karbonu Nízkého Jeseníku. – *Geol. výzk. Mor. Slez. v r. 2003*, 11, 51-54. Brno.
- McCaffrey, M. A. – Lazar, B. – Holland, H. D. (1987): The evaporation path of seawater and the coprecipitation of Br and K with halite. – *J. Sedim. Petrol.*, 57, 928-937.
- Ohmoto, H. – Rye, R. O. (1979): Isotope of sulfur and carbon. – In: Barnes, H. L. (ed.): *Geochemistry of hydrothermal deposits*, John Wiley & Sons, 509-567.
- O'Neil, J. R. – Clayton, R. N. – Mayeda, T. K. (1969): Oxygen isotope fractionation in divalent metal carbonates. – *J. Chem. Phys.*, 51, 5547-5558.
- Slobodník, M. – Dolníček, Z. (2001): Základní charakteristika fluid z hydrotermální mineralizace u Hrabůvky, Nízký Jeseník. – *Geol. výzk. Mor. Slez. v r. 2000*, 52-54. Brno.
- Slobodník, M. – Muchez, P. – Viaene, W. (1995): Mikrotermometrické studium žilné mineralizace v kulmu u Domašova nad Bystřicí. – *Geol. výzk. Mor. Slez. v r. 1994*, 72-73. Brno.
- Spirakis, C. S. – Heyl, A. V. (1988): Possible effects of thermal degradation of organic matter on carbonate paragenesis and fluorite precipitation in Mississippi Valley-type deposits. – *Geology*, 16, 1117-1120.
- Zheng, Y. F. (1999): Oxygen isotope fractionation in carbonate and sulfate minerals. – *Geochem. J.*, 33, 109-126.
- Zimák, J. – Losos, Z. – Novotný, P. – Dobeš, P. – Hladíková, J. (2002): Study of vein carbonates and notes to the genesis of the hydrothermal mineralization in the Moravo-Silesian Culm. – *Journal of the Czech Geological Society*, 47, 3-4, 111-122.