

Hydrotermální karbonáty a termometrie žilné mineralizace v terciérních vulkanitech u Uherského Brodu

Hydrothermal carbonates and thermometry of vein mineralization in Tertiary volcanites near Uherský Brod

Katarína Rusnáková¹, Marek Slobodník¹ ✉, Rastislav Milovský²

¹ Ústav geologických věd PŘF MU, Kotlářská 2, 611 37 Brno, Česká republika

² Ústav vied o Zemi SAV, Ďumbierska 1, 974 01 Banská Bystrica, Slovenská republika

Key words:

Outer Western Carpathians, Tertiary volcanites, hydrothermal veins, carbonates, thermometry

✉ marek@sci.muni.cz

Editor:

Zdeněk Losos

Abstract

Hydrothermal mineralization in the Bučník quarry near Uherský Brod is the best locality for the study of this type of mineralization in the Outer Western Carpathians. The studied sulfide vein mineralization is genetically linked to Tertiary volcanics and represents a distance manifestation of the polymetallic vein type widespread in the metallogenetic region of the Central Slovakian Volcanic Field.

Study of vein structure, ore textures and structures, chemical composition of carbonates, isotope thermometry (isotopic composition of sulfur in sphalerite/galena pairs) and fluid inclusions, including microthermometry, shows that mineralization occurred under complex and variable conditions. Carbonates, defined as calcites with a proportion of Fe and Mn, dolomites and Fe- and Mn-dolomites, Mg-ankerites, show a highly variable chemical composition clearly documented as fine zones in CL-microscopy and BSE images.

Fluid inclusions contain the aqueous system $H_2O-NaCl$ and $H_2O-NaCl + MgCl_2 + FeCl_{2,3}$. Fluid salinity ranges from 2.7 to 14.7 mass% NaCl eq. whereas it is higher for sphalerite than for carbonates. The same trend is for homogenization temperatures in the range of 121–272 °C.

A sulfur isotopic geothermometry in combination with fluid inclusion microthermometry shows a relatively wide probable range of temperature conditions. The younger carbonate mineralization may begin at temperatures of 125 °C and around 210 °C may overlap with a temperature of sulfide association that ranges from 210 °C to 290, resp. 335 °C. Isotopic thermometry also suggests higher temperatures up to 450 °C and above, but these highest temperatures are rather unlikely and most likely correspond to isotopic disequilibrium. The wide temperature range in which the mineralization originated is in accordance with the development of the hydrothermal system in a very dynamic environment in terms of tectonic, magmatic and hydrothermal. The studied hydrothermal system has a number of physico-chemical parameters similar to polymetallic vein systems in the Central Slovakian volcanics region and Baia Mare district, Rumania, as well.

Doporučená citace článku:

Rusnáková, K., Marek Slobodník, M., Milovský, R. (2020). Hydrotermální karbonáty a termometrie žilné mineralizace v terciérních vulkanitech u Uherského Brodu. – *Geologické výzkumy na Moravě a ve Slezsku*, 27, 1–2, 79–87.

DOI: <https://doi.org/10.5817/GVMS2020-13701>

Úvod

Hydrotermální žíly s prostorovou a genetickou vazbou na terciérní vulkanity na Bučníku u Komně (u Uherského Brodu) představují unikátní hydrotermální systém ve vnějších Západních Karpatech. Jejich výskyt je analogií k mineralizacím metalogenetického rájónu středoslovenských vulkanitů (Koděra in Bernard et al. 1981). Obecně je tento typ mineralizací s vazbou na vulkanity charakteristický pro prostředí pásemných pohoří nad subdukovanou zemskou kůrou (např. Pirajno 1992).

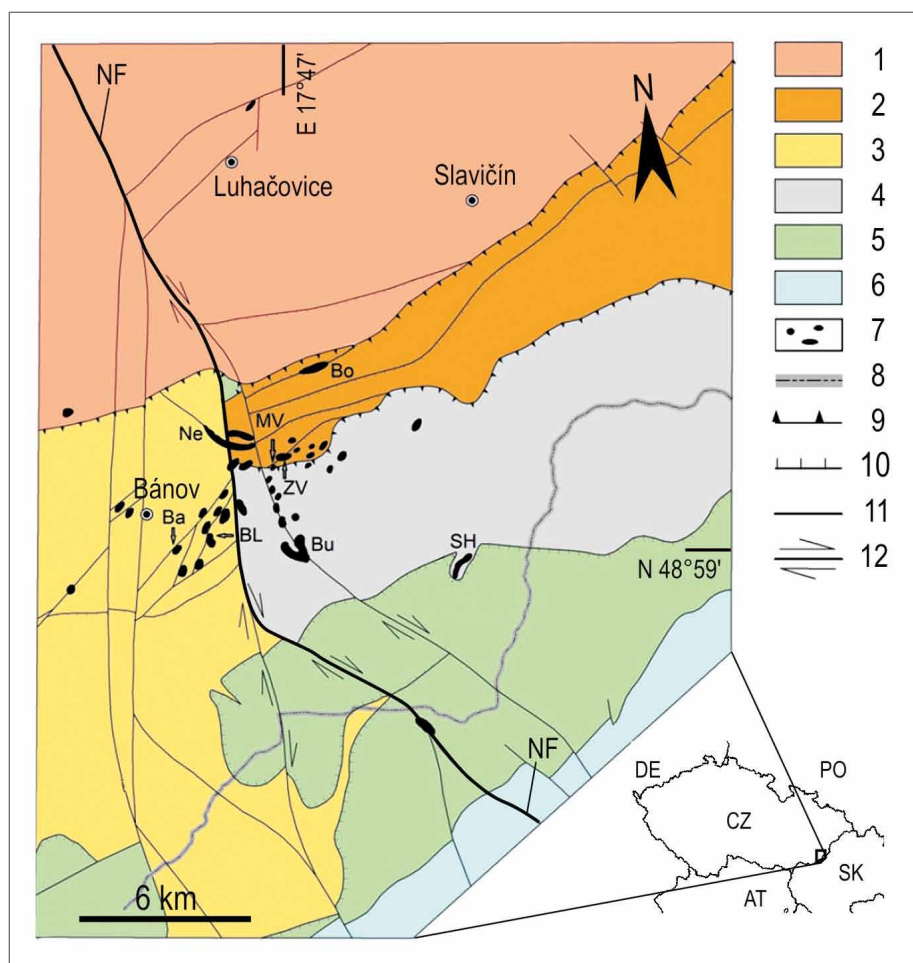
Hydrotermálními žilami v okolí Bučníku se zabývalo několik autorů zejména z hlediska mineralogického složení, chemické charakteristiky minerálních fází a jejich klasifikace a celkové minerální asociace žil. Již Černý (1958) popsal zrudnění na Bučníku jako „propylitické polymetalické zrudnění“ s převahou sulfidů Fe, Zn, As a posloupností krystalizace: křemen, chlorit, pyrit, arsenopyrit, sfalerit, pyrhotin, galenit, chalkopyrit, markazit, kalcit, ankerit, antimonit a siderit. Přichystal (1974) a Fojt, Přichystal (1979) upřesnili vývoj mineralizace a zařadili karbonáty do třech skupin: železnaté dolomity ležící mezi dolomitem a ankeritem, kalcit a nejméně zastoupený siderit. Minerální asociace vznikala podle těchto autorů za vysokých teplot v katatermálních podmínkách. Další studie se soustředily na revize a mineralogický výzkum žil (např. Kruťa 1966; Mátl 1982).

Studiem karbonátů se také zabýval Krobot (2011). Ulmanová (2015) klasifikuje hydrotermální žilné karbonáty, v asociaci se sfaleritem, křemenem a chloritem jako dolomit, Mn- a Fe-dolomit až Mg-ankerit, kalcit a Ca a Mg-siderit. Mineralizace označuje jako nízko-teplotní až středně-teplotní. Studované fluidní inkluze v kalcitech, na žilách s karbonáty a sfaleritem, homogenizovaly v intervalu 120–368 °C (primární inkluze) a 143–239 °C (sekundární inkluze). Uzavřené vodné systémy definuje jako H₂O-NaCl a H₂O-NaCl-KCl se salinitou 0,2–6,7 hm. % ekv. NaCl.

Geologická stavba blízkého okolí

Vulkanity prorážejí horniny bělokarpaté jednotky magurské skupiny příkrovů s typickou flyšovou sedimentací a s rytmickým střídáním psamitů a pelitů (Čtyroký, Stráník 1995) – viz obr. 1. Mezi vulkanity jsou zastoupeny olivinické bazalty, trachybazalty a trachyandezity, z nichž posledně jmenované jsou často intenzivně propylitizovány (Přichystal 1993). Xenolity ve vulkanitech byly definovány jako pyroxenicko-amfibolická gabra až diority, resp. monzogabra až

monzodiority (Hašková, Kropáč 2019), k zajímavostem patří nálezy rudních xenolitů (Přichystal 1974). Intruze protínají násunovou plochu bělokarpaté jednotky a současně nezdenický zlom a k výlevům docházelo podél zlomů se směrem S–J a V–Z (Přichystal 1974). Vulkanity tvoří ložní a pravé žíly s mocnostmi až 50 m, na Bučníku je rozvětvený cedrový lakolit a stáří vulkanických hornin bylo radiometricky datováno na střední až svrchní baden až sarmat. Stáří pyroxen-amfibolického trachyandezitu bylo volumetricky stanoveno na 13,5±0,4 Ma a izotopovým ředěním na 14,8±0,4 Ma (Přichystal et al. 1998) a zatím nejmladší datování pochází od Horního Srní se sarmatským stářím 11,8±0,4 Ma (Kantor et al. 1984). Kontaktní metamorfóza způsobuje vznik porcelanitů a kontaktních rohvců.



Obr. 1: Geologická mapa oblasti s příkrov, zlomy a tělesa vulkanitů (upraveno podle Hroudy et al. 2015). Vysvětlivky: 1 – račanská jednotka, 2 – bystrická jednotka, 3 – hlucký vývoj bělokarpaté jednotky, 4 – vlárský vývoj bělokarpaté jednotky, 5 – vlárský vývoj, příkrov Javorina, 6 – pieninské bradlové pásmo, 7 – tělesa vulkanitů, 8 – státní hranice, 9 – hlavní příkrov, 10 – vedlejší příkrov, 11 – zlomy (NF – nezdenický zlom), 12 – horizontální posun, Ba – Bánov, SH – Starý Hrozenkov, Ne – Nezdenice, BL – Bystřice pod Lopeníkem, ZV – Záhorovice, Bo – Bojkovice, Bu – Bučník, MV – Záhorovice, Modrá Voda.

Fig. 1: Geological sketch map of the area with thrusts, faults and bodies of volcanic rocks (modified according to Hrouda et al. 2015). Legend: 1 – Rača Unit, 2 – Bystrica Unit, 3 – Hluk Development, 4 – Vlára Development, 5 – Vlára Development, Javorina nappe, 6 – Pienniny Klippen Belt, 7 – volcanic bodies, 8 – state border, 9 – main thrusts, 10 – partial thrusts, 11 – faults (NF – Nezdenice fault), 12 – strike-slip faults, Ba – Bánov, SH – Starý Hrozenkov, Ne – Nezdenice, BL – Bystřice pod Lopeníkem, ZV – Záhorovice, Bo – Bojkovice, Bu – Bučník, MV – Záhorovice, Modrá Voda.

V tektonické stavbě jsou kromě násunových zlomů dominantně zastoupeny zlomy se směrem SZ–JV (Krejčí, Poul 2010). Hlavní puklinové systémy jsou však dva, SZ–JV a SV–JZ, a na tyto jsou vázány hydrotermální žíly s mocnostmi 0, X–X cm (Přichystal 1974). Deformace sedimentárních i vulkanických hornin byla poměrně rozsáhlá projevující se vznikem vrásových a puklinových struktur včetně ohlazů diskontinuit doprovázených lineacemi. Deformační etapy jsou spojeny s příkrovy, mezivrstevními přesmyky a horizontálními posuny (Krejčí, Poul 2010; Poul et al. 2010). K nejvýznamnějším strukturám patří systém nezdenického zlomu, který je považován za distribuční strukturu nejen vulkanitů, ale i hydrotermálních fluid.

Metodika

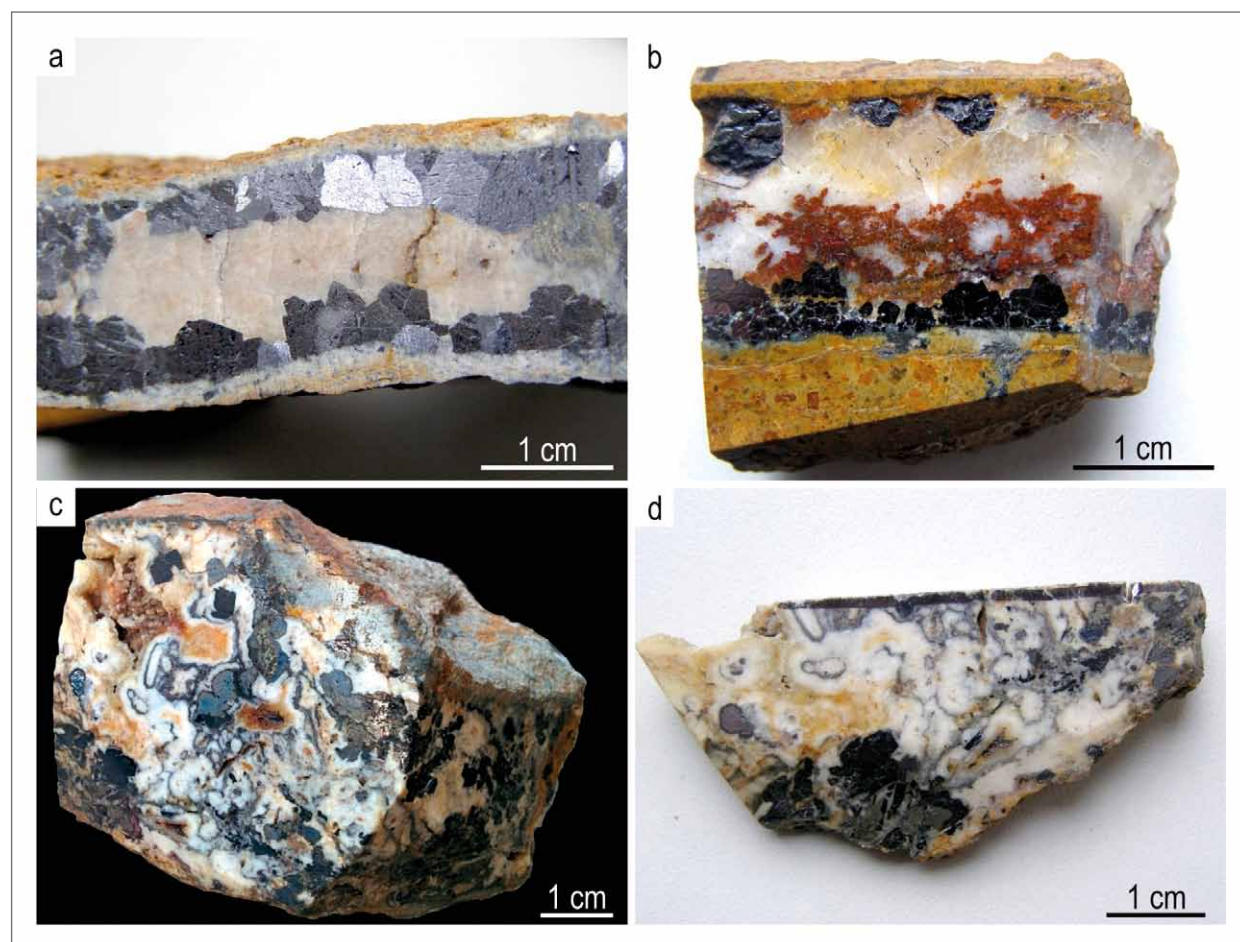
Většina studovaných vzorků byla získána ze starších sběrů a ze zapůjčených studijních vzorků z Moravského zemského muzea v Brně. Na studium fluidních inkluzí a na mikrotermometrii byly ze vzorků zhotoveny oboustranně leštěné destičky s tloušťkou cca 100 μm . Fluidní inkluze byly měřeny ve sfaleritu a karbonátech. Změřeno bylo 48 inkluzí s charakterem primárních (P) (27 inkluzí

ve sfaleritu a 21 v karbonátech) a jedna ve sfaleritu byla sekundární (S). Při analýze byl sledován poměr zaplnění ($F=L/L+V$, L – liquid, kapalná fáze, V – vapour, plynná fáze) a měřeny následující parametry: teplota homogenizace (T_h), teplota zamrznutí (T_f), eutektická teplota (T_e), teplota tání ledu (T_m ice). Salinita fluid byla vypočtena jako ekvivalent NaCl podle Bodnara (1993). Pro odvození teplotních podmínek vzniku mineralizace bylo využito konstrukce izochor (výpočty s programem FLUIDS, Bakker 2003 a stavové rovnice podle Zhang a Frantz 1987) s nejnižší a nejvyšší T_h a jejich protínání s geotermickým gradientem pro litostatické a hydrostatické podmínky.

Chemické složení karbonátů bylo analyzováno na elektronové mikrosondě Cameca SX100 na Ústavu geologických věd PŘF MU Brno. Analýzy byly provedeny ve vlnově disperzním módu, s průměrem elektronového svazku 8 μm při urychlovacím napětí 15 kV.

Katodoluminiscenční mikroskopie byla provedena na katedře geologie UP v Olomouci na aparatuře CITL Mk5-1 („studená“ katodoluminiscence) při akceleračním napětí 20 kV a proudu paprsku 300 μA .

Za účelem získání pionýrských dat izotopové termometrie byly na studované mineralizaci analyzovány



Obr. 2: Stavba hydrotermálních žil z lomu Bučník. a) Souměrná žíla se sulfidy na okrajích a s karbonáty, b) asymetrická stavba žíly se sulfidy (tmavá zrna) a karbonáty s malým množstvím křemene (světlé minerály), hnědá zrna jsou limonitizované karbonáty, c) + d) brekciovitě až kokardovité textury, vzorky z Moravského zemského muzea č. 479 (c) a 2692 (d).

Fig. 2: Structures of hydrothermal veins in the Bučník quarry. a) Symmetric vein with sulfides at the edges and carbonates in centre, b) asymmetric vein structure with sulfides (dark grains) and carbonates with a small amount of quartz (light minerals), brown grains are limonitized carbonates, c)+d) breccia-like structures, samples from Moravian Museum number 479 (c) and 2692 (d).

stabilní izotopy síry u párových sulfidů galenit-sfalerit v laboratoři Ústavu věd o Zemi SAV v Banské Bystrici. Izotopy síry byly měřeny v galenitu a sfaleritu na izotopovém hmotnostním spektrometru (IRMS) MAT253. Rozpráškované vzorky sulfidů o hmotnosti 170–185 mg byly navázeny do cínových kapslí společně se stejným množstvím V_2O_5 a spalovány při 1 000 °C v křemenné trubici v proudu kyslíku (FlashHT 2000 Plus, Thermo Scientific). Vzniklý SO_2 byl následně čištěn s použitím WO_3 a elementární mědi a separovaný chromatograficky od ostatních plynných složek. Standardní odchylka měření je 0,24 ‰. Analytické hodnoty byly kalibrovány mezinárodními standardy IAEA-S2 a IAEA-S3 ($\delta^{34}S = +22,7$ a $-32,3$ ‰ CDT) a jsou uvedeny vzhledem ke standardu CDT. Teploty izotopické rovnováhy pro páry sfalerit-galenit byly vypočteny podle Ohmoto a Rye (1979 in Barnes 1997), k výpočtům byl použit průměr ze dvou měření u každého vzorku.

Mineralizace studovaných vzorků

Hydrotermální žíly prorážejí obvykle hydrotermálně alterovanými vulkanity (propylitizace), příp. porcelanity (vypálené jílovce). Mocnosti hydrotermálních žil dosahují maximálně několika centimetrů. Stavba studovaných vzorků žil je často souměrná (obr. 2a), na okrajích se sulfidy a v centru s karbonáty, anebo komplexní, se

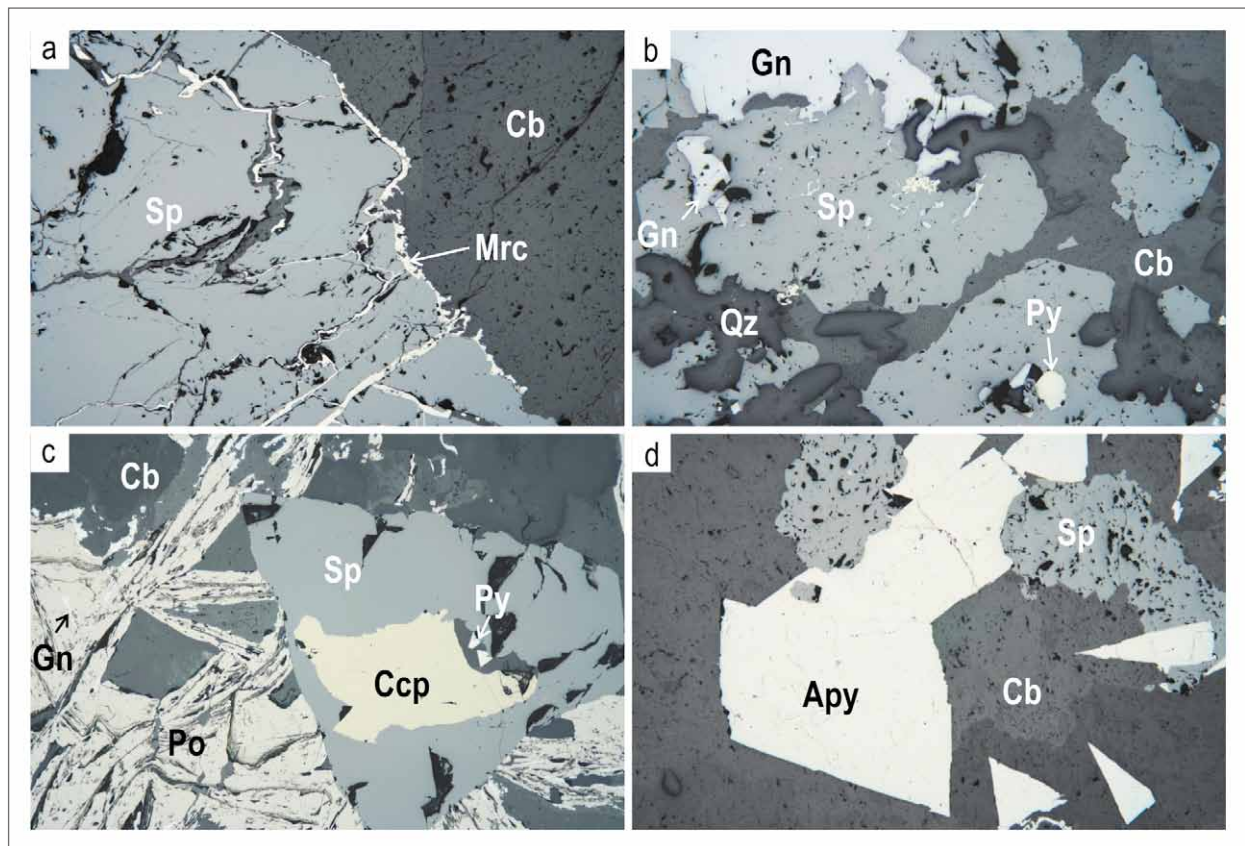
složitější brekciovitou texturou (obr. 2c, 2d). Okolo stěn žil jsou nejčastěji sulfidy jako sfalerit, galenit a někdy křemen (obr. 2a, 2b). Sfalerit je často podrcen a trhliny jsou vyplněny karbonáty a markazitem (obr. 3a). Galenit a sfalerit se často detailně prorůstají (obr. 3b) a galenit se vyskytuje i jako velmi drobné inkluze v pyrhotinu (obr. 3c). Arzenopyrit a chalkopyrit se vyskytují jako rozptýlená zrna ve společnosti sfaleritu a galenitu (obr. 3c, 3d).

CL-mikroskopie

V katodoluminiscenčním mikroskopu vykazují studované karbonáty velmi pestré a komplexní stavby zvýrazněné různou intenzitou luminiscence. Intenzity a odstíny se pohybují od světle oranžové přes oranžovo-hnědé až po velmi tmavé odstíny. Starší karbonátová výplň žil vykazuje deformační, brekciovité struktury, mladší má velmi detailní zonální stavbu s rozdílnou luminiscencí (obr. 4). Střídají se světle žluto-oranžové zóny s tmavě hnědo-oranžovými a se zónami bez luminiscence. Zóny bez luminiscence mají zvýšený obsah Fe a Mn. Často dobře krystalovaný dolomit vykazuje velmi slabou až žádnou luminiscenci.

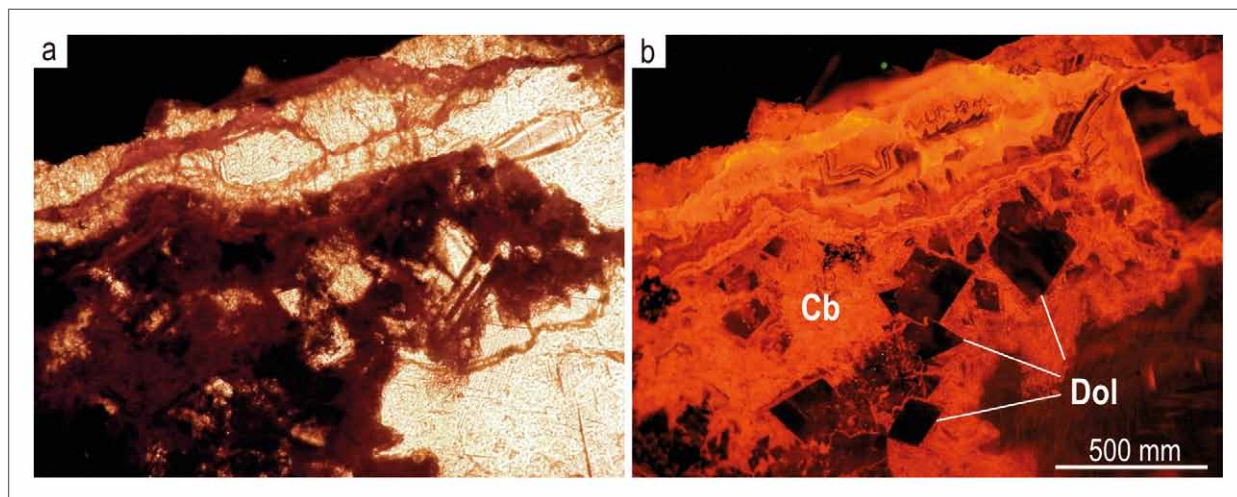
Chemické složení karbonátů

Složení karbonátů se pohybuje ve velmi širokém rozsahu: MgO 0,05–16,67 hm. %, CaO 4,24–54,14 hm. %,



Obr. 3: Nejčastější sulfidické minerály a jejich struktury na hydrotermálních žilách v lomu na Bučniku. Sp – sfalerit, Mrc – markazit, Cb – karbonáty, Gn – galenit, Py – pyrit, Qtz – křemen, Po – pyrhotin, Ccp – chalkopyrit, Apy – arzenopyrit. Odražené světlo, šířka snímků je 2,1 mm.

Fig. 3: The most common sulphide minerals and their textures in hydrothermal veins in Bučník quarry. Sp – sphalerite, Mrc – marcasite, Cb – carbonate, Gn – galenite, Py – pyrite, Qtz – quartz, Po – pyrrhotite, Ccp – chalcopyrite, Apy – arsenopyrite. Reflected light, width of images is 2,1 mm.



Obr. 4: Mikroskopické snímky se zřetelnou luminiscencí karbonátů dokumentující typické brekciovitě a detailně zonální struktury hydrotermální karbonátové mineralizace v žilách z lomu Bučník. Cb – karbonáty, Dol – dolomit, a) normální světlo, b) komplexní struktury karbonátů v katodoluminiscenci. Vzorek BUC2.

Fig. 4: Microscopic images with clear luminescence of carbonates showing typical breccia-like and detailed zonal structures of hydrothermal carbonate mineralization in veins from the Bučník quarry. Cb – carbonates, Dol – dolomite, a) normal light, b) complex carbonate textures in CL. Sample BUC2.

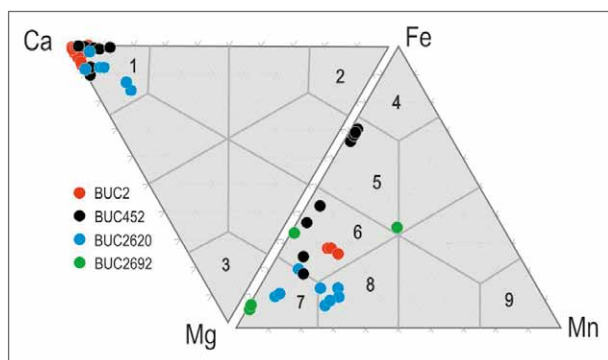
MnO 0,06–20,79 hm. %, FeO 0,04–43,84 hm. %, ZnO 0,00–2,44 hm. % a SrO 0,0–0,34 hm. % (elektronická příloha – e-příloha).

Analýzované karbonáty byly definovány jako kalcity, dolomity a ankerity podle klasifikace Trdličky a Hoffmana (Trdlička, Hoffman 1975) – viz obr. 5. Kalcity měly zvýšený podíl Fe mezi 0,03 až 5,01 hm. % a také Mn 0,53 až 16,10 hm. %. U karbonátů dolomitové skupiny byl nejčastěji zastoupen Fe-dolomit, Mn-dolomit a Mg-ankerit. Velmi detailní změny chemického složení jsou zřetelně zachyceny i na BSE snímcích (obr. 6, např. variabilita v obsahu Fe, Mn, analýzy viz e-příloha).

Studium fluidních inkluzí a mikrotermometrie

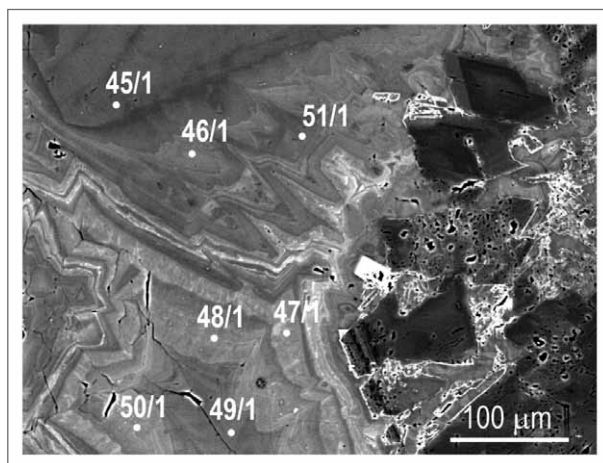
Tvar většiny inkluzí byl spíše pravidelný a nepříliš složitý (obr. 7). Sekundární inkluze ve sfaleritu měly ploché tvary. Všechny studované inkluze byly dvouřadové (L+V) s velikostmi 3–25 μm. Poměr zaplnění (F) se pohyboval mezi 0,90–0,95. Většina inkluzí byla solitérní, příp. společně s několika menšími inkluzemi.

Ve sfaleritu byly nalezeny primární i sekundární inkluze. Změřeny byly hlavně primární inkluze a jedna sekundární. Sekundární inkluze měly malé velikosti (<1–2 μm) a byly neměřitelné. V karbonátech byly měřeny pouze primární inkluze.

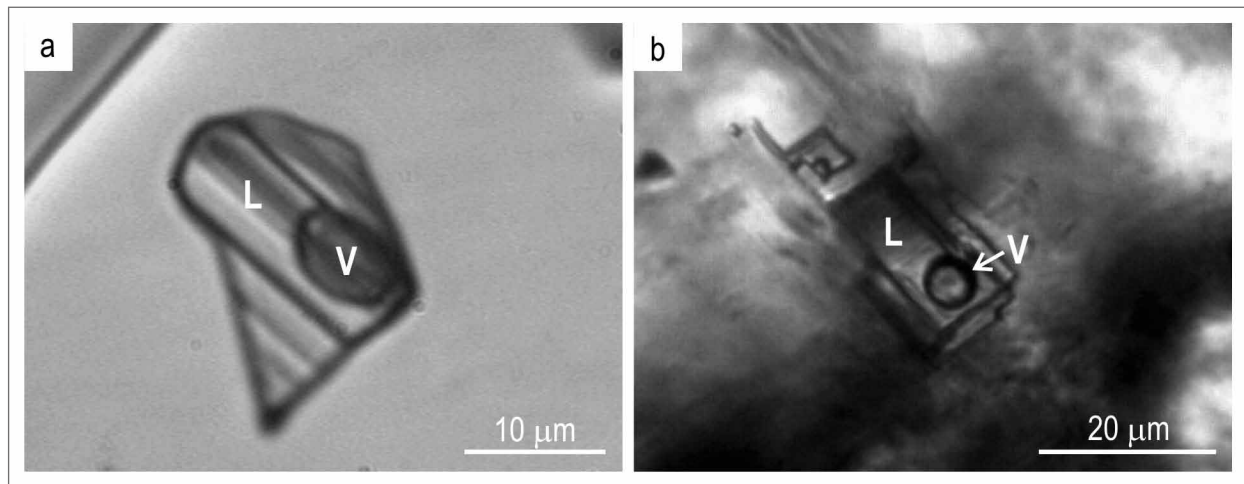


Obr. 5: Analýzy karbonátů v klasifikačních diagramech podle Trdličky a Hoffmana (1975). Vysvětlivky: kalcitová skupina: 1 – kalcit, 2 – siderit, 3 – magnesit, dolomitová skupina: 4 – ankerit, 5 – Mg-ankerit, 6 – Fe-dolomit, 7 – dolomit, 8 – Mn-dolomit, 9 – kutnohorit.

Fig. 5: Carbonate analyses in classification diagrams according to Trdlička and Hoffman (1975). Legend: calcite group: 1 – calcite, 2 – siderite, 3 – magnesite, dolomite group: 4 – ankerite, 5 – Mg-ankerite, 6 – Fe-dolomite, 7 – dolomite, 8 – Mn-dolomite, 9 – kutnohorite.



Obr. 6: Velmi detailní zonálnost karbonátů – dolomity mají nejtmaší odstíny, ostatní karbonáty mají různé šedé odstíny. Snímek BSE, analýzy viz e-příloha. Vzorek BUC2. Foto R. Škoda. Fig. 6: Largely detailed zonation of carbonates – dolomites have the darkest shades, other carbonates have different shades of gray. BSE image, analyses see electronic attachment. Sample BUC2. Photo R. Škoda.



Obr. 7: Primární dvoufázová fluidní inkluze ve sfaleritu (a) a v karbonátu (b).
Fig. 7: Primary two-phase inclusion in sphalerite (a) and in carbonate (b).

Mikrotermometrie

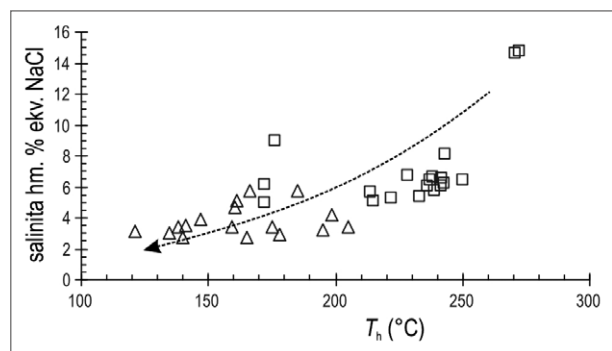
Všechny studované inkluze homogenizovaly na kapalinu. Inkluze ve sfaleritu vykazovaly T_h 172–272 °C a v karbonátech 121–205 °C (obr. 8). Eutektické teploty (T_e) u sfaleritu se pohybovaly od –38 do –22 °C (tab. 1) a naznačují přítomnost vodného systému $H_2O-NaCl$ a $H_2O-NaCl+MgCl_2+FeCl_{2,3}$ (Borisenko 1977, 1982). V karbonátech byly hodnoty T_e v rozmezí od –28 do –24 °C, což ukazuje na přítomnost vodného systému $H_2O-NaCl$ (Spencer et al. 1990). Hodnoty T_m ice u sfaleritu byly mezi –10,7 až –3,0 °C a u karbonátu mezi –3,5 až –1,6 °C, což odpovídá salinitě 5,0–14,7 hm. % NaCl ve sfaleritu a v karbonátech 2,7–5,7 hm. % NaCl (tab. 1; e-příloha).

Izotopová termometrie

U párových sulfidů sfalerit/galenit z konkrétních vzorků (BUC1, BUC4, BUC10566), kde byly sulfidy blízko u sebe, byly ze získaných izotopů síry vypočteny teploty izotopové rovnováhy 282, 450, 473 a 541 °C (tab. 2). V celém souboru izotopických dat byly vypočteny i další kombinace jednotlivých analýz a celý soubor pak vykazuje rozpětí teplot 174 až 5 770 °C. Analýza dat a výpočty teplot ukazují na pravděpodobné analytické chyby (vz. Sp1) a na pravděpodobnou izotopickou nerovnováhu (vz. Gn10). S danými vzorky/analýzami jsou spojeny všechny extrémní teploty (nereálné, velmi vysoké příp. velmi nízké). Pokud vyloučíme všechny hodnoty teplot spojené s těmito analýzami, tak dostaneme hodnotu mediánu 277 °C a průměr 289 °C.

Diskuze

Mineralizace vytváří symetrické žíly, anebo vznikají brekciovité až kokardovité textury, které potvrzují, že zrudnění vznikalo během intenzivní intramineralizační deformace. Mezi nejstarší minerály patří křemen a kataklazovaný sfalerit, v němž praskliny vyplňují mladší minerály (markazit, karbonáty). Karbonáty zaujímají střední části žil a patří na žilách k nejmladším hydrotermálním fázím. Sfalerit často prorůstá s dalšími sulfidy jako je galenit, pyrit, arzenopyrit a chalkopyrit, což ukazuje na jejich časově blízkou krystalizaci.



Obr. 8: Mikrotermometrická data (T_h) a salinita ve sfaleritech (čtvereček) a karbonátech (trojúhelník) s pravděpodobným trendem vývoje hydrotermálního systému.

Fig. 8: Microthermometric data (T_h) and salinity in sphalerites (square) and carbonates (triangle) with a possible trend of hydrothermal system development.

Stavba žil a textury včetně minerální asociace jsou velmi podobné některým ložiskům v rájónu středoslovenských vulkanitů, např. na ložisku Hodruša-Hámre. Sukcese minerálů na žíle Rozália má podobný charakter – křemen, sfalerit a pyrit patří mezi nejstarší minerály (Kubač 2017).

Změny ve složení karbonátů, které se viditelně projevují i v jejich zonálnosti, vypovídají o variabilních podmínkách při krystalizaci a o relativně rychlých změnách složení hydrotermálních fluid. Podobné variace ve složení karbonátů jsou uváděny z ložiska Hodruša-Hámre, žíla Rozália (např. Ca-Mg kalcit – dolomit, Ca-Mg-Fe dolomit – ankerit), (Maťo et al. 1996).

S ohledem na posloupnost vzniku minerálů je možné trend v grafu T_h -salinita interpretovat jako míšení fluid se zvyšujícím se podílem nízko-salinních a studenějších fluid v mladších generacích (obr. 8). Tento trend byl popsán např. i na žilách typu Karolína na ložisku Hodruša-Hámre, na žíle Rozália, kde salinita a T_h dosahují i vyšších hodnot u primárních inkluzí v křemenu a sfaleritu (Jeleň, Háber 2000; Kubač 2017). Na ložisku Hodruša i v celém banskoštiavnickém revíru je stejný trend interpretován s ohledem na izotopické složení kyslíku jako snižování

Tab. 1: Rozsah zjištěných a naměřených mikrotermometrických parametrů fluidních inkluzí ve sfaleritech a karbonátech.

Tab. 1: Range of detected and measured microthermometric parameters of fluid inclusions in sphalerites and carbonates.

Minerál	Geneze	N	Velikost (μm)	T_h (°C)	T_f (°C)	T_c (°C)	$T_{m\text{ ice}}$ (°C)	Salinita (hm. % NaCl)
sfalerit	P	27	3–25	+172/+272	-50/-32	-38/-22	-10,7/-3,0	5,0–14,7
sfalerit	S	1	21	191	-41	-	-	-
karbonát	P	21	4–21	+121/+205	-47/-39	-27/-24	-3,5/-1,6	2,7–5,7

Tab. 2: Analýzy izotopického složení síry párových sulfidů sfaleritu (Sp) a galenitu (Gn) a jejich teploty izotopické rovnováhy. n.a. – nebylo analyzováno.

Tab. 2: Sulphur isotope composition of sphalerite (Sp) and galena (Gn) and their temperatures of isotopic stability. n.a. – not analyzed.

vzorek	párové sulfidy	1.	2.	průměr	teplota izotopové rovnováhy T (°C)
BUC1	Sp1a	-0,32	1,02	0,35	473
	Sp1b	0,14	n.a.	0,14	541
	Gn1	-0,98	-0,94	-0,96	
BUC4	Sp4	1,02	0,9	0,96	
	Gn4	-0,46	-0,41	-0,435	450
BUC 10 566	Sp10	2,57	2,83	2,7	
	Gn10	0,47	0,19	0,33	282
BUC3	Sp3	0,87	0,91	0,89	
BUC 2692	Sp26	1,45	1,46	1,455	
BUC 11 139	Sp11	2,04	2,08	2,06	

podílu magmatické vody v hydrotermálních fluidech v důsledku progresivního míšení fluid s meteorickou vodou v závěru mineralizace (Lexa et al. 1999; Kovalenker et al. 2006; Kubač 2017). Pronikání meteorické vody do hydrotermálního systému je interpretováno i na ložisku Căvnic v revíru Baia Mare v Rumunsku (Grancea et al. 2002). Zmíněný revír vykazuje též dynamický vývoj a změny v hydrotermálním systému projevující se výraznou oscilační zonálností i sulfidických minerálů (Buzatu et al. 2015).

Odvozené teploty vzniku mineralizace a uzavření fluid dávají na Bučniku nejvyšší teploty 335 °C s aplikací litostatického gradientu (obr. 9). Pro konstrukci geotermického gradientu byla použita průměrná hustota hornin svrchní kůry v oblasti (Šimonová, Bielik 2016) a teplota 90 °C/km jako střední hodnota pro vulkanické oblasti (např. Morgan 2003). V rajonu středoslovenských vulkanitů byly však zjištěny spíše hydrostatické podmínky při vzniku žil (Koděra et al. 2005), což by při aplikaci na zkoumanou mineralizaci dávalo maximální teplotu 290 °C.

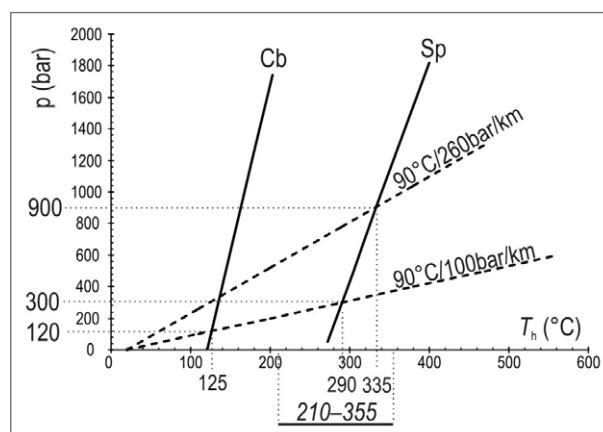
Vzhledem k tomu, že sulfidy se vyskytují v málo mocných žilkách nebo jen na puklinách, je možné, že i některá další zrna mohou být v izotopické rovnováze se zrny vzdálenějšími. Proto výpočty izotopické termometrie byly provedeny i pro ostatní kombinace zrn sfalerit/galenit (e-příloha). Po selekci analýz primárního souboru dávají ostatní kombinace reálné teploty v rozsahu 210–355 °C. Nejnižší hodnoty v tomto rozsahu jsou pak velmi blízké maximálnímu T_h primárních inkluzí karbonátů, takže mohou představovat transitní teplotní zónu mezi koncem krystalizace sulfidů a začátkem hlavního stádia krystalizace karbonátů. Odvozená maximální teplota 290 °C je pak v těsné blízkosti hodnot mediánu a průměru

z izotopické termometrie, tj. 277 a 289 °C. Odvozené vyšší tlaky do 300 bar (obr. 9) jsou vyšší než odhadované tlaky na ložisku Banská Hodruša (do 100 bar, Koděra et al. 2005), což může být důsledek určitého překrytí vulkanické struktury s hydrotermálním systémem na Bučniku, terciárními sedimenty. Podobnější podmínky vzniku mineralizace jsou uváděny v revíru Banská Štiavnica, kde jsou odvozeny tlaky do 160, resp. 260 bar, a teploty 58–380 °C pro polymetalické žíly (Kovalenker et al. 2006). Blízké teplotní parametry jsou publikovány i pro revír Baia Mare, kde sulfidická mineralizace vznikala za teplot okolo 350 °C, podle arzenopyritového termometru v rozmezí 320–360 °C (Buzatu et al.

2015), podle izotopové termometrie sulfidů (pyrit-galenit) byly teploty 417±75 a 320±70 °C a paragenese se sulfosolemi vznikaly pod 220 °C (Cook, Damian 1997). Pro ložiska Baia Sprie, Căvnic a Sasar je uváděn teplotní interval 150–320 °C (Grancea et al. 2002).

Závěr

Geologické prostředí hydrotermální mineralizace v lomu Bučník bylo velmi dynamické prostředí z hlediska vývoje tektoniky a deformace. Velké množství



Obr. 9: Teploty odvozené z protínání izochor a geotermických gradientů v porovnání s výsledky izotopické termometrie (kurzíva). Vysvětlivky: Cb – izochora nejnižší T_h , Sp – izochora nejvyšší T_h .

Fig. 9: Temperatures derived from intersecting isochores and geothermal gradients compared to the results from isotopic thermometry (italics). Legend: Cb – lowest T_h isochore, Sp – highest T_h isochore.

disjunktivních otevřených struktur v horninách ve svrchní části kůry umožňuje rozsáhlou migraci fluid a interakci s horninami, což vede k rychlejšímu chladnutí fluid, variabilitě složení, příp. velmi pravděpodobně k míchání různých typů vodných fluid. Takové prostředí se projevilo nejen na stavbě žil, texturách a strukturách, ale i na variabilitě chemického složení fluid, což dobře reprezentuje složení a struktura karbonátů, i na celkovém rozsahu teplotních podmínek vzniku mineralizace. Data získaná z použitých metod a vzorků umožňují odvodit pravděpodobný teplotní rozsah 210–290 °C pro vznik hlavní sulfidické asociace, za tlaků do 300 bar, s možným přesahem do vyšších teplot v případě vyšších než hydrostatických tlakových podmínek. Teploty karbonátové asociace ukazují na teplotní rozsah od 125 °C do přibližně 210 °C.

Řada zjištěných parametrů hydrotermálních roztoků vykazuje velkou podobnost s charakteristikami sulfidických žil nejen v rajónu středoslovenských vulkanitů, ale současně i s obecnými trendy tohoto genetického typu mineralizace.

Poděkování

Autoři děkují S. Houzarovi a dalším kolegům z Moravského zemského muzea a instituci a také A. Přichystalovi za zapůjčení studijních vzorků, R. Škodovi za analýzy na mikrosondě, Z. Lososovi za konzultaci výsledků analýz a poděkování za asistenci při CL-mikroskopii patří K. Kropáčovi. Autoři děkují editorům, recenzentům J. Zachariášovi a A. Přichystalovi za jejich přínos pro zkvalitnění původního rukopisu. Výzkum byl podpořen z fondů specifického výzkumu MU.

Literatura

- Bakker, R. J. (2003). Package FLUIDS 1. Computer programs for analysis of fluid inclusion data and for modelling bulk fluid properties. – *Chemical Geology*, 194, 3–23. [https://doi.org/10.1016/S0009-2541\(02\)00268-1](https://doi.org/10.1016/S0009-2541(02)00268-1)
- Barnes, H. L. (ed.) (1997). *Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits*. – 3rd ed., John Wiley & Sons, Inc. New York, Chichester, Weinheim, Brisbane, Singapore, Toronto. 972 s.
- Bernard, J. H. et al. (1981). *Mineralogie Československa*. – Vydání 2., Academia. Praha. 648 s.
- Bodnar, R. J. (1993). Revised equation and table for determining the freezing point depression of H₂O-NaCl solutions. – *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 57, 683–684. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(93\)90378-A](https://doi.org/10.1016/0016-7037(93)90378-A)
- Borisenko, A. S. (1977). Study of salt composition of fluid inclusions in minerals using cryometric technique. – *Geologia i Geofizika*, 8, 16–27.
- Borisenko, A. S. (1982). Analiz solevogo sostava rastvorov gazovo-židkikh vključenij v mineralach Metodom krijometrii. – In: Laverov N. P. (ed.): *Ispolzovanije metodov termobarogeochimiji pri poiskach i izučeniji rudnych mestoroždenij*, 37–46, Nedra, Moskva.
- Buzatu, A., Damian, G., Dill, H. G., Buzgar, N., Apopei, A. I. (2015). Mineralogy and geochemistry of sulfosalts from Baia Sprie ore deposit (Romania) — New bismuth minerals occurrence. – *Ore Geology Reviews*, 65, 132–147.
- Cook, N. J., Damian, G. S. (1997). New data on "plumosite" and other sulphosalt minerals from the Herja hydrothermal vein deposit, Baia Mare district, Rumania. – *Geologica Carpathica*, 48, 6, 387–399.

- Černý, P. (1958). Propylitické rudní žíly a jejich nerosty od Komně u Bojkovic. – Geologický sborník Slovenskej akadémie vied, 9, 300–324. Bratislava.
- Čtyrkoký, P., Stráňák, Z. (1995). Zpráva pracovní skupiny české stratigrafické komise o regionálním dělení Západních Karpat. – Věstník Českého geologického ústavu, 70, 3, 67–72.
- Fojt, B., Přichystal, A. (1979). Sfalorit a karbonáty z rudních žil v propylitizovaném andezitu od Komni (jihovýchodní Morava). – Scripta Facultatis Scientiarum Naturalium Universitatis Purkynianae Brunensis, Geologia 1, 9, 17–28. Brno.
- Grancea, L., Bailly, L., Leroy, J., Banks D., Marcoux, E., Milesi, J.-P., Cuney, M., André, A.-S., Istvan, D., Fabre, C. (2002). Fluid evolution in the Baia Mare epithermal gold/polymetallic district, Inner Carpathians, Romania. – Mineralium Deposita, 37, 630–647. <https://doi.org/10.1007/s00126-002-0276-5>
- Hašková, M., Kropáč, K. (2019). Petrografie xenolitů vyvřelých hornin v neovulkanitech z lomu Bučník u obce Komňa. – Geologické výzkumy na Moravě a ve Slezsku, 26, 1–2, 40–48. <https://doi.org/10.5817/GVMS2019-1-2-40>
- Hrouda, F., Buriánek, D., Krejčí, O., Chadima, M. (2015). Magnetic fabric and petrology of Miocene sub-volcanic sills and dykes emplaced into the SW Flysch Belt of the West Carpathians (S Moravia, Czech Republic) and their volcanological and tectonic implications. – Journal of Volcanology and Geothermal research, 290, 23–38. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2014.12.001>
- Jeleň, S., Háber, M. (2000). Mineralógia mineralizácií bane Rozálie, Hodruša-Hámre. – MS, Geologický ústav D. Štúra. Bratislava.
- Kantor, J., Repčok, I., Ďurkovičová, J., Eliášová, K., Wiegerová, A. (1984). Časový vývoj vybraných oblastí Západních Karpat podle radiometrického datování. – MS, Geologický ústav D. Štúra. Bratislava.
- Koděra, P., Lexa, J., Rankin, A. H., Fallick, A. E. (2005). Epithermal gold veins in a caldera setting: Banská Hodruša, Slovakia. – Mineralium Deposita, 39, 921–943. <https://doi.org/10.1007/s00126-004-0449-5>
- Kovalenker, V. A., Naumov V. B., Prokof'ev, V. Yu., Jelen, S., Gaber, M. (2006). Compositions of magmatic melts and evolution of mineral-forming fluids in the Banská Štiavnica epithermal Au-Ag-Pb-Zn deposit, Slovakia: A study of inclusions in minerals. – Geochemistry International, 44, 2, 118–136.
- Krejčí, O., Poul, I. (2010). Doklady střednomiocenní násunové tektoniky v bělokarpatské jednotce flyšového pásma Západních Karpat. – Geologické výzkumy na Moravě a ve Slezsku v r. 2009, 17, 58–63. Brno.
- Krobot, J. (2011). Dokumentace hydrotermálních mineralizací v bělokarpatské jednotce magurského flyše (Vnější Západní Karpaty). – MS, bakalářská práce. Přírodovědecká fakulta Univerzity Palackého v Olomouci.
- Kruťa, T. (1966). Moravské nerosty a jejich literatura 1940-1965. – Moravské muzeum v Brně, 379 s.
- Kubač, A. (2017). Mineralógia a genéza drahokovovo-polymetalickej mineralizácie na Rozálie bani a na lokalite Prochot v štiavnickom stratovulkáne. – MS, dizertační práce, Přírodovědecká fakulta Univerzity Komenského v Bratislave.
- Lexa, J., Štohl, J., Konečný, V. (1999). The Banská Štiavnica ore district: relationship between metallogenetic processes and the geological evolution of a stratovolcano. – Mineralium Deposita, 34, 639–654. <https://doi.org/10.1007/s001260050225>
- Maťo, L., Sasvári, T., Bebej, J., Kraus, I., Schmidt, R., Kalinaj, M. (1996). Štruktúrne kontrolovaná žilná mezotermálna zlato-kremeňová a epitermálna drahokovovo-polymetalická mineralizácia v hodrušskom rudnom poli, stredoslovenské neovulkanity. – Mineralia Slovaca, 28, 6, 455–490. Bratislava.
- Mátl, V. (1982). Hg zrudnění u Komni. – MS, diplomová práce. Přírodovědecká fakulta Univerzity Jana Evangelisty Purkyně. Brno.
- Morgan, P. (2003). Heat Flow. Encyclopedia of Physical Science and Technology, 265–278, Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409548-9.09439-2>
- Ohmoto, H., Rye, R. O. (1979). Isotopes of sulphur and carbon. – In: Barnes, H. L. (ed.): Geochemistry of hydrothermal ore deposits, second edition, 509–567, New York, John Wiley and Sons, Inc.
- Pirajno, F. (1992). Hydrothermal Mineral Deposits. Principles and Fundamental Concepts for the Exploration Geologist. – Springer, 709 s.
- Poul, I., Krejčí, O., Janečka, J., Živor, R. (2010). Deformace svrchnobadenských trachyandezitů u Bojkovic jako odraz postintenzivní transtenze v bělokarpatské jednotce (Vnější Západní Karpaty). – Geologické výzkumy na Moravě a ve Slezsku v r. 2009, 17, 85–87. Brno.
- Přichystal, A. (1974). Mineralogicko-chemické studium nerostných asociací na lokalitě Bučník (Komňa u Bojkovic). – MS, diplomová práce, UJEP Brno.
- Přichystal, A. (1993). Vulkanismus v geologické historii Moravy a Slezska od paleozoika do kvartéru. – In: Přichystal A., Obstová V., Suk M. (ed.): Geologie Moravy a Slezska, 59–70, MZM a Sekce geologických Věd Přírodovědecké fakulty MU, Brno.
- Přichystal, A., Repčok, I., Krejčí, O. (1998). Radiometrické datování trachyandezitu od Uherského Brodu (magurská skupina flyšového pásma). – Geologické výzkumy na Moravě a ve Slezsku v r. 1997, 33–34. 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. – Geochimica et Cosmochimica Acta, 54, 575–590. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(90\)90354-N](https://doi.org/10.1016/0016-7037(90)90354-N)
- Šimonová, B., Bielik M. (2016). Determination of rock densities in the Carpathian-Pannonian Basin lithosphere: based on the CELEBRATION 2000 experiment. – Contributions to Geophysics and Geodesy, 46, 4, 269–287. <https://doi.org/10.1515/congeo-2016-0016>
- Trdlíčka, Z., Hoffman, V. (1975). Untersuchungen der chemischen Zusammensetzung der Gangkarbonate von Kutná Hora/ČSSR. – Freiburger Forschungshefte, 6, 29–81.
- Ulmanová, J. (2015). Podmínky vzniku vybraných mineralizací z lomu Bučník u Komni. – MS, bakalářská práce. Přírodovědecká fakulta Univerzity Palackého v Olomouci.
- Zhang, Y. G., Frantz, J. D. (1987). Determination of the homogenization temperatures and densities of supercritical fluids in the system NaCl – KCl – CaCl₂ – H₂O using synthetic fluid inclusions. – Chemical Geology, 64, 335–350. [https://doi.org/10.1016/0009-2541\(87\)90012-X](https://doi.org/10.1016/0009-2541(87)90012-X)