

# MINERALOGIE SULFIDICKÉ, ARZENIDOVÉ A TELLURIDOVÉ MINERALIZACE V CORDIERITICKÉM PEGMATITU Z LOMU BORY U VELKÉHO MEZIŘÍČÍ (STRÁŽECKÉ MOLDANUBIKUM)

Mineralogy of sulphide, arsenide and telluride mineralization in cordierite-bearing pegmatite from the Bory Quarry near Velké Meziříčí (Strážek Moldanubicum)

Alena Fuksová<sup>1</sup>, Zdeněk Dolníček<sup>1</sup>, Petr Gadas<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Katedra geologie PřF UP, tř. 17 listopadu 12, 771 46 Olomouc; e-mail: fuksova@centrum.cz

<sup>2</sup> Ústav geologických věd PřF MU, Kotlářská 2, 611 37 Brno; e-mail: pgadas@centrum.cz

(24-13 Bystřice nad Pernštejnem)

**Key words:** Moldanubicum, Bory, pegmatites, arsenopyrite, löllingite,  $Bi_5Te_3$ ,  $Ag_7Te_5$

## Abstract

Sulphide, arsenide and telluride mineralization was found in the cordierite-bearing pegmatite from the Bory Quarry near Velké Meziříčí. The quarry is situated in granulites of the Bory Granulite Massif that are penetrated by veins and irregular bodies of several paragenetically distinct types of pegmatites. Besides common minerals, the cordierite-bearing pegmatite contains minor amount of ore minerals such as pyrite, arsenopyrite (with up to 0.05–0.12 apfu Co) and löllingite (with up to 0.17 apfu Ni). Tiny inclusions of empressite ( $Ag_7Te_5$ ) and unnamed  $Bi_5Te_3$  phase (with 0.74 apfu S) occur as inclusions in löllingite.

## Úvod

Lom Bory se nachází v s. části borského granulitového masivu, nedaleko obce Bory, 6 km s. od Velkého Meziříčí. Borský granulitový masiv představuje těleso protáhle čočkovitého tvaru (směru VSV–ZJZ), uložené konformně v biotitických, místy cordieritických rulách (Špinar 1995); z regionálně-geologického hlediska náleží do oblasti strážeckého moldanubika (Dudek et al. 1992). Lom je založený v granulitech s foliací uklánějící se na SZ (Kotková et al. 2003).

Na lokalitě se nachází několik typů pegmatitů, nejčastěji se jedná o primitivní pegmatity a subabysální cordieritové pegmatity, méně pak primitivní fosfátové pegmatity (Novák 2005) a pegmatity s bezvodými borosilikáty (Cempírek et al. 2010). Primitivní turmalínové pegmatity tvoří žilná tělesa s ostrými kontakty s okolními horninami, často jsou zonální, mají jednoduché minerální složení (křemen, K-živce, skoryl, biotit, muskovit), z méně běžných minerálů obsahují apatit, pyrit, arsenopyrit (Špinar 1995), granát, rutil, ilmenit a löllingit (Novák 2005). Vykazují vyšší stupeň frakcionace, který se projevuje vyšším poměrem Fe/(Fe+Mg) v turmalínu a Mn/(Mn+Fe) v biotitu ve srovnání se subabysálními cordieritickými pegmatity (Novák 2005). Subabysální cordieritové pegmatity vznikly natavením hornin a utužením v menší hloubce a za nižších tlaků než pegmatity abysální (Novák 2005), jejich minerální asociaci tvoří křemen, K-živce, plagioklas, biotit, cordierit, akcesorický skoryl, pyrit, pyrrotin (Špinar 1995), apatit, dumortierit a granát (Novák 2005). Vzácně se zde vyskytují žíly fosfátových pegmatitů (Veselovský in Staněk 2009) o mocnosti 0,5 m s minerální asociací: K-živce, křemen, albit, skoryl, muskovit, akcesoricky se vyskytuje apatit a fosforečnan (griftonit, baričit, vivianit a mitridatit). U pegmatitů s bezvodými borosilikáty tvoří minerální asociaci K-živce, plagioklas, křemen, turmalín, korund,

dumortierit, hercynit a vzácné borosilikáty (grandierit, ominelit, boralsilit, werdingit). Jedná se pravděpodobně o nejstarší pegmatitovou mineralizaci v dané oblasti (Cempírek et al. 2010).

## Metodika

Terénní výzkum a dokumentace lomu Bory probíhal v letech 2008–2010. Chemické složení rudních minerálů bylo analyzováno vlnově disperzní (WDX) bodovou analýzou na přístroji Cameca SX 100 na Ústavu geologických věd PřF MU v Brně (analytik P. Gadas). Při analýze bylo použito napětí 25 kV, proud 20 nA a průměr elektronového svazku 1 μm. Při analýzách byly využity následující standardy: chalkopyrit (S), pararammelsbergit (Ni, As),  $sulf1\_CdTe$  (Cd, Te),  $sulf1\_HgTe$  (Hg),  $FeS_2$  (Fe),  $PbCl_2$  (Cl),  $PbS$  (Pb),  $ZnS$  (Zn), elementární antimon (Sb), elementární bismut (Bi), elementární kobalt (Co), elementární mangan (Mn), elementární stříbro (Ag).

## Výsledky

Cordieritické pegmatity tvoří nepravidelná tělesa s pozvolnými přechody do okolních granulitů, zonální stavba těles není patrná. Studovaný pegmatit je hydrotermálně alterovaný, má šedou barvu. Alterace se projevuje přeměnami cordieritu, biotitu a živců (viz dále), makroskopicky jsou pozorovatelná šedomodrá nepravidelná zrna cordieritu do velikosti 2 cm, zrna mléčného až čirého křemene a živců.

Na základě mikroskopie výbrusů bylo zjištěno minerální složení: křemen, K-živce, plagioklas, cordierit, biotit, chlorit, muskovit a akcesorický dumortierit. Hornina má hypautomorfně zrnitou strukturu. Křemen tvoří xenomorfně omezená zrna s hojným množstvím sekundárních fluidních inkluzí. K-živce tvoří hypautomorfně až xenomorfně omezená zrna, která jsou hojně sericit-

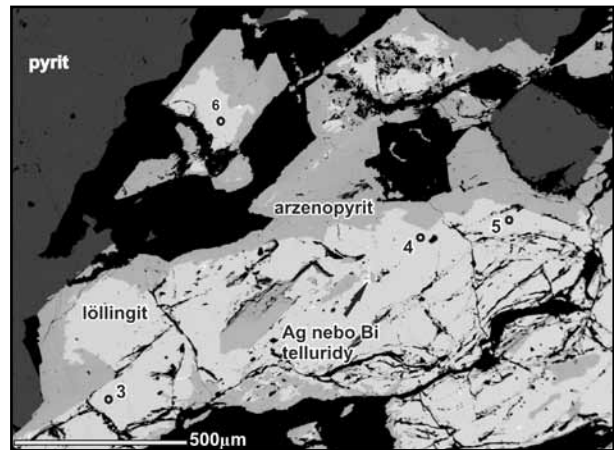
zována. Plagioklas je xenomorfně omezený a vyznačuje se typickým polysyntetickým lamelováním. Cordierit se vyskytuje v podobě xenomorfních zrn, která jsou často zatlačována chloritem a sericitem, podléhají tzv. pinitizaci. Biotit je hnědočervený, lištovitý, hypautomorfně omezený, místy přeměněný na chlorit, který se vyskytoval v podobě drobných šupinek. V produktech přeměn žilců a cordieritu se vyskytuje i jemně šupinkovitý muskovit. Akcesorií je zde dumortierit, který tvoří drobné silně pleochroické (modré – růžové) lišty do velikosti 250 µm.

Některé námi odebrané vzorky cordieritického pegmatitu obsahovaly i sulfidickou a arzenidovou mineralizaci. Rudní minerály vyplňují drobné dutiny, tvoří nepravidelná zrna či větší (1 cm) hnízda s makroskopicky nažloutlou barvou, místy se vyskytují oranžovozelené náběhové barvy. Rudní minerály jsou nejčastěji zastoupeny pyritem, který tvoří nepravidelná nezonální zrna. WDX analýzou (tab. 1) byly však určeny i další minerály, jako arzenopyrit, löllingit a inkluze telluridů Ag a Bi (obr. 1, 2).

|               | 3             | 4            | 5            | 6            | 7            | 8            | 9            | 10           |
|---------------|---------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
|               | löllingit     |              |              |              | arzenopyrit  |              |              |              |
| Mn            | 0,00          | 0,01         | 0,00         | 0,02         | 0,00         | 0,01         | 0,00         | 0,01         |
| Fe            | 20,00         | 20,40        | 19,77        | 19,72        | 28,74        | 32,07        | 31,68        | 26,95        |
| Co            | 3,02          | 2,60         | 3,26         | 3,49         | 3,49         | 1,70         | 2,26         | 4,25         |
| Ni            | 4,95          | 4,98         | 4,96         | 4,93         | 1,34         | 0,36         | 0,19         | 2,13         |
| Zn            | 0,00          | 0,00         | 0,01         | 0,00         | 0,00         | 0,01         | 0,00         | 0,00         |
| Ag            | 0,12          | 0,02         | 0,00         | 0,00         | 0,00         | 0,03         | 0,00         | 0,08         |
| Cd            | 0,00          | 0,00         | 0,00         | 0,00         | 0,00         | 0,00         | 0,01         | 0,00         |
| Hg            | 0,00          | 0,01         | 0,04         | 0,03         | 0,02         | 0,02         | 0,00         | 0,07         |
| S             | 1,83          | 0,77         | 0,81         | 0,92         | 16,38        | 18,81        | 19,09        | 16,12        |
| Cl            | 0,01          | 0,01         | 0,01         | 0,00         | 0,00         | 0,01         | 0,00         | 0,00         |
| As            | 70,79         | 70,91        | 70,63        | 70,13        | 49,40        | 46,21        | 45,81        | 49,98        |
| Sb            | 0,07          | 0,00         | 0,05         | 0,06         | 0,11         | 0,02         | 0,09         | 0,22         |
| <b>Celkem</b> | <b>100,79</b> | <b>99,72</b> | <b>99,52</b> | <b>99,30</b> | <b>99,49</b> | <b>99,25</b> | <b>99,12</b> | <b>99,81</b> |
| Mn            | 0,000         | 0,000        | 0,000        | 0,001        | 0,000        | 0,000        | 0,000        | 0,000        |
| Fe            | 0,733         | 0,748        | 0,726        | 0,725        | 0,873        | 0,950        | 0,937        | 0,821        |
| Co            | 0,105         | 0,090        | 0,114        | 0,121        | 0,101        | 0,048        | 0,063        | 0,123        |
| Ni            | 0,173         | 0,174        | 0,173        | 0,172        | 0,039        | 0,010        | 0,005        | 0,062        |
| Ag            | 0,002         | 0,000        | 0,000        | 0,000        | 0,000        | 0,001        | 0,000        | 0,001        |
| Sb            | 0,001         | 0,000        | 0,001        | 0,001        | 0,002        | 0,000        | 0,001        | 0,003        |
| <b>Catsum</b> | <b>1,014</b>  | <b>1,012</b> | <b>1,014</b> | <b>1,020</b> | <b>1,014</b> | <b>1,009</b> | <b>1,007</b> | <b>1,010</b> |
| S             | 0,050         | 0,049        | 0,052        | 0,059        | 0,867        | 0,971        | 0,983        | 0,860        |
| As            | 1,935         | 1,938        | 1,934        | 1,921        | 1,119        | 1,020        | 1,010        | 1,130        |
| <b>Ansum</b>  | <b>1,985</b>  | <b>1,987</b> | <b>1,986</b> | <b>1,979</b> | <b>1,986</b> | <b>1,991</b> | <b>1,993</b> | <b>1,990</b> |
| <b>Apfu</b>   | <b>2,999</b>  | <b>2,999</b> | <b>2,999</b> | <b>3,000</b> | <b>3,000</b> | <b>2,999</b> | <b>3,000</b> | <b>3,000</b> |

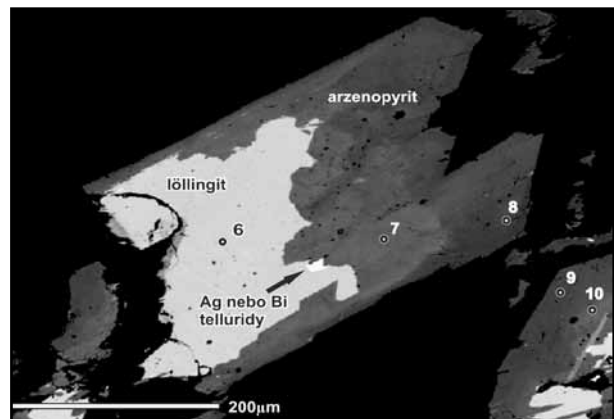
Tab. 1: Chemismus arzenopyritu a löllingitu z cordieritického pegmatitu. Analýzy WDX jsou v hmot. %, koeficienty empirického vzorce byly přepočítány na celkovou sumu iontů rovnou 3. Tab. 1: Chemical composition of arzenopyrite and löllingite from cordierite-bearing pegmatite. The WDX analyses are in wt. %. Empirical formulae were recalculated on bulk sum of ions equal to 3.

Arzenopyrit tvoří hypautomorfně až xenomorfně omezená, v BSE obraze místy zonální zrna, zatlačující löllingit (obr. 2). Arzenopyrit je růstově zonální, starší arzenopyrit je v obraze BSE světlejší (díky vyšším obsahům As, Co a Ni), na něj pak narůstá mladší, který je tmavší a hypautomorfně omezený (obr. 2). Arzenopyrit je chemi-



Obr. 1: Arzenidy, sulfidy a inkluze telluridů v cordieritickém pegmatitu (BSE). Číslo odpovídají číslům analýz v tab. 1. Černou barvu mají silikáty či křemen (Foto P. Gadas).

Fig. 1: Arsenides, sulphides and inclusions of tellurides in cordierite-bearing pegmatite (BSE). Numbers correspond to numbers of analyses in tab. 1. Black – silicates or quartz (Photo by P. Gadas).



Obr. 2: Löllingit zatlačovaný kompozičně zonálním arzenopyritem v křemeni (černý) cordieritického pegmatitu (BSE). Číslo odpovídají číslům analýz v tab. 1 (Foto P. Gadas).

Fig. 2: Löllingite corroded by arsenopyrite in quartz (black) of cordierite-bearing pegmatite (BSE). Numbers correspond to numbers of analyses in tab. 1 (Photo by P. Gadas).

ky poměrně čistý (tab. 1; analýzy 7–10), obsahoval pouze menší příměs Co (0,05–0,12 apfu) a Ni (0,005–0,062 apfu).

Löllingit tvoří xenomorfně omezená nezonální zrna zatlačovaná a obrůstána arzenopyritem (obr. 1, 2). Löllingit (tab. 1; analýzy 3–6) obsahuje příměs Ni (0,17 apfu) a méně Co (0,09–0,12 apfu).

Vzácně byly nalezeny Ag-tellurid a Bi-tellurid (tab. 2), které se vyskytovaly jako drobné bílé (v obraze BSE) inkluze v löllingitu (obr. 1, 2). Chemické složení Ag-telluridu odpovídá ideálnímu vzorci  $Ag_7Te_5$  (tab. 2, analýza 1), což je dle Thompsona et al. (1951) méně častější modifikace minerálu empressitu (častěji se vyskytuje ve formě  $Ag_5Te_3$ ). Chemické složení Bi-telluridu odpovídá nepojmenované fázi  $Bi_5Te_3$  (tab. 2, analýza 2).

#### Diskuze a závěry

Z rudních neoxidických minerálů byly v borských primitivních turmalínových pegmatitech dosud popsány löllingit (Novák 2005), pyrit a arzenopyrit (Špinar 1995),

|               | 1             | 2             |
|---------------|---------------|---------------|
| Mn            | 0,01          | 0,00          |
| Fe            | 2,02          | 0,82          |
| Co            | 0,45          | 0,17          |
| Ni            | 0,89          | 0,21          |
| Cu            | 0,00          | 0,01          |
| Zn            | 0,00          | 0,01          |
| Ag            | 50,49         | 0,00          |
| Cd            | 0,00          | 0,18          |
| Bi            | 0,00          | 74,10         |
| S             | 0,55          | 1,83          |
| Cl            | 0,04          | 0,00          |
| As            | 0,66          | 0,00          |
| Se            | 0,00          | 0,69          |
| Sb            | 0,01          | 0,00          |
| Te            | 44,53         | 22,04         |
| <b>Celkem</b> | <b>99,64</b>  | <b>100,06</b> |
| Mn            | 0,002         | 0,001         |
| Fe            | 0,481         | 0,190         |
| Co            | 0,100         | 0,038         |
| Ni            | 0,201         | 0,046         |
| Cu            | 0,000         | 0,001         |
| Zn            | 0,000         | 0,003         |
| Ag            | 6,218         | 0,000         |
| Cd            | 0,000         | 0,021         |
| Sb            | 0,002         | 0,000         |
| Bi            | 0,000         | 4,604         |
| <b>Catsum</b> | <b>7,003</b>  | <b>4,903</b>  |
| S             | 0,228         | 0,742         |
| Cl            | 0,016         | 0,000         |
| As            | 0,116         | 0,000         |
| Se            | 0,000         | 0,113         |
| Te            | 4,636         | 2,243         |
| <b>Ansum</b>  | <b>4,997</b>  | <b>3,097</b>  |
| <b>Apfu</b>   | <b>12,000</b> | <b>8,000</b>  |

Tab. 2: WDX analýza Ag-telluridu (koeficienty empirického vzorce přepočteny na sumu 12 iontů) a Bi-telluridu (koeficienty empirického vzorce přepočteny na sumu 8 iontů).

Tab. 2: WDX analyses of Ag-telluride (empirical formula was recalculated on sum of 12 ions) and Bi-telluride (empirical formula was recalculated on sum of 8 ions).

### Literatura

- Cempírek, J. – Novák, M. – Dolníček, Z. – Kotková, J. – Škoda, R. (2010): Crystal chemistry and origin of grandidierite-ominelite and associated borosilicates from Bory Granulite, Czech Republic. – *Am. Mineral.* 95, 1533–1547.
- Dudek, A. – Chlupáč, I. – Pouba, Z. – Vejnar, Z. – Zapletal, J. (1992): Krystalinikum a prevariské paleozoikum. – In: Chlupáč, I. – Štorch, P. (eds.): Regionálně-geologické dělení Českého masivu na území České republiky. – *Čas. Mineral. Geol.*, 37, 4, 258–275. Praha.
- Gu, X. P. – Watanabe, M. – Hostino, K. – Shibata, Y. (2001): Mineral chemistry and associations of Bi-Te (S, Se) minerals from China. – *Neu. Jb. Mineral, Mh* 289–309.
- Houzar, S. – Litochleb, J. – Sejkora, J. – Cempírek, J. – Cícha, J. (2008): Unusual mineralization with niobian titanite and Bi-tellurides in scheelite skarn from Kamenné doly quarry near Písek, Moldanubian Zone, Bohemian Massif. – *J. Geosci.*, 53, 1–16. Praha.
- Kotková, J. – Novák, M. – Povondra, P. (2003): Horní Bory near Velké Meziříčí. – *Field trip guidebook LERM 2003*, 47–51. Brno.
- Novák, M. (2005): Granitické pegmatity Českého masivu (Česká republika); mineralogická, geochemická a regionální klasifikace a geologický význam. – *Acta Mus. Moraviae, Sci. Geol.*, 90, 3–74. Brno.
- Thompson, R. M. – Peacock, M. A. – Rolland, J. F. – Berry, L. G. (1951): Empressite and “stuetzite”. – *Am. Mineral.*, 36, 5–6, 458–470.
- Staněk, J. (2009): Minerály Borů a Cyrilova u Velkého Meziříčí. – *Vyd. Obec Bory*, s. 102. Bory.
- Špinar, P. (1995): Vztah mezi pegmatity a alpskými žilami v kamenolomu u Horních Borů. – *Vlast. Sbor. Vysočiny, odd. věd přír.*, 12, 3–18. Jihlava.

u kterého byla spektrální analýzou prokázána přítomnost Sb a Bi (Špinar 1995). Ze subabysálních cordieritických pegmatitů byly popsány pouze pyrit a pyrrhotin (Špinar 1995). V pegmatitech s bezvodými borosilikáty byl nalezen löllingit a arzenopyrit (Cempírek et al. 2010). Kvantitativní chemické analýzy zmíněných fází však dosud nebyly publikovány.

Podobné výskyty nepojmenované fáze  $\text{Bi}_5\text{Te}_3$  jsou známy ze sulfid-scheelitového skarnu z Kamenných Dolů u Písku (Houzar et al. 2008). Tellurid se zde vyskytoval jako drobné nepravidelné agregáty (1–5  $\mu\text{m}$ ) v mikrotrhlinách arzenopyritu. Analyzované fáze z obou lokalit spadají do série  $\text{Bi}_5\text{X}_3$  dle klasifikace Gu et al. (2001), kde X je Te, S, Se. Vzorek z Kamenných Dolů má ovšem vzorec  $(\text{Bi}_{4,51}\text{Fe}_{0,40}\text{Cd}_{0,03}\text{Pb}_{0,02}\text{Sb}_{0,01}\text{As}_{0,01})\Sigma_{4,98}(\text{Te}_{1,58}\text{S}_{1,36}\text{Se}_{0,08})\Sigma_{3,02}$ , z čehož je patrné, že nově nalezený vzorek z Borů obsahuje menší množství síry (0,74 apfu) a dal by se podle této klasifikace označit jako Bi-tellurid, naopak vzorek z Kamenných Dolů obsahuje více síry (1,36 apfu) a nese označení Bi-sulfo-tellurid. Obsahy Bi a Cd jsou u obou téměř shodné, liší se v příměsi Fe, která v Borech činí pouze stopové množství (0,19 apfu). Dále se odlišují v obsahu stopových příměsí, kde v Borech se jako příměsi vyskytují Ni, Co a Zn, naopak v Kamenných Dolech je to Pb, Sb, As.

Rudní minerály v námi studovaném cordieritickém pegmatitu vznikaly v posloupnosti löllingit s telluridovými inkluzemi – arzenopyrit–pyrit. Minerální sukcese tedy vypovídá o změně aktivit S a As, kdy v průběhu krystalizace S přibývá na úkor As. Tento trend lze dokumentovat i na základě studia chemismu růstově zonálních agregátů arzenopyritu.

### Poděkování

Autoři děkují P. Tománkové za pomoc při odběru vzorků. Práce byla finančně podpořena granty GAČR 205/07/P130 a IGA UP PrF/2011/010.