

Геол. ан. Балк. полуос. Ann. Géol. Penins. Balk.	63 (1999)	253-268	Београд, децембар 2000 Belgrade, Decembre 2000
---	-----------	---------	---

UDC (УДК) 552.2:553.43(497.11-11)

Original scientific paper
Оригинални научни рад

GEOLOGY AND PARAGENETIC RELATIONSHIPS OF THE BREZANIK COPPER DEPOSIT (BOR, EASTERN SERBIA)

by

Petar Zarić*, Rade Jelenković* and Boris Vakanjac*

The article describes geologic features and copper mineralization environment of Brezanik deposit. Morphostructural types of ore, mineral concentrations in ore bodies, modes of the studied mineral species occurrence and ore types are considered. Preliminary inferences are given on the model of the formation and its sequence for the observed mineral parageneses.

Key words: copper, covellite, pyrite, mineralization, paragenetic relationships, Brezanik, Bor, eastern Serbia.

У раду се даје приказ геолошких карактеристика и средине стварања минерализације бакра у лежишту Брезаник. Посебна пажња се посвећује анализи морфоструктурних типова орудњења, степену концентрисаности минерала у рудиним телима, видовима појављивања анализираних минералних врста као и типовима руда. Доносе се прелиминарни закључци о моделу стварања образовања и редоследу стварања уочених минералних парагенеза.

Кључне речи: бакар, ковелин, пирит, руда, минерализација, парагенетски односи, Брезаник, Бор, источна Србија.

INTRODUCTION

The deposit (ore body, in Janković, 1990) is a part of the central deposit of the Bor ore field, characterised by a relatively simple structure similar to that of any other copper body of the same metallogenetic unit, described in detail by many mineralogists.

Complete descriptions of the structural and geologic features of the mineralization environment, the facial configuration of hydrothermal alterations and metallogenetic character of mineralization are found in Bogdanović (1969), Miličić & Grujičić (1979), Mišković (1979), Janković et al. (1980), Janković (1990), and some others.

* University of Belgrade, Faculty of Mining and Geology, Djušina 7, 11000 Belgrade.

GEOLOGY OF BREZANIK DEPOSIT

The principal lithologic members of the Brezanik copper deposit area are hydrothermally altered andesites and pyroclastics of hornblende–biotite andesites. A dominant structural characteristics of the ore mineralization environment is the presence of several fissure systems, the most developed being fractures in NNW–SSE direction. Rocks prevailing in the central part of the deposit are hornblende biotite andesites and their pyroclastic equivalents; in the eastern, Bor pelites and sandstones; in western, Bor pelites, andesite breccias, and tuffs, and subordinately quartz diorite porphyrite intrusions and limestones altered into skarn at the contact.

Ore minerals directly occur in propylitised andesites, pyroclastics, and hydrothermally altered andesites intersected by quartz veins and veins with gypsum and anhydrite. The propylitised andesites and pyroclastics are basically characterised by extensive pyritisation which is associated with the processes of igneous activity, and hydrothermally altered rocks associated with volcanic vents. Spatial distributions of copper–mineralised rocks is controlled by the mentioned geologic features which will be briefly described in this article.

Propylitised andesites consist largely of kaolinised plagioclase phenocrysts, altered coloured minerals (by prevailing chloritisation and epidotisation) with sparse magnetite, and the groundmass of fine crystalline quartz, illite, chlorite, and carbonate. The rock is holocrystalline porphyritic in structure. The hydrothermally altered rocks of completely changed primary composition and textural and structural properties consist of finegrained quartz, sericite, anhydrite, chlorite, some other mineral species, and idiomorphic grains of metallic minerals.

Piroclasts are composed of calcite fragments, hydrothermally altered andesites, metallic minerals, and prevailing anhydrite, illite, and chlorite. Their structure is lithoclastic. Quartz veins are composed dominantly of quartz, and subordinately of anhydrite, chlorite, and illite, impregnated by metallic minerals; veins with gypsum are composed of gypsum, anhydrite, chlorite, and metallic minerals.

The largest part of rock complexes, with which mineral ores are directly associated, have changed their primary mineral composition in reaction with the hydrothermal solutions. Notable among the alteration facies are: chloritisation, kaolinisation followed by local sericitisation, pyritisation, silicification, and sulphatisation, which exhibit certain, both vertical and lateral, zoning in their spatial distribution. Silicification is principally directly associated with mineralization, it is followed by kaolinisation (locally sericitisation as well), laterally alternating with chloritisation and carbonatisation facies. The types of alterations observed from the surface downward are: (a) from the surface to the depth of about 200 m, pyroclastic chloritised and pyritised hornblende–biotite andesite; (b) kaolinization zone from a few to 10 m thick; (c) zone of advanced chloritisation and subordinate kaolinization and pyritisation, 10 to 50 m thick; (d) zone of kaolinised andesites variable in thickness; (e) silicification and pyritisation zone with copper mineral (ore zone); (f) kaolinisation zone with chloritisation, and deep (g) chloritisation and the presence of large epidotes. The deepest ore levels consist of tectonic clays at the Bor fault level.

Chloritisation of variable occurrence intensity is extensive in the deposit. It alters pyroclastic rocks and andesites in two modes: one is the reaction of hydrothermal solutions with the femic minerals of rocks, and the other with the entire rock mass.

Kaolinisation is noted in three different types of formation. Hydrothermal, the commonest type is noted throughout the deposit, more advanced on its margin. The altered rocks are phenocrysts, almost completely, and groundmass. Another type of kaolinisation forms a narrow belt in the ore body and andesite contact zone. The third type is associated with tectonic displacement of rock blocks in the deposit and in the neighbouring rocks.

Silicification is also extensive and intensive within the deposit and the adjacent rocks. It occurs in three modes: intensive where entire rock has been altered, in fractures and fissures mainly on the deposit margin, and relict in rock where hydrothermal solutions leached most of the primary rock constituents.

Sulphatisation products are gypsum and anhydrite veins in rock fractures. It is more developed on the ore body margin. Generally, anhydrite formation is younger than the ore mineralisation. Copper ore bodies bear marginally anhydrites and locally thin galena and sphalerite veins.

Pyritisation is extensive, associated with other alterations.

MORPHOLOGY OF ORE BODIES AND ORE-MINERAL GRADE

Morphologic features of the Brezanik deposit ore bodies are the result of filling fractures and fissures in hydrothermally altered and propylitised andesites and pyroclasts which had not been significantly deformed in the pre-ore stage of the structural transformation. Controlled by the fissure systems of NNW-SSE trend and subvertical dip, the prevailing mineral occurrences are of vein-impregnation, partly vein and stockwork (stockwork-impregnation) types. Megascopically, the systems of mineralized fractures and fissures of up to 20 cm, and single veins and lenses form a number of subparallel ore zones of up to 150 m in length and to 350 m in depth. Marginal parts of the ore zones bear dominantly pyrite impregnations in silicified andesites. Minor lenses, or nests of massive sulphides, occur locally in the ore zones.

Mineral composition of the Brezanik ore zones is relatively simple. The essential mineral species are pyrite and copper sulphides: chalcopyrite, enargite, bornite, chalcocite, and covellite, assembled with many non-mineral, both hydrothermal and relict rocks mineral. Divided by the grade in the deposit, the modes of mineralization are the following:

(a) Predominant **veinlets** and **veinlets-impregnation**, localised in hydrothermally altered andesites (associations: 1. pyrite-covellite-quartz, 2. pyrite-quartz, and 3. enargite-pyrite-covellite) and partly in quartz veins (associations: 1. pyrite-covellite-quartz and 3. enargite-pyrite-covellite);

(b) Subordinate **impregnation**, localised mainly in hydrothermally altered andesites, represented by single grains of pyrite, covellite, rarely chalcopyrite, and pyrite-chalcopyrite aggregates.

(c) **Stockwork** and **stockwork-impregnation**, similar in composition with a; its distribution is limited to the much deformed cataclastic parts of the deposit; and

(d) **Massive**, but less developed than the former three modes.

It is represented by 1. pyrite-enargite assemblages with or without covellite and quartz, 2. pyrite-bornite assemblages with or without chalcocite, chalcopyrite, colusite, quartz, and gypsum, and 3. pyrite-covellite assemblages with quartz and gypsum.

The highest associated non-ore minerals are quartz and anhydrite, or gypsum.

MINERAL ORE OCCURRENCES

The predominant mineral in the Brezanik copper deposit is **pyrite**, which occurs in several generations. In respect of the time of formation and the relation to the mineral association these are: first generation of pyrite, associated with the processes of regional rock pyritisation that preceded the ore mineralization stage, and second, associated with copper mineralization. Pyrite, found in association with copper sulphides is commonly shapeless, partly recrystallised and cataclastic. In an ore mass, it forms irregular concentrations in small nests. Less frequently, it is idiomorphic, tens of μm in size, developed both in groundmass and in fracture/fissure systems. It is found in all characteristic ore associations (covellite–pyrite, bornite, chalcocite–pyrite, enargite–pyrite), and rarely unassociated (Fig. 1a). It is often developed on replaced hornblende and other femic minerals now chloritised, and sometimes as aggregate with leucoxene.

As to its crystallomorphic character, pyrite is known as granular idiomorphic in impregnations, granular xenomorphic in association with bornite in massive ore, and metagranular with covellite, or bornite, in massive ore. It is also cataclastic in impregnations, or in veins with quartz and covellite, or with enargite, covellite, and quartz, and in association with bornite.

Chalcopyrite is relatively a scarce mineral in the deposit. It is principally associated with other sulphides, usually pyrite (aggregate in hydrothermally altered andesites), or unassociated forming veinlets, veins and single grains of tens of μm in size, sometimes developed on femic minerals of rocks. It is its mode of occurrence that chalcopyrite cannot be assigned to the group of typomorphic minerals of Brezanik deposit (Fig. 1b). In massive sulphide mineralization, it relatively rarely forms structures of solid solution decomposition with bornite in the association bornite–pyrite±chalcocite, colusite, quartz, and gypsum.

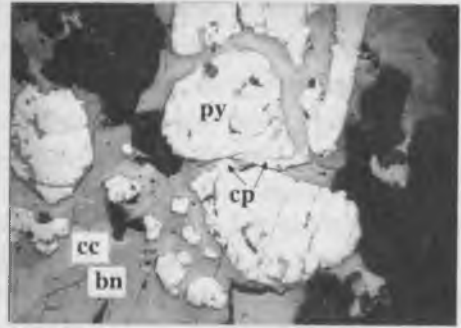
Enargite is widespread in Brezanik deposit, but it rarely forms significant concentrations. Its distribution is limited to the highly hydrothermally altered andesites, where it forms impregnations or veinlets. It is always associated with pyrite and with quartz cementing them (Fig. 1c). Cataclastic enargite is noted in place, particularly where in large aggregates. Covellite has precipitated in fractures and interstices of rock fragments. The relationship of enargite with other minerals of the deposit suggests its precedence to the bornite–chalcocite paragenesis.

Fig. 1. Characteristic patterns of mineral ore occurrences in Brezanik copper deposit: a. Idiomorphic pyrite grains in altered andesite (80 \times , II N); b. Chalcopyrite replacements in bornite (between two pyrite grains; 80 \times , II N); c. Cataclastic enargite with pyrite (80 \times , II N); d. Decomposition of solid chalcopyrite–bornite solution (30 \times , II N); e. Chalcocite–bornite (80 \times , II N); f. Younger covellite phase cementing cataclastic enargite and pyrite (80 \times , II N); g. Covellite associated with pyrite (80 \times , II N); h. Cataclastic pyrite associated with covellite (30 \times , II N). Symbols: py– pyrite, cv– covellite, cc– chalcocite, bn– bornite, en– enargite, cp– chalcopyrite.

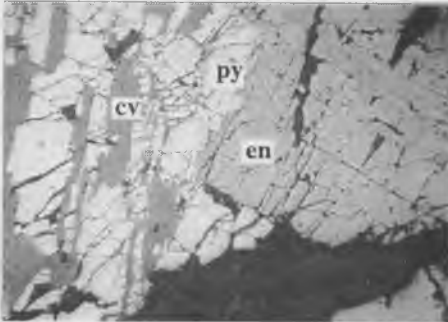
Сл. 1. Карактеристични облици појављивања рудних минерала у лежишту бакра Брезаник: а. идиоморфна зрна пирита у алтерисаном андезити (80 \times , II N); б. издвајања халкопирита у боршиту (између два зрна пирита (80 \times , II N); в. катаклазираани снaргити са пиритом (80 \times , II N); д. распад чврстог раствора халкозин–борнит (30 \times , II N); е. халкозин–борнит (80 \times , II N); ф. млађа фаза ковелина цементује катаклазираис снaргите и шпирите (80 \times , II N); г. ковелин у асоцијацији са пиритом (80 \times , II N); х. катаклазираани пирити у асоцијацији са ковелином (30 \times , II N). Символи: py– пирит, cv– ковелин, cc– халкозин, bn–борнит, en– снaргит, cp– халкопирит.



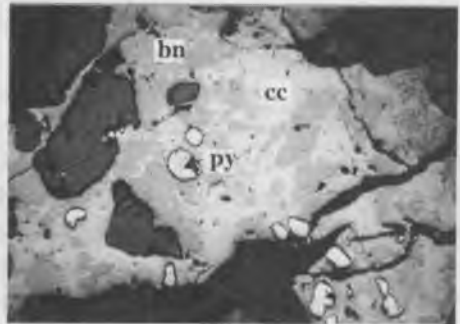
a



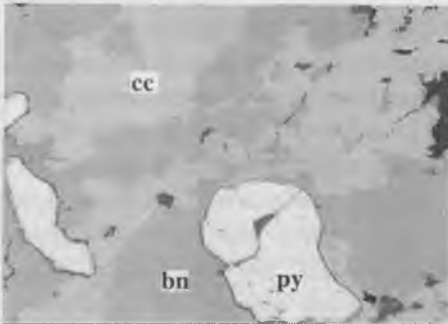
b



c



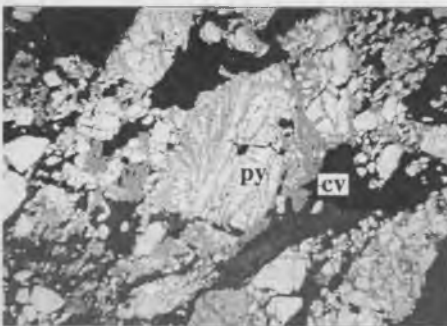
d



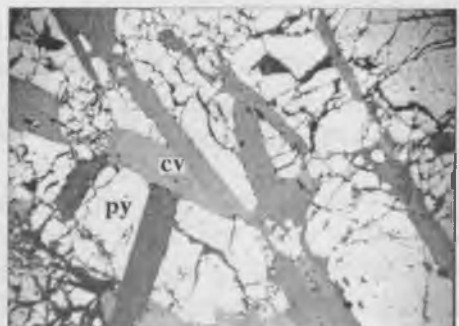
e



f



g



h

Bornite has precipitated in Brezanik deposit as the cement of cataclastic pyrite (association pyrite–bornite±chalcocite, chalcopyrite, quartz, gypsum) or in the form of decomposed solid solution with chalcocite also cementing cataclastic pyrite grains (association bornite–chalcocite from the group bornite–pyrite±chalcocite, chalcopyrite, colusite, quartz, gypsum) (Fig. 1d). It is always associated with quartz and, very rarely, in paragenesis with chalcocite and colusite (?). Occasionally, it forms thin veins with chalcopyrite. It was found in the basal part of the deposit and in quartz vein uncovered at IX–XI level.

Chalcocite has precipitated in ore bodies of Brezanik deposit in more than one mode. It has been noted in paragenesis with bornite (solid solution decomposed structure) in association with pyrite of the group bornite–pyrite±chalcocite, chalcopyrite, colusite, quartz, gypsum. A characteristic of this group of minerals is the presence of partly recrystallised and partly cataclastic former gel–pyrite which was formed before the mentioned minerals. According to Djordjevič (1984), chalcocite corrodes and cements cataclastic and partly recrystallised fragments of the same pyrite. Another, frequently found mode of chalcocite occurrence in Brezanik deposit is in association with covellite, always in irregular grains or intersecting varisized veinlets (Fig. 1e).

Covellite is comparatively widespread in the deposit. It occurs in several generation and modes. The older, large flaky covellite is dominant over the younger, usually localised in quartz–pyrite veins. The environment of its occurrence is hydrothermally altered and silicified andesite. Single covellite concentrations and veins with pyrite, quartz, and gypsum, or with chalcocite, pyrite, and quartz with or without gypsum, are dominant in the deposit. It is often associated with pyrite (occasionally forming eutectic texture with it), deposited between cataclasts of pyrite–enargite paragenesis. Also, it is noted in massive pyrite–covellite ore, where it forms columnar nuclei, syngenetic with pyrite. Covellite veins and impregnations in altered andesite, and veinlets of broken pyrite and quartz, to 5 mm wide and a few cm long, have an economic value as well. Covellite is commonly concentrated centrally in veins (Fig. 1f). Texturally, covellite occurs in the mentioned environments as granular xenomorphic (hydrothermally altered andesites), as meta-granular in quartz–anhydrite veins, and in cement associated with pyrite–enargite and pyrite–quartz.

The youngest ore minerals in Brezanik deposit are **galena** and **sphalerite**, which form veins with or without anhydrite or single grains/aggregates in fractures and fissures of the deposit.

Rutile and **leucoxene** also occur in the deposit, but their value is inferior. Rutile is mostly granular, idiomorphic, developed near or at the contact with pyrite mineral, varying in size within 10–30 μm . Leucoxene is scarcer than rutile. It forms irregular patches, sometimes with rutile in patch centre.

ORE TYPES

On the basis of the above descriptions of mineral composition and interrelationship of minerals and their concentrations in the studied ore bodies, the classified ore types of the Brezanik deposit are the following: 1. dominant **pyrite–covellite** with or without

quartz, gypsum, and anhydrite; 2. **pyrite** with scarce chalcopyrite, rutile, and leucoxene; 3. **pyrite**, and enargite with or without quartz, covellite, gypsum, and anhydrite; 4. **pyrite–chalcocite–covellite**; and 5. **pyrite–bornite**, with chalcocite and scarce chalcopyrite. Geological and economic characteristics of the ores, represented by the grade of ore–mineral content, environment and mode of occurrence, are the following:

The first type of ore is of the highest importance. Its distribution is limited to the hydrothermally highly altered andesites and less to quartz, gypsum, and anhydrite veins. This type of ore occurs in the deposit in several modes: (1) Veinlets and veins, less than 1 cm thick, of cataclastic pyrite and covellite cement. The veinlets centrally contain quartz, but not always; (2) Pyrite and covellite impregnations in rocks. Irregular covellite grains mostly form ellipsoid, nodular or veinous assemblages, whereas pyrite is disseminated in the groundmass; (3) Pyrite and covellite are developed in irregular metablasts.

The second type of ore is less abundant than the first type. It largely occurs in hydrothermally altered andesites; portions of andesite enclaves relicts of replaced feldspar minerals.

The third type of ore (pyrite with enargite, with or without quartz, covellite, gypsum, and anhydrite) is not much widespread in the deposit. It is massive, primarily without covellite. Quartz, pyrite, and enargite form aggregates of the 10 mm or less, replacing each other; quartz mainly fills spaces between ore minerals. In places, this type of mineral body got subsequently broken and sometimes cemented by younger covellite.

The fourth, pyrite–chalcocite–covellite type of ore is found in altered andesites, characteristically scarce in the deposit.

Analogous to the fourth, the fifth type of ore (pyrite–bornite with chalcocite and some chalcopyrite) has a small distribution and economic value. It occurs mainly in quartz veins with gypsum. The dominant mineral in this type of ore is bornite, locally developed chalcocite in the structures of solid solution decomposition. The minerals cement cataclastic pyrite grains. The ore contains sparsely chalcopyrite as a product of solid solution decomposition in bornite or as a halo of dispersion around pyrite grains.

ORE FORMATION MODEL, STAGED ORE MINERAL FORMATION

Preliminary inferences on the environment of ore–mineral occurrence, i.e. the metallogenetic analysis of the study region, on the morphostructural types of ores, the grade of ore–mineral concentrations in ore bodies, and the modes of occurrence of the given mineral species lead to the conclusions about the formation of the deposit and the present mineral paragenesis.

The pre–ore phase was the time when the Timok magmatic complex completed its structural and geological transformation and spatial localisation. Its origin is regionally associated with rift structures (horst/grabens) formed over the subduction area of the oceanic lithosphere (Karamata, 1974; Jankovič, 1989, 1990). The direct geological environment of the ore occurrence consists of volcanogenic intrusive complexes of calc–alkalic magma, associated vein equivalents of these rocks, and volcanic–sedimentary group. Magma was repeatedly extruded through linear, and locally central, volcanic vents. As a result of intensive hydrothermal activity, synchronous with and subsequent to vol-

canogenic intrusions, Brezanik deposit was formed as a part of Bor ore field (Janković et al., 1995).

The deposit itself formed through at least two phases: (a) pre-ore, when the interaction of magmatic gases and vapour and volcanogenic rocks resulted in intensive pyritisation and silification of country rocks, accompanied by relatively low copper concentration (acid environment, from high sulphur fugacity), and (b) ore, evolved in a number of subphases. The resulting ores of Brezanik deposit are characterised by relatively simple mineral compositions and complex paragenetic relationship. The composition and occurrence of ores are controlled by multiple pulsating hydrothermal flow which deposited ore minerals, and by complex physical and chemical conditions that prevailed in pre-, intra-, and post-ore periods. Hence, generally scrutinized, the general model of copper ore formation includes the following elements: the primary source of ore metals is calco-alkalic magma of the Upper Cretaceous, with the mobilisation and transfer of ore components performed by fluids of high sulphur fugacity. The mentioned solutions had a multiple effect on the environment, as evinced by the alteration products and the succession of mineral formation, their parageneses. Ore minerals are deposited at subvolcanic levels, in environments where the dominant factor for ore formation was process of secondary boiling caused by abrupt pressure decrease. The process liberated CO_2 and H_2S from the solution, decreased the acidity and provided for interaction between metals and S^{2-} and HS^- ions, which led to sulphide precipitation (Vakanjac & Jelenković, 1998). From the aspect of physical and chemical properties of hydrothermal fluids, the mineral associations of Brezanik deposit was principally deposited at low pH potential, in mildly reductional environment, where relative Fe^{2+} and Cu-complex ratios and oxygen fugacity were variable.

The first stage of hydrothermal action was synchronous with the geologic cycle of andesite formation and structural transformation of the environment (fracturing-fissuring) in which ore minerals were deposited in Brezanik deposit area. The hydrothermal action caused a process of regional alteration, which led to conversion of most of the petrogenic elements, removal of sodium, potassium, liberation of iron and silica and their redistribution. Consequently, new, empty spaces formed in the hydrothermally altered propylitised andesites and pyroclastics for regional pyritisation, and in the high-temperature oxide stage for extensive neorutilisation.

The second-stage action of hydrothermal solutions continued to alter volcanic rocks, with intensive silification and deposition of dominantly pyrite and enargite. The subsequent stage was that of intra-ore tectonics manifested in the development of fracture and fissure systems and pyrite-enargite, bornite and bornite-chalcocite mineralizations with minor chalcopyrite segregation. New generation of pyrite accompanied by quartz, barite, anhydrite and gypsum veins formed, locally associated with PbS and ZnS, in narrowly localised spaces of deposit. Continual extensive intra-ore deformations controlled the deposition of economic most significant mass of ore minerals (covellite and covellite with syngenetic pyrite).

The association of minerals thus formed in the Brezanik deposit general area includes pyrite, associated with the process of regional andesite pyritisation and propylitisation, with the formation of accessory neorutile as a result of decreased sulphur fugacity. The

formation of these minerals was succeeded by the activity of hydrothermal ore-bearing solutions from which, in suitably highly deformed environment and under favourable physical and chemical conditions, deposited the following ore parageneses: (1) **pyrite, enargite**, (2a) **pyrite-enargite**, (2b) **bornite and bornite-chalcocite \pm quartz, gypsum, and anhydrite (minor chalcopyrite)**, (3) **pyrite, quartz, barite, anhydrite, gypsum \pm PbS, ZnS**, and (4) **covellite and covellite with pyrite**.

REFERENCES-LITERATURA

- Bogdanović P., 1969: Geologija i tektonika šire okoline rudnika bakra "Bor" sa osvrtom na Cu mineralizaciju.- Vesn. Zav. za geol. i geofiz. istraživanja, A, 27, 21-49, Beograd (in Serbian).
- Djordjević G., 1984: Mineraloška studija ležišta bakra Breznik.- Int. izv. FSD Instituta za bakar Bor, 1-46, Bor (in Serbian, unpublished).
- Janković S., 1989: Types of copper deposits related to volcanic environment in the Bor district, Yugoslavia.- Int. Symp. "Mineral deposits". Geol. Verein. Mountain-Universität, 79/2, 467-478 Leoben.
- Janković S., 1990: The ore deposits of Serbia: Regional metallogenic settings, environments of deposition, and types.- Rud.-geol. fak., 1-760, Beograd (in Serbian, English summary).
- Janković S., Karamata S. & Jelenković R., 1995: Genetic model of the Bor deposit - UNESCO-IGCP No. 356., Plate tectonic aspects of Alpine metallogeny in the Carpatho-Balkan region, 3rd Annual Meeting, Athens, Greece, 18-19 September 1995; Book of abstracts, p. 11, Athens.
- Janković S., Terzić M., Aleksić D. & Miletić D., 1980: Metallogenic features of copper deposits in the volcano-intrusive complexes of the Bor district, Yugoslavia. In: S. Janković and R. H. Sillitoe (Eds.) European Copper Deposits.- SGA Spec. Publ. No. 1 and Dept. Econ. Geol., Min. geol. fac. 42-49, Belgrade.
- Karamata S., 1974: Geological development of our area: Characters and moving of some plates and significance of those features for metallogeny.- In: Metallogeny and concepts of geotectonic development of Yugoslavia. Rud.-geol. fak., 89-98, Beograd (in Serbian, English summary).
- Miličić M. & Grujičić B., 1979: Metallogenic characteristics of Bor ore field.- Int. Symp. "The European Copper Deposits", 82-104, Bor (in Serbian, English summary).
- Mišković V., 1979: Kontrolni faktori razmeštaja rudnih tela u okviru borskog rudišta.- Magistarska teza, Rud.-geol. fak., 1-38, Beograd (in Serbian, unpublished).
- Vakanjac B. & Jelenković R., 1998: Some typogenetic characteristics of enargite (and louzonite) from some ore deposits of the western part of the Bor metallogenic zone - 13. Kongres geologa Jugoslavije, SGD Jugoslavije, Crnogorsko geološko društvo, Knj. 4: Mineralne sirovine, 31-41, Herceg Novi (in Serbian, English summary).

РЕЗИМЕ

ГЕОЛОШКЕ КАРАКТЕРИСТИКЕ И ПАРАГЕНЕТСКИ ОДНОСИ У ЛЕЖИШТУ БАКРА "БРЕЗНИК" (БОР, ИСТОЧНА СРБИЈА)

У раду се даје приказ средине стварања и пратећих процеса образовања оруђења бакра у лежишту Брезник, допуњен приказом специфичности типова руда, минерализације и парagenетских односа најзначајнијих рудних компоненти. Само лежиште (рудно тело по Јанковићу, 1990) представља саставни део Централног рудишта рудног поља Бор, а карактерише се релативно једноставном структурно-геолошком грађом специфичном за друга оруђења бакра у поменутој металогенетској јединици, детаљно описаном у радовима бројних истраживача.

Најпотпунији приказ структурно–геолошког уобличавања средине стварања орудњења, просторног размештаја фазија хидротермалних алтерација и металогенетских карактеристика рудне минерализације налази се у радовима Bogdanović (1969), Miličić & Grujičić (1979), Mišković (1979), Janković et al. (1980), Janković (1990) и других истраживача.

ГЕОЛОШКА ГРАЂА ЛЕЖИШТА "БРЕЗАНИК"

Основни литолошки чланови у грађи ширег подручја лежишта бакра "Брезаник" су хидротермално промењени андезити и пирокластити хорнбленда–биотитских андезита. Доминантно структурно обележје средине у којој се налази рудна минерализација, чини присуство већег број система пукотина међу којима су најзаступљеније руптуре пружања ССЗ–ЈЈИ. У централном делу лежишта доминирају хорнбленда биотитски андезити и њихови пирокластични еквиваленти, у источном борски конгломерати и пешчари, у западном делу борски пелити, андезитске брече и туфови као и, мањим делом, пробоји кварцдиорит порфирита и кречњаци који су на контактима са истим скарнизирани.

Непосредну средину појављивања рудне минерализације чине пропицитисани андезити, пирокластити и хидротермално измењени андезити испресецани кварцним жицама, као и жицама са гипсом и анхидритом. Основна карактеристика пропицитисаних андезита и пирокластита је екстензивно развијена пиритизација чије се стварање може довести у везу са процесима вулканске активности, а хидротермално измењених стена са структурама вулканских апарата. С обзиром на чињеницу да је просторни размештај већег дела минерализације бакра контролисан положајем поменутих геолошких творевина, у даљем тексту рада укратко ћемо приказати њихове карактеристике.

Пропицитисани андезити су изграђени од претежно каолинисаних фенокристала плагиокласа, алтерисаних бојених минерала (хлоритизација и епидотизација преовлађују) са ретким магнетитом, док се основна маса стене састоји од ситнокристаластог кварца, илита, хлорита и карбоната. Структуре су холокристаласто порфирске. Хидротермално измењене стене потпуно измењеног примарног састава и структурно–тектурних карактеристика, су изграђене од ситнозрног кварца, серицита, анхидрита, хлорита и других минералних врста, као и идиоморфних зрна металичних минерала.

Пирокластити су изграђени од фрагмената калцита, затим хидротермално измењених андезита, металичних минерала и преовлађујућег анхидрита, илита и хлорита. Структуре су литокластичне. У саставу кварцних жица доминирају кварц, подређено анхидрит, хлорит и илит са импрегнацијама металичних минерала, а у жицама са гипсом – гипс, анхидрит, хлорит и металични минерали.

Највећи део стенских комплекса за које је рудна минерализација непосредно везана, претрпео је под утицајем хидротермалних раствора интензивне промене примарног минералног састава. Међу фазијама алтерација се истичу: хлоритизација, затим каолинизација са локалном серицитизацијом, пиритизација, силификација и сулфатизација, при чему се у њиховом просторном размештају, како у вертикалној равни, тако и латерално запажа одређена зоналност. Огледа се у следећем: силификација је најчешће непосредно везана са орудњењем; праћена је каолинисањем (местимично и серицитисањем), латерално се мењајући са фазијама хлоритизације и карбонитизације. Посматрано од површине терена ка дубљим нивоима лежишта, уочене су следеће врсте промена: (а) од површине до дубине приближно 200 м налази

се пирокластични хлоритисан и пиритисан хорнбленда–биотитски андезит, затим (б) зона каолинизације дебљине од неколико до 10 m, (в) зона са интензивном хлоритизацијом и са подређеном каолинизацијом и пиритизацијом чија је дебљина 10–50 m, (г) зона каолинисаних андезита променљиве дебљине у различитим деловима лежишта, (д) зона силификације и пиритизације са орудњењем бакра (рудна зона), (ђ) зона каолинизације са хлоритизацијом и, у дубљим деловима, (е) хлоритизација са присуством крупних епидота. У најнижим нивоима рудишта се налазе тектонске глине у нивоу борског раседа.

Хлоритизација различитог интензитета је екстензивно развијена у домену рудишта. Захвата пирокластичне стене и андезите, а испољава се на два начина: као последица активности хидротермалних раствора на фемске минерале стена у првом и, у другом случају, када захвата целу масу стене.

Каолинизација је констатована у три, по начину постанка међусобно различита типа. Хидротермална, уједно и најзаступљенија, се уочава у домену целог рудишта; најизраженија је, међутим, у његовим ободним деловима. Захвата како фенокристале, најчешће их потпуно трансформишући, тако и основну масу стене. Други тип каолинизације чини уски појас у зони контакта рудних тела и андезита, док је трећи тип исте везан за тектонска кретања стенских блокова у лежишту и околним стенама.

Силификација је такође екстензивна и интензивно је развијена у домену лежишта и околних стена. Манифестује се на више различитих начина: као интензивна, када захвата целу стену, затим пукотинско–прслинска, најчешће у периферним деловима лежишта и везана за активност хидротермалних раствора који су излучили већину осталих компоненти матичне стене.

Сулфатизација је представљена гипсним и анхидритским жицама у оквиру пукотинских система у стенској маси. Нарочито је развијена у ободним деловима рудног тела. У општем случају стварање анхидрита је млађе од рудне минерализације. Са анхидритима се, по ободу рудних тела, јављају местимично и танке жичице галенита и сфалерита.

Пиритизација је екстензивно развијена и јавља се у заједници са другим видовима промена.

МОРФОЛОШКЕ КАРАКТЕРИСТИКЕ РУДНИХ ТЕЛА И СТЕПЕН КОНЦЕНТРИСАНОСТИ РУДНИХ МИНЕРАЛА

Морфолошке карактеристике рудних тела у оквиру лежишта Брезаник представљају последицу запуњавања пукотинско–прслинских система у хидротермално алтерисаним и пропицитисаним андезитима и пирокластитима који у прерудном стадијуму структурно–тектонског уобличавања терена нису претрпели интензивна кретања стенских маса. Будући да су поменути руптурни системи претежно оријентисани правцем ССЗ–ЈЈИ и субвертикалног пада, у лежишту преовлађују жиличасто–импрегнациони, делом жични и штокверкни (штокверкно–импрегнациони) типови орудњења. Посматрано на макро плану, поменути системи минерализованих прслина и пукотина чије размере достижу и до 20 cm, заједно са појединачним жицама и сочивима граде већи број субпаралелних рудних зона дужине до 150 m чији вертикални интервал распрострањења достиже и до 350 m. У периферним деловима ових рудних зона, најчешће у силификованим андезитима, преовлађују импрегнације пирита. Карактеристично је да се у појединим деловима ових рудних зона налазе и мања сочива, односно гнезда масивних сулфида.

Минерални састав рудних зона у лежишту Брезаник је релативно једноставан. Доминантне минералне врсте су: пирит и сулфиди бабра: халкопирит, енаргит, борнит, халкозин и ковелин. Они су праћени низом нерудних како хидротермалних, тако и реликтних минерала стена. Са аспекта степена концентрисаности у домену лежишта могуће је издвојити следеће типове орудњења:

(а) Преовлађујући **жиличасти и жилично-импрегнациони** тип, локализован у хидротермално измењеним андезитима (асоцијације: 1. пирит-ковелин-кварц, 2. пирит-кварц и 3. енаргит-пирит±ковелин) и делом у кварцним жицама (асоцијације: 1. пирит-ковелин-кварц и 3. енаргит-пирит±ковелин). Затим

(б) Подређени **импрегнациони**, локализован претежно у хидротермално измењеним андезитима а представљен појединачним зрнима пирита, ковелина, врло ретко халкопиритом и агрегатима пирит-халкопирит.

(в) Трећи тип минерализације, **штокверкно-импрегнациони** је по саставу врло сличан типу (а); просторно је ограничен на тектонски интензивно поремећене, катаклазиране делове лежишта. Последњи,

(г) **масивни** тип орудњења, је са аспекта заступљености подређен у односу на претходно поменуте типове. Представљен је: 1. пиритско-енаргитским нагомилањима са или без ковелина и кварца, 2. пирит-борнитским нагомилањима са или без халкозина, халкопирита, колусита, кварца и гипса и 3. пиритско-ковелинским нагомилањима са кварцом и гипсом.

Најзаступљенији нерудни минерали асоцијације су кварц и анхидрит, односно гипс.

ВИДОВИ ПОЈАВЉИВАЊА РУДНЕ МИНЕРАЛИЗАЦИЈЕ

Доминантан минерал у лежишту бабра Брезаник је **пирит**. Јавља се у више генерација. Посматрано са становишта времена формирања и везе са рудном асоцијацијом минерала, то су: прва генерација пирита, везана за процесе регионалног пиритисања стена која је претходила фази рудне минерализације и друга, везана за минерализацију бабра. Пирит, који се налази у асоцијацији са сулфидима бабра је најчешће гелни, делимично рекристалисан и катаклазиран. У маси руде гради концентрације неправилног облика и мања гнезда. У ређим случајевима је идиоморфан, димензија до неколико десетина μm , развијен како у основној стенској маси, тако и у пукотинско-прслинским системима. Констатован је у свим карактеристичним рудним асоцијацијама (ковелин-пиритској, борнитској, халкозин-пиритској, енаргит-пиритској), ређе и као самосталан (сл. 1а). Често је развијен по бившој хорнбленди и другим фемским минералима сада хлоритисаним, а ређе и у виду агрегата са леукоксоном.

Пирит је познат као зрнаст идиоморфан у импрегнационом типу орудњења, зрнаст ксеноморфан у асоцијацији са борнитом у масивном типу орудњења и метазрнаст са ковелином, односно са борнитом у масивном типу орудњења. Такође, јавља се и као катакластичан у импрегнационом типу орудњења, затим у жиличастом типу са кварцом и ковелином, потом енаргитом, ковелином и кварцем, и у асоцијацији са борнитом.

Халкопирит је релативно редак минерал у лежишту. У већини случајева се налази у асоцијацији са другим сулфидима, обично са пиритом (агрегати у хидротермално измењеним андезитима) и као самосталан када гради жилице, жице и појединачна зрна димензија до неколико десетина μm , каткад развијен по фемским

минералима стене. Из поменутих разлога халкопирит не може да се уброји у групу карактеристичних минерала лежишта Брезаник (сл. 1b). У масивној сулфидној минерализацији релативно ретко гради структуре распада чврстог раствора са борнитом у асоцијацији борнит–пирит±халкозин, колусит, кварц и гипс.

Енаргит је широко распрострањен минерал у лежишту Брезаник, међутим, ретко образује значајније концентрације. Највећим делом је просторно ограничен на интензивно хидротермално промењене андезитe у којима гради импрегнације и жиличасте тип орудњења. Увек је у асоцијацији са пиритом као и кварцом који их цементује (сл. 1c). У појединим случајевима, посебно када граде агрегате крупнијих размера, може се уочити појава њиховог катаклазирања. У формиране пукотине и међупросторе фрагмената се одлаже ковелин. Анализирајући односе енаргита према другим минералима у лежишту, може се претпоставити да исти претходи борнит–халкозинској парагенези.

Борнит је у лежишту Брезаник депонован као цемент катаклазираних зрна пирита (асоцијација пирит–борнит±халкозин, халкопирит, кварц, гипс) и у виду распада чврстог раствора са халкозином када, такође, цементује катаклазирана зрна пирита (асоцијација борнит–халкозин из групе борнит–пирит±халкозин, халкопирит, колусит, кварц, гипс) (сл. 1d). Редовно је праћен кварцом и врло ретко са халкозином и колуситом (?). Каткад гради и танке жилице са халкопиритом. Нашим испитивањима је констатован у подинском делу лежишта и у кварцним жицама откривеним на IX–XI хоризонту.

Халкозин се у рудним телима лежишта Брезаник депонује на више различитих начина. Уочен је у асоцијацији са борнитом (структура распада чврстог раствора) у асоцијацији са пиритом, односно групи борнит–пирит±халкозин, халкопирит, колусит, кварц, гипс (сл. 1e). Карактеристично обележје поменуте групе минерала је присуство делимично рекристалисаних и, делом, катаклазираних бивших гел–пирита који су по времену формирања старији од поменутих минерала. По Djordjević (1984) халкозин кородује и цементује катаклазиране и делимично рекристалисане фрагменте истог пирита. Осим поменутог облика халкозин се у лежишту Брезаник налази и у асоцијацији са ковелином. У поменутом случају, јавља се у виду зрна неправилног облика или укрштених жилица променљивих размера.

Ковелин је релативно широко распрострањен у лежишту. Јавља се у више генерација и облика појављивања. Доминирају, љуспичаст ковелин крупнијих размера и ситнији, обично локализован у рудним кварцно–пиритским жицама. Геолошку средину њиховог појављивања чине хидротермално измењени и силификовани андезити. Самосталне концентрације ковелина и жице са пиритом, кварцем и гипсом или са халкозином, пиритом и кварцом са или без гипса, доминирају у лежишту. Чест је у асоцијацији са пиритом, депонован у међупросторима парагенезе пирит–енаргит. Такође, уочен је и у масивним пиритско–ковелинским рудама у којима гради приткасте индивидуе, сингенетске са пиритом. Економски значај имају и жилице и импрегнације ковелина у алтерисаном андезиту као и прожилци изграђени од катаклазираног пирита и кварца, ширине до 5 mm, дужине до неколико cm. Ковелин се обично концентрише у њиховим централним деловима (сл. 1f). Посматрано са аспекта структурних карактеристика, ковелин се у претходно поменутих срединама јавља као зрнаст ксеноформан (хидротермално измењени андезити), као метакристаласт у кварц–анхидритским жицама и у цементационим структурама у асоцијацији пирит–енаргит и пирит–кварц.

Најмлађи рудни минерали у лежишту Брезаник су **галенит** и **сфалерит**. Јављају се у виду жилица са или без анхидрита и као самостална зрна/агрегати у пукотинско–прслинским системима лежишта.

Осим набројаних рудних минерала, подређени значај у лежишту имају **рутил** и **леукоксен**. Први је најчешће зрнаст, идиобластичан, развијен у близини или на контакту са пиритском минерализацијом. Димензија је 10–30 μm . Леукоксен је нешто ређи од рутила. Развијен је у виду поља неправилне форме, у чијим се централним деловима понекад може да уочи рутил.

ТИПОВИ РУДА

На основу претходно формираног приказа минералног састава орудњења пратеног анализом њихове међусобне повезаности и степена концентрисаности у анализираним рудним телима, у лежишту Брезаник је могуће издвојити следеће типове руда: 1. доминантан **пирит–ковелински** са или без кварца, гипса и анхидрита, 2. **пиритски** са ретким халкопиритом, рутилом и леукоксеном, 3. **пиритски**, са енаргитом са или без кварца, ковелина, гипса и анхидрита, 4. **пирит–халкозин–ковелински** и 5. **пирит–борнитски**, са халкозином и ретким халкопиритом. Њихове основне геолошко–економске карактеристике, представљене степеном заступљености у лежишту, средином локализације и видовима појављивања, су следеће:

Економски најзначајнији је први тип руде. Просторно је ограничен на интензивно хидротермално измењене андезитне и мањим делом, кварцне, гипсне и анхидритске жице. У лежишту се јавља на више начина: 1. У виду жилица и жица дебљине испод 1 cm изграђених од катаклазираног пирита и ковелина који га цементује. У централним деловима жилица се обично налази кварц, али то није и правило; 2. Пирит и ковелин су у виду импрегнација развијени у стенској маси. Зрна ковелина неправилног облика обично су груписана градећи нагомилања елипсасте, гнездасте или жиличасте форме, док је пирит расејан у основној маси стене; 3. Пирит и ковелин су развијени као метабласти неправилног облика.

Други тип руде је нижег степена заступљености у односу на претходно поменути. Средином његовог појављивања највећим делом чине хидротермално измењени андезити, односно делови поменутих стена у којима се уочавају реликти замењених фемских миџерала.

Трећи тип руде (пиритски са енаргитом, са или без кварца, ковелина, гипса и анхидрита) нема велику распрострањеност у лежишту. Масивне је текстуре, примарно без ковелина. Кварц, пирит и енаргит граде агрегате величине и до 10 mm у којима се узајамно замењују, при чему кварц најчешће запуњава међупросторе између рудних минерала. У појединим случајева поменути тип орудњења је накнадно тектонски изломљен, када може бити цементован млађим ковелином.

Четврти, пирит–халкозин–ковелински тип руде је просторно ограничен на алтерисане андезитне. Релативно је редак у лежишту.

Аналогно четвртог, пети тип руде (пирит–борнитски са халкозином и ретким халкопиритом), ограниченог је распрострањења и економског значаја. Средином његовог појављивања, највећим делом, чине кварцне жице са гипсом. Доминантно учешће у овом типу руде има борнит, локално развијен са халкозином у облику распада чврстог раствора. Поменути минерали цементују катаклазирана зрна пирита. У оквиру ове групе каткад је развијен и халкопирит у форми распада чврстог раствора у борниту или као ореол око појединих зрна пирита.

МОДЕЛ ОБРАЗОВАЊА ОРУДЊЕЊА И ФАЗЕ СТВАРАЊА РУДНИХ МИНЕРАЛА

На основи претходно изведених закључака о средини појављивања рудне минерализације, односно металогенетској анализи ширег подручја изучаваног простора, затим морфоструктурним типовима орудњења, степену концентрисаности рудних минерала у рудним телима, видовима појављивања анализираних минералних врста и типовима руда, као прелиминарни могу се извести следећи закључци о стварању лежишта и присутних минералних парагенеза.

У првој фази која је претходила стварању лежишта извршено је структурно–геолошко уобличавање средине његове просторне локализације, односно творевина Тимочког магматског комплексa. Његов настанак се, регионално посматрано, доводи у везу са структурама рифтова (хорст–грабени) формираним изнад субдукционе зоне океанске литосфере (Karamata, 1974; Janković, 1989, 1990). Непосредну геолошку средину појављивања орудњења чине вулканогено–интрузивни комплекси калко–алкалне магне, пратећи жични еквиваленти поменутих магми и вулканогено–седиментне серије. Изливање магне је при томе вршено у више фаза преко вулканских апарата линијског, а на локалном плану, централног типа. Интензивном хидротермалном активношћу, синхронно са вулканогено–интрузивном делатношћу и након ње, у поменутој геолошкој средини, створено је лежиште Брезник као саставни део рудног поља Бор (Janković et al., 1995).

Само лежиште је формирано у најмање две фазе: (а) прерудној, у оквиру које су као резултат међусобног деловања вулканских гасова са вулканитима настале интензивна пиритизација и силификација матичних стена, праћене релативно ниском концентрацијом бакра (кисела средина, оличена високом фугаситом сумпора), и (б) рудној, одиграној у више подфаза. На овај начин формирана орудњења у лежишту Брезник се карактеришу релативно једноставним минералним саставом и сложеним парагенетским односима. Њихове међусобне разлике и специфичности појављивања, условљене су вишефазном, пулсационом активношћу хидротерми из којих је извршено депоновање рудне минерализације, као и сложеним физичко–хемијским условима који су владали у пре–, интра– и пострудном периоду. Отуда, генерално посматрано, општи модел образовања орудњења бакра укључује следеће елементе: примарни извор рудних метала је калко–алкална магма горњокредне старости, при чему су мобилизација и пренос рудних компоненти вршени флуидима са високом фугасношћу сумпора. Поменути раствори су на средину деловали селективно о чему сведоче алтерациони продукти и сукцесија стварања минерала са њиховим парагенезама. Депоновање рудне минерализације је везано за субвулканске нивое, односно средине у којима је доминантан фактор за образовање минералних фаза био процес секундарног кључања узрокован наглим падом притиска. Он је, са своје стране, довео до ослобађања CO_2 и H_2S компоненте из раствора, односно пада киселости и стварања услова за међусобне реакције метала са S^{2-} и HS^- јонима, тј. обарања сулфида (Vakanjac & Jelenković, 1998). Са аспекта физичко–хемијских карактеристика хидротермалних флуида, депоновање минералне асоцијације у лежишту Брезник је већим делом извршено у условима ниских вредности рН потенцијала и у слабо редукционој средини, са променљивим релативним односима Fe^{2+} и Cu –комплекса и фугаситом кисеоника.

Са геолошким циклусом образовања андезита и структурно–тектонским уобличавањем средине (пукотинско–прслинских система) у којој је депонована рудна

минерализација, на простору лежишта Брезаник сингенетски је одиграна прва фаза хидротермалне активности. Она је изазвала процес регионалног алтерисања, што је довело до преображавања већег дела петрогених компоненти, одношења натрије, калије, ослобађања гвожђа и силиције и њиховог прераспоређивања. На овај начин су створени нови, празни простори у хидротермално измењеним пропицитисаним андезитима и пирокластитима и извршена регионална пиритизација, а затим у високотемпературној оксидној фази, екстензивна неорутилизација.

Друга фаза активности хидротермалних раствора даље алтерисхе вулканите, врши се интензивна силификација и депонују доминантни пирит и енаргит. Након ове фазе следи локална интрарудна тектонска активност манифестована стварањем пукотинско-прслинских система са пирит-енаргитском, борнитском и борнит-халкозинском минерализацијом уз депоновање мање количине халкопирита. У уско локализованим просторима лежишта долази до стварања нове генерације пирита, као и жица кварца, барита, анхидрита и гипса, локално праћених PbS и ZnS. Даља, екстензивна интрарудна тектоника, омогућава депоновање економски значајних концентрација рудних минерала (ковелина и ковелина са сингенетским пиритом).

На овај начин, на ширем простору лежишта Брезаник је створена следећа асоцијација минерала: пирит, везан са процесом регионалне пиритизације и пропицитисањем андезита, праћен стварањем неорутила као последица пада фугасита сумпора. После њиховог стварања, уследила је активност хидротермалних рудоносних раствора из којих су у повољној високо теконизованој средини и повољним физичко-хемијским условима, депоноване следеће рудне парагенезе: (1) **пирит, енаргит**, (2а) **пирит-енаргит**, (2б) **борнит и борнит-халкозин±кварц, гипс и анхидрит (ретко халкопирит)**, (3) **пирит, кварц, барит, анхидрит, гипс±PbS, ZnS**, и (4) **ковелин и ковелин са пиритом**.