

NEW DATA ON SILVER-BEARING MINERALISATION IN THE SOUTHERN PERIPHERY OF THE MILIN KAMAK DEPOSIT, WESTERN SREDNA GORA MOUNTAINS

Danail Yovchev, Dian Strahilov

University of Mining and Geology “St. Ivan Rilski”, 1700 Sofia; E-mail: d.yovchev@mgu.bg; d.strahilov@mgu.bg

ABSTRACT. The paper presents new mineralogical data for silver-bearing mineralisation from the southern periphery of the Milin Kamak deposit, Western Sredna Gora Mountains. The study aims to characterise the mineral composition, textural relationships, and relative sequence of mineral deposition in a poorly investigated marginal part of the epithermal hydrothermal system. The mineralisation was studied by reflected-light microscopy and SEM-EDS analyses. Two structural varieties were distinguished: a sphalerite vein and disseminated to locally massive galena-sphalerite mineralisation. The main ore minerals are galena and sphalerite, whereas pyrite, chalcopyrite, and arsenopyrite occur in subordinate amounts. The Ag-bearing sulphosalts are of particular importance; they are represented by minerals of the tennantite–tetrahedrite group, as well as by polybasite and pearceite. Argentotetrahedrite, polybasite, and pearceite are considered newly established mineral phases for the deposit. The observed textural relationships indicate multistage mineral deposition, with quartz representing the earliest gangue mineral, and the Ag-bearing sulphosalts being related to later stages of mineralisation. The obtained data allow the studied mineralisation to be interpreted as Pb–Zn sulphide mineralisation overprinted by later deposition of Ag-bearing sulphosalts. The results complement existing knowledge of the mineral composition and mineral-geochemical zonation of the Milin Kamak deposit and indicate the need for more detailed investigation of silver-bearing mineralisation in its peripheral parts.

Key words: silver-bearing mineralisation; Ag-bearing sulphosalts; argentotetrahedrite; pearceite–polybasite group; Western Sredna Gora Mountains.

НОВИ ДАННИ ЗА СРЕБРОСЪДЪРЖАЩА МИНЕРАЛИЗАЦИЯ В ЮЖНАТА ПЕРИФЕРИЯ НА НАХОДИЩЕ „МИЛИН КАМЪК“, ЗАПАДНО СРЕДНОГОРИЕ

Данаил Йовчев, Диан Страхилов

Минно-геоложки университет „Св. Иван Рилски“, 1700 София

РЕЗЮМЕ. В работата са представени нови минераложки данни за среброносна минерализация от южната периферия на находище „Милин камък“, Западно Средногорие. Изследването е насочено към характеризиране на минералния състав, структурните взаимоотношения и относителната последователност на минералоотлагане в слабо проучен флангов участък на епитермалната хидротермална система. Минерализацията е изучена чрез микроскопски наблюдения в отразена светлина и SEM-EDS анализи. Установени са две текстурни разновидности: сфалеритова жила и впръсната до локално масивна галенит-сфалеритова минерализация. Главните рудни минерали са галенит и сфалерит, а в подчинени количества се установяват пирит, халкопирит и арсенопирит. Особено значение имат Ag-съдържащите сулфосоли, представени от минерали от групата тенантит–тетраедрит, както и от полибазит и пирсеит. Аргентотетраедритът, полибазитът и пирсеитът се разглеждат като новоустановени минерални фази за находището. Структурните взаимоотношения показват многоетапно минералоотлагане, при което кварцът е най-ранно отложените гангов минерал, а Ag-съдържащите сулфосоли са свързани с по-късни етапи на минерализацията. Получените данни позволяват изследваната минерализация да се интерпретира като Pb–Zn сулфидна минерализация, усложнена от по-късно отлагане на Ag-съдържащи сулфосоли. Резултатите допълват представите за минералния състав и минерално-геохимичната зоналност на находище „Милин камък“ и очертават необходимост от по-детайлно изследване на среброносната минерализация в периферните му участъци.

Ключови думи: среброносна минерализация; Ag-съдържащи сулфосоли; аргентотетраедрит; пирсеит–полибазитова група; Западно Средногорие.

Въведение

През последните две десетилетия детайлното проучване и подготовката за промишлено разработване на находище „Милин камък“ доведоха до натрупване на значителен обем нови геоложки, минераложки, геохимични и структурни данни за находището. В резултат на тях се очерта една сложна минераложка, геохимична и структурна конфигурация на орудяването, свързана с еволюцията на умереносулфидна епитермална хидротермална система. Настоящата работа представя нови данни за среброносна минерализация в находището, която към този етап остава слабо изследвана.

В находището Stoykov et al. (2007) установяват минерална асоциация, характерна за нискотемпературни епитермални златни системи. Впоследствие Sabeva et al. (2017) определят минерализацията като златно-сребърна епитермална от умереносулфиден тип, асоциираща с Pb, Zn и Cu, и детайлизира минералогията на находището и хидротермалните изменения. Същите автори отделят три основни хидротермални стадия на минералоотлагане: кварц-пиритов, кварц-полиметален и карбонатно-златен. Познанията за минералния състав на находището са допълнително разширени от Василева и Вангелова (2020),

които представят нови данни за геохимията на главните рудни минерали и формата на свързване на елементите-примеси в пирит, сфалерит, халкопирит и тенантит-тетраедрит. Минералогията на основната рудна зона 1 е разгледана подробно от Nikolova et al. (2019), като са установени допълнителни минерални фази и е уточнено присъствието на сулфосоли и самородно злато.

Наред с минераложките изследвания, важен принос за интерпретацията на орудяването имат структурните и геохимичните модели. Marinov et al. (2018, 2019) разглеждат структурния контрол и факторните геохимични асоциации, като демонстрират, че разпределението на Au, Ag, Pb, Zn, Cu, Sb и As е пространствено нееднородно и е свързано с отделни рудни зони и структурни позиции. Въз основа на тези резултати Nikolova (2022) извършва минераложка интерпретация на геохимичните ореоли и свързва три факторни асоциации с хидротермалните рудообразователни процеси: Factor 6 – ([As] Au) Mn, съответстващ на кварц-полиметалния стадий; Factor 4 – ([Cu, Sb] Bi)+Ag, Pb±As, Fe, Au, Ba, Zn, маркиращ кварц-сулфосолно-пирит-галенит-сфалеритовата асоциация; и Factor 1 – [Cd, Zn, Pb], отразяващ кварц-галенит-сфалеритовата асоциация.

Тези представи са допълнително подкрепени от Nikolova et al. (2026), които чрез едномерен статистически

анализ и корелационни матрици върху геохимични данни от детайлното проучване потвърждават ясно изразена минерално-геохимична зоналност в находището. Авторите установяват, че Pb и Zn достигат максимални съдържания в западния сектор на рудна зона 1, докато Ag, Cu, Sb и Bi участват в сулфосолно-свързани геохимични асоциации, а As се очертава като устойчив индикатор за злато в различните рудни зони.

Данните за минералния състав и стадийността на орудяването са допълнени и от изследвания върху хидротермалните изменения в находището. Novakova et al. (2024) установяват К-фелдшпатизация в дълбочина, развита главно в централните и източните части на находището.

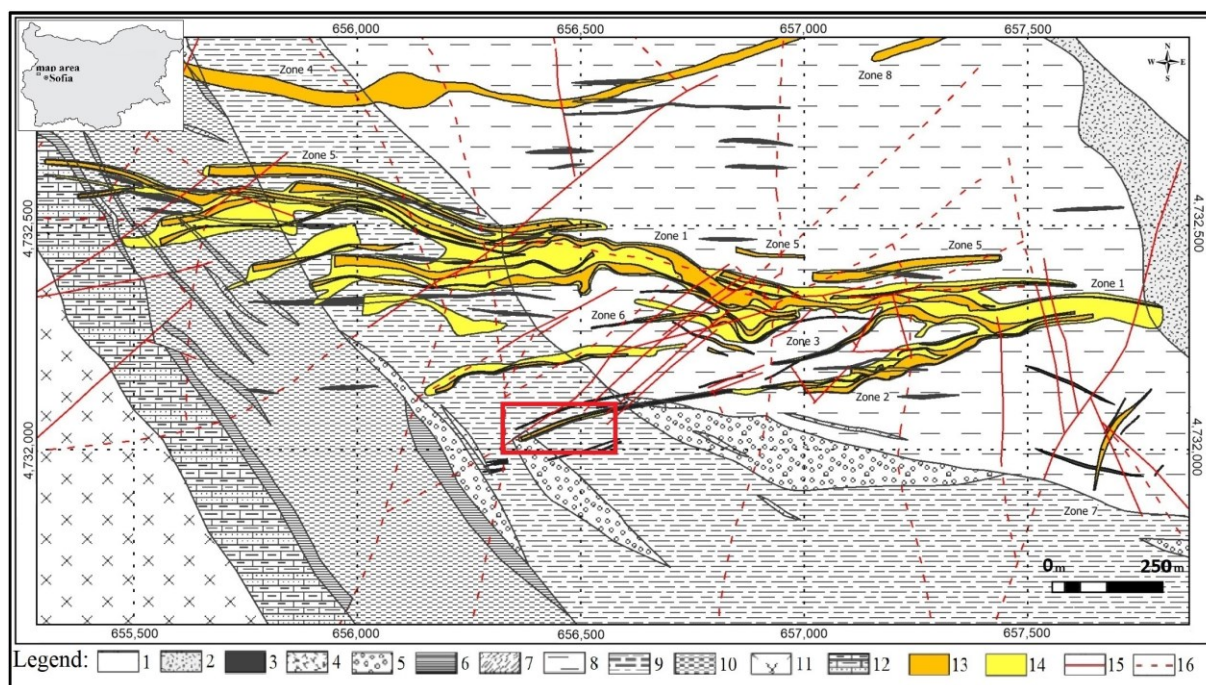
Въпреки значителния обем предходни изследвания, среброносната минерализация в периферните участъци на находището остава сравнително слабо проучена.

В процеса на проучване на находището сондажи, попадащи в южните флангови части, пресичат зона на галенит-сфалеритова минерализация с повишени съдържания на сребро в химичните анализи. Настоящото изследване има за цел да характеризира нейния минерален състав, структурните взаимоотношения и относителната последователност на минералоотлагане, както и да оцени значението ѝ за допълване на минераложката характеристика на находището и за интерпретацията на неговата минерално-геохимична зоналност.

Геоложка обстановка

Находище „Милин камък“ е разположено в Западното Средногорие, в близост до гр. Брезник, и е част от горнокредния Апусени–Банат–Тимок–Средногорски (ABTS) магматичен и металогеен пояс (Popov et al., 2002). То е вместено в хидротермално променени горнокредни вулкански и вулканокластични скали с трахибазалтов до андезитотрахибазалтов състав, интерпретирани като продукти на Брезнишкия палеовулкан (Байрактаров и Мутафчиев, 1981; Dabovski et al., 2009).

Рудните тела са представени от система от жили и орудени разломи, които демонстрират ясно изразен структурен контрол и са част от минерализирана разломно-жилна система, интерпретирана като лъвоотседна крехкопластична зона на сръзване от Риделов тип, подчинена на регионална лъвоотседна кинематика (Strahilov et al., 2022). Основната рудна зона 1 е с направление ИЮИ-ЗСЗ, затъваща към юг със среден наклон от около 60°. Останалите рудни зони, които се разглеждат като нейни апофизии, са с посоки СИ-ЮЗ, затъващи към ЮИ с наклони от около 45° до субвертикални. Именно от сондажна ядка в периферните части на един от апофизите (зона 2) са добити материалите на това изследване (фиг. 1).



Фиг. 1. Геоложка карта на находище Милин камък (по Strahilov et al., 2022).

Легенда: 1 – Кватернер; 2 – Алувиално-делувиални наслаги; Горна креда: 3 – Андезито-базалтова дайка; 4 – Базалтови и андезитобазалтови лавови потоци; 5 – Бомбено-блокови туфи; 6 – Псефитни и пелитни туфи; 7 – Трахибазалтови лавови потоци; 8 – Агломератови туфи с базалтов състав; 9 – Лапилни и псефитни туфи; 10 – лапилни туфи; 11 – Трахиандезити; 12 – Алтернация от туфути, мрамори, пясъчници и туфи; 13 – Рудна зона; 14 – Серицитизация; 15 – Установен разлом; 16 – Предполагам разлом. С червен полигон е обозначен районът на вземане на изследваните проби.

Материали и методи

Изследвани са представителни образци от оруден интервал от сондажна ядка с диаметър HQ в изследвания полигон, на дълбочина от приблизително 100 m под котата на терена. От тях са изработени аншлифи, микроскопирани

с поляризационен микроскоп Leica DM2500P и фотографирани с интегрирана дигитална камера Leica DFC295. Рудната минерализация е потвърдена и детайлизирана чрез 41 локални рентгеноспектрални анализа, извършени с помощта на сканиращ електронен микроскоп модел JEOL JSM-6010PLUS/LA с ускоряващо

напрежение 20 kV, диаметър на снопа 70 nm, оборудван с EDS детектор с разделителна способност <129 eV за MnK α , в режим на обратно разсеяни електрони (BEC – back-scattered electrons composition). Анализите са извършени в МГУ „Св. Иван Рилски“.

Минераложка характеристика

Изследваната минерализация е представена от две текстурно обособени разновидности: впръсната галенит-сфалеритова минерализация и жилна сфалеритова. Главните рудни минерали в тях са галенит и сфалерит, в подчинени количества се установяват пирит и халкопирит, докато арсенопирит и Ag-съдържащите сулфосоли се срещат по-рядко. Кварцът се явява основен гангов минерал.

Галенитът е основен руден минерал във впръснатата минерализация (~60%), докато в сфалеритовата жила той следва нейната морфология и е по-слабо представен (~10%). При по-високите концентрации образува плътна маса, в която са включени единични зърна и агрегати от ксеноморфни сулфосоли, сфалерит, халкопирит и по-рядко пирит (фиг. 2 а). Извън основната маса, галенитът се наблюдава като дисперсни ксеноморфни зърна в асоциация с пирит, особено в пиритните струпвания, халкопирит и сфалерит.

Галенитът прораста със сфалерит и в по-малка степен с халкопирит. В тетраедритов агрегат се среща като малки, до 10 μm , овални включения, което показва по-ранно образуване спрямо тетраедрита (фиг. 2 б). В жилата той се среща като ксеноморфни зърна, частично обгръщащи сфалерита и запълващи пукнатини в него, като най-честите му включения са от сфалерит. И в двете обстановки галенитът показва празнини и слабо изразени триъгълници на отронване. Той често е интерстициален и запълва пространствата между пирит и кварц, което говори за неговото по-късно отлагане. Рентгеноспектралните микросондови анализи на две галенитови зърна показват съдържания на примеси от Ag и Cd под прага на чувствителност на метода.

Сфалеритът в жилната разновидност е основен руден минерал, изграждащ около 40% от нея. Наблюдаваната жила е съставена от ксеноморфни сфалеритови зърна, заедно с галенит, пирит и по-рядко с халкопирит (фиг. 2 в). По границите на зърната се наблюдават множество малки празнини с неправилна форма, вероятно резултат от частично разтваряне или ремобилизация. Минералът често прораста с идиоморфни кварцови кристали.

Във впръснатата минерализация сфалеритът (~10%) образува ксеноморфни агрегати с размер до ~2 mm и отделни зърна. Асоциира основно с галенит, халкопирит и по-рядко с пирит. Най-честите включения са от галенит. „Халкопиритовата болест“ е рядко проявена. SEM-EDS анализите показват нискожелезист сфалерит с обща формула $(\text{Zn}_{0.83-0.85}\text{Fe}_{0.03-0.06})_{0.87-0.90}\text{S}_{1.10-1.13}$. Ниското съдържание на Fe (1,79–3,37 wt.%) съответства на умереносульфидни условия на минералообразуване, което обяснява съвместното му отлагане със среброносните сулфосоли в периферията на находището (Sillitoe and Hedenquist, 2003; Einaudi et al., 2003; Sabeva et al., 2017).

Пиритът (~5%) формира агрегати от идио- до ксеноморфни зърна по границите на сфалеритовата жила. Зърната му достигат до 150 μm . В струпванията се наблюдават зърна с порести ядра, интерпретирани като първа генерация пирит (пирит I), отложен най-рано, докато плътните им периферии представляват втора генерация (пирит II). Установени са и две големи зърна, до 750 μm , с множество пори и включения от галенит. Отделни зърна и агрегати при кръстосани николи показват слаб анизотропен ефект, вероятно вследствие на незначителни количества примес от арсен.

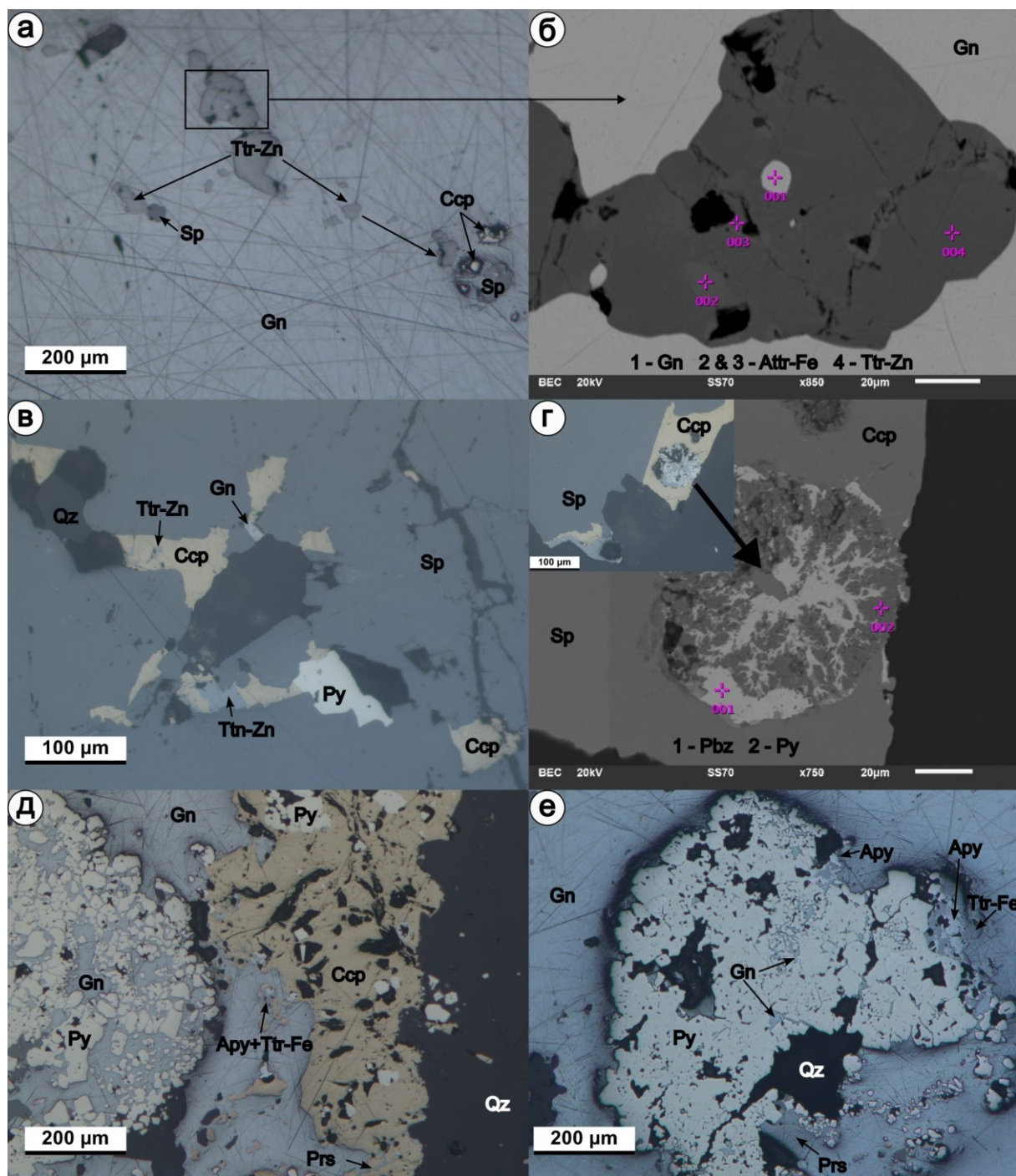
Във впръснатата минерализация пиритът (~3%) формира гнезда и впръследи от ксено- до идиоморфни зърна, често с празнини и дупки. Най-големият агрегат достига 1,2 mm (фиг. 2в, г), а идиоморфни дребни зърна пирит са споени от галенит, сфалерит и халкопирит. SEM-EDS анализите показват обща формула на пирита $\text{Fe}_{0.98-1.00}(\text{S}_{2.00-2.01}\text{As}_{0.00-0.01})_{2.00-2.02}$, като той практически не съдържа примеси от As.

Халкопиритът във впръснатата минерализация (~5%) се отлага като отделни ксеноморфни зърна и минерални агрегати с размери до ~1 mm. Асоциира и включва в обема си пирит, сфалерит, галенит и по-рядко сулфосоли (фиг. 2 г, д). В жилката се среща рядко, като единични ксеноморфни зърна с размер до ~200 μm . В сфалерита се наблюдава като удължени, неправилни включения (фиг. 2 в), докато „халкопиритовата болест“ е слабо развита и представена чрез микроскопични (до 2 μm) капковидни зърна. Стехиометричната му формула е $\text{Cu}_{0.99}\text{Fe}_{1.01}\text{S}_{2.00}$.

Арсенопиритът се установява само във впръснатата галенитова минерализация. Среща се като малки ксено- до хипидиоморфни зърна и като отделни домени по периферията на пиритовите агрегати, където асоциира с по-късните сулфосоли (фиг. 2 е). Отличава се с по-светъл цвят от пирита и силна анизотропия. SEM-EDS анализът показва лек недостиг на арсен: $\text{Fe}_{1.04}\text{As}_{0.91}\text{S}_{1.04}$.

Тетраедритът е най-разпространеният минерал сред сулфосолите, които не надвишават 1% от общата рудна минерализация. Той образува самостоятелни ксеноморфни зърна с размер до ~200 μm сред галенита и сфалерита или дребни агрегати в асоциация с халкопирит, пирит, арсенопирит и аргентотетраедрит (фиг. 2 а, б). Рентгено-спектралните микросондови анализи установяват цинков и железен тетраедрит, като втората разновидност-тетраедрит-(Fe) доминира (табл. 1). Съдържанията на Ag в тетраедрита са по-високи от публикуваните досега за находището (Василева и Вангелова, 2020; Sabeva et al., 2017; Nikolova et al., 2019), и това корелира с лекия недостиг на сярата в структурата (Biagioni et al., 2020).

Аргентотетраедритът, новоустановен минерал за находището, е анализиран само в едно зърно във впръснатата галенитова минерализация. Там той се наблюдава като неправилни ивици и зони с размер до 20 μm около пукнатини и празнини, които преминават с дифузна граница към тетраедрит, с което образува агрегат в галенита (фиг. 2 б). Резултатите от SEM-EDS анализите се характеризират с повишено съдържание на сребро ($\text{Ag} > 4 \text{ apfu}$), което според Biagioni et al. (2020) категорично свидетелства за аргентотетраедрит (табл. 1).



Фиг. 2. Микроскопски снимки и изображения от сканиращ електронен микроскоп в режим на обратно отразени електрони (BEC) на изследваната рудна минерализация от находище Милин Камък. а) Ксеноморфни зърна от по-късни тетраедрит, аргентотетраедрит и халкопирит в основната маса от галенит; б) ВЕС детайл на тетраедритово зърно сред галенит от фиг. 2 а, с дифузионна граница между аргентотетраедрита и тетраедрита; в) По-късни халкопирит, галенит, тенантит и тетраедрит, запълващи пукнатини в сфалерита; г) сфалерит и по-късен халкопирит, включващ агрегат, изграден от полибазит, който замества по-ранен пирит; д) по-ранен пирит, циментиран от галенит в асоциация с арсенопирит, тетраедрит и пирсеит, запълващ празнини в халкопирита; е) пиритов агрегат с по-късен арсенопирит, отложен по периферията му заедно с тетраедрит и пирсеит. Означения: галенит - Gn, сфалерит - Sp, пирит - Py, халкопирит - Ccp, арсенопирит - Apy, тетраедрит-(Zn)/(Fe) – Ttr-Zn/Fe, аргентотетраедрит-(Fe) – Attr-Fe, тенантит-(Zn) - Ttn-Zn, полибазит - Pbz, пирсеит - Prs, кварц – Qz.

Тенантитът се установява изключително рядко. В двата наблюдавани случая той се среща като ксеноморфни зърна с размери до 100 µm, най-често в асоциация с халкопирит, като запълва пукнатини и празнини в сфалеритовата жилка (фиг. 2 в). SEM-EDS анализите на тенантит-(Zn) показват дефицит на катиони и полуметали, както и завишено съдържание на S спрямо идеалната формула (табл. 1), най-вероятно вследствие на спектрални интерференции между

линиите на S, As и Sb. Тези отклонения са добре известен ефект на SEM-EDS анализа при сулфосолите (Biagioni et al., 2020).

Полибазитът също е новоустановен минерал за находището. Той е наблюдаван като овално агрегатно образувание с размер около 80 µm в халкопиритово зърно, разположено между сфалерит и кварц във впръснатата галенитова минерализация (фиг. 2 г). В това образувание

полибазитът се проявява като сулфосолна маса, запълваща корозионни празнини в рамките на реликтов, кородиран скелет от по-ранен пирит.

Пирсеитът, също новоустановен минерал за находището, е наблюдаван само във впръснатата галенитова минерализация като две ксеноморфни зърна. Едното, с размер около 25 μm , запълва празнина заедно с галенит в по-ранен халкопиритов агрегат (фиг. 2 д), а другото, с размер около 100 μm , заема интерстициална позиция между ранния пирит и по-късния галенит (фиг. 2 е).

Установените полибазит и пирсеит са минерали от пирсеит–полибазитовата група, като пирсеитът се характеризира с доминиращ As над Sb, докато при полибазита е обратното (табл. 1).

При изчисляване на кристалохимичните формули е използвано фиксиране на сумата на катионите на 18 атома съгласно методиката на Bindi et al. (2007). Този подход частично намалява матричния ефект при SEM-EDS анализа, при който характеристичното рентгеново лъчение на леката сяра се абсорбира силно в тежката Ag-Cu матрица и занижава измереното ѝ съдържание.

Кварцът (~20%) е основен гангов минерал, представен от ксено- до идиоморфни кристали и агрегати с размери до няколко mm. Той е най-ранно отложеният минерал, а рудните минерали запълват интерстициални пространства между кварцовите кристали.

Таблица 1. Представителни SEM-EDS анализи на Ag-съдържащите сулфосоли от изследваната минерализация. Съдържанията са в wt. %. Минералите от групата тенантит–тетраедрит са класифицирани съгласно Biagioni et al. (2020), а полибазитът и пирсеитът – съгласно Bindi et al. (2007).

№	Минерал	Реална кристалохимична формула	Cu	Ag	Zn	Fe	Sb	As	S
1	тетраедрит-(Fe)	(Cu _{9.14} Ag _{1.03}) _{10.17} (Fe _{1.22} Zn _{0.74}) _{1.95} (Sb _{2.19} As _{1.85}) _{4.03} S _{12.85}	35,75	6,83	2,96	4,18	16,40	8,52	25,36
2	тетраедрит-(Fe)	(Cu _{8.72} Ag _{1.47}) _{10.19} (Fe _{1.18} Zn _{0.63}) _{1.81} (Sb _{2.59} As _{1.56}) _{4.15} S _{12.85}	33,32	9,53	2,48	3,95	18,95	7,01	24,77
3	тетраедрит-(Zn)	(Cu _{8.82} Ag _{1.20}) _{10.02} (Zn _{1.57} Fe _{0.34}) _{1.91} (Sb _{3.52} As _{0.68}) _{4.20} S _{12.87}	32,91	7,60	6,04	1,11	25,15	2,99	24,21
4	аргентотетраедрит-(Fe)	(Cu _{6.00} Ag _{4.60}) _{10.60} (Fe _{1.19} Zn _{0.69}) _{1.88} (Sb _{3.75} As _{0.51}) _{4.26} S _{12.26}	20,32	26,42	2,41	3,53	24,34	2,04	20,95
5	аргентотетраедрит-(Fe)	(Cu _{6.27} Ag _{4.16}) _{10.43} (Fe _{1.10} Zn _{0.70}) _{1.80} (Sb _{3.84} As _{0.52}) _{4.36} S _{12.41}	21,44	24,14	2,45	3,31	25,16	2,10	21,41
6	тенантит-(Zn)	(Cu _{9.48} Ag _{0.04}) _{9.52} (Zn _{1.84} Fe _{0.12}) _{1.96} (As _{2.64} Sb _{0.69}) _{3.33} S _{14.18}	40,97	0,30	8,18	0,47	5,72	13,45	30,92
7	полибазит	(Ag _{13.03} Cu _{2.95} Fe _{0.18}) _{16.16} (Sb _{1.61} As _{0.22}) _{1.84} S _{9.67}	8,82	66,10	–	0,48	9,24	0,79	14,58
8	пирсеит	(Ag _{12.33} Cu _{3.82} Fe _{0.32}) _{16.47} (As _{1.48} Sb _{0.05}) _{1.54} S _{10.16}	11,94	65,39	–	0,87	0,32	5,47	16,02
9	пирсеит	(Ag _{13.04} Cu _{3.20} Fe _{0.06}) _{16.30} (As _{1.15} Sb _{0.55}) _{1.70} S _{9.54}	9,81	67,90	–	0,15	3,23	4,16	14,76

Дискусия

Изследваната среброносна минерализация от южната периферия на находище „Милин камък“ е представена от две текстурно обособени разновидности: сфалеритова жила с подчинено участие на галенит и други сулфиди и впръсната до локално масивна галенит-сфалеритова минерализация. Двете разновидности показват сходен минерален състав, представен от галенит, сфалерит, пирит, халкопирит, арсенопирит и Ag-съдържащи сулфосоли.

Наблюдаваните структурни взаимоотношения показват многоетапно минералоотлагане. Кварцът е най-ранно отложеният гангов минерал, като рудните минерали често заемат интерстициални пространства спрямо него. Ранната рудна минерализация е представена главно от пирит и сфалерит, като при пирита се наблюдават признаци за повече от една генерация. Галенитът, халкопиритът, арсенопиритът и Ag-съдържащите сулфосоли са по-късни от ранната кварц-пирит-сфалеритова асоциация и често запълват пукнатини, празнини и интерстициални пространства в по-ранни минерални агрегати.

Особено значение има установяването на Ag-съдържащи сулфосоли, представени от минерали от групите на тенантит–тетраедрита и пирсеит–полибазита. Тетраедритовите и тенантитовите разновидности допълват вече известната сулфосолна минерализация в находището, докато аргентотетраедритът, полибазитът и пирсеитът се разглеждат като новоустановени минерални фази за

находище „Милин камък“. Тяхното присъствие показва, че среброто не е свързано единствено като елемент-примес в главните сулфидни минерали, а участва и в собствени Ag-съдържащи минерални фази.

Минералният състав и структурните взаимоотношения позволяват изследваното орудяване да се интерпретира като Pb-Zn сулфидна минерализация с подчинена Cu-сулфидна компонента и по-късно отложени Ag-Sb-As-Cu-съдържащи сулфосоли в рамките на полиметалната еволюция на находището. Тя най-вероятно е свързана с късните прояви на кварц-полиметалния стадий, описан от Sabeva et al. (2017), но се отличава с локално обогатяване на Ag-съдържащи сулфосоли в периферната, вероятно ниско температурна минерализационна обстановка.

Получените резултати се вписват добре в статистически потвърдената минерално-геохимична зоналност на находище „Милин камък“, описана от Nikolova et al. (2026). Установената в настоящото изследване галенит-сфалеритова минерализация с подчинена Cu-компонента и Ag-съдържащи сулфосоли кореспондира основно с Pb-Zn геохимичната асоциация и показва минераложка близост до Cu-Sb-Bi-Ag геохимичната асоциация, разграничена в рамките на рудната система. В този контекст данните от южната периферия не представляват изолирана минераложка особеност, а допълват модела за пространствено развитие на полиметалната и сулфосолна минерализация в находището.

Заклучение

В резултат на проведените микроскопски и SEM-EDS изследвания са получени нови данни за минералния състав и структурните взаимоотношения на среброносна минерализация от южната периферия на находище „Милин камък“. Установени са две основни текстурни разновидности – сфалеритова жила и впръсната до локално масивна галенит-сфалеритова минерализация. Главните рудни минерали са галенит и сфалерит, а пиритът, халкопиритът и арсенопиритът имат подчинено участие. Особено значение има установяването на Ag-съдържащи сулфосоли, сред които аргентотетраедритът, полибазитът и пирсеитът се разглеждат като новоустановени минерални фази за находището.

Получените резултати допълват минераложката характеристика на находище „Милин камък“ и подкрепят представите за развитие на късна Pb-Zn минерализация с подчинена Cu-компонента и Ag-Sb-As-Cu-съдържащи сулфосоли в периферните части на рудната система.

Установяването на Ag-съдържащи сулфосоли и нови за находището минерални фази в южната периферия показва, че късните сулфидно-сулфосолни асоциации представляват важен елемент от минералната еволюция и зоналността на рудната система. Това обосновава необходимостта от по-детайлното им проследяване при бъдещи минераложки и геохимични проучвания.

Благодарности. Авторите изказват благодарност на „Брезник Минерал“ ЕООД за предоставените геоложки данни и съдействието при провеждане на изследването.

Литература

Байрактаров, И. & Мутафчиев, А. (1981). Установени палеовулкански структури в Западното Средногорие. *Рудодобив*, 4, 24.

Василева, Б., & Вангелова, В. (2020). Нови данни за минералогията и геохимията на злато-сребърно находище Милин камък, Западно Средногорие. *Годишник на Софийския университет „Св. Климент Охридски“, Геолого-географски факултет*, 105(1), 105–130.

Biagioni, C., George, L. L., Cook, N. J., Makovicky, E., Moëlo, Y., Pasero, M., Sejkora, J., Stanley, C. J., Welch, M. D., & Bosi, F. (2020). The tetrahedrite group: Nomenclature and classification. *American Mineralogist*, 105(1), 109–122. <https://doi.org/10.2138/am-2020-7128>

Bindi, L., Evain, M., Spry, P. G., & Menchetti, S. (2007). The pearceite-polybasite group of minerals: Crystal chemistry and new nomenclature rules. *American Mineralogist*, 92(5–6), 918–925. <https://doi.org/10.2138/am.2007.2440>

Dabovski, H., Kamenov, B., Sinnyovsky, D., Vasilev, E., Dimitrova, E., & Bairaktarov, I. (2009). Upper Cretaceous geology. In I. Zagorchev, H. Dabovski, & T. Nikolov (Eds.), *Geology of Bulgaria. Part II: Mesozoic geology* (pp. 305–638). Marin Drinov Academic Publishing House.

Einaudi, M. T., Hedenquist, J. W., & Inan, E. E. (2003). Sulfidation state of fluids in active and extinct hydrothermal

systems: Transitions from porphyry to epithermal environments. In S. F. Simmons & I. Graham (Eds.), *Volcanic, geothermal, and ore-forming fluids: Rulers and witnesses of processes within the Earth* (pp. 285–313). Society of Economic Geologists.

Marinov, I., Temelakiev, N., Doychev, P., & Popov, K. (2018). Ore-controlling factors at the gold-silver deposit Milin Kamak, Western Srednogie, Bulgaria. *Review of the Bulgarian Geological Society*, 79(3), 125–126.

Marinov, I., Popov, K., Ruskov, K., & Nikolova, D. (2019). Factor analysis of the geochemical associations in Milin Kamak ore deposit, Bulgaria. *Review of the Bulgarian Geological Society*, 80(3), 142–144.

Nikolova, D. (2022). Mineral associations in the geochemical halos of Milin Kamak ore deposit, Bulgaria. *Review of the Bulgarian Geological Society*, 83(3), 31–34. <https://doi.org/10.52215/rev.bgs.2022.83.3.31>

Nikolova, D., Dobrev, S., & Ruskov, K. (2019). Mineralisation in ore zone 1, Milin Kamak deposit, Western Srednogie, Bulgaria. *Journal of Mining and Geological Sciences*, 62(1), 11–16.

Nikolova, D., Ruskov, K., Marinov, I., & Stoykov, S. (2026). Mineral and geochemical zoning of the Milin Kamak deposit, Western Srednogie, Bulgaria: Insights from statistical analysis. *Annual of the University of Mining and Geology “St. Ivan Rilski”*, 69, in press.

Novakova, A., Marinov, I., Pristavova, S., & Yovchev, D. (2024). New data on the occurrence of K-feldspathization in the Milin Kamak deposit, Breznik, Western Srednogie. *Review of the Bulgarian Geological Society*, 85(2), 187–190. <https://doi.org/10.52215/rev.bgs.2024.85.2.187>

Popov, P., Berza, T., Grubic, A., & Dimitru, I. (2002). Late Cretaceous Apuseni-Banat-Timok-Srednogie (ABTS) magmatic and metallogenic belt in the Carpathian-Balkan orogen. *Geologica Balcanica*, 32(2–4), 145–163. <https://doi.org/10.52321/GeolBalc.32.2-4.145>

Sabeva, R., Mladenova, V., & Mogessie, A. (2017). Ore petrology, hydrothermal alteration, fluid inclusions, and sulfur stable isotopes of the Milin Kamak intermediate sulfidation epithermal Au-Ag deposit in Western Srednogie, Bulgaria. *Ore Geology Reviews*, 88, 400–415. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2017.05.013>

Sillitoe, R. H., & Hedenquist, J. W. (2003). Linkages between volcanotectonic settings, ore-fluid compositions, and epithermal precious metal deposits. In S. F. Simmons & I. Graham (Eds.), *Volcanic, geothermal, and ore-forming fluids: Rulers and witnesses of processes within the Earth* (pp. 315–343). Society of Economic Geologists.

Stoykov, S., Strashimirov, S., Moritz, R., Dimitrov, D., & Todorov, J. (2007). Mineral composition of the Breznik-Bardoto Au epithermal ore occurrence: Preliminary data. *Annual of the University of Mining and Geology “St. Ivan Rilski”*, 50(1), 117–122.

Strahilov, D., Doychev, P., & Dimitrov, I. (2022). Ore shoots formation in a sinistral strike-slip structural environment interpreted from the map of the Au-Ag Milin Kamak deposit in the Breznik area, Southwest Bulgaria. *Review of the Bulgarian Geological Society*, 83(3), 131–134. <https://doi.org/10.52215/rev.bgs.2022.83.3.131>