

PRAKTYCZNE ASPEKTY OSZACOWANIA ILOŚCIOWEGO SKŁADU MINERALNEGO MIEDZIONOŚNYCH SKAŁ OSADOWYCH NA PODSTAWIE PROCEDURY OBLICZEŃ ANALOGICZNEJ DO NORMY CIPW

PRACTICAL ASPECTS OF ESTIMATING THE QUANTITATIVE MINERAL COMPOSITION OF COPPER-BEARING SEDIMENTARY ROCKS BASED ON A CALCULATION PROCEDURE ANALOGICAL TO THE CIPW NORM

IZABELLA NOWAK¹

Abstrakt. W pracy przedstawiono możliwość oszacowania zawartości minerałów kruszczowych na podstawie analiz chemicznych próbek miedzionośnych skał osadowych z synklinorium północnosudeckiego i z monokliny przedsudeckiej, stosując obliczenia w sposób analogiczny do procedury CIPW. Dane mineralogiczne uzyskano za pomocą mikroskopu optycznego i mikros sondy elektronowej (EPMA). Ilościowy skład minerałów płonnych określono metodą XRD, a kruszców metodą komputerowej analizy obrazu mikroskopowego (CAMI). Zdefiniowano rzeczywisty zespół minerałów płonnych i kruszczowych, ich skład chemiczny, określono proporcje kruszców miedzi oraz wybrano pierwiastki będące głównymi składnikami zidentyfikowanych minerałów. Zgodnie z danymi mineralogicznymi i chemicznymi opracowano procedurę obliczeń analogicznie do normy CIPW. Zespół minerałów kruszczowych określony na podstawie obliczeń stosunków wagowych jest zgodny z obserwacjami mikroskopowymi skał miedzionośnych. Uzyskane tą metodą zawartości kruszców są zbliżone lub nieco wyższe w próbkach nisko zmineralizowanych i nieco niższe w próbkach bogato okruszczowanych w porównaniu do wyników metody CAMI. Różnice te mogą być spowodowane odmiennymi sposobami uśredniania próbek (sproszkowana, uśredniona skała i preparat mikroskopowy). Obliczone proporcje udziału kruszców są zgodne z proporcjami uzyskanymi metodą CAMI. Wykonane obliczenia ilościowego składu minerałów kruszczowych za pomocą procedury kalkulacyjnej podobnej do CIPW mogą być zastosowane do wstępnego oszacowania ilościowej zawartości kruszców w rudach podczas geologicznych prac poszukiwawczo-rozpoznawczych, wymagają one jednak przetestowania innych wariantów rozdzielania pierwiastków pomiędzy zestawem minerałów.

Słowa kluczowe: ilościowy skład mineralny, minerały kruszczowe, norma CIPW, margiel miedzionośny, łupek miedzionośny.

Abstract. The paper presents a possibility of estimating the content of ore minerals based on chemical analyses of copper-bearing sedimentary rock samples from the North-Sudetic Synclinorium and from the Fore-Sudetic Monocline using a calculation procedure similar to the CIPW norm. The mineralogical data was obtained by means of an optical microscope and an electron microprobe (EPMA). The quantitative composition of gangue minerals was determined using the XRD method, and of the ores by the computer microscopic image analysis (CAMI). The actual set of gangue and ore minerals, their chemical composition, and proportions of copper ores were determined in the samples. Elements that are the main components of identified minerals were selected. The calculation procedure has been developed in accordance with the mineralogical and chemical data. The set of ore minerals determined based on the calculation of the weight ratios is consistent with the microscopic observations of copper-bearing rocks. The obtained ore contents are similar or slightly higher in poorly mineralized samples and slightly lower in highly mineralized samples in comparison to the results of the CAMI method. These differences may be due to different methods of averaging samples (powdered, averaged rock samples, and a thin-section). The calculated ore proportions are consistent with those obtained by the CAMI method. The study calculations of the quantitative ore mineral composition using the calculation procedure analogical to the CIPW norm can be used to a preliminary approximation of the quantity of ores in geological prospect and exploration studies, but they require testing of more variants of the element partition between the set of minerals.

Key words: quantitative mineral composition, ore minerals, CIPW norm, copper-bearing marl, Kupferschiefer.

¹ KGHM CUPRUM Sp. z o.o. Centrum Badawczo-Rozwojowe, ul. Gen. Wł. Sikorskiego 2-8, 53-659 Wrocław; e-mail: inowak@cuprum.wroc.pl.

WSTĘP

Polimetaliczne złoża rud Cu-Ag-Pb-Zn typu Kupferschiefer występują w południowo-zachodniej Polsce w synklinorium północnosudeckim, gdzie były przedmiotem eksploatacji górniczej do lat 80. XX w. oraz na monoklinie przedsudeckiej, gdzie są obecnie eksploatowane w kopalniach KGHM Polska Miedź S.A. Na obu tych obszarach w badaniach poszukiwawczych i rozpoznawczych złóż rud Cu-Ag-Pb-Zn ocena ekonomiczna mineralizacji kruszcowej jest oparta o wyniki analiz chemicznych skał rudnych oraz dane mineralogiczne. W przeciwieństwie do licznych analiz chemicznych, pracochłonne badania mineralogiczne, niezbędne do identyfikacji paragenez minerałów użytecznych oraz określenia ich zawartości w rudzie o rozproszonej mineralizacji kruszcowej, są wykonywane zazwyczaj dla ograniczonej liczby próbek. Do wyznaczenia ilościowego składu mineralnego skał magmowych na podstawie składu chemicznego skały powszechnie stosuje się normę klasyfikacyjną CIPW, opartą na obliczeniu stosunków wagowych minerałów, z wykorzystaniem ich składów normatywnych. Analogiczne obliczenia normatywnych minerałów są również wykonywane na podstawie składu chemicznego skał osadowych (Cohen, Ward, 1991; Rosen, Abbyasov, 2003; Kackstaetter, 2014). Wyniki tych obliczeń często przedstawiają rozbieżności między obliczonym a rzeczywistym składem mineralnym. Rozbieżności te wynikają z przyjmowanego do obliczeń uproszczonego zestawu minerałów oraz z różnic między składem teoretycznym a rzeczywistym minerałów występujących w skałach. Wykorzystanie w procedurze obliczeniowej zestawu rzeczywistych minerałów i ich składów chemicznych uzyskanych na podstawie badań mineralogicznych danych skał, umożliwi obliczenie faktycznego, ilościowego składu mineralnego skał z danego obszaru na podstawie analizy ich składu chemicznego. Tego typu zintegrowane badania chemiczne i mineralogiczne stosowane do skał magmowych mogą być w sposób analogiczny wykorzystane do okruszczonych skał osadowych, szczególnie do oceny ilościowej zawartych w nich kruszców.

Celem przeprowadzonych badań było przetestowanie skuteczności zastosowania w miedzionośnych skałach osadowych procedury obliczeń opracowanej analogicznie do normy CIPW, do oszacowania zawartości minerałów kruszczowych na podstawie analiz chemicznych skał. Metoda ta nie była do tej pory stosowana w badaniach prospekcyjnych i rozpoznawczych złóż rud miedzi synklinorium północnosudeckiego i monokliny przedsudeckiej. Możliwość przeliczenia analiz składu chemicznego okruszczonych skał osadowych na ich ilościowy skład mineralny stwarza możliwość szybkiego uzyskania informacji w zakresie oszacowania zawartości minerałów kruszczowych dla dużej liczby próbek w rozpoznawanym obszarze złożowym. Na bieżąco wykonywane podczas prac poszukiwawczych i rozpoznawczych analizy składu chemicznego skał rudnych oraz częściowe badania mineralogiczne przy użyciu tej metody dają

możliwość, bez zwiększania kosztów badań, uszczegółowienia danych mineralogicznych potrzebnych do określenia zasięgu strefy złożowej oraz rozpoznania charakteru mineralizacji pod kątem możliwości przeróbki skał rudnych i odzyskiwania metali.

Materiał badawczy stanowiły próbki margli miedzionośnych ze wschodniej części synklinorium północnosudeckiego, z nieczynnej kopalni „Konrad” oraz próbki łupków miedzionośnych z monokliny przedsudeckiej, z rejonu złożowego Lubin–Sieroszowice. Badania przeprowadzone w celu otrzymania danych potrzebnych do obliczeń oraz weryfikacji uzyskanych wyników objęły wykonanie analiz chemicznych całych próbek skalnych oraz szczegółowe badania kruszców i minerałów płonnych z zastosowaniem klasycznej mikroskopii kruszców, której wyniki zostały uszczegółowione o analizy składu chemicznego minerałów i identyfikację trudnych do rozpoznania w mikroskopie optycznym faz mineralnych metodą mikroanalizy rentgenowskiej (EPMA). Niezależnie, ilościowy skład mineralny kruszców określono na podstawie komputerowej analizy obrazu mikroskopowego (CAMI), a minerałów skałotwórczych – metodą dyfrakcji promieniowania rentgenowskiego (XRD).

NORMA CIPW

Norma CIPW, opracowana na początku XX w. przez amerykańskich petrologów Crossa, Iddingsa, Pirsona i Washingtona, rozwijana i modyfikowana (np. Kesley, 1965; Cox i in., 1979; LeMaitre, 1982; Rollinson, 1993; Verma i in., 2002, 2003; Pruseth, 2009), jest ciągle powszechnie stosowana w petrologii skał magmowych do obliczania ilościowego składu mineralnego skał na podstawie wyników ich analiz chemicznych. Stanowi ona podstawę do porównywania i klasyfikowania skał magmowych niezależnie od ich modalnych zespołów mineralnych. W metodzie tej obliczany jest tzw. normatywny skład mineralny przez połączenie składników tlenkowych skały magmowej w ustanowiony zestaw standardowych minerałów niezawierających wody, o ściśle zdefiniowanych wzorach krystalochemicznych, zgodnie z dokładnie określoną kolejnością (np. Majerowicz, Wierchołowski, 1990; LeMaitre, 2002). Obecnie obliczenia składu normatywnego CIPW wykonuje się za pomocą programów komputerowych (np. NORRRM, González-Guzmán, 2016) i gotowych arkuszy kalkulacyjnych (np. http://lepr.ofm-research.org/WebServices/test_CIPWnorm.php). Zaletą normy CIPW jest szybkie uzyskanie informacji na temat składu mineralnego skał przy znajomości jedynie ich składów chemicznych. Dużym ograniczeniem tej metody jest jednak fakt, że rzeczywisty skład mineralny naturalnej skały może różnić się od jej składu normatywnego, co spowodowane jest różnicami w składzie chemicznym między badanymi a normatywnymi minerałami oraz obecnością w naturalnej skale dodatkowych minerałów, nie przewidzianych w przyjętej do obliczeń procedurze. Zastosowanie normy CIPW do skał osadowych wymaga przetworzenia procedury kalkula-

cyjnej na podstawie szczegółowych danych mineralogicznych. W tych badaniach na podstawie dokładnej identyfikacji rzeczywistych zespołów mineralnych występujących w badanych skałach osadowych oraz precyzyjnego określenia składów chemicznych minerałów, odpowiednio zmodyfikowano procedurę obliczeniową w celu przetestowania możliwości jej użycia do określania zawartości minerałów kruszczowych w zmineralizowanych skałach osadowych.

ZAKRES PRAC I ZASTOSOWANE METODY ANALITYCZNE

Badania przeprowadzono, wykorzystując 4 próbki margli miedzionośnych, pochodzących z wyrobisk kopalni „Konrad” z synklinorium północnosudeckiego (KK-1, KK-2, KK-3, KK-4) oraz 3 próbki łupków miedzionośnych, pobrane z obszaru złożowego Lubin–Sieroszowice z monokliny przedsudeckiej (LB-1, PL-1, RD-1). Dla badanych próbek wykonano analizy chemiczne sproszkowanych tzw. całych próbek skalnych (ang. *whole rock analysis*) w laboratorium Bureau Veritas Upstream Minerals w Kanadzie, w zakresie pierwiastków głównych, metali i wybranych pierwiastków śladowych oraz zawartości węgla organicznego. Oznaczenia koncentracji pierwiastków głównych wykonano metodą ICP-OES, natomiast oznaczenia zawartości metali i wybranych pierwiastków śladowych – metodą ICP-MS. Dane dotyczące szczegółów analitycznych wraz z limitami wykrywalności poszczególnych pierwiastków znajdują się na stronie: <http://www.acmelab.com>. Badania mineralogiczne obejmowały: 1) charakterystykę próbek margli i łupków miedzionośnych ze szczególnym uwzględnieniem minerałów kruszczowych przy użyciu mikroskopu polaryzacyjnego Eclipse LV 100 POL (Nikon) zintegrowanego z kamerą cyfrową DS-Ri1 (Nikon) i wykonano je w Pracowni Petrograficzno-Mineralogicznej Zakładu Geologii w KGHM Cuprum Sp. z o.o. CBR, oraz 2) szczegółową analizę składu chemicznego minerałów kruszczowych i płonnych z identyfikacją submikroskopowych faz mineralnych i przerostów, przeprowadzoną za pomocą mikroskopy elektronowej (EPMA) Cameca SX Five z emisją polową, w Międzyinstytutowym Laboratorium Mikroanalizy Minerałów i Substancji Syntetycznych na Wydziale Geologii Uniwersytetu Warszawskiego. Ze względu na niską zawartość kruszczów w większości badanych próbek, skład ilościowy minerałów wyznaczono metodą komputerowej analizy obrazu mikroskopowego (CAMI). Wielkoformatowe zdjęcia całych powierzchni preparatów mikroskopowych w świetle odbitym wykonano na mikroskopie polaryzacyjnym Eclipse LV 100 POL (Nikon) przy użyciu obiektywu 10× i rozdzielczości kamery 640 × 640 pikseli. Do komputerowej analizy obrazu mikroskopowego użyto oprogramowania NIS Elements Advanced Research firmy NIKON oraz oprogramowania komputerowego JM Microvision ver. 1.2.7. Obrazy mikroskopowe opracowano

zgodnie z procedurą opisaną przez Berrezueta i in. (2016). Ilościowy skład minerałów skałotwórczych uzyskano metodą dyfrakcji promieniowania rentgenowskiego (XRD). Analizy wykonano z bardzo małych objętości uśrednionej próbki w formie wysokorozdzielczych rejestracji XRD o czasie rejestracji 6 godzin na dyfraktometrze rentgenowskim X’Pert Pro MPD (PANalytical B.V. – Holandia). Próbki rejestrowano w zakresie 3,8–90,0° kąta 2θ, z krokiem 0,026° 2θ. W trakcie rejestracji dyfraktogramów wykorzystano promieniowanie CoKα, generowane z lampy rentgenowskiej zasilanej prądem o natężeniu 30 mA i napięciu 40 kV. Do detekcji promieniowania, które uległo dyfrakcji wykorzystano szybki detektor liniowy PIXcel, konstrukcji PANalytical B.V. – Holandia. Wyniki opracowano przy użyciu oprogramowania X’Pert HighScore Plus (ver. 2.2e) i najnowszej wersji bazy danych ICDD PDF-2 Release 2008 RDB. Ilościowe proporcje minerałów oszacowano metodą Rietvelde (Snyder, Bish, 1982; Young, 1993). Badania metodą XRD wykonano w Pracowni Rentgenowskiej IGMiP na Wydziale Geologii Uniwersytetu Warszawskiego. Rezultaty przeprowadzonych badań chemicznych oraz mineralogicznych z ustaleniem zawartości minerałów kruszczowych i płonnych w marglach i łupkach miedzionośnych użyto do opracowania metody przeliczenia analiz chemicznych okruszczowanych skał osadowych na ilościowy skład mineralny zawartych w nich kruszczów oraz stanowiły podstawę weryfikacji wyników uzyskanych za pomocą testowanej metody.

CHARAKTERYSTYKA PRÓBEK MIEDZIONOŚNYCH SKAŁ OSADOWYCH

MARGLE MIEDZIONOŚNE Z KOPALNI „KONRAD” (SYNKLINORIUM PÓLNOCNOSUDECKIE)

Próbki KK-1, KK-2, KK-3, KK-4 pobrane z poziomu margli miedzionośnych cechsztynu dolnego są marglami ilastymi barwy ciemno- do jasnoszarej, zawierają zmienne ilości szczątków organicznych i charakteryzują się względnie niskimi zawartościami kruszczów. Badane margle ilaste cechują się relatywnie wysokimi zawartościami CaO+MgO (14,94–26,80% wag.), krzemionki (34,41–39,14% wag.) i żelaza (1,91–2,66% wag.) oraz dużym udziałem minerałów ilastych, co potwierdza ich marglisty charakter. Względnie niska zawartość S (0,85–1,10% wag.) przekłada się na stosunkowo niewielką ilość kruszczów w tych skałach. Koncentracje Ag wahają się od 5,5–69,0 ppm i są zgodne z obecnością nielicznych minerałów srebra oraz domieszek tego pierwiastka w strukturze siarczków miedzi. Skupienia materii organicznej występują rzadko, a zawartość C/Org nie przekracza 1,45% wag. (zał. 1²).

W badanych próbkach obserwowano trzy odmiany chalkozynu o różnych cechach optycznych: (I) chalkozyn o barwie białej ze słabo widoczną anizotropią i dwójodbcim,

² Załączniki są zamieszczone w wersji online artykułu (<https://biuletynpig.pl>).

(II) chalkozyn o barwie niebieskiej, izotropowy, nie wykazujący dwójdrobności, o cechach optycznych zbliżonych do digenitu, oraz (III) chalkozyn o barwie białej, z odcieniem jasnoniebieskim, wyraźnym dwójdrobnością i anizotropią. Pod względem składu chemicznego w skupieniach chalkozynu stwierdzono również obecność digenitu, djurleitu, anilitu, spionkopitu, roxbyitu i geerytu, przy czym w odmianach barwy białej dominuje djurleit i chalkozyn, w jasnoniebieskich – geeryt, a w odmianie niebieskiej – digenit i anilit. W skupieniach siarczku miedzi o cechach optycznych kowelinu na podstawie składu chemicznego często oprócz kowelinu stwierdzono występowanie yarrowitu. Podsumowanie badań mikroskopowych próbek margli i łupków miedziońskich przedstawiono w załączniku 2.

Próbka KK-1. Margiel ilasty, mikrosparyto-pelitowy, z teksturą kierunkową, utworzoną przez równoległe ułożone liczne, drobne blaszki jasnych łuszczków i wydłużone skupienia kruszców oraz rzadziej – drobne smużki ilaste i skupienia materii organicznej. W tle skalnym margla występują wydłużone skupienia i gniazda sparytu (o średnicy 800–2000 μm) oraz są rozproszone ziarna detrytycznego kwarcu i tlenków Fe i Ti. Żyłki kalcytu o grubości 30–190 μm przecinają skośnie kierunkową teksturę skały.

Minerały kruszcowe są reprezentowane przez bornit, piryt, chalkozyn, tennantyt, chalkopiryt i kowelin. Występują one w formie rozproszonych, niewielkich skupień, często wydłużonych zgodnie z kierunkową teksturą skały, wypełniają pory skalne i zastępują skupienia sparytu, głównie w organicznych formach szkieletowych. Bornit tworzy izometryczne lub wydłużone skupienia o wielkości 10–120 μm , występuje w zrostach z chalkozynem do 160 μm , rzadziej z chalkopirytem oraz zwykle na brzegach skupień jest zastępowany przez tennantyt (fig. 1E). Rzadko bornit w zrostach z chalkozynem zastępuje szczątki organiczne do 730 μm średnicy. Piryt występuje w formie framboidów o średnicy od kilku do 10 μm , rozproszonych w skale oraz tworzących zespoły o wielkości do 50 μm , często spojone bornitem, tennantytem lub zrostami tych minerałów. W matriks margla obserwowano również hipautomorficzne kryształy pirytu o wielkości do 20 μm . Chalkozyn przedstawia barwy od bladoniebieskiej do ciemnoniebieskiej i zwykle słabą anizotropię. W skupieniach chalkozynu na podstawie składu chemicznego zidentyfikowano głównie anilit i digenit oraz w niewielkich ilościach roxbyit, a także obserwowano przerosty kowelinu i yarrowitu.

Próbka KK-2. Margiel ilasty, zbudowany głównie z mikrosparytu z kilkunastoprocentową domieszką substancji ilastej rozproszonej między składnikami węglanowymi oraz formującej drobne smużki ilaste. W tle skały są rozproszone blaszki jasnych łuszczków i ziarna detrytycznego kwarcu oraz tlenki Fe i Ti. W marglu występują równoległe do smugowania wydłużone skupienia i gniazda sparytu, do 2 mm średnicy, zawierające liczne minerały kruszcowe. Margiel ten zawiera równoległe do smugowania przeławicenia łupku marglistego, o teksturze laminowanej, z laminami ilastymi zawierającymi smugi mikrosparytu. W ilastym tle skały są

rozproszone liczne sparytowe szczątki organiczne, zwykle o owalnym pokroju oraz szkielety otwornic całkowicie lub częściowo zastępowane przez minerały kruszcowe. W laminach ilastych są obecne liczne, wydłużone zgodnie z laminacją skupienia materii organicznej. Rzadko występują soczewkowate skupienia średniokrystalicznego kalcytu.

Nierównomiernie rozproszone kruszce są reprezentowane głównie przez chalkozyn, digenit, kowelin, piryt i tennantyt oraz w śladowych ilościach przez bornit, chalkopiryt, galenę i srebro rodzime. Chalkozyn tworzy agregaty o barwie białej do jasnoniebieskiej o niskiej anizotropii i składzie chemicznym djurleitu, chalkozynu, a w śladowych ilościach również anilitu, geerytu i spionkopitu. Skupienia siarczku miedzi o barwie niebieskiej wykazują cechy optyczne i skład chemiczny digenitu. W laminach i nagromadzeniach sparytu dominują skupienia chalkozynu, zwykle o większych rozmiarach 50–130 μm , rzadko do 1270 \times 250 μm . Skupienia chalkozynu i digenitu często mają przerosty kowelinu oraz występują w zrostach z tennantytem, który lokuje się przeważnie na brzegach skupień siarczku miedzi. Sporadycznie obserwowano sparytowe formy organiczne, częściowo zastępowane przez zrosty chalkozynu z tennantytem. Rzadko w marglu ilastym występują zrosty digenitu z bornitem. W partiach wzbogaconych w składniki ilaste, skupienia chalkozynu mają mniejsze rozmiary, od kilku do 60 μm . Samodzielne skupienia kowelinu posiadają wielkość od kilku do 130 μm . W laminach ilastych kowelin miejscami zastępuje materią organiczną. Rzadziej są obecne zrosty kowelinu z bornitem oraz z tennantytem. Piryt powszechnie występuje w postaci rozproszonych w skale framboidów, często w znacznym stopniu zrekrystalizowanych, o średnicy 0,5–40,0 μm . Piryt jest także spotykany w postaci wrostków w chalkozynie i digenicie oraz w formie kilkumikronowych, automorficznych kryształów w tle skalnym margla. Większość skupień pirytu koncentruje się w ilastych partiach badanej skały. Chalkopiryt, galenę i srebro rodzime rozpoznano jedynie na podstawie analiz chemicznych w mikroobszarze w postaci drobnych przerostów w minerałach grupy chalkozynu i w kalcytcie.

Próbka KK-3. Margiel ilasty, organodetrytyczny, z węglanowo-ilastym tłem skały, w którym wielkość składników węglanowych zmienia się od mikrosparytu do sparytu. Margiel posiada niewyraźną teksturę smugowaną, utworzoną przez smugi i wydłużone skupienia sparytu. W próbce występują liczne szczątki organiczne o różnej wielkości i kształcie, wśród których dominują szkielety otwornic. Ziarna szkieletowe są zbudowane zazwyczaj z mikrytu lub mikrosparytu, a ośrodki są wypełnione sparytem. Szkielety otwornic są częściowo lub całkowicie zastępowane przez minerały kruszcowe. Wielkość form organicznych dochodzi do wymiarów 940 \times 370 μm . Wydłużone szkielety otwornic są ułożone równoległe lub pod niewielkim kątem w stosunku do smugowania. W matriks skały występują nieregularne skupienia sparytu, blaszki jasnych łuszczków, skupienia materii organicznej, ziarna detrytycznego kwarcu i tlenki Fe i Ti.

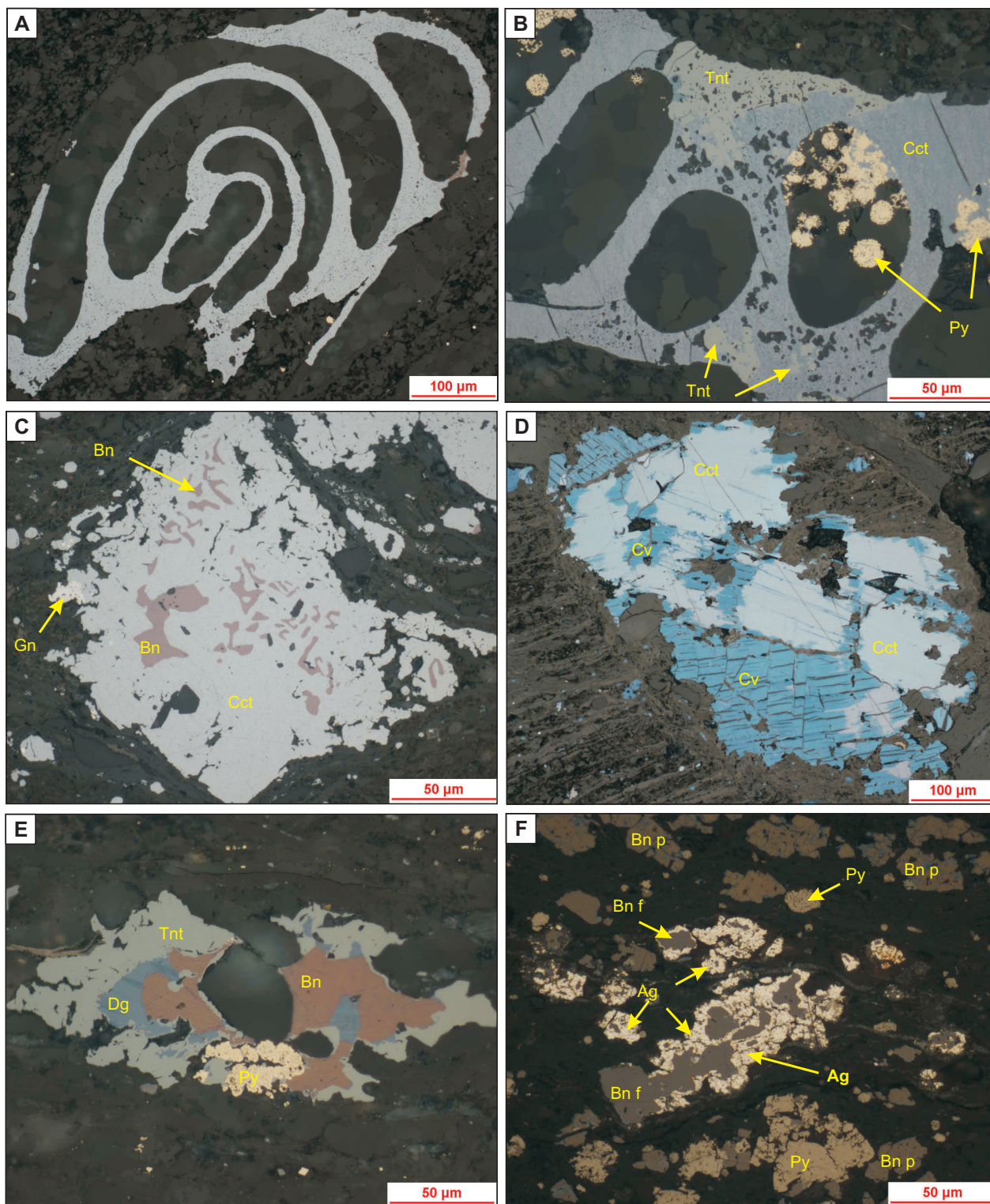


Fig. 1. Minerale kruszcowe w próbkach margli miedzionośnych i lupków miedzionośnych w świetle odbitym

A – szkielet otwornicy zastępowany przez chalkozyn, p. KK-3; **B** – szkielet otwornicy zastępowany przez zrosty chalkozynu (Cct) z tennantytem (Tnt). W ośrodku framboidy pirytu (Py), p. KK-3; **C** – pismowe przerosty bornitu (Bn) w chalkozynie (Cct). Widoczny wrostek galeny (Gn), p. RD-1; **D** – chalkozyn (Cct) zastępowany kowelinem (Cv), p. PL-1; **E** – zrosty bornitu (Bn), digenitu (Dg) z tennantytem (Tnt) oraz skupienia pirytu (Py), p. KK-1; **F** – zrosty bornitu fioletowego (Bn f) ze srebrem rodzimym (Ag) oraz bornit pomarańczowy (Bn p) i piryt (Py), p. LB-1

Ore minerals in samples of copper-bearing marl and copper-bearing shale in reflected light

A – foraminifera skeleton replaced by chalcocite, s. KK-3; **B** – foraminifera skeleton replaced by intergrowths of chalcocite (Cct) with tennantite (Tnt). Interior with pyrite framboids (Py), s. KK-3; **C** – graphic intergrowth of bornite (Bn) in chalcocite (Cct). Galena (Gn), s. RD-1; **D** – chalcocite (Cct) replaced by covellite (Cv), s. PL-1; **E** – intergrowths of bornite (Bn), digenite (Dg) and tennantite (Tnt), and pyrite aggregates (Py), s. KK-1; **F** – intergrowths of purple bornite (Bn f) with native silver (Ag) and orange bornite (Bn p) and pyrite (Py), s. LB-1

Minerały kruszcowe poza formami organicznymi tworzą liczne skupienia rozproszone w skałe. Wśród kruszców ilościowo przeważa chalkozyn o barwach jasnoniebieskich i niebieskich i zwykle słabej anizotropii. W skupieniach tego minerału analizy składu chemicznego w mikroobszarze wykazały obecność głównie geerytu, a także anilitu i digenitu oraz sporadycznie roxbyitu, djurleitu i spionkopitu. W badanym marglu wśród minerałów kruszcowych w mniejszych ilościach występuje piryt, kowelin i tennantyt. W śladowych zawartościach obecny jest bornit. Chalkozyn powszechnie zastępuje szkielety otwornic, formując struktury poikiloblastyczne i masywne oraz często występuje w zrostach z tennantytem (fig. 1A, B). Wielkość zmineralizowanych szczątków organicznych mieści się w przedziale od $370 \times 175 \mu\text{m}$ do $1100 \times 230 \mu\text{m}$. Chalkozyn tworzy również skupienia rozproszone w tle skalnym margla, o wielkości $10\text{--}110 \mu\text{m}$. Niektóre z tych skupień są zastępowane przez kowelin. Rzadko występują zrosty chalkozynu z bornitem. Piryt jest głównie obecny w postaci pojedynczych framboidów o średnicy $1\text{--}70 \mu\text{m}$ oraz ich kolonii o wielkości $30\text{--}180 \mu\text{m}$, rozproszonych w tle skalnym oraz lokujących się w osródkach szkieleatów otwornic. Kolonie framboidów pirytu często są spojone chalkozynem i kowelinem (fig. 2B).

Próbka KK-4. Margiel ilasty z mikrosparytowo-pelitowym tłem skalnym, w którym niewyraźną teksturę smugowaną tworzą smugi ilaste oraz wydłużone skupienia i smugi sparytu. W marglu są rozproszone nieliczne węglanowe szkielety otwornic oraz ziarna detrytycznego kwarcu i skaleni. Szczątki otwornic często są zastępowane przez minerały kruszcowe. Głównymi kruszczami w próbce są piryt i bornit. W podrzędnych ilościach występują tennantyt, chalkozyn, kowelin i chalkopiryt, a śladowo srebro rodzime. Piryt jest obecny w postaci framboidów o średnicy od poniżej mikrometra do $30 \mu\text{m}$, rozproszonych w tle skalnym oraz tworzących kolonie o wielkości $150\text{--}180 \mu\text{m}$. Nagromadzenia framboidów pirytu występują w osródkach szkieleatów otwornic, w których są często cementowane bornitem i zrostami bornitu z chalkopirytem oraz tennantytem i kowelinem (fig. 2C). Piryt w niektórych framboidach został częściowo zrekrytalizowany, a średnica tych form wynosi $70\text{--}110 \mu\text{m}$ (fig. 2A). W marglu występują rozproszone, hipautomorficzne kryształy pirytu o wielkości kilku mikrometrów, które miejscami tworzą wydłużone nagromadzenia do $400 \mu\text{m}$ grubości, równoległe do smugowania skały. Bornit zastępuje szkielety otwornic, w obrębie których często zawiera przerosty chalkopirytu oraz tworzy zrosty z tennantytem (fig. 2F). Wielkość form organicznych zastępowanych przez bornit wynosi $235\text{--}300 \mu\text{m}$. Rzadziej bornit występuje w agregatach z chalkozynem, kowelinem i chalkopirytem spajających kolonie framboidów pirytu (fig. 2D). W tle skalnym występują zrosty bornitu z chalkozynem oraz z tennantytem. Chalkozyn występuje w niewielkich ilościach, w zrostach z bornitem oraz w agregatach siarczoków spajających kolonie framboidów pirytu w tle skalnym. W obrazach BSE obserwowano mikrowrostki srebra rodzimego w chalkozynie zastępującym formę organiczną (fig. 3).

LUPKI MIEDZIONOŚNE (MONOKLINA PRZEDSUDECKA)

Próbki łupków marglistych LB-1, PL-1, RD-1 pochodzą z poziomu łupku miedzionośnego z rejonu złożowego Lubin–Sieroszowice i zawierają znaczące koncentracje minerałów kruszcowych. Są to skały o strukturze mikrytowo-pelitowej i teksturze laminowanej, wyrażonej laminami ilastymi, zbudowanymi głównie z illitu, oraz z mniej licznymi laminami i smugami węglanowymi. Partie węglanowe skały są zbudowane z mikrytu, rzadko mikrosparytu, w których dolomit zazwyczaj przeważa nad kalcytem. W matriks łupków marglistych są rozproszone ziarna detrytycznego kwarcu, w mniejszych ilościach blaszki jasnych łyszczyków i kryształy anhydrytu, rzadko obserwowano gniazda węglanowe do $800 \mu\text{m}$ średnicy. Ziarna detrytycznego kwarcu tworzą niekiedy skupienia, wydłużone równoległe do laminacji. Próbki są pocięte żyłkami węglanowymi o przebiegu równoległym, prostopadłym i skośnym do laminacji. W łupkach są rozproszone liczne skupienia kruszców, często wydłużone zgodnie z laminacją. W laminach ilastych są obecne skupienia materii organicznej. Zawartość substancji organicznej w tych skałach jest w zakresie od $8,32$ do $12,43\%$ wag. (C/Org, zał. 1). Łupki te charakteryzują się niewysokimi zawartościami $\text{MgO}+\text{CaO}$ ($4,65\text{--}5,64\%$ wag.) oraz zmiennymi, ale dość wysokimi koncentracjami krzemionki ($32,91\text{--}35,66\%$ wag.) i żelaza ($1,22\text{--}5,58\%$ wag.), potwierdzającymi sumaryczną przewagę minerałów ilastych i detrytycznego kwarcu nad składnikami węglanowymi. Względnie wysoka zawartość S ($1,69\text{--}5,19\%$ wag.) jest zgodna z obecnością licznych minerałów kruszcowych i niewielką ilością siarczanów w tych próbkach, a dość wysoka zawartość Ag przekłada się na obecność minerałów srebra (LB-1).

Próbka LB-1. Dominującym minerałem kruszcowym jest bornit, który występuje głównie w odmianie pomarańczowej, a w mniejszej ilości w odmianie fioletowej. Pozostałe kruszce są reprezentowane przez piryt, chalkopiryt, galenę, kowelin, digenit i sfaleryt oraz chalkozyn, srebro rodzime i clausthalit. Liczne agregaty bornitu pomarańczowego, o wielkości od kilku do $300 \mu\text{m}$, rzadko większe do $1470 \mu\text{m}$, są zwykle wydłużone lub soczewkowate i ułożone równoległe do laminacji skały. Bornit pomarańczowy występuje często w zrostach z chalkopirytem, kowelinem i pirytem (fig. 2E), nieco rzadziej z galeną, digenitem i sfalerytem. Bornit i chalkopiryt budują także formy żyłkowe o grubości do $255 \mu\text{m}$ i przebiegu równoległym do laminacji. Bornit fioletowy występuje w agregatach ze srebrem rodzimym, o wielkości $10\text{--}160 \mu\text{m}$, w których srebro rodzime lokuje się na brzegach bornitu (fig. 1F). W agregatach tych często występują przerosty chalkozynu, natomiast rzadko obserwowano clausthalit. Piryt jest powszechny w formie kilkumikronowych framboidów, rozproszonych w laminach ilastych oraz w postaci kryształów o kseno- lub hipautomorficznym pokroju, o średnicy od kilku do $70 \mu\text{m}$. Piryt współwystępuje z bornitem pomarańczowym i kowelinem, rzadziej ze sfalerytem. Chalkopiryt przedstawia również samodzielne skupienia

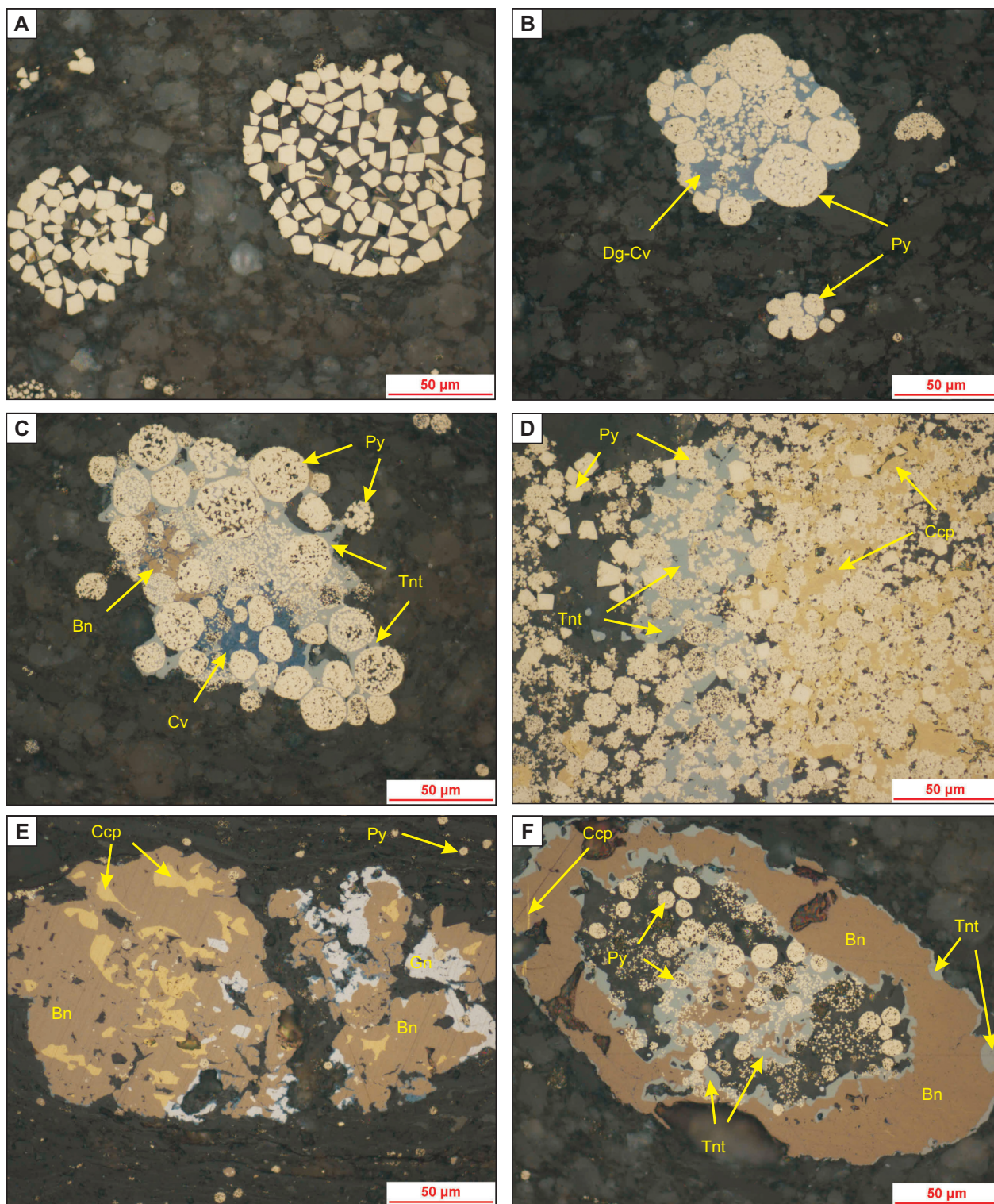


Fig. 2. Minerale kruszcowe w próbkach margli miedzionośnych i lupków miedzionośnych w świetle odbitym

A – skupienia framboidalnego pirytu, p. KK-1; B – kolonie framboidów pirytu (Py) cementowane digenitem i kowelinem (Dg-Cv), p. KK-3; C – kolonie framboidów pirytu (Py) cementowane przez zrosty bornitu (Bn), kowelinu (Cv) i tennantytu (Tnt), p. KK-4; D – agregaty kryształów i framboidów pirytu (Py) cementowane chalkopirytem (Ccp) i tennantytem (Tnt), p. KK-4; E – zrosty bornitu (Bn), chalkopirytu (Ccp) i galeny (Gn), p. LB-1; F – forma organiczna zastępowana przez bornit (Bn), chalkopiryt (Ccp) i tennantyt (Tnt) oraz framboidy pirytu (Py), p. KK-4

Ore minerals in samples of copper-bearing marl and copper-bearing shale in reflected light

A – framboidal pyrite aggregates, s. KK-1; B – aggregates of pyrite framboids (Py) cemented with digenite and covellite (Dg-Cv), s. KK-3; C – aggregates of pyrite framboids (Py) cemented by intergrowths of bornite (Bn), covellite (Cv) and tennantite (Tnt), s. KK-4; D – aggregates of crystals and pyrite framboids (Py) cemented by chalcopyrite (Ccp) and tennantite (Tnt), s. KK-4; E – intergrowths of bornite (Bn), chalcopyrite (Ccp) and galena (Gn), s. LB-1; F – organic structure replaced by bornite (Bn), chalcopyrite (Ccp), tennantite (Tnt) and pyrite framboids (Py), s. KK-4

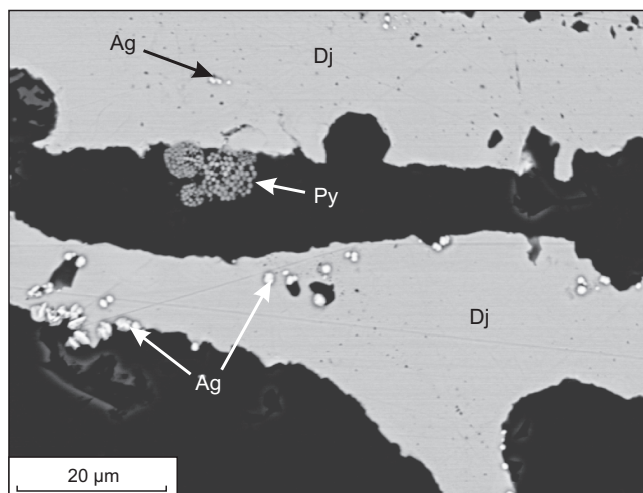


Fig. 3. Fragment formy organicznej zastępowanej przez djurleit (Dj) z mikrowrostkami srebra rodzimego (Ag) i pirytem (Py) próbka KK-4, obraz BSE

Part of an organic form replaced by djurleite (Dj) with microinclusions of native silver (Ag) and pyrite (Py), sample KK-4, BSE image

20–60 μm . Galena jest obecna w postaci kilku skupień o wielkości od kilku do 50 μm oraz w zrostach z digenitem, bornitem i chalkopirytem. Chalkozyn przedstawia soczewkowate skupienia o wielkości nieprzekraczającej 40 μm .

Próbka PL-1. Kruszcze są reprezentowane głównie przez kowelin oraz chalkozyn. Skupienia chalkozynu o zmiennej wielkości od kilku do 560 μm , są przeważnie wydłużone soczewkowato i ułożone równoległe do laminacji skały. Duże agregaty chalkozynu są zarówno wydłużone, jak i izometryczne w pokroju, lokują się w żyłkach kalcytowych skośnie przecinających laminację skały. Skupiska tego siarczku występują często przy ziarnach detrytycznego kwarcu. Kowelin tworzy samodzielne skupienia oraz występuje w postaci przerostów zgodnych z kierunkami krystalograficznymi w chalkozynie (fig. 1D). W ilastym tle skalnym framboidy pirytu zostały całkowicie zastąpione siarczkami miedzi. W skupieniach chalkozynu i kowelinu stwierdzono nieliczne mikrowrostki pirytu. Rzadko obserwowano kowelin i chalkozyn w skupieniach materii organicznej. Analizy chemiczne agregatów chalkozynu wykazały również obecność anilitu, w mniejszej ilości spionkopitu i geerytu.

Próbka RD-1. Dominującymi kruszczami są djurleit i digenit. Podrzędnie występują bornit fioletowy i pomarańczowy, chalkopiryt, kowelin i galena oraz piryt. Digenit i djurleit tworzą owalne, soczewkowate i nieregularne skupienia, zwykle jednak są wydłużone i ułożone zgodnie z laminacją łupka. Djurleit odznacza się barwami od białej z bladoniebieskawym odcieniem do jasnoniebieskiej i słabą anizotropią. Digenit posiada barwę niebieską i jest izotropowy. Wielkość skupień tych siarczków miedzi mieści się w szerokim przedziale od kilku do 200 μm , rzadko występują pojedyncze większe skupienia do 700 μm wielkości. Djurleit poza samodzielnymi skupieniami tworzy agregaty z bornitem fioletowym, niekiedy o charakterze pismowych przerostów

(fig. 1C), a także zrosty z galeną, rzadko zawiera wrostki pirytu. Digenit często przerasta się z kowelinem oraz występuje z bornitem pomarańczowym. W próbce obserwowano nieliczne, równoległe i skośnie do laminacji, drobne żyłki, utworzone przez zrosty galeny z digenitem. Djurleit i digenit zastępują całkowicie framboidy pirytu rozproszone w tle skalnym. Bornit pomarańczowy jest obecny także w postaci prostopadłych do laminacji żyłek o grubości 20–90 μm , w obrębie których współwystępuje z chalkopirytem oraz galeną. W sąsiedztwie tych żyłek lokują się równoległe do laminacji agregaty bornitu pomarańczowego i chalkopirytu. Rzadziej bornit pomarańczowy tworzy zrosty z kowelinem.

SKŁAD CHEMICZNY MINERAŁÓW KRUSZCOWYCH I PŁONNYCH

Z analiz składu chemicznego minerałów płonnych wynika, że kalcyt, dolomit i muskowit w badanych próbkach zawierają znikome ilości domieszek Fe, Cu, Zn lub Mn, a ich skład chemiczny jest zbliżony do stechiometrycznego. Składu chemicznego drobnoziarnistych agregatów minerałów ilastych o krystalochemii illit/muskowit nie określano z powodu bardzo licznych przerostów kalcytu, dolomitu, chlorytu, anhydrytu, chlorków Cu i Na-K oraz submikroskopowych przerostów materii organicznej w tych minerałach. Analizy składu chemicznego minerałów kruszczowych wykazały, że chalkozyn, bornit i kowelin oraz tennantyt, poza Cu, Fe, As i S, posiadają w składzie znaczące domieszki innych pierwiastków. Średnie składy chemiczne głównych minerałów kruszczowych i płonnych przedstawiono w załączniku 3.

Chalkozyn w próbkach margli miedzionośnych charakteryzuje się dużą zmiennością Cu, w zakresie od 71,33 do 79,91% wag., i S, od 19,68 do 27,71% wag., oraz cechują się stałymi, umiarkowanie wysokimi koncentracjami Ag, od 0,01–1,03% wag., o średniej zawartości 0,29% wag. (zał. 3). Najwyższe koncentracje Ag są charakterystyczne dla minerałów o składzie chalkozynu, djurleitu, digenitu i geerytu. Minerale te w próbkach łupków miedzionośnych zawierają koncentracje Cu od 70,45 do 78,63% wag. i S w granicach 20,35–29,47% wag. Analiza stosunków Cu/S wskazuje na obecność anilitu, djurleitu i digenitu, z niewielką ilością chalkozynu, spionkopitu i geerytu. Zawartości Ag w tych siarczkach wynoszą od 0,01 do 1,07% wag., a średnio 0,27% wag. Lokalnie podwyższone koncentracje Fe w siarczkach miedzi (do 2,98% wag.) mogą świadczyć o obecności submikroskopowych wrostków bornitu lub chalkopirytu. Zawartości pozostałych pierwiastków śladowych w chalkozynie są bardzo niskie i nie przekraczają 0,1% wag. (zał. 3).

Bornit w próbkach margli miedzionośnych posiada mało zróżnicowany skład chemiczny, zawierając przeciętnie od 54,75 do 67,16% wag. Cu, od 8,09 do 16,88% wag. Fe i od 24,57 do 28,57% wag. S. Zawartość Ag jest niska, do 0,18% wag. Ag, przy średniej koncentracji 0,08% wag. (zał. 3). W próbkach łupków miedzionośnych zawartości głównych składników w bornicie zmieniają się w następujących zakresach: Cu od 51,01 do 62,41% wag., Fe od 10,77 do

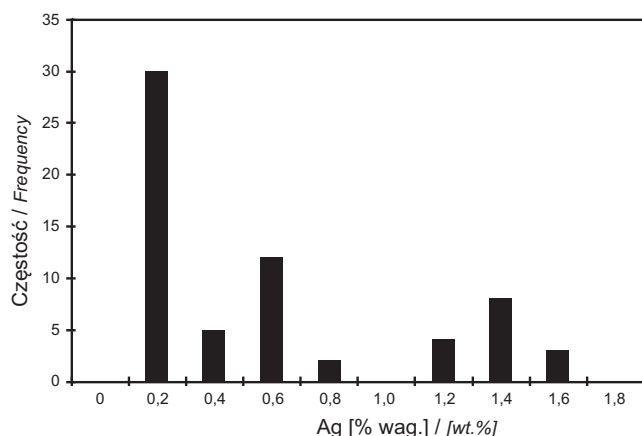


Fig. 4. Histogram zawartości Ag w bornicie z łupków miedzionośnych rejonu Lubin–Sierszowice

Histogram of Ag content in bornite from Kupferschiefer samples, The Lubin–Sierszowice area

15,45% wag., S od 25,23 do 33,10% wag. Koncentracje Ag w bornicie fioletowym mieszczą się w przedziale od 1,09 do 1,52% wag., przy średniej zawartości 1,28% wag., natomiast w bornicie pomarańczowym nie przekraczają 0,63% wag., przy średniej zawartości 0,22% wag. (zał. 3). Na histogramie zawartości Ag w strukturze bornitu są widoczne dwa maksima: ok. 1,4% wag., w którym koncentracje Ag są typowe dla bornitu fioletowego, i 0,2% wag., które jest korelowane z bornitem pomarańczowym (fig. 4). Lokalnie podwyższone zawartości Zn do 0,53% wag. i Pb do 0,23% wag. wskazują na obecność submikroskopowych wrostków sfalerytu i galeny w bornicie. Koncentracje pozostałych pierwiastków śladowych w bornicie oscylują wokół granicy ich detekcji.

Zawartości Ag w kowelinie i yarrowicie w próbkach margli miedzionośnych mieszczą się w przedziale 0,08–1,11% wag., średnio 0,37% wag. i są nieco wyższe od koncentracji tego pierwiastka w kowelinie i yarrowicie z próbek łupków miedzionośnych, które zmieniają się od 0,05 do 0,49% wag., a średnio wynoszą 0,22% wag. (zał. 3). Zawartości pozostałych pierwiastków śladowych w tych minerałach nieznacznie przekraczają granicę ich detekcji. Miejscami podwyższone zawartości Fe mogą odzwierciedlać obecność submikroskopowych przerostów bornitu i/lub chalkopiryty, stanowiących relikty pierwotnych faz zastępowanych przez kowelin, które nie uległy przeobrażeniu.

Tennantyt, obecny we wszystkich próbkach margli miedzionośnych, posiada typowe dla tego minerału zawartości Cu, As, Fe i S oraz odznacza się wysokimi koncentracjami Zn, od 4,68 do 7,82% wag., średnio 6,38% wag. (zał. 3). Niewielkie koncentracje w tym mineralu stanowi Sb, do 0,43% wag., oraz Ag, do 0,5% wag.

Pozostałe minerały kruszcowe nie posiadają w składzie chemicznym znaczących domieszek innych pierwiastków. W chalkopirycie koncentracje Cu zmieniają się od 30,77 do 35,84% wag., Fe od 28,67 do 36,08% wag., S od 31,68 do 36,45% wag. W pojedynczych ziarnach chalkopiryty stwier-

dzono podwyższone zawartości Zn (do 1,17% wag.) i As (do 2,79% wag.). W sfalerycie zawartości Fe zmieniają się od 0,01 do 7,43% wag. i Cd od 0,38 do 0,93% wag., natomiast miedź cechuje się stałymi i wysokimi koncentracjami od 0,05 do 2,88% wag. Spotykane anomalnie wysokie zawartości Cu ok. 7% wag. wynikają z obecności drobnych wrostków siarczków Cu w sfalerycie. Galena nie zawiera podwyższonych domieszek pierwiastków śladowych, a jej główne składniki zmieniają się w stosunkowo wąskich przedziałach: Pb od 85,31 do 86,84% wag., S od 12,67 do 14,04% wag. W pirycie zawartości Fe zmieniają się od 43,74 do 49,32% wag., a S od 48,84 do 54,64%. Koncentracje Cu wynoszą średnio 0,52% wag., natomiast zawartości innych pierwiastków nie przekraczają średnio 0,4% wag. (zał. 3).

BADANIA ILOŚCIOWEGO SKŁADU MINERALNEGO

METODA DYFRAKCJI

PROMIENIOWANIA RENTGENOWSKIEGO (XRD)

W próbkach margli i łupków miedzionośnych metodą dyfrakcji promieniowania rentgenowskiego (XRD) oznaczono minerały płonne, które stanowią ponad 95% objętości badanych próbek i są reprezentowane przez kwarc, skalenie (jako suma skalenii alkalicznych i plagioklazów), kalcyt, dolomit, anhydryt, minerały ilaste o krystalochemii zbliżonej do muskowitu i illitu, a także kaolinit oraz minerały wietrzeniowe paratakamit i anataz (tab. 1). Wśród minerałów kruszcowych zidentyfikowano chalkozyn, djurleit, bornit, chalkopiryty, piryty, kowelin i tennantyt. Ze względu na niskie koncentracje kruszców w większości próbek nie oznaczono wszystkich stwierdzonych mikroskopowo minerałów kruszcowych, a obliczenia ilościowej zawartości oznaczonych faz kruszcowych są obciążone dużym błędem, dlatego nie wzięto ich pod uwagę w dalszych rozważaniach. Próbkę margli miedzionośnych charakteryzują się wysoką zawartością kalcytu (od 16 do 22% wag), minerałów ilastych wraz z muskowitem (od 12 do 38% wag) i kwarcu (od 7 do 24% wag.). Zawartości skalenii i dolomitu są znacznie niższe i wynoszą odpowiednio od 4,0 do 14,9% wag. i od 1 do 7% wag. Wyniki te wskazują, że skały te mają skład mineralny wapieni marglistych (tab. 1). Stałym składnikiem badanych margli i łupków miedzionośnych jest anhydryt, którego zawartość zmienia się w przedziale 3–7% wag. W próbkach łupków miedzionośnych skład minerałów płonnych jest zdominowany przez minerały ilaste (37–43% wag.) i kwarc (21–31% wag.). Zawartości węglanów, reprezentujące sumę kalcytu i dolomitu, mieszczą się w przedziale od 2 do 12% wag. (tab. 1) i są zgodne z ilastym charakterem tych skał.

METODA KOMPUTEROWEJ

ANALIZY OBRAZU MIKROSKOPOWEGO (CAMI)

Na podstawie wielkoformatowych obrazów całych powierzchni preparatów mikroskopowych wykonanych

Tabela 1

Zawartości minerałów [% wag.] otrzymane metodą XRD w próbkach margli miedzionośnych (KK-1, KK-2, KK-3, KK-4) i łupków miedzionośnych (LB-1, PL-1, RD-1)

Mineral contents [wt.%] obtained by XRD method in copper-bearing marl samples (KK-1, KK-2, KK-3, KK-4) and Kupferschiefer samples (LB-1, PL-1, RD-1)

Minerał	Numer próbki						
	KK-1	KK-2	KK-3	KK-4	LB-1	PL-1	RD-1
Minerały skałowórcze							
Kwarc	27	20	23	21,8	23,5	21	31
Illit*	30	35	32	36,6	41,9	37	44
Dolomit	1	1	5	4,0	2,0	6	4
Kalcyt	22	16	18	11,9	–	6	1
Skaleń	4	4	7	14,8	–	–	–
Anhydryt	–	3	5	–	7,1	4	–
Kaolinit	10	13	7	5,9	–	–	–
Minerały wietrzeniowe							
Paratakamit	–	–	–	–	–	7	–
Anataz	–	–	–	–	–	–	<1
Minerały kruszczowe							
Chalkozyn	4	2	2	–	–	2	13
Djurleit	–	–	–	–	–	15	–
Bornit	<1	–	–	2	16,3	–	3
Chalkopiryt	1	–	–	<1	3,1	–	1
Piryt	1	3	1	2	6,1	–	3
Kowelin	–	2	–	–	–	2	–
Tennantyt	–	–	–	1	–	–	–

* illit przedstawia łączną zawartość minerałów ilastych (poza kaolinitem) i jasnych lyszczyków

* illite shows the total content of clay minerals (excluding kaolinite) and white micas

Tabela 2

Zawartości minerałów kruszczowych [% obj.] otrzymane metodą komputerowej analizy obrazu mikroskopowego (CAMI) w próbkach margli miedzionośnych (KK-1, KK-2, KK-3, KK-4) i w łupków miedzionośnych (LB-1, PL-1, RD-1)

Ore mineral contents [% vol.] obtained by computer analysis of microscopic image (CAMI) in samples of copper-bearing marls (KK-1, KK-2, KK-3, KK-4) and Kupferschiefer samples (LB-1, PL-1, RD-1)

Minerał	Numer próbki						
	KK-1	KK-2	KK-3	KK-4	LB-1	PL-1	RD-1
Chalkozyn	–	0,15	0,46	0,05	4,36	1,63	6,70
Digenit	0,30	–	–	–	–	–	–
Bornit pomarańczowy	0,10	–	–	0,08	6,17	–	0,41
Bornit fioletowy	–	–	–	–	–	1,63	6,70
Chalkopiryt	0,01	–	–	0,10	1,41	–	0,20
Piryt	0,06	0,34	0,55	0,10	0,20	–	–
Kowelin	–	0,16	0,08	–	1,19	4,34	2,87
Galena	–	0,01	–	–	–	–	0,40
Sfaleryt	–	–	–	–	0,20	–	–
Tło skalne	99,53	99,34	98,91	99,67	86,47	92,40	82,72
Sumaryczna zawartość kruszczów	0,47	0,66	1,09	0,33	13,53	7,60	17,28

w świetle odbitym, w badanych próbkach margli i łupków miedzionośnych określono ilościową zawartość następujących minerałów kruszczowych: chalkozyn, digenit, bornit pomarańczowy i fioletowy, chalkopiryt, piryt, kowelin i galena (tab. 2). Metoda CAMI pozwoliła na rozdzielenie zawartości bornitu pomarańczowego i wrzosoowego, natomiast metodą tą nie wyznaczono zawartości tennantytu, który ze względu na bardzo zbliżoną zdolność refleksyjną do refleksyjności chalkozynu, był z nim traktowany łącznie. Pomiędzy fazy kruszczowe występujące w badanych próbkach rzadko i w śladowych ilościach (<0,01% obj.), takie jak: srebro rodzime, claussthalit i sfaleryt.

Minerały kruszczowe w próbkach margli miedzionośnych występują w niewielkich ilościach, zwykle w postaci nierównomiernie rozmieszczonych skupień, koncentrują się w strefach równoległych do łupkowej tekstury skały lub tworzą nagromadzenia w obrębie domen o nieregularnym przebiegu. Tego rodzaju tekstury kruszczowe powodują, że wyniki procentowej zawartości kruszczów uzyskane z powierzchni preparatu mikroskopowego mogą odbiegać znacząco od ilościowego składu mineralnego występującego w całej badanej próbce. Sumaryczne zawartości minerałów kruszczowych w badanych marglach miedzionośnych są niskie i wynoszą od 0,23 do 1,09% obj. (tab. 2). We wszystkich próbkach margli na podstawie CAMI stwierdzono występowanie pirytu od 0,06 do 0,55% obj. Zawartości chalkozynu mieszczą się w przedziale 0,15–0,46% obj. Pozostałe siarczki miedzi zarejestrowano w ilościach nieprzekraczających 0,3% obj.

Próbki łupków miedzionośnych cechują wyraźnie wyższe zawartości minerałów kruszczowych w porównaniu do próbek margli, a liczne agregaty kruszczów są rozmieszczone zazwyczaj równomiernie w skali preparatu mikroskopowego. Najwyższe koncentracje kruszczów wykazały próbki łupków miedzionośnych LB-1 i RD-1, mieszczące się w przedziale od 13,53 do 17,28% obj., wśród których dominują bornit pomarańczowy i fioletowy (łącznie 6,17–7,11% obj.), chalkozyn (4,36–6,7% obj.) oraz kowelin (1,19–2,87% obj.), a w mniejszych ilościach występuje chalkopiryt. Badania CAMI wykazały śladowe ilości pirytu i galeny (tab. 2). Nieco niższa zawartość minerałów kruszczowych, na poziomie 7,6% obj., została otrzymana dla próbki PL-1, w której głównym siarczkiem miedzi jest kowelin (4,34% obj.).

PRZYGOTOWANIE DO OBLICZEŃ DANYCH CHEMICZNYCH I MINERALOGICZNYCH

Do obliczeń ilościowego składu mineralnego margli i łupków miedzionośnych na podstawie analiz chemicznych tych skał wybrano koncentracje pierwiastków głównych (SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , MgO , CaO , Na_2O , K_2O , TiO_2 , P_2O_5 , MnO oraz Ba i Sr) oraz tych metali (Cu, Ag, Pb, Zn, Ni, Co, As, Sb), które występują w znaczących koncentracjach w badanych próbkach i/lub mają istotne znaczenie w składzie chemicznym minerałów płonnych i kruszczowych (zał. 1). Do zestawu danych analitycznych włączono koncentracje węgla organicznego, nieorganicznego i siarki, przy czym zawartość węgla nieorganicznego wyznaczono jako różnicę wagową węgla całkowitego i organicznego (TOT/C-ORG/C). Następnie zawartości wszystkich wybranych składników przeliczono na koncentracje pierwiastków w % wag. i znormalizowano do 100% wag. W celu zastosowania obliczeń analogicznych do procedury CIPW do margli i łupków miedzionośnych określono na bazie obserwacji mikroskopowych oraz badań metodą XRD i CAMI zestaw minerałów płonnych i kruszczowych, tworzących badane próbki oraz zdefiniowano składy chemiczne minerałów. Stosunki ilościowe kruszców wyznaczono na podstawie obserwacji mikroskopowych i wyników CAMI. Składy chemiczne minerałów wyprowadzono z ich wzorów stechiometrycznych, a następnie zmodyfikowano na podstawie wyników analiz ich składu chemicznego (tab. 3). W badanych skałach rzadko obserwowano minerały Ag (zał. 2), natomiast na podstawie badań EPMA stwierdzono, że większa część Ag jest związana w strukturze minerałów grupy chalkozynu i w bornicie. W wyniku analizy zmienności koncentracji Ag w tych minerałach przyjęto zawartość Ag 0,3% wag. dla minerałów grupy chalkozynu i 0,1% wag. dla bornitu. Na podstawie średniego składu chemicznego cynkowego tennantytu przyjęto do obliczeń zawartość Zn 6,40% wag. Ze względu na niewielką zawartość domieszek w strukturze pirytu, chalkopirytu, sfalerytu i galeny przyjęto, że skład tych faz mineralnych jest zbliżony do ich składu stechiometrycznego. W celu uwzględnienia Ni i Co do obliczeń włączono siegenit, który nie był obserwowany w badanych próbkach, ale występuje w skałach miedzionośnych z tego regionu (np. Kucha, 2007). Pozostałe Fe przeliczono na teoretyczny magnetyt i goethyt. W trakcie obliczeń rozdzielono pulę moli pierwiastków między zdefiniowane fazy mineralne. Najpierw wydzielono fazy o unikatowym składzie chemicznym, w których można było zdefiniować pierwiastek wiodący, nie występujący w innych fazach mineralnych. Następnie do pierwiastka wiodącego dobrano pozostałe pierwiastki, uwzględniając obliczone współczynniki rozdziału (np. Cu/S pozwala po przydzieleniu Cu do minerału i dodanie do niego stechiometrycznej ilości S). Stosunki ilościowe minerałów kruszczowych zawierających ten sam pierwiastek wiodący Cu, który służy do dyskryminacji siarczków miedzi, tj. chalkopirytu, bornitu, chalkozynu i kowelinu, wyznaczono na podstawie obserwacji mikroskopowych i badań metodą CAMI (tab. 4).

PROCEDURA OBLICZANIA SKŁADU IŁOŚCIOWEGO MINERAŁÓW NA PODSTAWIE ANALIZ CHEMICZNYCH MIEDZIONOŚNYCH SKAŁ OSADOWYCH

Przeliczanie składu chemicznego badanych próbek margli i łupków miedzionośnych na skład ilościowy występujących w nich minerałów przeprowadzono w 3 etapach:

(I) Znormalizowane do 100% wag. wyniki analiz chemicznych przeliczono na ilości moli pierwiastków.

(II) Ilości moli pierwiastków rozdzielono między zdefiniowany zespół minerałów zgodnie z proporcjami pierwiastków, określonymi wzorami krystalochemicznymi obliczanych minerałów (tab. 3). W procesie rozdziału pierwiastków między zdefiniowane minerały zastosowano następującą kolejność obliczania: apatyt (P) > anataz (Ti) > C (C org.) > baryt (Ba, S) > albit (Na, Al, Si) > illit (K, Al, Si) > dolomit ((Mg+Mn); przy założeniu, że stosunek Mg+Mn do Ca jest równy 1:1) > anhydryt (Sr, Ca, S; przy założeniu, że koncentracja Sr w strukturze anhydrytu jest równa 1000 ppm) > kalcyt (Ca, pozostała ilość moli Ca); kwarc (Si, pozostała ilość moli Si).

Po obliczeniu ilości moli minerałów stanowiących składniki płonne, określono zawartość minerałów kruszczowych w następującej kolejności: galena (Pb, S) > sfaleryt (Zn, S) > tennantyt (As+Sb, Zn, Fe, Cu, S) > siegenit (Ni+Co, S) > chalkopiryty (Cu, Fe, S, podział Cu między współwystępujące z chalkopirytem, bornit, chalkozyn, kowelin, na podstawie wyników mikroskopowej analizy ilościowej) > bornit (Cu, Fe, S) > chalkozyn I (Cu, Ag, S) > chalkozyn II (Cu, S) > piryt (S, Fe) > magnetyt (Fe, pozostałe wolne Fe, przeliczono na teoretyczny goethyt).

(III) Otrzymaną ilość moli danego minerału przeliczono na skład mineralny wyrażony w % wag., a po uwzględnieniu ich przybliżonej gęstości na udziały objętościowe (tab. 5).

Porównanie ilościowych zawartości kruszców otrzymanych na podstawie przeliczeń składu chemicznego skały na ilościowy skład mineralny z metodą CAMI przedstawiono w tabeli 6.

DYSKUSJA WYNIKÓW I WNIOSKI

Obok koncentracji metali, znajomość ilościowego składu minerałów kruszczowych w miedzionośnych skałach osadowych jest kluczową informacją o zasięgu obszaru złożowego, niezbędną do wstępnego planowania procesu przetwarzania skały rudnej. Podczas prac poszukiwawczo-rozpoznawczych złóż rud miedzi są wykonywane liczne analizy chemiczne rud miedzi oraz częściowe badania mineralogiczne. Ilościowa zawartość kruszców w rudzie wyznaczana jest za pomocą planimetrii, metodą XRD oraz komputerową analizą obrazu mikroskopowego (CAMI). Tradycyjnie stosowana planimetria jest niezmiernie pracochłonna, a jej wyniki są ograniczone do powierzchni szlifów mikroskopowych. Metoda XRD pozwala na identyfikację jakościową i ilościową minerałów, przy czym granica wykrywalności jest od-

Tabela 3

**Składy chemiczne minerałów używane do obliczeń, zmodyfikowane na podstawie danych mineralogicznych i chemicznych.
Symbole minerałów wg Whitney i Evans (2010)**

Chemical compositions of minerals used for calculations, modified based on mineralogical and chemical data.
Mineral symbols according to Whitney and Evans (2010)

	Ap	Ant	C-Org	Brn	Ab	Ms	Dol	Anh	Cal	Qz	Gn	Sp	Tnt	Zn-Tnt	Sg	Ccp	Bn	Ag-Bn	Cct	Ag-Cct	Cv	Ag	Py	Mag	Gth
P	18,43																								
Ti		59,94																							
Si					31,50	21,13				46,74															
Al					10,77	20,30																			
Fe												2,88	3,80	1,65		30,43	11,13	10,91					46,55	72,36	62,85
Mg							13,18																		
Ca	39,74				0,76		21,73	29,44	40,04																
Ba																									
Na																									
K																									
Cu													47,51	43,85		34,63	63,31	63,05	79,85	79,55	66,46				
Ag																	0,10		0,30		100				
Zn												64,06		6,40											
Pb											86,60														
Ni																									
Co																									
As																									
S													20,37	19,35											
C			100				13,03		12,00		13,40	33,06	28,32	28,75	42,12	34,94	25,56	25,94	20,15	20,15	33,54		53,45		
O	38,07	40,06			27,42	48,66	52,06	47,01	47,96	53,26														27,64	36,02
H						0,46																			
F	3,77					0,95																			1,13
Suma	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100

C-Org – węgiel organiczny, Sg – siegenit, Ag – srebro rodzime
C-Org – organic carbon, Sg – siegenite, Ag – native silver

Tabela 6

Porównanie zawartości minerałów kruszczowych w próbkach margli i łupków miedzionośnych otrzymanych metodą CAMI i na podstawie przyjętej procedury obliczeń (ACP)

Comparison of ore mineral contents in samples of copper-bearing marl and Kupferschiefer obtained by the CAMI method and by the adopted calculation procedure (ACP)

Minerał	Numer próbki													
	KK-1		KK-2		KK-3		KK-4		LB-1		PL-1		RD-1	
	CAMI	ACP	CAMI	ACP	CAMI	ACP	CAMI	ACP	CAMI	ACP	CAMI	ACP	CAMI	ACP
Chalkozyn	0,30	0,23	0,15	0,39	0,46	0,67	0,05	0,06	4,36	0,52	1,63	3,15	6,70	4,61
Bornit	0,10	0,09	0	0	0	0	0,08	0	6,17	0,93	1,63	3,97	7,11	6,11
Chalkopiryt	0,01	0,01	0	0	0	0	0,10	0,24	1,41	0,40	0	0,20	0,20	0,27
Piryt	0,06	1,35	0,34	1,03	0,55	1,00	0,10	1,41	0,20	6,66	0	0	0	0
Kowelin	0	0	0,16	0,51	0	0,14	0	0	1,19	0,17	4,34	0	2,87	2,36
Galena	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,40	0
Sfaleryt	0	0	0	0	0	0	0	0	0,20	0,21	0	0	0	0,01
Suma	0,47	1,68	0,65	1,93	1,01	1,81	0,33	1,71	13,53	8,89	7,60	7,32	17,28	13,36

cowych (chalkozyn, bornit, kowelin, chalkopiryt, piryt), który zidentyfikowano za pomocą metody CAMI. Wyjątek stanowią próbki KK-3 i PL-1. W tej pierwszej obliczono zawartość 0,14% obj. kowelinu, podczas gdy minerału tego nie stwierdzono metodą CAMI, mimo odnotowania jego obecności w tej próbce podczas obserwacji mikroskopowych. W próbce PL-1 metodą CAMI otrzymano zawartość kowelinu 4,34% obj., natomiast obliczenia nie wykazały obecności tego minerału w próbce. Dla próbek margli miedzionośnych i próbki łupka PL-1 o niskich koncentracjach kruszczów, otrzymane zawartości poszczególnych minerałów kruszczowych są nieco wyższe od wartości obliczonych na podstawie przyjętej procedury, a w próbkach łupków miedzionośnych (LB-1, RD-1) zawierających większe koncentracje kruszczów, obliczone zawartości minerałów kruszczowych są niższe od wartości uzyskanych metodą CAMI. Znacząco różne wyniki otrzymano tymi dwiema metodami dla pirytu. Obliczone wysokie zawartości pirytu dla każdej próbki, w której zidentyfikowano tę fazę, mogą wynikać nie tylko z dużego udziału tego minerału w badanych skałach, lecz także częściowo mogą być spowodowane niewłączeniem Fe do struktury minerałów płonnych podczas obliczeń.

Proporcje zawartości minerałów kruszczowych obliczonych na podstawie przyjętej procedury są zgodne z proporcjami kruszczów uzyskanymi metodą CAMI. Otrzymane wyniki wskazują, że obliczenia składu mineralnego na podstawie składu chemicznego skał, które posiadają skład mineralny o bardzo zróżnicowanej ilości składników, nie umożliwiają obliczenia zawartości minerałów na podstawie koncentracji pierwiastków mniejszej niż 100 ppm (np. w przypadku galeny, tab. 6). Przeliczając na podstawie przyjętej procedury wyniki analiz chemicznych całych sproszkowanych próbek skalnych, statystycznie reprezentujących poszczególne partie badanego profilu złożowego, można uzyskać dane o ilościowej zawartości kruszczów w badanych próbkach zbliżonej do stanu faktycznego.

Stosowany w tych badaniach sposób przeliczeń składu chemicznego skały na jej ilościowy skład mineralny wyma-

ga przetestowania również innych wariantów rozdzielania udziałów molowych pierwiastków między zdefiniowany zestaw minerałów w celu dopracowania przyjętej procedury obliczeń. Wyjaśnienia wymagają jeszcze szczególnie duże różnice w zawartości kruszczów obliczone na podstawie przyjętej procedury i otrzymane metodą CAMI w próbce LB-1 (tab. 6). Niemniej, uzyskane wyniki wskazują, że, dysponując analizami chemicznymi miedzionośnych skał osadowych oraz częściowymi danymi mineralogicznymi, koniecznymi do wyznaczenia zespołu minerałów płonnych i kruszczowych, ich średnich składów chemicznych oraz wzajemnych proporcji kruszczów miedzi, możliwe jest stosunkowo szybkie otrzymanie pierwszego przybliżenia ilościowej zawartości minerałów kruszczowych w badanych skałach rudnych. Uzyskane w ten sposób dane o udziale kruszczów w badanych próbkach na podstawie wyników analiz chemicznych mogą być praktycznie wykorzystane na etapie poszukiwania i rozpoznawania złóż rud miedzi oraz do planowania lub modyfikacji procesów przeróbki rud miedzi.

Podziękowania. Autorka dziękuje dr. Krzysztofowi Nejbortowi za wykonanie badań mikrosondowych i komentarz naukowy oraz dr. hab. Sławomirowi Oszczepalskiemu za cenne uwagi, które ulepszyły pierwotną wersję artykułu.

Badania wykonano w ramach projektu statutowego pt. „Zintegrowane badania geochemiczne i mineralogiczne osadowych skał miedzionośnych jako metoda eksploracji mineralizacji kruszczowej Cu-Ag-Pb-Zn” finansowanego z funduszy KGHM CUPRUM Sp. z o.o. CBR.

LITERATURA

- BERREZUETA E., ORDÓÑEZ-CASADO B., BONILLA W., BANDA R., CASTROVIEJO R., CARRIÓN P., PUGLLA S., 2016 – Ore petrography using optical image analysis: application to Zaruma-Portovelo deposit (Ecuador). *Geosciences*, 6: 30, doi:10.3390/geosciences6020030.
- COHEN D., WARD C.R., 1991 – SEDNORM – A program to calculate a normative mineralogy for sedimentary rocks

- based on chemical analyses. *Computers & Geosciences*, **17**: 1235–1253.
- COX K.G., BELL J.D., PANKHURST R.J., 1979 – The Interpretation of Igneous Rocks. Allan & Unwin, London.
- GONZÁLEZ-GUZMÁN R., 2016 – NORRRM: A Free Software to Calculate the CIPW Norm. *Open J. Geol.*, **6**: 30–38.
- KACKSTAETTER U.R., 2014 – SEDMIN – Microsoft Excel™ spreadsheet for calculating fine-grained sedimentary rock mineralogy from bulk geochemical analysis. *Cent. Eur. J. Geosci.*, **6**: 170–181.
- KESLEY C.H., 1965 – Calculation of the CIPW norm. *Mineral. Mag.*, **34**: 276–282.
- KUCHA H., 2007 – Mineralogia kruszcowa i geochemia ciała rudnego złoża Lubin-Sieroszowice. *Biul. Państw. Inst. Geol.*, **423**: 77–97.
- LeMAITRE R.W., 1982 – Numerical petrology: statistical interpretation of geochemical data. Amsterdam, Elsevier.
- LeMAITRE R.W., 2002 – Igneous rocks. A Classification and Glossary of Terms. Recommendations of the International Union Of Geological Sciences Subcommission on the Systematics of Igneous Rocks. Cambridge University Press.
- MAJEROWICZ A., WIERZCHOŁOWSKI B., 1990 – Petrologia skał magmowych. Wydaw. Geol.
- PRUSETH K.L., 2009 – Calculation of the CIPW Norm: New Formulas. *J. Earth Sys. Sci.*, **118**: 101–113.
- ROLLINSON H.R., 1993 – Using geochemical data: evaluation, presentation, interpretation. Longman Harlow.
- ROSEN O.M., ABBYASOV A.A., 2003 – The quantitative mineral composition of sedimentary rocks: Calculation from chemical analyses and assessment of adequacy (MINLITH Computer Program). *Lithol. Miner. Res.*, **38**: 252–264.
- SNYDER R.L., BISH D.L., 1982 – Quantitative analysis. *W: Modern powder diffraction* (red. D.L. Bish, J.E. Post). *Rev. Miner.*, **20**: 101–144.
- VERMA S.P., TORRES-ALVARADO I.S., SOTELO-RODRÍGUEZ Z.T., 2002 – SINCLAS: Standard Igneous Norm and Volcanic Rock Classification System. *Comput. Geosci.*, **28**: 711–715.
- VERMA S.P., TORRES-ALVARADO I.S., VELASCO-TAPIA F., 2003 – A Revised CIPW Norm. *Swiss Bull. Miner. Petrol.*, **83**: 197–216.
- WHITNEY D.L., EVANS B.W., 2010 – Abbreviations for names of rock-forming minerals. *Amer. Miner.*, **95**: 185–187.
- YOUNG R.A., 1993 – The Rietveld method. IUCr Monographs on Crystallography, no 5. Oxford University Press.

SUMMARY

An economic assessment of ore mineralization of the Kupferschiefer Cu-Ag-Pb-Zn deposits in SW Poland is based on the results of chemical analyses of ore-hosted rocks and their mineralogical data. In contrast to numerous chemical analyses, the identification of mineral parageneses and the determination of their content in the ores is usually performed for a limited number of samples. Quantitative content of ore minerals in rock samples is determined by means of various methods (planimetry, XRD method and computer analysis of microscopic image (CAMI)), but each of them has some limitations. Traditionally used planimetry is extremely labour-intensive and its results are limited to the surface of thin sections. The XRD method allows the identification of minerals and their quantitative content, with the limit of detection being different for various mineral phases depending on the size of crystallites, their chemical composition, and structure type. The minimum amount of mineral that can be identified by this method is in a range of 1–5 vol.%. The limit of the CAMI method is the imaging resolution. Its results, like with planimetry, are limited to the surface of thin sections and may not be representative of samples with uneven distribution of ore aggregates. Therefore, calculating the quantitative mineral composition of mineralized sedimentary rocks from their chemical analyses (similar to the case with igneous rocks) using calculation analogical to the CIPW norm is a fast and potentially the most precise method of estimating the quantitative mineral composition, and, in particular, the quantitative ore content. The condition for using this method for copper-bearing sedimentary rocks with complicated mineral composition was to determine the actual set of ore minerals present in the study samples, the chemical composition of the minerals, and quantitative relations of copper sulphides. The aim of this

study was to test the effectiveness of the adopted calculation procedure for the estimation of the content of ore minerals based on chemical analyses of the copper-bearing sedimentary rocks.

The research material comprised samples of copper-bearing marls from the eastern part of the North-Sudetic Synclinorium (the abandoned “Konrad” mine), and samples of the Kupferschiefer from the Fore-Sudetic Monocline (the Lubin–Sieroszowice deposit and mine area). The work carried out in order to obtain mineralogical and chemical data necessary for calculations and verification of their results covered chemical analyses of whole rock samples, microscopic analysis of ores and gangue minerals, and analysis of chemical composition of minerals made by electron probe micro analyzer (EPMA). Independently, the quantitative mineral composition of ores was determined based on computer analysis of microscopic images (CAMI), and of rock-forming minerals by X-ray diffraction (XRD). Based on the adopted calculation procedure, the same set of ore minerals was obtained (chalcocite, bornite, covellite, chalcopyrite, pyrite), which was identified in the rocks by means of the CAMI method in samples of copper-bearing rocks. For samples with low ore concentrations, the calculated contents of individual ore minerals are similar or slightly higher than the values obtained by the CAMI method, while for samples of copper-bearing rocks containing higher concentrations of ores, the calculated mineral ore contents are slightly lower than the values obtained by the CAMI method. These differences may be due to different methods of averaging samples (powdered, averaged rock, and thin-section). The calculated high levels of pyrite for each sample, in which this phase has been identified, may result from the actual high proportion of this mineral in the studied samples, and partly due to

the non-distribution of Fe into the gangue mineral structure during the calculation. The proportions of the contents of ore minerals calculated by the adopted calculation procedure are consistent with the proportion of ores obtained by the CAMI method.

The results of the study indicate that the calculation of the quantitative composition of ore minerals can be used for the first quantitative approximation of the ore content in ore rocks during geological prospection and exploration

studies; however, they require testing more variants of element partition between the set of defined minerals. The proposed method to calculate the quantitative mineral composition from the chemical analyzes of ore rocks allows to specify mineralogical data during geological field works. These data, obtained at negligible extra cost, can be helpful to determine the extent of the deposit zone and to constrain the nature of mineralization. Such constraints are crucial to infer for ore rock processing and metal recovering.

Średni skład chemiczny minerałów (w % wag.) na podstawie badań przy użyciu mikrosondy elektronicznej (EPMA)

The average chemical composition of minerals (in wt.%) determined by electron microprobe (EPMA)

	Fe	Cu	Co	Ni	As	Se	S	Ag	Pb	Zn	Cd	Sb	Hg	Total	n
Margle miedzionośne z kopalni „Konrad”															
Minerały grupy chalkozynu															
średnia	0,15	77,98	0,01	0,01	0,01	0,01	21,53	0,29	0,01	0,04	0,01	0,00	0,00	100,05	180
s.d.	0,49	1,56	0,01	0,02	0,03	0,02	1,36	0,20	0,02	0,04	0,01	0,01	0,00	0,32	
Bornit															
średnia	11,34	61,98	0,01	0,01	0,03	0,00	26,46	0,08	0,00	0,07	0,01	0,00	0,00	99,99	50
s.d.	1,25	2,00	0,01	0,01	0,07	0,01	0,80	0,05	0,00	0,06	0,02	0,01	0,00	0,33	
Kowelin															
średnia	0,27	67,76	0,01	0,01	0,01	0,02	31,45	0,37	0,01	0,02	0,01	0,00	0,00	99,94	21
s.d.	0,20	1,62	0,01	0,02	0,02	0,02	1,57	0,26	0,02	0,03	0,01	0,01	0,00	0,30	
Tennantyt															
średnia	1,65	43,74	0,03	0,01	19,30	0,04	28,67	0,07	0,01	6,38	0,08	0,04	0,00	99,99	64
s.d.	1,01	1,28	0,02	0,02	0,41	0,04	0,57	0,12	0,02	0,60	0,02	0,07	0,01	0,21	
Łupki miedzionośne z rejonu Lubin–Sieroszowice															
Minerały grupy chalkozynu															
średnia	0,10	76,06	0,01	0,01	0,01	0,02	23,57	0,27	0,02	0,04	0,01	0,01	0,01	100,14	86
s.d.	0,12	2,26	0,02	0,02	0,06	0,02	2,40	0,38	0,04	0,04	0,01	0,01	0,02	0,38	
Bornit fioletowy															
średnia	11,95	58,81	0,01	0,01	0,01	0,00	26,90	1,28	0,10	0,10	0,02	0,01	0,00	100,21	15
s.d.	0,31	0,65	0,01	0,02	0,02	0,00	0,24	0,12	0,05	0,13	0,02	0,01	0,00	0,47	
Bornit pomarańczowy															
średnia	12,68	58,50	0,02	0,01	0,01	0,00	28,31	0,22	0,10	0,06	0,01	0,01	0,00	99,94	49
s.d.	1,18	3,54	0,02	0,01	0,01	0,00	2,36	0,21	0,06	0,04	0,01	0,01	0,00	0,46	
Kowelin															
średnia	0,66	67,78	0,02	0,01	0,04	0,02	31,29	0,22	0,06	0,05	0,00	0,01	0,01	100,17	16
s.d.	0,96	2,62	0,03	0,02	0,12	0,03	1,56	0,12	0,09	0,05	0,01	0,01	0,02	0,38	
Pozostałe siarczki z próbek margli i łupków miedzionośnych															
Chalkopiryt															
średnia	32,21	33,24	0,01	0,01	0,34	0,01	34,73	0,02	0,10	0,17	0,02	0,01	0,00	99,85	17
s.d.	1,46	1,38	0,03	0,02	0,88	0,01	0,74	0,03	0,07	0,33	0,02	0,01	0,00	0,75	
Sfaleryt															
średnia	0,83	1,31	0,00	0,01	0,02	0,01	32,91	0,02	0,02	64,41	0,27	0,01	0,01	99,84	22
s.d.	1,59	1,57	0,01	0,02	0,02	0,01	1,03	0,02	0,04	3,62	0,33	0,01	0,02	0,29	
Galena															
średnia	0,30	0,15	0,01	0,02	0,01	0,01	13,26	0,02	86,08	0,10	0,01	0,00	0,00	99,97	11
s.d.	0,16	0,14	0,02	0,01	0,01	0,02	0,52	0,05	0,54	0,11	0,02	0,01	0,00	0,40	
Piryt															
średnia	46,92	0,52	0,02	0,02	0,07	0,01	52,32	0,04	0,00	0,03	0,02	0,00	0,01	99,98	18
s.d.	0,66	1,10	0,03	0,03	0,05	0,01	1,40	0,05	0,01	0,03	0,03	0,01	0,02	0,02	
Minerały płonne z próbek margli i łupków miedzionośnych															
	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	ZnO	CuO	BaO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	F	Total	n
Kalcyt															
średnia	0,18	n.a.	0,01	0,32	0,40	0,69	0,11	n.a.	0,01	53,46	n.a.	0,07	n.a.	55,17	43
s.d.	0,39	-	0,02	0,27	0,37	0,43	0,17	-	0,03	1,62	-	0,06	-	1,44	
Dolomit															
średnia	1,05	n.a.	1,08	1,08	0,17	16,81	0,00	n.a.	0,03	37,02	0,35	n.a.	n.a.	56,07	5
s.d.	1,06	-	1,29	1,29	0,05	1,07	0,01	-	0,02	4,07	0,29	-	-	2,44	
Muskowit															
średnia	48,20	0,67	35,27	1,61	0,03	1,10	n.a.	0,11	0,10	0,22	0,38	9,95	0,19	97,82	7
s.d.	0,87	0,49	0,90	0,34	0,02	0,27	-	0,09	0,04	0,05	0,13	1,11	0,18	2,11	

s.d. – odchylenie standardowe; n.a. – nieanalizowane

s.d. – standard deviation; n.a. – not analyzed

Zestawienie obserwacji petrograficzno-mineralogicznych uzyskanych przy użyciu mikroskopu optycznego, uzupełnionych informacjami z mikroskopu elektronowego (SEM/EDS) dla próbek margli miedzionośnych i łupków miedzionośnych

List of petrographic-mineralogical observations obtained using an optical microscope, supplemented with information from a scanning electron microscope (SEM/EDS) for samples of copper-bearing marl and Kupferschiefer

	Numer próbki						
	KK-1	KK-2	KK-3	KK-4	LB-1	PL-1	RD-1
Jednostka geologiczna	synklinorium północnosudeckie	synklinorium północnosudeckie	synklinorium północnosudeckie	synklinorium północnosudeckie	monoklina przedsudecka	monoklina przedsudecka	monoklina przedsudecka
Lokalizacja	kop. „Konrad”	kop. „Konrad”	kop. „Konrad”	kop. „Konrad”	rejon Lubin–Sieroszowice	rejon Lubin–Sieroszowice	rejon Lubin–Sieroszowice
Poziom stratygraficzny	margle miedzionośne	margle miedzionośne	margle miedzionośne	margle miedzionośne	łupek miedzionośny	łupek miedzionośny	łupek miedzionośny
Litologia	margiel ilasty	margiel ilasty	margiel ilasty, organodetrytyczny	margiel ilasty	łupek marglisty	łupek marglisty	łupek marglisty
Struktura i tekstura skały	mikrosparytowo-pelitowa, niewyraźnie smugowana	mikrosparytowo-pelitowa, smugowana	mikrosparytowo-pelitowa, niewyraźnie smugowana	mikrosparytowo-pelitowa, niewyraźnie smugowana	mikrytowo-pelitowa, laminowana	mikrytowo-pelitowa, laminowana	mikrytowo-pelitowa, laminowana
Minerały skalotwórcze	minerały ilaste, kalcyt, kwarc, jasne łyszczyki, ziarna tl. Fe i Ti	minerały ilaste, kalcyt, kwarc, jasne łyszczyki, ziarna tl. Fe i Ti	minerały ilaste, kalcyt, kwarc, jasne łyszczyki, ziarna tl. Fe i Ti	minerały ilaste, kalcyt, kwarc, skalenie	minerały ilaste, kwarc, dolomit, jasne łyszczyki, anhydryt	minerały ilaste, kwarc, dolomit, jasne łyszczyki, anhydryt	minerały ilaste, kwarc, dolomit, jasne łyszczyki, anhydryt
Minerały kruszcowe	bornit, piryt, chalkozyn, tennantyt, chalkopiryt, kowelin, yarrowit	chalkozyn, digenit, kowelin, yarrowit, piryt, tennantyt, bornit, chalkopiryt, galena, srebro rodz.	chalkozyn, digenit, piryt, kowelin, yarrowit, tennantyt, bornit	piryt, bornit, tennantyt, charkozyn, kowelin, chalkopiryt, srebro rodz.	bornit, piryt, chalkopiryt, galena, kowelin, digenit, sfaleryt, charkozyn, srebro rodz., clausthalit	chalkozyn, kowelin, yarrowit, piryt	chalkozyn, digenit, bornit, chalkopiryt, kowelin, galena, piryt
Wielkość skupień i złożonych agregatów kruszców	10–120 µm, zastępowane formy organiczne do 730 µm średnicy	1–130 µm, pojedyncze agregaty 1270 × 250 µm	1–180 µm, formy organiczne od 370 × 175 µm do 1100 × 230 µm	1–180 µm, formy organiczne 235–300 µm, smugi do 400 µm długości	1–300 µm, agregaty do 1470 µm, żyłki 255 µm grubości	1–230 µm, agregaty 230–560 µm	1–200 µm, agregaty do 700 µm
Forma skupienia kruszców	rozproszone, zastępowanie form organicznych	rozproszone nierównoniernie, skupienia w smugach sparytu	rozproszone, zastępowanie form organicznych	rozproszone, zastępowanie form organicznych, smugi kruszców	rozproszone, formy żyłkowe równoległe do laminacji	rozproszone, formy żyłkowe równoległe do laminacji	rozproszone, żyłki równoległe i prostopadłe do laminacji
Materia organiczna, gniazda i żyłki	materia organiczna	materia organiczna	materia organiczna		materia organiczna, gniazda i żyłki węglanowe	materia organiczna, gniazda i żyłki węglanowe	materia organiczna, gniazda i żyłki węglanowe

Średni skład chemiczny minerałów (w % wag.) na podstawie badań przy użyciu mikrosondy elektronowej (EPMA)

The average chemical composition of minerals (in wt.%) determined by electron microprobe (EPMA)

	Fe	Cu	Co	Ni	As	Se	S	Ag	Pb	Zn	Cd	Sb	Hg	Total	n
Margle miedziunośne z kop. „Konrad”															
Minerały grupy chalkozynu															
średnia	0,15	77,98	0,01	0,01	0,01	0,01	21,53	0,29	0,01	0,04	0,01	0,00	0,00	100,05	180
s.d.	0,49	1,56	0,01	0,02	0,03	0,02	1,36	0,20	0,02	0,04	0,01	0,01	0,00	0,32	
Bornit															
średnia	11,34	61,98	0,01	0,01	0,03	0,00	26,46	0,08	0,00	0,07	0,01	0,00	0,00	99,99	50
s.d.	1,25	2,00	0,01	0,01	0,07	0,01	0,80	0,05	0,00	0,06	0,02	0,01	0,00	0,33	
Kowelin															
średnia	0,27	67,76	0,01	0,01	0,01	0,02	31,45	0,37	0,01	0,02	0,01	0,00	0,00	99,94	21
s.d.	0,20	1,62	0,01	0,02	0,02	0,02	1,57	0,26	0,02	0,03	0,01	0,01	0,00	0,30	
Tennantyt															
średnia	1,65	43,74	0,03	0,01	19,30	0,04	28,67	0,07	0,01	6,38	0,08	0,04	0,00	99,99	64
s.d.	1,01	1,28	0,02	0,02	0,41	0,04	0,57	0,12	0,02	0,60	0,02	0,07	0,01	0,21	
Łupki miedziunośne z rejonu Lubin–Sieroszowice															
Minerały grupy chalkozynu															
średnia	0,10	76,06	0,01	0,01	0,01	0,02	23,57	0,27	0,02	0,04	0,01	0,01	0,01	100,14	86
s.d.	0,12	2,26	0,02	0,02	0,06	0,02	2,40	0,38	0,04	0,04	0,01	0,01	0,02	0,38	
Bornit fioletowy															
średnia	11,95	58,81	0,01	0,01	0,01	0,00	26,90	1,28	0,10	0,10	0,02	0,01	0,00	100,21	15
s.d.	0,31	0,65	0,01	0,02	0,02	0,00	0,24	0,12	0,05	0,13	0,02	0,01	0,00	0,47	
Bornit pomarańczowy															
średnia	12,68	58,50	0,02	0,01	0,01	0,00	28,31	0,22	0,10	0,06	0,01	0,01	0,00	99,94	49
s.d.	1,18	3,54	0,02	0,01	0,01	0,00	2,36	0,21	0,06	0,04	0,01	0,01	0,00	0,46	
Kowelin															
średnia	0,66	67,78	0,02	0,01	0,04	0,02	31,29	0,22	0,06	0,05	0,00	0,01	0,01	100,17	16
s.d.	0,96	2,62	0,03	0,02	0,12	0,03	1,56	0,12	0,09	0,05	0,01	0,01	0,02	0,38	
Pozostałe siarczki z próbek margli i łupków miedziunośnych															
Chalkopiryt															
średnia	32,21	33,24	0,01	0,01	0,34	0,01	34,73	0,02	0,10	0,17	0,02	0,01	0,00	99,85	17
s.d.	1,46	1,38	0,03	0,02	0,88	0,01	0,74	0,03	0,07	0,33	0,02	0,01	0,00	0,75	
Sfaleryt															
średnia	0,83	1,31	0,00	0,01	0,02	0,01	32,91	0,02	0,02	64,41	0,27	0,01	0,01	99,84	22
s.d.	1,59	1,57	0,01	0,02	0,02	0,01	1,03	0,02	0,04	3,62	0,33	0,01	0,02	0,29	
Galena															
średnia	0,30	0,15	0,01	0,02	0,01	0,01	13,26	0,02	86,08	0,10	0,01	0,00	0,00	99,97	11
s.d.	0,16	0,14	0,02	0,01	0,01	0,02	0,52	0,05	0,54	0,11	0,02	0,01	0,00	0,40	
Piryt															
średnia	46,92	0,52	0,02	0,02	0,07	0,01	52,32	0,04	0,00	0,03	0,02	0,00	0,01	99,98	18
s.d.	0,66	1,10	0,03	0,03	0,05	0,01	1,40	0,05	0,01	0,03	0,03	0,01	0,02	0,02	
Minerały płonne z próbek margli i łupków miedziunośnych															
	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	ZnO	CuO	BaO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	F	Total	n
Kalcyt															
średnia	0,18	n.a.	0,01	0,32	0,40	0,69	0,11	n.a.	0,01	53,46	n.a.	0,07	n.a.	55,17	43
s.d.	0,39	–	0,02	0,27	0,37	0,43	0,17	–	0,03	1,62	–	0,06	–	1,44	
Dolomit															
średnia	1,05	n.a.	1,08	1,08	0,17	16,81	0,00	n.a.	0,03	37,02	0,35	n.a.	n.a.	56,07	5
s.d.	1,06	–	1,29	1,29	0,05	1,07	0,01	–	0,02	4,07	0,29	–	–	2,44	
Muskowit															
średnia	48,20	0,67	35,27	1,61	0,03	1,10	n.a.	0,11	0,10	0,22	0,38	9,95	0,19	97,82	7
s.d.	0,87	0,49	0,90	0,34	0,02	0,27	–	0,09	0,04	0,05	0,13	1,11	0,18	2,11	

s.d. – odchylenie standardowe; n.a. – nieanalizowane

s.d. – standard deviation; n.a. – not analyzed