



Porfirowe złożo Cu-Mo-(Au) Sierra Gorda – inwestycja KGHM Polska Miedź S.A. w Chile

Tomasz Bieńko¹



The Sierra Gorda porphyry Cu-Mo-(Au) deposit – a purchase of KGHM Polska Miedź in Chile. Prz. Geol., 65: 555–559.

Abstract. Porphyry deposits host the most of world's indicated Cu and Mo resources and are major sources of critical metals including Au, Ag, PGE, W and Re. The Sierra Gorda Paleocene-Eocene Cu-Mo deposit, located on the Atacama Desert in Northern Chile, can be identified as porphyry-type in terms of contained metals (Cu grade less than 0.5%, Mo grade up to 0.02%), mineralization (disseminated or stockwerk vein-hosted hypogene sulphides), structural controls (stockworks and hydrothermal breccia bodies), and genetic relation to an intermediate calc-alkaline intrusion (monzodiorite intrusion in volcanic country rocks). Three main centres of mineralization are associated with the intrusive body and genetically connected with spatially evolved hydrothermal

alteration. With target annual production of 220 k tones of Cu and 55 k tones of Mo, Sierra Gorda is the largest open-pit project of the major Polish metal mining company KGHM Polska Miedź.

Keywords: Sierra Gorda, porphyry-copper deposits, hydrothermal alteration

Porfirowe złoża Cu-Mo-Au są źródłem wielu cennych metali nieżelaznych. Od wielu lat wydobywanie miedzi z tego typu złóż stanowi 50–60% światowej produkcji, a molibdenu – 95% (Sinclair, 2007). Hydrotermalne złoża typu porfirowego bywają ponadto zasobne w złoto, srebro, ren, platynowce, a także bizmut, wolfram i cynę – metale krytyczne m.in. dla dynamicznie rozwijającego się przemysłu elektronicznego (Sinclair, 2007). Regiony, w których mogą występować porfirowe złoża miedzi, są zatem intensywnie badane, a odnalezione nagromadzenia zawartych w nich pierwiastków dokumentowane.

Zawartość miedzi i molibdenu w złożach typu porfirowego jest niewielka – przeważnie wynosi 0,2–0,6% Cu i 0,05–0,10% Mo. Zawartość złota waha się w szerokim zakresie – od 0,004 do 0,35 g/t (Kirgham, Dunne, 2000). Złoża te zawierają od kilkunastu milionów do kilkunastu miliardów ton rudy (Kirgham, Dunne, 2000).

Kilka lat temu KGHM Polska Miedź S.A. nabyło udziały w odkrywkowej eksploatacji złoża Sierra Gorda, które leży w północnym Chile na pustyni Atakama (ryc. 1). Zostało ono udokumentowane jako nagromadzenie miedzi, molibdenu oraz złota i jest modelowym przykładem złoża porfirowego. Świadczą o tym m.in.: genetyczne powiązania ze skałami magmowymi o chemizmie wapniowo-alkalicznym; model występowania rudy w postaci żył, żyłek i w formie rozproszonej; obecność obok sztokwerków brekcji hydrotermalnych i magmowych oraz niewielka zawartość metali użytecznych w kopalinie – 0,5% Cu i ok. 0,02% Mo (<http://kgm.com/en/our-business/mining-and-enrichment/sierra-gorda>). Udokumentowane zasoby złoża Sierra Gorda wynoszą prawie 1,5 mld ton rudy o średniej zawartości 0,4% Cu, 0,002% Mo i 0,065 g/t Au, co sytuuje chilijski nabytek KGHM wśród największych złóż tego typu na świecie (<http://kgm.com/en/our-business/mining-and-enrichment/sierra-gorda>). Celem artykułu jest przybliżenie cech budowy geologicznej i mineralizacji tego złoża.

NAJWIĘKSZE PORFIROWE ZŁOŻA MIEDZI NA ŚWIECIE

Największe porfirowe złoża metali (ryc. 1) zostały udokumentowane: na zachodnim wybrzeżu Ameryki Północnej, od Alaski po Meksyk, m.in. Pebble na Alasce, Bingham Canyon w Salt Lake City (Utah), Climax w stanie Kolorado i Morenci w stanie Arizona, na terenie Filipin (Dizon na wyspie Luzon), w Indonezji (kopalnia Grasberg na wyspie Nowa Gwinea), Chinach, na Kameczatce i w zachodniej Australii, jednak charakteryzują się one nieco inną mineralizacją – Cu-Au (Cooke i in., 2005). W chilijskich Andach występuje kilka wyjątkowo bogatych złóż porfirowych Cu-Mo-Au, m.in.: Chuquicamata, El Abra, El Salvador i La Escondida-Chimborozo, a także mniejsze – Radomiro Tomic i Spence, położone w niewielkiej odległości od Sierra Gorda. Po Chile drugim ważnym ośrodkiem wydobywania miedzi i innych metali nieżelaznych w Ameryce Południowej jest Boliwia (z zagłębieniem Potosi).

Większość hydrotermalnych złóż typu porfirowego powstała w jurze, kredzie i czwartorzędzie (Kirgham, Dunne, 2000). Jedynie w środkowej Azji i Afryce porfirowe złoża metali występują w starych górotworach – w strukturach paleozoicznych, np. złożo Verkhnee Qairaqty w Kazachstanie, i prekambryjskich, kopalnia Haib w Namibii (Sinclair, 2007).

HISTORIA GÓRNICWA W REGIONIE SIERRA GORDA

Indianie zamieszkujący tereny dzisiejszego Chile na długo przed odkryciem Ameryki przez Kolumba znali metody pozyskiwania i przetwarzania miedzi. Świadczą o tym miedziane przedmioty, licznie znajdowane na terenie Kordyliery Domeyki, w tym przede wszystkim w okolicach odkrywkowej kopalni miedzi Chuquicamata, którymi

¹ Wydział Geologii, Uniwersytet Warszawski, ul. Żwirki i Wigury 93, 02-089 Warszawa; tomasz.bienko@student.uw.edu.pl.

posługiwały się w czasach prekolumbijskich ludy Chuqui – stąd nazwa kopalni (Ossandon i in., 2001).

Historia wydobycia miedzi w Sierra Gorda, oddalonym kilkudziesięciu kilometrów na południe od Chuquicamata, sięga XIX w. W połowie lat 50. XIX w. notowano tu pojedyncze oznaki wydobycia rud tlenkowych z naturalnych odsłoneń lub niewielkich wykopów. Prace górnicze prowadziły małe kompanie wydobywcze (Gustafson, Hunt, 1975). Nieco wcześniej, bo w 1911 r., rozpoczęto wydobycie miedzi w słynnej kopalni Chuquicamata, należącej wówczas do Chile Exploration Company z siedzibą w USA. Lata 20. XX w. to czas odkrywania wielkich złóż typu porfirowego, m.in. El Salvador (Gustafson, Hunt, 1975).

Złoże Sierra Gorda zostało rozwiercone dopiero pod koniec lat 90. XX w. przez kompanię Outokumpu Chile (<http://kghm.com/pl/biznes/wydobycie-i-wzbogacanie-sx-ew/sierra-gorda>).

W 2004 r. koncesję na eksploatację odkrywkowego złoża Sierra Gorda nabyła kanadyjska spółka Quadra FNX, która planowała przeróbkę rudy tlenkowej metodą SX/EW. Metoda ta polega na ługowaniu tlenków miedzi za pomocą rozcieńzonego kwasu solnego, a następnie na wytrącaniu miedzi w procesie elektrolizy (Chadwick, 2013).

W 2006 r. pod pokrywą skał wzbogaconych w tlenki miedzi odkryto w złożu Sierra Gorda rudy siarczkowe. Quadra FNX przeprowadziła studium wykonalności projektu, mające na celu przygotowanie koncepcji zagospodarowania złoża. W 2011 r. 45% udziałów w projekcie Sierra

Gorda nabyła japońska spółka Sumitomo Metal Mining, a na początku 2012 r. głównym udziałowcem chilijskiego projektu górniczego (55%) stał się KGHM Polska Miedź S.A. Przejął on kanadyjską spółkę Quadra FNX, wykupując 100% jej akcji za prawie 9,5 mld zł, i zmienił jej nazwę na KGHM International (<http://kghm.com/pl/biznes/wydobycie-i-wzbogacanie-sx-ew/sierra-gorda>).

Od 2014 r. w zakładzie przetwórczym Sierra Gorda jest produkowany koncentrat miedzi i molibdenu. Według danych KGHM do końca 2016 r. wytworzono w nim 50 t miedzianych katod (<http://kghm.com/en/our-business/processes/sx-ew>).

GENEZA PORFIROWYCH ZŁÓŻ MIEDZI W AMERYCE POŁUDNIOWEJ

Porfirowe złoża miedzi i innych metali towarzyszą długim na wiele setek kilometrów pasom skał magmowych (*magmatic arcs*), które powstały w wyniku aktywności tektonicznej w strefach subdukcji (Sillitoe, 1972). W pasach tych występują skały wylewne, m.in. bazyalty i andezyty, tworzące miejscami sekwencje od toleitów do szoszonitów (Hawkins, 1985; Candela, Picolli, 2005), oraz diorytowe intruzje plutoniczne, które charakteryzują się dużą zawartością pierwiastków alkalicznych (Pirajno, 1995).

Na zachodnim wybrzeżu Ameryki Południowej wyróżnia się cztery równoległe pasy metalogeniczne o przebiegu południkowym, formujące cztery różnowiekowe strefy



Ryc. 1. Największe porfirowe złoża miedzi na świecie (wg Cooke'a i in., 2005): **A** – Prowincja Centralego Chile (złoża: El Taniente, Rio Blanco-Los Bronces i Los Pelambres), **B** – Prowincja Północnego Chile (złoża: Chuquicamata, Sierra Gorda, La Escondida, Radomiro Tomic, Rosario, El Salvador i El Abra), **C** – Prowincja Arizona-Sonora (złoża: Cananea, Lone Star i Morenci); złoża: 4 – Butte, 7 – Bingham, 8 – Grasberg, 13 – Oyu Tolgoi (Mongolia), 14 – Cerro Colorado (Peru), 16 – La Granja (Peru), 17 – Cujaone (Peru), 18 – Sar Cheshmeh (Iran), 21 – Aktogay-Aiderly (Kazachstan), 23 – Kal'makyr (Uzbekistan)

Fig. 1. The largest porphyry-copper deposits in the world (after Cooke et al., 2005): **A** – Central Chile Province (deposits: El Taniente, Rio Blanco-Los Bronces and Los Pelambres), **B** – North Chile Province (deposits: Chuquicamata, Sierra Gorda, La Escondida, Radomiro Tomic, Rosario, El Salvador and El Abra), **C** – Arizona-Sonora Province (deposits: Cananea, Lone Star and Morenci); deposits: 4 – Butte, 7 – Bingham, 8 – Grasberg, 13 – Oyu Tolgoi (Mongolia), 14 – Cerro Colorado (Peru), 16 – La Granja (Peru), 17 – Cujaone (Peru), 18 – Sar Cheshmeh (Iran), 21 – Aktogay-Aiderly (Kazakhstan), 23 – Kal'makyr (Uzbekistan)

złożowe (Richards, 2003): od zachodu pas paleoceńsko-eoceński (złoża Sierra Gorda i El Salvador), następnie eoceńsko-oligoceński (Chuquicamata, El Abra i La Escondida), mioceni oraz mioceni-plioceni. Pasy te są efektem subdukcji płyty pacyficznej pod płytę południowoamerykańską (Richards, 2003; Mpodozis, Ramos, 1989). Porfirowe złoża miedzi powstały w nich wzdłuż uskokuów równoległych do granicy płyt tektonicznych (Richards, 2003).

Według Richardsa (2003), który badał tereny północnego Chile, a także Peru i Boliwii, ewolucja geologiczna obszaru złożowego Sierra Gorda przebiegała następująco:

1) w późnej kredzie nastąpiły erupcje law wulkanicznych, w wyniku których powstały pokrywy skał o składzie zbliżonym do andezytowego,

2) na przełomie kredy i paleogenu w pokrywach tych powstały rozłamy tektoniczne, w które intrudowała magma o składzie granitu (hornblendowo-biotytowa), granodiorytu i monzodiorytu (piroksenowo-biotytowa),

3) w paleogenie z częściowo zastygłych intruzji uwolniły się roztwory i gazy hydrotermalne,

4) złożo uformowało się w paleocenie i eocenie, w wyniku reakcji hydrotermalnych roztworów i gazów ze skałami otoczenia i wodami meteorycznymi.

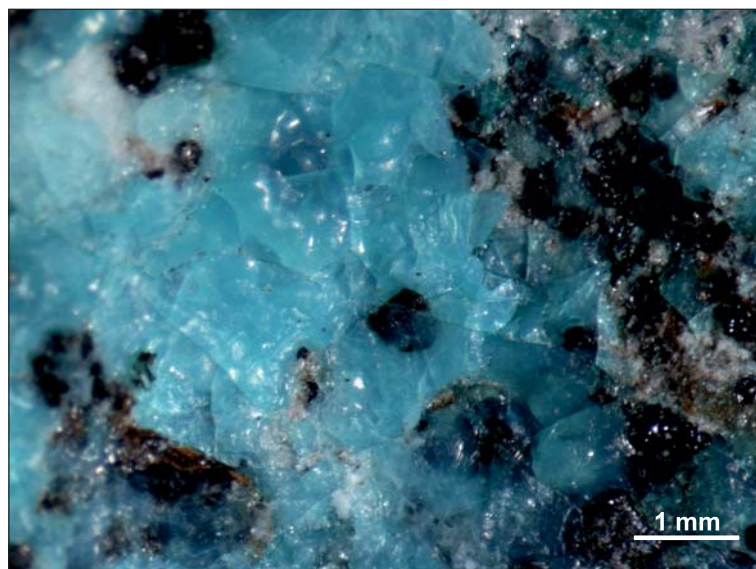
Wszystkie elementy decydujące o powstawaniu porfirowych złóż miedzi muszą współgrać ze sobą i następować w odpowiedniej kolejności. Rozwój wulkanizmu poprzedza najczęściej niezbyt gwałtowny epizod intruzywny. Wielkie granodiorytowe komory magmowe mogą współwystępować z centrami aktywnego wulkanizmu dacytowego – tak było w przypadku złoża Escondida w Chile (Richards, 2003). Szczególną rolę odgrywa fakt, że powstawaniu wielkich złóż porfirowych nie sprzyja gwałtowny przebieg uwalniania fluidów i gazów, a główne wydarzenie mineralizacyjne następuje zazwyczaj w warunkach stagnacji aktywności magmowej (Richards, 2003; Candela, Picolli, 2005).

Tempo uwalniania gazów i fluidów ze stopów magmowych zależy od składu chemicznego i właściwości fizycznych magmy, np. jej lepkości. Według Headenquista i Lowensterna (1994) mineralizacji sprzyjają magmy o składzie monzonitu i monzodiorytu, którym towarzyszy duża zawartość pierwiastków alkalicznych. Podstawowymi nośnikami metali w roztworach hydrotermalnych są gazy w stanie krytycznym (Henley, McNabb, 1978). Do przesylenia roztworów i gazów jonami metali, a w związku z tym do wytrącenia się siarczków metali nieżelaznych dochodzi w wyniku spadku ciśnienia w głębokich i płytkich strefach systemu hydrotermalnego. Proces ten przebiega w temperaturze od 600 do ok. 150°C (Hemley, Hunt, 1992; Berger i in., 2008).

→

Ryc. 2. Półprzezroczyste, niebieskie, nerkowe skupienia chryzokoli na powierzchni skały wulkanicznej z Sierra Gorda, z widocznym charakterystycznym woskowym połyskiem (zdjęcie binokularowe)

Fig. 2. Semi-transparent, blueish chrysocolla aggregate in a botryoidal form on the volcanic rock from Sierra Gorda. Characteristic greasy luster is visible



MINERALIZACJA ZŁOŻA SIERRA GORDA

W złożu Sierra Gorda wyróżniono trzy odmienne pod względem asocjacji mineralnej strefy kruszcowe, koncentrycznie rozwinięte wokół intruzji. Najpłycej znajduje się strefa wietrzeniowa, pod nią jest wzbogacona w miedź strefa przejściowa, a najniżej – strefa siarczków występujących w formie żył (tzw. sztokwerków), żyłek oraz w postaci rozproszonej. Mineralizacja przebiegała zarówno w skałach wulkanicznych, jak i podrzędnie w skałach głębinowych, a także w brekcjach hydrotermalnych (Shaver i in., 2009).

W strefie wietrzeniowej dominują tlenki, wodorotlenki, fosforany, chlorki, a także siarczany miedzi, które powstały w wyniku utlenienia kruszców miedzi w klimacie suchym i gorącym. Często jest tu spotykany atakamit $\text{Cu}_2(\text{OH})_3\text{Cl}$. Towarzyszą mu brokantyt $(\text{Cu}_4(\text{SO}_4)(\text{OH})_6)$ i antleryt $(\text{Cu}_3(\text{SO}_4)(\text{OH})_4)$. Ponadto występują: chryzokola $(\text{Cu}_{2-x}\text{Al}_x(\text{H}_{2-x}\text{Si}_2\text{O}_5)(\text{OH})_4 \cdot n\text{H}_2\text{O})$ (ryc. 2), chalkantyt $(\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O})$ i sampleit $(\text{NaCaCu}_5(\text{PO}_4)_4\text{Cl} \cdot 5\text{H}_2\text{O})$. Minerale te są wykształcone w postaci niewielkich skupień lub tworzą powłoki wietrzeniowe, które wypełniają pustki skalne. Ze względu na wyjątkowe warunki, w jakich powstawały, tworzą one unikatowe paragenezy, m.in. ze wspomnianym atakamitem, którego występowanie ogranicza się do strefy pustynnej zachodniego wybrzeża Ameryki Południowej (Berger i in., 2008).

Strefa przejściowa, wzbogacona w minerały kruszcowe, ma niewielką miąższość, toteż głównym obiektem działań górniczych w kopalni Sierra Gorda jest leżąca pod nią strefa rozproszonej mineralizacji siarczkowej. Występują w niej żyły i żyłki oraz brekcje bogate w siarczkowe minerały miedzi i molibdenu (ryc. 3). Do głównych minerałów kruszcowych należą tu chalkopiryt i bornit. Towarzyszą im chalkozyn, kowelin i miedź rodzima. Strop mineralizacji siarczkowej znajduje się na głębokości ok. 150 m p.p.t. Strefa tej mineralizacji została udokumentowana wierceniami do 1000 m p.p.t (Scoping Study, 2009).

Zawartość molibdenu w złożu wynosi 0,002%. Złoto występuje w postaci rozproszonej, a jego zawartość jest śladowa, jednak nie wyklucza się możliwości ekonomicznie uzasadnionego odzysku tego metalu (Shaver i in., 2009).

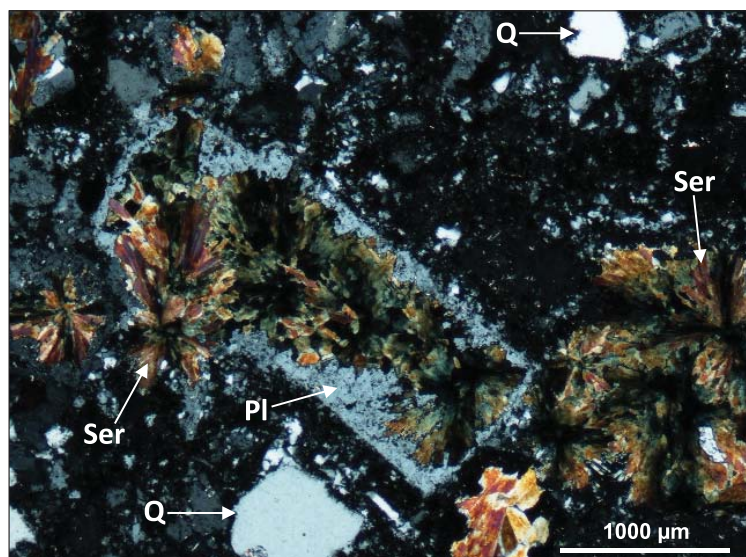
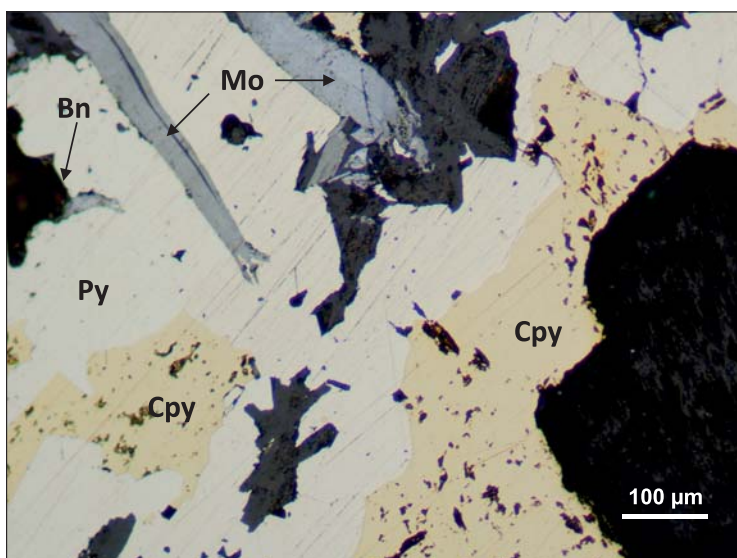


Ryc. 3. Brekcja hydrotermalna o spoiwie turmalinowym (wtórnie zmienionym w chloryt i muskowit). Jasne, ostrokrawędziste klasty to zmienione hydrotermalnie i pokruszone podczas powstawania brekcji skały wulkaniczne (skały otoczenia). Wypełnienia pustek o metalicznym połysku to siarczki, głównie piryt i chalkopiryt

Fig. 3. Quartz-tourmaline hydrothermal breccia. Bright angular clasts represent altered and disrupted fragments of volcanic host-rocks, which are cemented by aggregates of sulphides – mainly pyrite and chalcopyrite

Ryc. 4. Fragment żyły chalkopirytowo-molibdeno-pyrytowej. Zbite nagromadzenia chalkopiryty (Cpy) i pirytu (Py) są poprzecinane przez wydłużone kryształy molibdenitu (Mo). Pojedyncze, rozproszone kryształy bornitu (Bn) wypełniają drobne pory w skale płonnej (zdjęcie mikroskopowe zglądu w świetle odbitym)

Fig. 4. Thin-section photomicrograph of the core of a chalcopyrite-molybdenite-pyrite vein. Massive aggregates of chalcopyrite (Cpy) and pyrite (Py) are cross-cut by elongated, needle-shaped crystals of molybdenite (Mo). Disseminated bornite (Bn) is present in the spacings between opaque minerals. Photograph taken using a reflected light microscope



Ryc. 5. Mikroskopowe zdjęcie monzodiorytu, ukazujące hydrotermalną przemianę plagioklazów (Pl) w serycyt (Ser) i prehnit. W tle skalnym występuje kwarc (Q) oraz serycyt (Ser). Światło spolaryzowane, nikole skrzyżowane

Fig. 5. Thin-section photomicrograph of hydrothermally altered monzodiorite. Plagioclase (Pl) phenocrysts are selective-pervasively replaced by an aggregate of sericite and prehnite (Ser). Quartz (Q) and sericite (Ser) compose the matrix. Polarised light, crossed nicols

Duży udział wśród minerałów strefy siarczkowej ma także piryt. Występuje on zarówno w brekcji, jak i w strefach mineralizacji rozproszonej (ryc. 4). Halo pirytowe, które tworzy obwódkę wokół stref zasobnych w miedź, molibden i złoto, rozciąga się daleko poza granice udokumentowanego złoża. Im dalej od strefy zdominowanej

przez chalkopiryt, tym większy jest udział pirytu w skałach (Scoping Study, 2009).

Na podstawie obserwacji mikroskopowych stwierdzono, że dominującym minerałem płonnym w żyłach siarczkowych jest kwarc, ale pojawiają się również drobnoziarnisty epidot i serycyt.

PRZEMIANY HYDROTHERMALNE W ZŁOŻU SIERRA GORDA

W złożu Sierra Gorda udokumentowano kilka przemian fazowych mineralizacji hydrotermalnej: 1) glinokrzemianów potasowych (skaleni potasowego), 2) epidotowo-chlorytową, 3) biotytową, 4) chlorytową, 5) kwarcowo-pyrytowo-serycytową i 6) minerałów ilastych – argilitową. W obszarze złożowym tworzą one koncentryczne obwódki wokół porfiru, typowe dla większości porfirowych złóż miedzi opisanych w literaturze (Pirajno, 1995; Berger i in., 2008).

W dystalnych partiach systemu hydrotermalnego wyraźniej zaznacza się zależność paragenez mineralnych od składu skał otoczenia – dla monzodiorytów i granitoidów charakterystyczna jest przemiana chlorytowa, natomiast dla andezytów – epidotowo-chlorytowa (Pirajno, 1995; Berger i in., 2008).

Obszar oddziaływania intensywnej cyrkulacji gorących roztworów zdominowała parageneza kwarc-serycyt-chloryt-(biotyt), co odpowiada przemianie kwarcowo-pyrytowo-serycytowej. Wszystkie pozostałe typy zmian są znacznie mniej wyraźne (Pirajno, 1995; Berger i in., 2008).

W strefach aktywności roztworów hydrotermalnych często dochodzi do przemian – minerały zastępują się lub współwystępują w trudnej do zgeneralizowania sekwencji, zależnej od relacji roztwór–skała. W próbkach skalnych ze złoża Sierra Gorda bardzo wyraźnie widać, że drobnoziarnisty serycyt, występujący w postaci rozetowych skupień, zastąpił plagioklasy i skaleni potasowe (ryc. 5). W brekcji przemiany hydrotermalne skał są daleko posunięte, a oryginalna tekstura i skład mineralny niemożliwe do odtworzenia (Pirajno, 1995; Berger i in., 2008).

PERSPEKTYWY ZŁOŻOWE

Wystarczalność złoża Sierra Gorda została oszacowana na około 23 lata, przy założeniu, że roczne wydobycie osiągnie 220 tys. t miedzi i ok. 55 tys. t molibdenu (<http://kgm.com/en>). Kopalnia znajduje się na wysokości 1700 m n.p.m. Panują tu niekorzystne dla ludzi warunki naturalne. Przed pracownikami kopalni piętrzą się też liczne wyzwania natury technicznej – trzeba zapewnić bezpieczeństwo w trakcie robót strzałowych i odpowiedni sprzęt do rozkruszenia niezwykle twardych skał urobku. Kolejną niedogodnością jest brak bliskiego źródła wody. Woda potrzebna do flotacji i mielenia skał rudnych jest doprowadzana do zakładu za pomocą rurociągu z oddalonego o 143 km wybrzeża Pacyfiku. Ponadto według niektórych ekspertów (Maksymowicz, 2016), inwestycja ta, z powodu spadku światowych cen miedzi, jest ekonomicznie niepewna. Nie ulega wątpliwości, że przyszłość kopalni w dużej mierze zależy od rozwoju wydarzeń na rynku światowym, na którym popyt na surowce mineralne wzrasta. Jednocześnie następuje wyraźny spadek nowych odkryć złóż o znaczeniu globalnym (Gonzalez-Alvarez i in., 2017), co powoduje stopniowy zastój w światowej podaży miedzi i innych metali. Biorąc pod uwagę wskazane czynniki, można przypuszczać, że w ciągu dekady Sierra Gorda stanie się dochodową inwestycją.

Serdeczne podziękowania kieruję do pracowników Wydziału Geologii Uniwersytetu Warszawskiego za umożliwienie wyjazdu do Chile i prac laboratoryjnych. Zespołowi KGHM International

dziękuję za ciepłe przyjęcie w Sierra Gorda i czas poświęcony mi w Antofagasta. Dziękuję także Jego Magnificencji Rektorowi Uniwersytetu Warszawskiego, Radzie Konsultacyjnej ds. Studentckiego Ruchu Naukowego na Uniwersytecie Warszawskim, Władzom Wydziału Geologii Uniwersytetu Warszawskiego oraz firmie DHV Hydroprojekt za finansowe wsparcie wyjazdu. Redaktorowi Naczelnemu Przeglądu Geologicznego składam podziękowania za pomoc w przygotowaniu artykułu do publikacji, a do koleżanek i kolegów ze specjalizacji Geomateriały Mineralne na WGUW zwracam się ze słowami uznania za pomocne komentarze odnośnie wyników badań petrograficznych.

LITERATURA

- BERGER B.R., AYUSO R.A., SEAL R.R. 2008 – USGS Preliminary model of porphyry copper deposits. Open file report 2008–1321. U.S. Department of the Interior, USGS.
- CANDELA P.A., PICCOLI P. 2005 – Magmatic processes in the development of porphyry-type ore systems. [W:] Hedenquist J.W., Thompson J.F.H., Goldfarb R.J., Richards J.R. (red.), *Econ. Geol.*, 100th Anniversary Volume: Society of Economic Geologists, Littleton, Colorado, 25–37.
- CHADWICK J. 2013 – Cu roundup. *Advances in copper extraction. Intern. Mining* 3: 20–32., <http://www.ausenco.com/uploads/pages/1443072411-Advances-in-copper-extraction-heap-leach-int-mining.pdf>
- COOKE D.R., HOLLINGS P., WALSHE J.L. 2005 – Giant Porphyry Deposits: Characteristic, Distribution and Tectonic Controls. *Econ. Geol.*, 100: 801–816.
- GONZALEZ-ALVAREZ I., KING A., SMITH G., KLUMP J., BUTT C.R.M., FRASER R. 2017 – Geochemical mineral exploration under cover: consideration, challenges and innovative approaches. *Goldschmidt 2017 Conference, Paris*, <https://goldschmidt.info/2017/abstracts>.
- GUSTAFSON L.B., HUNT J.P. 1975 – The porphyry copper deposit of El Salvador, Chile. *Bull. Soc. Econ. Geol.*, 70: 858–912.
- HEDENQUIST J.W., LOWENSTERN J.B. 1994 – The role of magmas in the formation of hydrothermal ore deposits. *Nature*, 370: 519–527.
- HEMLEY J.J., HUNT J.P. 1992 – Hydrothermal ore-forming processes in the light of studies in rock-buffered systems: II. Some general geologic applications. *Econ. Geol.*, 87: 23–43.
- HENLEY R.W., MCNABB A. 1978 – Magmatic vapor plumes and ground-water interaction in porphyry copper emplacement. *Econ. Geol.*, 73: 1–20.
- <http://kgm.com/en/our-business/processes/sx-ew>
- <http://kgm.com/pl/biznes/wydobycie-i-wzbogacanie-sx-ew/sierra-gorda>
- KIRGHAM R.V., DUNNE K.P.E. 2000 – World distribution of porphyry, porphyry associated skarn, and bulk-tonnage epithermal deposits and occurrences. *Geological Survey of Canada, Open File 3792a*, <https://doi.org/10.4095/211229>.
- MAKSYMOWICZ A. 2016 – Trudna przyszłość KGHM Polska Miedź S.A. *Prz. Geol.*, 64: 215–217.
- MPODOZIS C., RAMOS V. 1989 – The Andes of Chile and Argentina. [W:] *Geology of the Andes and its relation to the hydrocarbon and mineral resources. Circum-Pacific Council for Energy and Mineral Resources, Earth Science Series*, 11: 60–90.
- OSSANDON G.C., FRERAUT R.C., GUSTAFSON L.B., LINDSEY D.D., ZENTILLI M. 2001 – Geology of the Chuquicamata mine: A progress report. *Econ. Geol.*, 96: 249–270.
- PIRAJNO F. 1995 – *Hydrothermal mineral deposits*. Springer-Verlag, Berlin.
- RICHARDS J.P. 2003 – Tectono-magmatic precursors for porphyry Cu-(Mo-Au) deposit formation. *Econ. Geol.*, 98: 1515–1534.
- SCOPING STUDY for the Sierra Gorda Project, II Region, NE Chile. *Quadra Mining LTD.*, 2009, <https://secure.kaiserresearch.com/ij/tr16/TRQX20090701.pdf>.
- SHAYER S.A., MANSKE S.L., CURRIE J., FAHEY P.L., MAYA J., STEIN H.J., HUARD J.J. 2009 – The Sierra Gorda Porphyry Cu-Mo(Au) deposit, Region II, NE Chile: Intrusive relations and ⁴⁰Ar/³⁹Ar and Re-Os molybdenite geochronology of the Catalina and 281 mineralization centers. *Portland GSA Annual Meeting 2009*.
- SILLIOE R.H. 1972 – A Plate Tectonic Model for the Origin of the Porphyry Copper Deposits. *Econ. Geol.*, 67: 184–197.
- SINCLAIR W.D. 2007 – Porphyry deposits, [W:] Goodfellow W.D. (red.), *Mineral Deposits of Canada: A Synthesis of Major Deposit-Types, District Metallogeny, the Evolution of Geological Provinces, and Exploration Methods: Geological Association of Canada, Mineral Deposits Division, Sp. Publ.*, 5: 223–243.

Praca wpłynęła do redakcji 12.12.2016 r.
Akceptowano do druku 11.04.2017 r.