

SÚBORNÝ REFERÁT

Geologické a genetické problémy chilských stratiformních ložisek mědi

(9 obr. a 4 tab. v textě)

JIRÍ LOSERT*

Úvod

Chilská stratiformní ložiska mědi zůstávala po dlouhá desetiletí ve stínu světoznámých ložisek typu "Porphyry copper ores", reprezentovaných zejména největším chilským ložiskem mědi Chuquibambuta, a ložisek typu „Breccia pipes“, dobývaných na dolech El Teniente a El Salvador. Se vzrůstem těžby mědi v Chile a s postupným ubýváním zásob na těchto obrovských ložiskách obrací se však pozornost geologů i na střední a malá ložiska, jež sice nedosahují tak velkých rozměrů, zato však jejich počet jde do desítek. Jsou to ložiska žilná a ložiska stratiformní, z nichž hlavně druhá skupina nabývá v poslední době stále většího významu a stává se předmětem intenzivního geologického výzkumu a průzkumu.

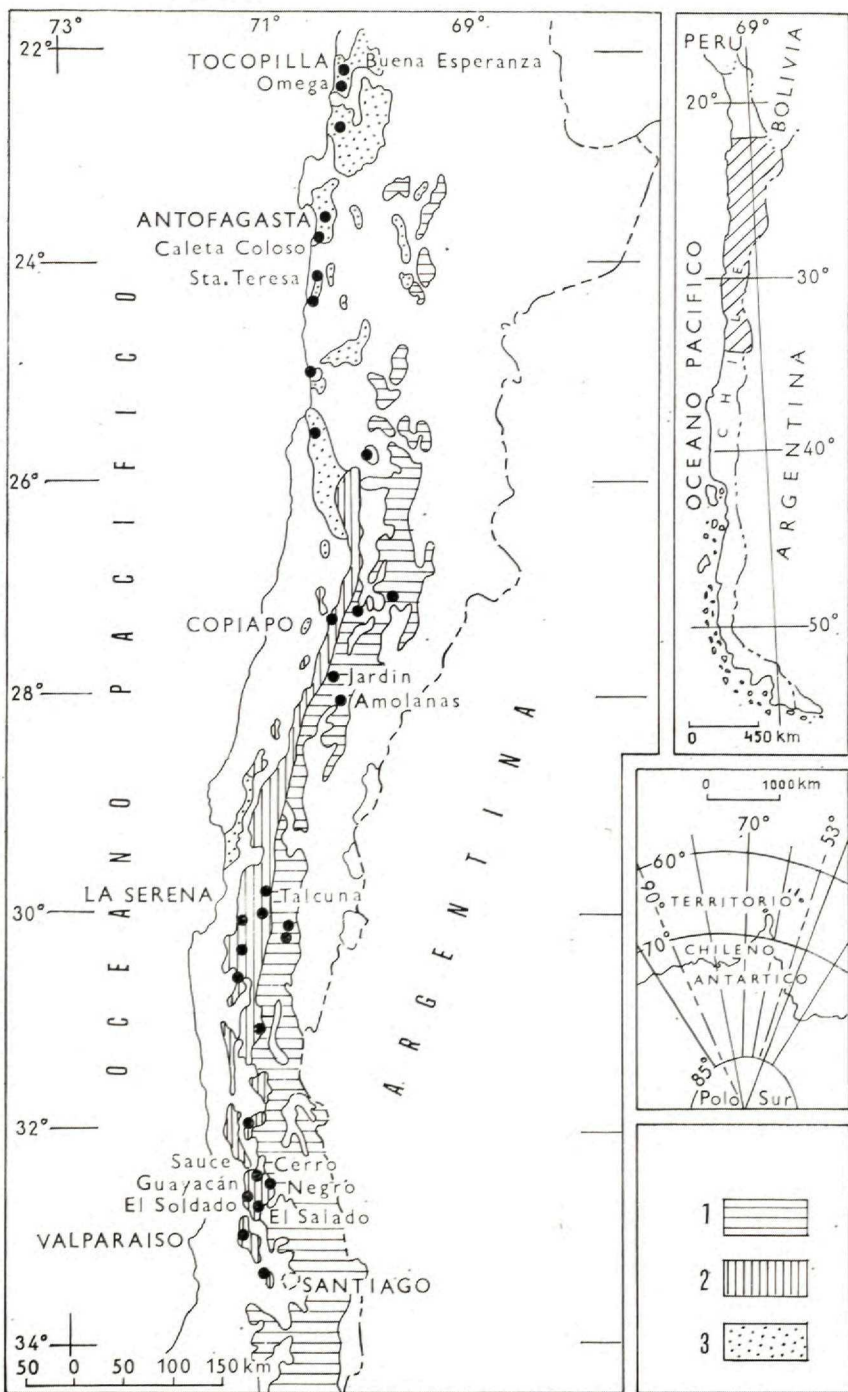
Základním problémem při nových výzkumných pracích na stratiformních ložiskách je vyřešení jejich geneze, neboť jediné tak lze vypracovat nové prospekční metody pro jejich vyhledávání a nastínit prognózy hloubkových a laterálních změn tohoto druhu ložisek. Genetickými problémy stratiformních ložisek v Chile se proto v současné době zabývá několik geologických skupin, v nichž pracují geologové chilští, sovětsí, japonští aj. a v nichž pracoval i autor této stati během své dvouleté činnosti v Chile v letech 1970—1972.

Rozšíření a výskyt stratiformních ložisek mědi v Chile

Chilská stratiformní ložiska mědi se vyskytují takřka výlučně v s. polovině země, v semiaridní až aridní oblasti, rozkládající se na S od Santiaga až k hranicím Peru a Bolívie (obr. 1). Obdobná ložiska jsou známa i z přilehlých oblastí Peru a Bolívie, kam pokračují analogické geologické jednotky andské geosynklinální zóny. V jižní části Chile jsou stratiformní ložiska mědi (a stejně tak i ložiska ostatních kovů) mnohem vzácnější, patrně vlivem větší zakrytosti terénu hojnými pokrývanými útvary a vegetací.

Většina stratiformních ložisek v severním Chile leží v horském terénu, a je proto dopravně těžko přístupná. Jejich průzkum a těžba naráží na nedostatek vody, elektrické energie a mnohdy i pracovních sil. Proto většina ložisek, z nichž mnohá patřila a ještě patří soukromým majitelům, byla těžena jen velmi primitivním způsobem, bez nasazení mechanizace a se zanedbáním základních principů bezpečnosti práce. Nehospodárny způsob těžby rabováním nejbohatších částí a bez zajišťovacích prací vedl v mnoha případech k znehodnocení ložisek a jejich opuštění. V rámci znárodňovacího programu uskutečňovaného chilskou lidovou vládou v posledních letech byla zestátněna i řada takovýchto ložisek, a to zejména ta, která mají perspektivy obnovení těžby a zásoby alespoň 50 000 t kvalitní rudy. Na takovýchto ložiskách se nyní započalo s plánovitou těžbou a v jejich okolí s vyhledáváním a těžbou ložisek nových. Vytěžená ruda se většinou sváží (lanovkami, nákladními auty, ale i na hřebtech koní a oslů) do menších středisek, kde se drtí, flotuje nebo vyluhuje. Získané koncentráty se pak dopravují do některého z velkých hutních středisek nebo se vyvážejí do Japonska, Anglie a jiných zemí. Od soukromých majitelů vykupuje rudu

* RNDr. Jirí Losert, CSc., Geologický ústav ČSAV, 165 00 Praha 6, Suchbát

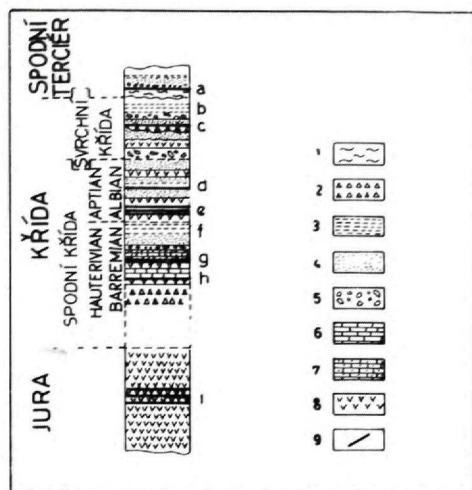


Obr. 1. Geografická poloha a schematická geologická pozice některých hlavních stratiformních ložisek mědi v Chile (tečky) 1 — svrchnokřídové a spodnoterciární kontinentální vulkanické a sedimentární série; 2 — spodnokřídové vulkanické a sedimentární série; 3 — jurské eugeosynklonální vulkanické série (podle Ruize et al. 1971)

státní podnik ENAMI (Empresa Nacional de Minería), avšak výkupní proces je vzhledem k malému množství rudy dodávané jednotlivými majiteli a k různé kovnatosti a mineralogii rud, pocházejících z různých ložisek, velmi pracný a neekonomický.

Geologická pozice stratiformních ložisek mědi

Geologickým rámcem chilských stratiformních ložisek mědi jsou jednotky tvořící výplň někdejšího andského geosynklinálního pásma; v rámci těchto jednotek jsou to zejména vulkanicko-sedimentární série eugeosynklinálního charakteru, vyskytující se při z. okraji andského geosynklinálního pásma. Stratigraficky odpovídají jednotky s ložisky juře, křídě a spodnímu terciéru (obr. 2), přičemž jednotky patřící spodní juře až svrchnímu neokomu mají převážně marinní charakter, kdežto jednotky tvořené svrchní křídou až spodním terciérem mají povahu kontinentální. Většina ložisek se nachází v křídě.



Obr. 2. Stratigrafická pozice některých stratiformních ložisek mědi v Chile (podle Ruize et al. 1971)

1 — ignimbrity; 2 — brekcie; 3 — černé břidlice; 4 — vulkanické pískovce; 5 — slepence; 6 — mořské vápence; 7 — skarny; 8 — andezity; 9 — stratiformní rudní polohy s rudami mědi

rušeném sedimentaci kontinentálních nebo mořských sedimentů.

Sedimenty i vulkanity všech zrudněných stratigrafických jednotek nesou znaky slabých regionálně metamorfických přeměn, odpovídajících svým charakterem poklesovému metamorfismu (burial metamorphism) (LEVI—CORVALÁN 1964). Ukazují na to minerální parageneze, v nichž se uplatňují zeolity, K-živce [(adulár i mikroklin), albit, chlorit, pumpellyit, prehnit, kalcit, epidot, sericit a aktinolit. Zda je tento metamorfismus vyvolán „pohřbením“ sérií do oblastí velkých tlaků a teplot, či zda je způsoben vlivem mladších intruzí, které v hojné míře prorážejí zrudněné série v podobě subintruzivních pňů i větších masívů a batolitů, není dosud jasno; výsledky dosavadních studií ukazují, že mohou existovat oba typy.

Tvar stratiformních ložisek

a) Konkordantní zrudnění

Základním a nejmarkantnějším tvarem studovaných stratiformních ložisek je deskovité či ploše

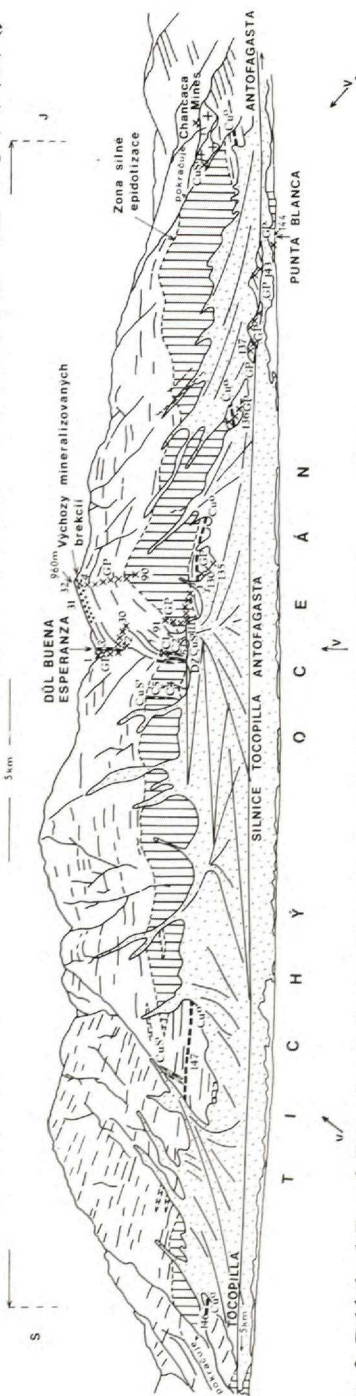
Petrograficky jsou horniny, v nichž jsou ložiska uložena, reprezentovány marinními nebo kontinentálními sedimenty (černé břidlice, často s pyritem, vápence, slepence a pískovce, slínovce), efuzivní a extruzivní (andezity a tzv. „okoity“ — velmi hrubozrnné porfyrické andezity —, bazaltické andezity a bazalty a jejich brekcie a tufy, kyselé ignimbrity) a smíšenými vulkanogenně sedimentárními horninami tufitického charakteru. Z uvedených horninových skupin jsou nejčastější doprovodnou horninou stratiformních ložisek andezity a jejich tufy a brekcie.

Horninové série s ložisky mají obvykle monoklinální zapadání, dané jednoduchou — ploše vrásou s tavbou, místy komplikovanou strmými zlomy převážně meridionálního nebo ekvatoriálního směru. Typické jsou velké mocnosti horninových sérií — mocnosti přesahující 10 km nejsou zvláštností. V mnoha případech je značná část sérií budována desítkami až stovkami deskovitých, převážně andezitových nebo bazaltických příkrovů (obr. 3; tab. I, obr. 1) s malou, ale velmi pravidelnou mocností jednotlivých lávových proudů (3—12 m). Jejich neobyčejně velký laterální rozsah při poměrně malé mocnosti svědčí o poměrně klidném rytmickém trhlínovém vulkanismu, tu a tam pře-

čočkovité těleso, uložené konkordantně se stratifikací okolních horninových poloh. V latinskoamerické geologické literatuře se taková tělesa označují jako „mantos“. Na jednom ložisku může být jedno nebo i více takových ložiskových těles. Jsou známa i ložiska (např. ložisko Buena Esperanza v provincii Antofagasta v severním Chile, které studoval autor této stati), kde je vyvinuto až 28 zrudněných poloh nad sebou (obr. 4).

Mocnost jednotlivých rudních těles může být několik centimetrů, na jiných ložiskách i několik desítek metrů. Laterální rozsah rudních poloh po směru a sklonu je od desítek metrů do několika kilometrů, přičemž v některých případech mohou rudní polohy po přerušení (např. díky laterální záměně facií) znovu nasadit ve stejné stratigrafické úrovni.

Vnitřní struktura jednotlivých stratiforálních ložisek závisí do značné míry na tom, v jakých horninách je zrudnění uloženo. V nejtýpějších případech, kdy jsou rudy uloženy v andezitových nebo bazalt-andezitových příkrovech (např. ložiska Buena Esperanza, El Pacotillo, Guyacán, Peumo, Palqui, El Salado de Catemu), hromadí se zrudnění převážně ve svrchních částech jednotlivých příkrovů, které mají obvykle mandlovcovitou nebo proudově brekciovitou strukturu (flow breccias). Mikroskopická pozorování ukazují, že v těchto pórovitých partiích příkrovů zaplňují sulfidy mědi zčásti nebo úplně mandle (v lávě i v úlomcích lávy v brekciích) a také nepravidelné dutiny mezi úlomky porfyrické lávy, tvořící proudovou brekci. Spolu s měděnými rudami se v dutinách i v mandlích vyskytují křemen, chalcedon, sericit, chlorit a kalcit. Směrem k bázi příkrovů se zrudnění vytrácí a objevuje se znovu v nejsvrchnější části podložního příkrovu. V některých případech, je-li báze příkrovů rovněž mandlovcovitá, jsou přítomny rudní minerály i zde. Jinak se v masivní střední a spodní části příkrovů obvykle vyskytují rudní minerály v podobě krátkých rudních žilek nebo impregnací o velmi nízké kovnatosti a v nedobyvatelném množství. Celkově lze tedy říci, že omezení rudního tělesa uloženého v lávách je dáno mocností lávového proudu — každý lávový proud, je-li dostatečně zrudněn, představuje obvykle i samostatně dobytelnou rudní polohu. V případech, kdy je mocnost příkrovů a rudních poloh menší než 2—4 m, dobývá se zpravidla několik rudních příkrovů společně.

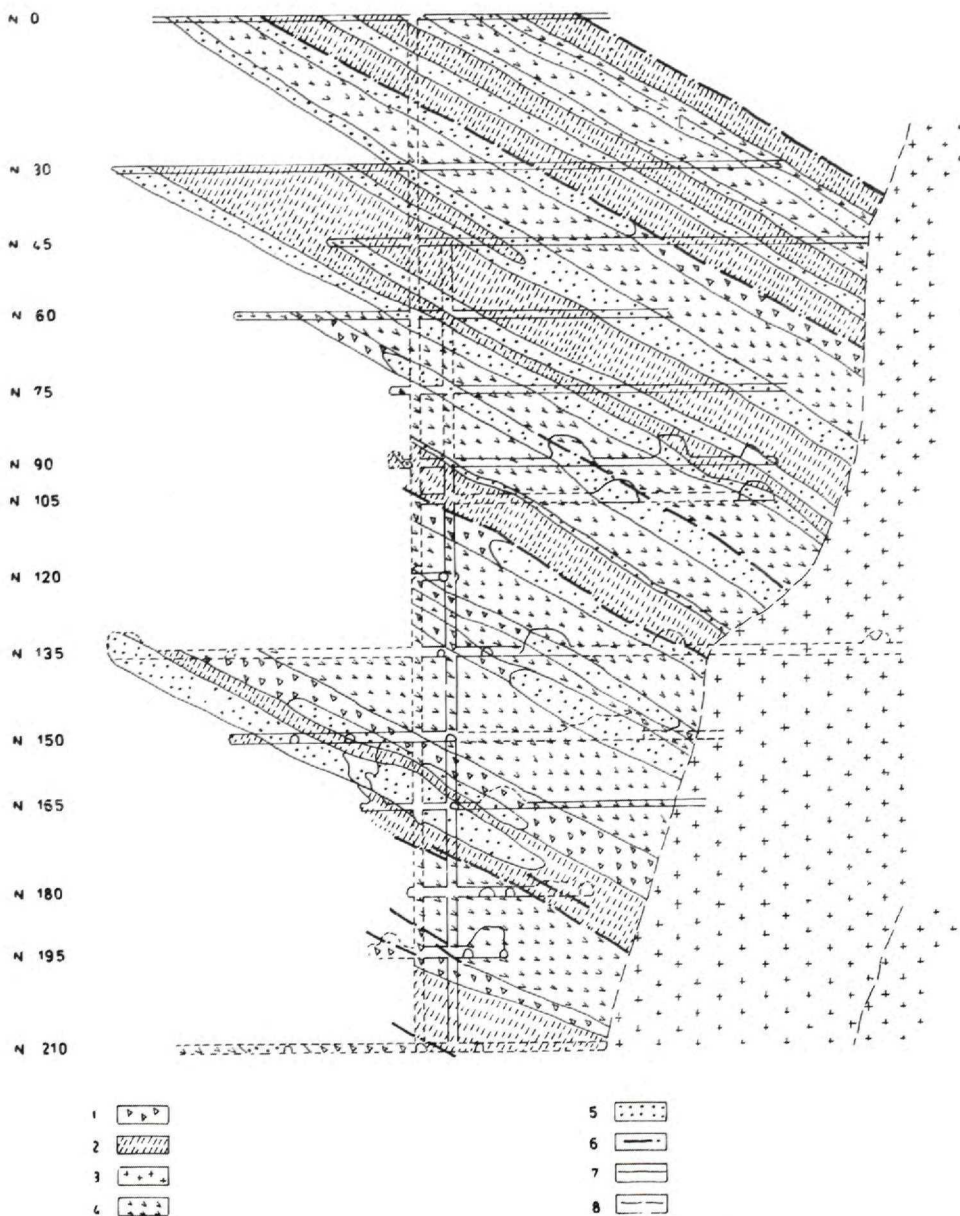


Obr. 3. Pohled od Z na ložiskový revír Buena Esperanza v provincii Antofagasta (podle Loserta 1972)

Jurská vulkanická série tvořící přivrácený svah je ponechána bez šrafy, jen se schematicky vyznačenou stratifikací. Vertikální šrafy znázorňují rozsah epigenetické epidotizace bazaltů a bazaltových andezitů. Tečkované — suti, křížky vyznačují geochemické profily (GP) a číslu u nich je znázorněna poloha některých orientačních bodů v profilech. Silná přerušovaná čára vyznačuje horizont rýzí mědi (Cu⁰) v metasomatických draselných andezitech v podložní epidotizované zóně. C 1—C 2 a CuS⁺ jsou výchovy rudních žil se sulfidy mědi; 2 — hlavní vchod do lu Buena Esperanza. Svislé křížky — výchovy intruzivních dioritů

Z

V



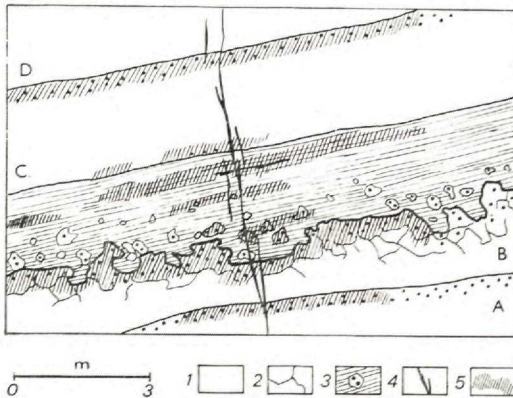
Obr. 4. Geologický profil střední částí stratiformního ložiska mědi Buena Esperanza (upraveno podle QUEZADY, in RUIZ et al. 1971)

1 — amygdaloidní andezitové brekcie; 2 — mikroporfyrický andezit; 3 — diorit a gabrový porfyr; 4 — porfyrický andezit; 5 — stratiformní zrudnění; 6 — porucha; 7 — kontakty v efuzivní a vulkanogenní sérii; 8 — přechod mezi dioritem a gabrovým porfyrem

Ojedinelé rudní struktury jsou vyvinuty na ložisku Mantos de Catemu. Zrudnění tam vystupuje v podobě pravidelně rozestětých závalků chalkopyritu v černých porfyryckých andezitech, které mají strukturu „Sonnenbrand“, popř. v tufech těchto andezitů, a připomíná struktury některých liquid-magmatických ložisek. Pozoruhodné jsou struktury v tufech, kde původní kalcitový tmel úlomků je téměř zatlačen rudami, hlavně chalkopyritem.

V četných případech jsou andezitové efuzivní série proloženy vložkami středně až hrubě zrnitých tuů, kontinentálních tufogenních pískovců a slepenců a sedimentárních a vulkanických brekcií. Tyto horniny mohou tvořit až desítky metrů mocné vložky, avšak také jen výplně žlabovitých erozivních rýh, kanálů a kapes, vyhloubených ve svrchních partiích lávových příkrovů. V takových horninách tvoří měděné rudy (obvykle spolu s kalcitem) tmel mezi úlomky hornin, popř. vyplňují i póry v úlomcích v podobě rudní impregnace (obr. 5). Větší dutiny v tufech mohou být zaplněny litou sulfidickou rudou. Příklady tohoto typu zrudnění jsou známy z ložisek Cerro a Talcuna v provincii Aconcagua a Buena Esperanza (prov. Antofagasta).

Ryolitové ignimbrity, tvořící bázi nejmladší (spodnoterciární) vulkano-sedimentární sekvence andské geosynklinály, jsou okolní horninou ložisek Jardín, El Venado a Amolanas v provincii Copiapó.



Obr. 5. Detail z ložiska Buena Esperanza dokazující epigenetický charakter zrudnění a vliv vlastností okolních hornin na jeho charakter (podle Loserta 1972)

A — Spodní andezitový příkrov s mandlovcovitou facií ve svrchní části

B — Další andezitový příkrov nepravidelně erodovaný a překrytý tufitickým pískovcem, přecházejícím do sedimentární brekcie s úlomky mandlovcovitého andezitu (3). Nejvyšší část erodovaného příkrovu má blokovitou stavbu, popř. je v ní vyvinuta proudová brekcie (2)

C — Vyšší andezitový příkrov překrývající vulkanogenně sedimentární vložku

D — Nejvyšší příkrov

Příčné žilky tvořené sulfidy mědi (4) protínající všechny čtyři andezitové příkrovy i vulkanogenně sedimentární vložku, v níž se zrudnění (5) šíří do stran podle stratifikace. Zrudněny jsou rovněž mandlovcovité partie ve svrchních částech všech příkrovů, nejnižší mandlovcovitá část proudy C a také úlomky mandlovcovitého andezitu v sedimentární brekci

V marinních vápencích a slínech, obvykle černě nebo černošedě zbarvených a bohatých organickým materiálem a někdy i pyritem, tvoří sulfidické rudy mědi proužkovitě uspořádané impregnace nebo tenké pásy lité rudy střídající se s impregnacemi (např. ložisko Carmen v oblasti Cabildo, Russa a Torre v provincii Aconcagua, Teresita v provincii Atacama). V černých břidlicích a slinitých břidlicích lagunárního původu, známých z ložisek Chanqueta a Veta Negra (Cabildo), vytvářejí rudy konkrce a hlízky soustředěné do jednoho nebo více rudních horizontů.

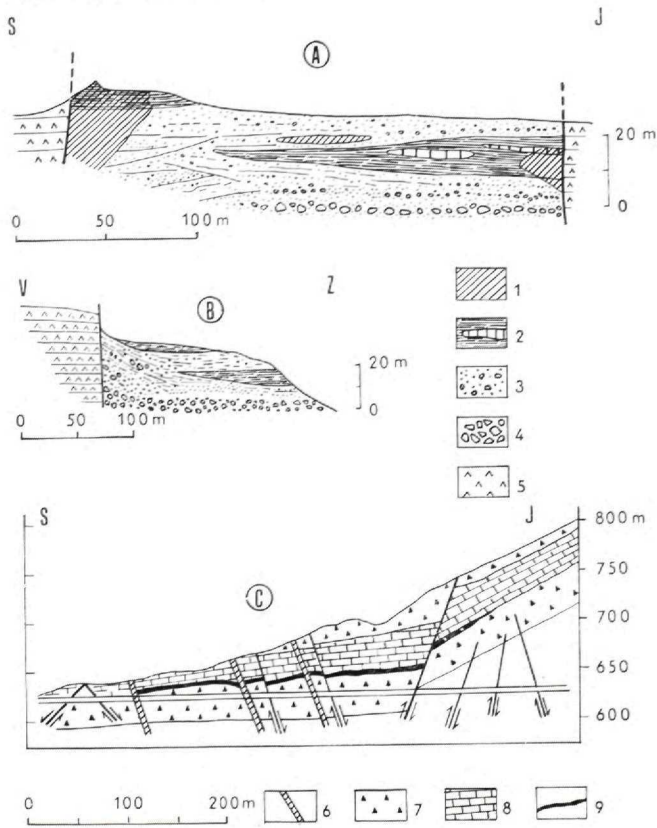
Komplikovanější typy zrudnění jsou vyvinuty např. v ložisku Guayacán, kde zrudněné amygdaloidní porfyrické andezity jsou diskordantně překryty transgresivními brekciemi a organogenními vápenci až lumachelami, které vyplňují erozivní rýhy v andezitovém podkladu. V andezitech je ruda soustředěna do mandlí nebo zatlačuje vyrostlivce živců, kdežto ve vápencích tvoří impregnace a krátké nepravidelné žilky, rotinající lastury brachiopodů i jemnozrnnou matrix vápenců.

Výjimečně mohou být doprovodnou horninou stratiformního zrudnění i červené a hnědé jaspility, uložené v černých slinitých vápencích a břidlicích, které tvoří vložky v andezitech a tufech (Mina Portales). Zrudnění v nich má charakter zvlněných a anastomozujících pásků vráskovitě deformovaných subakvatickými skluzy, popř. i impregnací v dobře zachovaných úlomcích zuhelnatělých stromovitých rostlin křídového stáří. Na ložiskách v oblasti Cerro Negro provázejí jas-

pility zrudnění uložené v hrubých tufech překrytých břidlicemi (ložisko Pirquitas) nebo prachovci a vápenci (ložisko Diablo) (obr. 6). Celá série má kontinentální původ.

Ke stratiformním ložiskům se v Chile řadí i konkordantní rudní polohy, které mají charakter skarnů (El Sauce, Los Maquis, La Campana, Fortuna, část ložisek v distriktu Santa Gracia) a zřejmě kontaktně metasomatický původ, odvozený od křídových až terciálních intruzív. Měděné rudy jsou tam vyvinuty v kontaktně metamorfovaných vápencích bohatých granátem, epidotem a místy přecházejí do železourudného (magnetit-hematitového) zrudnění.

Nakonec je nutno zmínit se i o stratiformních ložiskách recentního až subrecentního původu, reprezentovaných ložiskem Caleta Coloso v provincii Antofagasta a několika ložisky (Sagasca, Riqueza, El Tesoro aj.) na Z od Ariky v provincii Tarapacá. Na tamějších ložiskách je ruda (převážně oxidická) přítomná jako impregnace a povlaky ve tmelu málo zpevněných terciálních až kvartérních slepenců. Nejvýznamnější je ložisko Sagasca, kde zásoby chryzokolové rudy s 2,5 % Cu dosahují asi 10 mil. tun.

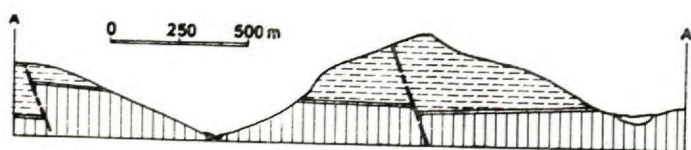
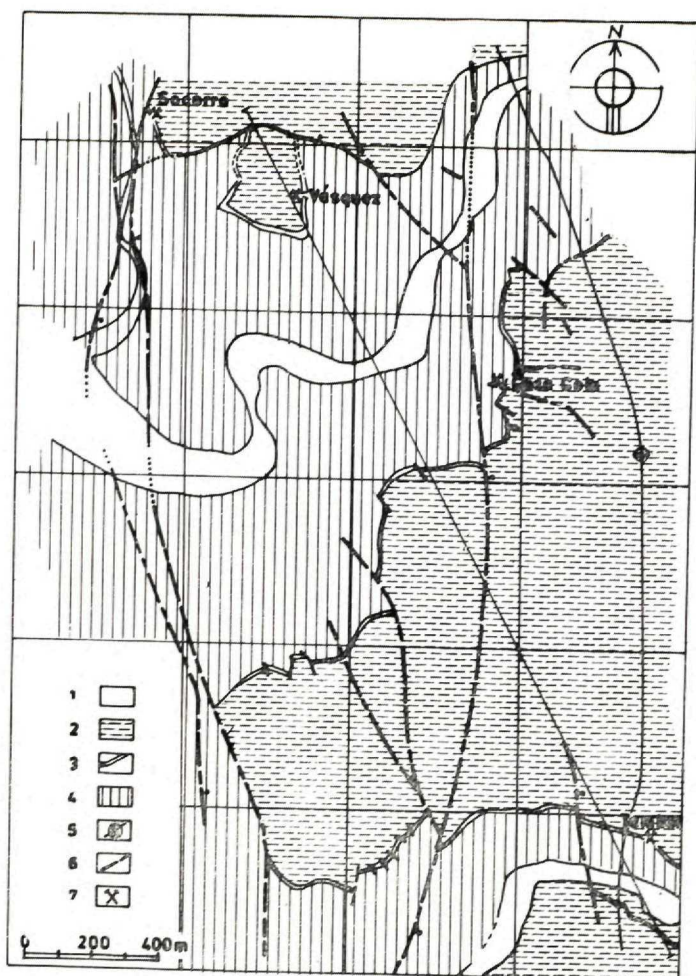


Obr. 6. Geologické řezy ložiska Pirquitas (A, B) a Diablo (C) v oblasti Cerro Negro. Podle PELISSONIERA (1971; A, B) a ALISTE (1964; C)

1 — jaspility a zóny silicifikace; 2 — břidlice s vločkami vápenců; 3 — hrubé tufy; 4 — masivní vulkanické brekcie; 5 — andezity; 6 — žilné horniny; 7 — brekcie; 8 — vápence a vápnité břidlice; 9 — těžené zrudnění

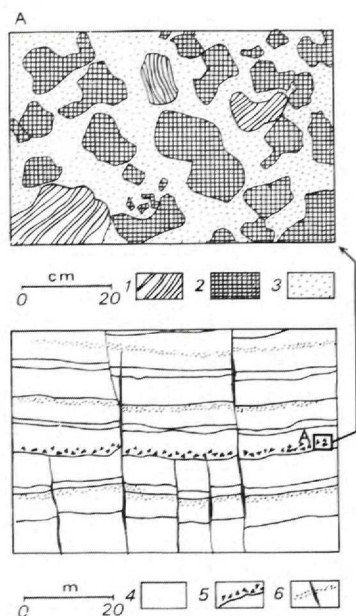
b) Diskordantní zrudnění

Na mnoha stratiformních ložiskách se vyskytují — obyčejně v kvantitativně podřízeném měřítku — i diskordantní typy zrudnění. Obyčejně jsou málo nápadné a jejich zásoby malé, takže se většinou netěží. Mívají charakter nepravidelných žilníků, impregnačních pásem strmých úklonů, výplní poruchových pásem nebo nepravidelných strmých žil. Na některých ložiskách (Talcuna, Portales, Buena Esperanza, Carmen, Diablo aj.) dosahují žíly i větších — několikadecimetrových až metrových — rozměrů a kumulace měděných rud v nich byly příležitostně dobývány. Syme-



Obr. 7. Schematická geologická mapa ložiskového revíru Talcuna (podle Peeblesa, in Ruiz et al. 1971)

1 — aluvium; 2 — andezity, andezitové aglomeráty a brekcie; 3 — horizont se stratiformním zrudněním mědi; 4 — vulkanické brekcie a tufy blíže neurčené; 5 — osa antiklinály; 6 — poruchy, zčásti též žíly se sulfidy mědi a barytovou žilovinou; 7 — doly



Obr. 8. Intermineralizační eroze na ložisku Talcuna (podle Loserta)
 A — detail z celkového profilu ložiska, ukazující úlomky páskované barytové žiloviny s měděnými sulfidy (1) a úlomky andezitu (2) v bazálním horizontu mladší vulkano-sedimentární série; 3 — tufitická písčitá brekcie; 4 — andezity s lokálními vložkami vulkanických brekcií a tufů; 5 — bazální horizont s úlomky starších rudních žil; 6 — rudní žíly, částečně končící na ploše skryté diskordance, částečně protínající obě vulkanogenně sedimentární série. Tečkovaně je vyznačen rozsah stratiformního měděného zrudnění v tufových vložkách

tricky páskované a brekciovitě žíly na ložisku Talcuna (obr. 7) byly dokonce předmětem rozsáhlé těžby barytu.

Diskordantní zrudnění na stratiformních ložiskách se vyskytuje buď samostatně, nebo ve spojení se zrudněním stratiformním. V druhém případě, z genetického hlediska velmi důležitém, mohou žíly nebo zrudněné drcené zóny protínat jednu nebo více stratiformních poloh, přičemž styk mezi diskordantním a konkordantním zrudněním může mít přechodný charakter (žíly se do ložních rudních poloh rozpíjejí) nebo jsou kontakty mezi nimi ostré. Vzácně byly pozorovány (na ložisku Talcuna, srov. PEEBLES 1966, RUIZ et al. 1971) fragmenty žilného materiálu v poloze sedimentární tufové brekcie, která je stratiformně zrudněna (srov. obr. 8).

Mezi minerálním složením diskordantního a konkordantního zrudnění na jednom ložisku nebývá obvykle větších kvalitativních rozdílů, avšak kvantitativními poměry jednotlivých nerostů se mohou oba typy zrudnění výrazně lišit, a to i v případě, kdy do sebe oba typy zrudnění přecházejí. Typickým příkladem — s převahou barytu nad sulfidy mědi v žilách a s opačným poměrem obou nerostů ve stratiformních polohách — je ložisko Talcuna.

Mineralogie a kovnatost stratiformních ložisek

Až na malé výjimky jsou chilská stratiformní ložiska mědi téměř vždy monometalická, s mědi jakožto jediným anebo daleko převládajícím kovovým prvkem. Doprovodným kovem někdy bývá železo (obsažené v bornitu, chalkopyritu nebo hematitu) nebo mangan (v podobě oxidů), jehož rudy tvoří ovšem samostatné polohy pod nebo nad polohami měděných rud. Výjimečný je obsah olova (galenit), zinku (sfalerit), popř. arzenu (arzenopyrit). Obsahy zlata a stříbra jsou obvykle nepatrné, jen na ložisku Diablo (Cerro Negro) obsah Ag dosahuje až 125 g/t.

Z primárních měděných rud jsou nejčastější chalkozín, bornit, chalkopyrit, digenit a neodigenit. Obvykle bývá přítomno i trochu pyritu a hematitu popř. magnetitu. Žiloviny, ve stratiformním zrudnění dosti vzácné, jsou zastoupeny křemenem, chalcodonem a zejména kalcitem, popř. barytem. Na některých ložiskách (Guayacán, Palqui, Buena Esperanza) byl pozorován růžový laumontit, prehnit, adulár, albit, chlorit a epidot, avšak tyto nerosty jsou zřejmě produktem regionálního nízkoteplotního metamorfismu. Magnetit, hematit, wollastonit, granát a epidot provázejí Cu-rudy na ložiskách skarnového typu. Ojedinelý a v Chile dosud neznámý typ stratiformního měděného

zrudnění byl nalezen autorem této stati (LOSERT 1972) v podloží sulfidického zrudnění na ložisku Buena Esperanza (obr. 3). Jde o výplně ryzí mědi — společně s epidotem, kalcitem, křemenem, aj. — v mandlích andezitů, které byly postiženy draselnou metasomatózou (tab. V, obr. 1, 2). Jde o zrudnění analogické strukturami i genezí ložiskům známým z oblasti Hořejšího jezera aj. (CORNWALL 1956).

Mezi stratiformními ložisky jsou sice známa ložiska téměř výhradně chalkopyritová (Mantos de Catemu), obvykle však převládá chalkozín nebo bornit, oba často s příměsí digenitu nebo neodigenitu. Chalkozín může náležet více genetickým typům (hypogenní i supergenní). Výjimečný je galenit a sfalerit, arzenopyrit, cobaltin nebo saflorit (poslední na ložisku Carmen—CARTER 1961). Charakteristická je nepřítomnost nebo nepatrné obsahy stříbrných rud a nízké obsahy zlata v rudě, místy nízké obsahy As v ryzí mědi.

Běžné jsou na stratiformních ložiskách supergenní proměny, vedoucí někdy k úplnému povrchovému vyloužení měděných rud a obvykle i ke vzniku bohatých oxidačních zón, v nichž hlavní rudu tvoří směs atakamitu, chryzokolu, azuritu, malachitu a tzv. měděné černi. V cementačních pásmech jsou hlavními rudami chalkozín, covellín a místy i ryzí měď, v podobě až několikakilogramových agregátů.

Kovnatost stratiformních ložisek mědi je nestejná, v rámci jednoho ložiska však může být dosti pravidelná. V andezitových lávách bývají nejbohatší svrchní partie příkrovů, které mívají obsahy až 5—15 % Cu. Průměrné obsahy rudních poloh, přepočítané na celou mocnost příkrovů, nepřesahují 3—3,5 % Cu (Buena Esperanza), protože ve středních a spodních částech příkrovů jsou obsahy mědi velmi nízké, obvykle s kovnatostí jen 0,1—0,4 % Cu. Pro srovnání je možno uvést, že klarkové obsahy mědi v nezrudněných andezitech ložiskových oblastí severního Chile jsou kolem 48 ppm (jurské andezity v oblasti Buena Esperanza; LOSERT, 1973, 1974), 66 ppm křídlové andezity; OYARZÚN 1971), 46 ppm (terciární andezity, Oyarzún l. c.), popř. 61 ppm (kvarterní andezity, Oyarzún l. c.).

Je-li zrudnění vyvinuto v tufech (Cerro Negro, Talcuna), bývají průměrné obsahy mědi nižší (kolem 1,5—2,5 %), zato však pravidelnější; jednotlivé rudní polohy tam mají sice větší mocnost, ale je jich zpravidla méně než u ložisek uložených v lávách. Výjimku zde tvoří vysokoprocentní chalkopyritové rudy na ložisku Mantos de Catemu. Obsahují až 50 % chalkopyritu zatlačujícího kalcitový tmel mezi úlomky v černém andezitovém tufu. Na některých ložiskách (Talcuna, Cerro Negro, Cuchillo blanco, Tropezón) lze porozovat, že kovnatost zrudnění ve stratiformních tělesech uložených v tufech klesá s rostoucí vzdáleností od strmých rudních žil, které je protínají (PEEBLES 1966).

Rychlé laterální změny kovnatosti jsou známy z ložisek kontaktních, kde směrem ke kontaktu je měděné zrudnění vystřídáno magnetit-hematitovým (Santa Gracia u La Sereny). Naopak velmi stálá je kovnatost nově zjištěného zrudnění ryzí mědi v andezitech u Buena Esperanzы: plošná rozloha tohoto zrudnění je přes 10 km², bohužel však kovnatost, i když je pravidelná, je příliš nízká (0,1—0,2 % Cu), a zrudnění je proto nebilanční.

Žilné zrudnění na stratiformních ložiskách nebývá bohaté, i když lokálně se mohou vyskytnout žíly litých sulfidů (bornit, chalkozín, chalkopyrit, tetraedrit), jako je tomu na ložisku Portales. Obvykle však v žilách převládají žiloviny nad rudními nerosty, kdežto v konkordantním zrudnění je tomu naopak.

Technologicky jsou rudy ze stratiformních ložisek pro jednoduché mineralogické složení a nízký obsah žilovin snadno zpracovatelné. Upravují se flotací (sulfidické rudy) nebo kyselým loužením a redukcí kovové mědi na železném šrotu (oxidické rudy).

Geneze stratiformních ložisek

Nejzajímavější a z hlediska vyhledávání nových stratiformních ložisek mědi nepochybně nejdůležitější otázkou je jejich vznik. Problémy zásadní důležitosti jsou zde v podstatě dva: zda jsou stratiformní ložiska (a z nich zejména ta, která jsou uložena v andezitových vulkanitech) syngenetická či epigenetická, a jaký je původ mědi v nich obsažené. Oba tyto problémy je přirozeně nutno řešit hlavně na ložiskách s primárním zrudněním. Proto ložiska tvořená akumulací sekundárních rud nejistého původu nebyla v první fázi prací zatím do výskumu pojata.

Při studiu stratifonních ložisek je obyčejně prvním znakem, který geology upoutá, konkordantní pozice zrudněných poloh uložených souhlasně se zvrstvením sedimentů nebo vulkanitů. Stratifonní tvar většiny takových ložisek je často natolik sugestivní, že řada geologů, kteří ložiska podrobně nestudují mineralogickými, strukturními, geochemickými a jinými metodami, tento tvar přecení a dospěje k názoru o syngenetickém vzniku takových ložisek. Odtud je pak již jen krok ke generalizaci syngenetických názorů na všechna stratifonní ložiska mědi v Chile. Není proto divu, že syngenetická interpretace chilských ložisek mědi ve vulkanitech se průběhem času ustálila v geologické literatuře (srov. RUIZ et al. 1965) a byla pak ve vyhraněné formě publikována na sjezdu IMA—IAGOD, konaném v r. 1971 v Tokyu (RUIZ, AGUILAR, EGERT, ESPINOSA, PEBBLES, QUEZADA, SERRANO 1971). Opatrněji a zvláštní formou (diskusí mezi zastánci syngenetické a epigenetické teorie) formuloval své názory na vznik ložisek v oblasti Cerro Negro PELLISSONNIER (1971).

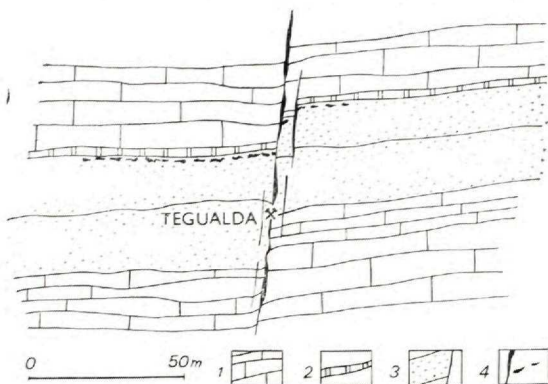
Názory uvedených autorů na syngenezi stratifonních ložisek mědi v Chile (zejména oněch uložených v andezitových lávách) a jimi uváděné důkazy pro syngenetickou interpretaci lze shrnout takto: přítomnost jemných zrněk sulfidů mědi v základní hmotě zrudněných andezitových proudů anebo v úlomcích andezitů obsažených v sedimentárních brekciích, dále absence žilovinových minerálů a hydrotermální alterace nasvědčují tomu, že měď byla přítomna pravděpodobně již v andezitovém magmatu jako dispergovaná primární fáze tvořená kapičkami sulfidů mědi, které pak krystalovaly současně s minerály andezitových láv. Tuto hypotézu podporují podle autorů mimořádně vysoké obsahy mědi v chilských andezitech, dosahující až 200—300 g/t. Tendence zrudnění koncentrovat se ve svrchních částech proudů může dokazovat částečnou mobilizaci sulfidů mědi plynnou fází uvolňující se při krystalizaci andezitového magmatu po jeho efúzi (tj. prakticky za atmosférických podmínek — pozn. autora). Pokud jde o jemnou sulfidickou impregnaci, zčásti nahromaděnou do páskovaných kumulací a vyskytující se v karbonátových horninách nebo černých břidlicích, mají autoři za to, že je produktem syngenezi sedimentárních vulkanických exhalací, přinášejících sloučeniny mědi a ukládajících je v marinních nebo kontinentálních sedimentárních pánvích. Precipitace sloučenin mědi byla způsobena redukcí nerozpustných sulfidů mědi z rozpustných sulfátů, a to redukcí účinkem sapropelitických látek. Vulkanický původ mědi, obsažené ve stratifonních ložiskách, je podle názoru autorů dokázán mj. také regionální asociací ložisek s vulkanity a nepřímo také tím, že ložiska, nejeví žádné vztahy ke granitoidním batolitům a ke geologickým strukturám.

Nedávno započaté nové výzkumy stratifonních ložisek uložených v efúzích a tufech (NESTERENKO—CHÁVEZ 1971; LOSERT 1972; NAUMOV—NESTERENKO—LOSERT—CHÁVEZ 1973; NESTERENKO—LOSERT—CHÁVEZ—NAUMOV, v tisku) však ukázaly, že s generalizovaným názorem na syngenetický vznik těchto ložisek není možno souhlasit. Důkazy pro to byly shromážděny několika cestami: strukturním a litologickým výzkumem některých vybraných typických ložisek, mineralografickým studiem rud, studiem alterací provázejících zrudnění, detailním geochemickým studiem zrudněných vulkanických sérií i jejich nezrudněných i nealterovaných ekvivalentů a termobarometrickým studiem žilovin provázejících sulfidy mědi na ložiskách tohoto typu. Sledujme tyto jednotlivé linie důkazů podrobněji:

1. Strukturní a litologický výzkum řady stratifonních ložisek uložených ve vulkanických sériích ukázal na výraznou závislost lokalizace zrudnění na disjunktivní tektonice. Zřetelně byla tato závislost proukázána např. na ložisku Buena Esperanza (Losert l. c.), kde zrudnění leží ve významném tektonickém pásu vz. směru, které porušuje jurskou vulkanickou sérii a je samo částečně zrudněno měděnými rudami (tab. VI, obr. 2). Zároveň je zde velmi výrazně vyvinut ještě druhý jev, charakteristický pro stratifonní ložiska, a to lokalizace zrudnění v určitých litologicky příznivých horizontech. Na ložisku Buena Esperanza jsou to buď polohy andezitových proudových brekcií, tvořených úlomky silně mandlovcovitých andezitů uzavřených v nedokonale tmelených vulkanických pískovcích, anebo svrchní, silně mandlovcovité části andezitových příkrovů. Celé ložisko je zřetelně lokalizováno na křížení strmých poruchových pásem se sérií takových pórovitých hornin, což se dá nejsnadněji vysvětlit epigenetickým, hydrotermálním charakterem zrudnění. Naproti tomu žádná syngenetická teorie nemůže vysvětlit, proč všech 28 zrudněných příkrovů leží přesně nad sebou a zrudnění ve všech se do stran současně vytrácí.

Závislost stratifonního zrudnění na disjunktivních poruchách je zřejmá i v jiných oblastech,

např. v revírech Talcuna, Cerro Negro, Mina Tegualda aj. Severojižní poruchy v ložiskovém revíru Talcuna (obr. 7) jsou přitom výrazně zrudněny a mají charakter rytmicky páskovaných barytových žil se sulfidy mědi (PEEBLES 1966). Stratiformní zrudnění tu tvoří celkem tři polohy. Nachází se v subhorizontálně uložených polohách jemně laminovaných vulkanických pískovců a s nimi se střídajících jemných sedimentárních brekcií tmelených kalcitem, který je zatlačován chalkozínem a bornitem. Z genetického hlediska je důležité, že stratiformní rudní polohy mají největší kovnatost tam, kde jsou protínány rudními žilami — od nich na obě strany se kovnatost zřetelně zmenšuje a vyznívá. V hrubších horninách se obohacení projevuje do větší vzdálenosti než v jemnozrnných. Pozoruhodné je pokračování shodné mineralizace po dočasné emerzi, projevující se skrytou diskordancí a výskytem úlomků rudních žil i mineralizovaných sedimentárních brekcií na bázi sedimentární série mladšího cyklu (obr. 8).



Obr. 9. Ložisko Tegualda u Tocopilly (podle Loserta) 1 — andezity a bazaltické andezity; 2 — vložky vulkanických (převážně andezitových) brekcií; 3 — ignimbrit; 4 — rudní žíly převážně s chalkopyritem, přecházející do ložních poloh chalkopyritu ve svrchní části ignimbritové polohy

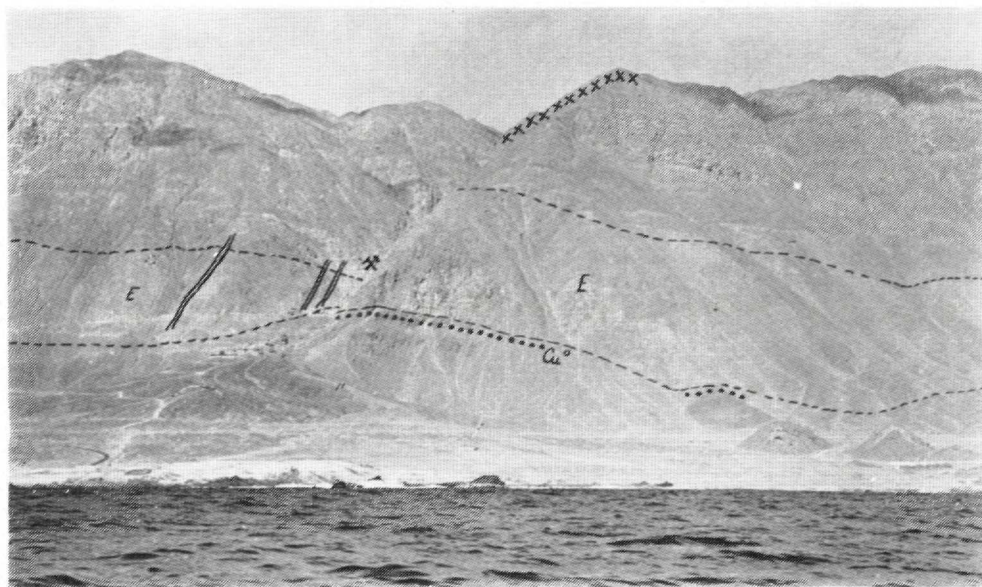
převážně v pórovitých apikálních částech proudů a částečně z nich zasahuje i do nadložní bazální vápencové brekcie. Lze podle autorů nejlépe vysvětlit epigenetickou povahou zrudnění, při němž byly zrudňující roztoky vedeny pórovitými hřbety andezitových proudů a mineralizovaly přitom i nadložní vápencové brekcie a lumachely.

Podobné případy „vedení“ hydrotermálního zrudnění poskytuje i ložisko El Salado de Catemu, v němž je zrudnění soustředěno v deseti nad sebou ležících andezitových příkrovech, a to v mandlovcovité facii vyvinuté při jejich povrchu. Podobně je tomu na ložisku Los Mantos de Catemu, vyvinutém v propustných polohách andezitových brekcií. Epigenezi nasvědčuje i hromadění Cu-zrudnění pod nepropustnými vložkami břidlic v tufech (např. oblast Cerro Negro).

2. Mineralogickým studiem a mikrostrukturním výzkumem rud ze stratiformních ložisek lze zjistit řadu příznaků typických pro epigenetický charakter zrudnění. Je to především řada drobných žilných struktur, většinou vyvinutých jen v mikroskopickém měřítku, jako například žilníkové typy zrudnění, uzlíkové struktury, v nichž se kombinují impregnační a žilníkové struktury (tab. II, obr. 2, tab. III, obr. 1) a jiné. Minerograficky lze dále konstatovat shodnost minerálního obsahu žilných a s nimi spojených stratiformních ložisek stratiformních poloh na rudní žíly. Přitom je pozoruhodné, že sukcese minerálů ve stratiformním a diskordantním zrudnění je stejná, a to i v případě, kdy se kvantitativní zastoupení minerálů v žilách a ložních rudních polohách liší. Studium rudních výplní v mandlovcích ukazuje, že mandle jsou mezi sebou často propojeny žilkami (tab. III, obr. 2., tab. IV, obr. 3, 4.) a jimi také napojeny na rozvodní a přírodní trhlíny hydrotermálních roztoků. Minerální sukcese v žilkách i mandlích je stejná a shodné jsou i cha-

Určující vliv kombinace radiálních zlomových pásem a příhodných (pórovitých nebo snadno propustných) hornin ukazuje i malé ložisko Tegualda j. od města Tocopilla, asi 150 km s. od Antofagasty (obr. 9). Jde o vertikální chalkopyritové žíly vz. směru, sledující poruchová pásma porušující sérii andezitových a bazaltových láv s vložkou ryolitického ignimbritu. Tam, kde žíly protínají pórovité horniny ve svrchní části ignimbritu, šíří se epigenetické chalkopyritové zrudnění podél vrstevnatosti až do vzdálenosti několika desítek metrů od žil.

Zajímavý způsob lokalizace rud uvádějí CARTER a ALISTE (1964) z ložiska Guayacán. Rudy jsou tam výrazně koncentrovány v mandlovcovitých hřbetních částech jazykovitých proudů porfyrického andezitu, překrytých bazální vápencovou brekcií a tufy. Skutečnost, že zrudnění vystupuje

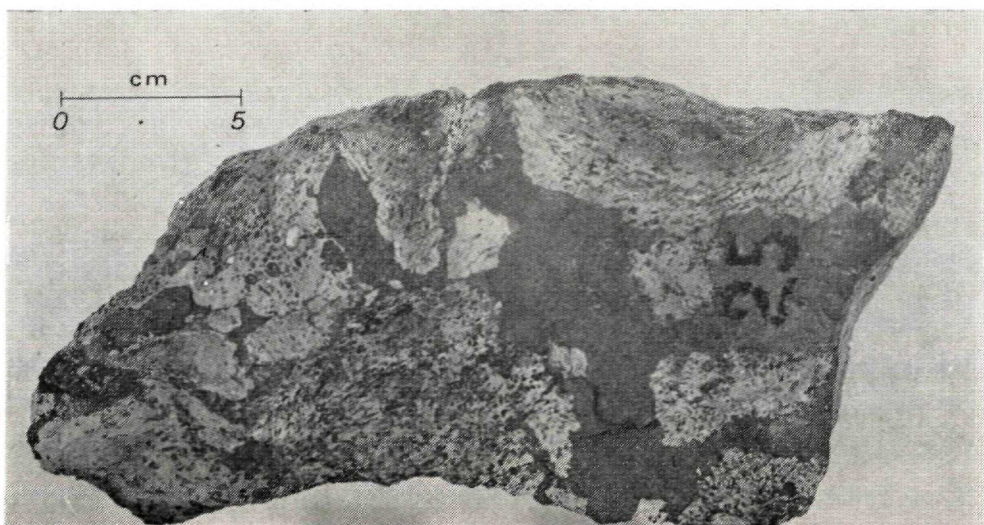


Obr. 1. Pohled od západu na střední část ložiskového revíru Buena Esperanza. E — ložní zóna silné epidotizace bazaltů a bazaltických andezitů. Křížky — výchozy stratiformního Cu-zrudnění ložiska Buena Esperanza, uloženého v andezitových příkrovech. Dvojitě čáry — žíly s Cu-zrudněním; tečky (Cu) — horizont ryzí mědi v andezitech bohatých draslíkem; kladívka — hlavní vchod dolu Buena Esperanza

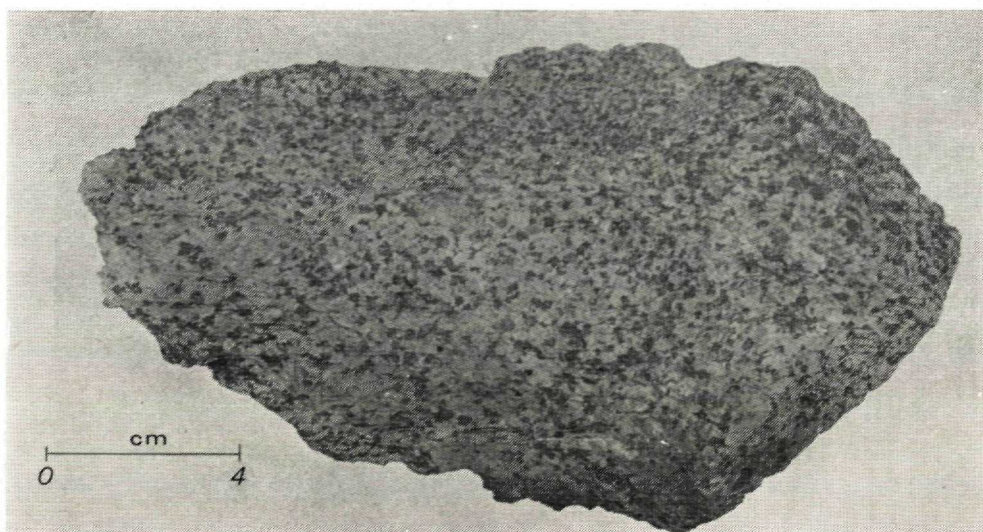
rakteristické mikrotextury, jako pseudomyrmekitické prorůstání bornitu s chalkozímem, postupné zatlačování pyritu Cu-sulfidy (tab. IV, obr. 2) aj. Toto vše ukazuje na současné ukládání rudních nerostů v diskordantním i stratiformním zrudnění, což nasvědčuje epigenezi stratiformní mineralizace a — časově i geneticky — společnému vzniku obou typů zrudnění. Epigenezi zrudnění dokazuje i zatlačování nerostů vzniklých při regionální metamorfóze (např. titanitu, K-živce) nerosty, které provázejí sulfidické zrudnění (např. anatas, sericit).

3. Přes tvrzení, že „neither the sequences that include these strata-bound copper sulphide deposits, nor the ore bodies themselves, show any effects of hydrothermal alterations that could be related to the sulphide mineralization...“ (Ruiz et al. 1971), bylo novým výzkumem zjištěno, že stratiformní zrudnění ve vulkanitech je provázáno výraznou hydrotermální přeměnou hornin. Jde přitom o přeměny vysloveně epigenetické, protože jsou „přetištěny“ přes regionálně metamorfní asociace (LOSERT l. c.) a běžně sečou hranice jednotlivých lávových proudů i vložených vulkanogenně sedimentárních a sedimentárních hornin. Na ložiskách, kde se minerální asociace vzniklá hydrotermální alterací podobá produktům regionální metamorfózy, může být hydrotermální alterace málo nápadná a může ujít pozornosti. Avšak i v takových případech se hydrotermální proměna zřetelně projevuje (např. kolem trhlin) v čerstvých horninách ve středních a spodních částech příkrovů, které jsou obvykle masívní a díky tomu byly uchráněny před regionálními přeměnami.

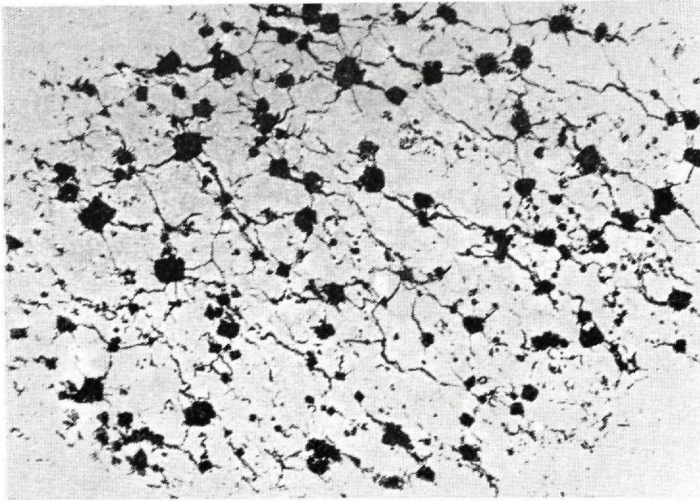
Na stratiformních ložiskách uložených ve vulkanitech jsou nejběžnějšími minerály hydrotermální alterace sericit, chlorit, kalcit, křemen, chalcedon, albit, hematit, anatas a vzácný skapolit. Nerosty regionálně metamorfního původu, jako pumpellyit, zeolity, prehnit, epidot a K-živec, nebyly v hydrotermálně přeměněných horninách zjištěny. Tím se také potvrzuje, že měděné zrudnění nebylo synchronní s regionální metamorfózou vulkanických sérií a nebylo při ní ani regenerováno, jak se domnívá např. LEVI (1970).



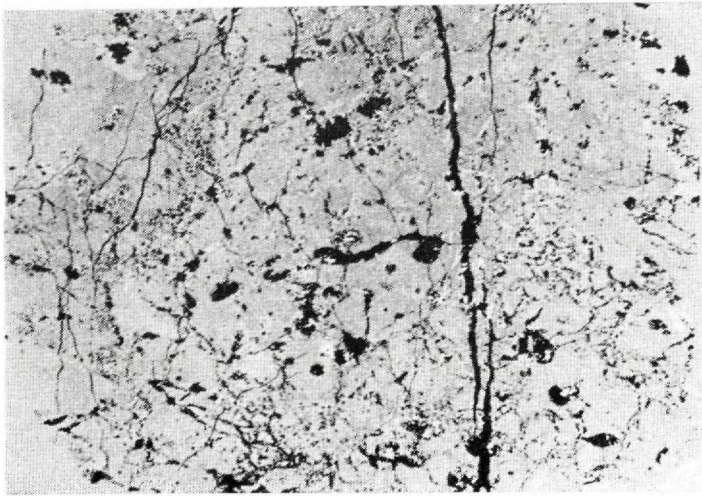
Obr. 1. Sedimentární brekcie z dolu Buena Esperanza. Zrudnění je vyvinuto v mandlích v úlomcích andezitů a jako impregnace i v základní hmotě tufitického pískovce



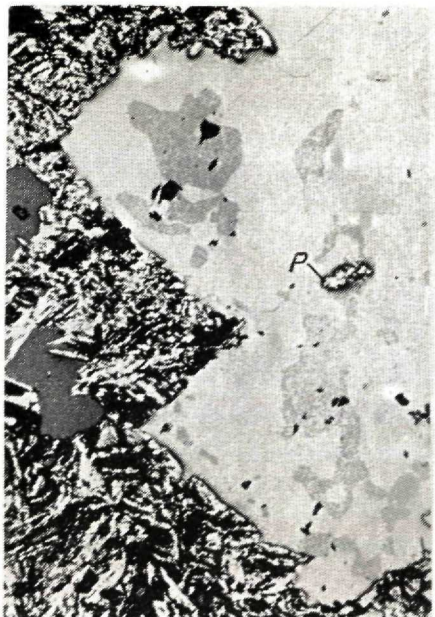
Obr. 2. Typická ukázka uzlíkové textury Cu-zrudnění z dolu Buena Esperanza. Vznikla hypogenní cementací Cu-sulfidů na pyritové impregnaci. Pseudomorfozy po krystalcích pyritu jsou připojeny žilníkem sulfidů mědi



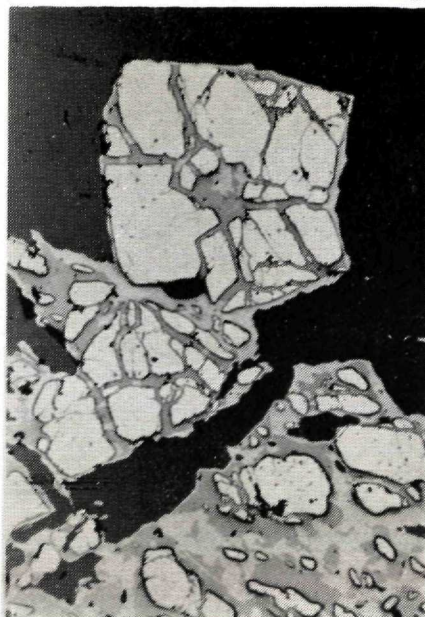
Obr. 1. Mikroskopický obraz uzlíkové textury z obr. 2, tab. II. Výbrus, bez nikolů, zvětš. 3×



Obr. 2. Kombinovaná rudní textura z dolu Buena Esperanza. Jemný žilník tvořený sulfidy mědi navazuje na sulfidické výplně drobných mandlí v andezitu. Výbrus, bez nikolů, zvětš. 3×



Obr. 1. Chalkozín (bílý) pseudomorfuje krychle pyritu, z nichž se zachoval jen malý relikt (P). Šedý nerost v chalkozínu je bornit. Chalkozín částečně zatlačuje i lištovitý hematit. Ložisko Buena Esperanza. Nábrus, bez nikolů, zvětš. 15×



Obr. 2. Charakteristická hypogenní cementace chalkozínu (šedobílý) a bornitu (šedý) na krystalech pyritu (bílý). Ložisko Talcuna. Nábrus, bez nikolů, zvětš. 10×

Na mnoha ložiskách jsou produkty hydrotermálních přeměn barevně pestré a již zdaleka do očí bijící. Nejmarkantnější jsou proměny na ložisku El Salado de Catemu, kde jsou svrchní mandlovcovité části osmi andezitových příkrovů silně albitizovány a prokřemeněny a světle růžové přeměněné horniny odrážející se od černošedých nepřeměněných andezitů tvořících spodní části příkrovů jsou viditelné na vzdálenost několika kilometrů. Rovněž proměny na ložisku Buena Esperanza jsou barevně nápadné a — což je důležité — nezastavují se na hranicích jednotlivých lávových příkrovů a sedimentárních vložek (obr. 5), jak by to vyžadovala syngenetická teorie. Podobně na ložiskách oblasti Cerro Negro má silicifikace navozující zrudnění výrazně diskordantní charakter.

4. Geochemický výzkum rovněž ukazuje na shodné rysy žilného a stratiformního zrudnění a tím i na genetickou spřízněnost obou. Výzkum též zjistil analogický makrochemismus i mikrochemismus odpovídajících si rudních generací a nerostů na žilách i stratiformních tělesech a také geochemicky totožný charakter alterací hornin provázejících oba typy zrudnění. Ten je charakterizován redistribucí K a Na uvnitř alterovaných vulkanických hornin, které byly zároveň při alteraci ochuzeny o Ca a Sr, Ni, Co a Zn (Losert l. c.). Tím se alterace spjatá s Cu-zrudněním výrazně liší od regionálně metamorfních proměn, např. regionální epidotizace, která vyvolává redistribuci Si, Na, Ca a Sr uvnitř epidotizovaných pásem a vynáší z nich K, Rb a Cu.

5. Termobarometrické studium bylo konáno na uzavřeninách v kalcitových a křemenných žilovinách, které krystalovaly současně nebo téměř současně se sulfidickými nerosty mědi na stratiformních ložiskách ve vulkanických sériích (NAUMOV, NESTERENKO, LOSERT, CHÁVEZ, 1973; NESTERENKO, LOSERT, CHÁVEZ, NAUMOV, práce v tisku). Teploty homogenizace plynokapalných uzavřenin mohou být nízké (mezi 65—140 °C [kalcit] a 122—195 °C [křemen] na ložisku Buena Esperanza) až středně vysoké (mezi 249—430 °C [křemen] pro ložisko El Salado de Catemu; 140



Obr. 3. Chalkozín (černý) tvoří výplň mandle v andezitu a zároveň její lem a drobné žilky, které na něj navazují. Ložisko Buena Esperanza. Výbrus, bez nikolů, zvětš. 10×



Obr. 4. Chalkozínové žilky protínající základní hmotu mandlovcovitého andezitu se napojují na chalkozínovou výplň mandlí. Ložisko Buena Esperanza. Nábrus, bez nikolů, zvětš. 8×

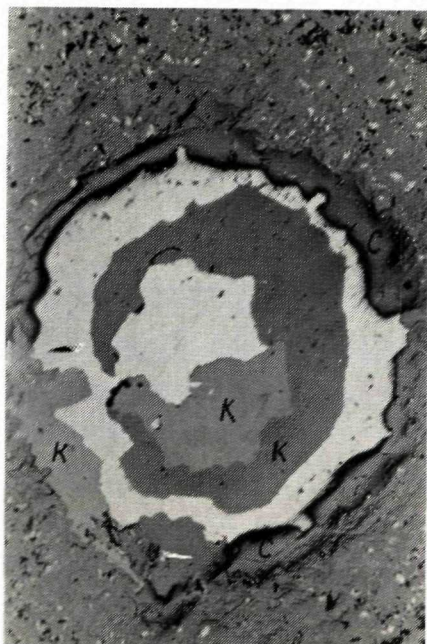
až 406 °C [kalcit] a 290—340 °C [křemen] pro ložisko Santa Gracia). Ložiska se středně vysokými teplotami vzniku jeví obyčejně geografické i genetické vztahy k intruzívům, kdežto ložiska s nízkými teplotami krystalizace jsou obvykle kryptomagmatická.

Zásadní důležitost má stanovení minimálních tlaků panujících při krystalizaci žilovin a odvozených z teplot vymizení plynné fáze a teplot rozpuštění pevné fáze v třífázových uzavřeninách. Takto zjištěné tlaky mají hodnoty mezi 285—315 bary (ložisko Buena Esperanza), 340 barů (ložisko El Salado de Catemu) a 260—1200 barů (Santa Gracia). Tyto hodnoty jednoznačně dokazují, že krystalizace nerostů nemohla probíhat za atmosférických podmínek v lávách vylitých na povrch, tak jak to vysvětlují zastánci syngenetického vzniku stratiformních ložisek uložených v andezitových příkrovech.

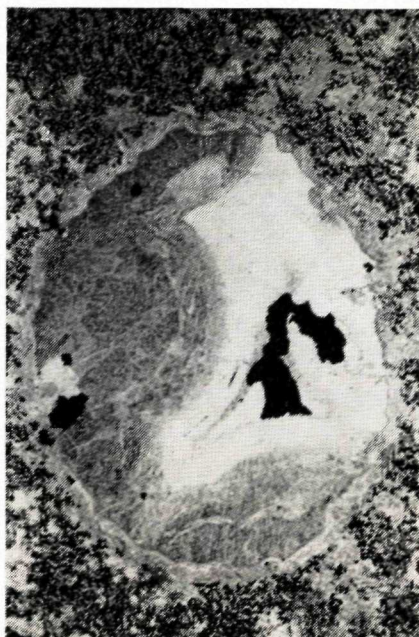
Souhrn poznatků získaných zmíněnými pěti metodami zřetelně ukazuje na epigenetický vznik stratiformního měděného zrudnění v andezitových lávách a s nimi sdružených vulkanosedimentárních horninách. Tento typ geneze dokládá také výskyt některých vysokoteplotních stratiformních ložisek (např. skarnových nebo katatermálních, provázených vznikem albitizovaných hornin) v těsné blízkosti intruzivních těles a zřetelná pozice takových ložisek uvnitř zonální rudní aureoly vyvinuté kolem těchto intruzí (Santa Gracia).

Zdroj mědi pro stratiformní ložiska

Druhou zásadní otázkou stratiformních ložisek je původ mědi v nich obsažené. Přestože syngenetickou mobilizací mědi z láv během jejich solidifikace je možno z výše uvedených důvodů pokládat za nemožnou, nelze andezity a bazalty vyloučit z možných zdrojů mědi. I když průměrné obsahy mědi v chilských andezitech nejsou tak velké, jak o tom píše RUIZ et al. (1965, 1971), kteří uvádějí obsahy 200—300 ppm, přece jen průměrné obsahy mědi v chilských andezitech (46—66 ppm)



Obr. 1. Ryzí měď (černá) tvoří spolu s křemenem (bílý) a chalcedonem (šedý) výplň mandle v andezitu bohatém draslíkem. Západně od dolu Buena Esperanza. Výbrus, bez nikolů, zvětš. 10×

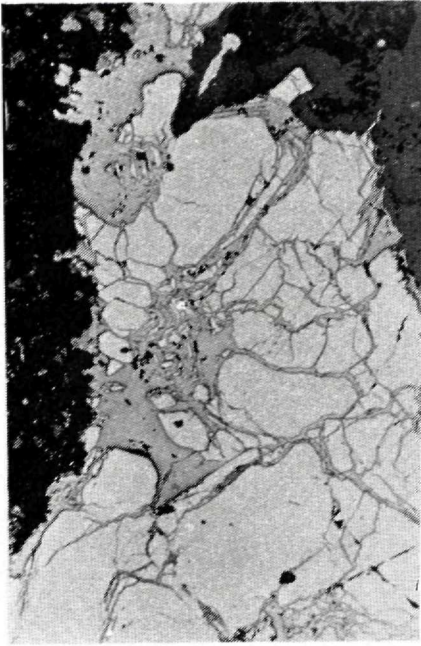


Obr. 2 — Ryzí měď (bílá) tvoří prstencovitou zónu v mandli vyplněné křemenem (K) a kalcitem (C). Bílé tečky v základní hmotě draslíkem bohatého andezitu jsou magnetit. Západně od dolu Buena Esperanza. Nábrus, bez nikolů, zvětš. 10×

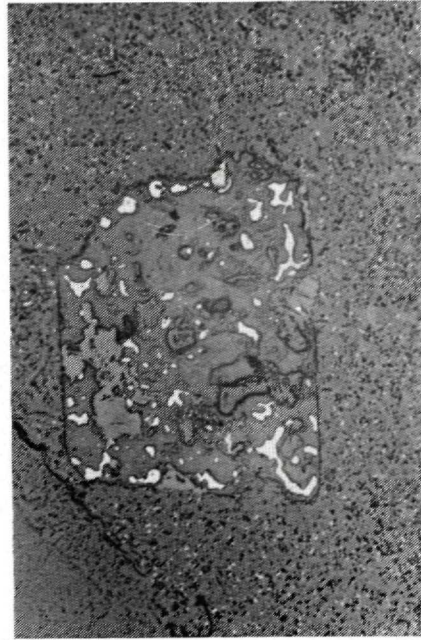
a podobně i bazaltech (55–84 ppm, OYARZÚN 1971), postačují k tomu, aby za určitých podmínek mohla být z těchto hornin uvolněna (extrahována) značná množství tohoto kovu.

Možnost rozsáhlé epigenetické a v regionálním měřítku probíhající extrakce mědi z bazaltů a bazaltických andezitů byla poprvé v Chile dokázána autorem této práce (Losert l. c.), a to detailním geochemickým výzkumem na ložisku Buena Esperanza. Čerstvé jurské bazalty a bazaltické andezity v této oblasti mají průměrné obsahy kolem 50 ppm Cu, avšak v rozsáhlých ložních polohách, kde tyto horniny podlely epidotizací (tab. I, obr. 1), klesá v nich obsah mědi na hodnoty menší než 15 ppm. Jelikož rozměry epidotizovaných zón v efuzívech dosahují rozměrů až $5 \times 0,3 \times 1$ km, je množství mědi uvolněné z takové epidotizované zóny efuzív pozoruhodné a dosahuje řádu 100 000 tun. Je to zhruba stejné množství mědi, jaké je obsaženo v zásobách stratiformního ložiska Buena Esperanza, které leží v nadloží epidotizované zóny, a v zásobách stratiformních akumulací ryzí mědi v andezitových mandlovcích, které leží v těsném podloží epidotizované zóny. Analýzy čerstvých a alterovaných hornin ukázaly, že k uvolnění mědi, která původně substituovala Fe^{2+} v primárních pyroxenech, olivínu a magnezitu, dochází úplnou oxidací Fe^{2+} na Fe^{3+} , vázaného nyní výhradně v epidotu. Celý proces epidotizace je výsledkem regionální nízkoteplotní hydrotermální alterace, které podlely především nejbazičtější (bazaltické a bazalt-andezitické) horniny celé vulkanické série.

Měď uvolněná z epidotizovaných hornin byla z epidotizovaných pásem vynesena hydrotermálními roztoky a jimi transportována podél příčných poruchových pásem. Byla potom uložena tam kde tato strmá poruchová pásma protínají horizonty pórovitých vulkanických a sedimentárních



Obr. 3. Agregáty ryzí mědi (bílá) v pseudo-morfóze po hyperstenu v draslíkem bohatém andezitu. Západně od dolu Buena Esperanza. Nábrus, bez nikolů, zvětš. 10×

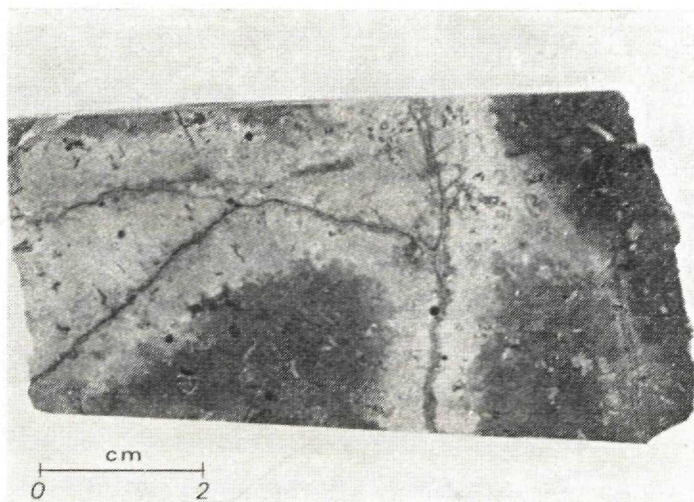


Obr. 4. Chalkopyrit (šedý) zatlačuje pyrit (bílý). Ložisko Mantos de Catemu. Nábrus, bez nikolů, zvětš. 10×

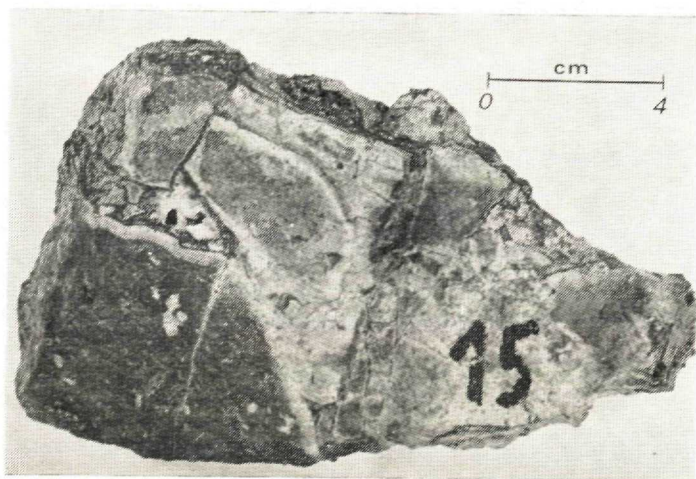
brekcií, popř. mandlovcovité polohy andezitových příkrovů. Spolu s mědí bylo z epidotizovaných pásem vyneseno i takové množství síry, že to opravňuje k předpokladu, že veškerá měď a síra obsažená v ložisku Buena Esperanza byla odvozena z epidotizovaných bazaltických hornin. To znamená, že v tomto případě není nutno hledat původ těchto dvou prvků v blízkých intruzívech, která prorážejí vulkanickou sérii s ložisky.

Otevřeným problémem zůstává původ sterilních hydrotermálních a silně oxidizujících roztoků, které vyvolaly regionální epidotizaci vulkanitů a vynášely z nich měď, síru a jiné prvky (Ni, Co, Zn). Je možno uvažovat o roztocích uvolněných z intruzív, o fosilních vodách „uvězněných“ v mandlovcovitých nebo struskovitých partiích vulkanické série a ohřátých (při poklesu a překrytí vulkanitů dalšími sériemi) vlivem geotermického gradientu či intruzív, nebo reziduálním teplem neúplně vychladlé vulkanické série, navíc kontinuálně prohřívané mladšími subvulkanickými tělesy vulkanitů, popř. intruzív. NESTERENKO a CHÁVEZ (1971), kteří analogickým způsobem — koncentrací mědi odvozené z alterovaných andezitů — objasňují vznik ložiska El Salado de Catemu, uvažují dokonce o vodách meteorického původu, sestupujících podle stratifikace vulkanické série zapadající směrem k intruzívům. V jejich termickém dosahu se meteorické vody ohřívaly, chemicky aktivizovaly a byly pak schopny extrahovat kovy z vulkanických hornin a přenášet je na jiná místa, kde ve vhodných strukturních a litologických podmínkách dochází k precipitaci sulfidů mědi a k tvorbě ložisek.

U stratiformních zrudnění ve vápencích a břidlicích se ve srovnání se zrudněním ve vulkanitech nedá původ mědi tak snadno stanovit, protože tato ložiska jsou značně menší, špatně prozkoumaná a ani jejich závislost na tektonice nelze pro nedostatek mapovacích prací v okolí ložisek zatím ověřit. Přesto však již dnes lze konstatovat epigenetický původ mědi z vulkanitů a její koncentraci ve vápencích a vulkanitech na ložisku Guayacán. V každém případě vyžádá si však řešení geneze zrudnění ve vápencích a břidlicích a původ mědi v nich obsažené dalších podrobných prací.



Obr. 1. Diskordantní typ zrudnění z ložiska Buena Esperanza ukazující silné hydrotermální proměny andezitu kolem žilek tvořených chalkozínem, křemenem a bornitem



Obr. 2. Zrudněná tektonická brekcie z dolu Buena Esperanza. Pozoruhodná je proměna andezitu na okrajích úlomků a v sousedství zrudnění, tvořeném chalkozínem, bornitem, hematitem a digenitem v křemenné a kalcitové žilovině. Důl Buena Esperanza

Shrnutí výsledků a význam studia

Přestože nových výzkumných prací zabývajících se chilskými stratiformními ložisky mědi není zatím mnoho, jsou jejich výsledky hodny povšimnutí a zasluhovaly by pokus o jejich aplikaci i v jiných případech. Hlavní přínos těchto výzkumů spočívá v tom, že prokázaly epigenetický charakter zrudnění uloženého ve vulkanitech a že ukázaly, že měď, potřebná k vytvoření takových ložisek, nemusí ve všech případech pocházet z magmatických zdrojů, nýbrž může být odvozena z vulkanitů samotných, a to epigenetickými, původně patrně steilními hydrotermálními roztoky. Takovýto pohled na genezi stratiformního zrudnění ve vulkanitech ukazuje na velký význam studia regionálních hydrotermálních alterací ve vulkanických sériích a zejména na důležitost geochemického vymezení takových typů alterace, které vedly k uvolnění velkých množství mědi z přeměněných vulkanických hornin. Takovým studiem je možno vyčlenit území bez perspektiv pro výskyt nových ložisek mědi a na druhé straně — ve spojitosti se strukturálním výzkumem (disjunktivní tektonika) a studiem litologie vulkanických sérií — vymezit oblasti nadějně pro výskyt nových stratiformních ložisek mědi.

Zvláštní úloha při prospekci nových stratiformních ložisek mědi připadá také geochemickému výzkumu těch druhů alterací, které přímo provázejí stratiformní zrudnění ve vulkanitech (tzv. lokální alterace na rozdíl od alterací regionálních, postihujících vulkanické série o rozloze několika km² a více). Ukazuje se (LOSERT l. c.), že v takto alterovaných vulkanitech charakteristicky klesá obsah stroncia oproti čerstvým, nealterovaným horninám. Tak např. čerstvé andezity v oblasti ložiska Buena Esperanza mají 163—284 ppm Sr, kdežto hydrotermálně alterované andezity souseďící se zrudněním jen 24—27 ppm Sr. Také Ca/Sr a Rb/Sr hodnoty hydrotermálně alterovaných hornin (958—1370, resp. 1,48—2,46) se diametrálně liší od Ca/Sr a Rb/Sr hodnot nepřeměněných andezitů (202—273, resp. 0,1—0,47). Tato skutečnost spolu s možností rychlého a celkem nenákladného stanovení Sr (a popř. Ca, Rb a Sr) ve velkém množství vzorků činí ze studia distribuce těchto prvků v alterovaných horninách užitečnou prospekční metodu. Její další výhoda spočívá v tom, že charakteristicky nízké obsahy Sr a vysoké hodnoty Ca/Sr a Rb/Sr se nemění ani tehdy, jestliže byly sulfidy mědi zcela odstraněny (vylouženy) z výchozů supergenními pochody, a zrudnění se proto ve vyloužené alterované zóně nijak neprojevuje. Těto prospekční metody již bylo s úspěchem použito při prospekci stratiformní měděné mineralizace ve vulkanické sérii La Negra v okolí ložiska Buena Esperanza (ALFARO 1972).

Doručené 18. 1. 1974

Doporučil V. Zorkovský

LITERATURA

- ALFARO, H. G. 1972: Alteración hidrothermal y elementos en trazas en prospección de yacimientos de cobre en andesitas de la zona de Tocopilla. Colloq. sobre fenómenos de alteración hidrothermal y metamorfismo en rocas volcánicas e intrusivas. Depart. de Geología, Univ. de Chile, Santiago.
- CARTER, W. D. 1961: Yacimientos de cobre tipo manto. Bol. Inst. Invest. Geol., Chile, 10, Santiago.
- NELSON ALISTE N. 1964: Paleo-channels at the Guayacán Copper mine, Cabildo district, Aconcagua province, Chile. Econ. Geol., 59, 1283—1292.
- CORNWALL, H. R. 1956: A summary of ideas on the origin of native copper deposits. Econ. Geol., 51, 615—631.
- LEVI, B., CORVALÁN J. 1964: Metamorfismo regional en las rocas volcánicas del Geosinclinal Andino. Minerales, 86, 6—15, Santiago.
- LEVI, B. 1970: Burial metamorphic episodes in Andean geosyncline, Central Chile. Geol. Rundschau, 59, 3, 994—1013.
- LOSERT, J. 1972: Alterations and associated copper mineralizations in the Buena Esperanza mining area, Northern Chile. Colloq. sobre fenómenos de alteración hidrothermal y metamorfismo en rocas volcánicas e intrusivas. Depart. de Geología, Univ. Chile, Santiago.
- LOSERT, 1973: Genesis of copper mineralizations and associated alterations in the Jurassic vol-

- canic rocks of the Buena Esperanza mining area (Antofagasta province, Northern Chile). Bol. Univ. Chile, Santiago.
- LOSERT, 1974: The formation of the stratiform copper deposits in relation to the alteration of volcanic series. Rozpravy ČSAV, Praha.
- NAUMOV, V. G., NESTERENKO, G. V., LOSERT, J., CHÁVEZ, L. 1973: Termobaričeskije usloviya formirovaniya nekotorykh mestoroždenij Čili. Geochimia, 8.
- NESTERENKO, G. V., CHÁVEZ, L. 1971: Génesis de yacimientos de cobre tipo manto en Chile (Informe preliminar). Univ. de Chile Bol. 18 p. Santiago.
- NESTERENKO, G. V., LOSERT, J., CHÁVEZ, L., NAUMOV, V. G. (v tisku): Presiones y temperaturas de la formación de algunos yacimientos cupríferos Chilenos. Bol. Inst. Invest. Geol., Santiago.
- OYARZÚN, J. 1971: Contribution à l'étude géochimique des roches volcaniques et plutoniques du Chili. Thèse présentée à la Faculté des Sciences d'Orsay, Université Paris — Sud, pour obtenir le titre docteur de l'Université. P. 114.
- PEEBLES, F. 1966: Estudio geológico del distrito cuprífero de Talcuna. Bol. Inst. Invest. Geol., Santiago.
- PELISSONNIER, H. 1971: Le gisement de cuivre stratiforme de Cerro Negro (Aconcagua, Chili). Bulletin du B.R.G.M. (deuxième série), section II, N° 6, 43—50.
- RUIZ, C., AGUIRRE, L., CORVALÁN, J., KLOHN, C., KLOHN, E., LEVI, B. 1965: Geología y yacimientos metalíferos de Chile. Inst. Invest. Geológicas, Chile, Santiago.
- RUIZ, C., AGUILAR, A., EGERT, E., ESPINOSA, W., PEEBLES, F., QUEZADA, R., SERRANO, M. 1971: Strata-bound Copper Sulphide Deposits of Chile. Soc. Mining Geol. Japan, Spec. issue, 3, 252 to 260. (Proc. IMA—IAGOD Meetings 1970, IAGOD Vol.), Tokyo.

Geological and genetical problems of the Chilean stratiform copper deposits

JIRÍ LOSERT

The Chilean stratiform copper deposits — several dozens in total — occur mostly in the northern part of the country. They are found in volcanic and sedimentary series extending along the w. border of the Andean geosynclinal zone. The major part of the deposits is in Jurassic-, Cretaceous- and Lower Tertiary series, in which andesites, basalt-andesites and corresponding tuffs are the dominant rocks. Limestones, both continental and marine, marlstones, shales, sandstones and conglomerates together with tuffites and volcanic breccias are host rocks to a minor part of the deposits. All of the host series bear evidence of a low-temperature burial metamorphism and are commonly intruded by granitoid bodies rimmed by zones of contact metamorphism.

Conformable layers parallel to stratification of the host rocks and up to several dozens of meters thick are characteristic forms of the deposits in question. Several mineralized layers can be developed in one single deposit. In lava flows, the mineralization is concentrated in the upper part of flows. It also infills amygdules or forms cement between fragments of flow breccias. When present in tuffs, the copper minerals occur as impregnation or cement, whereas massive and banded copper mineralization is mostly confined to limestones, sandstones, and shales. Chalcocite is the prevailing copper mineral, but bornite, chalcopyrite, digenite, neodigenite and some pyrite and hematite may also be present in varying amounts. Stratiform deposits of native copper have been recently discovered (Losert, 1962). Gangue minerals are generally rare and represented by calcite, quartz, chalcedony, and barite.

Exceptionally, the host rocks are rhyolite ignimbrites or jasper. Some of the deposits are skarn deposits with calcium-iron silicates formed at the contacts of granitoid- or gabbroidic intrusions. Secondary copper minerals, such as atacamite, chrysocolla and azurite are typical of the deposits set in conglomerates.

In addition to conformable layers, disconformable mineralizations — such as veins, cement of tectonically brecciated zones and cross-cutting zones of impregnation — are also found in the stratiform deposits. Both the stratiform and vein-type mineralization usually display identical

mineralogy and succession and may pass into each other thus showing that both are similar and coeval in origin.

The overestimation of layered forms of the deposits together with the subestimation of disconformable mineralization and of rock alteration is expressed in syngenetic interpretation extended by previous authors on all Chilean stratiform copper deposits (Ruiz et al., 1971). According to them „copper was probably present in the andesite magma as a disperse phase of copper sulphides droplets that crystallized simultaneously with the lava...“ and „the tendency of the mineralization to concentrate in the upper part of flows could represent a partial gaseous mobilization of the copper sulphides“.

In contrast to those ideas the recent work carried out by Nesterenko, Chávez, Losert and Naumov points to epigenetic character of the copper mineralization found in the volcanics. The epigenetic character is attested by 1. dependence of the location of the mineralization on fault tectonics and on the lithologically favorable rocks such as porous amygdaloidal lavas or breccias, 2. identical mineralogy and mineral succession in both stratiform and disconformable mineralization which not uncommonly are seen to pass into each other, 3. intense hydrothermal alteration of rocks adjacent to the mineralization. The alteration is superimposed on both primary rock-forming minerals and secondary minerals stemming from burial metamorphism, and geochemically identical disregarding whether it accompanies stratiform or discordant mineralization within one deposit, 4. the same geochemical character of the stratiform and related disconformable mineralization, 5. relatively high pressures (285—340 bars) controlling the crystallization of gangue minerals in stratiform deposits, which excludes the possibility of syngenetic formation of minerals in superficially cooling effusives.

The geochemical studies by the above authors proved that volcanic rocks themselves can serve as source of copper present in the stratiform deposit. Under favourable conditions, such as those governing during the regional epidotization of volcanic series, an epigenetic hydrothermal extraction of copper from basalts and andesites (containing around 50 ppm Cu) may occur. The copper extracted and removed from the epidotized zones is assumed to have been transported through steep fault zones and deposited — as copper sulphides — in lithologically favorable layers. Since the dimensions of such epidotized zones (in which copper-contents drop to values lower than 15 ppm) reach as much as $5 \times 0,3 \times 1$ km, the total amount of copper mobilized from one such zone is of the X00.000 t magnitude. It is of importance that the ore reserves found to underlie and overlie such a zone also belong to the same magnitude.

The cause of liberation of copper taking place as andesites and basalts were undergoing epidotization, is the activity of solutions promoting the low-temperature hydrothermal alteration of especially the most mafic (basalt-andesitic to basaltic) volcanic rocks. As the above rock were epidotized, their Fe^{2+} (originally substituted by Cu^{2+}) was oxidized to Fe^{3+} bound in epidote and not substitutable by Cu^{2+} , the latter thus being set free. Considerable amounts of sulfur, Ni and other elements, too, were also removed as the rocks were epidotized.

As to the origin of sterile hydrothermal solutions that brought about the regional epidotization and oxidation of volcanics depleting them in copper, several alternatives can be considered: fluids of magmatic origin (from intrusives), fossil waters buried together with volcanic complexes and warmed due to geothermic gradient or by intrusions or by residual heat of incompletely cooled volcanic series repeatedly heated by younger subvolcanic intrusives.

The establishment of epigenetic origin of stratiform copper deposits with copper derived from volcanic rocks underlines the importance of geochemical studies of rock alterations affecting the volcanic host rocks of stratiform deposits. In such rocks the Sr-contents were found to drop to values up to ten times lower than those of equivalent fresh rocks. The Ca/Sr and Rb/Sr values of hydrothermally altered rocks from the vicinity of the mineralization are 958—1370, and 1,48 to 2.16, respectively, and also substantially differ from those of equivalent unaltered andesites (207—273; 0.1—0.47). Such geochemical differences can serve as a guide to location of altered zones promising stratiform ore possibilities. It is important in this relation that removal from outcrops of copper ores by supergene processes does not change the characteristically low Sr-contents and high values of Ca/Sr and Rb/Sr ratios.

Translated by D. Losertová