

Nota breve – Short note

La mineralizzazione del Monte Avanza

Enrico FRANGIPANI

Via dei Fabbri 1, I-34124 Trieste
E-mail: Enrico.frangipani@libero.it

SUMMARY - *The Mount Avanza mineralisations* - The Mount Avanza deposit contains primarily tetrahedrite accompanied by barite and traces of chalcopyrite and sphalerite. The process of ore generation is viewed as due to an hydrothermal fluid that rapidly ascended to the sea floor. Considerations of the pressure regime during ore deposition are based on tetrahedrite. It seems likely that this mineral formed at temperatures above 280 °C. Its formation could be achieved only if the depth of water was sufficient to prevent the hydrothermal solution from boiling on the sea floor; in this case, at least m 600 of water were required. The mixing of seawater with the hot, acid and barium-rich hydrothermal solution is also believed to have occurred because the addition of seawater to this solution may account for the appearance of barite, chalcopyrite and sphalerite. The presence of barium in the hydrothermal fluid, the presence of a deep sea at the time of mineralization and the presence of many other sulphide deposits in the Lower-Middle Triassic formations in the neighbourhood, strongly suggest that this ore deposit formed in the Triassic period.

Parole chiave: tetraedrite, barite, calcopirite, idrotermalismo, Cadore

Key words: tetrahedrite, barite, chalcopyrite, hydrothermalism, Cadore

1. INTRODUZIONE

Nel bacino montano del Piave si situano alcuni giacimenti minerali caratterizzati da un ristretto numero di metalli, che compaiono in pochi e tipici minerali. Le metallizzazioni a solfuri, piombo-zincifere con zinco prevalente, sono quelle più comuni e le più importanti sono ubicate nel Cadore. Il rame si ritrova generalmente nella calcopirite, ma in una ristretta zona situata all'estremità nord orientale del bacino plavense (M. Avanza) si rinviene nella tetraedrite.

Il presente lavoro si propone di delineare alcuni aspetti genetici delle mineralizzazioni del Monte Avanza. Prospettando una genetica idrotermale, si propone di inquadrare le stesse in un possibile modello che interpreta le metallizzazioni delle Alpi calcaree orientali, spiegandole con il variare delle caratteristiche fisico chimiche di fluidi idrotermali in risalita verso il fondale marino.

2. INQUADRAMENTO GEOLOGICO

Il Monte Avanza (2475 m s.l.m.) risulta formato da calcari massicci e stratificati devono-dinantiani for-

matisi in ambiente di mare basso e bordati da rocce carbonifere della formazione flyschoides dell'Hochwipfel, per lo più argilliti siltose e siltiti d'ambiente marino batiale-abissale. Durante l'orogenesi ercinica i sedimenti subirono compressioni tali da venire fagliati e piegati (Brusca 1996).

Una miniera, da cui si estrasse il rame fino alla seconda guerra mondiale, si situa sul fianco meridionale del Monte Avanza, nel Comune di Forni Avoltri (UD). Cinque gallerie a sviluppo quasi orizzontale situate a quote comprese fra 1639 e 1865 m attraversano le rocce scistose del flysch carbonifero e raggiungono il contatto con il calcare devoniano-dinantiano, sede della mineralizzazione. Il contatto è di tipo tettonico con una milonite legata ai movimenti dislocativi e ha un'inclinazione quasi verticale (Brusca 1996).

Il minerale dominante è la tetraedrite, che talora si rinviene in reticolati di vene che penetrano per brevi distanze nei calcari. Abbondante appare pure la barite, mentre più rari sono la blenda e la calcopirite. Nell'estremo ovest della galleria Finsepol, situata a 1639 m di quota, è segnalata anche la presenza della fluorite (Brusca 1996).

3. CENNI SUI METALLI DEL MONTE AVANZA

I dati chimici della tetraedrite sono stati ottenuti con la microsonda elettronica (Tab. 1). Brusca, nella sua relazione del 1996, la definisce zincifera e argentifera, da povera a molto ricca in arsenico, tendente alla variante schwartzite per l'elevato tenore in mercurio.

Dunque, la mineralizzazione del Monte Avanza è costituita da metalli quali rame, antimonio, arsenico, mercurio e zinco i cui solfuri presentano bassi prodotti di solubilità.

Da lungo tempo è noto che la solubilità di un solfuro che si vuole precipitare, saturando con H_2S una soluzione contenente il relativo catione, dipende dal pH. In soluzione abbastanza acida precipitano bene i solfuri di arsenico, mercurio, bismuto, rame; in soluzione meno acida vengono precipitati i solfuri di antimonio, piombo stagno, cadmio; in soluzione neutra precipitano in modo completo i solfuri di cobalto, nichel, zinco e, infine, per i solfuri di ferro e manganese occorrerà raggiungere concentrazioni di ioni S^{2-} che si hanno soltanto in soluzione nettamente alcalina.

Sembra proprio che il deposito del Monte Avanza confermi le osservazioni di laboratorio e ci permetta di ipotizzare una soluzione acida, ancora ricca di quegli elementi che si sarebbero depositati per primi al diminuire dell'acidità della soluzione capostipite.

Sono ormai molti anche gli esperimenti di laboratorio e le osservazioni del mondo naturale che hanno permesso di capire come questa soluzione possa essersi caricata di metalli, come possa essersi originata e quale possa essere stata l'origine degli ioni in essa contenuti.

Si è osservato, ad esempio, che alterando i basalti oceanici ad alta temperatura con acqua di mare, quest'ultima diventa sempre più acida col procedere delle reazioni, perde i solfati e il magnesio e si arricchisce di metalli, che vengono rimossi dalla roccia ed entrano nella soluzione.

Alterando un basalto tholeitico, ad esempio, il rame raggiunge le più alte concentrazioni quando la soluzione ha temperature di 375-400 °C e pH compreso fra 3,3 e 3,6, e il basalto è più cristallino e meno vetroso (Seyfried *et al.* 1985). Nelle soluzioni calde delle dorsali oceaniche che si ritengono derivate da acqua di mare percolante nelle rocce basaltiche, le

concentrazioni del rame variano da 0,6 ppm a 2,8 ppm (Von Damm 1985).

Il fatto che nelle soluzioni dei fondali oceanici con temperature minori di 270 °C il rame non è presente (Janecky *et al.* 1984), mentre si rinviene in quelle più calde, suggerisce l'importanza della temperatura nel condizionare la solubilità di questo elemento (Crerar & Barnes 1976).

4. LA TETRAEDRITE

Le relazioni di fase nel sistema ternario rame, antimonio e zolfo sono state studiate da diversi autori. Skinner *et al.* nel 1972 misero in evidenza la scomparsa della tetraedrite a 543 °C e l'impossibilità per i composti di alta temperatura di rimanere stabili anche a temperatura ambiente. Secondo Kiyooki Tatsuka *et al.* (1973) la tetraedrite è stabile in un ampio campo di soluzioni solide al di sopra dei 95 °C. Il campo più ampio appare fra i 300 °C e i 350 °C per poi rimpicciolire a temperature superiori a 361 °C. In un successivo lavoro, del 1977, K. Tatsuka *et al.* confermarono il rimpicciolimento del campo della tetraedrite a temperature superiori a 300 °C, sempre nel sistema Cu-Sb-S, e avanzarono l'ipotesi che al di sotto dei 300 °C esso potrebbe espandersi fino a includere la composizione ideale $Cu_{12}Sb_4S_{13}$. A temperature inferiori a 250 °C, la tetraedrite diventerebbe instabile e si decomporrebbe in famatinite, digenite e antimonio elementare.

Tali Autori sottolinearono pure che per applicare le relazioni di fase ai minerali naturali sarebbe stato necessario lo studio di sistemi più complessi, e condussero alcuni esperimenti con l'aggiunta di arsenico e ferro ottenendo una tetraedrite stabile anche a temperatura ambiente (1977).

Studi di inclusioni fluide per diverse paragenesi sembrano confermare che la tetraedrite si formi a temperature intorno ai 300 °C, così come registrato da esperimenti di laboratorio (Seal 1990). Per la paragenesi di Casapalca in Perù, ad esempio, costituita da blenda, pirite, calcopirite oltre che da tetraedrite, è probabile una temperatura di formazione compresa fra 280 °C e 320 °C. Una temperatura superiore ai 280 °C è stata dedotta per un deposito minerario nel distretto di Bayhorse, Idaho (Seal 1989).

Altri studi (Seal *et al.* 1990) hanno evidenziato

Tab. 1 - Analisi della tetraedrite.

Tab. 1 - Tetrahedrite chemical analysis.

Hg	5,218%	Ag	0,188%	Ni	0,006%	Fe	0,770%
Pb	0,1%	Sb	21,91%	Cu	39,939%	Co	0,029%
Bi	0,057%	As	4,692%	Zn	4,900%	S	25,527%

che a 300 °C nel sistema Cu-Fe-Sb-S il campo di stabilità della tetraedrite è stabile per valori di $\log fS_2$ compresi fra -11 e -10 e di $\log fO_2$ di circa -33, valori che corrispondono a quelli delle sorgenti calde oceaniche attuali che registrano una temperatura di 315 °C.

Seal *et al.* (1990) fanno notare, inoltre, che in un ambiente alcalino la tetraedrite difficilmente potrebbe formarsi, perché altri minerali sarebbero più stabili, ad esempio calcopirite e stibnite (Sb_2S_3).

5. INTERPRETAZIONE DELLA MINERALIZZAZIONE

Le osservazioni dei fondali oceanici, le analisi delle sorgenti idrotermali odierne e gli esperimenti di laboratorio ci suggeriscono come milioni di anni fa potrebbe essersi formata la mineralizzazione del Monte Avanza.

Il processo, nel suo insieme, può essere pensato come una serie di reazioni irreversibili fra una roccia e una soluzione acquosa, probabilmente d'origine marina. Nelle sue fasi iniziali si può immaginare una lenta percolazione dell'acqua verso zone profonde in una zona piuttosto vasta caratterizzata da un basso rapporto acqua/roccia. L'intrusione di un corpo magmatico nell'area causò il riscaldamento dell'acqua e velocizzò le reazioni di solubilizzazione dei metalli, più rapide a temperature superiori a 350 °C. L'acqua di mare cambiò il suo chimismo: divenne sempre più acida, si arricchì in metalli e acido solfidrico, perse lo

ione solfato e magnesio. È probabile che i metalli siano stati tenuti in soluzione come complessi clorurati. Quando le forze ascensionali superarono quelle dirette verso il basso, la soluzione risalì (Fig. 1). Poiché la risalita avvenne lungo faglie, cioè in zone più ristrette rispetto alla più vasta area di percolazione, a parità di volumi il fluido idrotermale dovette essere più veloce in fase ascendente. Durante la risalita, il rapporto acqua/roccia divenne grande; conseguentemente, il trasferimento di calore alla roccia divenne inefficiente e il fluido si mosse su lunghe distanze rimanendo caldo e buon trasportatore di metalli.

Probabilmente, la soluzione, risalendo, non reagì sensibilmente con le rocce carbonatiche devoniane; infatti, se ciò fosse successo, avrebbe aumentato la sua alcalinità. In questo caso, però, non sarebbe precipitata la tetraedrite ma la calcopirite, che i dati termodinamici indicano più probabile in ambiente alcalino. È verosimile che il contatto con le rocce carbonatiche sia stato minimo per l'elevata velocità della soluzione.

La tetraedrite si depositò lungo il percorso di risalita del fluido idrotermale, da una soluzione che, in corrispondenza dei livelli mineralizzati più elevati – oggi situati a quota 1900 m –, doveva avere una temperatura di almeno 280 °C, perché a temperature più basse sarebbe stata priva o quasi di rame. Secondo Haas (1971), una soluzione 1 M NaCl a 280 °C non raggiunge il punto di ebollizione se è sottoposta a una pressione idrostatica di 60 bar. È probabile, quindi, che il punto in cui la tetraedrite si è formata – ipotiz-

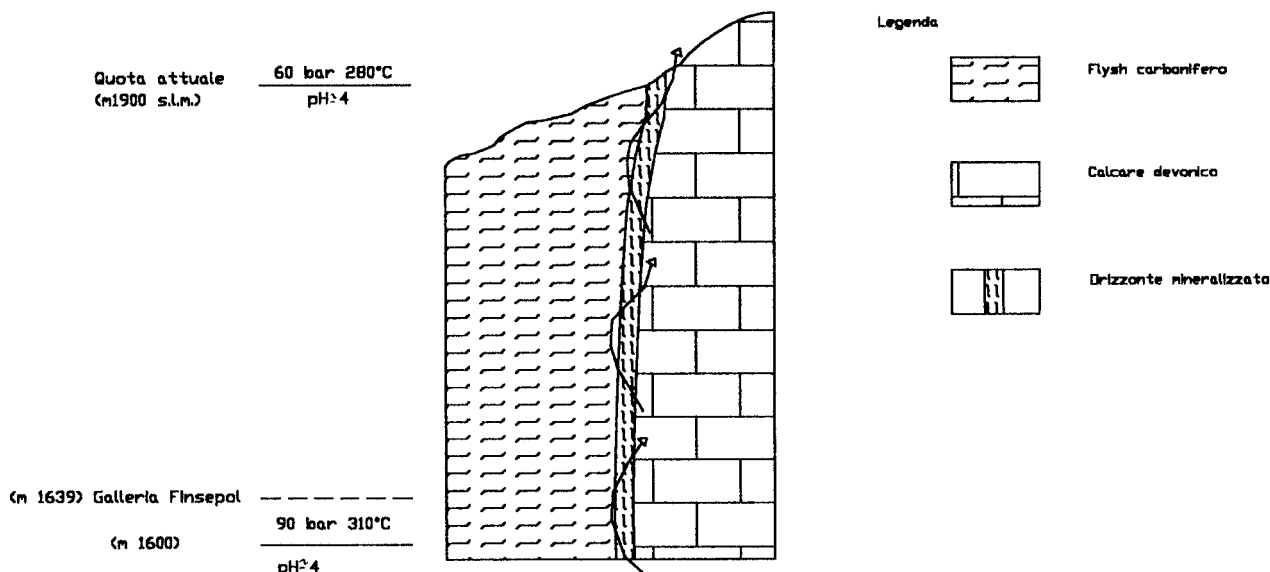


Fig. 1 - Schema geologico all'epoca dell'idrotermalismo e caratteristiche fisico-chimiche ipotizzate della soluzione in risalita.

Fig. 1 - Geological sketch of the rising fluid and its chemical-physical characteristics.

zando che corrispondesse al punto di fuoriuscita della soluzione sul fondo del mare – fosse sovrastato da almeno 600 metri d'acqua, un battente che, se presente oggi, supererebbe appena la cima del Monte Avanza, situata a quota 2475 m.

La tetraedrite posta più in profondità nella miniera si trova, invece, a una quota di circa 1600 m; è quindi probabile che si sia formata in un ambiente sottoposto a una pressione di 90 bar, compatibile con una temperatura di circa 310 °C. È verosimile pure che i metalli con un prodotto di solubilità più elevato, non presenti nella miniera, siano stati scaricati in mare o si siano depositati lungo il percorso di risalita, a quote più elevate, in sedimenti che poi vennero erosi.

6. ALTRE CONSIDERAZIONI

Anche se il deposito può essere definito monomineralico per la presenza quasi esclusiva di tetraedrite, la presenza localizzata di alcuni altri minerali suggerisce qualche considerazione ulteriore.

La baritina appare particolarmente significativa nell'ipotesi di un mescolamento avvenuto fra la soluzione e l'acqua di mare contenuta nelle rocce. Simulazioni condotte mescolando fluidi idrotermali di fondo oceanico e acqua di mare – per capire meglio la sequenza paragenetica delle fasi minerali riscontrate lungo i condotti termali odierni – bene si adattano alla paragenesi del Monte Avanza. Esse hanno rivelato che l'anidrite e la calcopirite sono fra i primi minerali a precipitare, seguiti dalla blenda (Janecky *et al.* 1984). Nel nostro caso la baritina, che è meno solubile del solfato di calcio, si depositò al posto dell'anidrite e ciò avvenne probabilmente per la più alta concentrazione di bario nell'antica soluzione dolomitica rispetto a quella delle soluzioni attuali di fondo oceanico. È probabile, quindi, che anche la roccia che si alterò, rispetto ai basalti tholeitici oceanici, contenesse più bario.

Le simulazioni di Janecky *et al.* (1984) indicano che inibendo la precipitazione della pirite e della pirrotite e quindi da una soluzione ricca di ferro, la blenda sarebbe potuta precipitare a 285 °C.

7. CONSIDERAZIONI SULL'ETÀ DELLA MINERALIZZAZIONE

La localizzazione della mineralizzazione ci permette di affermare che essa deve essere successiva all'evento orogenetico ercinico. La sua età può restringersi osservando che per l'esistenza stessa del modello suesposto è necessaria la presenza di un corpo magmatico profondo. Senza di esso i fenomeni convettivi non sarebbero stati possibili così come la solubilizzazione e il trasporto dei metalli.

Due sono gli episodi magmatici nel settore dolomitico: il primo si verificò nel Permiano inferiore, circa 274-276 milioni di anni fa; il secondo nel Triassico medio, circa 228 milioni di anni fa (Bosellini 1996). Mentre nel Permiano la regione dolomitica e con essa l'intera attuale area alpina fino alla Slovenia era emersa, nel Triassico l'intera area fu soggetta a subsidenza progressiva trasformandosi in una estesa area marina (Bosellini 1996).

Il modello proposto nei paragrafi precedenti richiede abbondante presenza di acqua, che in ambiente continentale come quello Permiano non poteva essere sufficiente; inoltre, la tetraedrite si formò a una pressione di almeno 60 bar, pressione che avrebbe potuto sussistere sui fondali triassici sommersi da una considerevole colonna d'acqua.

Il fatto poi che il magmatismo triassico sia di tipo shoshonitico, caratterizzato da rocce ricche di bario, come richiesto dal modello, lascia pochi dubbi sull'età, triassica, del fenomeno idrotermale. Da notare, altresì, che molte altre mineralizzazioni, per lo più piombo-zincifere, non lontane, nel Cadore, sono sicuramente triassiche, essendo impostate nella dolomia dello Sciliar, tipica formazione carbonatica di età Anisico sup. - Ladinico.

8. ALCUNE IMPLICAZIONI DELL'INTERPRETAZIONE GENETICA

È probabile che la genesi di tutte le mineralizzazioni del Cadore sia analoga, anche se spesso, in piccolo spazio, coesistono più concentrazioni con caratteri diversi formate da minerali diversi. Esse sono tutte spiegabili con il variare degli equilibri chimici all'interno di un fluido idrotermale in risalita verso il fondale marino.

La precipitazione dei minerali, che avvenne a profondità diverse, è legata al raffreddamento del fluido idrotermale in risalita, alle sue interazioni con la roccia e al suo mescolamento con acque di formazione.

È solo con questo modello che risulta facile spiegare perché le concentrazioni si siano arrestate alle unità sedimentarie del Triassico medio: mancano, infatti, depositi mineralizzati assegnabili con sicurezza non solo ai terreni liassici e giurassici, ben rappresentati nell'area dolomitica, ma anche quelli del Triassico superiore. La risposta risulta ovvia una volta constatata la mancanza di un evento magmatico successivo al Triassico medio.

Appare convincente anche la risposta al quesito sulla posizione paleogeografica dei giacimenti di Pb-Zn: ovvero perché essi si situano entro le piattaforme carbonatiche, in prossimità del loro margine, e comunque entro un raggio di 1,5 km da quest'ultimo? (Assereto *et al.* 1977). La risposta emerge da due

osservazioni. La prima è che i corpi minerali sono legati in genere a sistemi di faglie di piccole proporzioni che determinano spesso motivi di sprofondamento a gradinata (di Colbertaldo 1967). Ciò suggerisce che i margini delle piattaforme siano stati ricoperti da un mare più profondo rispetto alle zone centrali. La seconda osservazione è che i fluidi in risalita, alla fine del loro percorso, raggiungendo temperature inferiori a 200 °C, perdono la capacità di trasportare i metalli perché i complessi clorurati si dissociano.

Ecco allora che se il fluido idrotermale, seguendo le faglie, si fosse diretto al margine della piattaforma e quindi verso un mare profondo, sarebbe stato in grado di trasportare i metalli anche alla fine del suo percorso perché avrebbe potuto riversarsi in mare ancora caldo; al contrario, se avesse seguito le faglie delle zone centrali delle piattaforme fin verso la superficie, l'avrebbe raggiunta ormai spento, con una temperatura non superiore a 100 °C, che è la temperatura possibile alla pressione atmosferica. Esso, probabilmente, sarebbe stato capace di depositare solo calcite.

Probabilmente, quindi, non è vero che i giacimenti si situano solo ai margini delle piattaforme; è verosimile, invece, che esistano anche nelle zone centrali, ma che, essendo più profondi, non siano ancora stati individuati.

CONCLUSIONI

Il giacimento del Monte Avanza è di natura idrotermale. Esso rappresenta ciò che un'antica soluzione poteva depositare in condizioni di elevata acidità, alta pressione e alta temperatura. Ben si inquadra in uno schema genetico che spiega le metallizzazioni delle Alpi calcaree orientali con l'esistenza di uno o più corpi magmatici intrusi e più soluzioni metallizzanti in uscita sul fondo del mare triassico.

RINGRAZIAMENTI

Un sentito grazie al dott. C. Brusca che ha fornito i dati sulla miniera.

BIBLIOGRAFIA

Assereto A. *et al.*, 1977 - Le mineralizzazioni Pb-Zn nel Triassico delle Dolomiti. Quadro geologico e interpretazione genetica. *L'industria mineraria*, 28: 367-402
 Brusca C., 1996 - Unità mineraria di monte Avanza. Relazione sui lavori effettuati e sui risultati conseguiti.

Bishoff J.L., 1980 - Geothermal system at 21° N, East Pacific Rise: Physical limits on geothermal fluid and role of adiabatic expansion. *Science*, v. 207, no 4438: 1465-1469.
 Bishoff J.L. *et al.*, 1983 - Seafloor massive sulphide deposits from 21 N, East Pacific Rise; Juan de Fuca ridge; and Galapagos Rift: Bulk chemical composition and economic implications. *Econ. Geol.*, 78: 1711-1720.
 Bosellini, 1996 - Geologia delle Dolomiti. Athesia ed., Bolzano: 250 pp.
 Colbertaldo di D., 1967 - I giacimenti piombo-zinciferi nell'Anisico delle Alpi bellunesi e la loro genesi alla luce delle più recenti interpretazioni. *Atti giorn. Studi geom. Agordo*: 135-148.
 Crerar D.A. & Barnes, 1976 - Ore solution chemistry V. Solubilities of chalcopyrite, chalcocite assemblages in hydrothermal solutions at 22° to 350 °C. *Econ. Geol.*, 71: 772-794.
 Frangipani E., 2004 - Un modello genetico per i giacimenti metalliferi del Fursil, Costa dei Canopi e Col Piombin. *Studi Trent. Sci. Nat., Acta Geol.*, 79.
 Haas J., 1971 - The effect of salinity on the maximum thermal gradient of a hydrothermal system at hydrostatic pressure. *Econ. Geol.*, 66: 940-946.
 Janecky *et al.*, 1984 - Formation of massive sulphide deposits on oceanic ridge crests: Incremental reaction models for mixing between hydrothermal solutions and seawater. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 48: 2723-2738.
 Kiyooki T. *et al.*, 1973 - Composition Variation and Polymorphism of tetrahedrite in the Cu-Sb-S system below 400 °C. *American Mineralogist*, 58: 425-434.
 Kiyooki T. *et al.*, 1977 - Tetrahedrite stability relations in the Cu-Sb-S system. *Econ. Geol.*, 72: 258-270.
 Kiyooki T. *et al.*, 1977 - Tetrahedrite stability relations in the Cu-Fe-Sb-S system. *American Mineralogist*, 62: 1101-1109.
 Seal R., 1989 - Relationship of water-rock interactions to base and precious-metal mineralization, Bayhorse district, Idaho. Ph. D. thesis, Univ. Michigan, Ann Arbor, Michigan.
 Seal R. *et al.*, 1990 - Tetrahedrite and tennantite: evaluation of thermodynamic data and phase equilibria. *Canadian Mineralogist*, 28: 725-738.
 Seyfried *et al.*, 1985 - Heavy metal and sulfur transport during subcritical and supercritical hydrothermal alteration of basalt: Influence of fluid pressure and basalt composition and crystallinity. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 49: 2145-2560.
 Skinner B.J. *et al.*, 1972 - Studies of the sulfosalts of copper III. Phases and phase relations in the system Cu-Sb-S. *Econ. Geol.*, 67: 924-938.
 Von Damm *et al.*, 1985 - Chemistry of submarine hydrothermal solutions at 21 N, East Pacific Rise. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 49: 2197-2220.

