



ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ
ΤΟΜΕΑΣ ΟΡΥΚΤΟΛΟΓΙΑΣ - ΠΕΤΡΟΛΟΓΙΑΣ -
ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΟΛΟΓΙΑΣ



ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΑ Φ. ΜΙΧΑΗΛΙΔΟΥ
ΑΕΜ: 5722

ΤΑ ΗΦΑΙΣΤΕΙΟΓΕΝΗ ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΑ ΣΥΜΠΑΓΩΝ ΣΟΥΛΦΙΔΙΩΝ: Cu-Zn
(ΤΥΠΟΥ NORANDA)

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ



ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ
2021





ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΑ Φ. ΜΙΧΑΗΛΙΔΟΥ

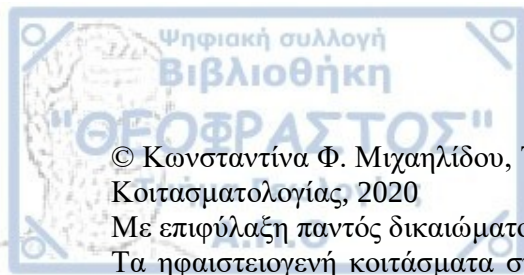
ΤΑ ΗΦΑΙΣΤΕΙΟΓΕΝΗ ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΑ ΣΥΜΠΙΑΓΩΝ ΣΟΥΛΦΙΔΙΩΝ: Cu-Zn (ΤΥΠΟΥ
NORANDA)

Υποβλήθηκε στο Τμήμα Γεωλογίας
Τομέας Ορυκτολογίας - Πετρολογίας - Κοιτασματολογίας

Επιβλέπων Καθηγητής

Βασίλης Μέλφος, Αναπληρωτής Καθηγητής

© Κωνσταντίνα Φ. Μιχαηλίδου, 2020
Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All right reserved.



© Κωνσταντίνα Φ. Μιχαηλίδου, Τμήμα Γεωλογίας Α.Π.Θ., Τομέας Ορυκτολογίας, Πετρολογίας, Κοιτασματολογίας, 2020

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος.

Τα ηφαιστειογενή κοιτάσματα συμπαγών σουλφιδίων: Cu-Zn (τύπου Noranda) – *Διπλωματική Εργασία*

© Konstantina F. Michailidou, School of Geology, Department of Mineralogy, Petrology, Economic Geology, 2020

All rights reserved.

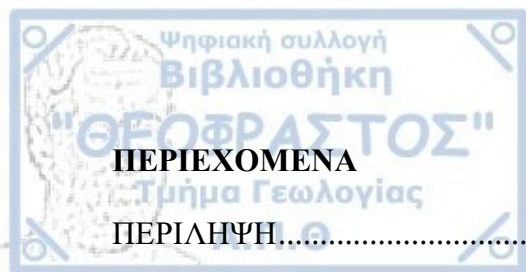
The volcanogenic massive sulphide deposits: Cu-Zn (Noranda type) – *Bachelor Thesis*

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς το συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν το συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευτεί ότι εκφράζουν τις επίσημες θέσεις του Α.Π.Θ.

Εικόνα Εξωφύλλου:.....





ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	1
ABSTRACT	2
ΠΡΟΛΟΓΟΣ.....	3
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	4
2. ΓΕΝΙΚΑ ΓΙΑ ΤΑ ΗΦΑΙΣΤΕΙΟΓΕΝΗ ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΑ ΤΥΠΟΥ NORANDA	9
3. ΠΕΤΡΩΜΑ ΞΕΝΙΣΤΗΣ ΚΑΙ ΕΞΑΛΛΟΙΩΣΕΙΣ.....	25
4. ΜΕΤΑΛΛΙΚΑ ΟΡΥΚΤΑ ΚΑΙ ΖΩΝΩΔΗ ΚΑΤΑΝΟΜΗ	29
5. ΠΑΡΑΓΕΝΕΣΕΙΣ	35
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	38



ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Τα ηφαιστειογενή κοιτάσματα συμπαγών σουλφιδίων: Cu-Zn (τύπου Noranda)

Κωνσταντίνα Μιχαηλίδου

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματεύεται τη μελέτη των ηφαιστειογενών κοιτασμάτων συμπαγών σουλφιδίων τύπου Noranda, τα οποία είναι σπουδαίες πηγές Zn, Cu, Pb, Ag και Au. Τα κοιτάσματα αυτά σχηματίζονται σε ηφαιστειογενή περιβάλλοντα, κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας, και εντοπίζονται στο βυθό ή κοντά σε αυτόν. Η κοινή ομοιότητα σε αυτού του τύπου τα κοιτάσματα είναι πως εμφανίζονται σε εκτεταμένα τεκτονικά περιβάλλοντα, συμπεριλαμβανομένου τόσο του ωκεάνιου πυθμένα όσο και τα περιβάλλοντα τόξα. Ωστόσο οι πιο σημαντικές πηγές εξόρυξής τους είναι τα ρήγματα και οι καλδέρες. Τα πιο αρχαία κοιτάσματα αυτού του τύπου, τα οποία και διατηρούνται σε όλο το γεωλογικό χρόνο, έχουν δημιουργηθεί σε ωκεάνιες και ηπειρωτικές περιοχές οπισθοτόξιων λεκανών. Τέλος, κατατάσσονται σε διάφορες κατηγορίες ανάλογα με την περιεκτικότητα τους σε βασικά μέταλλα και χρυσό καθώς και με την λιθολογία του ξενιστή πετρώματος.



ABSTRACT

The volcanogenic massive sulphide deposits: Cu-Zn (Noranda type)

Konstantina Michailidou

This diploma thesis focuses on the study of the volcanogenic massive sulphide Noranda type, which are great sources of Zn, Cu, Pb, Ag and Au. These deposits are formed in volcanic environments under the sea surface and are located in the bottom of the sea or near it. There is a common similarity in all these deposits that appear in extensional tectonic environments, including such as oceanic seafloor and arc environments. However, the most significant mining sources are faults and calderas. The older deposits were formed in oceanic and continental back-arc environments. They are classified in different categories according to base mental content and host-rock lithology.

.



Στο πλαίσιο της μελέτης των ηφαιστειογενών κοιτασμάτων, η συγκεκριμένη πτυχιακή εργασία επιχειρεί να παρουσιάσει και να εξετάσει αυτού του είδους τα κοιτάσματα και πιο συγκεκριμένα των συμπαγών σουλφιδίων: Cu-Zn (τύπου Noranda).

Το θέμα της παρούσας διπλωματικής εργασίας μου ανατέθηκε τον Ιούλιο του 2020 από τον Αναπληρωτή Καθηγητή του Τομέα Ορυκτολογίας-Πετρολογίας-Κοιτασματολογίας του τμήματος Γεωλογίας κ. Βασίλειο Μέλφο, τον οποίο και ευχαριστώ ιδιαίτερος για την ανάθεση ενός τόσο ενδιαφέροντος θέματος, την συνεχή και σημαντική βοήθειά του, καθώς και για την άψογη συνεργασία μας καθ' όλη τη διάρκεια της εκπόνησης της εργασίας αυτής.

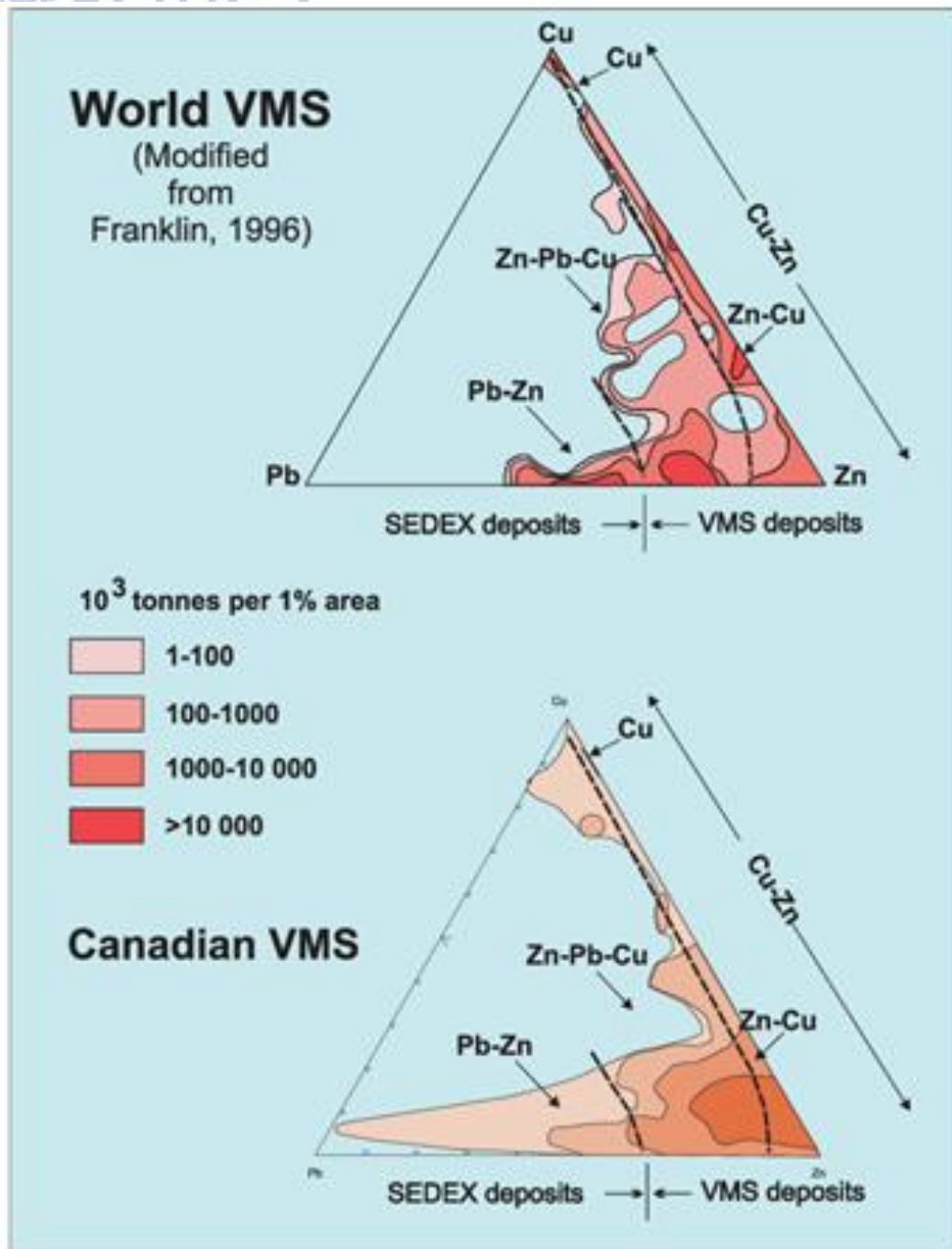
Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου για την αδιάλειπτη στήριξη που υπέδειξαν κατά τη διάρκεια της φοίτησής μου.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

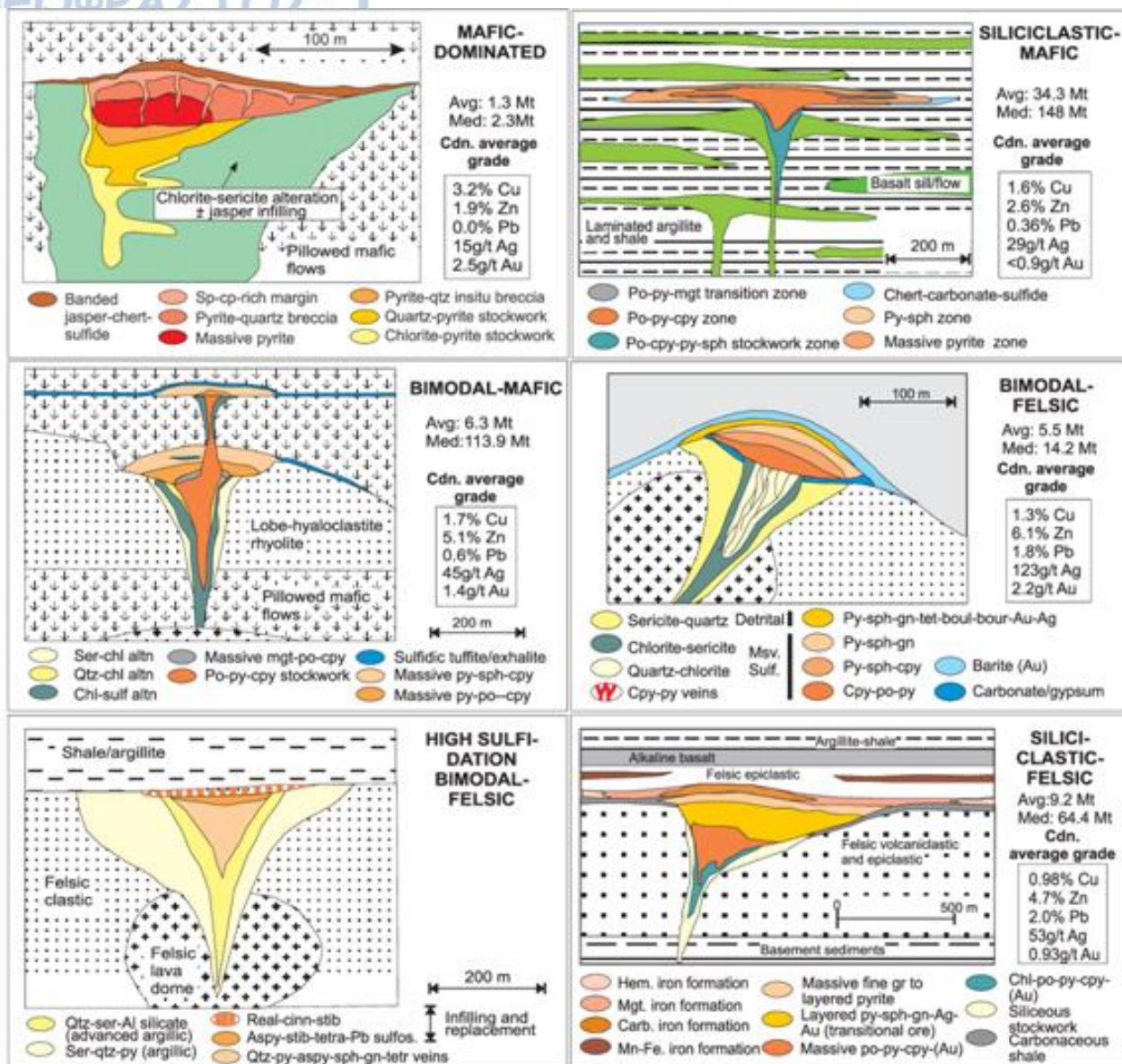
Τα ηφαιστειογενή κοιτάσματα συμπαγών σουλφιδίων (VMS) είναι σημαντικές πηγές Zn, Cu, Pb, Ag και Au και σημαντικές πηγές για Co, Sn, Se, Mn, Cd, In, Bi, Te, Ga και Ge. Συνήθως εμφανίζονται ως φακοί πολυμεταλλικού συμπαγούς σουλφιδίου που σχηματίζονται στο θαλασσινό βυθό ή κοντά σε αυτόν σε υποθαλάσσια ηφαιστειακά περιβάλλοντα. Υπάρχουν κοντά 350 γνωστά κοιτάσματα VMS στον Καναδά και πάνω από 800 γνωστά παγκοσμίως. Ιστορικά, αντιπροσωπεύουν το 27% της παραγωγής Cu, το 49% του Zn, το 20% του Pb, το 40% του Ag και το 3% του Au. Τα κοιτάσματα VMS ταξινομούνται ανάλογα με την περιεκτικότητα σε βασικά μέταλλα, την περιεκτικότητα σε χρυσό ή με τη λιθολογία του ξενιστή. Τα κοιτάσματα χωρίζονται επίσης σε Cu-Zn, Zn-Cu και Zn-Pb-Cu.

Οι κατηγορίες Cu-Zn και Zn-Cu για τα κοιτάσματα του Καναδά καθορίστηκαν αργότερα στους τύπους Noranda και Mattabi αντίστοιχα, συμπεριλαμβανομένου του πετρώματος ξενιστή και την χαρακτηριστική αλλοίωση των ορυκτών (κυριαρχείται από χλωρίτη-σερικίτη). Η κατηγορία Zn-Pb-Cu προστέθηκε αργότερα για την πληρέστερη εκπροσώπηση των κοιτασμάτων της Αυστραλίας (Σχ. 1).

Στη συνέχεια δημιουργήθηκε ένας απλός ορισμός του «κανονικού» έναντι του «πλούσιο σε χρυσό» VMS κοιτάσματος. Περαιτέρω έρευνα έχει δείξει ένα πιο σύνθετο φάσμα συνθηκών για τον σχηματισμό των πλούσιων σε χρυσό VMS που σχετίζονται με το βάθος του νερού, την οξειδωτική κατάσταση, τη θερμοκρασία των ρευστών που αποθέτουν την μεταλλοφορία και τις πιθανές μαγματικές συνεισφορές. Στην ταξινόμηση αυτή τα πλούσια σε χρυσό VMS ορίζονται αυθαίρετα ως αυτά στα οποία οι συγκεντρώσεις του χρυσού (σε ppm) είναι μεγαλύτερες από τα μέταλλα Zn + Cu + Pb (σε wt %). Μία τρίτη ταξινόμηση που κερδίζει δημοτικότητα στον Καναδά είναι μια πενταπλή ομαδοποίηση, στην οποία κυριαρχεί η λιθολογία του πετρώματος ξενιστή. Η λιθολογία του ξενιστή περιλαμβάνει τα στρώματα μέχρι 3000 μέτρα κάτω από το κοιτάσμα, και μέχρι 5000 μέτρα σε μήκος. Οι πέντε ομάδες είναι τα βασικής σύστασης, τα διττής ηφαιστειότητας βασικής σύστασης, τα διττής ηφαιστειότητας όξινης σύστασης, τα πυριτο-κλαστικά βασικής σύστασης και τα διττής ηφαιστειότητας πυριτο-κλαστικά πετρώματα (Σχ. 2).



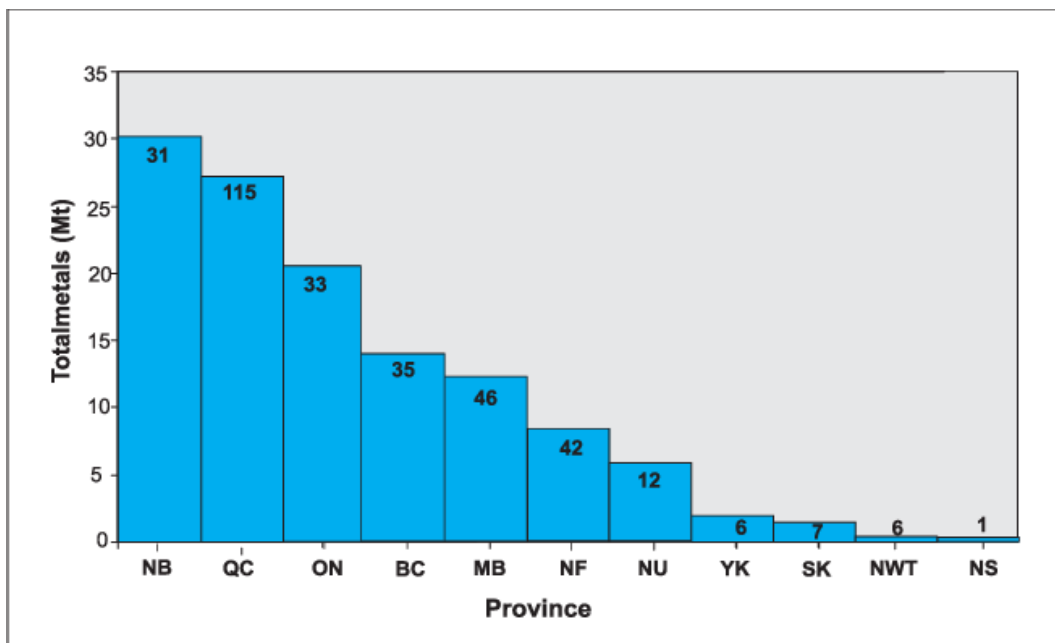
Σχ. 1. Ταξινόμηση των VMS ανάλογα με τα βασικά μέταλλα (Hannington and Jonasson 2007).



Σχ. 2. Ταξινόμηση κοιτασμάτων ανάλογα με το πέτρωμα ξενιστής (Hannington and Jonasson 2007). Αυτά τα πετρώματα συσχετίζονται γενικά με διαφορετικά τεκτονικά καθεστώτα. Οι ομάδες που σχετίζονται με τα βασικά ηφαιστειακά και ηφαιστειοκλαστικά πετρώματα είναι πιο συνηθισμένες σε ωκεάνια τόξα, ενώ οι δύο ομάδες όπου κυριαρχούνται από όξινα στρώματα είναι πιο συχνές στα ηπειρωτικά τόξα.

Τέλος κοιτάσματα VMS αναγνωρίζονται σε κάθε μεγάλη ήπειρο εκτός από την Ανταρκτική, παρόλο που τα κοιτάσματα Zn-Pb-Cu σχηματίζονται στο στενό Bransfield στην Ανταρκτική Χερσόνησο. Cu και Au έχουν εξορυχθεί από κοιτάσματα Τριτογενούς ηλικίας που φιλοξενούνται στους οφιολίθους γύρω από την Ανατολική Μεσόγειο, για πάνω από 5000

χρόνια. Μέχρι το 2002, τα VMS εκτιμάται ότι έχουν προμηθεύσει πάνω από 5 δισεκατομμύρια τόνους θειούχου μεταλλεύματος. Αυτό περιλαμβάνει τουλάχιστον το 22% της παγκόσμιας παραγωγής του Zn, το 6% του Cu, το 9,7% του Pb, το 8,7% του Ag και το 2,2% του Au.. Πάνω από 350 κοιτάσματα VMS που περιέχουν γεωλογικά αποθέματα πάνω από 200.000 τόνους είναι γνωστά στον Καναδά, από τα οποία μόνο τα 13 παράγουν σήμερα. Ο μεγαλύτερος αριθμός κοιτασμάτων βρίσκεται στο Κεμπέκ (33%), στη Μανιτόμπα (15%), στη Βρετανική Κολούμπια (10%), στο Οντάριο (9%) και στο Νιου Μπρούνσγουικ (9%). Τα κοιτάσματα στο New Brunswick είχαν την υψηλότερη συνολική αξία σε Cu+Zn+Pb, ακολουθούμενη από το Κεμπέκ και στη συνέχεια το Οντάριο (Σχ. 3) (Hannington and Jonasson 2007).



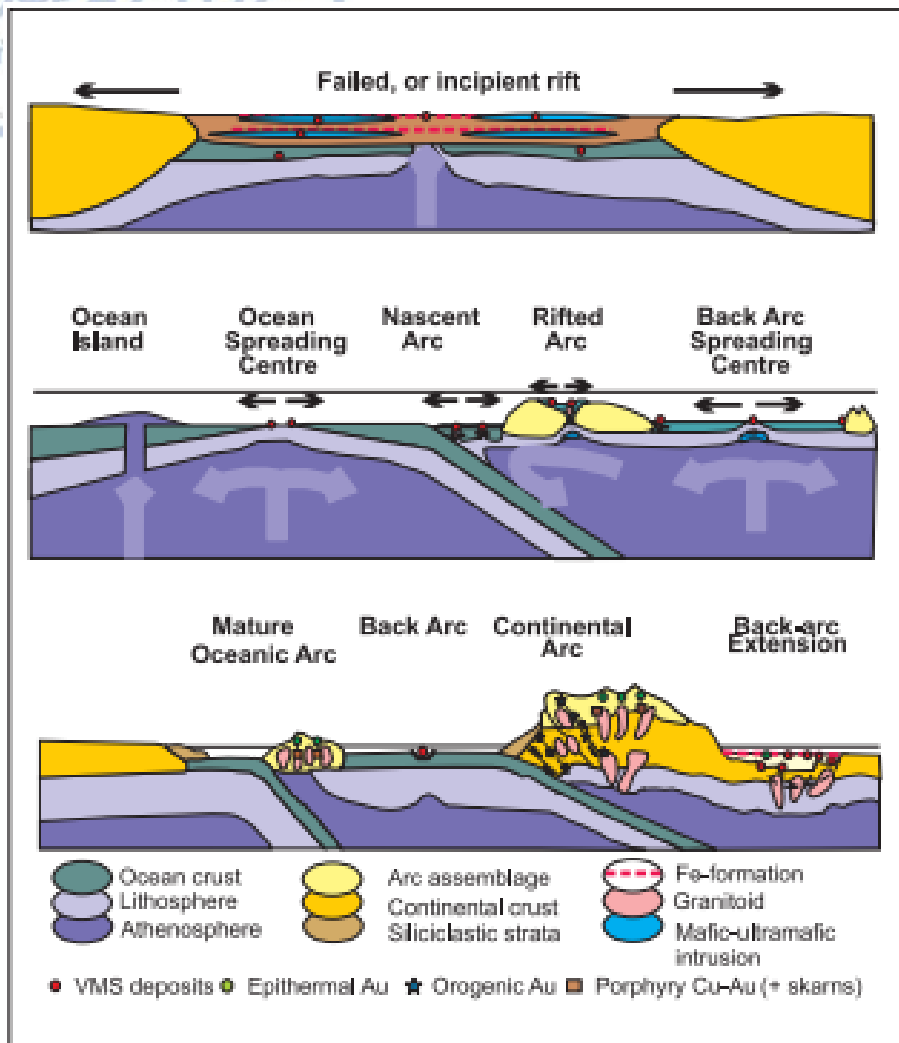
Σχ. 3. Ιστόγραμμα της συνολικής χωρητικότητας των βασικών μετάλλων από γνωστά VMS ανά επαρχία (Hannington and Jonasson 2007).

2. ΓΕΝΙΚΑ ΓΙΑ ΤΑ ΗΦΑΙΣΤΕΙΟΓΕΝΗ ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΑ ΤΥΠΟΥ NORANDA

Τα συμπαγή κοιτάσματα σουλφιδίων χαλκού-ψευδαργύρου στη Νοράντα του Κεμπέκ εμφανίζονται σε ένα παχύ σωρό αρχαίων ανδεσιτών και ρυόλιθων που σχηματίζουν το ανώτερο τμήμα της ομάδας του ποταμού Blake. Οι ροές είναι ασθενώς μεταμορφωμένες και σε μεγάλο μέρος της περιοχής έχουν μόνο ρηχές βυθίσεις. Πέντε ζώνες ρυολιθικής λάβας σηματοδοτούν πέντε διαδοχικές περιόδους ρυολιθικής δραστηριότητας. Οι αποθέσεις της μεταλλοφορίας, οι οποίες επικαλύπτουν την υδροθερμική εξαλλοίωση χλωρίτη, εμφανίζονται κοντά στην κορυφή των ρυολιθικών σχηματισμών και πολλοί συνδέονται με πρωτογενή ηφαιστειακά χαρακτηριστικά όπως οι θόλοι λάβας. Δείχνουν μια χωροθέτηση των αναλογιών χαλκού-ψευδαργύρου και αποτελούν απόδειξη κατακερματισμού ορισμένων συμπαγών σουλφιδίων πριν από την κάλυψή τους από μεταγενέστερες ροές ανδεσίτη ή ρυόλιθου. Δύο κύριοι τύποι κοιτασμάτων, χαλκού-ψευδαργύρου και πλούσιου σε ψευδάργυρο, αναγνωρίζονται, αντίστοιχα, στην τρίτη και τέταρτη ρυολιθική ζώνη, ενώ μόνο ένα συμπαγές σώμα σιδηροπυρίτη είναι γνωστό στην πέμπτη ζώνη (De Rosen-Spence and Spence 1975).

Το μεγάλο κοινό χαρακτηριστικό μεταξύ όλων των κοιτασμάτων συμπαγών σουλφιδίων είναι ότι σχηματίζονται σε εκτατικό τεκτονικό περιβάλλον, συμπεριλαμβανομένων τόσο την επέκταση του ωκεάνιου πυθμένα όσο και τα περιβάλλοντα τόξα (Σχ. 4).

Τα σύγχρονα υποθαλάσσια κοιτάσματα VMS βρίσκονται τόσο στις ωκεάνιες τάφρους όσο και στα ηπειρωτικά τόξα, ενώ τα κοιτάσματα που σώζονται ακόμα στο γεωλογικό αρχείο σχηματίζονται κυρίως τόσο σε ωκεάνιο και ηπειρωτικό τόξο, όσο και σε οπισθοτόξιες λεκάνες. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι κατά τη διάρκεια της καταβύθισης, λαμβάνοντας υπόψη την τεκτονική δραστηριότητα, μεγάλο μέρος του αρχαίου ωκεάνιου φλοιού έχει απομακρυνθεί, αφήνοντας μόνο λίγους οφιόλιθους ως υπολείμματα του βυθισμένου ωκεάνιου φλοιού. Παράδειγμα των παραπάνω αποτελούν ο Ορντοβικιανός κόλπος των οφιολοθικών νησιών στο Newfoundland και το Triassic Cache Creek στη Βρετανική Κολομβία.



Σχ. 4. Υπάρχουν τρία κύρια τεκτονικά περιβάλλοντα όπου δημιουργούνται τα VMS κοιτάσματα και το καθένα αντιπροσωπεύει ένα στάδιο στο σχηματισμό του γήινου φλοιού. ΠΑΝΩ: η πρώτη εξέλιξη της Γης κυριαρχείται από τη δραστηριότητα του μανδύα κατά την οποία πολλά αρχικά τεκτονικά γεγονότα σχηματίζουν λεκάνες που χαρακτηρίζονται από τον πρώιμο ωκεάνιο φλοιό με τη μορφή πρωτόγονων βασαλτών και / ή κοματιτών, που προέρχονται από πυριτικά συσχετιζόμενα με το σχηματισμό του Fe. ΜΕΣΗ: Ο σχηματισμός πραγματικών ωκεάνιων λεκανών συνδέθηκε με την ανάπτυξη και εξάπλωση των κέντρων των ωκεανών κατά μήκος των οποίων κυριαρχούν όξινα κοιτάσματα VMS. Η ανάπτυξη των ζωνών καταβύθισης οδήγησε στην δημιουργία ωκεάνιου τόξου με τμήματα όπου υπήρχαν bimodal-βασικά, bimodal-όξινα και κυρίαρχα βασικά VMS. ΚΑΤΩ: Ο σχηματισμός των ώριμων τόξων και των ωκεάνιων-ηπειρωτικών μετώπων καταβύθισης είχε ως αποτέλεσμα τη δημιουργία ηπειρωτικού ηφαιστειακού τόξου που φιλοξενούσε τα κυρίαρχα-όξινα και τα bimodal πυριτικοκλαστικά κοιτάσματα (Hannington and Jonasson 2007).

Εκκολαπτόμενο ή πρώιμο τόξο προκύπτει από την αρχικό πυκνό ωκεάνιο φλοιό, συνήθως μαζί με τα ρήγματα μετασχηματισμού. Οι πρώιμες περιοχές υποβύθισης παρατηρούνται συχνότερα, ήδη από την αρχαιότητα, στη βάση του ωκεάνιου τόξου στην οποία τα κοιτάσματα VMS χωρικά συνδέονται με ρυολιθικά σύμπλοκα κοντά στην κορυφή του λεπτού βασάλτη και του βασαλτικού ανδεσίτη. Το καλύτερο Καναδικό παράδειγμα αυτών των διτροπικών ρυθμίσεων της καλδέρας είναι ο Παλαιοπροτεροζωικός ξενιστής στο Snow Lake Camp στο Manitoba. Η δημιουργία κομματιτικού-βασαλτικού ρυολίθου για την κατάθεση Archean Kidd Creek έχει ερμηνευθεί ως μία πρώιμη πρωτόγονη δημιουργία τόξου που ενδεχομένως συνδέεται με τον υποκείμενο μανδύα, ή με ένα σπάνιο παράδειγμα που δεν συνδέεται με το περιβάλλον τόξου και σχετίζεται με μερική λιθοσφαιρική τήξη πάνω από το μανδύα. Το κοιτάσμα VMS το οποίο είναι πλούσιο σε νικέλιο μέσα στο ίδιο κομματιτικό σύμπλεγμα Kidd Munro, είναι ένα άλλο σπάνιο παράδειγμα.

Στα εξιδανικευμένα εξελικτικά στάδια της περιοχής του τόξου, ο σχηματισμός του τόξου είναι μια άλλη κοινή περίοδος σχηματισμού VMS. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα ο σχηματισμός καλδέρων στον οποίο κυριαρχούν τα bimodal-βασικά, είναι ίσως το πιο κοινό περιβάλλον τόξου για το σχηματισμό VMS σε ωκεάνιες συνθήκες τόξου. Οι bimodal καλδέρες με βασικά συστατικά που κυριαρχούν και φιλοξενούν κοιτάσματα VMS περιλαμβάνουν το Archean Noranda και το Παλαιοπροτεροζωικό Φλιν Φλον πεδίο εξόρυξης. Το ηπειρωτικό τόξο, σε αντίθεση, έχει ως αποτέλεσμα την ανάπτυξη περισσότερων ηφαιστιοκλαστικών και bimodal όξινων συστατικών. Παραδείγματα αυτού περιλαμβάνουν το Sturgeon Lake Camp στη περιοχή του Archean Wabigoon της Οντάριο και το Devonian Buttle Lake VMS Camp στη περιοχή Wranglia του BC. Εκτός Καναδά, η περιοχή Paleoproterozoic Skellefte στη Σουηδία και η περιοχή Cambrian Mount Read στην Τασμανία είναι άλλα παραδείγματα ηπειρωτικού τόξου. Συνεχιζόμενη επέκταση τόσο στις ωκεάνιες όσο και στις ηπειρωτικές συνθήκες τόξου περιθωρίου έχουν ως αποτέλεσμα την ανάπτυξη οπισθοτόξιων λεκανών. Σε ωκεάνιες συνθήκες, οι οπισθοτόξιες λεκάνες με ώριμους οφιολίθους μπορούν επίσης να φιλοξενήσουν τα κοιτάσματα VMS. Καναδικά παραδείγματα περιλαμβάνουν το Coronation Paleoproterozoic Birch-Flexar Camp στην πλευρά Saskatchewan του Flin Flon και το Betts Cove, στο Newfoundland. Γνωστά παραδείγματα εκτός Καναδά περιλαμβάνουν οι οφιολίτες στην Κύπρο (Τρόδος), στο Ομάν (Σεμαΐλ) και στη Τουρκία (Εργάνη).

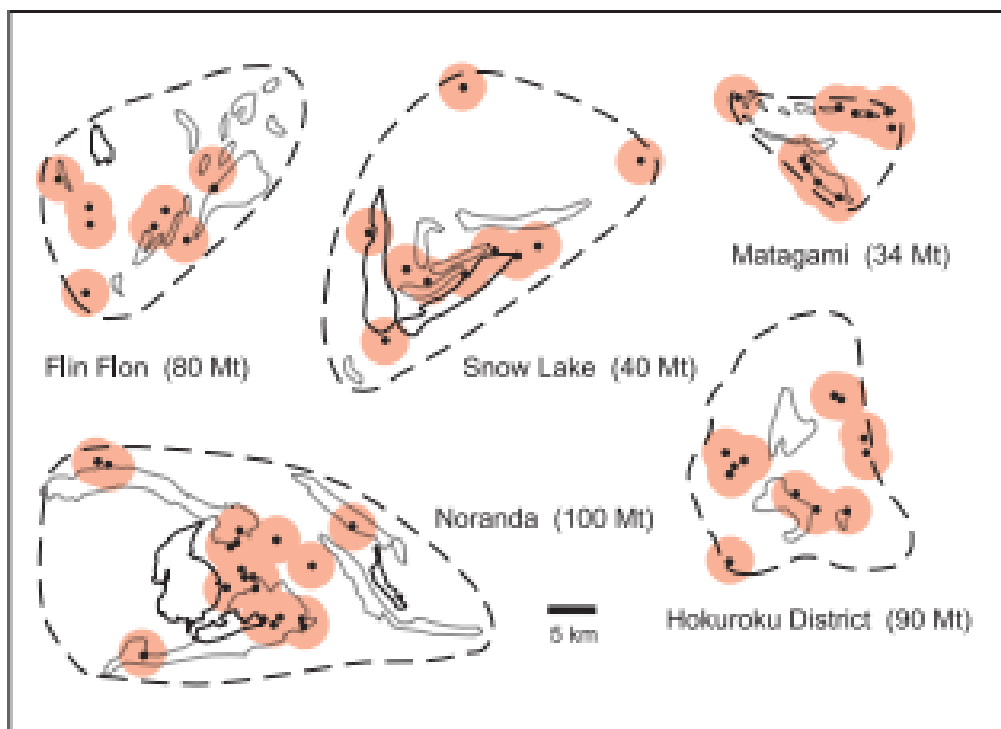
Οι ηπειρωτικές οπισθοτόξιες συνθήκες περιέχουν μερικές από τις πιο σημαντικές, οικονομικά περιοχές VMS στον κόσμο. Αυτά τα περιβάλλοντα κυριαρχούνται από bimodal

πυριτικά πετρώματα, π.χ σχηματισμός σιδήρου, και περιλαμβάνουν το Ordovician Bathurst Camp του New Brunswick. Παραδείγματα εκτός Καναδά περιλαμβάνουν το Archean Golden Grove Camp στη Δυτική Αυστραλία, το Παλαιοπροτεροζωικό Bergslagen στη περιφέρεια της Σουηδίας, το Cambro-Ordovician Mount Windsor του Queensland και τη Devonian-Mississippian Ιβηρική ζώνη σιδηροπυρίτη καθώς και τμήματα της Devonian στα Νότια Ουράλια στις περιοχές της Ρωσίας και του Καζακστάν.

Άλλα εκτατικά περιβάλλοντα μπορούν να διαμορφωθούν στις περιοχές μετά της προσαύξεσης ή/και της διαδοχής των τόξων. Η πάχυνση του φλοιού μπορεί να οδηγήσει σε τροποποίηση της γωνίας καθόδου της πλάκας καταβύθισης ή να υπάρξει αλλαγή στην κατεύθυνση κίνησης των συγκρουόμενων πλακών. Αυτή η διαδικασία έχει ως αποτέλεσμα την δημιουργία λεκανών σε παλαιότερες θέσεις τόξων..

Ο μαγματισμός που σχετίζεται με αυτές τις οπισθοτόξιες λεκάνες μπορεί να συσχετιστεί με ανοργανοποιημένα πορφυριτικά πετρώματα και οι λεκάνες μπορούν να γεμίσουν και με τα δύο υποθαλάσσια bimodal ηφαιστειακά πετρώματα. Αυτό μπορεί να οδηγήσει στο σχηματισμό πολλαπλών τύπων ορυκτών κοιτασμάτων, όπως επιθερμικά και VMS κοιτάσματα. Ένα καλό παράδειγμα αυτού είναι το Hazelton του Κάτω Ιουρασικού στο Todogoone και στο Sustut του BC. Όταν αυτά τα συστήματα ρηγμάτων μετατρέπονται σε ένα ηπειρωτικό περιθώριο, όπως π.χ η σύγχρονη λεκάνη Guaymas, ο κόλπος της Καλιφόρνιας, τότε αρχίζουν γρήγορα να γεμίζουν με τρομερά ιζήματα. Αυτά μπορούν να φιλοξενήσουν κοιτάσματα VMS, όπως η Triassic Windy Craggy και τα κοιτάσματα Creek Green στην BC και την Αλάσκα. Αυτά είναι γνωστά ως κοιτάσματα τύπου Besshi από την τοποθεσία των Ιαπωνικών νησιών του Μειοκαίνου. Άλλα κοιτάσματα VMS αυτού του τύπου βρίσκονται στο Middle Valley στο Juan de Fuca στη περιοχή BC.

Τα περισσότερα, αλλά όχι όλα τα σημαντικά κοιτάσματα VMS εμφανίζονται σε ομάδες που ορίζουν μεγάλα πεδία εξόρυξης. Στη συνέχεια χρησιμοποιήθηκε η κατανομή των κοιτασμάτων VMS εντός γνωστών ορυχείων στις περιοχές του Καναδά για να δείξουν ότι υπήρχε ένας πρώτης τάξης περιφερειακός έλεγχος της κατανομής τους (Σχ. 5).

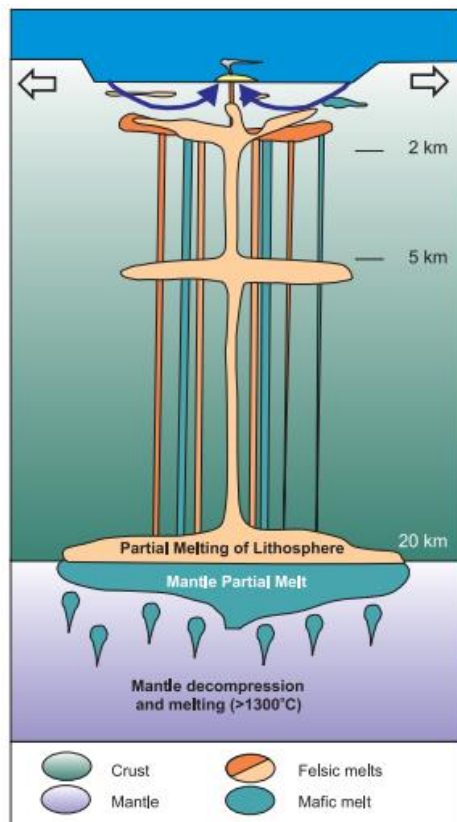


Σχ. 5. Μια σύγκριση της ίδιας κλίμακας των επιλεγμένων περιοχών των VMS. Ένας κύκλος διαμέτρου 5 χιλιομέτρων γύρω από κάθε κατάθεση δείχνει την υποθετική περιοχή επιρροής του. Όλα είναι περικυκλωμένα από μια διακεκομμένη γραμμή που καθορίζει την προτεινόμενη έκταση ενός συστήματος μετατροπής περιφερειακής κλίμακας για καθένα από αυτά τα πεδία με βάση την παρουσία γνωστών ηφαιστειακών σχηματισμών. Ουσιαστικά, το παράδειγμα Noranda αντιστοιχεί στενά στην παρατηρούμενη αλλοίωση (Hannington and Jonasson 2007).

Γενικά, τα συμπλέγματα κοιτασμάτων περιορίζονται είτε σε γραμμικές ρωγμές είτε σε καλδές. Αυτά τα χαρακτηριστικά δημιουργούνται από μια περιφερειακή αραίωση της βάσης, αποσυμπίεση του υποκείμενου μανδύα, και μία γενιά βασικού μάγματος (Σχ. 6).

Στο περιβάλλον ωκεάνιας επέκτασης αυτά τα μάγματα αυξάνονται έως λίγα μέτρα από τον πυθμένα τη θάλασσας για να σχηματίσουν επιμήκη «περβάζια» στους παράλληλους άξονες εξάπλωσης του θαλάσσιου βυθού. Όπου υπάρχει προϋπάρχον ωκεάνιο δάπεδο ή λιθοσφαιρικό τόξο, αυτά τα μάγματα 1000 έως 1400 ° C υποπληρώνουν τον φλοιό, παράγοντας ενδιάμεσο έως όξινο τήγμα. Τα συνδεδεμένα διοριτικά-τοναλικά σύμπλοκα μπορούν να ανέλθουν σε απόσταση 2 έως 3 χιλιόμετρα. Όπου λαμβάνει χώρα η επέκταση, ο φλοιός γίνεται παχύτερος (20-30 χλμ.), όπως σε μια συνεχή ρύθμιση οπίσθιου τόξου, τα μάγματα μπορούν να σχηματίσουν ενδιάμεσες κρούστες. Αυτά τα τήγματα παραμένουν στα υποκείμενα πετρώματα του εδάφους. Οι διαφορετικές θεωρίες έχουν ως αποτέλεσμα διάφορες

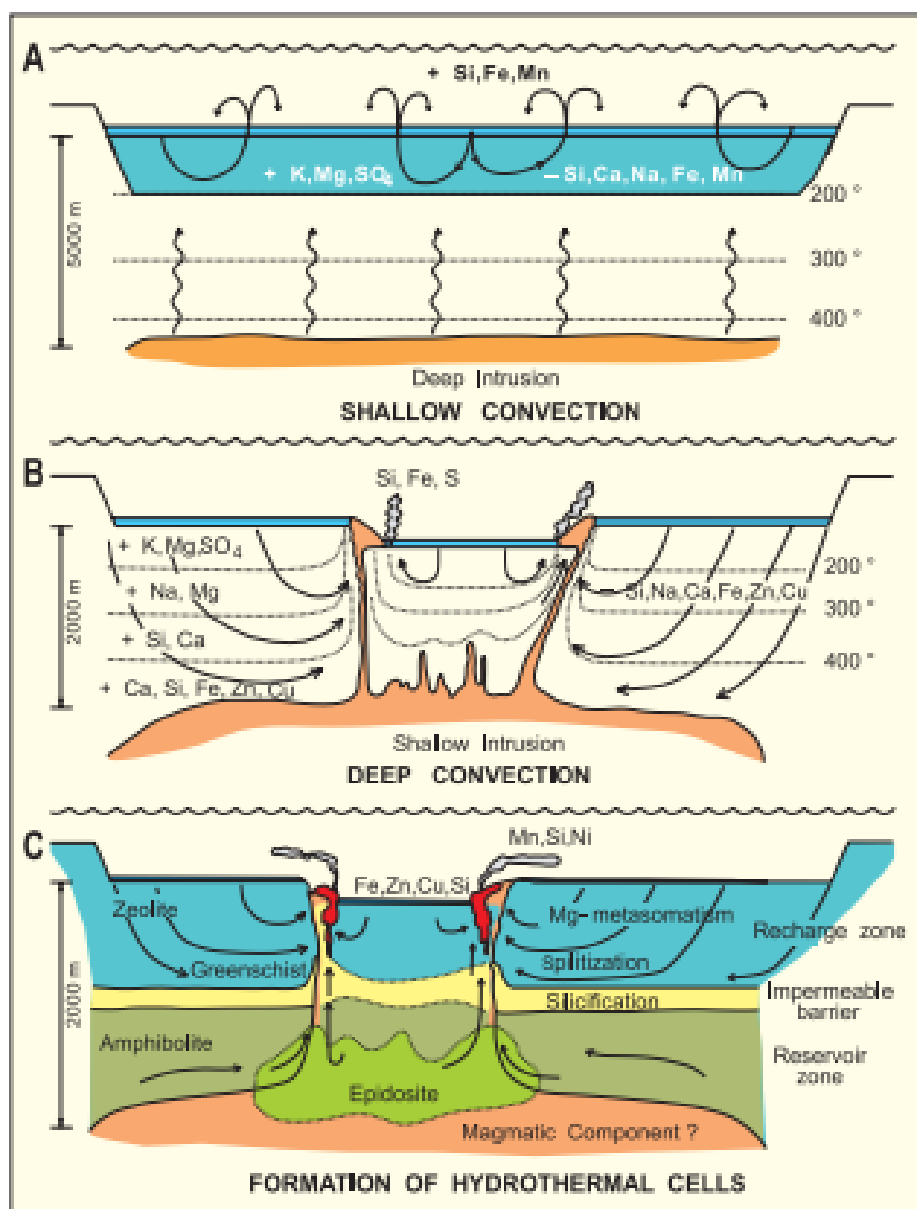
μορφές μεταβολής της περιφερειακής κλίμακας και διάφορα χαρακτηριστικά απόθεσης για μια ένα κοίτασμα VMS.



Σχ. 6. Τα περιβάλλοντα VMS χαρακτηρίζονται από τεκτονική επέκταση σε διάφορες κλίμακες. Η επέκταση έχει ως αποτέλεσμα την αραίωση του φλοιού, την αποσυμπίεση του μανδύα και τη γενιά των βασαλτών που λιώνει. Ανάλογα με το πάχος του φλοιού και τη πυκνότητα, αυτά τα τήγματα μπορεί να συσσωρευτούν στη βάση του φλοιού, με αποτέλεσμα την μερική τήξη και την παραγωγή γρανιτικών τηγμάτων. Αυτά τα άνυδρα, υψηλής θερμοκρασίας τήγματα μπορούν γρήγορα να ανέλθουν σε περιβάλλον υποθαλάσσιου βυθού (<3 χλμ κάτω από το θαλασσινό νερό), όπου η θερμότητά τους μπορεί να ξεκινήσει και να διατηρήσει τη μεταφορά υδροθερμικών κυττάρων που σχηματίζουν τα κοιτάσματα VMS (Hannington and Jonasson 2007).

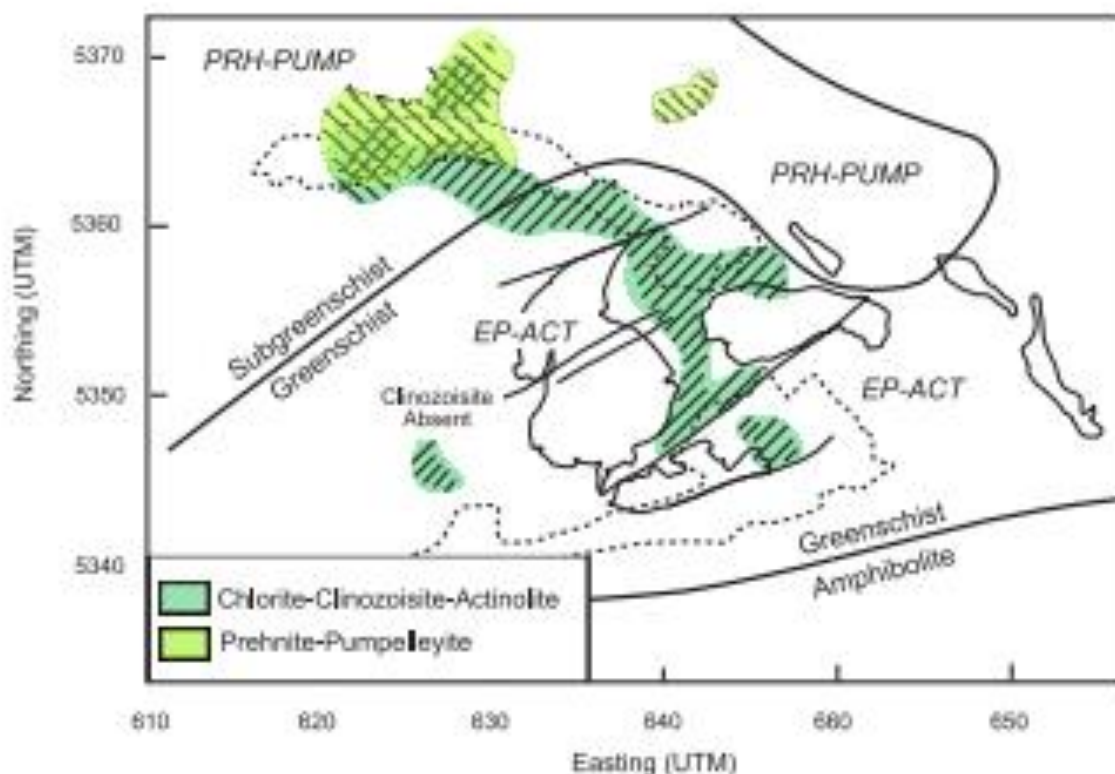
Η παρουσία είτε βασικών είτε υψηλού επιπέδου υποηφαιστειακών εισβολών μέσα σε ένα ρήγμα ή μία καλδέρα θα οδηγήσει σε ένα υποθαλάσσιο σύστημα μεταφοράς υγρών (Σχ. 7). Συνδέεται πρώτα το θαλασσινό νερό στον πορώδο φλοιό και θερμαίνεται, προκαλώντας άνωση. Καθώς αυτό θερμαίνεται το νερό ανεβαίνει μέχρι τις συνηφαιστειακές δομές ρήγματος και το κρύο θαλασσινό νερό πηγαίνει πάνω από την περιοχή ψύξης. Αυτά τα

αρχικά κρύα και ουδέτερα υγρά θερμαίνονται προοδευτικά κατά τη διάρκεια της μετανάστευσης προς τα κάτω, αλληλεπιδρώντας με τα γύρω πετρώματα σε προοδευτικά υψηλότερες θερμοκρασίες. Οι ισόθερμες πάνω από το σημείο ψύξης είναι γενικά οριζόντιες, με αποτέλεσμα να σχηματίζεται μια στρωματοποιημένη ζώνη αλλοίωσης (Σχ. 7).



Σχ. 7. Η ανάπτυξη και η ωρίμανση ενός γενικού υποθαλάσσιου υδροθερμικού συστήματος, το οποίο περιλαμβάνει τρία στάδια (Hannington and Jonasson 2007).

Η κατανομή των τελικών μεταλλικών συναθροίσεων αλλοίωσης μιμούνται εκείνη της περιφερειακής μεταμόρφωσης (Σχ. 8). Οι υδροθερμικές ζώνες αντίδρασης που υπερκαλύπτουν άμεσα τις εισβολές μπορούν να μεταβληθούν σε αμφιβολιτικά συμπλέγματα, συμπεριλαμβανομένων αμφιβόλου πλούσια σε Fe-Ca, ασβεστιτικά πλαγιόκλαστα και μαγνητίτη (Σχ. 8 και Σχ. 9 a,b,c).

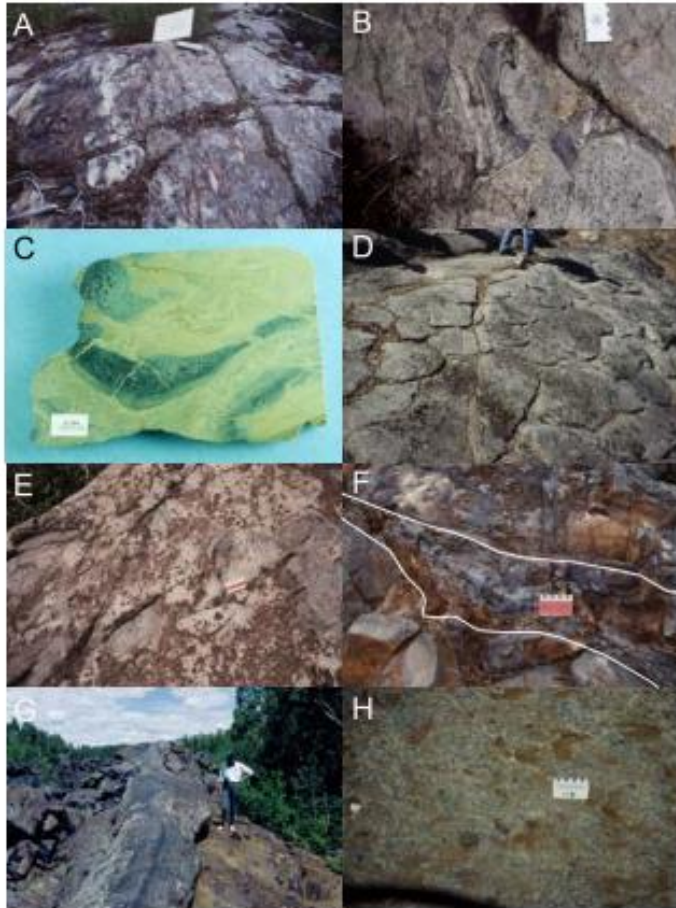


Σχ. 8. Σύγκριση των περιφερειακών πρασινοσχιστολιθικών φάσεων υδροθερμικής αλλοίωσης στο ηφαιστειακό σύμπλεγμα Noranda με προηγουμένως να έχουν χαρτογραφηθεί οι ισόθερμες (συμπαγείς γραμμές). Η κατανομή πρασινοσχιστολιθικής φάσης υδροθερμικής αλλοίωσης (σκιασμένο) προτείνει ότι η μεταμορφική ζώνωση είναι τουλάχιστον εν μέρει ένα προϊόν των πρώων συνηφαιστειακών υδροθερμικών διεργασιών. Σημειώνεται ότι το επίδοτο και ο χλωρίτης έχουν μεταμορφωθεί με την ίδια πίεση και θερμοκρασία (Hannington and Jonasson 2007).

Πάνω από αυτό είναι τα πλούσια σε Na και Ca πρασινοσχιστολιθικά συμπλέγματα που χαρακτηρίζονται από αλβίτη, χαλαζία, χλωρίτη, ακτινόλιθο και επιδότο. Πιο κοντά στο θαλασσινό νερό είναι ο ζεόλιθος και η άργιλος και συναφή ορυκτά συμπλέγματα υποπρασινοσχιστολιθικών ορυκτών συμπλεγμάτων από K-Mg πλούσιους σμεκτίτες, μεικτά στρώματα χλωριτών και καλιούχους αστρίους. Η αναγνώριση αυτών των χημικών αλλαγών στο αρχείο των πετρωμάτων μπορεί να είναι περαιτέρω ενισχυμένη με χαρτογράφηση των διαφόρων ισοτοπικών ζωνών. Αυτές οι στρωματοποιημένες υδροθερμικές ζώνες μπορούν να έχουν μήκος από 5 έως 50 χλμ και πάχος από 1 έως 3 χλμ. σε συνθήκες καλδέρας. Το μέγεθος και η επιφανειακή μορφολογία του συστήματος αλλοίωσης είναι μια αντανάκλαση του μεγέθους και της επιφανειακής μορφολογίας του συμπλέγματος κοιτασμάτων VMS.. Αυτά τα συστήματα μπορούν να παραμείνουν ενεργά μέσω διαφόρων κύκλων ηφαιστειακής και υδροθερμικής δραστηριότητας. Το αποτέλεσμα είναι αρκετές περιόδους σχηματισμού VMS σε διαφορετικά στρωματογραφικά επίπεδα με ένα ρήγμα ή με μία δομή καλδέρας.

Τα κυρίαρχα βασικά, bimodal-βασικά και bimodal-όξινα πετρώματα ξενιστές κυριαρχούνται από διάχυτες ηφαιστειακές διαδοχές. Αυτό το υποθαλάσσιο περιβάλλον υψηλής θερμοκρασίας τείνει να υποστηρίζει τα υψηλής θερμοκρασίας (>350°C) υδροθερμικά συστήματα, τα οποία με τη σειρά τους μπορούν να διαμορφώσουν Cu, Cu-Zn και Zn-Cu-(Pb) κοιτάσματα VMS με μεταβλητό περιεχόμενο σε Au και Ag. Ένας εκτεταμένος ορίζοντας πάχους 1-5 μέτρα πλούσιος σε Fe μπορεί να σηματοδοτήσει την δημιουργία κοιτάσματος VMS (Σχ. 9 στ, ζ). Αυτές οι αποθέσεις σχηματίζονται από ένα συνδυασμό λεπτού ηφαιστειακού υλικού, πυριτόλιθου και ανθρακικού άλατος.

Σχηματίζονται κατά τη διάρκεια των ανώριμων και / ή φθίνουσων σταδίων της περιφερειακής υδροθερμικής δραστηριότητας όταν κυκλοφορούν ρηχά οι λωρίδες θαλασσινού νερού με Fe, Si και μερικά κοινά μέταλλα σε θερμοκρασία <250°C και κατακάθονται στον πυθμένα μέσω υδροθερμικού εξαερισμού. Ο σχηματισμός σε υπόστρωμα που κυριαρχείται από βασάλτη συνοδεύεται συνήθως από πυριτοποίηση και / ή χλωριτίωση του υποκείμενου 200-500 μέτρων στρώματος (Σχ. 9 δ, ε). Παραδείγματα αυτού παρατηρούνται στο Noranda, στη λίμνη Matagami και στο Snow Lake Camp. Σε περιοχές με κυρίαρχα όξινα ηφαιστειοκλαστικά, η παραγωγή Fe συνοδεύεται από εκτεταμένη K-Mg αλλοίωση του όξινου υποστρώματος, όπως καταγράφονται στην περιοχή Bergslagen της Σουηδίας.

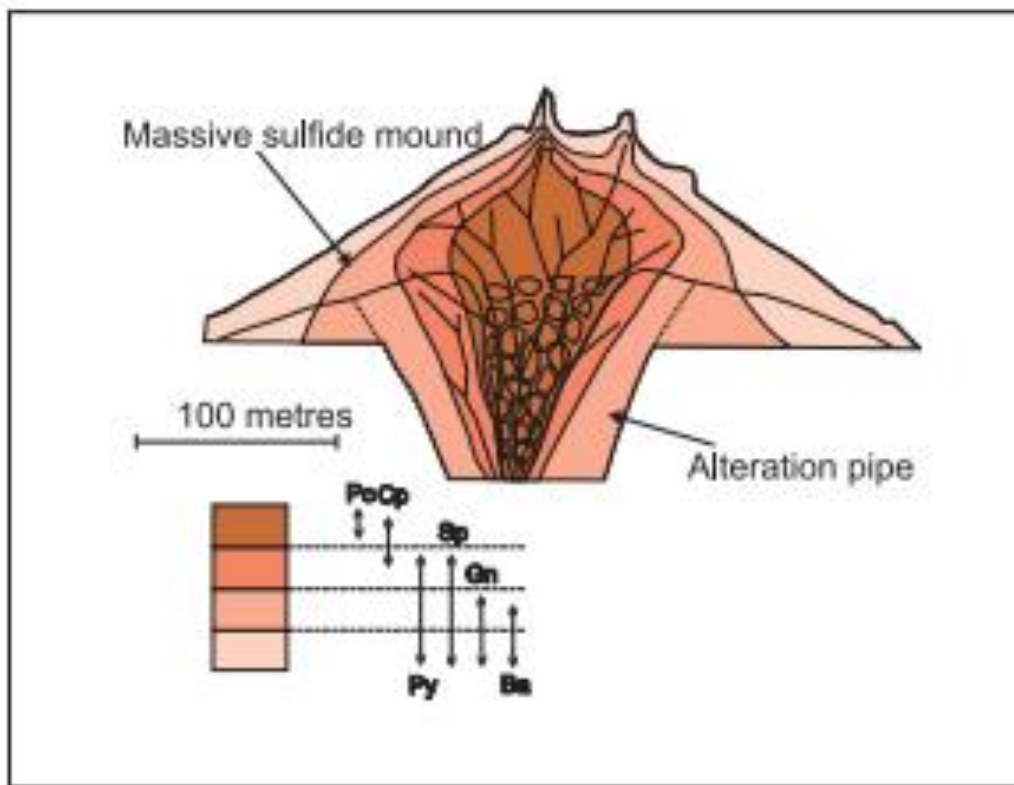


Σχ. 9. Α) υδροθερμική αλλοίωση υψηλής θερμοκρασίας του ηφαιστειακού θολώματος που επικαλύπτεται από μια έντονα πυριτοποιημένη ροή φεμικών συντριμμιών 1200μέτρων κάτω από το Chisel-Lost-Ghost ορίζοντα του VMS, στο Snow Lake. Αυτό αντιπροσωπεύει μια ζώνη αντίδρασης περιφερειακής κλίμακας που επικαλύπτεται από τη ζώνη πυριτίου υψηλής θερμοκρασίας Β) έντονα πυριτωμένα μαξιλάρια με κυστίδια σωλήνων γεμισμένα με ακτινόλιθο, επίδοτο και μαγνητίτη, και υαλοκλαστίτη. Γ) ένα παράδειγμα από επιδοτίτη χαρακτηριστικό των ριζικών ζωνών υδροθερμικής ανόδου στις οποίες οι υψηλές αναλογίες υγρών/πετρωμάτων είχαν ως αποτέλεσμα την έκπλυση λιθόφιλων και χαλκόφιλων από τα στρώματα. Δ) έντονα τροποποιημένα μαξιλαροειδής μεταμορφωμένα πετρώματα σε ανθοφυλλίτη-κορδιερίτη στο άνω τέμαχος στο Winston Lake. Ε) πυριτωμένος βασαλτικός ανδεσίτης του Noranda. Στ) επαφή ορίζοντα (μεταξύ λευκών γραμμών) που βρίσκονται οι πυριτωμένοι ανδεσίτες του Waite, Noranda. Ζ) κλιμακωτά μαγνητίτης-πυριτόλιθος Fe-σχηματισμός, πάνω του βρίσκεται το κοίτασμα Austin Brook, στο Bathurst camp. Η) πλούσια σε χλωρίτη ζώνη κάτω από την κατάθεση Matabi, στο Sturgeon Lake, όπου τα πλούσια σε Fe υδροθερμικά υγρά διέσχισαν μία προηγουμένως σχηματισμένη πλούσια σε ανθρακικό άλας περιφερειακή ζώνη αλλοίωσης (Hannington and Jonasson 2007).

Βασικά, όξινα και bimodal ηφαιστειακά σύμπλοκα τείνουν να φιλοξενήσουν ογκομετρικά μικρότερα βασικά ή / και όξινα σύμπλοκα που περιέχουν γενικά Zn-Cu-Co και κοιτάσματα Zn-Pb-Cu-Ag VMS, αντίστοιχα. Τα ημιμεταμορφωμένα υδροθερμικά συστήματα αποτελούνται από μεταλλικά σύνολα χαμηλής θερμοκρασίας, με Mg-K σμεκτίτη και K-άστριο αλλοίωση και το σχηματισμό εκτεταμένης αποθέσης Fe-Si-Mn χαμηλής θερμοκρασίας (δηλ. σχηματισμός σιδήρου). Άλλοι τύποι σχηματισμού σιδήρου ερμηνεύονται ως προϊόντα νέφους από υψηλής θερμοκρασίας υδροθερμικό εξαερισμό σε μειωμένη στρωματοποιημένη στήλη νερού, ή συλλογή αλάτων εντός ελεγχόμενων από ρήγματα κοιλότητες στο θαλασσινό νερό. Μεμονωμένες μονάδες σχηματισμού σιδήρου μπορούν να επεκταθούν για δεκάδες χιλιόμετρα, όπως στο Bathrust VMS Camp στο New Brunswick, στη περιοχή Paleoproterozoic Bergslagen, τη devono-Mississippian IPB στην Ισπανία και Πορτογαλία και το Mississippian Finlayson Lake camp, Yukon. Ορυκτολογικές παραλλαγές γίνονται μέσα σε αυτούς τους περιφερειακά εκτεταμένους σχηματισμούς σιδήρου, από το οξείδιο μέσω του ανθρακικού άλατος στο σουλφίδιο. Οι ορυκτολογικές παραλλαγές συνοδεύονται από αλλαγές στις αναλογίες στοιχείων όπως Fe, Mn, B, P και Zn έναντι Al και Ti.

Τα κοιτάσματα VMS αποτελούνται από ένα συμπαγές έως ημισυμπαγές σύστημα φλεβών σουλφιδίων. Σε αυτό το ευρύ πλαίσιο υπάρχει ένα φάσμα, διαφόρων μεγεθών κοιτασμάτων, μορφολογιών και συνθέσεων, ανάλογα με τη φύση των συνηφαιστειακών ρηγμάτων και την λιθολογία των πετρωμάτων ξενιστών, το βάθος του νερού, το μέγεθος και τη διάρκεια του υδροθερμικού συστήματος, των κλίσεων θερμοκρασίας και το βαθμό συντήρησης. Οι μεμονωμένοι φακοί συμπαγών σουλφιδίων μπορούν να έχουν πάχος άνω των 100 μέτρων, δεκάδες μέτρα πλάτος και εκατοντάδες μέτρα μήκος. Το κοίτασμα 148 Mt Kidd Creek αρχίζει στην παρούσα διάβρωση επιφάνειας και εκτείνεται για πάνω από 2000 μέτρα βάθος, με τα 5 σύνθετα σώματα μεταλλεύματος άνω των 500 μέτρων εύρος και μεμονωμένοι φακοί πάχους έως 100 μέτρων. Το στρωματοποιημένο θειούχο συστατικό ενός κοιτάσματος VMS μπορεί να έχει μια σειρά μορφολογικών και μεταβλητών εσωτερικών δομών (Σχ. 11). Παρατηρήσεις των σύγχρονων συμπλεγμάτων υδροθερμικών αεραγωγών σε διαχυτικές, κυριαρχούμενες από τη ροή περιοχές δείχνουν ότι οι αποθέσεις αρχίζουν να σχηματίζονται ως σειρά θειούχου-πυριτικού-θειϊκού άλατος (Σχ. 11 α). Αυτά γίνονται δομικά ασταθή με συνεχή ανάπτυξη ώστε να καταρρεύσει και να συγχωνευθεί, για να σχηματίσει ένα ανάχωμα (Σχ. 11 β, γ). Η συνεχής κυκλοφορία υδροθερμικών υγρών μέσα σε αυτό το ανάχωμα έχει ως αποτέλεσμα τη σφράγιση από το θαλασσινό νερό με ένα πώμα από πυρίτιο,

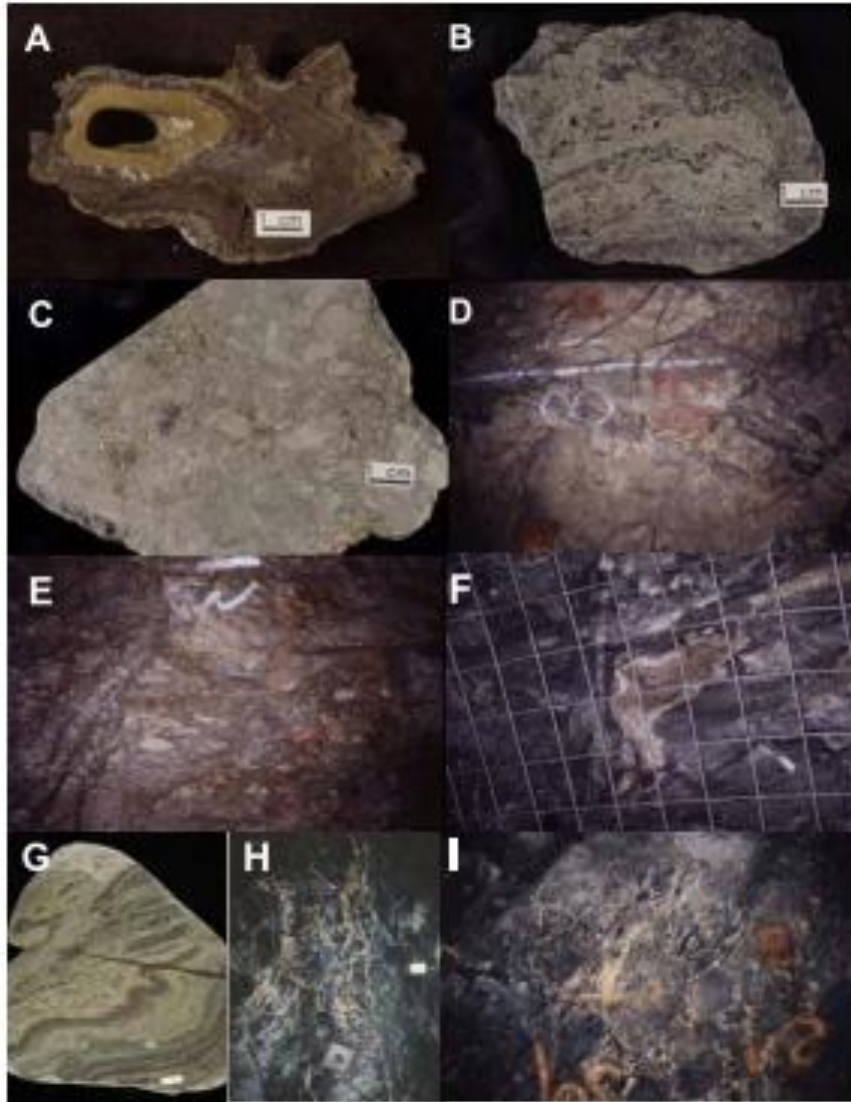
πηλό και/ή θειικό. Η ροή του υδροθερμικού υγρού μέσα στη δομή του αναχώματος συνήθως οδηγεί στην επανατοποθέτηση προηγούμενων μετάλλων κατά μήκος μιας χημικής και θερμοκρασιακής κλίσης κάθετα προς τη διεπαφή του θαλασσινού νερού (Σχ. 10). Αυτή η διαδικασία αναφέρεται ως διύλιση ζώνης και έχει ως αποτέλεσμα έναν πλούσιο σε χαλκοπυρίτη πυρήνα και μια πλούσια σε γαληνίτη και σφαλερίτη εξωτερική ζώνη (Σχ. 10).



Σχ. 10. Η ορυκτολογική ζώνωση που παρατηρείται συνήθως μέσα στα κοιτάσματα VMS είναι κατά ένα μεγάλο μέρος μια συνάρτηση της υδροθερμικής ρευστής θερμοκρασίας και της σύνθεσης. Η ζώνωση θερμοκρασίας έχει ως αποτέλεσμα την οριοθέτηση των θειούχων ορυκτών εντός και των δύο ζωνών αποθεμάτων και του αναχώματος σουλφιδίου (Hannington and Jonasson 2007).

Σε ακραίες περιπτώσεις, μεγάλο μέρος από τα πολύτιμα μέταλλα μπορούν να επανατοποθετηθούν από το σουλφίδιο και να μεταφερθούν στη στήλη του θαλασσινού νερού μέσω των υδροθερμικών υγρών. Οι πυριτικοί πυρήνες και τα πολύτιμα μέταλλα είναι ένα χαρακτηριστικό των κοιτασμάτων VMS που είχαν παρατεταμένη θερμική ιστορία. Αν και πολλά κοιτάσματα VMS έχουν κλαστική σύνθεση, αυτό είναι συνήθως υποδεέστερο των συμπαγών σουλφιδίων. Αλληλοσυνδεδεμένα θειούχα και πλούσια σε πυρίτιο στρώματα σχηματίζονται από την διάβρωση και την περιοδική κατάρρευση ενός θειούχου για να σχηματίσουν άμμο. Παραδείγματα όπου αυτά τα κλαστικά συστατικά σουλφιδίων αποτελούν κυρίαρχο μέρος του κοιτάσματος περιλαμβάνουν τα Eskay Creek και Tulsequah Chief, στη Βρετανική Κολούμπια και το Buchans, στο Newfoundland. Σε άλλες περιπτώσεις, λεπτόκοκκοι φακοί μεταλλεύματος μπορούν να προκύψουν από υψηλό νέφος θερμοκρασίας των μορίων σουλφιδίου που αναμιγνύονται με υδροθερμικό διοξείδιο του πυριτίου, τάλκη και μαγνησιούχους σμεκτίτες. Παρόμοια λεπτά κλιμακωτά μεταλλεύματα μπορούν επίσης να είναι τα προϊόντα δυναμικής ανακρυστάλλωσης σουλφιδίων κατά τη διάρκεια δευτερευόντων γεγονότων παραμόρφωσης. Τα κοιτάσματα VMS φιλοξενούν εύκολα την πίεση κατά τη διάρκεια της δευτερεύον παραμόρφωσης λόγω όγκιμης φύσης των σωμάτων συμπαγών σουλφιδίων, και μπορεί επομένως να εμφανίσουν πολύ υψηλότερων βαθμών ανακρυστάλλωσης από το ηφαιστειακό περιβάλλον και το ιζηματογενές στρώμα.

Σε ορισμένες περιπτώσεις, τα κοιτάσματα VMS δεν σχηματίζονται στο πυθμένα αλλά αναπτύσσονται ως αποτέλεσμα ρηγών υποθαλάσσιων αντικαταστάσεων. Αυτό συμβαίνει όταν τα υδροθερμικά υγρά γεμίζουν το πρωταρχικό χώρο πόρων είτε σε αυτοκλαστικές, ηφαιστειακές κλαστικές ή επικλαστικές διαδοχές κάτω από ένα αδιαπέρατο καπάκι (Σχ. 11 d, e). Στην κατάθεση Ansil στο Archean Noranda VMS camp, μια σειρά από ελασματοποιημένες ροές όξινης τέφρας γεμίζουν ένα μικρό ρήγμα (Σχ. 11 ζ). Η υδροθερμική διαρροή ρευστού μέχρι τα περιθώρια του ρήγματος έχε ως αποτέλεσμα την ανά μονάδα αντικατάσταση των ελασματοποιημένων ηφαιστειακών στρωμάτων με σιδηροπυρίτη, σφαλερίτη και διοξείδιο του πυριτίου. Μερικά έχουν σχηματίσει εξαιρετικά μεγάλες αποθέσεις συμπαγών σουλφιδίων μέσα σε ηφαιστειακές κοιλάτες γεμάτες με ετερολιθολογική ροή (Hannington, and Jonasson, 2007).



Σχ. 11. Α) παράδειγμα μιας θειούχους ζώνης από την περιοχή Ridge vent field. Β) τυπικές υφές από ένα τεράστιο ανάχωμα σουλφιδίου, κύριο πεδίο εξαερισμού, Juan de Fuca Ridge. Θραύσμα από την μεταγενέστερη αύξηση σουλφιδίου κατά τη διάρκεια της κατάρρευσης αναχώματος και την επακόλουθη εισβολή από υδροθερμικό υγρό. Γ) αμμώδες θειούχο μετάλλευμα από Κρητιδική κατάθεση, στο Ομάν. Τυπική υφή λόγω επαναλαμβανόμενης κατάρρευσης αναχώματος λόγω της διάλυσης ανυδρίτη και την εκ νέου τσιμεντοποίηση με μεταγενέστερο θειούχο άλας. Δ) μερική αντικατάσταση από συμπαγή χαλκοπυρίτη, Noranda. Ε) Κλάστες ριολίτη που τσιμεντοποιούνται από θειούχο σιδηροπυρίτη-σφαλερίτη, Louvicourt κατάθεση. Στ) κλάστης σιδηροπυρίτη-σφαλερίτη ως μέρος της εγγύς ροή, Louvicourt, Val D'or. Η) καλά αναπτυγμένη φλέβα πυρροτίτη-χαλκοπυρίτη με έντονη χλωριτική αλλοίωση, κατάθεση Ansil, Noranda (Hannington and Jonasson 2007).

3. ΠΕΤΡΩΜΑ ΞΕΝΙΣΤΗΣ ΚΑΙ ΕΞΑΛΛΟΙΩΣΕΙΣ

Τα VMS κοιτάσματα εμφανίζονται τυπικά, αν όχι αποκλειστικά, σε γεωλογικές περιοχές που υπάρχουν ηφαιστειακά πετρώματα. Παρόλο που το άμεσο πέτρωμα ξενιστής είναι ή άμεσης ηφαιστειακής προέλευσης, όπως λάβα ή πυροκλαστικά, ή έμμεσης όπως ηφαιστειοκλαστικά, κάποια ιζηματογενή θαλάσσιας λιθολογίας και χωρίς να έχουν κάποιο ηφαιστειακό χαρακτηριστικό, όπως σχιστόλιθοι μπορούν να «φιλοξενήσουν» αυτά τα κοιτάσματα. Δεν εμφανίζεται να υπάρχει ένα προτεινόμενο γεωτεκτονικό περιβάλλον για τα VMS εκτός από το ότι, όπως και τα υποθαλάσσια ηφαιστειακά πετρώματα, σχηματίζονται στα περιθώρια των πλακών. Πιο συγκεκριμένα βρίσκονται στα αποκλίνοντα περιθώρια σαν μεσωκεάνιες ράχες ή οπισθοτόξιες λεκάνες, στα συγκλίνοντα περιθώρια σε νησιωτικό τόξο ή σε ηπειρωτικά περιθώρια που σχετίζονται με ενδοπλακικά ωκεάνια νησιά.

Είναι προφανή από τα παραπάνω ότι το περιβάλλον των τεκτονικών πλακών προκύπτει από το πετροχημικό χαρακτήρα των πυριγενών πετρωμάτων. Προτάθηκε ότι υπάρχει μια προτιμητέα συσχέτιση των κοιτασμάτων αυτών με τις διάφορες φάσεις του ασβεστα-αλκαλικού μάγματος. Σε μερικές περιπτώσεις το ασβεστα-αλκαλικό πέτρωμα ξενιστής μπορεί να ήταν περισσότερο, λόγω της σύγχυσης του διαχωρισμού μεταξύ της πραγματικής ασβεστα-αλκαλικής και «ψευδο-αλκαλικής» φάσης που βρίσκεται στα θολεϊτικά πετρώματα από την πλευρική μετάβαση της υδροθερμικής εξαλλοίωσης που συνδέεται με αυτά τα κοιτάσματα. Προκειμένου να εξετάσουμε εάν τα VMS σχετίζονται με συγκεκριμένο πετροχημικό τύπο, η χημική τους κατανομή πρέπει να κανονικοποιηθεί ανά μονάδα επιφάνειας για κάθε πετρογραφικό τύπο των ηφαιστειακών πετρωμάτων (Lydon 1984).

Οι ζώνες αλλοίωσης που αποτελούν τη βάση της «φιλοξενίας» των κοιτασμάτων Cu-Zn ήταν το επίκεντρο των ερευνών τα τελευταία 15 χρόνια. Αυτή η έρευνα έχει δείξει ότι οι πετρογραφικά διακριτές ζώνες παράγονται με την αντίδραση ενός θερμού υδατικού υγρού, πιθανώς τροποποιημένο θαλασσινό νερό, με τα ηφαιστειακά πετρώματα. Λεπτομερέστερες μελέτες έδειξαν ότι οι ζώνες αλλοίωσης οδήγησαν στην αναγνώριση δύο διαφορετικών εμφανίσεων των ζωνών αυτών. Σωλήνες οι οποίοι αποτελούν το θεμέλιο των κοιτασμάτων συμπαγών σουλφιδίων καθώς και των στρωματογραφικών ημιμεταμορφωμένων ζωνών αλλοίωσης που υπάρχουν κάτω από τον ορίζοντα μεταλλεύματος. Οι ζώνες αλλοίωσης μπορούν να ταξινομηθούν τόσο πάνω, όσο και πλευρικά και κάθετα στους σωλήνες αυτούς.

Τα ηφαιστειακά πετρώματα που συνδέονται με τα κοιτάσματα συμπαγών σουλφιδίων έχουν μελετηθεί με πολύ λιγότερες λεπτομέρειες σε αντίθεση με την εξαλλοίωση, με την πλειονηφία από αυτές τις μελέτες να έχουν ασχοληθεί με τη χημική σύνθεση και τη δομή των ηφαιστειακών πετρωμάτων και όχι με τη κλασική ηφαιστειολογία. Μελέτες σχετικά με τη κλασική ηφαιστειολογία αποδεικνύουν ότι η κατανόηση της μορφολογίας, του τρόπου λειτουργίας και της τοποθέτησης των ηφαιστειακών πετρωμάτων είναι αρκετά σημαντική εάν γίνει οποιαδήποτε προσπάθεια για την ανακατασκευή του περιβάλλοντος σχηματισμού του μεταλλεύματος και για την απόδειξη της δυνατότητας οποιασδήποτε γενετικής σχέσης μεταξύ των κοιτασμάτων συμπαγών σουλφιδίων και ειδικών ηφαιστειακών μονάδων ή/και περιβαλλόντων. Επιπλέον, το μεγαλύτερο μέρος της σύνθεσης των ηφαιστειακών πετρωμάτων ελέγχεται από τις χημικές παραλλαγές που συνέβησαν κατά τη διάρκεια των αλληλεπιδράσεων νερού και πετρώματος καθώς και η διαπερατότητα των ηφαιστειακών πετρωμάτων είναι ένας σημαντικός έλεγχος σχετικά με την κατανομή των ζωνών αλλοίωσης. Συνεπώς τα κοιτάσματα Cu-Zn μπορούν να υποδιαιρεθούν σε δύο διακριτούς τύπους οι οποίοι, για περιγραφικούς λόγους, έχουν ονομαστεί Νοράντα και Ματάμπι. Κάθε τύπος παρουσιάζει διαφορές στις μεταλλικές συγκεντρώσεις, στα ηφαιστειακά πετρώματα και στα ηφαιστειακά περιβάλλοντα.

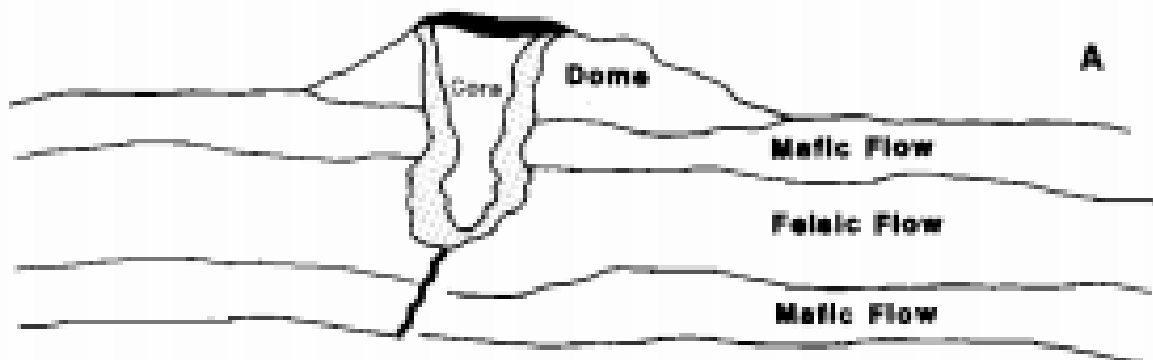
Τα κοιτάσματα τύπου Noranda χαρακτηρίζονται από έναν καλά καθορισμένο σωλήνα αλλοίωσης, μια κατώτερη ημιμεταμορφωμένη ζώνη από πετρώματα πλούσια σε επίδοτο, ακτινόλιθο, χαλαζία όπου κυριαρχούν οι βασικές και οι όξινες ροές και οι υαλοκλαστίτες. Τα πετρώματα αυτού του τύπου σχηματίστηκαν σε βάθη νερού άνω των 500 μέτρων. Οι σωλήνες αλλοίωσης που βρίσκονται κάτω από τα κοιτάσματα τύπου Noranda είναι κάθετα εκτεταμένοι, φτάνοντας μέχρι αρκετές εκατοντάδες μέτρα, και στενεύουν με το βάθος. Αυτοί οι σωλήνες εντοπίζονται στα ρήγματα. Οι μεταλλικές συγκεντρώσεις είναι ζώνες και αποτελούνται από μια σαφώς καθορισμένη εσωτερική ζώνη χλωρίτη-χαλαζία που περιβάλλεται από μια λιγότερο καλά καθορισμένη εξωτερική ζώνη χαλαζία-σερικίτη. Η εσωτερική ζώνη έχει συνήθως πλάτος παρόμοιο με εκείνο του κοιτάσματος ενώ η εξωτερική ζώνη συνήθως εκτείνεται πιο πέρα από το κοίτασμα. Ο χλωρίτης στην εσωτερική ζώνη είναι τυπικά πλούσιος σε μαγνήσιο και ο οποίος έχει μεταμορφωθεί σε ανθοφυλλίτη ή κορδιερίτη. Ο πλούσιος σε σίδηρο χλωρίτης με περίσσεια αλουμινίου είναι ένα δευτερεύον συστατικό που περιέχεται στον τάλκη και στον φλογοπίτη. Αν και το νάτριο γενικά εξαντλείται μπορεί να εντοπίζεται πλούσιο στον αλβίτη στα ανώτερα τμήματα των σωλήνων. Η εξωτερική ζώνη είναι ακανόνιστα κατανεμημένη και μεταβάλλεται κατά την ανάπτυξη της ζώνης. Γενικά η

αλλοίωση είναι πιο έντονη δίπλα στον πυρήνα του χλωρίτη και προς τα έξω. Η εξωτερική ζώνη χαρακτηρίζεται από σερικήτη και χαλαζία με ή χωρίς δευτερεύον χλωρίτη (Σχ.12).

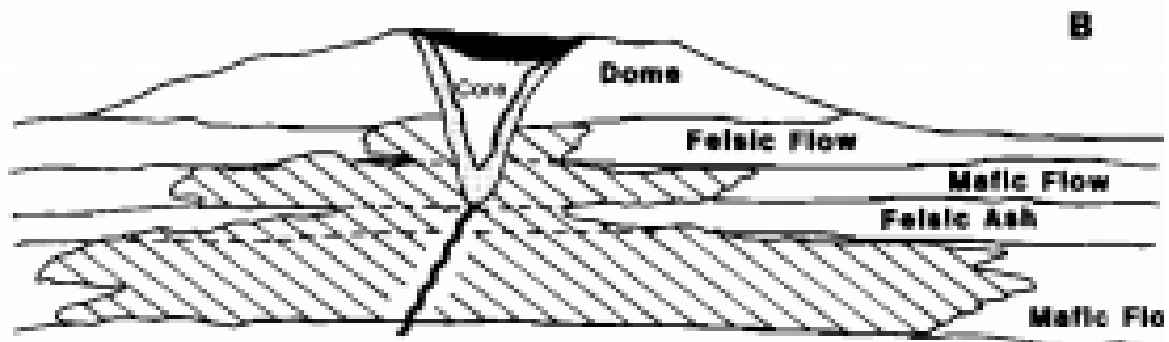
Μόνο μερικά παραδείγματα κατώτερων ημιμεταμορφωμένων ζωνών έχουν τεκμηριωθεί. Το μήκος τους είναι μεγάλο φτάνοντας αρκετά χιλιόμετρα και το πάχος τους φτάνει από εκατοντάδες μέχρι χιλιάδες μέτρα. Η αλλοίωση είναι γενικά ακανόνιστα διαχωρισμένη, συνήθως αποτελούμενη από φακούς με φλέβες φτάνοντας από αρκετά εκατοντάδες μέτρα σε λίγα μέτρα στη διάμετρο, καθώς περιβάλλεται από λιγότερο αλλοιωμένα πετρώματα. Οι φλέβες και το εξωτερικά αλλοιωμένο πέτρωμα κατανέμονται κατά μήκος της ζώνης σαν αμυγδαλωτές ροές, υαλοκλαστίτες και σαν ζώνες ρήγματος. Οι κατώτερες ζώνες κάτω από τα ηφαιστειογενή κοιτάσματα τύπου Noranda είναι ορυκτολογικά παρόμοια και περιλαμβάνουν πλευρικά εκτεταμένες περιοχές τόσο πυριτιωμένων όσο και οφιολιθικών πετρωμάτων τα οποία κόβονται από την πλούσια σε μαγνήσιο ζώνη αλλοίωσης. Γενικά λέγεται ότι η πυριτιοποιημένη ζώνη κάτω από το ορυχείο Millenbach του Noranda μπορεί να αποτελεί το ανώτερο τμήμα της υδροθερμικής δεξαμενής. Τα οφιολιθικά πετρώματα συνήθως εμφανίζονται κάτω από ζώνες των πυριτιωμένων πετρωμάτων και φαίνεται να είναι πιο διαδεδομένα από αυτές. Τα πυριτιωμένα πετρώματα αποτελούνται από επίδοτο και χαλαζία με ή χωρίς αλβίτη, τρεμολίτη-ακτινόλιθο και χλωρίτη πλούσιο σε μαγνήσιο.

Το ηφαιστειακό τμήμα κάτω από τα κοιτάσματα τύπου Noranda περιλαμβάνει πετρώματα τόσο με βασικά όσο και όξινα συστατικά. Οι τύποι των ηφαιστειακών πετρωμάτων με τα βασικά κυριαρχούνται από pillow lavas, υαλοκλαστίτες, και από αμυγδαλωτές ροές. Ενώ τα όξινα εμφανίζονται ως ροές λάβας ή θόλοι (Franklin. and Morton 1987).

**Noranda-Type
Pipe-Like Alteration**



**Noranda-Type
Semi-Conformable Alteration
X-Cut or Overlain by Pipe-Like Alteration**



Σχ 12. Γενικό διάγραμμα απεικόνισης των σωλήνων και των ζωνών αλλοίωσης που συνδέονται με τα κοιτάσματα τύπου Noranda (Franklin and Morton 1987).

4. ΜΕΤΑΛΛΙΚΑ ΟΡΥΚΤΑ ΖΩΝΩΔΗ ΚΑΤΑΝΟΜΗ

Τα βασικά μέταλλα των ηφαιστειακών κοιτασμάτων συμπαγών σουλφιδίων που βρίσκονται μέσα στους όξινους ηφαιστειακούς σωρούς είναι χαρακτηριστικές ζώνες που αποτελούνται από μια πλούσια σε χαλκό βάση και μια πλούσια σε ψευδάργυρο κορυφή. Στα μεταλλεία Νοράντα και Ματαγκάμι του Καναδά ο χαλκοπυρίτης συγκεντρώνεται με τον πυρροτίτη, τον σιδηροπυρίτη και τον μαγνητίτη στη βάση των φακών του μεταλλεύματος ή σε μια ζώνη κάτω από τους φακούς. Πηγαίνοντας στρωματογραφικά προς τα πάνω ο λόγος του πυρροτίτη-σιδηροπυρίτη γενικά αυξάνεται, η περιεκτικότητα σε μαγνητίτη μειώνεται και οι κορυφές του μεταλλεύματος χαρακτηρίζονται από τη δημιουργία σιδηροπυρίτη-σφαλερίτη. Το κοίτασμα Cu-Zn-Pb στην περιοχή Kuroko της Ιαπωνίας παρουσιάζει παρόμοια ορυκτολογία, με τη διαφορά ότι υπάρχει έλλειψη μαγνητίτη και πυρροτίτη και αφθονία των θειικών αλάτων.

Τα πυριτικά μεταλλεύματα μέσα σε οφιολιθικά περιβάλλοντα (τύπος Κύπρου) είναι πλούσια σε χαλκό με μηδενικό ψευδάργυρο και αμελητέο μόλυβδο. Στερούνται πυρροτίτη και μαγνητίτη και δεν έχουν ζώνωση.

Και οι τρεις τύποι μεταλλευμάτων επικαλύπτουν σωλήνες υδροθερμικής ενέργειας και θεωρούνται ότι έχουν εναποτεθεί στην επιφάνεια επαφής του νερού με το πέτρωμα ή κάτω από αυτήν. Τα πειραματικά δεδομένα σχετικά με τη διαλυτότητα του χαλκοπυρίτη, του σφαλερίτη και του γαληνίτη δείχνουν ότι υπάρχουν δύο διακριτά περιβάλλοντα στα οποία μπορούν να μεταφερθούν Cu, Pb και Zn για να σχηματίσουν συμπαγή σουλφίδια. Στο πρώτο περιβάλλον υπάρχει μειωμένο με υψηλή θερμοκρασία ($>275^{\circ}\text{C}$) οξύ προς ουδέτερο pH. Το δεύτερο περιβάλλον είναι οξειδωμένο, σε οποιαδήποτε θερμοκρασία και με οποιοδήποτε pH.

Η εξέταση των ισορροπιών του ορυκτού και του διαλύματος στο σύστημα Fe-S-O υποδηλώνει ότι τα ηφαιστειογενή κοιτάσματα τύπου Noranda εναποτίθενται σε περιοχές με υψηλή θερμοκρασία, ήπια οξέα και μειωμένα πλούσια σε χλωρίδιο διαλύματα (εντός δηλαδή του πρώτου περιβάλλοντος) και τα οποία αναμειγνύονται με το θαλάσσιο νερό στην κορυφή του ηφαιστειακού σωρού. Η ανάμιξη έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση του pH και του οξυγόνου του διαλύματος. Όλο αυτό συνοδεύεται από πτώση της θερμοκρασίας και οδηγεί στη καθίζηση του χαλκοπυρίτη-μαγνητοπυρίτη ($\pm$ σιδηροπυρίτη, $\pm$ μαγνητίτη) στις ζώνες μεταλλεύματος κάτω από την επαφή θαλασσινού νερού και πετρώματος, ενώ ο σιδηροπυρίτης, σφαλερίτης και γαληνίτης εναποτίθενται γύρω από την υδροθερμική ζώνη απευθείας στον πυθμένα της θάλασσας. Με την εναπόθεση του διοξειδίου του πυριτίου και

του σιδηροπυρίτη δημιουργούνται στρωματοποιημένοι τόφφοι με πυριτόλιθο που συνήθως συνδέονται με τα κοιτάσματα. Η παρουσία σιδηροπυρίτη και όχι αιματίτη ή μαγνητίτη σε αυτά σημαίνει ότι το εκπεμπόμενο διάλυμα πιθανώς περιείχε περίσσεια Sr σε σχέση με το SO. Τα κοιτάσματα τύπου Kuroko πιθανότατα αποτέθηκαν σε παρόμοιο γεωλογικό περιβάλλον από διαλύματα πιο πλούσια σε μόλυβδο με υψηλότερο επίπεδο οξυγόνου.

Τα ηφαιστειογενή κοιτάσματα συμπαγών σουλφιδίων στα ηφαιστειακά εδάφη έχουν χαρακτηριστική φακοειδής μορφή, είναι ευρέως στρωματομόρφα, και αποτελούνται από σιδηροπυρίτη ή/και μαγνητοπυρίτη με μικρότερες ποσότητες χαλκοπυρίτη, σφαλερίτη και γαληνίτη. Είναι γενικά αποδεκτό ότι αυτά τα κοιτάσματα είναι συνυπάρχοντα με τα περικλείοντα υποθαλάσσια ηφαίστεια και αποτέθηκαν είτε κοντά είτε στο πρόσωπο μεταξύ πετρώματος και νερού. Γενικά είναι αποδεκτό ότι τα κοιτάσματα αυτά χωρίζονται σε 3 κατηγορίες. Ο πρώτος τύπος είναι αυτός του χαλκού-ψευδαργύρου, ο οποίος έχει σύνθεση από βασάλτη μέχρι ρυόλιθο. Ο δεύτερος τύπος είναι αυτός του μολύβδου-ψευδαργύρου-χαλκού ο οποίος περιλαμβάνει τα κοιτάσματα τύπου Kuroko στην Ιαπωνία. Ο τρίτος τύπος είναι αυτός του σιδηροπυρίτη, πλούσιος σε χαλκό.

Στον τύπο Cu-Zn στην ανώτερη ζώνη επικρατεί χαλκοπυρίτης ο οποίος συγκεντρώνεται με σιδηροπυρίτη-μαγνητοπυρίτη $\pm$ μαγνητίτη στη βάση του φακού του κοιτάσματος ή κάτω από αυτό. Περνώντας στρωματογραφικά προς τα πάνω, ο λόγος σιδηροπυρίτη/μαγνητοπυρίτη αυξάνεται, ενώ η περιεκτικότητα σε μαγνητίτη μειώνεται και η κορυφή του κοιτάσματος χαρακτηρίζεται από μάντες σιδηροπυρίτη. Ορισμένα κοιτάσματα (π.χ Mattabi) περιέχουν γαληνίτη στην κορυφή του φακού, στη μάντα του σιδηροπυρίτη, αλλά γενικά λείπουν σημαντικά ποσά μολύβδου.

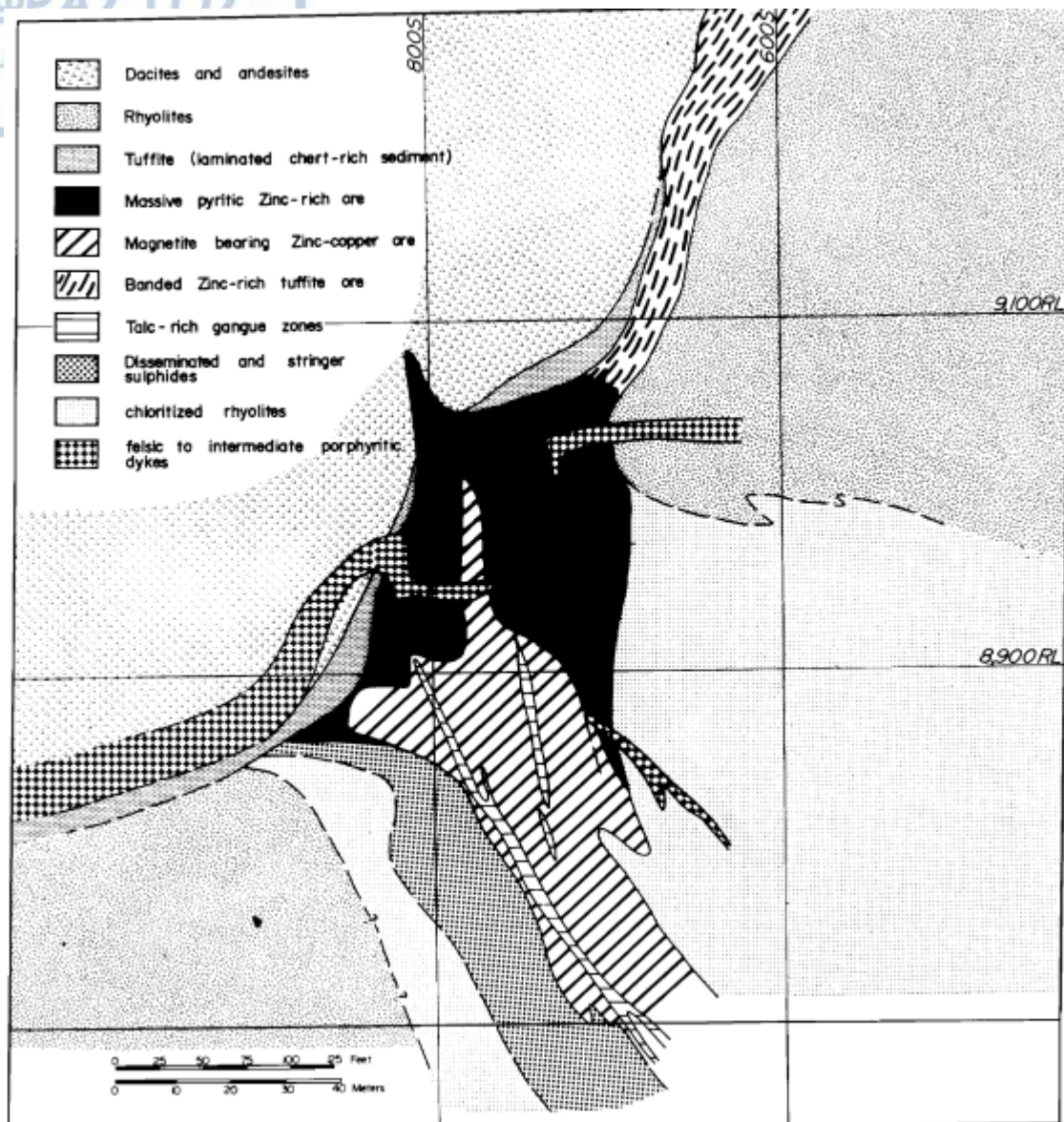
Τα κοιτάσματα Cu-Zn επικαλύπτονται συχνά από, ή το διαπερνούν στρωματογραφικά, ένα ιζημα που περιέχει μικρές ποσότητες σιδηροπυρίτη. Αυτά τα ιζήματα, τα οποία γενικά εμπλουτίζονται σε σφαλερίτη για κάποια απόσταση είναι τοπικά και ονομάζονται τόφφοι και λέγεται ότι είναι χημικές κατακρημνίσεις κυρίως ηφαιστειακής προέλευσης. Ο μαγνητοπυρίτης και μαγνητίτης είναι μεταλλικά ορυκτά που αποτελούν ένα σημαντικό μέρος των κοιτασμάτων Cu-Zn. Ωστόσο, ορισμένα κοιτάσματα του τύπου Pb-Zn-Cu-Ag περιέχουν μαγνητοπυρίτη και μαγνητίτη.

Στην περιοχή Matagami του Κεμπέκ, τα ηφαιστειογενή κοιτάσματα Cu-Zn εμφανίζονται μέσα σε μία στήλη από ανδεσίτη-δακίτη-ρυόλιθο, η οποία έχει υποστεί συνθήκες της πρασινοσχιστολιθικής μεταμόρφωσης. Τα μεγάλα κοιτάσματα, τα οποία περιλαμβάνουν τη λίμνη Mattagami, Orchan, τη λίμνη Garon, New Hosco και Norita,

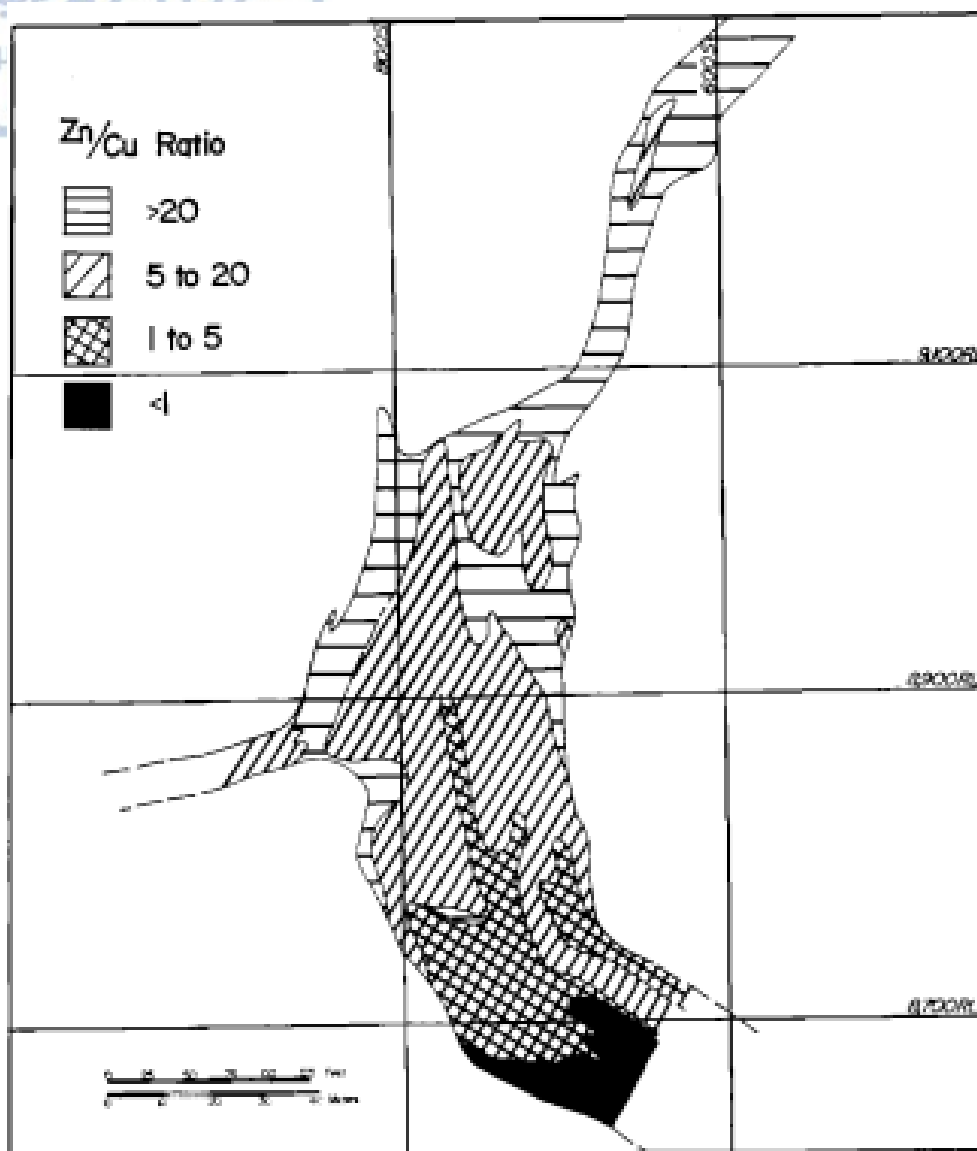
περιορίζονται σε μια στρωματογραφική ζώνη κοντά στην επαφή μίας στήλης από όξινα ηφαιστειακά με υπερκείμενα τα ενδιάμεσα έως βασικά ηφαιστειακά. Το Orchan No 3 επιλέχθηκε για λεπτομερή μελέτη σε μια προσπάθεια να συσχετιστεί ο τύπος Cu-Zn με τη διάσπαση του θειούχου σιδήρου, του οξειδίου και των πυριτικών ορυκτών. Ένα γεωλογικό τμήμα προήλθε από τα δεδομένα που παρέχονται από τα ορυχεία, τους γεωλόγους και συμπληρώνονται από τα δεδομένα που παίρνουμε από το τρυπάνι. Το μετάλλευμα έχει ένα τραχύ σχήμα T. Το στέλεχος του T αντιπροσωπεύεται από συμπαγή δισθενή σουλφίδια εγκιβωτισμένα σε χλωριωμένο ρυόλιθο, ενώ το υπόλοιπο T αντιπροσωπεύεται από ένα σώμα συμπαγών σουλφιδίων παράλληλα με την ρυολιθική-ανδεσιτική επαφή. Ένα ελασματοποιημένο πυριτικό ίζημα που σηματοδοτεί την επαφή του ρυόλιθου-ανδεσίτη, επικαλύπτει τις πλευρές του μεταλλεύματος (Σχ 13).

Ορυκτά στο σύστημα Fe-S-O (δηλαδή σιδηροπυρίτης, μαγνητοπυρίτης και μαγνητίτης) συγκεντρώνονται σε επικαλυπτόμενες ζώνες εντός του μεταλλεύματος. Ο σιδηροπυρίτης γενικά εμφανίζεται σε όλο το μετάλλευμα αλλά συγκεντρώνεται στο συμπαγές τμήμα του προς την στρωματογραφική κορυφή. Ο μαγνητίτης συγκεντρώνεται στο κεντρικό και κατώτερο τμήμα της ζώνης σωλήνων και φθάνει μέχρι και το 30 τοις εκατό του συμπαγούς μεταλλεύματος σε ορισμένα σημεία. Ο μαγνητοπυρίτης διανέμεται πιο ασταθής σε όλο το σώμα, αλλά συγκεντρώνεται προς την κορυφή της ζώνης που φέρει μαγνητίτη και επικαλύπτεται με τον συμπαγή σιδηροπυρίτη απαλλαγμένο από μαγνητίτη.

Οι αναλογίες ψευδαργύρου / χαλκού λαμβάνονται από δεδομένα ρουτίνας που προέρχονται από το τρυπάνι διαμαντιού. Αξίζει να σημειωθεί ότι η ζώνωση δεν είναι απλώς μια γενικά αυξανόμενη αναλογία Zn / Cu από το άνω τέμαχος στο κάτω τέμαχος ενός ρήγματος, αλλά μάλλον ένας συνδυασμός κάθετης και πλευρικής ζώνης. Το κοίτασμα πλούσιο σε ψευδάργυρο ($Zn/Cu > 20$), εμφανίζεται στην κορυφή του μεταλλεύματος και επεκτείνεται επίσης κάτω από τις πλευρές του σώματος και περικλείει εντελώς το πλούσιο σε χαλκό μετάλλευμα προς το κέντρο του σωλήνα. Μια παρόμοια ζωνώδης κατανομή του χαλκού και του ψευδαργύρου έχει αναφερθεί και σε άλλα κοιτάσματα όπως στο Millenbach (Σχ 14) (Large 1977).



Σχ 13. Γεωλογικό τμήμα του Orchan No 3 (Large 1977).



Σχ 14. Κατανομή ψευδαργύρου / χαλκού στο Orchan No 3 (Large 1977).

5. ΠΑΡΑΓΕΝΕΣΕΙΣ

Προκειμένου να συσχετιστεί η ζωνώδης κατανομή των ηφαιστειογενών κοιτασμάτων συμπαγών σουλφιδίων Cu-Zn με τη χημική εξέλιξή τους στο χώρο και στο χρόνο, θα ήταν χρήσιμο να έχουμε δεδομένα σχετικά με την ποσότητα της κατακρήμνισης ορυκτών ή της παραγένεσης. Ωστόσο, λόγω των επιδράσεων του χαμηλού έως μέσου βαθμού μεταμόρφωσης στην ανόπτηση και την ανακρυστάλλωση των συσσωματωμάτων των σουλφιδίων, αυτά τα δεδομένα είναι συνήθως δύσκολο να ληφθούν. Σε περίπτωση έλλειψης διακριτικών στοιχείων υφής, μπορεί να θεωρηθεί ότι η ορυκτολογική ζώνη αντιπροσωπεύει μία απλή παραγενετική αλληλουχία, δηλαδή κατατέθηκαν πρώτα στη βάση του μεταλλεύματος po-mag και cry στη συνέχεια ακολουθούν po-cry-sp-ry, και τελικά ry-sp στην κορυφή. Υπάρχει σημαντική αλληλεπικάλυψη τόσο στο χώρο όσο και στο χρόνο κατακρήμνισης αυτών των συγκροτημάτων, και είναι πιθανό, σε ορισμένες περιπτώσεις, το συγκρότημα po-cry να κατακρημνίστηκε στη βάση του μεταλλεύματος ταυτόχρονα με το συγκρότημα ry-sp, το οποίο κατατέθηκε στην κορυφή.

Σε μια αρχική μελέτη των υφών στο Orchan No 3 όπου η μεταμόρφωση είναι πιο κάτω από αυτή της πρασινοσχιστολιθικής φάσης, έδειξε ότι ο σιδηροπυρίτης ακολούθησε τον μαγνητίτη και τον πυρωτίτη, αλλά παρόλα αυτά δεν υπάρχει σαφή σχέση μεταξύ του μαγνητίτη και του πυρωτίτη.

Γενικά ο μαγνητίτης αποσυντίθεται σε όλη την έκταση του κάτω τεμάχους της χλωριτικής αλλοίωσης κάτω από το μέταλλευμα του New Hosco, στην περιοχή Matagami. Μία παρόμοια συσχέτιση υπάρχει στο κάτω τέμαχος του κοιτάσματος συμπαγών σουλφιδίων Haynes, στη περιοχή Jerome της Αριζόνας. Στο μέταλλευμα Orchan No 3 και στις δύο περιπτώσεις που αναφέρθηκαν παραπάνω, ο μαγνητίτης μπορεί ήταν το πρώτο ορυκτό στο σύστημα Fe-S-O που κατακρημνίστηκε εντός της ζώνης υδροθερμικής αλλοίωσης κάτω από τον πυθμένα της θάλασσας. Στο Orchan No 3 ο μαγνητίτης πιθανώς ακολουθείται από πυρωτίτη ± σιδηροπυρίτη και από τα παραπάνω μεταλλικά σουλφίδια. Στη κορυφή του πλούσιου σε ψευδάργυρο μέταλλευμα, ο σφαλερίτης φαίνεται να είναι σύγχρονος με το σιδηροπυρίτη ή και πιο νέος.

Συμπερασματικά, αν και η ακολουθία των μεταλλικών ορυκτών είναι ένας σημαντικός παράγοντας που πρέπει να εξεταστεί στη χημική εξέλιξη των συμπαγών σουλφιδίων, οι μελέτες των υφών είναι συνήθως ασαφείς και δεν παρέχουν τις απαιτούμενες πληροφορίες. Παρά τις παραπάνω δυσκολίες εξήχθη το συμπέρασμα ότι η ζώνωση των

ορυκτών από το κάτω στο άνω τέμαχος στα κοιτάσματα συμπαγών σουλφιδίων προσεγγίζει τη σειρά της καθίζησης των ορυκτών.

Η βασική ζώνωση των μεταλλικών ορυκτών των κοιτασμάτων συμπαγών σουλφιδίων έχει υποστεί μία μεγάλη διαδικασία διεργασιών. Για παράδειγμα, το κοίτασμα τύπου Noranda στο σύνολό του, τα πλούσια σε ψευδάργυρο μεταλλεύματα εμφανίζονται στρωματογραφικά πάνω από τα μεταλλεύματα του χαλκού. Αυτό το μοτίβο, εκτός από τη κάθετη οριοθέτηση του Cu σε Zn μέσα σε μεμονωμένα κοιτάσματα, είναι αποτέλεσμα ενός προοδευτικού εμπλουτισμού του ψευδάργυρου μέσα σε υδροθερμικές αλλοιώσεις με το χρόνο. Η αύξηση της αναλογίας Zn / Cu του ρευστού μεταλλεύματος σχετίζεται με την ηφαιστειακή εξέλιξη της περιοχής Noranda.

Με παρόμοιο τρόπο παρουσιάζεται και η συμμετρική ορυκτολογική ζώνη σε συμπαγή κοιτάσματα σουλφιδίου στις περιοχές Άλται, Ουράλια, Κάνκασος και Ειρηνικής Ζώνης των ΗΠΑ. Βέβαια σχετίζεται με παλλόμενα υδροθερμικά διαλύματα που προέρχονται από διάφορους θαλάμους μάγματος. Υποδηλώνουν ότι οι διαδοχικοί παλμοί των διαλυμάτων διεισδύουν σε μεγάλες αποστάσεις και διαμορφώνουν μια σειρά από διάφορα στάδια ορυκτοποίησης, η κάθε μία πιο κοντά στο άνω τέμαχος του ρήγματος.

Πρόσφατα προτάθηκε ότι η μεταλλική ζώνωση των συμπαγών σουλφιδίων είναι δευτερεύον φαινόμενο που σχετίζεται με ηλεκτρικά δυναμικά, που αναπτύχθηκαν μέσα στα σουλφίδια, πιθανώς πιο νωρίς από το στάδιο της διαγένεσης. Υποστηρίζουν ότι ο Cu, Pb, και Zn, τα οποία ήταν κατά κύριο λόγο ομοιόμορφα κατανεμημένα σε όλο το φακό σουλφιδίου, μεταναστεύουν και γίνονται ζώνες σε συνάρτηση της κατανομής των δυνατοτήτων εντός των σουλφιδίων. Δυστυχώς, αυτή η υπόθεση δεν εξηγεί την παράλληλη ζώνη μαγνητίτη, πυρωτίτη, και σιδηροπυρίτη, τα οποία έχουν το σίδηρο ως το μόνο κατίον. Ούτε εξηγεί την τραχιά ζώνη από το πυριτικό άλας, το ανθρακικό άλας, και το θειικό άλας που εκθέτουν πολλά κοιτάσματα (τύποι Kuroko, Rosebery, Orchan, Millenbach) και που ακολουθεί στενά η μεταλλική ζώνη.

Σύμφωνα με απλές εκτιμήσεις, η σχετική αφθονία των μεταλλευμάτων στο υδροθερμικό διάλυμα είναι ένας σημαντικός παράγοντας για τον καθορισμό της τάξης των κοιτασμάτων συμπαγών σουλφιδίων. Έτσι, υποθέτοντας ότι οι διαλυτότητες των συμπαγών σουλφιδίων δεν είναι πάρα πολύ ανόμοιες, το μέταλλο που είναι σε μεγαλύτερη αφθονία θα καθιζάνει πρώτο, ακολουθούμενο από το επόμενο πιο άφθονο, και ούτω καθεξής. Ως εκ τούτου, μια πλούσια σε Cu και Fe λύση με μικρό Zn και το Pb θα καταθέσει χαλκοπυρίτη

ακολουθούμενο από σφαλερίτη-γαληνίτη, ενώ ένα πλούσιο σε Zn διάλυμα θα καταθέσει σφαλερίτη ακολουθούμενο από χαλκοπυρίτη και γαληνίτη.

Ωστόσο, πειραματικές εργασίες για τη διαλυτότητα των χλωριούχων συμπλεγμάτων Cu και Zn, δείχνουν ότι υπό τις συνθήκες σχηματισμού κοιτασμάτων συμπαγών σουλφιδίων τύπου 1, ο σφαλερίτης είναι μεταξύ 10 έως 100 φορές πιο διαλυτός από τον χαλκοπυρίτη. Κατά συνέπεια, για να καθιζάνει ο σφαλερίτης πριν από το χαλκοπυρίτη, το διάλυμα πρέπει να περιέχει 10 έως 100 φορές περισσότερο Zn από Cu.

Σημειώνεται ότι η αντίστροφη ζώνη (δηλαδή, Zn έως Cu) δεν έχει αναφερθεί από τη περιοχή Noranda και Matagamí, ακόμα κι αν αυτά τα κοιτάσματα παρουσιάζουν μεγάλη διακύμανση στη μέση τιμή Cu / Zn. Για παράδειγμα, η σχετικά πλούσια σε χαλκό Millenbach κατάθεση που περιέχει 3 εκατομμύρια τόνους μεταλλεύματος 3,5 τοις εκατό Cu και 4,5 τοις εκατό Zn, δείχνει Cu σε Zn ζώνωση όμοια με εκείνη εντός του πλούσιου σε ψευδάργυρο Orchan, το οποίο περιέχει περίπου 5 εκατομμύρια τόνους με 1,1 τοις εκατό Cu και 11, 6 τοις εκατό Zn. Δεν υπάρχουν περιπτώσεις αντίστροφης ζώνωσης για ηφαιστειογενή κοιτάσματα των τύπων 1 και 2. Αυτό ακριβώς το γεγονός υποδηλώνει ότι τα υδροθερμικά υγρά από τα οποία σχηματίστηκαν αυτά τα κοιτάσματα δεν είχαν αναλογία Zn / Cu μεγαλύτερη από περίπου 100: 1.

Η μεταλλική ζώνη εντός των κοιτασμάτων τύπου 1 της επαρχίας Superior είναι πιθανώς το αποτέλεσμα της διαδοχικής εναπόθεσης σουλφιδίων κατά μήκος απότομων γεωθερμικών βαθμίδων που επικρατούν στα ηφαιστειακά περιβάλλοντα κοντά στην επιφάνεια. Τα πιο ασταθή συστατικά μπορεί να έχουν αποσταχθεί από χαμηλότερα επίπεδα και επανατοποθετήθηκαν παραπάνω. Επίσης η ζώνη Cu-Pb-Zn στον τύπο 2 (New Brunswick) μπορεί να είναι το αποτέλεσμα της μεταφοράς των βασικών μετάλλων με τη μορφή πτητικών ενώσεων αλογόνου που εναποτίθενται κάτω από ένα καθεστώς μείωσης της θερμοκρασίας. Εκτός από τη θερμοκρασία, τη διαλυτότητα και τη σταθερότητα των μεταλλευμάτων εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από το pH και τη συγκέντρωση του ολικού διαλυμένου θείου (Large 1977).

- De Rosen-Spence A. F and Spence C. D 1975. The place of sulfide mineralization in the volcanic sequence at Noranda, Quebec. *Economic Geology*, 70(1), 90-101.
- Galley, A. G., Hannington, M. D., & Jonasson, I. R. (2007). Volcanogenic massive sulphide deposits. *Geological Association of Canada, Mineral Deposits Division*, 141-161.
- Large, R. R. (1977). Chemical evolution and zonation of massive sulfide deposits in volcanic terrains. *Economic Geology*, 72(4), 549-572.
- Lydon, J. W. (1984). Ore deposit models-8. Volcanogenic massive sulphide deposits Part I: A descriptive model. *Geoscience Canada*.
- Morton, R. L., & Franklin, J. M. (1987). Two-fold classification of Archean volcanic--associated massive sulfide deposits. *Economic Geology*, 82(4), 1057-1063.
- Sangster, D. F. (1980). QUANTITATIVE CHARACTERISTICS OF VOLCANOGENIC MASSIVE SULFIDE DEPOSITS. 1. METAL CONTENT AND SIZE DISTRIBUTION OF MASSIVE SULFIDE DEPOSITS IN VOLCANIC CENTERS. *CIM BULLETIN*, 73(814), 74-81.