



ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ

ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ

ΤΟΜΕΣ ΟΡΥΚΤΟΛΟΓΙΑΣ-ΠΕΤΡΟΛΟΓΙΑΣ-

ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΟΛΟΓΙΑΣ

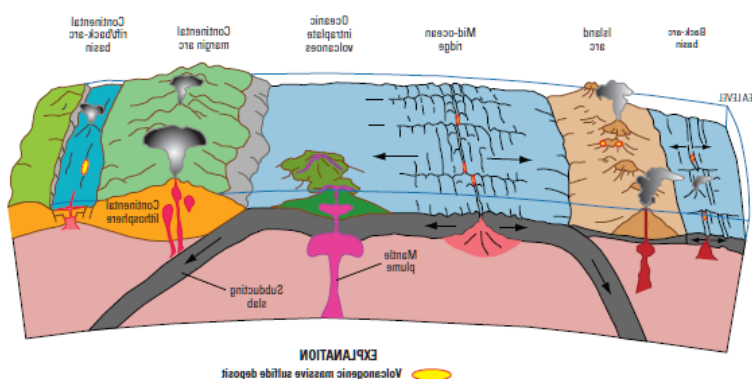
ΣΟΥΖΗ-ΧΡΙΣΤΙΝΑ ΖΑΡ

ΑΕΜ:5543

ΜΕΤΑΛΛΟΓΕΝΕΣΗ ΗΦΑΙΣΤΕΙΟΓΕΝΩΝ ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΩΝ Cu

ΤΥΠΟΥ ΚΥΠΡΟΥ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ



ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ

2021





ΣΟΥΖΗ-ΧΡΙΣΤΙΝΑ ΖΑΡ

ΜΕΤΑΛΛΟΓΕΝΕΣΗ ΗΦΑΙΣΤΕΙΟΓΕΝΩΝ ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΩΝ Cu
ΤΥΠΟΥ ΚΥΠΡΟΥ

Υποβλήθηκε στο Τμήμα Γεωλογίας
Τομέας Ορυκτολογίας – Πετρολογίας - Κοιτασματολογίας

Επιβλέπων Καθηγητής:

Βασίλειος Μέλφος, Αναπληρωτής Καθηγητής

© Σούζη-Χριστίνα Ζαρ, 2020

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All right reserved.

© Σούζη-Χριστίνα Ζαρ, Τμήμα Γεωλογίας Α.Π.Θ., Τομέας Ορυκτολογίας, Πετρολογίας,
Κοιτασματολογίας, 2020

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος.

Μεταλλογένεση ηφαιστειογενών κοιτασμάτων Cu τύπου Κύπρου-Διπλωματική Εργασία



© Susi-Christina Sahr, School of Geology, Department of Mineralogy, Petrology, Economic Geology. 2020

All rights reserved.

Volcanogenic massive deposits Cu Cyprus 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.





ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	7
ABSTRACT.....	8
ΠΡΟΛΟΓΟΣ.....	9
1.ΕΙΣΑΓΩΓΗ	10
1.1 ΓΕΝΙΚΑ.....	10
1.2 ΣΗΜΑΣΙΑ ΚΑΙ ΕΞΟΡΥΞΗ.....	10
1.3 ΠΑΡΑΓΩΓΗ Cu.....	11
1.4 ΧΡΗΣΕΣ Cu.....	12
2.ΗΦΑΙΣΤΕΙΟΓΕΝΗ ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΑ VMS.....	15
2.1 ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΩΝ.....	15
2.2. ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΑ ΤΡΟΟΔΟΥΣ.....	16
3.ΓΕΩΤΕΚΤΟΝΙΚΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΥ ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΩΝ ΤΥΠΟΥ ΚΥΠΡΟΥ	19
3.1 ΓΕΝΙΚΑ.....	19
3.2 ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΣ ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΩΝ.....	19
3.3 ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΑ ΤΥΠΟΥ ΚΥΠΡΟΥ.....	20
4.ΠΕΤΡΟΓΡΑΦΙΑ ΞΕΝΙΣΤΩΝ.....	25
5.ΟΡΥΚΤΟΛΟΓΙΚΗ ΚΑΙ ΧΗΜΙΚΗ ΣΥΣΤΑΣΗ ΜΕΤΑΛΛΟΦΟΡΙΑΣ ΚΑΙ ΕΞΑΛΛΟΙΩΣΕΩΝ.....	30
6.ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ	36
7.ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	40



ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Μεταλλογένεση ηφαιστειογενών κοιτασμάτων Cu τύπου Κύπρου

Σούζη-Χριστίνα Ζαρ

Η παρούσα διπλωματική πτυχιακή εργασία αφορά την μελέτη των ηφαιστειογενών κοιτασμάτων Cu τύπου Κύπρου . Πρόκειται για μια κατηγορία των ηφαιστειογενών κοιτασμάτων συμπαγών σουλφιδίων (VMS) τα οποία αποτελούν σημαντικότερη πηγή για μέταλλα στον κόσμο όπως είναι Zn,Cu,Pb,Ag κ.ά.. Χωρίζονται σε τρεις τύπους κοιτασμάτων : 1) Zn-Cu-σιδηροπυρίτης λεγόμενος και ως “Norada type” 2) Zn-Pb-Cu-σιδηροπυρίτης “Kuroko type” και 3) Cu-σιδηροπυρίτης “Cyprus type” . Έχουν πραγματοποιηθεί πολλές μελέτες για τις γεωδυναμικές διεργασίες γένεσης, τη θέση και του χρονοδιαγράμματος των κοιτασμάτων αυτών αλλά οι πληροφορίες δεν είναι τόσο κατανοητές. Συγκρίνοντας όμως πολλές περιοχές με βάση τα ίδια κριτήρια των κοιτασμάτων αυτών όσον αφορά τα γεωλογικά γεγονότα επέφεραν τα συμπεράσματα ότι υπάρχει σύνδεση της υποθαλάσσιας ηφαιστειακής δράσης με την ιζηματογένεση.



ABSTRACT

Volcanogenic massive deposits Cu Cyprus type

Susi-Christina Sahr

This diploma thesis focuses on the study of volcanogenic massive deposits Cu Cyprus type. It concerns volcanogenic massive sulfide deposits (VMS) which are really important resource of mining Zn,Cu,Pb,Ag et. al.. There are three types of deposits: 1) Zn-Cu-pyrite “Norada type”, 2) Zn-Cu-Pb-pyrite “Kuroko type” and 3) Cu-pyrite “Cyprus type”. There have been many studies about geodynamic process of genesis,location and timing remain of deposits but the informations are not completely understood. Comparison many districts of the same criteria of deposits which are about geological events the conclusion is that exist connection between submarine volcanic action and sendimentary.



ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Το θέμα της παρούσας πτυχιακής διπλωματικής εργασίας μου ανατέθηκε τον Οκτώβριο του 2020 από τον Καθηγητή του Τομέα Ορυκτολογίας – Πετρολογίας – Κοιτασματολογίας του Τμήματος Γεωλογίας του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης, κ. Βασίλειο Μέλφο, τον οποίο ευχαριστώ θερμά για την υπόδειξη του θέματος, την καθοδήγηση και τις συμβουλές του σε όλη τη διάρκεια της εργασίας αυτής.

Η συγκεκριμένη πτυχιακή εργασία επιχειρεί να παρουσιάσει και να εξετάσει την μεταλλογένεση ηφαιστειογενών κοιτασμάτων Cu τύπου Κύπρου.

Ιδιαίτερες ευχαριστίες οφείλω στον Επίκουρο Καθηγητή κ. Β. Μέλφο, που ήταν επιβλέπωντας της πτυχιακής αυτής εργασίας, για την ανάθεση ενός τόσο ενδιαφέροντος θέματος, όπως και για την συνεχή βοήθειά του κατά την εκπόνηση αυτής της εργασίας. Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου για τη στήριξή τους σε όλη τη διάρκεια των σπουδών μου.

1.1 ΓΕΝΙΚΑ

Ο χαλκός είναι μεταλλικό στοιχείο βρίσκεται στην 11^η ομάδα του Περιοδικού Πίνακα μεταξύ νικελίου (Ni) και ψευδαργύρου (Zn), είναι ευγενές μέταλλο όπως ο χρυσός και το ασήμι. Έχει χρήσιμες φυσικές ιδιότητες όπως εμφάνιση, ικανότητα κράματος, χαμηλή διάβρωση, ελαστικότητα, υψηλή θερμική και ηλεκτρική αγωγιμότητα για αυτό λόγο έχει μεγάλη βιομηχανική σημασία. (Agency for Toxic Substances and Disease Registry, US Public Health Service. ATSDR's Toxicological Profiles: Copper. Boca Raton, Florida: Lewis Publishers, CRC Press Inc, 1997). Έχει ατομικό αριθμό 29 και ατομικό βάρος 63,546. Η θερμοκρασία τήξης του είναι 1084,6°C. Στην μεταλλική κατάσταση ο χαλκός έχει κοκκινωπό χρώμα και μεταλλική λάμψη, είναι μαλακός (2,5-3 κλίμακα Mohs)και δύστηκτος . Εμφανίζεται χωρίς σχιστότητα, αδιαφανής και χωρίς μαγνητικές ιδιότητες. Εμφανίζεται με αριθμούς οξείδωσης +1,+2, αντιδρά δύσκολα με άλλα στοιχεία εκτός το οξυγόνο και το θείο για αυτό δεν έχει ευρεία χρήση ως αναγωγικό. (Μήτσιος 2004).

Η επεξεργασία του χαλκού χρονολογείται από το 9.000-7.000 π.Χ. στο δυτικό Ιράν και στην Ανατολία (Garper M. Br J Ind Med 1987). Η διαδικασία της τήξης έγινε γνωστή το 3.500 π.Χ. παράγοντας σχετικά καθαρό χαλκό με χαμηλή περιεκτικότητα σε αρσενικό. Παρόλο που τα σουλφίδια χαλκού περιέχουν υψηλές συγκεντρώσεις σε αρσενικό κατά την διάρκεια τήξης απελευθερώνεται μεγάλο μέρος αυτού στον αέρα. Οι διαφορές μεταξύ του κράματος χαλκού-κασσιτέρου (μπρούντζος) και χαλκού-αρσενικού είναι οριακές.Ο μπρούντζος κυριάρχησε στην Ευρώπη και στην Μέση Ανατολή τα τελευταία 300-400 έτη. Η επανεμφάνιση του χαλκού-αρσενικού έγινε σε περιόδους παύσης του εμπορίου. (Tylecote R.F. 1976).

1.2 ΣΗΜΑΣΙΑ ΚΑΙ ΕΞΟΡΥΞΗ

Τα πρώτα μέταλλα που χρησιμοποίησε ο άνθρωπος ήταν τα αυτοφυή όπως είναι ο χρυσός , ο χαλκός και ο άργυρος. (Thompson F.C1958). Τα πιο γνωστά ορυκτά του είναι ο μαλαχίτης και ο αζουρίτης (Πίνακας 1.2.1. Ευαγγελία Ναϊδου). Ο χαλκός βρίσκεται σε μια οξειδωμένη ζώνη με μικρό πάχος όπου τα ορυκτά του εντοπίζονται με περιεκτικότητες 2-3% . Στη ζώνη αυτή απαντάται ωστόσο και αυτοφυής χαλκός (Ανδρεοπούλου – Μάγκου 1994). Ακολουθεί η ζώνη σουλφιδίων με θειούχα μεταλλεύματα χαλκού και περιεκτικότητα 25% σε Cu. Η στρωματογραφία του κοιτάσματος χαλκού παρατίθεται στον Πίνακα 1.2.2..

Η προβλεπόμενη αύξηση του πληθυσμού από 6,7 σε 10 δισεκατομμύρια έως το 2100 (United Nations, 2013), μαζί με το BRIC (Brazil, Russia, India, China) και άλλες χώρες που υιοθετούν το δυτικό βιοτικό επίπεδο, αναμένεται να προκαλέσει τεράστια αύξηση στη ζήτηση για Cu, εκτιμάται ότι υπερβαίνει τα 575Kt ετησίως υποθέτοντας μάλιστα την πλήρη ανακύκλωση προϊόντων Cu (Gordon et al., 2006). Η ελλείψει ολικής ανακύκλωσης Cu ή ανάπτυξης υποκατάστατου χαλκού, η ικανοποίηση αυτής της ζήτησης στα τρέχοντα επίπεδα παραγωγής Cu θα απαιτήσει δύο επιπλέον ορυχεία για να ξεκινήσει την παραγωγή κάθε τρία χρόνια, το καθένα με ετήσια παραγωγή Cu ισοδύναμη με εκείνη της Escondida της Χιλής περίπου 900 Ktpa (www.bhpbilliton.com, 2012). Η αυξημένη παραγωγή αναπόφευκτα θα οδηγήσει σε αυξημένη εξερεύνηση, η οποία, με όλο και πιο περιοριστική περιβαλλοντική νομοθεσία, είναι πιθανό να επικεντρωθεί σε κοιτάσματα που έχουν χαμηλότερες περιβαλλοντικές επιπτώσεις στα ορυχεία. Λόγω των πολιτικών προβλημάτων σε ορισμένες χώρες, ιδίως στην Αφρική, είναι επίσης σημαντικό να διερευνήσουμε τις καταθέσεις σε χώρες που θεωρούνται χαμηλού πολιτικού κινδύνου (Gordon et al., 2005).

1.3 ΠΑΡΑΓΩΓΗ Cu

Περίπου το 65% της παγκόσμιας παραγωγής χαλκού προέρχεται από αποθέσεις τύπου πορφύρη, ενώ το υπόλοιπο από κοιτάσματα στρωματοειδών ιζημάτων και ηφαιστειογενών συμπαγών σουλφιδίων (VMS), που περιέχουν ορυκτά όπως ο χαλκοπυρίτης και ο βορνίτης (Mudd et al. , 2013). Η επεξεργασία των πρωτογενών μεταλλευμάτων σουλφιδίου εξακολουθεί να κυριαρχείται μέσω πυρομεταλλουργίας, ενώ για μεταλλεύματα υψηλής ποιότητας, μεγάλα τεμάχια μπορούν να μεταφερθούν απευθείας στους κλιβάνους, οι ολοένα και πιο σημαντικές εναποθέσεις χαμηλού βαθμού Cu όπως οι πορφυρίτες (Kesler, 1994) απαιτούν ωφέλεια για την παραγωγή συμπυκνώματος που μπορεί να σταλεί στον κλίβανο. Η επεξεργασία του θειούχου μεταλλεύματος χαμηλής ποιότητας είναι εξαιρετικά εντατική σε ενέργεια και έχει ως αποτέλεσμα την εκπομπή υψηλών επιπέδων CO₂ (ή ισοδύναμου). Οι εκπομπές αερίων θερμοκηπίου κυμαίνονται από 1-9t CO₂ ισοδύναμο ανά τόνο Cu με μέσο όρο 2,6t CO₂ ανά τόνο Cu (Northey et al., 2013a). Αναφέρεται ότι 8,14t CO₂ εκπέμπονται για την παραγωγή ενός τόνου καθόδου Cu (RioTinto, 2011). Η τήξη μπορεί επίσης να παράγει διοξείδιο του θείου, με πιθανότητα να προκαλέσει όξινη βροχή, μαζί με πλούσια σε μέταλλα σωματίδια που μπορούν να έχουν επιβλαβείς επιπτώσεις στα οικοσυστήματα και

την ανθρώπινη υγεία (Udachin et al., 2003; Williamson et al., 2004), αν και αυτό μπορεί να μετριάσκει σε μεγάλο βαθμό με τη χρήση σύγχρονων τεχνολογιών καθαρισμού.

Η σουλφιδική συμπεριφορά των αποβλήτων έχει υψηλή παραγωγή οξέος και συνδέονται με την αποστράγγιση όξινων πετρωμάτων που μπορεί να επηρεάσει σε μεγάλο βαθμό τα εδάφη και τα επιφανειακά και υπόγεια ύδατα (Gray, 1997). Τα δευτερεύοντα κοιτάσματα Cu (SCUDs) είναι μια ελκυστική εναλλακτική λύση έναντι των κοιτασμάτων PMS, καθώς ενδέχεται να περιέχουν οξείδια Cu, υδροξείδια, θειικά, ανθρακικά άλατα και δευτερογενή θειούχα, τα οποία είναι σχετικά επιρρεπή στην υδρομεταλλουργία ή στην εκχύλιση με ηλεκτροδιαλύτη (SX-EW). Η υδρομεταλλουργία προσφέρει πολλά οφέλη έναντι των παραδοσιακών πυρομεταλλουργικών μεθόδων. Η έκπλυση μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την επεξεργασία μεταλλεύματος χωρίς την απαιτούμενη επεξεργασία καθώς τα οξέα διαποτίζουν το πέτρωμα και μειώνουν τον Cu. Ο χρόνος που απαιτείται για την έκπλυση συσχετίζεται άμεσα με το μέγεθος σωματιδίων μεταλλεύματος, και ενώ ο όγκος του μεταλλεύματος μπορεί να εκπλυθεί, η κονιορτοποίηση του μεταλλεύματος και η συσσώρευση απόπλυσης μπορεί να μειώσει το χρόνο έκπλυσης από χρόνια σε μήνες (Habashi, 2003). Τα όξινα νερά που παράγονται στα ορυχεία θείου μπορούν να χρησιμοποιηθούν στη διαδικασία εκχύλισης με διαλύτη και μπορούν επίσης να ανακυκλωθούν, μειώνοντας το κόστος. Επιπλέον, η διαδικασία έκπλυσης οξέων είναι κατάλληλη για μεταλλεύματα πολύ χαμηλότερης ποιότητας (έως 0,1% Cu στη Σκουριώτισσα, Adamides N. pers. comm., 2011) από ό, τι είναι συνήθως οικονομική, χρησιμοποιώντας πυρομεταλλουργία. Αυτό έχει επεκτείνει το εύρος των καταθέσεων Cu που μπορούν να χρησιμοποιηθούν. Για τους λόγους αυτούς, οι SCUD έχουν ήδη αξιοποιηθεί, για παράδειγμα εκείνες που σχετίζονται με καταθέσεις πορφύρη στη Νότια Αμερική όπου το SCUD μπορεί να είναι υψηλότερου βαθμού από το PMS.

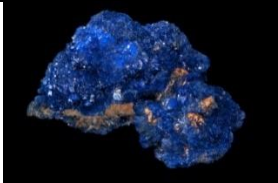
Οι Aubert και Pinta (1977) μελέτησαν την περιεκτικότητα πετρωμάτων σε χαλκό. Παρουσιάζεται ο Πίνακας 1.3.1 με τις περιεκτικότητες χαλκού σε διάφορα υλικά.

1.4 ΧΡΗΣΕΙΣ Cu

Ο χαλκός (Cu) είναι ένα απαραίτητο ιχνοστοιχείο για το φυσιολογικό μεταβολισμό των φυτών που παίζει σημαντικό ρόλο σε μεγάλο αριθμό μεταλλοενζύμων, στη συνδεόμενη με τη φωτοσύνθεση πλαστοκυανίνη και στη δομή των μεμβρανών. Σε μεγάλες συγκεντρώσεις όμως θεωρείται ιδιαίτερα τοξικό μέταλλο με σημαντικές αρνητικές επιδράσεις σε όλους τους οργανισμούς (Panou-Filothou et al., 2001). Ο χαλκός έχει χρησιμοποιηθεί ως

δραστικό συστατικό στα φυτοφάρμακα στην γεωργία των Ηνωμένων Πολιτειών. Η πιο συνηθισμένη μορφή είναι ο θευκός χαλκός.

Ορυκτά Χαλκού

<u>Όνομα</u>	<u>Χημικός τύπος</u>	<u>Φωτογραφία</u>
Αυτοφυής Χαλκός	Cu	 Gery Parent
Χαλκοπυρίτης	CuFeS ₂	 Didier Descouens
Αζουρίτης	Cu ₃ (CO ₃) ₂ (OH) ₂	 Depositphotos
Μαλαχίτης	Cu ₂ (CO ₃)(OH) ₂	 Catawiki
Κυπρίτης	Cu ₂ O	 Geo.auth
Χρυσόκολλα	(Cu,Al) ₂ H ₂ Si ₂ O ₅ (OH) ₄	 Rob Lavinsky

Πίνακας 1.2.1

Βάθος, σε m	Ζώνη φλέβας και κατά προσέγγιση % περιεκτικότητα σε Cu ανά ζώνη	Ορυκτά ανά ζώνη	% Cu στο καθαρό ορυκτό
	επιφάνεια εδάφους σιδηροί κάλυμμα ζώνη εκπτώσεως	ένυδρα οξειδία του σιδήρου διαλυτά ορυκτά	
	ζώνη οξειδίων (2 - 3 % Cu)	αζουρίτης $2\text{CuCO}_3 \cdot \text{Cu}(\text{OH})_2$ μαλαχίτης $\text{CuCO}_3 \cdot \text{Cu}(\text{OH})_2$ κυπρίτης Cu_2O αυτοφυής χαλκός χρυσόκολλα $\text{CuSiO}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ολιβενίτης $2\text{CuAsO}_4 \cdot 2\text{Cu}(\text{OH})_2$	55 58 90 100 36 42
	υδροφόρος ορίζοντας		
	ζώνη σουλφιδίων (25 % Cu)	χαλκοσίνης Cu_2S βορνίτης Cu_5FeS_4 χαλκοκυρίτης CuFeS_2 κοβελλίτης CuS εναργίτης Cu_3AsS_4 τετραεδρίτης $\text{Cu}_3\text{SbS}_{3-4}$ τενναντίτης $\text{Cu}_3\text{AsS}_{3-4}$	80 63 31 67 50 55 55
	ζώνη πρωτογενούς μεταλλεύματος (1 - 3 % Cu)	χαλκοκυρίτης CuFeS_2 χαλκοσίνης Cu_2S βορνίτης Cu_5FeS_4 σιδηροκυρίτης FeS_2	31 80 63
70m			

Πίνακας 1.2.2

Υλικό	Εύρος περιεκτικότητας σε mg Cu/ kg υλικού	Μέσος όρος περιεκτικότητας σε mg Cu/ kg υλικού
Βασάλτης	30-160	90
Γρανίτης	4-30	15
Πυρόξενοι	10-40	15
Άργιλος	30-150	50
Ηφαιστειογενή πετρώματα	5-20	-
Ασβεστόλιθος	5-20	-
Λιθόσφαιρα	-	70
Φλοιός της γης	24-55	-
Έδαφος	2-100	20-30

Πίνακας 1.3.1 Περιεκτικότητες σε χαλκό. (Adriano, 1986, Kabata και Brummer, 1991; USEPA, 1993). (Μήτσιοι, 2004).

Τα ηφαιστειογενή κοιτάσματα εμφανίζονται κυρίως ως συμπαγή σουλφίδια που σχηματίστηκαν κάτω από συνθήκες υποθαλάσσιας ηφαιστειακής δράσης

(Εικόνα 2.1). Τα συστατικά που δημιουργούνται από τα υδροθερμικά διαλύματα τελικά ιζηματοποιούνται για αυτό υπάρχει συνδυασμός μαγματικής δράσης και ιζηματογένεσης. Τα κοιτάσματα VMS αποτελούν σημαντική πηγή Zn,Cu,Pb,Ag και Au και επειδή δημιουργούνται μόνο από την δράση των ατμίδων . Ιστορικά αντιπροσωπεύουν το 27% Cu, 49% Zn, 29% Pb, 40% Ag, 3% Au , παραγωγής στον Καναδά .Τα κοιτάσματα VMS συνδέονται με υποθαλάσσια ηφαιστειακή δράση για αυτό και ονομάζονται “ Κοιτάσματα υποθαλάσσιων αναθυμιάσεων και εκχύσεων” (Eckstrand et al.,1995). Τα συστατικά των υδροθερμικών διαλυμάτων ιζηματοποιούνται στον πυθμένα της θάλασσας. Τα κοιτάσματα χαρακτηρίζονται κυρίως ως στρωματομορφα τα οποία σχηματίζουν φακοειδή στρώματα που αποτελούνται κυρίως από συμπαγή σουλφίδια (>40%), χαλαζία και δευτερεύοντα φυλλοπυριτικά και ορυκτά οξειδίου. Τα κοιτάσματα ομαδοποιούνται με βάση ορισμένα κριτήρια.

2.1 ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΩΝ

Τα VMS κοιτάσματα ταξινομούνται με βάση την περιεκτικότητα σε βασικά μέταλλα, την περιεκτικότητα Au και την λιθολογία των πετρωμάτων ξενιστών(Εικόνα 2.1.2, Εικόνα 2.1.3 Εικόνα 2.1.4.). Το βασικό μέταλλο που χρησιμοποιείτε για την ταξινόμηση από τους Franklin et all.(1981) και τελειοποιήθηκε από τον Large(1992) και Franklin(2005) είναι ίσως και το πιο κοινό. Τα κοιτάσματα VMS χωρίζονται σε Cu-Zn-σιδηροπυρίτης (Noranda type), Cu-σιδηροπυρίτης(Τύπου Κύπρου), Zn-Pb-Cu-σιδηροπυρίτης (Kuroko type). Η κατηγορία Zn-Cu-σιδηροπυρίτης στα κοιτάσματα του Καναδά μετονομάστηκαν από τους Morton και Franklin (1987) σε Noranda. Η κατηγορία Zn-Pb-Cu-σιδηροπυρίτης προστέθηκε από τον Large(1992) για να αντιπροσωπεύσει ακριβέστερα τα κοιτάσματα VMS της Αυστραλίας.

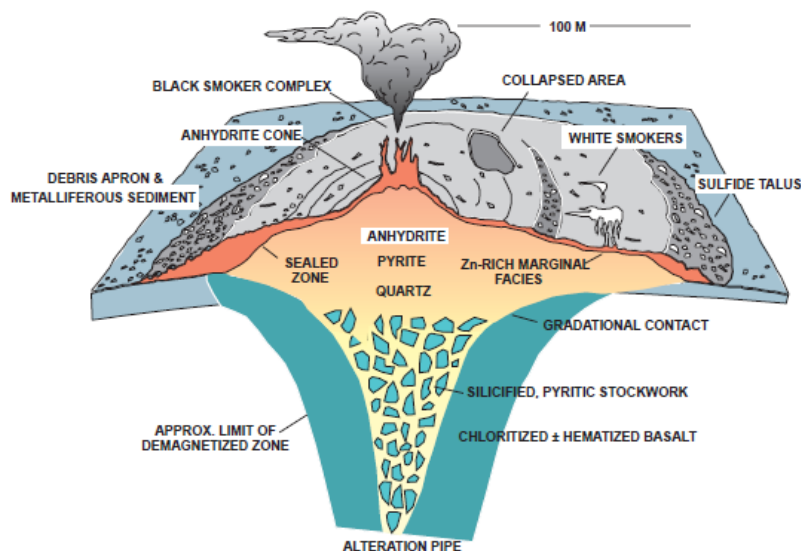
Για να αναγνωριστεί η διαφορά των VMS και επιθερμικών κοιτασμάτων , οι Poulsen και Hannington δημιούργησαν μία έννοια ανάμεσα στα κανονικά και στα πλούσια σε Au VMS κοιτάσματα. Περισσότερες έρευνες όμως έδειξαν ότι τα κοιτάσματα πλούσια σε Au δημιουργήθηκαν κάτω από περίπλοκες συνθήκες που σχετίζονται με βάθος νερού, οξειδωτική κατάσταση και μαγματικές συνθήκες.(Hannington et al. 1999a). Σύμφωνα με την ταξινόμηση κατά Poulsen και Hannington (1995) τα VMS κοιτάσματα Au έχουν

μεγαλύτερη αριθμητική αφθονία σε χρυσό από τα βασικά μέταλλα (Zn+Cu+Pb wt% Εικόνα 2.3.)

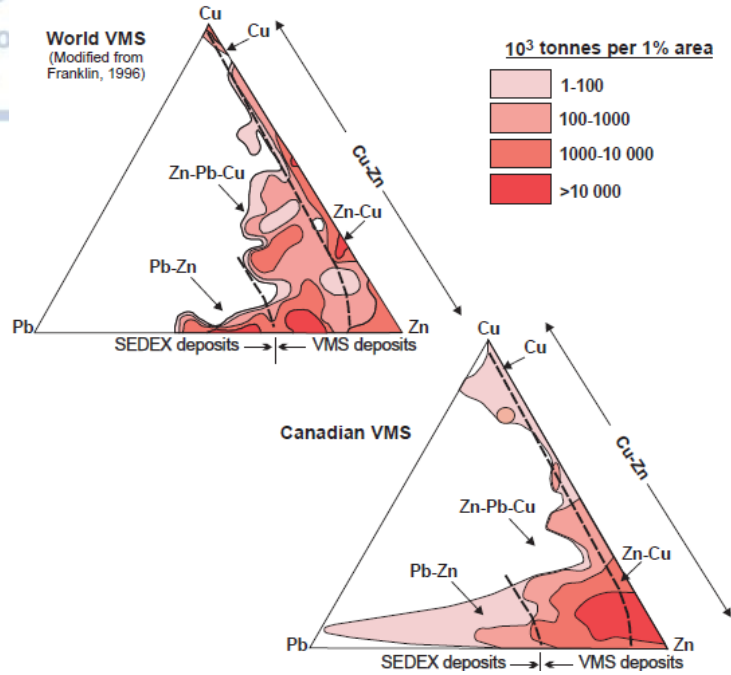
Ένας τρίτος τύπος ταξινόμησης, που προτάθηκε από τους Barrie και Hannington (1999) και αργότερα τροποποιήθηκε από τους Franklin et al.(2005) , περιλαμβάνει τα κοιτάσματα VMS με βάση την λιθολογία τους και την χρονική διαδοχή τους.

2.2 ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΑ ΤΡΟΟΔΟΥΣ

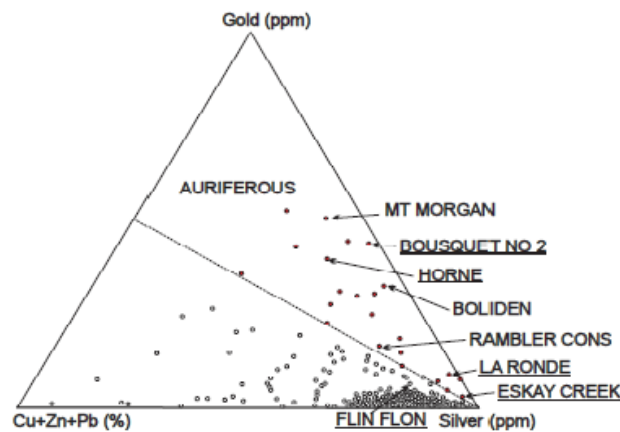
Το Τρόοδος είναι ευρέως αποδεκτό ότι φιλοξενεί VMS κοιτάσματα τύπου Κύπρου (π.χ. Barrie and Hannington, 1999; Hannington et al., 1998). Υπάρχουν πάνω από 90 γνωστές περιπτώσεις VMS στο Τρόοδος που κυμαίνονται σε μέγεθος από 0,05- 16 Mt (Adamides, 2010a). Οι βαθμοί κυμαίνονται ουσιαστικά από άγονο έως 4% κ.β. Cu με μέσες βαθμολογίες Cu 2% κ.β. (Hannington et al., 1998). Ιστορικά ορυχεία έχουν εξορύξει για βασικά μέταλλα, κυρίως Cu και Zn. Το σιδηρούν κάλυμα(gossan) εμφανίζεται στην επιφάνεια και εξορύσσεται ιστορικά για χιλιάδες χρόνια για το Au και το Cu που είναι εμπλουτισμένο σε αυτά τα περιβάλλοντα. Το τελευταίο ορυχείο Cu στην Κύπρο, η Σκουριώτισσα, βρίσκεται στο βορειοδυτικό Τρόοδος. Το μετάλλευμα υποβάλλεται σε επεξεργασία με έκπλυση σωρού ακολουθούμενη από εκχύλιση με διαλύτη electro-win (SXEW).



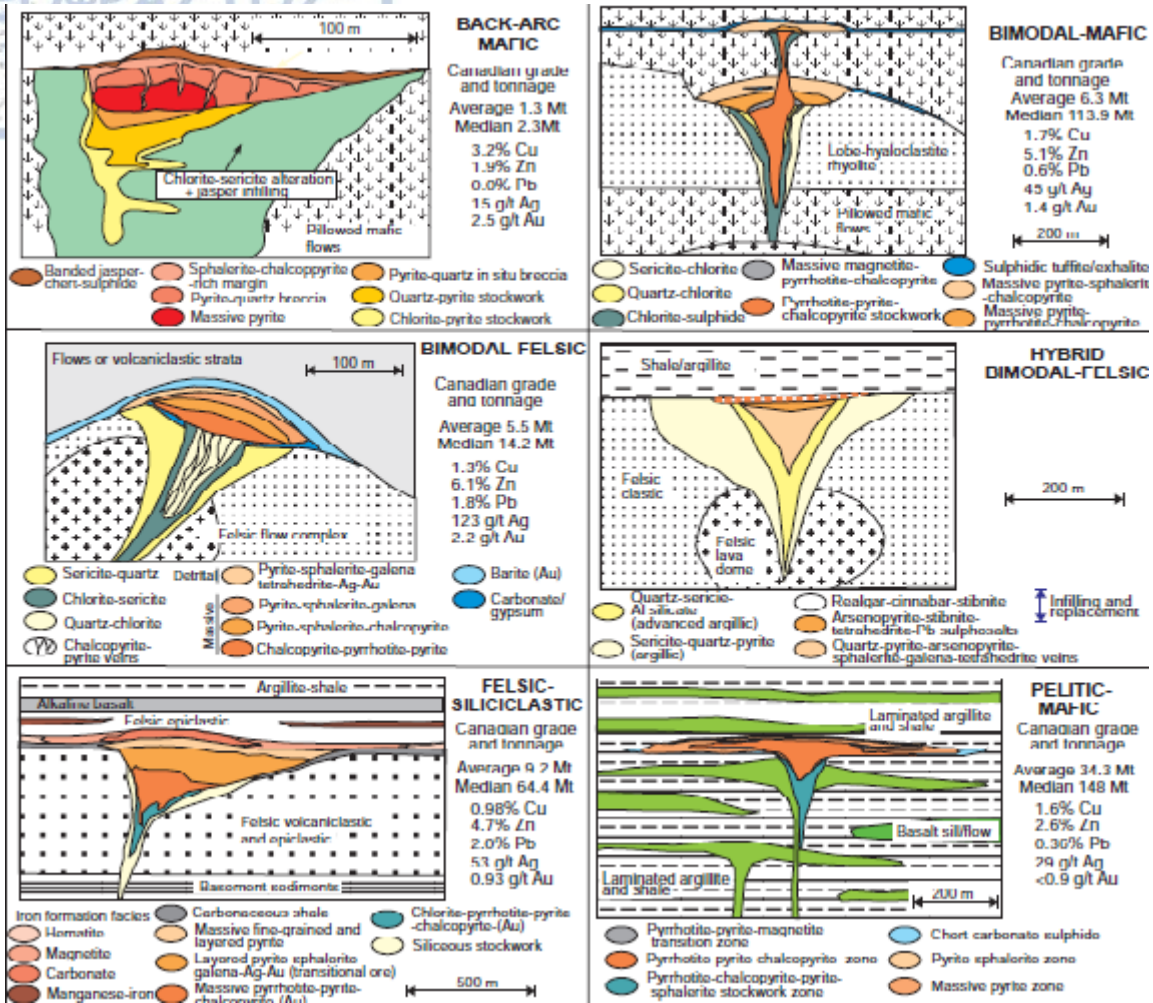
Εικόνα 2.1. Hannington et al. (1998).



Εικόνα 2.1.2 Σχέδιο ταξινόμησης βασικών μετάλλων παγκόσμιων και Καναδικών VMS κοιτασμάτων (Franklin et al. 1981, Large 1992)



Εικόνα 2.1.3 Ταξινόμηση βασικών και πολύτιμων μετάλλων . Σύγκριση κοιτασμάτων του Καναδά με διεθνείς παραδείγματα . (Hannington et al. 1999c)



Εικόνα 2.1.4 Γραφική αναπαράσταση των λιθολογικών ταξινομήσεων που τροποποιήθηκαν από τους Barrie και Hannington (1999) από τους Franklin et al. (2005)

3.1 ΓΕΝΙΚΑ

Η Μεσόγειος θεωρείται μια τεκτονικά πολύπλοκη περιοχή που οφείλει την ύπαρξή της στο κλείσιμο της Νέο-Τηθύος κατά την διάρκεια της Αλπικής Ορογένεσης (Robertson, 2002). Η περιοχή περιλαμβάνει πολλές μικροπλάκες που βρίσκονται μεταξύ της μεγαλύτερης Αφρικανικής πλάκας στα Νότια και της Ευρασιατικής πλάκας στα Βόρεια. Ο ωκεανός της Νέο-Τηθύος άνοιγε συνεχώς κατά το Ιουρασικό και την Πρώιμη Κρητιδική περίοδο, καθώς η Αφρικανική ήπειρος μετακινήθηκε σταδιακά μακριά από την Ασία. Κατά το Μέσω-Κρητιδικό(119 Ma) η Αφρικανική πλάκα μετακινήθηκε προς τα Βόρεια (Dewey et al., 1973; Dilek et al., 1990; Poole and Robertson, 1991) ξεκινώντας το κλείσιμο της Νέο-Τηθύος που και συνεχίστηκε για τα τελευταία εκατομμύρια χρόνια. Το κλείσιμο του ωκεανού ολοκληρώθηκε σε λίγα εκατομμύρια χρόνια (Edwards et al., 2010) όταν η Αφρική συγκρούστηκε με την Ευρώπη.

3.2 ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΣ ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΩΝ

Τα κοιτάσματα συμπαγών σουλφιδίων σχηματίζονται σε θαλάσσιο τεκτονικό περιβάλλον όπου υπάρχει μια ισχυρή χωρική και χρονική σχέση μεταξύ του μαγματισμού, της σεισμικότητας και της υψηλής θερμοκρασίας εξαιρισμού. Αυτές οι ρυθμίσεις περιλαμβάνουν μεσο-ωκεάνιες ράχες, ηφαιστειακά τόξα, οπισθοτόξιες λεκάνες και λεκάνες ηπειρωτικής διάρρηξης (Σχήμα 3.2.1)

Το σημερινό σύστημα μεσο-ωκεάνιων ράχων σχηματίζει μια υποθαλάσσια οροσειρά μήκους 50.000χλμ. και έχει μέσο όρο περίπου 3.000μ. πάνω από τον πυθμένα της θάλασσας. Διαφορετικοί τύποι ράχων διακρίνονται με βάση το ρυθμό εξάπλωσης και τη μορφολογία, οι οποίες ποικίλλουν ανάλογα με τις περιφερειακές τεκτονικές τάσεις και τους ρυθμούς παροχής μάγματος (Sinha and Evans, 2004; Hannington and others, 2005). Αυτοί οι παράγοντες επηρεάζουν επίσης το μέγεθος των υδροθερμικών συστημάτων μεταφοράς στις ράχες και υπάρχει μια γενική θετική συσχέτιση μεταξύ του αυξανόμενου ρυθμού εξάπλωσης και της συχνότητας εμφάνισης της υδροθερμικής έκχυσης (Baker και others, 1996; Baker, 2009). Στα κέντρα επεκτάσεως (πλήρεις ρυθμοί εξάπλωσης 6 έως ≥ 10 εκατοστά ετησίως [cm / έτος]) όπως η Ανατολή του Ειρηνικού Ωκεανού τα ρευστά υψηλής θερμοκρασίας κυκλοφορούν σε σχετικά ρηχά βάθη (1-2χλμ) (Εικόνα 3.2.1) λόγω της διακοπτόμενης παρουσίας του μάγματος σε αβαθής θαλάμους και το άνοιγμα συσχετίζεται στενά με τις περιοχές των πιο πρόσφατων ηφαιστειακών εκχύσεων.

Ωστόσο, τα κοιτάσματα που σχηματίζονται σε κέντρα επεκτάσεων τείνουν να είναι μικρά (λιγότερο από μερικές χιλιάδες τόνους) επειδή οι συχνές εκρήξεις τείνουν να διαταράσσουν τη ροή των υδροθερμικών ρευστών και να θάβουν τις σουλφιδικές συσσωρεύσεις και επειδή τα σύμπλοκα εξαιρισμού γρήγορα μετατοπίζονται από την πηγή θερμότητας τους μέσω του ρυθμού ταχείας επέκτασης (Hannington και άλλοι, 2005). Τα κέντρα επεκτάσεως (4–6 cm / έτος), όπως τα συστήματα Juan de Fuca και Gorda Ridge και το Galapagos Rift στον Ανατολικό Ειρηνικό Ωκεανό, χαρακτηρίζονται από χαμηλότερα ποσοστά παροχής μάγματος, βαθύτερες αξονικές κοιλάδες και καλύτερο δομικό έλεγχο της ροής του υδροθερμικού ρευστού από ό, τι στις μεσο-ωκεάνιες ράχες. Τα κέντρα επεκτάσεων έχουν μερικά από τα μεγαλύτερα γνωστά vent fields, με οπές να επικεντρώνονται συνήθως κατά μήκος του τεκτονικού βυθίσματος ή στις ζώνες αξονικής διάρρηξης. Για παράδειγμα, το τμήμα Endeavour του Juan de Fuca Ridge έχει 50-100 black-smokers που βρίσκονται σε έξι ομοιόμορφα πεδία εξαιρισμού, σε απόσταση 2-3 χιλιομέτρων, κατά μήκος ενός τμήματος 15 χιλιομέτρων της αξονικής κοιλάδας (Delaney and others, 1992; Kelley and others, 2001). Η αργή επέκταση ράχων (1,4 cm / έτος) όπως η Μέσο-Ατλαντική ράχη μεταξύ 13°-15° Βόρεια, χαρακτηρίζονται από χαμηλούς ρυθμούς τροφοδοσίας μάγματος και τοπική διακοπτόμενη έκχυση βασαλτών. Αυτές οι ράχες δείχνουν έντονη τεκτονική επέκταση που χαρακτηρίζεται από μεγάλες ποσότητες κανονικών ρηγμάτων και διεισδύσεις γάββρου και σερπεντινωμένων υπερμαφικών πετρωμάτων του πυρήνα που σχηματίστηκαν σε detachment ρήγματα (Escartin and others, 2008; Smith and others, 2008). Σε αρκετές τοποθεσίες κατά μήκος της Μέσο-Ατλαντικής ράχης τα black smokers και τα συμπαγή σουλφιδικά κοιτάσματα χαρακτηρίζονται από εμπλουτισμούς σε στοιχεία ομάδας Ni, Co και πλατίνας, εμφανίζονται στην επιφάνεια από υπερμαφικά σερπεντινωμένα πετρώματα που αντιπροσωπεύουν εκτεθειμένο μανδύα (Krasnov and others, 1995; Bogdanov and others, 1997; McCaig and others, 2007).

3.3 ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΑ ΤΥΠΟΥ ΚΥΠΡΟΥ

Αρκετές γεωλογικές έρευνες που σχετίζονται με την δημιουργία νέου ωκεάνιου φλοιού και την τοποθέτηση και την επακόλουθη ταφή των σουλφιδικών φακών πρέπει να λαμβάνεται υπόψη κατά την εξέταση των ηφαιστειογενών κοιτασμάτων συμπαγών σουλφιδίων τύπου Κύπρου. Οι μεσο-ωκεάνιες ράχες είναι ένα χαρακτηριστικό περιβάλλον σχηματισμού των VMS κοιτασμάτων τύπου Κύπρου. Για αυτό το λόγο, η γεωλογία της Κύπρου στο

τεκτονικό περιβάλλον της Ανατολικής Μεσογείου αποτελεί βασικό χαρακτηριστικό για την γένεση και εξέλιξη του οφιολίθου του Τροόδους.

Ανάλογα με το γεωδυναμικό περιβάλλον χωρίζονται σε αποκλίνοντα περιθώρια , συγκλίνοντα και ενδοπλακικά. Τα κοιτάσματα VMS σχηματίζονται σε μεσο-ωκεάνιες ράχες, οπισθοτόξιες λεκάνες, ηφαιστειακά τόξα και λεκάνες ηπειρωτικής διάρρηξης και η λιθολογία είναι μαφική (Hannington et al. (2005), Van Kranendonk (2007), Franklin et al. (2005) and Huston et al. (2010)) (Πίνακας 3.3.1).

Στα συγκλίνοντα περιθώρια η Κύπρος βρίσκεται στην Ανατολική Μεσόγειο και αποτελείται από τέσσερις σειρές (Εικόνα 3.3.2): την σειρά της Κερύνειας, την πεδιάδα της Μεσαορίας, τον όγκο του Τροόδους και το σύμπλεγμα της Μαμώνιας. (e.g. Robertson and Xenophontos, 1993). Τα κοιτάσματα σουλφιδίων τύπου Κύπρου βρίσκονται στα πετρώματα του οφιολίθου του Τροόδους . Το ορεινό σύμπλεγμα Τρόοδος θεωρείται ωκεάνιο τέμαχος Μεσοζωικού το οποίο είναι αποτέλεσμα σύγκρουσης της Ευρασίας με την Αφρική. (Gass and Masson-Smith, 1963; Moores and Vine, 1971). Αποτελεί μέρος της νότιας ζώνης των μη παραμορφωμένων οφιολίθων της Baer-Bassit (Συρία) και Kizildag (Τουρκία) που αποχωρίστηκε από την βόρεια ζώνη παραμορφωμένων οφιολίθων, την Ταυριδική ζώνη. Έχουν εκφραστεί διάφορες απόψεις για το περιβάλλον δημιουργίας του Τροόδους , η επικρατούσα άποψη ότι ο πυθμένας εκτείνεται πάνω από μία ζώνη υποβύθισης περίπου 91Ma (Mukasa and Ludden, 1987). Πιο συγκεκριμένες απόψεις μεταξύ εμπρος και οπισθοτόξιων λεκανών έχουν προταθεί για την παρουσία του μάγματος με μπονινιτικούς αφινίτες (Galley και Koski, 1999) (Εικόνα 3.3.2).

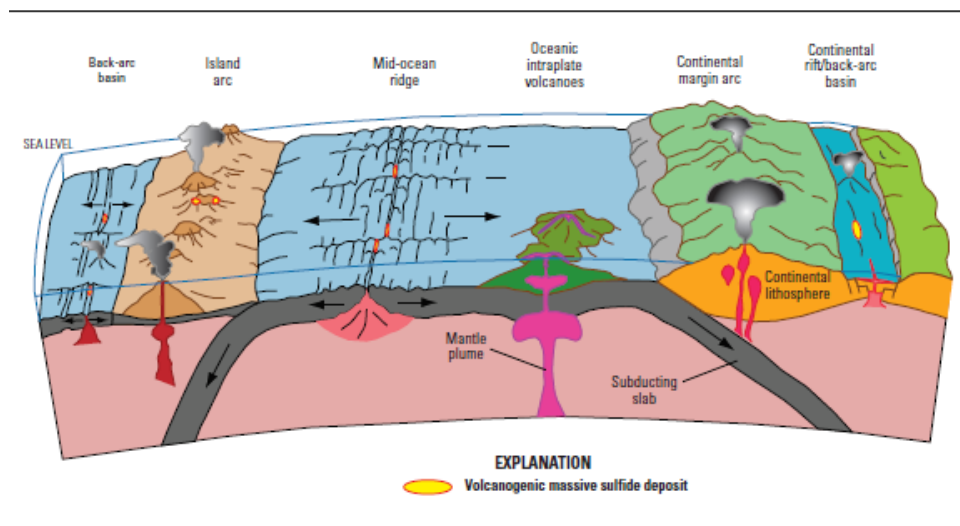
Η κυκλοφορία των υδροθερμικών διαλυμάτων στο κέντρο της μεσο-ωκεάνιας επέκτασης πιστεύεται ότι οφείλει τον σχηματισμό των συμπαγών σουλφιδίων του Τροόδους (Parmentier and Spooner, 1978). Στον ωκεάνιο φλοιό δημιουργούνται θερμικοί πυρήνες μεταφοράς , λόγω της καθοδικής πορείας του θαλασσινού νερού μέσω εκτεταμένων ρηγμάτων προς τον μαγματικό θάλαμο, όπου τα ρευστά θερμαίνονται μέσω ενός λεπτού στρώματος. Τα θερμά ρευστά ανεβαίνουν στην επιφάνεια μέσω κυλινδρικών ανοδικών ζωνών (Counou et al., 2008) , όπου συγκεντρώνονται κυρίως σε μεγάλα κανονικά ρήγματα (McCaig et al., 2007), πριν απομακρυνθούν μέσω μιας διαπερατής ζώνης ρήγματος (Cann et al., 1985) (Εικόνα 3.3.3) .

Το σύμπλεγμα της Μαμώνιας το οποίο εμφανίζεται ως διαβρωμένο παράθυρο στα ΝΔ της Κύπρου , αποτελείται από Τριαδικά μάγματα , ιζηματογενή πετρώματα Μεσοζωικού και οφιολιθικά πετρώματα Τροόδους συμπεριλαμβάνοντας ηφαιστειογενή μεταμορφικά πετρώματα σε ρηματογενείς ζώνες . Τρία κύρια τεκτονικά χαρακτηριστικά που έχουν

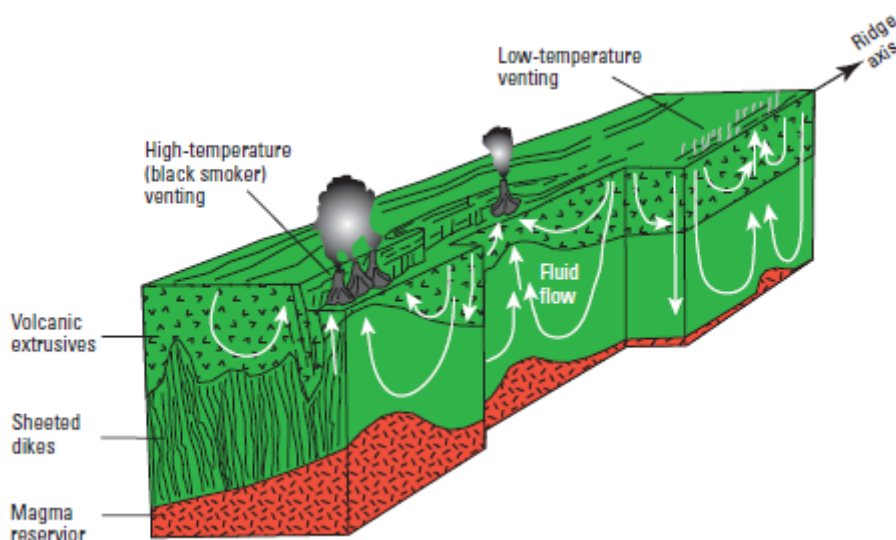
αναγνωρίζεται στο σύμπλεγμα της Μαμώνιας είναι: το χαμηλότερο από αυτά ο Διαρίζος που περιλαμβάνει Μεσοζωικά ηφαιστειακά ιζήματα, τα οποία σχηματίστηκαν κατά το άνοιγμα του ωκεανού της Τηθύος που προηγείται του σχηματισμού του Τροόδους (Robertson 1990). Η δεύτερη σειρά αποτελείται από Άνω-Κρητιδικά οφιολιθικά πετρώματα, σερπεντινωμένες στρώσεις και μεταμορφικά πετρώματα αβέβαιης προέλευσης. Τα οφιολιθικά πετρώματα υπέρκεινται από μια σειρά ρωών πάχους εκατοντάδων μέτρων γνωστή ως σειρά Κάθικας (Swarbrick, 1980). Το ανώτερο τμήμα του συμπλέγματος Μαμώνια περιέχει δευτερευόντως μεταμορφικές ενότητες, οι οποίες πιστεύεται ότι αντιπροσωπεύουν μια μεταμορφική βάση, όπως παρατηρείται σε άλλους οφιολίθους της Τηθύος (Robertson 2002). Αυτή η βάση εικάζεται ότι βρίσκεται στο θερμότερο ανώτερο μανδύα, τμήμα πάνω από το οποίο ωθεί τα πετρώματα του φλοιού κατά τη σύγκρουση. Ωστόσο καμία μεταμορφική βάση δεν έχει παρατηρηθεί κάτω από το Τροόδους (Robertson and Xenophontos, 1993). Η Μαμώνια καταγράφει πιθανώς τη διάσπαση ενός Μεσοζωικού ηπειρωτικού παθητικού περιθωρίου κατά τη σύγκλιση πλακών με την μικροπλάκα του Τροόδους.

Η σειρά της Κερύνειας αποτελείται από ασβεστόλιθους Περμίου που σχηματίστηκαν στη βορειοδυτική πλάκα της Γκοτβάνας. Τα ιζήματα που αντιπροσωπεύουν τα παλαιότερα πετρώματα της Κύπρου, τα οποία εκτείνονται ως μια σειρά λόφων με Ανατολική-Δυτική κατεύθυνση κατά μήκος της Βόρειας ακτής του νησιού. Το Τριαδικό ρήγμα της Γκοντβάνας μπορεί να έχει χωρίσει τη σειρά της Κερύνειας, απομονώνοντας τα πετρώματα της Μαμώνιας στην άκρη μιας μικροηπείρου (LaGroix and Borradaile, 2000). Τα κοιτάσματα του Τροόδους είναι πλούσια σε Cu και δευτερευόντως Zn, αν και είναι συνηθισμένες πυριτικές αποθέσεις είτε Cu είτε Zn. Έχουν πραγματοποιηθεί κάποιες μελέτες στην Σκουριώτισσα και βόρεια στα κοιτάσματα του Μαθιάτη που χαρακτηρίζουν την μορφολογία τους (Hutchinson and Searle, 1971; Constantinou and Govett, 1973). Η γεωλογία της περιοχής στο Νότιο Μαθιάτη σχετίζεται με τα κοιτάσματα της περιοχής του Μιτσερού (Εικόνα 3.3.4), τα οποία βρίσκονται στο κεντρικό τμήμα της περιοχής, μια σειρά από τεκτονικά χαρακτηριστικά που συνδέεται με την εξέλιξη του οφιόλιθου. Το τεκτονικό αυτό βύθισμα έχει βόρεια κατεύθυνση. (Adamides, N. G. 1984. Cyprus volcanogenic sulphide deposits in relation to their environment of formation, PhD thesis, University of Leicester, UK.). Η Αγροκηπιά είναι ένα μικρό μαζώδες σουλφιδικό κοιτάσμα που εντοπίζεται ανάμεσα στην επαφή των Άνω και Κάτω Pillow Lavas (Bear, 1960, Constantinou and Govett, 1973).

Το Τροόδος εμφανίζει δομικά χαρακτηριστικά παρόμοια με τα σύγχρονα κέντρα χαμηλής εξάπλωσης (Varga and Moores, 1985; Allerton and Vine, 1987). Συγκεκριμένα όπως είναι τα ρήγματα αποκόλλησης (Κακοπετριά) και η περιστροφή των ανώτερων τμημάτων του φλοιού υποδηλώνουν ότι η εξάπλωση δεν έγινε αποκλειστικά από μαγματισμό αλλά και με λέπτυνση του φλοιού μέσω ρηγμάτων (Dietrich and Spencer, 1993; Nuriel et al., 2009; Varga and Moores, 1990). Ωστόσο, έχουν προταθεί αρκετά πιθανά σενάρια σε μια προσπάθεια ανασυγκρότησης του περιβάλλοντος εξάπλωσης του Τροόδους.



Σχήμα 3.2.1 Σχηματικό διάγραμμα που δείχνει τα ηφαιστειογενή κοιτάσματα συμπαγών σουλφιδίων σε περιβάλλοντα από μεσο-ωκεάνιες ράχες, ηφαιστειακά τόξα, οπισθοτόξιες λεκάνες και λεκάνες ηπειρωτικής διάρρηξης Modified from Schmincke (2004) and Galley and others (2007).



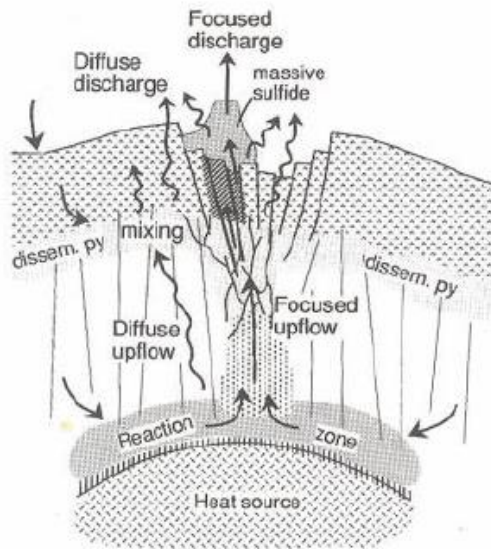
Εικόνα 3.2.1 Σχηματικό διάγραμμα που δείχνει την ροή του υδροθερμικού ρευστού (East Pacific Rise). Οι υψηλές θερμοκρασίες των οπών (black smoker) εμφανίζονται πάνω από τα πιο ρηχά τμήματα της πηγής αζονικού μάγματος Modified from Haymon and others (1991).

Geodynamic setting	Tectonic Environment	Environment sub-type	Lithographic association	Type-example	Average size (Mt)	Average Cu grade (%)	Average Au grade (g/t)
<u>Divergent</u>	Intracontinental rift		Clastic-dominated sediment hosted	Iberian-Pyrite Belt-type,			
	<u>Mid-Oceanic ridges</u>	Slow spreading	Mafic, pelitic-mafic	Cyprus-type, Besshi-type			
		<u>Intermediate-rate</u>	<u>Mafic</u>	<u>Cyprus-type</u>	1.6	1.7	2.56
		Fast-spreading	Mafic	Cyprus-type,			
		Sedimented ridges	Pelitic-mafic	Besshi-type,	11.0	1.74	0.84
<u>Convergent</u>	Arc-related	(Rifted) intraoceanic arc	Bimodal-mafic	Noranda-type			
		Intraoceanic back-arc	Mafic/pelitic-mafic	Cyprus-type/Besshi-type			
		(Rifted) intracratonic arc	Bimodal-felsic	Kuroko-type	5.2	1.44	2.06
		Intracratonic back-arc	Bimodal-felsic, siliciclastic-felsic	Iberian Pyrite Belt-type	23.7	1.10	1.13
	Other convergent environments	Extension related to oblique collision (Tornos, 2005)	Siliciclastic-felsic	Iberian Pyrite Belt-type			
		Postcollisional extension (Crawford, 1992)	Bimodal-felsic	Kuroko-type			
<u>Intraplate</u>	Plume or hot spot	Intraplate volcano	Mafic	Cyprus-type			
		Oceanic plateau	Bimodal-mafic	Noranda-type			

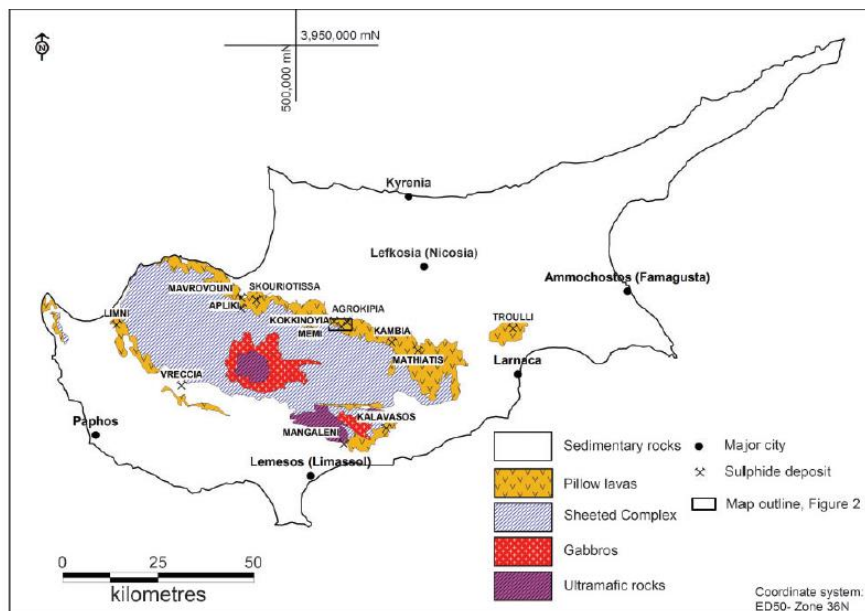
Πίνακας 3.3.1 Σύγκριση της γεωδυναμικής, τεκτονικής και λιθολογίας και ταξινόμηση VMS κοιτασμάτων, παγκόσμια κατανομή Cu και Au (μη συμπεριλαμβανομένης της Κίνας (Hannington et al. (2005), Van Kranendonk (2007), Franklin et al. (2005) and Huston et al. (2010).)



Εικόνα 3.3.2 Σύνοψη γεωλογίας της Κύπρου. Robertson and Xenophontos (1993)



Εικόνα 3.3.3 Σχηματική απεικόνιση του ωκεανού κάτω από τις υδροθερμικές διεξόδους (hydrothermal vents). Το μέταλλευμα δημιουργείται κατά μήκος εκτεταμένων ρηγμάτων σαν φακούς. Η διάχυτη έκχυση προκύπτει από ανάμειξη του ρευστού και του θαλασσινού νερού στα περιθώρια των ζωνών υπερχείλισης.



Εικόνα 3.3.4 Γεωλογία του οφιολίθου του Τροόδους. (Adamides, N. G. 1984. Cyprus volcanogenic sulphide deposits in relation to their environment of formation, PhD thesis, University of Leicester, UK

4. ΠΕΤΡΟΓΡΑΦΙΑ ΠΕΤΡΩΜΑΤΩΝ ΞΕΝΙΣΤΩΝ

Έχουν προταθεί διάφορα σχήματα ταξινόμησης για κάθε μονάδα με βάση διαφορετικά χαρακτηριστικά (Εικόνα 4.1).

Το Τμήμα Γεωλογικής Επισκόπησης της Κύπρου (GSD) ταξινόμησε αρχικά την ηφαιστειακή ακολουθία του οφιολίθου του Τροόδους, Upper Pillow Lavas, Lower Pillow Lavas και τον μεταβατικό ορίζοντα της Βασαλτικής ομάδας μεταξύ του Sheeted Dyke Complex (SDC). Οι pillow lavas αποκαλύπτονται εκτενώς γύρω από την περιφέρεια του οφιολίθου στις βόρειες και νότιες πλευρές του Τροόδους (Εικόνα 4.2). (Carr and Bear 1960; Gass 1960). Αυτές οι πρώτες ταξινομήσεις βασίστηκαν σε παρατηρήσεις πεδίου που εμφανίζονταν, τότε, συνεχείς σε ολόκληρο τον οφιολίθο.

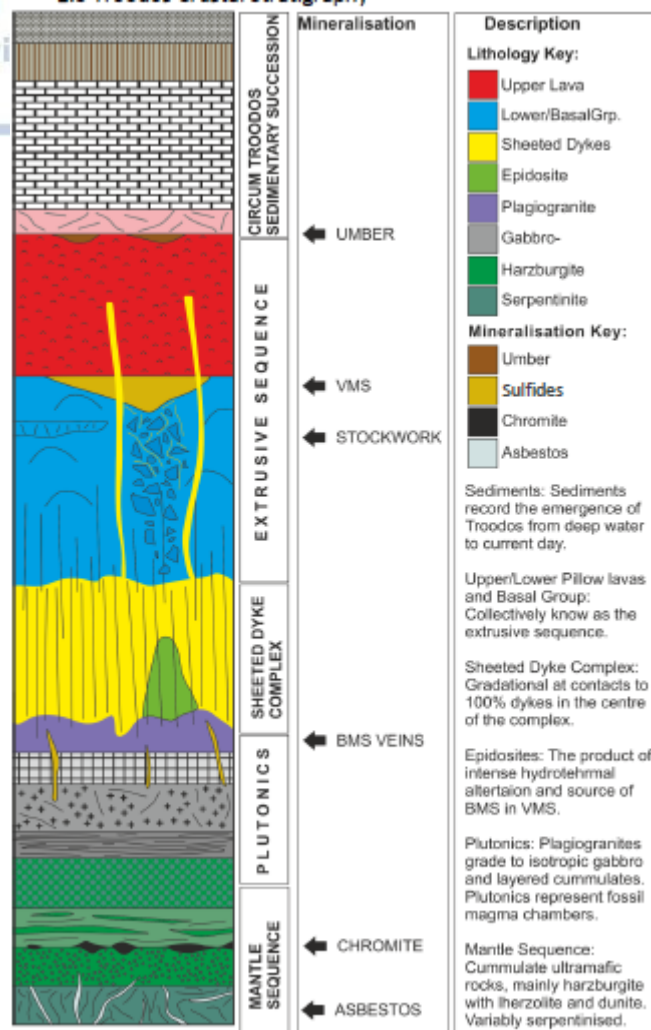
Η ανώτερη ομάδα Pillow Lavas είναι γενικά μικρού πλάτους <1m. Περιέχει ολιβίνη με φαινοκρυστάλλους αργιλικών ορυκτών (Carr and Bear, 1960; Gass, 1960). Η ούμβρα είναι χαρακτηριστική στη βάση των ιζημάτων των UPL και είναι πλούσια σε ιχνοστοιχεία καστανού χρώματος ιζήματα (Robertson, 1975). Αποτελούν μέρος του σχηματισμού Πέρα Πεδί και δημιουργούν κοίλωμα στον πυθμένα της θάλασσας. Συνήθως είναι σκούρο καφέ-μαύρο χρώμα είναι λεπτόκοκκο και πορώδες (Robertson, 1975). Ορυκτολογικά αποτελείται κυρίως από γκαιτίτη και μαγγανίτη με ίχνη REE, Co, Ni, Pb, V, Zn και Zr (Josso et al., 2018; Robertson, 1975). Οι ούμβρες εξάγονται από διάφορες περιοχές της Κύπρου ως χρωστική ουσία.

Οι Lower Pillow Lavas είναι πυριτικές και αφυρικές πλάτους >1m. Η εγκατάλειψη των dykes αυξάνεται από 30-50% στα χαμηλότερα των βασαλτικών ομάδων και γίνεται 100% στο κέντρο του Sheeted Dyke Complex. (Gass, 1990). Τα ξεχωριστά dykes κυμαίνονται από 0,1-3 m πλάτος, είναι λεπτόκοκκα και αφυρικά (Gass, 1960). Τα ψυχρά περιθώρια είναι ευρέως διαδεδομένα στο SDC και διατηρούν τοπικά τη μονόδρομη ψύξη που αντικατοπτρίζει την εισβολή των dykes γύρω από μια κεντρική τοποθεσία (Kidd και Cann, 1974). Τελικά η μονόδρομη ψύξη που διατηρείται εντός των sheeted dykes είναι λανθασμένη καθώς τώρα καταλαβαίνουμε ότι η κρυσταλλική συσσώρευση είναι πολύ πιο περίπλοκη με τα τοπικά εκρηξιγενή κέντρα. Επιπλέον, το μέγεθος του δείγματος που αναλύθηκε από τους Kidd και Cann (1974) ήταν πιθανώς ανεπαρκές για να αντιπροσωπεύσει τις διεργασίες του οφιολίθου. Η μετάβαση μεταξύ του SDC και των ανώτερων πλουτωνικών είναι διαβαθμισμένη σε αρκετά μέτρα. Ένας μικρός αριθμός αναχωμάτων παρατηρείται κατά μήκος των γαββρικών σωμάτων που δείχνουν ότι ο

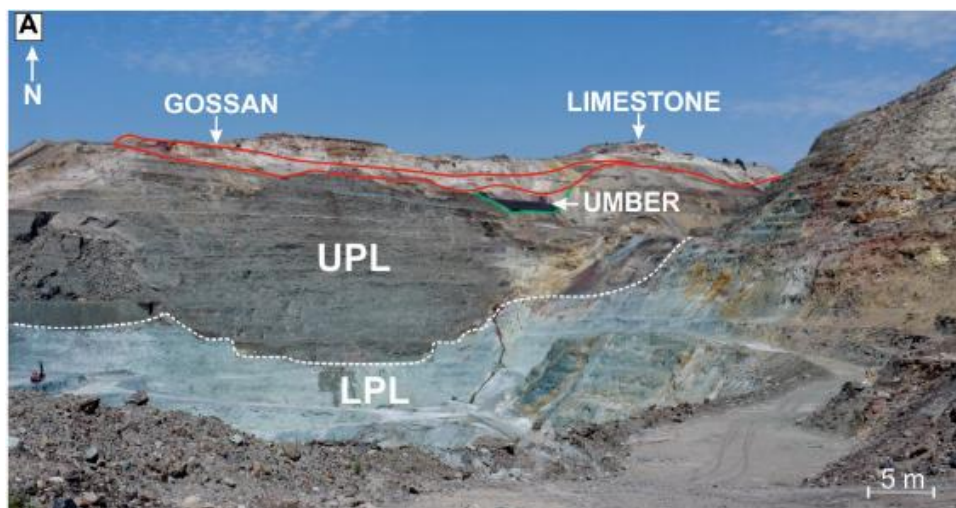
σχηματισμός των dykes δεν είναι αμοιβαίος με το σχηματισμό των ανώτερων πλουτωνιτών (Gass, 1990).

Τα Dykes δρουν ως αγωγοί για την ανάβαση του μάγματος από τον πλουτωνίτη στον πυθμένα της θάλασσας τροφοδοτώντας την έκχυτη στρωματογραφική ακολουθία παραπάνω. Τα SDC είχαν εισέλθει κατακόρυφα κατά τη διάρκεια των επεκτάσεων των λεκανών (Cooke et al., 2014; Varga, 1991) και στη συνέχεια διαχωρίστηκαν σε εννέα κλάδους (Varga, 1991). Η κύρια διεύθυνση των dykes είναι BBA-NNΔ με εξαίρεση τον Αρακαπά και νότια του Μιτσερό (Varga, 1991; Varga and Moores, 1990).

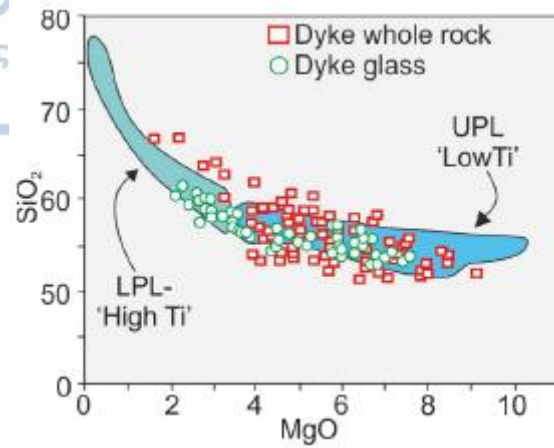
Η γεωχημεία των dykes και των pillow lavas μπορούν να χωριστούν σε δύο ομάδες, υψηλού και χαμηλού Ti (Σχήμα 4.1) (Staudigel et al., 2000). Δύο διακεκριμένες τάσεις των Sheeted Dyke Complex αναγνωρίστηκαν και σχετίζονται κυρίως με εκείνες που πρότειναν οι Schmicke et al. (1983) για υπερκείμενες μονάδες λαβών. Οι σειρές χαμηλού Ti (που αντιστοιχούν στο UPL, $<0,8\%$ TiO_2) είναι βασαλτικές έως ανδεσιτικές και μειωμένη σε συμβατά στοιχεία, ενώ η υψηλή σειρά Ti περιλαμβάνει ανδεσίτες έως ρυόλιθους (Staudigel et al., 2000). Περίπου το 20% των dykes αντιστοιχούν στη χαμηλή σειρά TiO_2 «UPL» Baragar et al., 1990; Schouten and Kelemen, 2002)



Εικόνα 4.1 Απλοποιημένη στρωματογραφική ενότητα της ωκεάνιας λιθόσφαιρας και ιζημάτων του Τροόδους



Εικόνα 4.2 Ιζήματα-UPL-LPL στο ορυχείο της Σκουριώτισσας. Το UPL είναι σκούρο γκρι και διαχωρίζεται από το LPL από το ρήγμα Phoucasa.



Σχήμα 4.1 Σύγκριση μεταξύ γεωχημείας των dykes και της λάβας. Η σύνθεση των UPL και LPL είναι προσδιορισμένες εντός του Sheeted Dyke Complex (after Staudigel et al., 2000).

5. ΟΡΥΚΤΟΛΟΓΙΚΗ ΚΑΙ ΧΗΜΙΚΗ ΣΥΣΤΑΣΗ ΤΗΣ ΜΕΤΑΛΛΟΦΟΡΙΑΣ ΚΑΙ ΕΞΑΛΛΟΙΩΣΕΩΝ

Το πλουτωνικό σύμπλεγμα του Τροόδους υποδιαιρείται σε ισοτροπικούς γάββρους και μια σωρρειτική αλληλουχία (Gass, 1980). Η αλληλουχία βρίσκεται στο σύμπλεγμα ορίου μεταξύ του ομοιογενούς γάββρου και του τεκτονισμένου χαρτσβουργίτη που οριοθετεί την μετάβαση σε διαφορετικές λιθολογίες του μανδύα. Ο κατώτερος φλοιός είναι ετερογενείς από δουνίτη έως βερλίτη στη βάση και πυροξενίτη σε γάββρο (George, 1978; Thy, 1987). Οι συσσωρεύσεις εμφανίζουν δομές από στρωματωειδής μορφές που σχηματίζονται από τον διαχωρισμό των κρυστάλλων κατά την κλασματική κρυστάλλωση (Gass, 1980; Greenbaum, 1977).

Οι πλαγιογρανίτες θεωρείται ότι αντιπροσωπεύουν (μέσω κλασματικής κρυστάλλωσης) λιωμένους φακούς που αποτελούν άμεση στήριξη του Sheeted Dyke Complex (Freund et al., 2014). Εναλλακτικά, σχηματίστηκαν μέσω της αφομοίωσης του ενυδατωμένου υλικού SDC από ένα αρχικά γαββρικό σώμα κατά την άνοδο του μάγματος (Grimes et al., 2013). Οι πλαγιογρανίτες προεξέχουν ακανόνιστα μεταξύ του γάββρου και του SDC σε αρκετές περιοχές (Freund et al., 2014; Gass, 1980). Είναι λεπτόκοκκοι έως μεσοκόκκοι με ορυκτολογία αποτελούμενη από χαλαζία, πλαγιόκλαστο, αμφίβολο ± τιτανίτη, επίδοτο, κλινοπυρόξενο, μαγνητίτη, ζirkόνιο και απατίτη (Freund et al., 2014). Οι πλαγιογρανίτες που βρίσκονται στο μέτωπο μεταξύ του Sheeted Dyke Complex και του γάββρου εμφανίζουν συνθήκες υδροθερμικής εξαλλοίωσης με δευτερογενή χαλαζία, επίδοτο και αμφίβολο που υποδηλώνουν μεταμόρφωση του πρασινοσχιστόλιθου σε μεταμορφικούς αμφιβολίτες με θερμοκρασίες $>350^{\circ}\text{C}$ σε υδροθερμικά ρευστά (Freund et al., 2014; Gillis and Roberts, 1999)). Η πλουτωνική ακολουθία είναι μεσαίου έως χονδρόκοκκου γάββρου και ολιβινικού γάββρου. Η ορυκτολογία κυριαρχείται από πλαγιόκλαστο, ενστατίτη και πυροξένο (Thy, 1987; Vine and Smith 1990). Η ομοιογενής φύση του γάββρου και η αλληλεπίδραση μεταξύ των πλούσιων σε ολιβίνη γάββρων υποδηλώνει ότι τα τήγματα δημιουργήθηκαν από πολλαπλές εισροές μάγματος που εισέβαλαν σε διαφορετικά επίπεδα του κατώτερου φλοιού (Abelson et al., 2001).

Τα Sheeted Dyke εισχώρησαν κάθετα στον άξονα εξάπλωσης των ορυκτών με τα dykes να εκμεταλλεύονται τα επίπεδα στην κατεύθυνση με την μικρότερη τάση, δηλαδή παράλληλα προς τον άξονα διασποράς (σ_2). Η σημερινή διεύθυνση των dykes είναι B-N που υποδηλώνει έναν προσανατολισμό A-Δ κατά την παλαιοεπέκταση (Σχήμα 5.1). Χρησιμοποιώντας τον δομικό προσανατολισμό των dykes, εννέα δομικοί τομείς έχουν

αναγνωρίζεται στο Τροόδους (Σχήμα 5.1, Moores et al., 2000). Τα αντίθετα dyke dip οριοθετούν τρία κύρια τεκτονικά βυθίσματα όπως ορίζει η περιοχή των Sheeted Dyke Complex με σύμφωνες διευθύνσεις ,αναστρέφοντας την πολικότητα σε αντίθετη διεύθυνση κατά μήκος ενός διακριτού τεκτονικού βυθίσματος (Varga and Moores, 1985; Varga, 1991 Moores et al., 2000). Οι Dietrich και Spencer (1993) σημειώνουν ότι η εξάπλωση στο Τροόδους προσαρμόζεται μέσω ενός δικτύου κανονικών ρηγμάτων μικρής κλίμακας που σχηματίστηκαν πολύ κοντά στον άξονα κορυφογραμμής. Αυτά τα ρήγματα μικρής κλίμακας συχνά κόβουν κατά μήκος των μεγαλύτερων επιπέδων των ρηγμάτων (detachments), που φιλοξενούν τη διαδοχή του ανώτερου φλοιού (Dietrich and Spencer, 1993). Στη βόρεια πλευρά του Τροόδους διακρίνονται τρία τεκτονικά βυθίσματα από Δ-Α: η Σολέα , το Μιτσερό και το τεκτονικό βύθισμα της Λάρνακας (Varga and Moores, 1985; Dietrich and Spencer 1993).

Το τμήμα του μανδύα του Τροόδους ξεπερνά το τοπογραφικά υψηλότερο σημείο του Ολύμπου (1950μ.) . Οι χαρτσβουργίτες αποτελούν το 80% του συνολικού μανδύα και πιστεύεται ότι έχουν σχηματιστεί από τήγμα πλαγιοκλαστικού λερζολίθου από το οποίο έχει αποσπασθεί βασαλτικό τήγμα (Gass, 1980; George, 1978; Greenbaum, 1972). Αυτό υποστηρίζεται λόγω της ύπαρξης λοβολίθων πλαγιοκλάστου μέσα στους χαρτσβουργίτες. Το υπόλοιπο 20% είναι δουνίτης, λερζόλιθος και πυροξενικός γάββρος που εμφανίζονται ως δευτερεύοντα σώματα στον μανδύα του Τροόδους (Gass, 1980). Το κέντρο της ανατολικής μανδυακής ακολουθίας έχει υποστεί σερπεντινίωση στο κέντρο του ρήγματος του Αμιάντου, ενώ στο δυτικό τμήμα παραμένει σε μεγάλο βαθμό χωρίς σερπεντινίτη περιλαμβάνοντας δουνίτη, λερζόλιθο, χαρτσβουργίτη με podiform χρωμίτες (Gass, 1980).

Ορυκτολογία και πετρογραφία του κοιτάσματος:

Τα ορυκτά του κοιτάσματος εμφανίζονται σε διαφορετικά επίπεδα της στρωματογραφίας του οφιολίθου του Τροόδους. Στο Τροόδους φιλοξενούνται σημαντικά ποσοστά αμιάντου , βιομηχανικών πετρωμάτων, γύψου , χρωμίτη και μικρή ποσότητα χρυσού. Ο αμιάντος σχηματίστηκε μέσα σε σερπεντινιωμένα τμήματα του μανδύα και εμφανίζεται κυρίως σαν φλέβες χρυσότιλου (Nuriel et al., 2009).

Ο podiform χρωμίτης συνδέεται με τον δουνίτη και τον χαρτσβουργίτη στην ακολουθία του μανδύα του Τροόδους. Ο χρωμίτης σχηματίζεται σε τέσσερις κύριες φάσεις: μαζί με τον δουνίτη (<5% Cr₂O₃), ως χρωμιτόμορφους δουνίτες (5-50% Cr₂O₃), ολιβινικοί χρωμίτες (51-90% Cr₂O₃) ή συμπαγής χρωμίτης (> 90% Cr₂O₃) (Greenbaum 1977,

McElduff and Stumpfl, 1991). Ο χρωμίτης εξορύσσεται ιστορικά στο Τροόδες , για παράδειγμα στον Κοκκινόροτο, ο οποίος παρήγαγε >1 Mt μεταλλεύματος χρωμίτη σε 47% Cr₂O₃ (Greenbaum, 1977). Συνολικά είναι γνωστές 64 καταθέσεις, αλλά πολλές είναι υπο-οικονομικές (Greenbaum, 1977). Η πρώιμη σωρρευτική αλληλουχία περιλαμβάνει γάββρο και πυροξενίτη που εμφανίζουν μια καλά ανεπτυγμένη τεκτονική δομή και μικρής κλίμακας ισοκλινής πτυχής (Banks, 2004). Η ισχυρή τεκτονική δομή στην αρχική σύνθεση ερμηνεύεται ότι έχει σχηματιστεί κατά τη διάρκεια της επέκτασης του ωκεανού (Ableson et al., 2001; Banks, 2004; George, 1978; Thy, 1987).

Όσον αφορά την πετρογραφία του μεταλλευμάτος τα δείγματα των σουλφιδίων έχουν ταξινομηθεί στις ακόλουθες μορφολογικές κατηγορίες: μαζώδης, ημι-μαζώδης, αποθέματα, διασπορά και ίασπις.

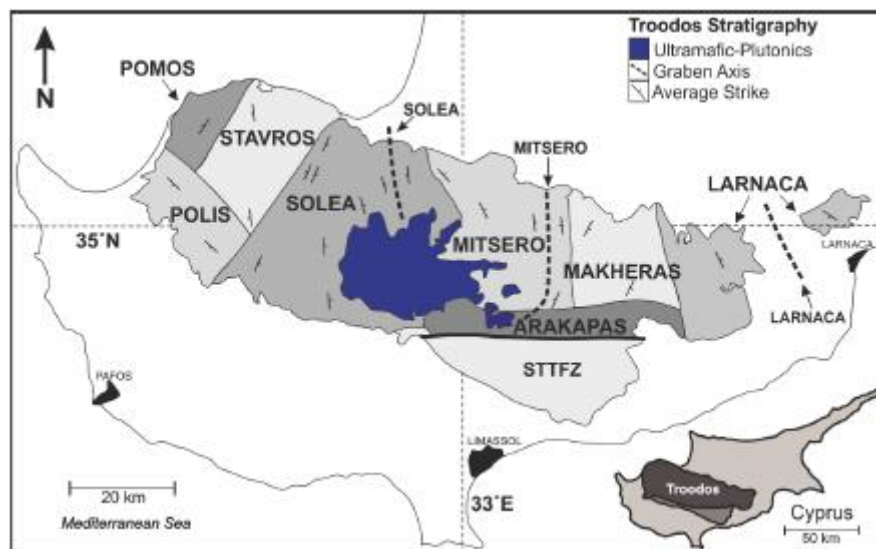
Ο σιδηροπυρίτης υπάρχει σε όλα τα δείγματα (Πίνακας 5.1). Η υφή και η μορφολογία ποικίλλουν αντανakλώντας τις συνθήκες ρευστού υπό τις οποίες σχηματίστηκε (π.χ. θερμοκρασία, FO₂, FS₂ κ.λπ.). Εμφανίζεται ως μαζώδης (> 75%), ημι-μαζώδης (50-75%) (Σχήμα 5.2 Γ), κολλοφόρμιο, διαδίδεται (10-20%) (Σχήμα 5.1) σε ποικιλίες φλεβών. Μέσα σε αυτές τις υφές, οι κόκκοι σιδηροπυρίτη ποικίλλουν από τον euhedral έως τον anhedral και σπάνια framboidal. Πολλοί κόκκοι παρουσιάζουν ένα βαθμό διάλυσης με τον οποίο αρχικά ο σιδηροπυρίτης μπορεί να μετατραπεί σε υφές υπόθερμου ή «φτερωτού». Ο κοκκώδης σιδηροπυρίτης είναι συνηθισμένος στην ανώτερη στρωματογραφία VMS με φραβοειδείς κόκκους, που συνδέονται με γιαροσίτη, γκαιτίτη και κοβελίνη. Οι απορροφημένοι κόκκοι εμφανίζουν συνήθως έναν πορώδη ή λαμπερό πυρήνα. Αυτό είναι ιδιαίτερα συνηθισμένο για τα ιασπικά δείγματα όπου το σιδηροπυρίτης είναι συνυφασμένος με αιματίτη και διοξείδιο του πυριτίου. Ο γαλινίτης και σφαλερίτης υπάρχουν σε ορισμένους κόκκους πυρίτη και συνήθως έχουν μικρό μέγεθος (Moore et al. (1990))(Σχήμα 5.1).

Ο χαλκοπυρίτης (CuFeS₂) είναι το κύριο ορυκτό που φέρει Cu σε VMS τύπου Κύπρου και εμφανίζεται ενδιάμεσα σε συμπαγή σιδηροπυρίτη. Στα κοιτάσματα, ο χαλκοπυρίτης είναι συχνά μαζώδης, φιλοξενείται και ως φλέβα (Adamides, 2010a, 2010b) (Σχήμα 3.10). Εντός των υποθαλάσσιων VMS κοιτασμάτων αντικατάστασης, εμφανίζεται χαλκοπυρίτης που σχετίζεται με φλέβες χαλαζία. Ο σφαλερίτης (ZnFe (S)) είναι σπάνιος (<< 1 wt.%) στα VMS τύπου Κύπρου, αλλά εμφανίζεται συχνά ως μικροεγκλείσματα σε άλλα θειούχα (π.χ. σιδηροπυρίτης) (Hannington et al., 1998; Herzig and Hannington, 1995). Ο σφαλερίτης με χαμηλή περιεκτικότητα σε Fe δηλώνει πηγή ρευστού χαμηλής θερμοκρασίας (Keith et al., 2014). Τοπικά υψηλού Fe σφαλερίτη έχει αναλυθεί από τα

μεταλλεύματα Βόρεια του Μαθιάτη (Troodos, Hannington et al., 1998). Ο σφαλερίτης θα μπορούσε ενδεχομένως να χρησιμοποιηθεί για την ανασυγκρότηση της θερμοκρασίας των παλαιών σε καταθέσεις VMS του Τροόδους.

Εξαλλοίωση:

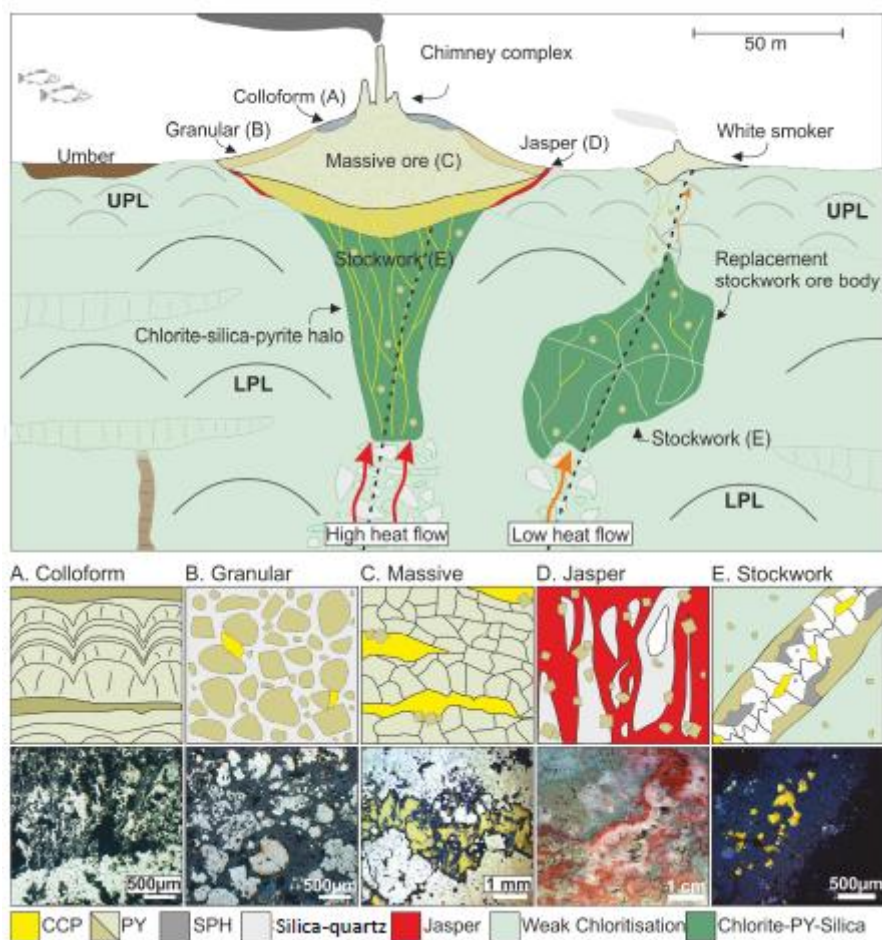
Η ψευδοεπιθερμική μεταλλογένεση εμφανίζει διακριτή ορυκτολογική εξαλλοίωση που παράγεται στον πυθμένα της θάλασσας (Jowitt et al., 2005). Παραδείγματα επιθερμικής μεταλλογένεσης βρίσκονται στο ΝΑ Τροόδους. Ως συνέπεια των ρευστών τα κοιτάσματα εμπλουτίζονται σε Au εμφανίζοντας αλλοιώσεις όπως το dickite που αποδεικνύει παρουσία ρευστών με χαμηλό pH. Αυτά τα κοιτάσματα προτείνονται να είναι παρόμοια με τα επιθερμικά καθώς βρέθηκαν άμεσα με πητικά, ωστόσο τα κοιτάσματα του Τροόδους έχουν σχηματιστεί υποθαλάσσιο περιβάλλον (Jowitt et al., 2005).



Σχήμα 5.1 Περίληψη των δομικών τομέων που ταξινομούνται κατά dyke dip και strike για τον οφιόλιθο του Τροόδους (after Varga and Moores, 1985).

Locality	Location (WGS 1984)	Structural domain	Sample type	Mineral
Limni	045294 3877209	Polis	Disseminated, Massive	PY, CCP
Kynousa/Lysos	045555 3876810	Polis	Massive, Stockwork	PY, SPH, CCP
Pournaji	045529 3876352	Polis	Massive	PY
'77'	045404 3877993	Polis	Massive	PY
Mala	047042 3864323	Solea	Massive	PY
Apliki	048575 3881758	Solea	Stockwork	CV, CCP, PY
Phoucasa	048990 3883713	Solea	Stockwork, Massive	CCP, CV, PY
Phoenix	048993 3884050	Solea	Stockwork, Jasper	CCP, PY
Three Hills	049088 3883189	Solea	Stockwork	CCP, PY
Memi	050366 3877476	Mitsero	Massive, Disseminated	PY
Kokkinopezula	051038 3877259	Mitsero	Jasper	PY
Kokkinoyia	050974 3877946	Mitsero	Stockwork, Massive	PY, CCP
Agrokippia A	051327 3878134	Mitsero	Massive, Disseminated	PY
Agrokippia B	N/A	Mitsero	Stockwork	CCP, PY, SPH
Kaphedes	052394 3871610	Larnaca	Massive, Disseminated	PY
Kampia	052501 3872967	Larnaca	Massive, Jasper	PY
Mathiatis N	053185 3870606	Larnaca	Stockwork, Massive	CCP, PY, SPH
Mathiatis S	053170 3867617	Larnaca	Massive	PY
Sha	053414 3867843	Larnaca	Massive	PY
Kalavasos	052371 3850315	STTFZ	Stockwork	PY

Πίνακας 5.1 Τοποθεσίες και ορυκτά σε καταθέσεις VMS που εξετάστηκαν σε αυτήν τη μελέτη PY = σιδηροπυρίτης, CCP = χαλκοπυρίτης, SPH = σφαλερίτης, CV = κοβελλίνης



Σχήμα 5.1 Περίληψη της κοινής ορυκτολογίας μεταλλεύματος και υφής των VMS του Τροόδους. Τα δευτερεύοντα ορυκτά εμπλουτισμού σχηματίζονται στο Τροόδους κατά τη διάρκεια της οξειδώσεως που σχετίζεται με τον υποθαλάσσιο πυθμένα (Parvaz, 2014; Herzig and Hannington



1991). Κατά τη διάρκεια του εμπλουτισμού, ο χαλκοπυρίτης μεταβάλλεται σε κοβελλίνη (CuS), χαλκοσίνη (Cu_2S), διγενίτης θειούχος χαλκός (Cu_9S_5) και βορνίτη (CuFeS_4). Επιπλέον, η αποσάθρωση μπορεί επίσης να οδηγήσει στο σχηματισμό χαλκανθίτη ($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$), μαλαχίτη ($\text{Cu}_2\text{CO}_3(\text{OH})_2$) και σπάνια αζουρίτη ($\text{Cu}_3(\text{CO}_3)_2(\text{OH})_2$). Τα θειικά και τα ανθρακικά άλατα εμφανίζονται συνήθως σύνδεσμοι επικάλυψης, ειδικά σε περιοχές με υψηλή μετεωρική ροή νερού. Τα δευτερογενή υδροξείδια και θειικά Fe (οξυ) είναι κοινά σε όλες τις εναποθέσεις και παράγονται κατά την οξείδωση του σιδηπυρίτη (Hannington et al., 1998; Parvaz, 2014). Τα σιδηρούν καλύμματα που σχηματίζονται μέσω οξείδωσης σιδηπυρίτη, περιέχουν γκαιτίτη, χαλαζία, αιματίτη και νατριούχο γιαιοσίτη (Herzig et al., 1991; Parvaz, 2014)

6. ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ

Μεταξύ των διάφορων τύπων κοιτασμάτων που συνδέονται με υπερβασικά και βασικά ηφαιστειογενείς κοιτάσματα συμπαγών σουλφιδίων λαμβάνει χώρα το σύμπλεγμα των οφιολίθων που θεωρείται θραύσματα του παλιού ωκεάνιου φλοιού (Εικόνα 6.1). Οι συγγραφείς θεωρούν ότι μόνο τα κοιτάσματα στα οποία έχουν ολοκληρωθεί λίγο πολύ τμήματα συμπλεγμάτων οφιολίθου συμπεριλαμβανομένων(από κατώτερα προς την κορυφή) των τεκτονισμένων δουνιτών και πυροξενιτών που αντικαθίσταται υψηλότερα από ζώνες συμπαγών και στρωματομόρφου γάββρου, στη συνέχεια από ζώνη sheeted dyke complex, pillow lavas, basalt group, ούμβρες και ιζηματογενή πετρώματα. Σε κάποια συμπλεγματα οφιολίθου με σουλφίδια κάποια μέλη μπορεί να απουσιάζουν. Στα βόρεια Απέννινα όρη δεν προσδιορίζεται η ζώνη των παράλληλων dykes, τον γάββρο που διεισδύει στον λερζόλιθο, τα pillow lavas και τους πελαγικούς ιζηματογενείς σχηματισμούς κάλυψε απευθείας την βάση του μανδύα στη επιφάνεια του οφιολίθου, τα οποία είναι τα προϊόντα της υποθαλάσσιας διάβρωσης των ηφαιστειακών πετρωμάτων (Garuti, et al., 2008). Το πάχος του εκτεθειμένου μέρους των συμπαγών σουλφιδίων οφιολίθου μπορεί να ξεπεράσει τα 4χλμ. (Strong, Saunders, 1988). Στα συμπαγή κοιτάσματα σουλφιδίων προσδιορίζονται τουλάχιστον 25 από τα 200 γνωστά συμπλέγματα οφιολίθου (Galley, Koski, 1999). Τα κλασσικά παραδείγματα αυτής της ομάδας είναι τα κοιτάσματα Central Newfoundland (Tilt Cove, Wales back, κ.λπ.), Ομάν (Aardga, Lasail και Bayda), Κύπρος (Μαυροβούνι, Αγροκηπιά, κ.λπ.) (Khadistavrinou, Konstantinou, 1984) που είναι χαρακτηριστικά μέλη των τμημάτων των οφιολικών συμπλεγμάτων. Η θέση του μεταλλεύματος μέσα στα συμπλέγματα μπορεί να είναι διαφορετική. Στις κεντρικές περιοχές του Newfoundland (Dunnage zone) είναι γνωστή η φτωχή μεταλλογένεση των sheeted dykes, ένα μέρος των κοιτασμάτων βρίσκεται πάνω από αυτό, κοντά σε υπερκείμενες pillow lavas (κοιτάσματα Betts Cove, Little Bay, Miles Cove), ένα μέρος βρίσκεται στο τμήμα των pillow lavas, παρόλο που οι υποκείμενες ζώνες πλεγμάτων φλεβών συνδέονται με αυτά μπορούν να συνδεθούν με τα sheeted dykes (κοιτάσματα Walesback, Rendel-Jack-man, κλπ) και το κοιτάσμα Tilt Cove βρίσκεται σε επαφή με τους βασάλτες με λεπτόκκοκα ιζηματογενή πετρώματα (Swinden, et al., 1998). Τα μεγαλύτερα κοιτάσματα της Κύπρου (εκτός της Σκουριώτισσα) (Khadistavrinou, Konstantinou, 1984) και του Oman βρίσκονται κυρίως στις ανώτερες και κατώτερες pillow lavas, οι οποίες διαφέρουν μερικώς ανάλογα με την δομή τους, και οι σχηματισμοί εμφανίζονται πιθανότατα κατά την διάρκεια του ανοίγματος λόγω

εκχύσεων των pillow lavas. Επίσης σε ορισμένα οφιολιθικά συμπλέγματα, όπως στα βόρεια Απέννινα όρη τα κοιτάσματα συμπαγών σουλφιδίων, σχηματίζουν στρωματόμορφα κοιτάσματα με σερπεντινωμένο λατυποπαγές με διαβαθμισμένη στρωμάτωση που καλύπτονται από βασαλτικές pillow lavas, επομένως σχηματίστηκαν πριν από την ηφαιστειακή έκρηξη(κοιτάσματα Reppia I, MonteBardeneto και Monte Bianco I). Στην απουσία των ζωνών των παράλληλων πλεγμάτων φλεβών η μεταλλογένεση μπορεί να εξαπλωθεί στον γάββρο (κοιτάσματα Campeli) (Garuti, et al., 2008).

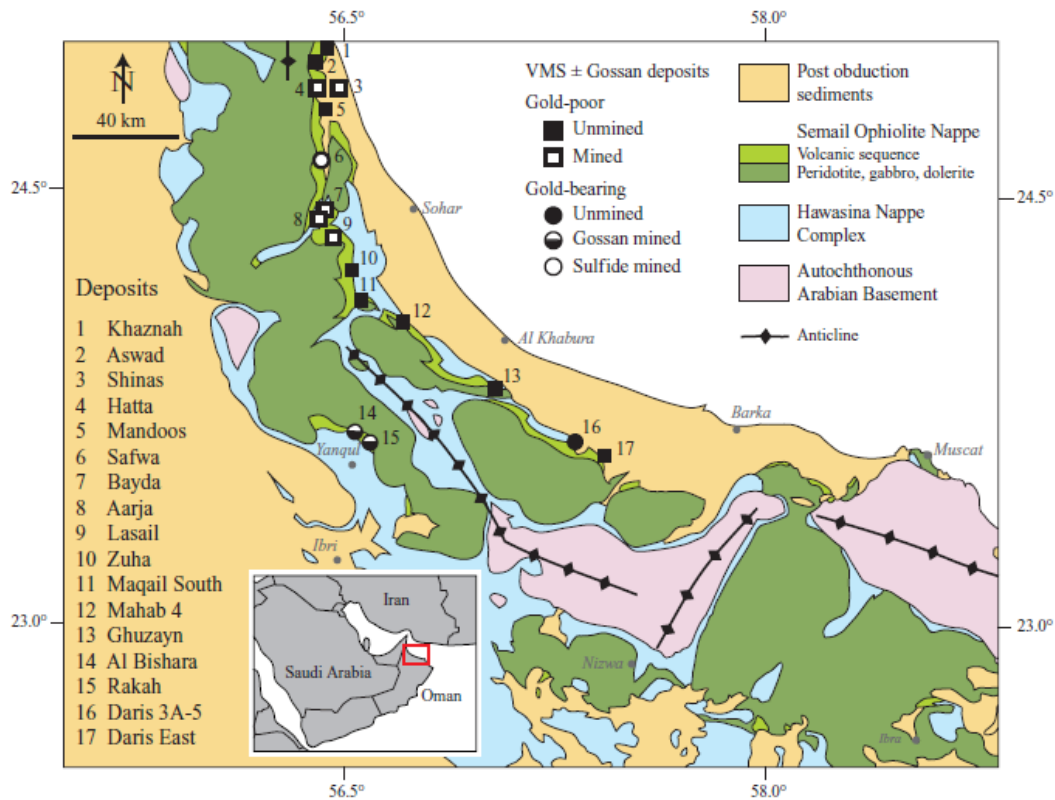
Είναι αξιοσημείωτο ότι το μεγαλύτερο συμπαγές σουλφιδικό κοιτάσμα της Κύπρου, Oman και Newfoundland είναι τα πιο σημαντικά κοιτάσματα των βόρειων Απέννινων Όρεων τα εννέα βρίσκονται είτε στην επαφή των pillow lavas με τη ζώνη των sheeted dykes, είτε ανάμεσα στις χωριστές ροές λάβας μέσα στους βασάλτες, αλλά σε κάθε περίπτωση εναποτέθηκαν σε διαβρωμένη επιφάνεια βασαλτών ή σερπεντινιτών που καλύφθηκαν από βασάλτες. Εμφανίζεται ότι η θέση στο τμήμα επηρέασε σημαντικά το ημι-σύμφωνο ανάχωμα όπως το σώμα του μεταλλεύματος και εμπόδισε την καταστροφή και την οξείδωση σε υποθαλάσσιο περιβάλλον. Τα μεταλλοφόρα σώματα επικαλύπτουν τους σερπεντινίτες ή τις βασαλτικές ροές κάτω από το κάλυμμα πυριτικών ιζηματογενών πετρωμάτων που συχνά φέρουν ίχνη βιογενετικής επεξεργασίας και μηχανικής καταστροφής με τον σχηματισμό derbis flows.

Τα κοιτάσματα οφιολιθικού συμπλέγματος χαρακτηρίζονται από ορυκτά χαλκού, χαλκού-ψευδαργύρου και ένα σύνολο από άλλα χαρακτηριστικά, που μας επιτρέπουν να τα ξεχωρίσουμε σε έναν ανεξάρτητο τύπο, τύπου Κύπρου (Eremin, 1983; Eremin, et al., 2000). Τα χαρακτηριστικά αυτού του τύπου αποτελούν το λιγότερο από το 10% του συνολικού αθροίσματος των συμπαγών κοιτασμάτων σουλφιδίων στον κόσμο. Παρόλα αυτά τα κοιτάσματα Dombarovskiy στα Ουράλια Όρη συχνά αναφέρονται ως κοιτάσματα τύπου Κύπρου (Seravkin, 2007) σύμφωνα με κάποια χαρακτηριστικά, ο συγγραφέας αναφέρει τους ακόλουθους τύπους κοιτασμάτων: Ishkinskoie, Ivanovskoie, Dergamyshskoye, Maukskoye (Ορδοβίσιο, Σιλούριο), καθώς και Zharly Asha, Zhangana, Aktogaiskoye (Μέσω Δεβόνιο) (Prokin, et al., 1992; Zaikov, 1999; Koroteev, Sazonov, 2005). Μεταλλεύματα που φιλοξενούν βασάλτες σε κοιτάσματα τύπου Κύπρου σε ορισμένες περιπτώσεις που σχετίζονται με ωκεάνιους θολεΐτες χαμηλού καλίου που είναι παρόμοια τύπου MORB (Prisakmarsko–Voznesenskaya ζώνη Ουράλιων Όρεων)(Koroteev, Sazonov, 2005), τα συμπλέγματα οφιολίθου του Skidder-Basalt του Bay-of-island στην Newfoundland και οι βασάλτες του εδάφους Stikinia του Beregovoi Crystal complex

στην Βρετανική Κολομβία (Swinden, et al., 1988), πιθανών σχηματίστηκαν σε περιβάλλον μεσο-ωκεάνιων ράχων. Συγκριτικά σπάνια και κατά κανόνα μικρά κοιτάσματα συμπαγών σουλφιδίων στα Ουράλια και στην Newfoundland ((Maukskoye, Skidder, York-Harbor, Gregory River, κλπ.) σχετίζονται με βασάλτες τύπου MORB. Τα περισσότερα κοιτάσματα τύπου Κύπρου (συμπεριλαμβανομένων και αυτών της Newfoundland και στο Κεμπέκ, Απαλάχια Όρη) σχετίζονται με βασαλτικούς σχηματισμούς, στους οποίους το χαμηλότερο μέρος των τμημάτων αποτελούμενο από ανδεσίτες υψηλού μαγνησίου παρόμοιους με του σύγχρονους μπονινίτες καθώς επίσης και τους θολεϊτικούς βασάλτες, οι οποίοι διαφέρουν από τους βασάλτες του τύπου MORB από το χαμηλό τους περιεχόμενο σε Ti, Zr, Hf, U, Th καθώς και το υψηλότερο περιεχόμενο τους ελαφρά στοιχεία σπάνιων γαιών. Τέτοια πετρώματα ερμηνεύονται ως σχηματισμοί καταβύθισης των ζωνών, που σχηματίστηκαν στα πρώτα στάδια του ανοίγματος της οπισθοτόξιας λεκάνης. Στην Newfoundland συμμετέχουν στη δομή, στο σύμπλεγμα του οφιολίθου Betts Cove με κοιτάσματα στο Tilt cove, καθώς και τμήμα της ομάδας Lushs Bight με κοιτάσματα σε Lady Point, Little Bay, Little Deer κλπ. και στο Κεμπέκ περικλείουν το κοιτάσμα Huntington (Trottier et al., 1987). Τα πετρώματα περικλείουν τα κοιτάσματα στην Αλάσκα και Ομάν που εμφανίστηκαν στο περιβάλλον της οπισθοτόξιας λεκάνης παρά στις μεσο-ωκεάνιες ράχες και είναι μεταξύ βασαλτών μεσο-ωκεάνιων ράχων και του θολεϊτικού νησιωτικού τόξου (Crowe, et al., 1992; Haymon, 1989). Σε εξαιρετικές περιπτώσεις που τα κοιτάσματα είναι με πολλούς τρόπους παρόμοια με αυτά του τύπου Κύπρου (για παράδειγμα Chu Chua στη Βρετανική Κολομβία) συνδέονται με θολεϊτικούς βασάλτες υψηλής αλκαλικότητας και αλκαλι-βασάλτες που σχηματίζονται σε ενδοπλακικά περιβάλλοντα και είναι χαρακτηριστικό των ωκεανών νησιών (Aggarwal, Nessbit, 1984).

Στα κοιτάσματα τύπου Κύπρου οι βασαλτικές δομές κυριαρχούν έντονα, τα ιζηματογενή πετρώματα περιέχουν σίδηρο, μαγγάνιο, πυρίτιο, σχιστόλιθους και αργιλίτες. Στην περιοχή των κοιτασμάτων συγχρόνως κοιλώματα σε διαφορετικά μεγέθη περιορίζονται από μια σειρά παράλληλων κλίσεων ($45-60^\circ$) (για παράδειγμα στο κοιτάσμα Weiss στην Νοτιοανατολική Ανατολία, Τουρκία). Στο κοιτάσμα Baida του Ομάν το πλάτος αυτών των βυθισμάτων φτάνει τα 70μ. Η φύση αυτού και οι παρόμοιες δομές αποδεικνύονται συνήθως από την παρουσία βασαλτών breccias κάτω από το μετάλλευμα που αποτελείται από θραύσματα βασαλτών και από συμπαγή κοιτάσματα σουλφιδίων. Πολλά από αυτά τα κοιτάσματα βρίσκονται κοντά σε τεκτονικά βυθίσματα, ηφαιστειακά τόξα. Τα συμπαγή σουλφιδικά κοιτάσματα συναντώνται στην επιφάνεια μια σερπεντινιωμένης

βάσης από έκρηξη βασικών λαβών, αλλά απουσιάζει εάν το θεμέλιο καλύφθηκε από πελαγικά ιζήματα.



Εικόνα 6.1 Απλοποιημένος γεωλογικός χάρτης του οφιολίθου Semail στο βόρειο Ομάν (τροποποιημένος από τους Calvez και Lescuyer, 1991), δείχνει τις κύριες εναποθέσεις VMS και gossan που σχετίζονται με τον ηφαιστειακό πυθμένα του Κάτω Κρητιδικού. Υποδηλώνουν σύμβολα κατάθεσης περιεχόμενου χρυσού.

Βιβλιογραφία

- Ανδρεοπούλου – Μάγκου Ε., Μελέτη αρχαίων Χάλκινων αντικειμένων από τον Ελλαδικό χώρο, Διδακτορική Διατριβή, Πάτρα 1994.
- Μήτσιος, Ι., 2004. Γονιμότητα εδαφών. Θρεπτικά στοιχεία φυτών(μακροθρεπτικά, μικροθρεπτικά) και βαρέα μέταλλα. Μέθοδοι και Εφαρμογές. Εκδόσεις Zymel, Αθήνα.
- Φωτογραφίες από τις ακόλουθες ιστοσελίδες: α). www.orykta.gr, β&στ) <http://el.wikipedia.org/wiki>, γ) <http://195.134.76.37/quali/quali>, ε) www.geo.auth.gr.
- Abelson, M., Baer, G., Agnon, A., 2001. Evidence from gabbro of the Troodos ophiolite for lateral magma transport along a slow-spreading mid-ocean ridge. *Nature* 409, 72. <https://doi.org/10.1038/35051058>
- Adamides, N. G. 1984. Cyprus volcanogenic sulphide deposits in relation to their environment of formation, PhD thesis, University of Leicester, UK.
- Adamides, N. G. (2010b). "Mafic-dominated volcanogenic sulphide deposits in the Troodos ophiolite, Cyprus Part 2- A review of genetic models and guides for exploration." *Applied Earth Science (Transactions of the Institute of Mineralogy and Metallurgy Bulletin)* 119(4): 193-204.
- Adamides, N.G., 2010b. Mafic-dominated volcanogenic sulphide deposits in the Troodos ophiolite, Cyprus Part 1- The deposits of the Solea graben. *Appl. Earth Sci.* 119, 65–77.
- Adamides, N.G., 2010a. Mafic-dominated volcanogenic sulphide deposits in the Troodos ophiolite, Cyprus Part 2- A review of genetic models and guides for exploration. *Appl. Earth Sci.* 119, 193–204.
- Agency for Toxic Substances and Disease Registry, US Public Health Service. ATSDR's Toxicological Profiles: Copper. Boca Raton, Florida: Lewis Publishers, CRC Press Inc, 1997
- Aggarwal, P.K. and Nessbit, B.E., Geology and geochemistry of the Chu Chua massive sulfide deposit, British Columbia, *Econ. Geol.*, 1984, vol. 79, pp. 815–825.
- Allerton, S., Vine, F.J., 1987. Spreading structure of the Troodos ophiolite, Cyprus: Some paleomagnetic constraints. *Geology* 15, 593–597. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1987\)15<593:SSOTTO>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1987)15<593:SSOTTO>2.0.CO;2)
- Aubert & M. Pinta 1977. Trace Elements in Soils. *Developments in Soil Science*, no. 7. x+396 pp.

- Baker, E.T., Chen, Y.J., and Phipps Morgan, J., 1996, The relationship between near-axis hydrothermal cooling and the spreading rate of mid-ocean ridges: Earth and Planetary Science Letters, v. 142, p. 137–145.
- Baker, E.T., 2009, Relationships between hydrothermal activity and axial magma chamber distribution, depth, and melt content: Geochemistry Geophysics Geosystems, v. 10, Q06009, 15 p., doi.10.1029/2009GC002424.
- Banks, G.J., 2004. Accretion of the lower oceanic crust in the Troodos ophiolite: textural and geochemical constraints from drill core CY-4, Cyprus (Doctoral dissertation, The University of Wales College of Cardiff (United Kingdom)).
- Baragar, W.R., Lambert, N., Baglow, N., Gibson, I., 1990. The sheeted dyke zone in the Troodos ophiolite, in: OPHIOLITES Oceanic Crustal Analogues, Proceedings of the Symposium "Troodos 1987." The Geological Survey Department, Ministry of Agriculture and Natural Resources, Nicosia, Cyprus, pp. 37–51.
- Barrie, C.T., D Hannington, M., 1999. Classification of Volcanic-Associated Massive Sulfide Deposits Based on Host-Rock Composition, in: Rev. Econ. Geo. pp. 1–11.
- Bogdanov, Y.A., Bortnikov, N.S., Vikent'ev, I.V., Gurvich, E.G., and Sagalevich, A.M., 1997, A new type of modern mineral-forming systems—Black smokers of the hydrothermal field at 14°45'N latitude, Mid-Atlantic Ridge: Geology of Ore Deposits, v. 39, p. 68–90.
- Calvez, J.Y., and Lescuyer, J.L., 1991, Lead isotope geochemistry of various sulphide deposits from the Oman Mountains: Ophiolite Genesis and Evolution of the Oceanic Lithosphere, v. 5, p. 385–397.
- Cann, J. R., Strens, M. R. and Rice, A. (1985). "A simple magma-driven thermal balance model for the formation of volcanogenic massive sulphides." Earth and Planetary Science Letters 76: 123-134.
- Carr, J.M. and Bear, L.M., 1960. The geology and mineral resources of the Peristerona-Lagoudhera area (Vol. 2). authority of the Government of Cyprus.
- Constantinou, G. and Govett, G. J. S. 1973. Geology, geochemistry and genesis of Cyprus sulfide deposits, Econ. Geol., 68, 843–858.
- Cooke, A.J., Masson, L.P., Robertson, A.H.F., 2014. Construction of a sheeted dyke complex: evidence from the northern margin of the troodos ophiolite and its southern margin adjacent to the arakapas fault zone. Ofioliti 39, 1–30.
<https://doi.org/10.4454/ofioliti.v39i1.426>

- Coumou, D., Dreisner, T. and Heinrich, C. A. (2008). "The structure and dynamics of mid-ocean ridge hydrothermal systems." *Science* 321: 1825 - 1828.
- Crowe D.E., Nelson S.W., Brown P.E., et al., *Geology and Geochemistry of Volcanogenic Massive Sulfide Deposits and Related Igneous Rocks, Prince William Sound, SouthCentral Alaska*, *Econ. Geol.*, 1992, vol. 87, pp. 1722–1746.
- Delaney, J.R., Robigou, V., McDuff, R.E., and Tivey, M.K., 1992, *Geology of a vigorous hydrothermal system on the Endeavour segment, Juan de Fuca Ridge*: *Journal of Geophysical Research*, v. 97, p. 19,663–19,682.
- Dewey, J. F., Pittman, W. C., Ryan, W. B. F. and Bonnin, J. (1973). "Plate tectonics and the evolution of the Alpine system." *Geological Society of America Bulletin* 84: 3137-3180.
- Dietrich, D., Spencer, S., 1993. Spreading-induced faulting and fracturing of oceanic crust: examples from the Sheeted Dyke Complex of the Troodos ophiolite, Cyprus. *Geol. Soc. Lond. Spec. Publ.* 76, 121–139.
<https://doi.org/10.1144/GSL.SP.1993.076.01.06>
- Dilek, Y., Thy, P., Moores, E. M. and Ramsden, T. W. (1990). "Tectonic evolution of the Troodos ophiolite within the Tethyan frame- work." *Tectonics* 9: 811-823.
- Edwards, S., Hudson-Edwards, K., Cann, J., Malpas, J. and Xenophontos, C. (2010). "Classic Geology in Europe 7: Cyprus." *Terra Publishing*: 271.
- Eremin, N.I., Dergachev, A.L., Sergeeva Nat.E., and Pozdniakova, K.V., *Types of Sulphide Deposits of Volcanic Association*, *Geol. Rudn. Mestorozhdenii*, 2000, no. 2, pp. 177–190.
- Eremin, N.I., *Differentsiatsia Vulkanogenogo Sulfidnogo Orudenenia (na Primere Kolchedannykh Mestorozhdenii Fanerozoia)* (Differentiation of Volcanogenic Sulphide Ore Grade Mineralization (in Terms of Sulphide Deposits of Phanerozoic), Moscow, Izd. Msk. Univ., 1983, p. 256.
- Escartin, J., Smith, D.K., Cann, J., Schouten, H., Langmuir, C.H., and Escrig, S., 2008, Central role of detachment faults in accretion of slow-spreading oceanic lithosphere: *Nature*, v. 455, p. 790–795.
- Franklin, J.M., Gibson, H.L., Jonasson, I.R., and Galley, A.G., 2005, Volcanogenic Massive Sulfide Deposits, in Hedenquist, J.W., Thompson, J.F.H., Goldfarb, R.J., and Richards, J.P., eds., *Economic Geology 100th Anniversary Volume: The Economic Geology Publishing Company*, p. 523-560.

- Freund, S., Haase, K.M., Keith, M., Beier, C., Garbe-Schönberg, D., 2014. Constraints on the formation of geochemically variable plagiogranite intrusions in the Troodos Ophiolite, Cyprus. *Contrib. Mineral. Petrol.* 167, 978. <https://doi.org/10.1007/s00410-014-0978-6>
- Galley, A. G. and Koski, R. A. 1999. Setting and characteristics of ophiolite-hosted volcanogenic massive sulfide deposits, in *Volcanic-associated massive sulphide deposits: processes and examples in modern and ancient settings*, (ed. C. T. Barrie and M. D. Hannington), *Rev. Econ. Geol.*, 8, 221–246.
- Galley, A.G., Hannington, M.D., and Jonasson, I.R., 2007, *Volcanogenic Massive Sulphide Deposits*, in Goodfellow, W.D., ed., *Mineral deposits of Canada—A synthesis of major deposit-types, district metallogeny, the evolution of geological provinces, and exploration methods*: Geological Association of Canada, Mineral Deposits Division, Special Publication No. 5, p. 141–161
- Garper M. Possible toxic metal exposure of prehistoric bronze workers. *Br J Ind Med* 1987;44:652–656.
- Garuti, G., Bartoli, O., Scacchetti, M., and Zaccarini, F., Geological Setting and Structural Styles of Volcanic Massive Sulfide Deposits in the Northern Apennines (Italy): Evidence for SeaFloor and Sub Seafloor Hydrothermal Activity in Unconventional Ophiolites of the Mesozoic Tethys, *Boletin de la Soc. Geol. Mexicana*, 2008, vol. 60, no. 1, pp 121–145.
- Gass, I. G., 1960. The geology and mineral resources of the Dhali area. *Cyprus Geol. Survey Dept. Mere.* 4, 116 pp.
- Gass, I. G. and Masson-Smith, D. 1963. The geology and gravity anomalies of the Troodos Massif, *Philos. Trans. R. Soc. Lond.*, A255, 417–467.)
- Gass, I.G., 1980. The Troodos massif: Its role in the unravelling of the ophiolite problem and its significance in the understanding of constructive plate margin processes, in: *Ophiolites, Proceedings: International Ophiolite Symposium, Cyprus 1979*. The Geological Survey Department, Ministry of Agriculture and Natural Resources, Nicosia, Cyprus, pp. 23–35.
- George Jr, R.P., 1978. Structural petrology of the Olympus ultramafic complex in the Troodos ophiolite, Cyprus. *Geological Society of America Bulletin*, 89(6), pp.845-865

- Gillis, K.M., Roberts, M.D., 1999. Cracking at the magma–hydrothermal transition: evidence from the Troodos Ophiolite, Cyprus. *Earth Planet. Sci. Lett.* 169, 227–244.
[https://doi.org/10.1016/S0012-821X\(99\)00087-4](https://doi.org/10.1016/S0012-821X(99)00087-4)
- Gordon, R., Bertram, M. and Graedel, T. E. (2006). "Metal stocks and sustainability." *Proceedings of the National Academy of Sciences* 103: 1209-1214.
- Gray, N. F. (1997). "Environmental impact and remediation of acid mine drainage: a management problem." *Environmental Geology* 30(1-2): 62-71.
- Greenbaum, D., 1977. The chromitiferous rocks of the Troodos ophiolite complex, Cyprus. *Economic Geology*, 72(7), pp.1175-1194.
- Grimes, C.B., Ushikubo, T., Kozdon, R., Valley, J.W., 2013. Perspectives on the origin of plagiogranite in ophiolites from oxygen isotopes in zircon. *Lithos* 179, 48–66.
- Habashi, F. (2003). *Metals from ores - An Introduction to Extractive Metallurgy - Métallurgie Extractive Québec*. Quebec, Sainte-Foy.
- Hannington, M.D., Jonasson, I.R., Herzig, P.M., and Petersen, S., 1995, Physical and chemical processes of seafloor mineralization at midocean ridges, in Humphris, S., ed., *Seafloor Hydrothermal Systems: Physical, Chemical, Biological, and Geological Interactions: American Geophysical Union, Geophysical Monograph v. 91*, p. 115-157.
- Hannington, M.D., Galley, A., Gerzig, P., Petersen, S., 1998. Comparison of the TAG mound and stockwork complex with Cyprus-type massive sulfide deposits. *Proc. Ocean Drill. Program Sci. Results* 158, 389–415.
<https://doi.org/10.2973/odp.proc.sr.158.217.1998>
- Hannington, M.D., Barrie, C.T., and Bleeker, W., 1999a, The giant Kidd Creek volcanogenic massive sulfide deposit, western Abitibi Subprovince, Canada, in Hannington, M.D., and Barrie, C.T., eds., *The Giant Kidd Creek Volcanogenic Massive Sulfide Deposit, Western Abitibi Subprovince, Canada: Economic Geology Monograph 10*, p. 1-30.
- Hannington, M.D., Poulsen, K.H., Thompson, J.F.H., and Sillitoe, R.H., 1999c, Volcanogenic gold in the massive sulfide environment, in Barrie, C.T., and Hannington, M.D., eds., *Volcanic-Associated Massive Sulfide Deposits: Processes and Examples in Modern and Ancient Settings: Reviews in Economic Geology* 8, p. 325-356.

- Hannington, M. D., de Ronde, C. D. J. and Petersen, S. (2005). "Sea-floor tectonics and submarine hydrothermal systems." Economic Geology 100th Anniversary Volume (Society of Economic Geologists): 111-141.
- Haymon, R.M., Koski, R.A., and Abrams, M.J., Hydrothermal Discharge Zones beneath Massive Sulfide Deposits Mapped in the Oman Ophiolites, Geol., 1989, vol. 17, pp. 531–535.
- Haymon, R.M., Fornari, D.J., Edwards, M.H., Carbotte, S., Wright, D., and MacDonald, K.C., 1991, Hydrothermal vent distribution along the East Pacific Rise crest (9°09' - 54'N) and its relationship to magmatic and tectonic processes on fast-spreading mid-ocean ridges: Earth and Planetary Sciences, v. 104, p. 513–534.
- Herzig, P.M., Hannington, M.D., Scott, S.D., Maliotis, G., Rona, P.A., Thompson, G., 1991. Gold-rich sea-floor gossans in the Troodos Ophiolite and on the Mid-Atlantic Ridge. Econ. Geol. 86, 1747–1755. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.86.8.1747>
- Huston, D. L., Pehrsson, S., Eglington, B. M. and Zaw, K. (2010). "The Geology and Metallogeny of Volcanic-Hosted Massive Sulfide Deposits: Variations through Geologic Time and with Tectonic Setting." Economic Geology 105(3): 571-591.
- Hutchinson, R. W. and Searle, D. L. 1971. Stratabound pyrite deposits in Cyprus and relations to other sulphide ores, Soc. Min. Geol. Jpn, Special Issue 3, 198–205.
- Josso, P., Roberts, S., Teagle, D.A.H., Pourret, O., Herrington, R., Ponce de Leon Albarran, C., 2018. Extraction and separation of rare earth elements from hydrothermal metalliferous sediments. Miner. Eng. 118, 106–121. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2017.12.014>
- Jowitt, S.M., Osborn, R.G.M., Thomas, R.D.H., Naden, J., Gunn, A.G., Herrington, R.J., Nicolaides, S., 2005. 'T'-type mineralisation — a pseudo-epithermal style of VHMS associated gold mineralisation, Cyprus, in: Mineral Deposit Research: Meeting the Global Challenge. Springer, Berlin, Heidelberg, pp. 635–637.
- Keith, M., Haase, K.M., Klemm, R., Smith, D.J., Schwarz-Schampera, U., Bach, W., 2018a. Constraints on the source of Cu in a submarine magmatic-hydrothermal system, Brothers volcano, Kermadec island arc. Contrib. Mineral. Petrol. 173, 40. <https://doi.org/10.1007/s00410-018-1470-5>
- Kelley, D.S., Delaney, J.R., and Yoerger, D.A., 2001, Geology and venting characteristics of the Mothra hydrothermal field, Endeavour segment, Juan de Fuca Ridge: Geology, v. 29, p. 385–491.

- Kesler, S. E. (1994). Mineral resources, economics and the environment. New York Macmillan.
- Khadistavrinou, Y. and Konstantinou 1984, G., Kipr. Mineralnye Mestorozhdenia Evropy (Cyprus. Mineral Deposits of Europe), Moscow, Mir, vol. 2, pp. 345–374.
- Kidd, R.G.W., Cann, J.R., 1974. Chilling statistics indicate an ocean-floor spreading origin for the Troodos complex, Cyprus. Earth Planet. Sci. Lett. 24, 151–155. [https://doi.org/10.1016/0012-821X\(74\)90020-X](https://doi.org/10.1016/0012-821X(74)90020-X)
- Koroteev, V.A. and Sazonov, V.M., Geodinamika, Rudogenez, Prognoz (na Primere Urala) (Geodynamics, Ore Genesis, Forecast (in terms of the Urals)), Yekaterinburg, UrO RAS, 2005, p. 259.
- Krasnov, S.G., Proroshina, I.M., and Cherkashev, G.A., 1995, Geological setting of high-temperature hydrothermal activity and massive sulfide formation on fast and slow-spreading ridges, in Parson, L.M., Walker, C.L., and Dixon, D.R., eds., Hydrothermal Vents and Processes: Geological Society of London, Special Publication 87, p. 17–32.
- LaGroix, F. and Borradaile, G. J. (2000). "Tectonics of the circum-Troodos sedimentary cover of Cyprus, from rock magnetic and structural observations." Journal of Structural Geology 22: 453-469.
- Large, R.R., 1992, Australian volcanic-hosted massive sulphide deposits: features, styles and genetic models: Economic Geology, v. 87, p. 471-510.
- McCaig, A. M., Cliff, R. A., Escartin, J., Fallick, A. E. and MacLeod, C. J. (2007). "Oceanic detachment faults focus very large volumes of black smoker fluids." Geology 35(10): 935-938.
- McElduff, B., Stumpfl, E.F., 1991. The chromite deposits of the Troodos complex, cyprus — Evidence for the role of a fluid phase accompanying chromite formation. Miner. Deposita 26, 307–318. <https://doi.org/10.1007/BF00191079>
- Moores, E. M. and Vine, F. J. 1971. The Troodos massif, Cyprus, and other ophiolites as oceanic crust: evaluation and implications, Philos. Trans. R. Soc. Lond., 268, 443–466.
- Moores, E.M., Varga, R.J., Verosub, K.L., Ramsden, T.W., 1990. Regional structure of the Troodos dyke complex. In: Malpas, J., Moores, E.M., Panayiotou, A., Xenophontos, C. (Eds.), Troodos 1987: Ophiolites, Oceanic Crustal Analogues. Geol. Surv. Dept. Cyprus, Nicosia, pp. 27–35.

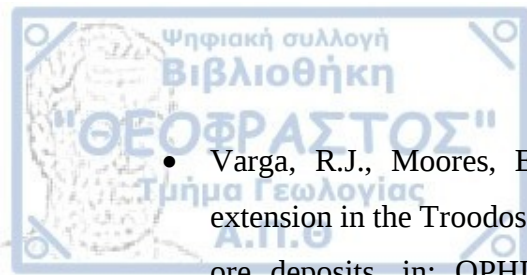
- Moores, E.M., Kellogg, L.H. and Dilek, Y., 2000. Tethyan ophiolites, mantle convection, and tectonic" historical contingency": A resolution of the" ophiolite conundrum". SPECIAL PAPERS-GEOLOGICAL SOCIETY OF AMERICA, pp.3-12.
- Mudd, G. M., Weng, Z. and Jowitt, S. M. (2013). "A detailed assessment of global Cu resource trends and endowments." *Economic Geology* 108: 1163-1183.
- Mukasa, S. B. and Ludden, J. N. 1987. Uranium-lead isotopic ages of plagiogranites from the Troodos ophiolite, Cyprus, and their tectonic significance, *Geology*, 15, 825–828.
- Northey, S., Haque, N. and Mudd, G. (2013a). "Using sustainability reporting to assess the environmental footprint of copper mining." *Journal of Cleaner Production* 40(0): 118-128.
- Nuriel, P., Katzir, Y., Abelson, M., Valley, J.W., Matthews, A., Spicuzza, M.J., Ayalon, A., 2009. Fault-related oceanic serpentinization in the Troodos ophiolite, Cyprus: Implications for a fossil oceanic core complex. *Earth and Planetary Science Letters* 282, 34–46. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2009.02.029>
- Parmentier, E. M. and Spooner, E. T. C. (1978). "A theoretical study of hydrothermal convection and the origin of the ophiolitic sulphide ore deposits of Cyprus." *Earth and Planetary Science Letters* 40: 33-44.
- Parvaz, D.B., 2014. Oxidation Zones of Volcanogenic Massive Sulphide Deposits in the Troodos Ophiolite, Cyprus: Targeting Secondary Copper Deposits.
- Poole, A. J. and Robertson, A. H. F. (1991). "Quaternary uplift and sea-level change at an active plate boundary, Cyprus." *Journal of the Geological Society* 148(5): 909-921.
- Poulsen, H., and Hannington, M., 1995, Auriferous Volcanogenic Sulfide Deposits, in Eckstrand, O.R., Sinclair, W.D., and Thorpe, R.I., eds. *Geology of Canadian Mineral Deposit Types*, *Geology of Canada*, no. 8, *Decade of North American Geology (DNAG)*: Geological Society of America, Part 1. p. 183-196.
- Prokin, K.A., Seravkin, I.B., Buslaev, F.P., et al., Medonokolchedannye Mestorozhdenia Urala: Uslovia Formirovania (Copper Sulphide Deposits of Urals: Formation Terms), Yekaterinburg, UrO RAS, 1992, p. 307.
- RioTinto (2011). "Annual Report." www.riotinto.com(8/10/2013): Accessed 1/10/2013.
- Robertson, A. H. F. (1990). Tectonic evolution of Cyprus. Ophiolites; oceanic crustal analogues; proceedings of the symposium "Troodos 1987". Malpas, J., Moores, E. M.,

Panayiotou, A. and Xenophontos, C. (eds). Nicosia, Cyprus, Ministry of Agriculture, Natural Resources and Environment, Geological Survey Department: 235-250.

- Robertson, A.H.F., 1975. Cyprus umbers: basalt-sediment relationships on a Mesozoic ocean ridge. J. Geol. Soc. 131, 511–531. <https://doi.org/10.1144/gsjgs.131.5.0511>
- Robertson, A.H.F., 1977. Tertiary uplift history of the Troodos massif, Cyprus. GSA Bull.88,17631772.[https://doi.org/10.1130/00167606\(1977\)88<1763:TUHOTT>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/00167606(1977)88<1763:TUHOTT>2.0.CO;2)
- Robertson, A. H. F. and Xenophontos, C. (1993). "Development of concepts concerning the Troodos ophiolite and adjacent units in Cyprus." Geological Society, London, Special Publications 76(1): 85-119.
- Robertson, A. H. F. (2002). "Overview of the genesis and emplacement of Mesozoic ophiolites in the Eastern Mediterranean Tethyan region." Lithos 65(1-2): 1-67.
- Schmincke, H.-U., Rautenschlein, M., Robinson, P.T., Mehegan, J.M., 1983. Troodos extrusive series of Cyprus: A comparison with oceanic crust. Geology 11, 405–409. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1983\)11<405:TESOCA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1983)11<405:TESOCA>2.0.CO;2)
- Schmincke, H.-U., 2004, Volcanism: Berlin, Springer, 324 p.
- Schouten, H., Kelemen, P.B., 2002. Melt viscosity, temperature and transport processes, Troodos ophiolite, Cyprus. Earth Planet. Sci. Lett. 201, 337–352.
- Seravkin, I.B., Vulkanogennyye Kolchedannyye Mestorozhdenia Yuzhnogo Urala. Geodinamika, Metamorfizm i Rudoobrazovanie (Volcanogenic Sulphide Deposits of Southern Urals. Geodynamics, Metamorphism and Ore Formation), Yekaterinburg, IGGI UrO RAS,2007, pp. 638–669.
- Sinha, M.C., and Evans, R.L., 2004, Geophysical constraints upon the thermal regime of ocean crust, in German, C.R., and others, eds., Mid-ocean ridges—Hydrothermal interactions between the lithosphere and oceans: American Geophysical Union Geophysical Monograph 148, p. 19–62.
- Smith, D.K., Escartin, J., Schouten, H., and Cann, J.R., 2008, Fault rotation and core complex formation—Significant processes in seafloor formation at slow-spreading mid-ocean ridges (Mid-Atlantic Ridge, 13°-15°N): Geology Geophysics Geosystems, v. 9, Q03003, 23 p., doi:10.1029/2007GC001699.
- Staudigel, H., Tauxe, L., Gee, J.S., Bogaard, P., Haspels, J., Kale, G., Leenders, A., Meijer, P., Swaak, B., Tuin, M., Van Soest, M.C., Verdurmen, E.A.T., Zevenhuizen, A., 2000. Geochemistry and intrusive directions in sheeted dikes in the Troodos

ophiolite: Implications for mid-ocean ridge spreading centers. *Geochem. Geophys. Geosystems* 1, n/a-n/a. <https://doi.org/10.1029/1999GC000001>

- Strong, D.R. and Saunders, S.M., Geological Setting of Sulfide Mineralization at Tilt Cove, Berts Cove Ophiolite, Newfoundland, *Volcanogenic Sulfide Districts of Central Newfoundland*, 1988, pp. 54–61
- Swarbrick, R. E. (1980). The Mamonia Complex of S.W. Cyprus; a Mesozoic continental margin and its relationship to the Troodos Complex. *Ophiolites; Proceedings, International ophiolite symposium*. Panayiotou, A. (eds), Cyprus, Ministry of Agriculture, Natural Resources and Environment, Geological Survey Department, Nicosia, Cyprus: 86-92.
- Swinden, H.S., Kean B.F., and Dunning, G.R. 1998, Geological and Paleotectonic Settings of Volcanogenic Sulfide Mineralization in Central Newfoundland, *Ibid.*, pp. 5–27.
- Thompson F.C., "The early Metallurgy of copper and bronze", *Man* 58 1958
- Thy, P., 1987. Petrogenetic implications of mineral crystallization trends of Troodos cumulates, Cyprus. *Geological Magazine* 124, 1–11. <https://doi.org/10.1017/S0016756800015739>
- Trottier, J., Gauthier, M., and Brown, A., Geology and Lithogeochemistry of the Huntingdon Deposit, Cyprus type Mineralization in the Ophiolite Belt of the Southeastern Quebec Appalachians, *Econ. Geol.*, 1987, vol. 82, pp. 1483–1504.
- Tylecote R.F. A History of Metallurgy. London: The Metals Society, 1976:1–39.
- Udachin, V., Williamson, B. J., Purvis, O. W., Spiro, B., Dubbin, W., Brooks, S., Coste, B., Herrington, R. J. and Mikhailova, I. (2003). "Assessment of environmental impacts of active smelter operations and abandoned mines in Karabash, Ural Mountains of Russia." *Sustainable Development* 11(3): 133-142.
- United Nations, D. o. E. a. S. A., Population Division (2013). World population prospects: The 2012 revision, highlights and advance tables. Working paper No. ESA/P/WP.228.
- Varga, R.J. and Moores, E.M., 1985. Spreading structure of the Troodos ophiolite, Cyprus. *Geology*, 13(12), pp.846-850.
- Varga, R.J., 1991. Modes of extension at oceanic spreading centers: evidence from the Solea graben, Troodos ophiolite, Cyprus. *J. Struct. Geol.* 13, 517–537. [https://doi.org/10.1016/0191-8141\(91\)90041-G](https://doi.org/10.1016/0191-8141(91)90041-G)



- Varga, R.J., Moores, E.M., 1990. Intermittent magmatic spreading and tectonic extension in the Troodos Ophiolite: implications for exploration for black smoker-type ore deposits, in: OPHIOLITES Oceanic Crustal Analogues, Proceedings of the Symposium "Troodos 1987." The Geological Survey Department, Ministry of Agriculture and Natural Resources, Nicosia, Cyprus, pp. 53–64.
- Vine, F.J. and Smith, G.C., 1990. Structure and physical properties of the Troodos crustal section at ICRDG drill holes CY1, 1a and 4. Ophiolites–oceanic crustal analogues.
- Wilson, R. A. M. (1959). "The geology of the Xeros-Troodos area." Geological Survey Department, Nicosia, Cyprus: 184.
- Zaikov, V.V., Mednokolchedannye Mestorozhdenia sredi Ofiolitov Yuzhnogo Urala – Analogi Sul’fidnykh Zalezheiv Okeanicheskikh Riftakh. Voprosy Petrologii, Mineralogii, Geokhimii i Geologii Ofiolitov (Copper Sulphide Deposits among Ophiolites of South Urals–Analogues of Sulphide Deposits in Oceanic Rifts. Matters of Petrology, Mineralogy, Geochemistry and Geology of Ophiolites). Novosibirsk: JA RAS, 1999, p. 180.