



ΒΑΡΒΑΡΗ ΕΛΙΣΑΒΕΤ ΑΕΜ 5784 ΜΑΝΔΡΑΒΕΛΗ ΝΙΚΗ ΑΕΜ 5851

ΠΟΡΦΥΡΙΤΙΚΑ ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΑ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ



ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ 2022





ΒΑΡΒΑΡΗ ΕΛΙΣΑΒΕΤ ΜΑΝΔΡΑΒΕΛΗ ΝΙΚΗ

ΠΟΡΦΥΡΙΤΙΚΑ ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΑ

Υποβλήθηκε στο Τμήμα Γεωλογίας Τομέας Ορυκτολογίας - Πετρολογίας - Κοιτασματολογίας

Επιβλέπων Καθηγητής

Βασίλης Μέλφος, Καθηγητής

© Ελισάβετ Βαρβάρη - Νίκη Μανδραβέλη, 2022 Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All right reserved. Βιβλιοθηκη
 © Ελισάβετ Βαρβάρη - Νίκη Μανδραβέλη, Τμήμα Γεωλογίας Α.Π.Θ., Τομέας Ορυκτολογίας, Πετρολογίας, Κοιτασματολογίας, 2022
 Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος.
 Πορφυριτικά Κοιτάσματα - Διπλωματική Εργασία

Ψηφιακή συλλογή

© Elisavet Varvari - Niki Mandraveli, School of Geology, Department of Mineralogy, Petrology, Economic Geology, 2022 All rights reserved. Porphyry Type Deposits - *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:Πορφυριτικό κοίτασμα Μαρώνειας (φωτογραφία Β. Μέλφος)

Α.Π.Θ Περιεχόμενα

HEPIEXOMENA

Τμήμα Γεωλογίας

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

ΠΕΡΙΛΗΨΗ	1
ABSTRACT	2
ΠΡΟΛΟΓΟΣ	3
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	4
2. ΓΕΝΙΚΑ ΓΙΑ ΤΑ ΠΟΡΦΥΡΙΤΙΚΑ ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΑ	6
2.1 ΓΕΝΕΣΗ ΠΟΡΦΥΡΙΤΙΚΩΝ ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΩΝ	7
2.2 ΖΩΝΕΣ ΥΔΡΟΘΕΡΜΙΚΗΣ ΕΞΑΛΛΟΙΩΣΗΣ	8
2.3 ΜΟΡΦΕΣ ΜΕΤΑΛΛΟΦΟΡΙΑΣ	12
2.3.1 ΦΛΕΒΙΚΗ ΜΕΤΑΛΛΟΦΟΡΙΑ	12
2.3.2 BRECCIAS	14
2.4 ТҮПОІ	16
2.4.1 ΠΟΡΦΥΡΙΤΙΚΑ ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΑ ΧΑΛΚΟΥ	16
2.4.2 ΠΟΡΦΥΡΙΤΙΚΑ ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΑ ΧΑΛΚΟΥ-ΜΟΛΥΒΔΟΥ	16
2.4.3 ΠΟΡΦΥΡΙΤΙΚΑ ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΑ ΧΑΛΚΟΥ-ΧΡΥΣΟΥ	17
2.4.4 ΕΜΦΑΝΙΣΕΙΣ ΡΗΝΙΟΥ ΣΤΑ ΠΟΡΦΥΡΙΤΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ	18
3. ΠΟΡΦΥΡΙΤΙΚΑ ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΑ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ	20
3.1 ГЕNIKA	20
3.2 ΠΟΡΦΥΡΙΤΙΚΟ ΚΟΙΤΑΣΜΑ Cu-Mo-Re-Au ΣΤΗΝ ΜΑΡΩΝΕΙΑ	21
3.2.1 ΥΡΟΘΕΡΜΙΚΕΣ ΕΞΑΛΛΟΙΩΣΕΙΣ ΣΤΟ ΚΟΙΤΑΣΜΑ ΤΗΣ ΜΑΡΩΝΕΙΑΣ	23
3.2.2 ΤΥΠΟΙ ΦΛΕΒΩΝ ΣΤΟ ΚΟΙΤΑΣΜΑ ΤΗΣ ΜΑΡΩΝΕΙΑΣ	24
3.2.3 ΟΡΥΚΤΟΛΟΓΙΑ ΤΟΥ ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΟΣ ΤΗΣ ΜΑΡΩΝΕΙΑΣ	25
3.3 ΠΟΡΦΥΡΙΤΙΚΟ ΚΟΙΤΑΣΜΑ Cu-Au ΣΤΙΣ ΣΚΟΥΡΙΕΣ	26
3.3.1 ΟΡΥΚΤΟΛΟΓΙΑ ΤΟΥ ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΟΣ ΤΩΝ ΣΚΟΥΡΙΩΝ	27
3.3.2 ΥΡΟΘΕΡΜΙΚΕΣ ΕΞΑΛΛΟΙΩΣΕΙΣ ΚΑΙ ΟΜΑΔΕΣ ΦΛΕΒΩΝ ΣΤΟ ΚΟΙΤΑΣΜΑ	
ΤΩΝ ΣΚΟΥΡΙΩΝ	28
3.3.2.1 ΦΛΕΒΕΣ ΠΡΩΙΜΟΥ ΣΤΑΔΙΟΥ	28
3.3.2.2 ΦΛΕΒΕΣ ΚΥΡΙΟΥ ΣΤΑΔΙΟΥ	29
3.3.2.3 ΦΛΕΒΕΣ ΤΕΛΙΚΟΥ ΣΤΑΔΙΟΥ	30
3.3.3 Η ΜΟΡΦΗ ΚΑΙ ΟΙ ΦΑΣΕΙΣ ΣΤΟ ΚΟΙΤΑΣΜΑ ΤΩΝ ΣΚΟΥΡΙΩΝ	30
4. ΠΑΓΚΟΣΜΙΑ ΠΟΡΦΥΡΙΤΙΚΑ ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΑ	31
4.1. ГЕNIKA	31

0	Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη	
	"OFOTDASTOS"	
1	4.2 ΠΟΡΦΥΡΙΤΙΚΟ ΚΟΙΤΑΣΜΑ Cu-Mo ΣΤΗΝ ΧΙΛΗ	
5	4.2.1 ΓΕΝΕΣΗ ΚΑΙ ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗ ΤΟΥ EL TENIENTE	
10	4.2.2 ΤΥΠΟΙ BRECCIAS ΣΤΟ ΚΟΙΤΑΣΜΑ EL TENIENTE	34
	4.3. ΠΟΡΦΥΡΙΤΙΚΟ ΚΟΙΤΑΣΜΑ Cu-Au ΣΤΗΝ ΠΑΠΟΥΑ ΝΕΑ ΓΟΥΙΝΕΑ	36
	4.3.1 ΤΟ ΚΟΙΤΑΣΜΑ ΟΚ ΤΕDΙ ΣΤΗΝ ΠΑΠΟΥΑ ΝΕΑ ΓΟΥΙΝΕΑ	37
	4.3.2 ΧΡΟΝΟΛΟΓΗΣΗ ΤΟΥ ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΟΣ ΟΚ ΤΕDΙ ΜΕ ΤΗΝ ΜΕΘΟΔΟ	
	ZIPKONIΩN	
	5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	40
	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	41



ΠΕΡΙΛΗΨΗ Πορφυριτικά Κοιτάσματα

Ελισάβετ Βαρβάρη Νίκη Μανδραβέλη

Η παρούσα διπλωματική πτυχιακή εργασία αφορά την μελέτη των πορφυριτικών κοιτασμάτων και την περιγραφή των ιδιαίτερων γνωρισμάτων τους. Αρχικά, δόθηκε βάση στο γεωτεκτονικό μοντέλο γένεσης, καθώς και στις μορφές μεταλλοφορίας (φλέβες, διάσπαρτη, φλεβίδια stockworks, breccias). Θεμελιώδους σημασίας είναι η μεταλλοφορία που εντοπίζεται στα πορφυριτικά κοιτάσματα που αποτελείται από μέταλλα όπως Cu, Mo και Au, αλλά και από Re, Ag, W, Te, Pt, Pd, Se, σε μικρότερες περιεκτικότητες. Επιπλέον, γίνεται αναφορά σε δύο από τα σημαντικότερα πορφυριτικά κοιτάσματα της Ελλάδας και στις Σκουριές Χαλκιδικής, με Cu -Au, ενώ όσον αφορά τα παγκόσμια κοιτάσματα, αναλύονται αυτά στο El Teniente της κεντρικής Χιλής, το οποίο χαρακτηρίζεται από μεταλλοφορία Cu - Mo, και το κοίτασμα στο Ok Tedi της Παπούα Νέας Γουινέας, με μεταλλοφορία Cu - Au.



ABSTRACT

Porphyry Type Deposits

Elisavet Varvari Niki Mandraveli

This diploma thesis focuses on the study of porphyry type deposits and highlights their unique characteristics. First of all, great emphasis is given to the geotectonic genetic model, as well as the forms of mineralization (veins, disseminations, stockwork veinlets, breccias). Fundamental is the importance of the mineralization in the porphyry system that consists of metals such as Cu, Mo and Au, along with Re, Ag, W, Te, Pt, Pd, Se, in lower concentrations. Also, two of the most important porphyry type deposits of Greece and two of the largest globally are described in this thesis. In Greece, the deposits are located in Maronia, containing the metals Cu - Mo - Re - Au, and in Skouries of Chalkidiki, with Cu -Au. The global deposits that are discussed here are the El Teniente deposit in Central Chile, which is characterized by Cu - Mo, and the Ok Tedi deposit in Papua New Guinea with Cu - Au.

Το θέμα της παρούσας πτυχιακής διπλωματικής εργασίας μας ανατέθηκε τον Οκτώβριο του 2021 από τον Καθηγητή του Τομέα Ορυκτολογίας - Πετρολογίας - Κοιτασματολογίας του Τμήματος Γεωλογίας του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης, κ. Βασίλειο Μέλφο, τον οποίο ευχαριστούμε θερμά για την υπόδειξη του θέματος, την καθοδήγηση και τις συμβουλές του σε όλη τη διάρκεια της εργασίας αυτής.

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

λογίας

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η συγκεκριμένη πτυχιακή εργασία πραγματεύεται την ιδιαιτερότητα και την σημασία των πορφυριτικών κοιτασμάτων καθώς και ορισμένες εμφανίσεις τους στην Ελλάδα αλλά και παγκοσμίως.

Ιδιαίτερες ευχαριστίες οφείλουμε στον Καθηγητή κ. Β. Μέλφο, που ήταν ο επιβλέποντας της πτυχιακής αυτής εργασίας, για την ανάθεση ενός τόσου ενδιαφέροντος θέματος, όπως και για την συνεχή βοήθειά του κατά την εκπόνηση αυτής της εργασίας. Τέλος, θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε τις οικογένειές μας για τη στήριξή τους σε όλη τη διάρκεια των σπουδών μας.

Τα ορυκτά και τα πετρώματα αποτέλεσαν σημαντικούς πυλώνες κατά την εξέλιξη και τον εκσυγχρονισμό του ανθρώπινου πολιτισμού. Οι πρώτες επαφές του ανθρώπου με τα πετρώματα χρονολογούνται κατά την λίθινη εποχή κατά την οποία κατασκεύαζαν εργαλεία από λίθους με σκοπό την χρήση τους για επιβίωση. Αργότερα, κατά την Νεολιθική περίοδο τα μέταλλα και τα ορυκτά χρησιμοποιούνται εκτενέστερα και πιο συστηματικά, με εκμετάλλευση των ποικίλλων ιδιοτήτων τους για επιπλέον χρήσεις, εκτός της επιβίωσης. Σημαντικός σταθμός αποτέλεσε κατά την εποχή του χαλκού η ανάπτυξη της μεταλλουργίας και η εκτεταμένη χρήση του κράματος χαλκού-κασσιτέρου, γνωστό και ως μπρούντζος, για την παραγωγή εργαλείων και όπλων με μεγαλύτερη αντοχή. Έπειτα, κατά την εποχή του Σιδήρου ξεκίνησε η επεξεργασία των μετάλλων όπως, χαλκός σίδηρος, μόλυβδος, χρυσός, άργυρος, και η παραγωγή χάλυβα για την εκπλήρωση των νέων αναγκών του ανθρώπου λόγω της εξέλιξης. Στην σύγχρονη εποχή τα ορυκτά και τα μέταλλα είναι ευρέως διαδεδομένα διότι βρίσκονται σε ποικίλα προϊόντα καθημερινής χρήσης αλλά και σε αντικείμενα υψηλής τεχνολογίας όπως, κινητά τηλέφωνα, μπαταρίες ιόντων λιθίου, φωτοβολταϊκά συστήματα, καλώδια οπτικών ινών. Αξίζει επιπλέον να σημειωθεί, ότι αναπτύχθηκε μια ομάδα πρώτων υλών, οι οποίες χαρακτηρίστηκαν κρίσιμες διότι λόγω της υψηλής ζήτησης τους και της χαμηλής υποκαταστασιμότητας υπάρχει ο κίνδυνος εξάντλησης τους. Τα μέταλλα αυτά είναι τα παρακάτω: Sb, Be, Cr, Co, C, F, Ga, Ge, In, Mg, Nb, P, PGE, HREE, LREE, Si, W, Sc (Μέλφος κ.ά. 2021).

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

Α.Π.Θ

ογίας

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Επομένως, γίνεται κατανοητό ότι οι ορυκτοί πόροι αποτελούν αναπόστατο κομμάτι των σύγχρονων κοινωνιών και για αυτό τον λόγο έχει αναπτυχθεί η ανακάλυψη και εκμετάλλευση των κοιτασμάτων. Η μελέτη των κοιτασμάτων οδήγησε στον διαχωρισμό τους σε κατηγορίες με βάση τα χαρακτηριστικά τους (τρόπος γένεσης, μεταλλοφορία, μορφή κλπ.). Τα πορφυριτικά κοιτάσματα αποτελούν μια ιδιαίτερη κατηγορία κοιτασμάτων, αφού είναι η κύρια πηγή εξόρυξης χαλκού και σχεδόν η μόνη πηγή εξόρυξης μολύβδου. Πρόκειται για κοιτάσματα μεγάλων διαστάσεων με μικρές σχετικά συγκεντρώσεις των κυρίως μετάλλων της μεταλλοφορίας (Cu, Mo, Au, Re), των οποίων η εκμετάλλευση γίνεται επιφανειακά σε όλη την μάζα του πετρώματος.

Στην Ελλάδα παρατηρούνται ποικίλες εμφανίσεις πορφυριτικών κοιτασμάτων, οι οποίες είναι πλούσιες σε μέταλλα οικονομικής σημασίας. Διακρίνονται δύο μεταλλογενετικές επαρχίες στον Ελλαδικό χώρο, η πρώτη εντοπίζεται στην βόρεια Ελλάδα στην μάζα Ροδόπης και στην Σερβομακεδονική ζώνη με ηλικία Ολιγοκαίνου, ενώ η δεύτερη βρίσκεται στην νότια Ελλάδα στην Αττικοκυκλαδική ζώνη με ηλικία Μειοκαίνου.

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη



Σχ. 1.1. Πορφυριτικά κοιτάσματα στην μάζα Ροδόπης και την Σερβομακεδονική ζώνη (Voudouris et al. 2019).

2. ΓΕΝΙΚΑ ΓΙΑ ΤΑ ΠΟΡΦΥΡΙΤΙΚΑ ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΑ

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

Τα πορφυριτικά (ή υποηφαιστειακά) κοιτάσματα είναι μια πολύ σημαντική κατηγορία κοιτασμάτων καθώς αποτελούν πηγή Cu, Mo και Au, ενώ μπορούν να βρεθούν και μικρότερες περιεκτικότητες από Re, Ag, W, Te, Pt, Pd, και Se. Πρόκειται για κοιτάσματα μεγάλης έκτασης που εντοπίζονται σε μικρά βάθη (0 - 4 km) και ο σχηματισμός τους σχετίζεται με την κυκλοφορία υδροθερμικών διαλυμάτων. Τα μεταλλοφόρα διαλύματα ψύχονται απότομα με τέτοιο τρόπο ώστε να μην παρατηρείται ζωνώδης ανάπτυξη των μεταλλικών στοιχείων αλλά να αποτίθενται ταυτόχρονα. Εξαιτίας της εμφάνισης τους σε μικρό βάθος, η εκμετάλλευσή τους συνήθως γίνεται επιφανειακά σε μεταλλεία ανοικτού τύπου (open pit) και τα οικονομικά εκμεταλλεύσιμα μέταλλα είναι Cu, Au, Mo και σε μικρότερες περιεκτικότητες Re, Pt, Te, Pd.

Το γεωτεκτονικό περιβάλλον στο οποίο συνήθως δημιουργούνται τα πορφυριτικά κοιτάσματα είναι σε ορογενετικές ζώνες σύγκλισης ηπειρωτικών περιθωρίων ή σε ζώνες υποβύθισης νησιωτικών τόξων. Συνδέονται με ασβεσταλκαλικό ή αλκαλικό μαγματισμό ο οποίος δημιουργείται κατά μήκος της υποβύθισης των λιθοσφαιρικών πλακών (Σχ. 2.1). Άλλες απόψεις που έχουν διατυπωθεί υποστηρίζουν ότι ο σχηματισμός των πορφυριτικών κοιτασμάτων μπορεί να σχετίζεται με υποβυθίσεις χαμηλής γωνίας κλίσης (arc reversals, low-angle subduction) (Sinclair 2007).

Οι μορφές μεταλλοφορίας που παρατηρούνται είναι με μορφή φλεβών, διάσπαρτη μεταλλοφορία, πλέγμα φλεβιδίων (stockworks) και συστήματα παράλληλων φλεβών (sheeted dykes). Ακόμη, από την δράση μαγματικών ρευστών εξαλλοιώνονται τα πετρώματα και προκαλούνται ζώνες υδροθερμικής εξαλλοίωσης.



Σχ. 2.1. Ζώνες εμφανίσεως πορφυριτικών κοιτασμάτων παγκοσμίως (Richards 2013).

2.1 ΓΕΝΕΣΗ ΠΟΡΦΥΡΙΤΙΚΩΝ ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΩΝ

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

Η γένεση των πορφυριτικών κοιτασμάτων αποτελεί μια πολύπλοκη διαδικασία η οποία εξαρτάται από ποικίλους παράγοντες και συνθήκες. Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, τα πορφυριτικά κοιτάσματα συναντώνται σε ζώνες σύγκλισης ή υποβύθισης. Κατά την υποβύθιση του ωκεάνιου φλοιού κάτω από τον ηπειρωτικό, η ωκεάνια πλάκα όταν συναντάει την ζώνη Benioff (150 - 150 km) ανατήκεται, καθώς παρατηρείται αύξηση θερμοκρασίας - πίεσης, και δημιουργούνται μάγματα τα οποία ανέρχονται προς την επιφάνεια της γης στον ηπειρωτικό φλοιό. Εκεί, φτάνουν έως πολύ μικρά βάθη μέσω διόδων που βρίσκουν από ρήγματα και διακλάσεις, όπου και κρυσταλλώνονται. Με την άνοδο αυτή προκαλείται απότομη ψύξη του μάγματος και αργότερα θραύση λόγω της έντονης πίεσης από την παρουσία πτητικών συστατικών (Σχ. 2.1.1). Τα μάγματα αυτά είναι ενδιάμεσα έως όξινα, κυρίως ασβεσταλκαλικής και αλκαλικής σύστασης (Μέλφος και Βουδούρης 2021).



of the subducted slab



Ένα ευρέως διαδεδομένο μοντέλο το οποίο έχει προταθεί για να περιγράψει την γένεση των πορφυριτικών κοιτασμάτων είναι ένα μαγματικό-υδροθερμικό μοντέλο κατά το οποίο τα μεταλλικά συστατικά του κοιτάσματος προέρχονται από αντίστοιχες γενετικά και χρονικά συσχετιζόμενες διεισδύσεις (Sinclair 2007). Με βάση το μοντέλο αυτό αναπτύσσονται μεγάλα υδροθερμικά συστήματα μέσα και γύρω από τις διεισδύσεις, οι οποίες, αντιδρούν με μετεωρικά και μαγματικά νερά. Τα όξινα και ενδιάμεσα μάγματα όταν βρεθούν κοντά στην επιφάνεια της γης κρυσταλλώνονται στα περιθώρια του μαγματικού θαλάμου και παγιδεύονται τα πτητικά συστατικά. Λόγω της συγκέντρωσης των πτητικών και των ρευστών συστατικών δημιουργούνται υψηλές πιέσεις με αποτέλεσμα την θραύση των υπερκείμενων πετρωμάτων και τον σχηματισμό κενών χώρων όπου εισέρχονται τα υδροθερμικά ρευστά. Στην συνέχεια τα ρευστά αυτά ψύχονται και σπάνε το περιβάλλον πέτρωμα διαμορφώνοντας λατυποπαγή συστήματα (breccias) (Σχ. 2.1.2).

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη



Σχ. 2.1.2. Διάγραμμα μαγματικού-υδροθερμικού μοντέλου (Sinclair 2007).

2.2 ΖΩΝΕΣ ΥΔΡΟΘΕΡΜΙΚΗΣ ΕΞΑΛΛΟΙΩΣΗΣ

Ένα ιδιαίτερο φαινόμενο που σχετίζεται με τα πορφυριτικά κοιτάσματα είναι η ύπαρξη υδροθερμικών εξαλλοιώσεων στην έκταση του κοιτάσματος και η ζώνωση που παρουσιάζουν τα μέταλλα από τα εσωτερικά προς τα εξωτερικά (Σχ. 2.2.1).



Σχ. 2.2.1. Γενικό μοντέλο ζωνών υδροθερμικών εξαλλοιώσεων στα πορφυριτικά κοιτάσματα (Sillitoe 2010).

Η δημιουργία των υδροθερμικών εξαλλοιώσεων οφείλεται στην κυκλοφορία ρευστών τα οποία προέρχονται από την μεταμόρφωση πετρωμάτων σε τεκτονικές ζώνες και ιζηματογενείς λεκάνες. Τα ρευστά αυτά περιέχουν νερό του οποίου η προέλευση διαφέρει ανάλογα τις συνθήκες. Έτσι, πιο συγκεκριμένα μπορεί να είναι μαγματικό, μετεωρικό, συγγενές, θαλασσινό, μεταμορφικό και υψηλής αλατότητας νερό.

Τα υδροθερμικά διαλύματα είναι θερμά ρευστά με κύριο συστατικό το νερό (είτε σε υγρή είτε σε αέρια φάση) και περιέχουν στοιχεία όπως Si, Na, K, Al, S. Βρίσκονται σε θερμοκρασίες μεταξύ 100 και 600 °C και οι πιέσεις μεταβάλλονται από υψηλές έως χαμηλές ανάλογα με το βάθος. Οι συνθήκες αυτές, θερμοκρασίας και πίεσης, μειώνονται με την άνοδο των διαλυμάτων προς την επιφάνεια της γης και την αντίδραση τους με τα γειτονικά πετρώματα. Η άνοδος των διαλυμάτων γίνεται μέσω των ρηγμάτων, των διακλάσεων, των πόρων του πετρώματος και των ορίων των κόκκων όπου και αποτίθενται οι μεταλλοφορίες έπειτα από αντίδραση με τα γειτονικά πετρώματα (Σχ. 2.2.2).



Σχ. 2.2.2. Γενικό μοντέλο ζωνών υδροθερμικών εξαλλοιώσεων στα πορφυριτικά κοιτάσματα (Halley et al. 2015).

Η κυκλοφορία και η δράση των υδροθερμικών διαλυμάτων προκαλεί εκτεταμένες εξαλλοιώσεις στα πετρώματα με αποτέλεσμα την μεταβολή της αρχικής ορυκτολογικής και χημικής σύστασης με την αντικατάσταση των πρωτογενών μαγματικών ορυκτών από δευτερογενή υδροθερμικά ορυκτά. Οι υδροθερμικές εξαλλοιώσεις που προκαλούνται είναι χαρακτηριστικές και είτε επεκτείνονται σε μεγάλη έκταση γύρω από τα υποηφαιστειακά πετρώματα είτε εμφανίζονται πιο περιορισμένες υπό μορφή φλεβών και φλεβιδίων stockworks.

Ο τύπος και η ένταση των υδροθερμικών εξαλλοιώσεων κατά περίπτωση επηρεάζεται από: την ορυκτολογική και χημική σύσταση του πετρώματος ξενιστή, τις συνθήκες θερμοκρασίας και πίεσης, την σύσταση των ρευστών, την διαπερατότητα του περιβάλλοντος πετρώματος και από μεταβολές σε ορισμένα συστατικά.

Σύμφωνα με το ιδεατό μοντέλο των ζωνών υδροθερμικής εξαλλοίωσης και μεταλλοφορίας οι πιο διαδεδομένες είναι η καλιούχος (ποτασσική), η νατριοασβεστιούχος, η

σερικιτική ή σερικιτική, η αργιλική, η προπυλιτική, η προχωρημένη αργιλική εξαλλοίωση και η πυριτίωση.

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

- Καλιούχος (ή ποτασσική) εξαλλοίωση (potassic alteration): Σε αυτή την ζώνη εξαλλοίωσης έχουμε αντικατάσταση των πρωτογενών ορυκτών λόγω προσθήκης καλίου(Κ) στο σύστημα από δευτερογενή ορυκτά όπως βιοτίτη, υδροθερμικό καλιούχο άστριο, χαλαζία, σερικίτη και ανυδρίτη
- Νατριοασβεστιούχος εξαλλοίωση (soldic-calcic alteration): Προστίθενται νάτριο (Na) και ασβέστιο (Ca) στο σύστημα και αντικαθίστανται τα πλαγιόκλαστα και οι καλιούχοι άστριοι από αλβίτη και ολιγόκλαστο (νατριούχα πλαγιόκλαστα), ενώ τα φεμικά ορυκτά όπως είναι ο ακτινόλιθος, ο πυρόξενος και η κεροστίλβη αντικαθίστανται από μαγνητίτη, τιτανίτη και σπανιότερα διοψίδιο, χλωρίτη και επίδοτο.
- Σερικιτική ή Σερικιτική εξαλλοίωση (sericitic or phyllic alteration): Περιβάλλει και καλύπτει την ποτασσική ζώνη εξαλλοίωσης. Όπως και παραπάνω, τα πρωτογενή πλαγιόκλαστα και οι καλιούχοι άστριοι μετατρέπονται σε σερικίτη (λεπτομερής λευκός μαρμαρυγίας), χαλαζία σιδηροπυρίτη και χλωρίτη. Η ζώνη αυτή μπορεί να χαρακτηρίζεται και ως χλωριτική-σερικιτική όταν ο χλωρίτης εντοπίζεται σε μεγάλες ποσότητες.

 $3KAlSi_{3}O_{8} + 2H^{\scriptscriptstyle +} \rightarrow KAl_{3}Si_{3}O_{10}(OH)_{2} + 6SiO_{2} + 2K^{\scriptscriptstyle +}$

- Αργιλική εξαλλοίωση (argillic alteration): Δεν έχει καθορισμένη ανάπτυξη και σε πολλές περιπτώσεις δεν υπάρχει. Χαρακτηρίζεται από μετατροπή καλιούχων αστρίων σε καολίνη εξαιτίας επίδρασης όξινων διαλυμάτων, σε μοντμοριλλονίτη και σε ιλλίτη.
 4KAlSi₃O₈ + 4H₂O + 2CO₂ → 2K₂CO₃ + Al₄ (OH)₈ Si₄O₁₀ + 8SiO₂
- Προχωρημένη αργιλική εξαλλοίωση (advanced argillic alteration): Από διαδικασίες συμπύκνωσης και αλλοίωσης μαγματικών αερίων, πλούσιων σε SO₂ και HCl, σχηματίζονται καλύμματα (lithocaps) προχωρημένης αργιλικής εξαλλοίωσης. Τα ορυκτά εξαλλοίωσης είναι χαλαζίας, σερικίτης, καολινίτης σε χαμηλές θερμοκρασίες και πυροφυλλίτης σε υψηλές θερμοκρασίες.
- Προπυλιτική εξαλλοίωση (propylitic alteration): Αποτελεί εξωτερική ζώνη η οποία εκτείνεται στα γειτονικά πετρώματα σε μεγάλες αποστάσεις (έως και πάνω από 1000 μέτρα). Εντοπίζεται χλωρίτης, ασβεστίτης, επίδοτο και σπανίως αλβίτης και αδουλαίος.

Πυριτίωση (silicification): Αποτελεί μια εξαλλοίωση που συναντάται κυρίως στα επιθερμικά κοιτάσματα υψηλής θείωσης τα οποία σχετίζονται με τα πορφυριτικά συστήματα. Χαρακτηρίζεται από αντικατάσταση των ορυκτών από SiO₂ (χαλαζίας, οπάλιος).

2.3 ΜΟΡΦΕΣ ΜΕΤΑΛΛΟΦΟΡΙΑΣ

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

2.3.1 ΦΛΕΒΙΚΗ ΜΕΤΑΛΛΟΦΟΡΙΑ

Τα πορφυριτικά κοιτάσματα συνδέονται με μαγματικές διεισδύσεις και σχηματίζουν μεταλλοφορίες με μορφές κατακόρυφων και οριζόντιων επιμηκυμένων φλεβών, φλεβιδίων stockworks και μικρών ακανόνιστων σωμάτων. Εμφανίζονται με διάμετρο και μήκος που συνήθως δεν ξεπερνάν το 1 km. Ωστόσο, έχουν βρεθεί πορφυριτικές εμφανίσεις στις οποίες το μήκος των φλεβών ξεπερνά τα 4 km και μπορεί να φτάσει έως και 14 km.

Οι διεισδύσεις που σχετίζονται με τα πορφυριτικά κοιτάσματα διαχωρίζονται με βάση τον βαθμό και την χρονική στιγμή κατά την οποία κρυσταλλώνονται τα ορυκτά. Στην πρώτη φάση της διείσδυσης υπάρχει μεγαλύτερος βαθμός κρυστάλλωσης με καλά σχηματισμένα ορυκτά, ενώ σε μεταγενέστερες φάσεις ο βαθμός κρυστάλλωσης είναι μικρότερος με ορυκτά λιγότερο καλά σχηματισμένα.

Όσον αφορά τον τρόπο σχηματισμού των φλεβών, καθώς τα υδροθερμικά διαλύματα ανέρχονται προς την επιφάνεια μειώνονται η πίεση και θερμοκρασία με αποτέλεσμα να δημιουργούνται κατάλληλες συνθήκες στις οποίες λαμβάνει χώρα ο βρασμός του νερού και προκαλείται ο διαχωρισμός των φάσεων σε υγρή και αέρια. Έπειτα, στην αέρια κυρίως φάση συγκεντρώνονται τα σύμπλοκα ιόντα και διασπώνται ώστε ο Fe, ο Cu και ο Mo να παραμένουν ελεύθερα και να ενώνονται με το S που υπάρχει, δημιουργώντας σουλφίδια. Ακόμη σημαντικό ρόλο στην διαδικασία αυτή έχει η αύξηση της πτητικότητας του S, δηλαδή η αύξηση της διαλυτότητας, και η μείωση της πτητικότητας του Ο.

Όταν οι φλέβες διεισδύουν στα πετρώματα, τα πετρώματα αυτά δεν έχουν κρυσταλλωθεί ακόμα πλήρως κι έτσι δεν είναι ευθύγραμμες αλλά παρεκκλίνουν παίρνοντας καμπυλωτές μορφές. Ακόμη, τα όρια των φλεβών με το γειτονικό πέτρωμα μπορεί να είναι καθορισμένα στην περίπτωση που η διείσδυση γίνεται σε μια διάκλαση είτε στην περίπτωση που υπάρχουν πολλαπλές διεισδύσεις σε μια φλέβα, τα όρια να εμφανίζουν μια ζωνώδη και πιο ομαλή επαφή με το γειτονικό πέτρωμα.

Μία ταξινόμηση των φλεβών που είναι ευρέως διαδεδομένη έχει προταθεί από τον Sillitoe 2010. Χωρίζονται σε τρείς κατηγορίες, η πρώτη κατηγορία περιλαμβάνει τις φλέβες

Μ-τύπου, η δεύτερη κατηγορία τις φλέβες Α- και Β-τύπου και η τρίτη τις φλέβες D-τύπου (Σχ. 2.3.1).

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

Οι Μ-τύπου φλέβες σχηματίζονται πριν από τις Α-τύπου φλέβες και χαρακτηρίζονται από ορυκτά όπως χαλαζίας, μαγνητίτης, ακτινόλιθος, πρώιμος βιοτίτης ενώ δεν παρατηρείται η εμφάνιση σουλφιδίων και υδροθερμικών εξαλλοιώσεων.

Η δεύτερη κατηγορία φλεβών, που περιλαμβάνει τις Α- και Β-τύπου, διακρίνεται από τις Μ-τύπου φλέβες διότι είναι μεταγενέστερες και από ορυκτολογικής άποψης υπάρχουν επιπλέον χαλκοπυρίτης και βορνίτης. Πιο συγκεκριμένα, οι Α-τύπου φλέβες εμφανίζονται με μορφές τύπου stockworks και υποπαράλληλα sheeted dykes. Τα ορυκτά που εμφανίζονται στις φλέβες αυτές είναι κοκκώδης χαλαζίας, χαλκοπυρίτης, βορνίτης και τις εντοπίζουμε συχνά σε πορφυριτικά κοιτάσματα πλούσια σε Αu. Οι Β-τύπου φλέβες δημιουργούνται μετά από τις Ατύπου και το κύριο χαρακτηριστικό τους είναι ότι μπορεί να υπάρξει και δεύτερη διείσδυση με αποτέλεσμα να ξανανοίξει η φλέβα και να αποτεθούν εσωτερικά νέα ορυκτά, συνήθως χαλκοπυρίτης. Άλλα ορυκτά που υπάρχουν σε αυτές τις φλέβες είναι χαλαζίας, μολυβδαινίτης, σιδηροπυρίτης και βορνίτης. Αξίζει να σημειωθεί ότι σε πολλές περιπτώσεις η μεταλλοφορία Μο στα πορφυριτικά κοιτάσματα Cu και Μο εντοπίζεται στις Β-τύπου φλέβες.

Η τρίτη κατηγορία φλεβών, D-τύπου, δημιουργούνται τελευταίες και αποτελούνται από χαλαζία, σιδηροπυρίτη, χαλκοπυρίτη, σπανίως εμφανίζονται μεγάλης οικονομικής σημασίας βορνίτης και χαλκοσίνης μαζί με τον χαλκοπυρίτη. Οι D-τύπου φλέβες εμφανίζονται σε αφθονία στα πορφυριτικά κοιτάσματα Cu και Mo σε σχέση με τα πορφυριτικά κοιτάσματα Cu και Au όπου δεν είναι τόσο συνηθισμένες.

Όσον αφορά τις υδροθερμικές εξαλλοιώσεις που σχετίζονται με τις φλεβικές μεταλλοφορίες, οι φλέβες της πρώτης και της δεύτερης κατηγορίας αποτίθενται κατά την ποτασσική εξαλλοίωση, ενώ της τρίτης κατηγορίας κατά την χλωριτική-σερικιτική εξαλλοίωση, την σερικιτική εξαλλοίωση και την προχωρημένη αργιλική εξαλλοίωση. Στις φλέβες αυτές, και κυρίως στις D-τύπου φλέβες μπορεί να εντοπιστεί τουρμαλίνης σε αφθονία μαζί με χαλαζία, σιδηροπυρίτη και η παρουσία του σχετίζεται με μαγματικά υδροθερμικά breccias που επηρεάζονται από σερικιτικές εξαλλοιώσεις.



Σχ. 2.3.1. Σχηματική απεικόνιση τύπων φλεβών στα πορφυριτικά κοιτάσματα (Sillitoe 2010).

2.3.2 BRECCIAS

Στα πορφυριτικά κοιτάσματα εντοπίζονται τρείς τύποι υδροθερμικών breccias, οι οποίοι είναι τα μαγματικά-υδροθερμικά breccias, τα phreatic (μετεωρικά-υδροθερμικά) breccias και τα φρεατομαγματικά breccias (diatremes).

Τα μαγματικά-υδροθερμικά breccias είναι ο πιο διαδεδομένος τύπος υδροθερμικών breccia και εντοπίζονται στα βαθύτερα τμήματα των πορφυριτικών κοιτασμάτων Cu. Στα κοιτάσματα αυτά τα breccia εμφανίζονται είτε σε περιεκτικότητες από 5 έως 10 % είτε καθόλου. Παρουσιάζουν ποικιλία από υφές, οι οποίες εξαρτώνται από την σύσταση, την μορφή των σπασμένων τεμαχών (γωνιώδη ή αποστρογγυλεμένα), την αναλογία matrix/cement και τον τύπο υδροθερμικής εξαλλοίωσης του κοιτάσματος (Σχ. 2.3.2). Οι μορφές που εμφανίζουν είναι από σωληνοειδής έως διάσπαρτα σώματα και δημιουργούνται κατά τις ενδιάμεσες φάσεις κρυστάλλωσης των πορφυριτικών, το οποίο φαίνεται από την ύπαρξη προϋπαρχόντων τύπων εξαλλοιώσεων και φλεβών στα τεμάχη. Κατά τα νωρίτερα στάδια σχηματισμού των breccia παρατηρείται ποτασσική εξαλλοίωση με ορυκτά όπως ο βιοτίτης, ο μαγνητίτης και ο χαλκοπυρίτης, ενώ στα μεταγενέστερα στάδια έχουμε σερικιτική εξαλλοίωση και ορυκτά όπως ο χαλαζίας, ο χαλκοπυρίτης, ο σιδηροπυρίτης και ο τουρμαλίνης.



Σχ. 2.3.2. Σχηματική απεικόνιση μαγματικών-υδροθερμικών breccia και οι ζώνες εξαλλοίωσης τους (Sillitoe 2010).

Τα φρεατικά (μετεωρικά-υδροθερμικά) breccias εμφανίζονται κυρίως στα πορφυριτικά συστήματα Cu, υπό μορφή φλεβών ή μεγάλων σωμάτων που προκύπτουν από την ύπαρξη ψυχρού υπόγειου νερού κοντά στο μάγμα. Συνήθως περιέχουν πολύμικτα τεμάχη γωνιώδη έως αποστρογγυλεμένα και εμφανίζουν χαρακτηριστικά μεταγενέστερων φάσεων κρυστάλλωσης, δηλαδή είναι άγονα και δεν έχουν υδροθερμικές εξαλλοιώσεις. Τα ορυκτά που συναντώνται είναι ο χαλαζίας, ο χαλκηδόνιος, ο εναργίτης, ο βαρύτης και ο αλουνίτης.

Τέλος, τα φρεατομαγματικά breccias (diatremes) εμφανίζονται σε πορφυριτικά κοιτάσματα Cu και σε επιθερμικά κοιτάσματα ως επιφανειακές εκδηλώσεις των ηφαιστείων maar. Τα diatremes είναι διέξοδοι απ' όπου διαφεύγει ανοδικά ηφαιστειακό υλικό που προέρχεται από φρεατομαγματική εκρηκτική δράση. Εντοπίζονται κοντά στην επιφάνεια της

γης σε απόσταση μικρότερη του 1 km και με κατακόρυφη ανάπτυξη τουλάχιστον 2 km, στις παλαιοεπιφάνειες των maar ηφαιστείων. Αυτή η κατηγορία breccia χαρακτηρίζεται από πολύμικτα υλικά και τεμάχη λεπτόκοκκα, αποστρογγυλεμένα και λεία. Τα φρεατομαγματικά breccias διαφέρουν από τα μαγματικά-υδροθερμικά breccias, λόγω της έλλειψης τοφφικού υλικού και από τα phreatic (μετεωρικά-υδροθερμικά) breccias λόγω της διαφορετικής υφής που προκαλείται από την προχωρημένη αργιλική εξαλλοίωση (Sillitoe 2010).

2.4 ТҮПОІ

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

Τα πορφυριτικά κοιτάσματα εμφανίζουν ποικίλες μεταλλοφορίες με βάση τις οποίες κατηγοριοποιούνται χρησιμοποιώντας κάθε φορά το στοιχείο με την επικρατούσα περιεκτικότητα. Έτσι, οι κυριότεροι τύποι που συναντώνται είναι πορφυριτικά κοιτάσματα χαλκού, μολυβδαινίου και χρυσού.

2.4.1 ΠΟΡΦΥΡΙΤΙΚΑ ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΑ ΧΑΛΚΟΥ

Μια αξιοσημείωτη και πολύ συνήθης κατηγορία πορφυριτικών κοιτασμάτων είναι τα πορφυριτικά κοιτάσματα χαλκού, τα οποία χαρακτηρίζονται από μεγάλη εξάπλωση και χρίζουν οικονομικής σημασίας. Ο χαλκός εντοπίζεται σε μορφές μεταλλοφορίας κυρίως διάσπαρτες εντός λευκοκρατικών πετρωμάτων, υποηφαιστειακών ή πλουτωνικών, όπως γρανίτες και διορίτες. Επίσης, η μεταλλοφορία μπορεί να υπάρξει και με μορφή φλεβιδίων stockworks. Από ορυκτολογικής απόψεως περιλαμβάνονται από σουλφίδια κυρίως ο σιδηροπυρίτης και ο χαλκοπυρίτης, ενώ ακόμη βορνίτης, χαλκοσίνης, τετραεδρίτης και ίχνη μολυβδαινίτη. Ιδιαίτερο χαρακτηριστικό της κατηγορίας αυτής είναι τα τεράστια αποθέματα κοιτασμάτων, λόγω μεγάλων διαστάσεων των μητρικών πετρωμάτων, παρόλο που η περιεκτικότητα του χαλκού σε αυτά είναι πολύ μικρή (0,2% έως πάνω από 1% Cu) (Sinclair 2007). Τα πορφυριτικά κοιτάσματα χαλκού εντοπίζονται κατά κύριο λόγο σε περιοχές της Βόρειας και Νότιας Αμερικής (Άνδεις), ενώ στην Ελλάδα παρατηρούνται χαρακτηριστικές εμφανίσεις στην Παγώνη Ράχη.

2.4.2 ΠΟΡΦΥΡΙΤΙΚΑ ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΑ ΧΑΛΚΟΥ-ΜΟΛΥΒΔΟΥ

Μια ακόμη κατηγορία πορφυριτικών κοιτασμάτων που παρατηρείται είναι τα πορφυριτικά κοιτάσματα χαλκού-μολύβδου, τα οποία συνδέονται με γεωτεκτονικά περιβάλλοντα ηπειρωτικών περιθωρίων.

Αρχικά, τα πορφυριτικά κοιτάσματα τύπου Cu-Mo ξεχωρίζουν από την προηγούμενη κατηγορία καθώς τα πρώτα εμφανίζονται σε πυριγενή πετρώματα που σχηματίζονται σε περιοχές ρηγμάτων τάσεως (rifting). Η μεταλλοφορία περιλαμβάνει ορυκτά όπως

μολυβδαινίτη, καλιούχους αστρίους, βιοτίτη, σερικίτη φθορίτη, επίδοτο, βισμουθινίτη, και τοπάζιο. Μια ιδιαίτερη κατηγοριοποίηση που παρατηρείται είναι ο διαχωρισμός σε τύπου Climax και τύπου Endako, ο οποίος σχετίζεται με ζώνες υποβύθισης και ζώνες ρηγμάτων (rifting). Ο τύπος Endako χαρακτηρίζεται από μικρές περιεκτικότητες μολύβδου, ενώ ο τύπος Climax περιέχει περισσότερο μόλυβδο (πάνω από 0,15% Mo). Στα τύπου Climax διακρίνονται δύο συγκεντρικές ζώνες μεταλλοφορίας, εσωτερικά και πιο κοντά στο μητρικό πέτρωμα εμφανίζεται η ζώνη μολυβδαινίου, ενώ εξωτερικά παρατηρείται η ζώνη βολφραμίου (Sinclair 2007) (Σχ. 2.4.2). Η μεταλλοφορία του μολυβδαινίτη εμφανίζεται σε σχήματα λεπτών εξαγωνικών φύλλων, με πάχος μικρότερο από 0,1mm, μέσα σε συστήματα χαλαζιακών φλεβιδίων stockworks τα οποία βρίσκονται πάνω από το μητρικό πέτρωμα. Στην Ελλάδα χαρακτηριστική εμφάνιση πορφυριτικού κοιτάσματος που περιέχει μόλυβδο εντοπίζουμε στην περιοχή της Μαρώνειας.

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη



Σχ. 2.4.2. Σχηματική απεικόνιση ζωνών μεταλλοφορίας κοιτασμάτων τύπου Climax (Mutschler et al. 1981).

2.4.3 ΠΟΡΦΥΡΙΤΙΚΑ ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΑ ΧΑΛΚΟΥ-ΧΡΥΣΟΥ

Τα πορφυριτικά κοιτάσματα χαλκού-χρυσού αποτελούν σημαντικές πηγές χρυσού, γεγονός το οποίο τα καθιστά συνήθως οικονομικά εκμεταλλεύσιμα. Η μεταλλοφορία του χρυσού εντοπίζεται σε σουλφίδια Cu, Fe και χωρίζεται με βάση τις ατομικές αναλογίες Cu/Au, σε εύρος από 5.000 έως 5.000.000 με μέση τιμή στο 40.000 στην οποία γίνεται ο διαχωρισμός μεταξύ πλούσιων και φτωχών σε χρυσό κοιτάσματα. Στα περισσότερα συστήματα η παρουσία

χρυσού συνδέεται στενά με τον χαλκό και δημιουργείται κατά τα πρώτα στάδια εξαλλοίωσης και κρυστάλλωσης των ορυκτών. Στο κεντρικό τμήμα των κοιτασμάτων συγκεντρώνονται οι μεγαλύτερες ποσότητες χαλκού και χρυσού. Επιπλέον, η μεταλλοφορία του χρυσού εντοπίζεται ανάμεσα στους κόκκους των ορυκτών ή σε εγκλείσματα μέσα σε σουλφίδια, όπως είναι ο βορνίτης και ο χαλκοπυρίτης. Μια ιδιαίτερη εμφάνιση πορφυριτικών κοιτασμάτων χαλκού-χρυσού παρατηρείται στην Ελλάδα στην περιοχή των Σκουριών στην Χαλκιδική (Kesler et al. 2002).

2.4.4 ΕΜΦΑΝΙΣΕΙΣ ΡΗΝΙΟΥ ΣΤΑ ΠΟΡΦΥΡΙΤΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ

Το ρήνιο (Re) είναι ένα πολύ ιδιαίτερο και σπάνιο μέταλλο το οποίο εντοπίζεται σε ίχνη μέσα στον μολυβδαινίτη και δεν υπάρχει ελεύθερο μέσα στην φύση. Χαρακτηρίζεται από το υψηλότερο σημείο βρασμού στους 5596°C και την τρίτη (κατά σειρά) υψηλότερη θερμοκρασία τήξης στους 3186°C. Τα πορφυριτικά κοιτάσματα είναι τα μόνο από τα οποία μπορεί να εξορυχθεί το ρήνιο καθώς τις περισσότερες φορές εμφανίζεται μέσα στον μολυβδαινίτη σε ίχνη. Τα κύρια ορυκτά από τα οποία αποτελείται το ρήνιο είναι ο ρηνιίτης (ReS₂) και ο ταρκιανίτης (Cu, Fe)(Re, Mo)₄S₈. Οι μεταλλοφορίες σχετίζονται με την παρουσία Au, με σουλφίδια Fe-Cu και οξείδια ενώ αποτίθενται στις ποτασσικές, νατριούχες και σερικιτικές εξαλλοιώσεις. Ο λόγος που υπάρχει εμπλουτισμός σε ρήνιο στα πορφυριτικά κοιτάσματα, σε εκτεταμένη περιοχή, είναι διότι σχετίζεται με την ασθενοσφαιρική σφήνα που σχηματίζεται σε περιβάλλον υποβύθισης ωκεάνιου φλοιού.

Η κυριότερη εμπορική πηγή του ρηνίου είναι ο μολυβδαινίτης και είναι ένα από τα πιο ακριβά βιομηχανικά μέταλλα καθώς η διαθεσιμότητα του είναι πολύ χαμηλή σε σχέση με την ζήτηση του στην αγορά.

Οι πιο σημαντικές χρήσεις του ρηνίου είναι:

- η παραγωγή υπερκραμάτων με σκοπό την αύξηση αντοχής των υλικών σε υψηλές θερμοκρασίες
- η χρήση του ως καταλύτη (σε συνδυασμό με την πλατίνα) στην παραγωγή πετρελαίου
 με στόχο την βελτιστοποίηση των υγρών καυσίμων
- η κατασκευή ευαίσθητων οργάνων ώστε να αντιστέκονται σε μεταβολές θερμοκρασίας
- και στην ιατρική.

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

Αξίζει να σημειωθεί ότι στην Θράκη εμφανίζονται οι υψηλότερες περιεκτικότητες ρηνίου στον κόσμο (έως 4,7%), συγκεκριμένα στις περιοχές Παγώνη Ράχη Κίρκης, στον Κώνο Σαπών, στην Μαρώνεια και στην Μελίταινα Ξάνθης (Σχ. 2.4.4).



Σχ. 2.4.4. Μικροσκοπική εικόνα από το πορφυριτικό κοίτασμα Παγώνη Ράχης όπου απεικονίζονται ρηνιίτης μολυβδαινίτης και χαλαζίας (Voudouris 2009).

3. ΠΟΡΦΥΡΙΤΙΚΑ ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΑ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ

3.1 ΓΕΝΙΚΑ

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

Στην Ελλάδα έχουν μελετηθεί πλήθος πορφυριτικών κοιτασμάτων, ιδιαίτερης σημασίας καθώς έχουν βρεθεί σε αυτά ποσότητες σπάνιων μετάλλων (Re) και μέταλλα PGM (Platinum Group Metals) (Pt, Pd, Rh, Ru, Os). Όπως έχει αναφερθεί και παραπάνω (Kεφ. 1), ο Ελληνικός χώρος χωρίζεται σε δύο μεταλλογενετικές επαρχίες, η μια είναι ηλικίας Ολιγοκαίνου και βρίσκεται στην περιοχή της μάζας Ροδόπης και στην Σερβομακεδονική ζώνη, ενώ η δεύτερη είναι ηλικίας Μειοκαίνου και εντοπίζεται στην Αττικοκυκλαδική ζώνη στην νότια Ελλάδα (Σχ. 3.1).

Η πρώτη μεταλλογενετική επαρχία εμφανίζεται σε περιοχές της ανατολικής Ροδόπης όπως στην Μαρώνεια, στην Παγώνη Ράχη, στην Μελίταινα και σε περιοχές της Σερβομακεδονικής, όπως στην Ολυμπιάδα της Βορειοανατολικής Χαλκιδικής ή Μεταλλεία Κασσάνδρας και στο Κιλκίς. Η γένεση των κοιτασμάτων αυτών σχετίζεται με πορφυριτικούς γρανοδιορίτες, πορφυριτικούς μικροδιορίτες, πορφυριτικούς μικρογρανίτες, τα οποία είναι υποηφαιστειακά πετρώματα, ενδιάμεσης έως όξινης σύστασης. Ο σχηματισμός των κοιτασμάτων αυτών σχετίζεται με την άνοδο μαγματικών θαλάμων και την δράση ρηγμάτων αποκόλλησης στην περιοχή. Κάποιες διαφορές που παρατηρούνται ανάμεσα στα κοιτάσματα της πρώτης μεταλλογενετικής επαρχίας, είναι ότι σε αυτά που βρίσκονται στην μάζα Ροδόπης διακρίνεται μια επιθερμική επικάλυψη ως αποτέλεσμα του σχηματισμού σε μικρά βάθη και της συσχέτισης τους με υποηφαιστειακά πετρώματα. Αντιθέτως, τα κοιτάσματα της Σερβομακεδονικής ζώνης δεν εμφανίζουν την επιθερμική επικάλυψη καθώς, δημιουργήθηκαν σε ενδιάμεσα βάθη και συνδέονται με υψηλού βαθμού μεταμορφωμένα πετρώματα.

Η δεύτερη μεταλλογενετική επαρχία παρατηρείται στην ενότητα Βερτίσκου της Σερβομακεδονικής, όπως Βάθη και Δοϊράνη, στην Λήμνο και στην Λέσβο, στην Σαμοθράκη (Μακρύγιαλος) και κάποιες περιορισμένες εμφανίσεις στην Αττικοκυκλαδική, όπως στην Πλάκα Λαυρίου, στην Καμάριζα, στην Τήνο και στην Σέριφο (Μέλφος και Βουδούρης 2021).



Σχ. 3.1 Γεωλογικός χάρτης με τις γεωτεκτονικές ζώνες και τα κοιτάσματα της Ελλάδας, όπου με τα κόκκινα σημεία συμβολίζονται τα πορφυριτικά κοιτάσματα (Melfos and Voudouris 2017).

3.2 ΠΟΡΦΥΡΙΤΙΚΟ ΚΟΙΤΑΣΜΑ Cu-Mo-Re-Au ΣΤΗΝ ΜΑΡΩΝΕΙΑ

Στην περιοχή της Μάζας Ροδόπης εντοπίζονται πολυάριθμα πορφυριτικά κοιτάσματα, ηλικίας Ολιγοκαίνου - Μειοκαίνου, τα οποία συνδέονται με γεγονότα όπως η διείσδυση μαγμάτων κατά μήκος ρηγμάτων αποκόλλησης και η εκταφή συμπλεγμάτων μεταμορφικών πυρήνων. Κατά το Καινοζωικό η γένεση κοιτασμάτων στον Ελλαδικό χώρο επηρεάστηκε από την διάνοιξη και το κλείσιμο του ωκεανού της Τηθύος ανάμεσα στην Αφρικανική και την Ευρασιατική πλάκα, καθώς και από την υποβύθιση της μιας πλάκας κάτω από την άλλη. Με αποτέλεσμα να λάβει χώρα η υποχώρηση και τήξη της πλάκας στον οπισθοτόξιο χώρο, η δημιουργία νέων μαγμάτων, και τέλος η κατάρρευση του ορογενούς κατά μήκος ρηγμάτων αποκόλλησης και η αποκάλυψη μεταμορφικών πυρήνων.

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

Επομένως, ένα από τα πορφυριτικά κοιτάσματα που εμφανίζονται στην Μάζα Ροδόπης είναι το πορφυριτικό κοίτασμα 5 km νοτιοανατολικά του χωριού Μαρώνεια, με μεταλλοφορία Cu, Mo, Re, Au. Στην περιοχή της Μαρώνειας προϋπήρχαν μεταμορφωμένα υλικά της Περιροδοπικής ζώνης, πιο συγκεκριμένα αποτελείται από μεταϊζηματογενή υλικά όπως μάρμαρα, σχιστόλιθους και από μεταηφαιστειοϊζηματογενή πετρώματα όπως πρασινοσχιστόλιθους, χαλαζίτες, τα οποία έχουν ηλικίες από Τριαδικό έως Ιουρασικό. Στα πετρώματα αυτά της Περιροδοπικής ζώνης διείσδυσαν ο πλουτωνίτης της Μαρώνειας και ο πορφυριτικός μικρογρανίτης του λόφου Κτίσματα.(Σχ. 3.2.1.)



Σχ. 3.2.1 Γεωλογικοί σχηματισμοί στην περιοχή της Μαρώνειας (Melfos et al. 2020).

Ο πλουτωνίτης της Μαρώνειας είναι ηλικίας Ολιγοκαίνου και αποτελείται από μονζογάββρο, χαλαζιακό μονζονίτη και κάποια μικρά σώματα γάββρου. Περιέχει ορυκτά όπως πυρόξενο, βιοτίτη, πλαγιόκλαστο, χαλαζία, απατίτη, μαγνητίτη, τιτανίτη, ενώ χαρακτηρίζεται κυρίως από μεσόκοκκη υφή. Ο πορφυριτικός μικρογρανίτης στα Κτίσματα είναι αυτός που σχετίζεται κυρίως με την μεταλλοφορία του πορφυριτικού κοιτάσματος Cu, Mo, Re, Au. Ο

μικρογρανίτης αυτός διείσδυσε κατά μήκος του κάτω τεμάχους ενός ρήγματος αποκόλλησης και διαπερνάει ακόμη τον πλουτωνίτη της Μαρώνειας. Η διείσδυση επηρεάστηκε από τρία σετ ρηγμάτων με τάσεις, ΒΑ-ΝΔ, ΒΔ-ΝΑ και ΔΝΒ-ΑΝΑ, ενώ δημιούργησε και μια εκτεταμένη ζώνη διάτμησης στην περιοχή που επηρέασε τον πλουτωνίτη και τον πορφυριτικό μικρογρανίτη προκαλώντας έντονη πλαστική και κατακλαστική παραμόρφωση. Στον πορφυριτικό μικρογρανίτη εμφανίζονται φαινοκρύσταλλοι χαλαζία, καλιούχων αστρίων, πλαγιοκλάστων και μεταλλοφορία που περιέχει μαγνητίτη, σιδηροπυρίτη, χαλκοπυρίτη και μολυβδαινίτη (Voudouris et al. 2019).

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

3.2.1 YPOΘEPMIKES ΕΞΑΛΛΟΙΩΣΕΙΣ ΣΤΟ ΚΟΙΤΑΣΜΑ ΤΗΣ ΜΑΡΩΝΕΙΑΣ

Στο πορφυριτικό κοίτασμα της Μαρώνειας εντοπίζονται πέντε εκτεταμένες ζώνες εξαλλοίωσης που καλύπτουν σχεδόν όλη την έκταση του κοιτάσματος. Οι ζώνες εξαλλοίωσης που συναντώνται είναι : η ποτασσική, η νατριοασβεστιούχος, η σερικιτική, η αργιλική και η προπυλιτική.

Η καλιούχος (ή ποτασσική) εξαλλοίωση παρατηρείται κυρίως στα βόρεια, νοτιοανατολικά και νοτιοδυτικά περιθώρια του πορφυριτικού μικρογρανίτη με τον πλουτωνίτη της Μαρώνειας. Η αργιλική και η σερικιτική εξαλλοίωση βρίσκονται σε όλη την έκταση του πορφυριτικού μικρογρανίτη, ενώ ένα μέρος της προπυλιτικής εξαλλοίωσης εμφανίζεται στον πλουτωνίτη στο νοτιοδυτικό περιθώριο του με τον πορφυριτικό μικρογρανίτη. Στην νοτιοανατολική επαφή των πετρωμάτων, οι εξαλλοιώσεις φαίνεται να επηρεάζονται από την τεκτονική της περιοχής, με αποτέλεσμα οι εξαλλοιώσεις να ξεχωρίζουν από τα ρήγματα ώστε η ποτασσική εξαλλοίωση να εμφανίζεται στον μυλωνιτιωμένο πορφυριτικό μικρογρανίτη, η νατριοασβεστιούχος εξαλλοίωση στον μυλωνιτιωμένο μονζονίτη και ένα μέρος της προπυλιτικής εξαλλοίωσης πάλι στον μονζονίτη. Ακόμη, στο βορειοανατολικό και στο νοτιοανατολικό τμήμα του πορφυριτικού μικρογρανίτη παρατηρούμε δύο ζώνες πυριτίωσης (silicification) με παραγένεση επιθερμικού σταδίου (Σχ. 3.2.2.1).



Σχ. 3.2.2.1 Ζώνες εξαλλοίωσης πορφυριτικού κοιτάσματος Μαρώνειας (Melfos et al. 2020).

3.2.2 ΤΥΠΟΙ ΦΛΕΒΩΝ ΣΤΟ ΚΟΙΤΑΣΜΑ ΤΗΣ ΜΑΡΩΝΕΙΑΣ

Στο πορφυριτικό κοίτασμα Cu, Mo, Re, Au της Μαρώνειας η μεταλλοφορία εντοπίζεται με μορφή διάσπαρτη, φλεβική, ακανόνιστη και σε δίκτυα φλεβιδίων (stockworks), μέσα στον πορφυριτικό γρανίτη αλλά και στα περιβάλλοντα πετρώματα. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρατηρείται στον φλεβικό τύπο της μεταλλοφορίας. Αρχικά, παρατηρούνται απλιτικές γρανιτικές και μικρογρανιτικές φλέβες, πάχους από μερικά εκατοστά έως ένα μέτρο που διαπερνούν τον μονζονίτη και φιλοξενούν μεταλλοφορία σιδηροπυρίτη, χαλκοπυρίτη και μαγνητοπυρίτη. Ακόμη, εμφανίζονται έξι τύποι υδροθερμικών φλεβών, από αρχικά έως τελικά στάδια, οι οποίοι είναι οι εξής : Μ-τύπου, ΕΒ-τύπου, Α-τύπου, Β-τύπου, D-τύπου και επιθερμικού τύπου (Melfos et al. 2020).

- Μ-τύπου φλέβες : Οι φλέβες αυτές διασταυρώνονται με τον μονζονίτη και τις απλιτικές φλέβες κατά μήκος μιας ζώνης διάτμησης, όπου υπάρχει νατριοασβεστιούχος εξαλλοίωση. Χαρακτηρίζονται από πάχος μικρότερο των 5 εκατοστών και περιέχουν ορυκτά όπως δευτερογενή ακτινόλιθο, νατριούχο πλαγιόκλαστο, τιτανίτη, επίδοτο, αλλανίτη, μαγνητίτη και σπάνια σιδηροπυρίτη, σε περίπτωση που υπάρξει σερικιτική εξαλλοίωση.
- ΕΒ-τύπου φλέβες : Οι ΕΒ-τύπου φλέβες εμφανίζονται με πάχος από 1 έως 5 χιλιοστά, σε μονζονίτη και πορφυριτικό μικρογρανίτη που έχει υποστεί καλιούχο (ποτασσική) εξαλλοίωση. Περιέχουν λεπτόκοκκο βιοτίτη και μαγνητίτη.

και Β-τύπου φλέβες : Οι δύο αυτοί τύποι φλεβών εμφανίζονται με πάχος

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

> από 1 έως 3 εκατοστά, ως φλεβίδια σε δίκτυο stockworks, στον πορφυριτικό μικρογρανίτη είτε στο εξαλλοιωμένο από ποτασσική εξαλλοίωση τμήμα είτε στο τμήμα που δεν έχει επηρεαστεί από κάποια υδροθερμική εξαλλοίωση. Οι Ατύπου περιέχουν ορυκτά όπως χαλαζία, καλιούχους αστρίους, βιοτίτη, μαγνητίτη, ρουτίλιο και απατίτη, ενώ σε περίπτωση μεταλλοφορίας εντοπίζεται σιδηροπυρίτης, χαλκοπυρίτης και μαγνητοπυρίτης. Οι Β-τύπου φλέβες χαρακτηρίζονται από βιοτίτη, μολυβδαινίτη.

- **D-τύπου φλέβες :** Οι φλέβες D-τύπου εμφανίζονται στον πορφυριτικό μικρογρανίτη όπου υπάρχει σερικιτική εξαλλοίωση και διασταυρώνονται με τις A- και B-τύπου φλέβες. Είναι ευθύγραμμες φλέβες με πάχος έως 10 εκατοστά, και περιέχουν ορυκτά όπως χαλαζία, σερικίτη και σιδηροπυρίτη.
- Επιθερμικού τύπου φλέβες : Οι φλέβες αυτές βρίσκονται στην μάζα του πορφυριτικού μικρογρανίτη όπου υπάρχει αργιλική εξαλλοίωση, και έχουν πάχος από 1 έως 5 εκατοστά. Περιέχουν ορυκτά όπως πυροφυλλίτη, χαλαζία και μεταλλοφορίες σιδηροπυρίτη, γαληνίτη, σφαλερίτη και θειοάλατα Cu, Pb, Sb, As (βουρνονίτης, βουλανζερίτης, τεναντίτης).

3.2.3 ΟΡΥΚΤΟΛΟΓΙΑ ΤΟΥ ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΟΣ ΤΗΣ ΜΑΡΩΝΕΙΑΣ

Στο πορφυριτικό κοίτασμα της Μαρώνειας ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η ορυκτολογία της ποτασσικής (καλιούχου) και της νατριοασβεστιούχου εξαλλοίωσης. Στην νατριοασβεστιούχο εξαλλοίωση, μέσα στον μονζονίτη εντοπίζονται ορυκτά όπως ακτινόλιθος, τιτανίτης, μαγνητίτης, νατριοασβεστιούχα πλαγιόκλαστα, χαλαζίας, χλωρίτης. Στην ποτασσική εξαλλοίωση, μέσα στον μονζονίτη και τον πορφυριτικό μικρογρανίτη εμφανίζονται δευτερογενής βιοτίτης, καλιούχος άστριος, ρουτίλιο, απατίτης και μαγνητίτης.

Στην περιοχή της Μαρώνειας βρέθηκαν δύο τύποι βιοτίτη, πρωτογενής μαγματικός βιοτίτης που εμφανίζεται στον μονζονίτη και δευτερογενής βιοτίτης, στον μονζονίτη και τον πορφυριτικό μικρογρανίτη. Ο πρωτογενής βιοτίτης υπάρχει με μορφή πλατιών κρυστάλλων με μέγεθος έως 3 mm μέσα στο υλικό πλήρωσης του μονζονίτη. Σε κάποια σημεία όπου παρατηρείται νατριοασβεστιούχος εξαλλοίωση, ο πρωτογενής βιοτίτης διαλύεται και δημιουργούνται νέα ορυκτά στην θέση του, όπως δευτερογενής χλωρίτης, ακτινόλιθος, τιτανίτης. Ο δευτερογενής βιοτίτης εντοπίζεται κυρίως στο ανατολικό περιθώριο του πλουτωνίτη με τον πορφυριτικό μικρογρανίτη, όπου ο μονζονίτης εμφανίζεται μυλωνιτιωμένος με μαύρο χρώμα. Σε σχέση με τον μαγματικό βιοτίτη, ο δευτερογενής είναι πιο λεπτόκοκκος με κόκκους μεγέθους μικρότερο από 100μm, ενώ δεν διακρίνονται οι έδρες των κρυστάλλων. Συνήθως αντικαθιστά μαγματικό πυρόξενο, βιοτίτη και κεροστίλβη στον μονζονίτη.

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

Οι καλιούχοι άστριοι που παρατηρούνται στην ποτασσική εξαλλοίωση του πλουτωνίτη της Μαρώνειας έχουν κυρίως μορφή ορθόκλαστου με όχι πολύ καλά σχηματισμένες τις έδρες των κρυστάλλων. Βρίσκονται μαζί με χαλαζία, μαγνητίτη και σιδηροπυρίτη, μέσα σε φλέβες EB-τύπου. Ακόμα, με την ποτασσική εξαλλοίωση σχετίζεται το ρουτίλιο, το οποίο υπάρχει στο βορειοανατολικό περιθώριο του πορφυριτικού συστήματος, μέσα στον μονζονίτη και τον πορφυριτικό μικρογρανίτη, και έχει μορφή μικρών κόκκων με μέγεθος έως 0,5mm ή μορφή βελόνων. Ο μαγνητίτης στην ποτασσική εξαλλοίωση σχηματίζει κρυστάλλους μεγέθους από 50 έως 300μm, χωρίς καλά σχηματισμένες έδρες, σχετίζεται με τον δευτερογενή βιοτίτη και συναντάται με χαλκοπυρίτη, σιδηροπυρίτη και μαγνητοπυρίτη. Ο χαλκοπυρίτης συναντάται συχνά σε πετρώματα με ποτασσική εξαλλοίωση μαζί με κόκκους σιδηροπυρίτη, σε κρυστάλλους μεγέθους από 10 έως 500μm.

Στην νατριοασβεστιούχο εξαλλοίωση, μέσα στον μονζονίτη βρίσκουμε υδροθερμικό ακτινόλιθο με πρισματικούς κρυστάλλους μήκους έως 0,5mm, ο οποίος αντικαθιστά τον προϋπάρχοντα υδροθερμικό βιοτίτη και πυρόξενο. Επιπλέον, μαζί με τον ακτινόλιθο συναντάται και τιτανίτης με μορφή επιμηκυμένων κρυστάλλων με μήκος έως 1mm, ενώ αντικαθιστά πρωτογενή ορυκτά όπως βιοτίτη, μαγνητίτη, ιλμενίτη.

Τέλος, είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι ο μολυβδαινίτης του πορφυριτικού συστήματος της Μαρώνειας εμφανίζεται με δύο τύπους, τον ρομβοεδρικό και τον εξαγωνικό. Εντοπίζεται με κρυστάλλους σε φυλλώδη μορφή μεγέθους έως 5mm, ενώ στην χημική του σύσταση υπάρχει και το σπάνιο στοιχείο του ρηνίου σε περιεκτικότητες από 0,1 έως 2,9%, οι οποίες είναι από τις υψηλότερες σε παγκόσμιά κλίμακα.

3.3 ΠΟΡΦΥΡΙΤΙΚΟ ΚΟΙΤΑΣΜΑ Cu-Au ΣΤΙΣ ΣΚΟΥΡΙΕΣ

Μία σπάνια αλλά ιδιαίτερη μεταλλοφορία, ηλικίας Μειοκαίνου, παρουσιάζεται στις Σκουριές της Χαλκιδικής και αποτελεί μέρος της μεταλλευτικής περιοχής των Μεταλλείων Κασσάνδρας. Βρίσκεται μέσα στον σχηματισμό του Βερτίσκου ο οποίος αποτελείται από σχιστόλιθους, γνευσίους, αμφιβολίτη σε μορφή φακών ενώ θεωρείται ότι περιλαμβάνει και τμήματα μιας οφιολιθικής ακολουθίας. Πρόκειται για ένα κοίτασμα πορφυριτικού χαλκού που η μεταλλοφορία του περιλαμβάνει πολύτιμα μέταλλα όπως τα ορυκτά της πλατίνας (PlatinumGroup Elements (PGE)) (Economou-Eliopoulos and Eliopoulos 2000). Τα ορυκτά αυτά είναι η πλατίνα (Pt), το παλλάδιο(Pd) και ο χρυσός (Au) (Σχ. 3.3.1).



Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

Σχ. 3.3.1 Γεωλογικός χάρτης της περιοχής Σκουριές Χαλκιδικής (McFall et al. 2018).

3.3.1 ΟΡΥΚΤΟΛΟΓΙΑ ΤΟΥ ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΟΣ ΤΩΝ ΣΚΟΥΡΙΩΝ

Η σπανιότητα του κοιτάσματος αυτού έγκειται στις πολύ υψηλές περιεκτικότητές του σε Au-Cu,καθώς περιέχει 0,8g/t Au και 0,5wt Cu,και όχι στο μέγεθός του. Επιπλέον περιλαμβάνει και τα προαναφερόμενα σπάνια μέταλλα σε περιεκτικότητες ως 0,15g/t Pt και ως 0,61 g/t Pd, γεγονός που το καθιστά ιδιαίτερο. Συγκεκριμένα, τα κύρια μεταλλικά ορυκτά της μεταλλοφορίας είναι χαλκοπυρίτης, σιδηροπυρίτης, βορνίτης, μαγνητίτης και ο χρυσός. Ο χρυσός μπορεί να βρίσκεται με μορφή αυτοφυούς χρυσού μέσα στον χαλκοπυρίτη ή στον συλβανίτη. Η μεταλλοφορία αυτή φιλοξενείται εντός των γειτονικών μεταμορφωμένων πετρωμάτων που μπορεί να είναι αμφιβολιτικοί σχιστόλιθοι, μαρμαρυγιακοί σχιστόλιθοι ή γνεύσιοι και σχετίζεται με υποηφαιστειακές διεισδύσεις μονζονιτικής σύστασης.

3.3.2 ΥΡΟΘΕΡΜΙΚΕΣ ΕΞΑΛΛΟΙΩΣΕΙΣ ΚΑΙ ΟΜΑΔΕΣ ΦΛΕΒΩΝ ΣΤΟ ΚΟΙΤΑΣΜΑ ΤΩΝ ΣΚΟΥΡΙΩΝ

Όσο αφορά τις εξαλλοιώσεις που έχει υποστεί η μεταλλοφορία, θεωρείται ότι κατά μεγάλο ποσοστό έχει υποστεί ποτασσική εξαλλοίωση και εμφανίζει δίκτυο φλεβών τύπου stockwork, ωστόσο ορισμένα μέρη του κοιτάσματος εμφανίζουν προπυλιτική και άλλα σερικιτική εξαλλοίωση. Πιο συγκεκριμένα, έχουν αναγνωριστεί 14 στάδια φλεβών και αλλοιώσεων, τα οποία έχουν ταξινομηθεί σε 3 ομάδες (McFall et al. 2018) : το πρώιμο στάδιο (Ε) που σχετίζεται με την πρώτη φάση, δηλαδή με μονζονίτη και συηνίτη, το κύριο στάδιο (Μ) που σχετίζεται με τον πορφυριτικό συηνίτη και τις φλέβες συηνίτη και το τελικό στάδιο (L) το οποίο διαπερνά όλες τις προηγούμενες φάσεις (Σχ. 3.3.2.1).



Σχ. 3.3.2.1 A) Φλέβες M-3 τύπου με ορθόκλαστο και βιοτίτη, B) Φλεβίδια stockworks M-4 τύπου, Γ) Φλέβες M-5 τύπου μέσα σε βιοτιτικό σχιστόλιθο Δ) Πολυμεταλλικές φλέβες L-4 τύπου με χαλαζία και βαρύτη (McFall et al. 2018).

3.3.2.1 ΦΛΕΒΕΣ ΠΡΩΙΜΟΥ ΣΤΑΔΙΟΥ

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

Οι φλέβες του πρώιμου σταδίου σχετίζονται με τον πρώιμο μονζονίτη, χαρακτηρίζονται από ψηλή περιεκτικότητα σε μαγνητίτη, έχουν ασαφή όρια και χωρίζονται σε τέσσερις υποκατηγορίες οι οποίες είναι οι E-1, E-2, E-3 και E-4 (McFall et al. 2018).

Ε-1 φλέβες : Οι φλέβες αυτές είναι κυματοειδείς δίχως σαφή όρια, έχουν πλάτος
 1-2mm περιέχουν μαγνητίτη, βιοτίτη και ορθόκλαστο.

Ε-2 φλέβες : Οι φλέβες Ε-2 είναι κυματοειδείς, αποτελούνται από χαλαζία και το πλάτος τους είναι 2-10mm. Οι φλέβες αυτής της υποκατηγορίας μπορεί να τέμνονται μεταξύ τους και να περιέχουν φαινοκρυστάλλους ορθόκλαστου ή βιοτίτη.

- Ε-3 φλέβες: Οι φλέβες Ε-3 περιλαμβάνουν το δίκτυο φλεβών χαλαζία (stockwork) με μαγνητίτη, ο οποίος εντοπίζεται στα περιθώρια των φλεβών αλλά και διασκορπισμένος στο κεντρικό τμήμα των φλεβών και χαλκοπυρίτη. Επίσης, τέμνουν τις φλέβες Ε-1 και Ε-2.
- Ε-4 φλέβες : Οι φλέβες Ε-4 είναι οι τελευταίες του πρώιμου σταδίου και αποτελούνται από χαλκοπυρίτη και πυρίτη, έχουν πλάτος 1-3mm και τέμνουν τις φλέβες των προαναφερόμενων υποκατηγοριών.

3.3.2.2 ΦΛΕΒΕΣ ΚΥΡΙΟΥ ΣΤΑΔΙΟΥ

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

Οι φλέβες του κύριου σταδίου συνδέονται με τον πορφυριτικό συηνίτη και τις φλέβες συηνίτη, περιέχουν μαγνητίτη, βιοτίτη, ορθόκλαστο, χαλκοπυρίτη, βορνίτη, έχουν υποστεί ποτασσική εξαλλοίωση και είναι οι παρακάτω:

- Μ-1 φλέβες : Οι φλέβες αυτές υποδιαιρούνται στις M-1A και στις M-1B. Οι M-1A φλέβες έχουν πλάτος 2-5mm και αποτελούνται από βιοτίτη και μαγνητίτη. Οι M-1B είναι φλέβες υδροθερμικού ορθόκλαστου και έχουν πλάτος 5mm-10cm.
- Μ-2 φλέβες : Οι φλέβες αυτές είναι χαλαζιακές φλέβες, έχουν ακανόνιστα όρια, πλάτος 2-4mm και τέμνουν τις πρώιμες φλέβες. Επιπλέον, περιλαμβάνουν ένα εξωτερικό αλλοιωμένο περίβλημα το οποίο είναι λεπτόκοκκο και έχει πλάτος 1-2mm.
- Μ-3 φλέβες : Οι φλέβες Μ-3 έχουν μαζώδη χαλκοπυρίτη στο κεντρικό τους μέρος, με πλάτος 3-30mm ενώ, κατά περιπτώσεις, μπορεί να εμφανίζουν ίχνη σουλφιδίων.
- Μ-4 φλέβες : Οι φλέβες Μ-4 περιέχουν χαλαζία, μαγνητίτη, χαλκοπυρίτη και βορνίτη ενώ το πλάτος τους είναι 10-50mm. Επίσης μπορεί να συνοδεύονται από χαλαζιακό δίκτυο φλεβών τύπου stockwork. Η περιεκτικότητα τους σε βορνίτη είναι μεγαλύτερη από την περιεκτικότητα σε χαλκοπυρίτη, με τον χαλκοπυρίτη να σχηματίζει δευτερογενείς φάσεις σε ρωγμές του βορνίτη.
- Μ-5 φλέβες : Οι φλέβες Μ-5 είναι χαλαζιακές μαζί με σουλφίδια όπως χαλκοπυρίτης και βορνίτης. Σε αυτόν τον τύπο φλεβών η περιεκτικότητα του χαλκοπυρίτη είναι υψηλότερη από του βορνίτη.

3.3.2.3 ΦΛΕΒΕΣ ΤΕΛΙΚΟΥ ΣΤΑΔΙΟΥ

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

Οι φλέβες τελικού σταδίου συνδέονται με σερικιτική εξαλλοίωση και περιλαμβάνουν ορυκτά εξαλλοίωσης όπως χαλαζία, ασβεστίτη, σερικίτη, δολομίτη και καολίνη. Οι φλέβες τελικού σταδίου χωρίζονται σε τέσσερις κατηγορίες και είναι οι εξής:

- L-1 φλέβες: Οι φλέβες L-1 αποτελούνται από φλέβες γύψου πάχους 4-8mm και σχετίζονται με την παρουσία διάσπαρτου αιματίτη.
- L-2 φλέβες: Οι φλέβες L-2 έχουν επηρεαστεί από την σερικιτική εξαλλοίωση, περιέχουν πυρίτη και το πλάτος τους είναι 2-10mm.
- L-3 φλέβες: Οι φλέβες L-3 είναι σπάνια κατηγορία φλεβών. Πρόκειται για ευθύγραμμες χαλαζιακές φλέβες με σερικιτική εξαλλοίωση και πλάτος 8-15mm.
- L-4 φλέβες: Οι φλέβες L-4 είναι ακανόνιστες φλέβες με χαλαζία και βαρύτη, πλάτους
 5-15cm. Στο κέντρο αυτών των φλεβών εντοπίζεται λεπτόκοκκος χαλαζίας μαζί με κρυστάλλους βαρύτη ενώ, επίσης, εμφανίζουν σιδηροπυρίτη, γαληνίτη, σφαλερίτη και ορισμένες φορές απατίτη. Εξωτερικά περιβάλλονται από ένα αλλοιωμένο περίβλημα.

3.3.3 Η ΜΟΡΦΗ ΚΑΙ ΟΙ ΦΑΣΕΙΣ ΣΤΟ ΚΟΙΤΑΣΜΑ ΤΩΝ ΣΚΟΥΡΙΩΝ

Σχετικά με την μορφή της μεταλλοφορίας, το κοίτασμα αυτό, εμφανίζει την μορφή ενός κατακόρυφου σωλήνα που έχει μεγάλο βάθος (πάνω από 700 μέτρα), διάμετρο 200m και σχήμα ελλειπτικό. Το σύστημα αυτό αποτελείται από πολλές γενιές διεισδύσεων με σύσταση από μονζονιτική έως συηνιτική, με αποτέλεσμα να εμφανίζει τέσσερις πορφυριτικές φάσεις (McFall et al. 2018). Η πρώτη φάση είναι ένας πρώιμος χαλαζιακός μονζονίτης με 40-50% φαινοκρυστάλλους πλαγιόκλαστου, 5-20% φαινοκρυστάλλους βιοτίτη και 5-10% φαινοκρυστάλλους χαλαζία. Η φάση αυτή χαρακτηρίζεται από συηνίτη με 60% φαινοκρυστάλλους αστρίων,5-10% πρωτογενή βιοτίτη και 2% αμφίβολο. Όλα αυτά τα συστατικά φιλοξενούνται εντός μίας αφανιτικής μάζας καλιούχου αστρίου μέσα στην οποία υπάρχει διάσπαρτος μαγνητίτης. Η τρίτη φάση περιλαμβάνει φλέβες συηνίτη που κόβουν και κόβονται από πορφυριτικό συηνίτη και θραύουν τις προηγούμενες φάσεις. Η τέταρτη φάση είναι ένας μεταγενέστερος πορφυριτικός συηνίτη με χαρακτηριστικό σκούρο γκρι χρώμα και τέμνει τα παραπάνω σύνολα φλεβών.

4. ΠΑΓΚΟΣΜΙΑ ΠΟΡΦΥΡΙΤΙΚΑ ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΑ

4.1. ГЕNIKA

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

Παγκοσμίως τα πορφυριτικά κοιτάσματα αναπτύσσονται σε ηπειρωτικά και ωκεάνια τόξα του Τριτογενούς και του Τεταρτογενούς, κυρίως γύρω από τον Ειρηνικό ωκεανό και σε παλιές ζώνες πτυχώσεων. Έχουν ανακαλυφθεί, έπειτα από μελέτες, 25 πολύ μεγάλα κοιτάσματα πορφυριτικού χαλκού, τα οποία μπορούν να κατηγοριοποιηθούν με βάση την ηλικία δημιουργίας τους κατά το, Παλαιόκαινο - Ηώκαινο, Ηώκαινο - Ολιγόκαινο και Μέσο Μειόκαινο. Αυτά τα κοιτάσματα συγκεντρώνονται σε συγκεκριμένες τοποθεσίες - επαρχίες, στην κεντρική Χιλή, στην Βόρεια Χιλή και στην νοτιοδυτική Αριζόνα - στο βόρειο Μεξικό. Τα κοιτάσματα αυτά χαρακτηρίζονται από περιεκτικότητες χαλκού, χρυσού και μολυβδαινίου. Η έρευνα των πορφυριτικών κοιτασμάτων σε παγκόσμια κλίμακα τα τελευταία χρόνια μας έχει προσφέρει πολύτιμες γνώσεις αναφορικά με την γεωλογία και την γεωχημεία (Σχ. 4.1.1).

Παρακάτω αναφέρονται δύο πολύ εντυπωσιακά πορφυριτικά κοιτάσματα, το El Teniente στην κεντρική Χιλή και το Ok Tedi στην Παπούα Νέα Γουινέα.



Σχ. 4.1.1 Παγκόσμιος χάρτης με τα πορφυριτικά κοιτάσματα, στην Παπούα Νέα Γουινέα(Ok Tedi)-Irian Jaya (D), στις Φιλιππίνες (E), στην πολιτεία Utah (2), στο Ουζμπεκιστάν (3, 15), στην Χιλή (5), στην Νέα Νότια Ουαλία (6), στην Μογγολία (8), στην Ινδονησία (9), στο Βόρειο Περού (10), στην κεντρική Χιλή (El Teniente) (12), στην Βόρεια Χιλή (13, 22), στην Καμτσάτκα (14), στην Αργεντινή (16), στην Αλάσκα (18), στο Ιράν (21), στην Βρετανική Κολομβία του Καναδά (24) και στο Πακιστάν (25) (Cooke et al. 2005).

4.2 ΠΟΡΦΥΡΙΤΙΚΟ ΚΟΙΤΑΣΜΑ Cu-Mo ΣΤΗΝ ΧΙΛΗ

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

Στην κεντρική Χιλή εντοπίζονται δύο από τα μεγαλύτερα πορφυριτικά κοιτάσματα του κόσμου, το El Teniente και το Río Blanco-Los Bronces, και ένα γιγαντιαίο κοίτασμα, το Los Pelambres-El Pachón. Τα πορφυριτικά συστήματα σχετίζονται με γεωτεκτονικά καθεστώτα όπου δημιουργούνται τόξα, ενώ επίσης τα γιγάντια κοιτάσματα σχετίζονται με συγκεκριμένες μεταλλογενετικές επαρχίες και ηλικίες. Τα πλούσια σε χαλκό, μολυβδαίνιο και χρυσό πορφυριτικά κοιτάσματα στην κεντρική Χιλή σχηματίστηκαν λόγω της σύγκρουσης και υποβύθισης της πλάκας Juan Fernández (Cooke et al. 2005) (Σχ. 4.2.1).



Σχ. 4.2.1 Χάρτης των πορφυριτικών κοιτασμάτων στην Χιλή (Spencer et al. 2015).

32

Το El Teniente είναι ένα πορφυριτικό κοίτασμα Cu-Mo, που τοποθετείται στην κεντρική Χιλή, 70 km νοτιοανατολικά του Santiago, στο δυτικό περιθώριο της οροσειράς των Ανδεων. Έχει το μεγαλύτερο μεταλλείο υπόγειας εκμετάλλευσης χαλκού, με πιθανά ορυκτά αποθέματα με περίπου 95 Mt Cu, ενώ γίνεται και εξόρυξη μολυβδαινίου, ως υποπροϊόν του Cu, με ποσότητες μεταλλεύματος μικρότερες από 0,03 wt.%. Ενώ η απολήψιμες ποσότητες Mo από το κοίτασμα δεν είναι πολύ μεγάλες, εξακολουθεί να αποτελεί την μεγαλύτερη πηγή Mo στον κόσμο, λόγω των τεραστίων διαστάσεων του κοιτάσματος (Sillitoe 2010).

4.2.1 ΓΕΝΕΣΗ ΚΑΙ ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗ ΤΟΥ ΕL ΤΕΝΙΕΝΤΕ

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

Το πορφυριτικό σύστημα του El Teniente φιλοξενείται μέσα στο ηφαιστειακό σύμπλεγμα Teniente (Teniente Mafic Complex (TMC)), το οποίο αποτελείται από βασικά πυριγενή και ηφαιστειοκλαστικά πετρώματα με ανδεσιτική και βασαλτική σύσταση. Το Teniente Mafic Complex (TMC) τοποθετείται με μορφή λακκόλιθου και μέγεθος μεγαλύτερο από 50 km³, μέσα στον Μειοκαινικό σχηματισμό Farellones, πριν από 7,5 με 15,2 εκατομμύρια χρόνια. Έπειτα, στα 7,0 Ma η πάχυνση του φλοιού οδηγεί στην περάτωση της ηφαιστειότητας στο Southern Volcanic Zone (SVZ) και επακολούθως στην δημιουργία ενός μαγματικού θαλάμου κάτω από το El Teniente. Ο μαγματικός θάλαμος προέρχεται από ένα μανδυακό μητρικό μάγμα το οποίο αναμιγνύεται με ωκεάνια ιζήματα και νερό, το οποίο φανερώνεται από τις ποσότητες νερού, θείου, χλωρίου και χαλκού που υπάρχουν στο El Teniente (Spencer et al. 2015).

Πριν από περίπου 4,5 με 6,5 εκατομμύρια χρόνια, λόγω μεταβολών στην θερμοκρασία και της ανάμιξης του μάγματος, ξεκινάει η άνοδος του μάγματος και μία σειρά από διεισδύσεις όξινων έως ενδιάμεσων μαγμάτων. Μια από της παλαιότερες διεισδύσεις είναι αυτή του χαλαζιακού διορίτη Sewell (Sewell Quartz Diorite), στο νοτιοανατολικό τμήμα του κοιτάσματος. Στον χαλαζιακό διορίτη Sewell διεισδύει αργότερα ο A-Porphyry, στο βόρειο περιθώριο του χαλαζιακού διορίτη με το Teniente Mafic Complex (TMC). Ο A-Porphyry είναι στην πραγματικότητα ένα μαγματικό breccia που αποτελείται από το Teniente Mafic Complex (TMC) και από κλάστες του χαλαζιακού διορίτη Sewell, μέσα σε υλικό πλήρωσης με ορυκτά όπως καλιούχους άστριους, πλαγιόκλαστα, βιοτίτη, ανυδρίτη και χαλαζία. Ο Teniente Dacite Porphyry που έχει διεισδύσει πιο βορειοδυτικά στο Teniente Mafic Complex (TMC), διακόπτεται από το Braden Breccia pipe, που βρίσκεται στο κέντρο του κοιτάσματος. Το Braden Breccia ρισματικό breccia (diatreme), που δημιουργήθηκε με ένα απότομο γεγονός πριν από 4,58 εκατομμύρια χρόνια (Σχ. 4.2.1.1).



Σχ. 4.2.1.1 Γεωλογικός χάρτης του πορφυριτικού κοιτάσματος El Teniente, στην κεντρική Χιλή (Spencer et al. 2015).

4.2.2 ΤΥΠΟΙ BRECCIAS ΣΤΟ ΚΟΙΤΑΣΜΑ ΕL ΤΕΝΙΕΝΤΕ

Στο πορφυριτικό κοίτασμα El Teniente παρατηρούνται ποικίλοι τύποι μαγματικών και υδροθερμικών breccia που διαταράσσουν τις πορφυριτικές διεισδύσεις του κοιτάσματος. Διακρίνονται εφτά τύποι breccia, οι οποίοι είναι: τα πυριγενή (igneous) breccia, τα βιοτιτικά breccia, τα χαλαζιακά breccia, τα breccia τουρμαλίνη, τα breccia ανυδρίτη, τα anhydritecarbonate±gypsum-cemented breccia και τα rock flour breccia. Στα πυριγενή (igneous) και τα βιοτιτικά breccia, σπάνια υπάρχουν σουλφίδια Cu και Mo, ενώ στους υπόλοιπους τύπους έχουμε ποικιλία περιεκτικοτήτων, με Cu σε ποσοστά από 5 έως 40% και με Mo σε ποσοστά από 5 έως 20%.

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

Τα πυριγενή (igneous) breccia είναι ο δεύτερος πιο συνηθισμένος τύπος breccia στο El Teniente, περιέχει κλάστες κυρίως από το Teniente Mafic Complex (TMC), αλλά και από τον χαλαζιακό διορίτη Sewell και τον A-Porphyry. Εκεί εμφανίζονται ορυκτά όπως, βιοτίτης, χαλαζίας, φαινοκρύσταλλοι πλαγιοκλάστων και μέταλλα όπως μολυβδαινίτης, χαλκοπυρίτης και σιδηροπυρίτης σε ποσότητες 1 έως 2%.

Τα βιοτιτικά breccia εντοπίζονται κοντά σε εμφανίσεις του A-Porphyry και αποτελούνται από κλάστες του Teniente Mafic Complex (TMC) και του Sewell Quartz Diorite (SQD). Παρατηρούνται τα ίδια ορυκτά με τα πυριγενή breccia, ενώ από μέταλλα έχουμε μόνο χαλκοπυρίτη σε ποσότητες μικρότερες από 3%.

Τα χαλαζιακά breccia έχουν περιορισμένες εμφανίσεις, στα σημεία όπου έρχονται σε επαφή οι διορίτες με χαλαζιακά stockworks. Οι κλάστες σε αυτό τον τύπο είναι από το Teniente Mafic Complex (TMC) και από αλλοιωμένους διορίτες. Από ορυκτά βρίσκουμε χαλαζία και κάποιους καλιούχους άστριους, μολυβδαινίτη σε περιεκτικότητες 5-10% και χαλκοπυρίτη σε ποσότητες μικρότερες από 5%.

Τα breccia τουρμαλίνη βρίσκονται γύρω από το Braden Breccia pipe, με κλάστες από τον Teniente Dacite Porphyry (TDP), το Teniente Mafic Complex (TMC) και από διορίτες. Τα ορυκτά που εντοπίζονται είναι τουρμαλίνης, ανυδρίτης και μολυβδαινίτης σε περιεκτικότητες από 0 έως 70%.

Τα breccia ανυδρίτη είναι ο πιο συνηθισμένος τύπος και εμφανίζεται γύρω από τον A-Porphyry, τον Teniente Dacite Porphyry (TDP) και τους διορίτες. Περιέχουν φαινοκρυστάλλους πλαγιοκλάστων, χαλαζία, βιοτίτη, ανυδρίτη και μέταλλα όπως μολυβδαινίτη, χαλκοπυρίτη, σιδηροπυρίτη και βορνίτη, σε περιεκτικότητες από 2 έως 10%.

Τα anhydrite-carbonate±gypsum-cemented breccia εμφανίζονται στους διορίτες και τον Teniente Dacite Porphyry (TDP). Παρατηρούνται ορυκτά όπως ανυδρίτης, ασβεστίτης, γύψος και θειοάλατα, καθώς και μολυβδαινίτης σε πολύ μεγάλες περιεκτικότητες και βορνίτης.

Τέλος, τα rock flour breccia αποτελούν το κύριο κομμάτι του Braden Breccia pipe, έχοντας κλάστες από όλες τις διεισδύσεις και το Teniente Mafic Complex (TMC). Τα ορυκτά που το χαρακτηρίζουν είναι φαινοκρύσταλλοι πλαγιοκλάστων, χαλαζίας, βιοτίτης, ανυδρίτης και μικρές ποσότητες από μολυβδαινίτη, χαλκοπυρίτη, βορνίτη και σιδηροπυρίτη.

4.3. ΠΟΡΦΥΡΙΤΙΚΟ ΚΟΙΤΑΣΜΑ Cu-Au ΣΤΗΝ ΠΑΠΟΥΑ ΝΕΑ ΓΟΥΙΝΕΑ

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

Η γένεση του πορφυριτικού κοιτάσματος Cu-Au στην Παπούα Νέα Γουινέα, στηρίζεται στο ορθομαγματικό μοντέλο (Sillitoe 1972). Σύμφωνα με το μοντέλο αυτό, ένυδρα μάγματα με σύσταση από ενδιάμεση έως όξινη, εξέρχονται στα ανώτερα 5km του φλοιού με αποτέλεσμα τα υδροθερμικά ρευστά να διαλύονται και να αποτίθενται Cu και Au. Αυτό συμβαίνει εξαιτίας της αλληλεπίδρασης των ρευστών, της διείσδυσης και των περιβαλλόντων πετρωμάτων (Σχ. 4.3.1).



Σχ. 4.3.1 A) Παλαιογεωγραφία και B) Σχηματική αναπαράσταση της γεωτεκτονικής της περιοχής Παπούα Νέας Γουινέας κατά το Μέσο Μειόκαινο (Hill et al. 2003).

36

Το ορογενές της Παπούα Νέας Γουινέας δημιουργήθηκε κατά το ανώτερο Μειόκαινο (Hill et al., 2002) από την σύγκρουση νησιωτικού τόξου με το βόρειο περιθώριο του κράτωνα της Αυστραλίας, που αποτέλεσε το νότιο τμήμα της Παπούα Νέας Γουινέας. Το νότιο αυτό τμήμα, αποτελείται από ζώνες πτυχώσεων και εφιππεύσεων με φορά προς τον νότο (Σχ. 4.3.1).

Όσο αφορά την στρωματογραφία, περιλαμβάνει ηπειρωτικού περιθωρίου ιζηματογενή πετρώματα θαλάσσιας προέλευσης και ηλικίας Κρητιδικό-Μέσο Μειόκαινο. Τα πετρώματα αυτά επικάθονται σε παλαιοζωικά μεταμορφωμένα πετρώματα και σε γρανιτικά πετρώματα της δυτικής πλατφόρμας της Παπούα Νέας Γουινέας (Bamford 1972).

4.3.1 ΤΟ ΚΟΙΤΑΣΜΑ ΟΚ ΤΕDΙ ΣΤΗΝ ΠΑΠΟΥΑ ΝΕΑ ΓΟΥΙΝΕΑ

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

Το κοίτασμα Ok Tedi είναι ένα από τα μεγαλύτερα κοιτάσματα πορφυριτικού χαλκού, πλούσιο σε χρυσό, παγκοσμίως. Το πέτρωμα που φιλοξενεί την μεταλλοφορία Cu-Au είναι ένας μονζονίτης ο οποίος ονομάζεται Fubilan Monzonite Porphyry (FMP) και αποτελεί μέρος μίας μεγάλης ασβεσταλκαλικής διείσδυσης. Ο μονζονίτης (FMP) έχει διάμετρο 850m αλλά εμφανίζει μια λέπτυνση προς τα κάτω, ενώ επίσης διεισδύει στα περιβάλλοντα ιζηματογενή πετρώματα και σε ένα παλαιότερο μονζοδιορίτη που ονομάζεται Μονζοδιορίτης του Σίδνεϋ (Rush and Seegers, 1990).

Οι διεισδύσεις που σχετίζονται με το Ok Tedi κοίτασμα, δημιουργούνται στο άνω τέμαχος μιας μεγάλης εφίππευσης, η οποία συνδέεται με ένα βαθύ ρήγμα που περιλαμβάνει τμήματα του υποβάθρου (Mason 1997, Hill et al 2002).

Η μεταλλοφορία του κοιτάσματος αυτού, αποτελείται από χαλκοσίνη, χαλκοπυρίτη, σιδηροπυρίτη και βορνίτη, τα οποία αποτίθενται σε φλεβίδια χαλαζία τύπου stockworks στο κεντρικό τμήμα του πετρώματος ξενιστή, δηλαδή του μονζονίτη (FMP). Επίσης, ο Cu και ο Au εντοπίζονται σε διάσπαρτα σουλφίδια εντός του μονζονίτη αλλά και σε μαγνητίτη.

Εξαιτίας των υδροθερμικών εξαλλοιώσεων προκλήθηκε ποτασσική εξαλλοίωση, η οποία συνδέεται με τις φλέβες που είναι πλούσιες σε Cu και βρίσκονται εντός του μονζονίτη ενώ ταυτόχρονα σχετίζονται και με μια μεγαλύτερη ζώνη προπυλιτικής εξαλλοίωσης με σιδηροπυρίτη, μαγνητίτη, χλωρίτη και επίδοτο.

Για την καλύτερη μελέτη του κοιτάσματος Ok Tedi και την δημιουργία τρισδιάστατου γεωλογικού μοντέλου, χρησιμοποιήθηκαν πάνω από 40 πυρήνες γεωτρήσεων. Οι θέσεις από τις οποίες έγινε δειγματοληψία είναι στον Fubilan Monzonite Porphyry (FMP), όπου φιλοξενείται και η μεταλλοφορία, στον Μονζοδιορίτη του Σίδνεϋ, από έναν μονζονίτη στα νοτιοανατολικά του συστήματος και από δύο θέσεις στα όρια των δύο αυτών πετρωμάτων.



Σχ. 4.3.1.1 Γεωλογικός χάρτης του πορφυριτικού κοιτάσματος Ok Tedi (Large et al. 2018).

4.3.2 XPONOAOFH Σ H TOY KOITA Σ MATO Σ OK TEDI ME THN ME@OAO ZIPKONI ΩN

Από τις θέσεις δειγματοληψίας που αναφέρθηκαν παραπάνω, συλλέχθηκαν κόκκοι ζιρκονίου με σκοπό την χρονολόγηση του κοιτάσματος Ok Tedi. Μετά από πλήθος αναλύσεων, οι ηλικίες των ζιρκονίων του Ok Tedi κοιτάσματος, διαχωρίστηκαν σε δύο ηλικιακές ομάδες. Η πρώτη ομάδα είναι ηλικίας Πλειστοκαίνου (<1,5 Ma) και η δεύτερη Προτεροζωικής ηλικίας (>1,6 Ma). Όσο αφορά τα χαρακτηριστικά τους, φαίνεται ότι είναι μαγματικής προέλευσης, λόγω ορισμένων ιδιοτήτων όπως το σχήμα των κρυστάλλων, γεγονός που υποδηλώνει ότι η ηλικία που προσδιορίστηκε εργαστηριακά, συμπίπτει με την ηλικία κρυστάλλωσης τους.

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

Από την μελέτη των ζιρκονίων τελικά προέκυψε ότι το Ok Tedi είναι το νεότερο γνωστό πορφυριτικό κοίτασμα Cu-Au στον κόσμο γεγονός που πιθανότατα οφείλεται στους γρήγορους ρυθμούς της διάβρωσης στην περιοχή της Παπούα Νέα Γουινέας (Weiland and Cloos,1996).

Η παρούσα διπλωματική πτυχιακή εργασία αφορά την μελέτη των πορφυριτικών κοιτασμάτων και τα κύρια χαρακτηριστικά τους. Κάποια από αυτά είναι η εμφάνιση τους σε μικρά βάθη με μεγάλη οριζόντια εξάπλωση, οι μικρές περιεκτικότητες Cu, Au, Mo αλλά σε πολύ μεγάλα αποθέματα και η μορφή της μεταλλοφορίας σε πλέγμα φλεβών και διάσπαρτη. Το γεωτεκτονικό περιβάλλον δημιουργίας των πορφυριτικών κοιτασμάτων είναι σε ορογενετικές ζώνες σύγκλισης ηπειρωτικών περιθωρίων ή σε ζώνες υποβύθισης νησιωτικών τόξων.

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Τέτοιου είδους κοιτάσματα υπάρχουν πολλά ανά τον κόσμο και την Ελλάδα, τα οποία μας προσφέρουν μέταλλα χρήσιμα για την καθημερινότητα και την εξέλιξη του ανθρώπου. Πιο συγκεκριμένα, για την Ελλάδα αναλύθηκαν τα πορφυριτικά κοιτάσματα της Μαρώνειας, όπου υπάρχει μεταλλοφορία Cu - Mo - Re - Au και των Σκουριών Χαλκιδικής, με μεταλλοφορία Cu - Au. Όσον αφορά τα πορφυριτικά κοιτάσματα σε παγκόσμια κλίμακα, ιδιαίτερη σημασία δόθηκε στο κοίτασμα El Teniente στην κεντρική Χιλή, το οποίο χαρακτηρίζεται από μεταλλοφορία Cu - Mo και στον κοίτασμα Ok Tedi στην Παπούα Νέα Γουινέα, με μεταλλοφορία Cu - Au.



Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

Μέλφος Β., Βουδούρης Π., 2021, Κοιτάσματα της Ελλάδος.

Μέλφος Β., Βουδούρης Π., Σακελλάρης Γ. Α., 2021, Γενική Κοιτασματολογία.

- Bamford, R. W., 1972, The Mount Fubilan (Ok Tedi) porphyry copper deposit, Territory of Papua and New Guinea, Economic Geology, 67.8, 1019-1033.
- Cooke, D. R., Hollings, P., & Walshe, J. L., 2005, Giant porphyry deposits: characteristics, distribution, and tectonic controls, Economic geology, 100.5, 801-818.
- Economou-Eliopoulos, M., Eliopoulos, D. G., 2000, Palladium, platinum and gold concentration in porphyry copper systems of Greece and their genetic significance, Ore Geology Reviews, 16.1-2, 59-70.
- Halley S., Dilles H. J., Tosdal M. R., 2015, Footprints: Hydrothermal Alteration and Geochemical Dispersion Around Porphyry Copper Deposits.
- Hill, K. C., Hall, R., 2003, Mesozoic-Cenozoic evolution of Australia's New Guinea margin in a west Pacific context, Geol. Soc. Australia Spec. Publ. 22, and Geol. Soc. America Spec. Pap. 372, 265-289.
- Hill, K. C., Kendrick, R. D., Crowhurst, P. V., Gow, P. A. (2002). Copper-gold mineralisation in New Guinea: Tectonics, lineaments, thermochronology and structure, Australian Journal of Earth Sciences, 49.4, 737-752.
- Kesler S. E., Chryssoulis S. L., Simon G., 2002, Gold in porphyry copper deposits: its abundance and fate, Ore Geology Reviews 21, 103 124.
- Large, S. J., Quadt, A. V., Wotzlaw, J. F., Guillong, M., & Heinrich, C. A., 2018, Magma evolution leading to porphyry Au-Cu mineralization at the Ok Tedi deposit, Papua New Guinea: Trace element geochemistry and high-precision geochronology of igneous zircon, Economic Geology, 113.1, 39-61.
- Mason, R. A., 1997, Structure of the Alice anticline, Papua New Guinea: serial balanced crosssections and their restoration, Journal of structural geology, 19.5, 719-734.
- McFall, K. A., Naden, J., Roberts, S., Baker, T., Spratt, J., & McDonald, I., 2018, Platinumgroup minerals in the Skouries Cu-Au (Pd, Pt, Te) porphyry deposit, Ore Geology Reviews, 99, 344-364.
- Melfos, V., Voudouris, P., 2017, Cenozoic metallogeny of Greece and potential for precious, critical and rare metals exploration, Ore Geology Reviews, 89, 1030-1057.
- Melfos, V., Voudouris, P., Melfou, M., Sánchez, M. G., Papadopoulou, L., Filippidis, A., Spry
 P. G., Schaarschmidt A., Klemd R., Haase K., Tarantola A., Mavrogonatos, C., 2020,
 Mineralogical constraints on the potassic and sodic-calcic hydrothermal alteration and

vein-type mineralization of the Maronia porphyry Cu-Mo±Re±Au deposit in NE Greece, Minerals, 10.2, 182.

- Mutschler, F. E., Wright, E. G., Ludington, S., & Abbott, J. T., 1981, Granite molybdenite systems, Economic Geology, 76.4, 874-897.
- Richards, S. W., Holm, R. J.,2013, Tectonic preconditioning and the formation of giant porphyry deposits.
- Rush, P. M., Seegers, H. J.,1990, Ok Tedi copper-gold deposits. Geology of the mineral deposits of Australia and Papua New Guinea, 2, 1747-1754.
- Sillitoe, R. H., 1972, A plate tectonic model for the origin of porphyry copper deposits, Economic geology, 67.2, 184-197.
- Sillitoe, R. H., 2010, Porphyry copper systems, Economic geology, 105.1, 3-41.

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

- Sinclair W. D., 2007, Porphyry Deposits, 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, Canada, Newfoundland, 223-243.
- Spencer, E. T., Wilkinson, J. J., Creaser, R. A., Seguel, J., 2015, The distribution and timing of molybdenite mineralization at the El Teniente Cu-Mo porphyry deposit, Chile. Economic Geology, 110.2, 387-421.
- Voudouris P., Mavrogonatos C., Spry P.G., Baker T., Melfos V., Klemd R., Haase K., Repstock, A., Djiba A., Bismayer U., Tarantola A., Scheffer C., Moritz R., Kouzmanov K., Alfieris D., Papavassiliou K., Schaarschmidt A., Galanopoulos E., Galanos E., Kołodziejczyk J., Stergiou C., Melfou M.,2019, Porphyry and epithermal deposits in Greece: An overview, new discoveries, and mineralogical constraints on their genesis, Ore Geology Reviews, 654-691.
- Voudouris, P. C., Melfos, V., Spry, P. G., Bindi, L., Kartal, T., Arikas, K., Moritz R., Ortelli, M., 2009, Rhenium-rich molybdenite and rheniite in the Pagoni Rachi Mo-Cu-Te-Ag-Au prospect, northern Greece: implications for the Re geochemistry of porphyry-style Cu-Mo and Mo mineralization, The Canadian Mineralogist, 47.5, 1013-1036.
- Weiland, R. J., Cloos, M., 1996, Pliocene-Pleistocene asymmetric unroofing of the Irian fold belt, Irian Jaya, Indonesia: Apatite fission-track thermochronology, Geological Society of America Bulletin, 108.11, 1438-1449.