



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

ΜΑΓΓΙΡΑ Δ. ΙΩΑΝΝΑ
ΑΕΜ 5373

ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΑ ΕΠΙΘΕΡΜΙΚΟΥ ΤΥΠΟΥ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ 2021





ΜΑΓΓΙΡΑ Δ. ΙΩΑΝΝΑ

ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΑ ΕΠΙΘΕΡΜΙΚΟΥ ΤΥΠΟΥ

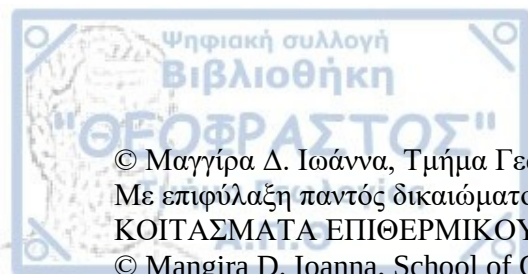
Υποβλήθηκε στο Τμήμα Γεωλογίας

Επιβλέπων Καθηγητής

Μέλφος Βασίλειος, Αναπληρωτής Καθηγητής

© Μαγγίρα Δ, Ιωάννα, 2021

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All right reserved.



© Μαγγίρα Δ. Ιωάννα, Τμήμα Γεωλογίας Α.Π.Θ., Τομέας Ορυκτολογίας-Πετρολογίας, 2021
Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος.

ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΑ ΕΠΙΘΕΡΜΙΚΟΥ ΤΥΠΟΥ – *Διπλωματική Εργασία*

© Mangira D. Ioanna, School of Geology A.U.Th., Dept. of Mineralogy and Petrology, 2021
All rights reserved.

EPITHERMAL 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.



ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Περίληψη	1
Πρόλογος.....	3
1. Εισαγωγή	4
2. Περιβάλλοντα σχηματισμού Επιθερμικών κοιτασμάτων	5
3. Ταξινόμηση επιθερμικών κοιτασμάτων.....	8
3.1. Υψηλής θείωσης επιθερμικά κοιτάσματα (HS)	8
3.2. Χαμηλής θείωσης επιθερμικά κοιτάσματα (LS)	9
3.3. Ενδιάμεσης θείωσης επιθερμικά κοιτάσματα (IS)	10
4. Υδροθερμικές εξαλλοιώσεις και ζώνωση.....	10
4.1.Εξαλλοιώσεις στα HS κοιτάσματα.....	11
4.2.Εξαλλοιώσεις στα LS κοιτάσματα.....	12
4.3. Επιθερμικά υγρά και διεργασίες.....	14
5. Παγκόσμια Παραδείγματα	15
5.1 Round Mountain, Nevada.....	16
5.2 Frieda River, Papua New Guinea.....	17
5.3 Hishikari, Japan, El Indio, Chile.....	18
6. Ελληνικά παραδείγματα	22
7.Βιβλιογραφία	30



Περίληψη

Τίτλος: Κοιτάσματα επιθερμικού τύπου

Όνομα: Μαγγίρα Ιωάννα

Η παρακάτω εργασία αποτελεί μια σύνοψη όλων των χαρακτηριστικών γνωρισμάτων ενός κοιτάσματος επιθερμικού τύπου. Τα επιθερμικά κοιτάσματα εμφανίζονται σε ένα γεωτεκτονικό περιβάλλον υποβύθισης μίας ωκεάνιας τεκτονικής πλάκας κάτω από μια άλλη ηπειρωτική, και με ταυτόχρονη άνοδο μάγματος και μεταφορά ρευστών. Στην εργασία, αναφέρονται η ταξινόμηση τους σε χαμηλής, υψηλής και ενδιάμεσης θεώσης κοιτάσματα καθώς όλα τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά τους, όπως ορυκτά της μεταλλοφορίας, μορφή των μεταλλοφόρων σωμάτων, πηγή προέλευσης των ρευστών, μητρικό πέτρωμα ξενιστής κ.ά., Επιπλέον, αναφέρονται αναλυτικά οι υδροθερμικές εξαλλοιώσεις που είτε προϋπάρχουν στα ορυκτά του πετρώματος ξενιστές, είτε αναπτύσσονται κατά τη δημιουργία της μεταλλοφορίας καθώς και η ζώνωση των κοιτασμάτων αυτών. Τέλος, παρατίθενται μερικά παραδείγματα τόσο παγκόσμιων όσο και Ελληνικών εμφανίσεων των κοιτασμάτων επιθερμικού τύπου.



Abstract

Title: Epithermal type deposits

By: Mangira Ioanna

This diploma thesis is a summary of all the features that characterize an epithermal type deposit. The epithermal deposits appear in a tectonic environment with the subduction of an oceanic lithosphere below a continental lithospheric slab, causing a contemporaneously rise of magma and fluid circulation. Their special features such as the ore and hydrothermal minerals, the form of the ore bodies, the origin of the fluids, the host rocks etc. are further discussed. All these data that are used in order to discriminate them from other types of deposits and also to classify the epithermal deposits in subtypes based on their sulfidation state. Subsequently, the different types of hydrothermal alteration are discussed whether they pre-existed in the minerals of the host rocks, or they were formed during the mineralization process from the hydrothermal fluids. Last but not least, several examples of global and Greek epithermal type deposits, are briefly described.



Πρόλογος

Η παρούσα πτυχιακή εργασία , αναφέρεται στα επιθερμικά κοιτάσματα και αναλύει τα κυριότερα χαρακτηριστικά τους. Τα επιθερμικά κοιτάσματα παρουσιάζουν μεγάλο οικονομικό ενδιαφέρον παγκοσμίως αλλά και συγκεκριμένα στον Ελληνικό χώρο αφού περιλαμβάνουν σημαντικά αποθέματα για εκμετάλλευση.

Στην εργασία αυτή αναλύονται οι τρεις ομάδες στις οποίες χωρίζονται τα επιθερμικά κοιτάσματα με βάση το βαθμό θείωσης τους, καθώς επίσης τα βασικά χαρακτηριστικά τους , τα ορυκτά τους και το περιβάλλον στο οποίο αυτά αναπτύσσονται,

Ευχαριστώ, θερμά τον Αναπληρωτή καθηγητή του Τομέα Ορυκτολογίας – Πετρολογίας – Κοιτασματολογίας, κ. Βασίλη Μέλφο, για την πολύτιμη βοήθειά του καθόλη τη διάρκεια της εργασίας μου έως και το πέρας της.



1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Με τον όρο επιθερμικά κοιτάσματα αναφερόμαστε σε στα κοιτάσματα αυτά τα οποία σχηματίζονται κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας ($T \sim 150-300^{\circ}\text{C}$, βάθος 50-1000m), και κάτω από ένα παλαιό – επίπεδο υπόγειο υδροφόρου ορίζοντα και σχετίζονται με έντονα εξαλλοιωμένα πετρώματα.

Τα γενικά χαρακτηριστικά των επιθερμικών κοιτασμάτων επηρεάζονται από τις τεκτονικές, μαγματικές και γεωλογικές συνθήκες που επικρατούν.

Οι εμφανίσεις των επιθερμικών κοιτασμάτων ανά τον κόσμο ακολουθούν την Ανατολική και Δυτική ζώνη του Ειρηνικού (Ακτές Δυτικής Αμερικής, Ιαπωνία, Αυστραλία, Νέα Ζηλανδία κ.ά.) καθώς και τη ζώνη της Τηθύος, στην οποία και ανήκουν τα Ελληνικά επιθερμικά κοιτάσματα.

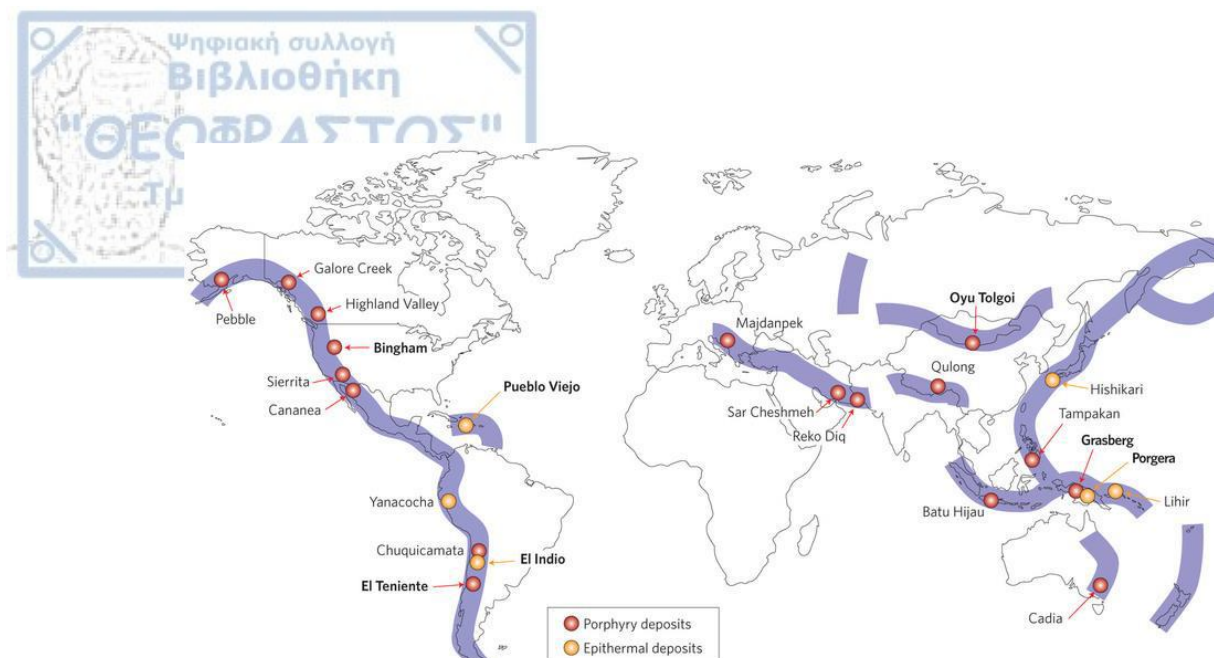
Τέλος , σημαντικό είναι να αναφερθεί ότι τα επιθερμικά κοιτάσματα είναι μεγάλης οικονομικής σημασίας επειδή αποτελούν πηγή προέλευσης διάφορων στοιχείων και χρυσού.

2.ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΑ ΕΠΙΘΕΡΜΙΚΩΝ ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΩΝ

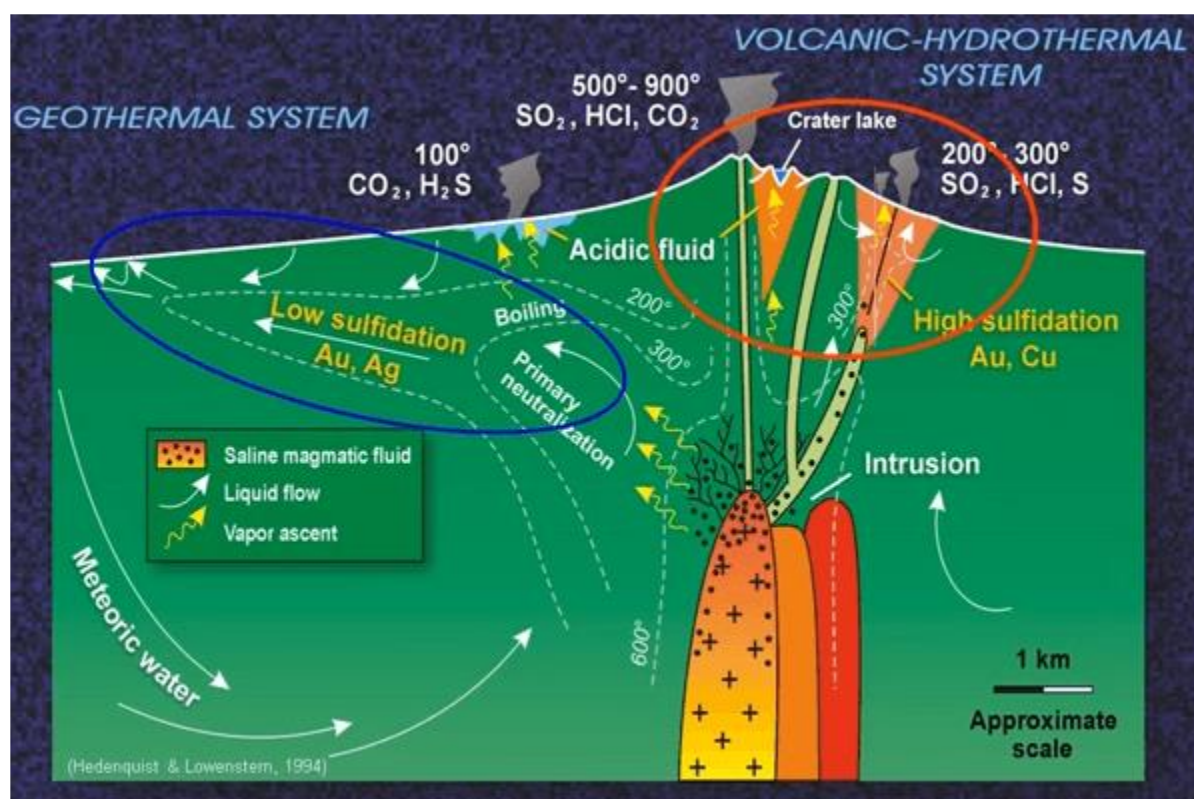
Ο Lindgren (1922) όρισε για πρώτη φορά το επιθερμικό περιβάλλον ως ένα ρηχό σε βάθος περιβάλλον που φιλοξενεί κοιτάσματα Au, Ag και άλλων βασικών μετάλλων. Επίσης τα επιθερμικά περιβάλλοντα συμπεριλαμβάνουν σε μεγάλο βαθμό μέταλλα και ορυκτά υδράργυρου (Hg), Αντιμόνιο (Sb), Θείου S , καολίνη και διοξείδιο του πυριτίου. Σχηματίζονται κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας ($T \sim 150\text{-}300^{\circ}\text{C}$) και κάτω από ένα παλαιό – επίπεδο υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα. Συγκεκριμένα ο Lindgren εκτίμησε το βάθος του σχηματισμού περίπου στα 1.000 μέτρα.

Υπάρχουν δύο διαφορετικά είδη υδροθερμικών συστημάτων στα επιθερμικά περιβάλλοντα (σχήμα 2). Στο ένα άκρο υπάρχει το Γεωθερμικό σύστημα όπου επικρατεί σχεδόν ουδέτερο pH και υγρό σε βάθος που βρίσκεται σε ισορροπία με το αλλοιωμένο πέτρωμα – ξενιστή λόγω της σχετικά αργής ανάβασης του (Giggenbach, 1992). Το υγρό αυτό έχει συνήθως χαμηλή αλατότητα. Επίσης σε αυτό το περιβάλλον εμφανίζονται νερά με ατμό τα οποία έχουν δημιουργηθεί από συμπύκνωση στο υπόγειο νερό. Τα γεωθερμικά συστήματα εμφανίζονται συνήθως σε απόσταση από το ηφαιστειακό τμήμα και μπορούν επίσης να εμφανιστούν σε περιοχές χωρίς ηφαιστειακή δραστηριότητα ή χωρίς ηφαιστειακά πετρώματα. Στις περισσότερες περιπτώσεις τα γεωθερμικά συστήματα χαρακτηρίζονται από διεισδύσεις που βρίσκονται 5-6 χιλιόμετρα κάτω από την επιφάνεια.

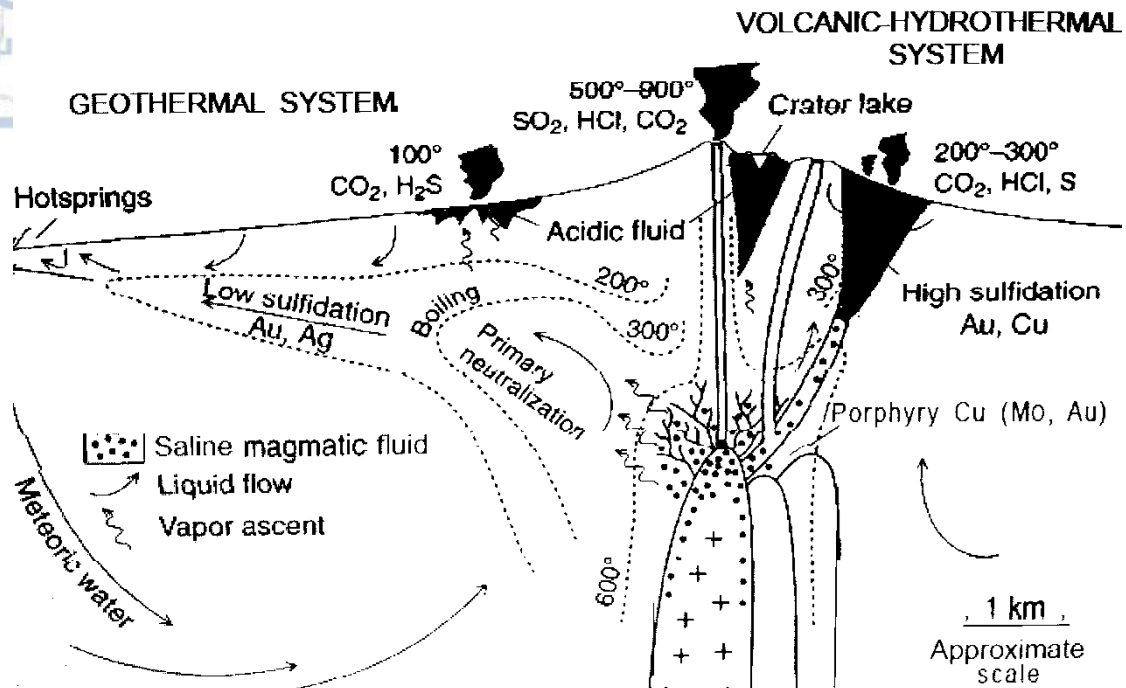
Στο άλλο άκρο έχουμε υδροθερμικό-ηφαιστειακό σύστημα (σχήμα 3) όπου εμφανίζεται σε μία τοποθεσία κοντά σε μία υδροθερμική διέξοδο (volcanic vent) που εστιάζει στην μεταφορά ατμών στην επιφάνεια. Επικρατούν υψηλές θερμοκρασίες και εξαιρετικά όξινο νερό. Και τα δύο αυτά συστήματα μπορούν να συνυπάρξουν σε ένα περιβάλλον. Στο σχήμα 1 εμφανίζονται σε χάρτη τα επιθερμικά κοιτάσματα παγκοσμίως. Στον πίνακα 1 αναφέρονται τα βασικά χαρακτηριστικά των δύο επιθερμικών περιβαλλόντων.



Σχήμα 1. Παγκόσμια εμφάνιση επιθερμικών κοιτασμάτων (Sillitoe, 2015)



Σχήμα 2. Γεωτεκτονικό περιβάλλον σχηματισμού επιθερμικών κοιτασμάτων (Hedenquist et al., 1995)



Σχήμα 3. Διαδικασίες του γεωθερμικού, ηφαιστειακού – υδροθερμικού συστήματος και τα αντίστοιχα HS, LS περιβάλλοντα (Hedenquist, 2000).

Πίνακας 1. Χαρακτηριστικά των δύο βασικών επιθερμικών περιβαλλόντων (Hedenquist, 2000)

Γεωθερμικό σύστημα	Ηφαιστειακό – Υδροθερμικό σύστημα
Φλέβες Au – qtz σε ανδεσίτη και ρυόλιθο. Φλέβες Ag-Au, Ag, Au-Te, και AuSe	Au - Αλλουνίτης
Θερμές πηγές	Au – Εναργίτης
Σερικίτης - αδουλάριος	Θεικό οξύ
Χαμηλό θείο	Αλλουνίτης - Καολινίτης
Χαμηλή θείωση	Υψηλή θείωση

3.ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΕΠΙΘΕΡΜΙΚΩΝ ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΩΝ

Τα επιθερμικά κοιτάσματα με βάση την κατάσταση θείωσης που επικρατεί χωρίζονται σε τρεις κατηγορίες.

1. Υψηλής θείωσης (High sulfidation)1

2. Ενδιάμεσης θείωσης (Intermediate Sulfidation)
3. Χαμηλής θείωσης (Low sulfidation)

Για τα υψηλής και χαμηλής θείωσης κοιτάσματα υπάρχουν σημαντικά παραδείγματα με μεγάλη οικονομική σημασία (Hedenquist et al., 1995). Αν και φαίνεται να έχουν παρόμοιες ορυκτολογικές αλλοιώσεις έχουν σχηματιστεί από υγρά διαφορετικής χημικής σύστασης. Ο διαχωρισμός τους είναι ζωτικής σημασίας για την αποτελεσματική διερεύνηση και έγινε με βάση το χημικό περιβάλλον, την ορυκτολογική παραγένεση, τις υδροθερμικές εξαλλοιώσεις και τις συνθήκες σχηματισμού (Hedenquist, 2002).

3.1 Επιθερμικά Κοιτάσματα υψηλής θείωσης (HS)

Τα υψηλής θείωσης κοιτάσματα είναι αυτά που σχετίζονται με υψηλές θερμοκρασίες καθώς και όξινα θειικά άλατα που σχηματίστηκαν στο μαγματικό – υδροθερμικό περιβάλλον κοντά σε ανδεσιτικά ηφαίστεια (Ransome, 1907, Hedenquist et al., 1994). Εμφανίζονται μέσα σε ηφαιστειακά πετρώματα ενδιάμεσης σύστασης. Ατμός πλούσιος σε HCL και SO₂ απορροφάται από τα υπόγεια ύδατα (Rye, 1993), και καταλήγει σε ένα θερμό (200-300 °C) και πολύ όξινο (pH 0-2) οξειδωτικό διάλυμα το οποίο επιδρά και διεισδύει στο πέτρωμα ξενιστή. Τα ρευστά ανεβαίνουν μέσα από διαρρήξεις στην επιφάνεια και ακολουθεί απόθεση των υλικών τους. Καθώς τα ρευστά αυτά ανεβαίνουν και φτάνουν σε θερμοκρασίες 200°-300° C αποθέτουν τα θειούχα ορυκτά τους στα περιβάλλοντα πετρώματα ασβεσταλκαλικής σύστασης και εξαλλοιώνουν τα υπάρχοντα. Τα ορυκτά αυτά είναι ο σιδηροπυρίτης (py), χαλκοπυρίτης (cpy), τενναντίτης (ten), εναργίτης (en), λουζονίτης (luz), φαματινίτης (fam), κοβελλίνης (con), τελλουρίδια και χρυσός. Τα μεταλλικά στοιχεία που παρατηρούνται στα υψηλής θείωσης επιθερμικά κοιτάσματα είναι ο χαλκός (Cu), χρυσός (Au), άργυρος (Ag), αρσενικό (As) και επίσης μόλυβδος (Pb), υδράργυρος (Hg), αντιμόνιο (Sb), τελλούριο (Te), κασσίτερος (Sn), και βισμούθιο (Bi).

3.2 Επιθερμικά Κοιτάσματα χαμηλής θείωσης (LS)

Τα χαμηλής θείωσης κοιτάσματα σχηματίζονται σε ουδέτερο περιβάλλον σχηματισμού με αναγωγικές συνθήκες. Χαρακτηρίζονται από υδροθερμικά υγρά με

ουδέτερο pH και μία εξαλλοίωση όξινων θεικών αλάτων από μαγματικές πηγές. Στα χαμηλής θείωσης κοιτάσματα το υδροθερμικό υγρό είναι κυρίως μετεωρικό νερό αλλά κάποια συστήματα περιέχουν νερό και μαγματικά ενεργά αέρια (CO₂, SO₂, HCL) (Hedenquist and Lowenstern, 1994).

Παρατηρήσεις

Τα βασικά χαρακτηριστικά οποιουδήποτε κοιτάσματος είναι ο τύπος και τα ορυκτολογικά συστατικά του, οι υφές του μεταλλεύματος και τα σύνδρομα ορυκτά του. Πολλά ορυκτά είναι κοινά στα υψηλής θείωσης και στα χαμηλής θείωσης κοιτάσματα, παρόλα αυτά υπάρχουν σημαντικές διαφορές στην ορυκτολογική σύσταση τους. Στον πίνακα 2 εμφανίζονται τα ορυκτά που σχηματίζονται στις δύο κατηγορίες (HS,LS) επιθερμικών κοιτασμάτων (Chang et al., 2011). Μία σημαντική διαφορά είναι η ύπαρξη του σφαλερίτη και του αρσενοπυρίτη στα χαμηλής θείωσης επιθερμικά κοιτάσματα, ενώ στα υψηλής θείωσης ο σφαλερίτης είναι ελάχιστος και ο αρσενοπυρίτης συναντάται σπάνια. Σε αντίθεση με τα LS κοιτάσματα, τα HS συνήθως εμπεριέχουν ορυκτά χαλκού-αρσενικού κυρίως εναργίτη και λουζονίτη. Επίσης σουλφίδια όπως τενναντίτης και τετραεδρίτης που συναντάμε συχνά στα HS κοιτάσματα (Barton and Skinner, 1979, Hedenquist, 1995), είναι σχετικά σπάνια ή απουσιάζουν από τα χαμηλής θείωσης κοιτάσματα. Στον πίνακα 3 αναφέρονται τα σύνδρομα ορυκτά που χαρακτηρίζουν κάθε κατηγορία.

Πίνακας 2. Εμφανίσεις ορυκτών μετάλλων στα κοιτάσματα (White and Hedenquist, 1995)

	Χαμηλής Θείωσης	Υψηλής Θείωσης
Σιδηροπυρίτης	Ευρύς (άφθονος)	Ευρύς (άφθονος)
Σφαλερίτης	Κοινός (μεταβλητός)	Κοινός (ελάχιστος)
Γαληνίτης	Κοινός (μεταβλητός)	Κοινός (ελάχιστος)
Χαλκοπυρίτης	Κοινός (ελάχιστος)	Κοινός (ελάχιστος)
Εναργίτης- Λουζονίτης	Σπάνιος (ελάχιστος)	Ευρύς (μεταβλητός)
Τενναντίτης- Τετραεδρίτης	Κοινός (ελάχιστος)	Κοινός (μεταβλητός)
Αρσενοπυρίτης	Κοινός (ελάχιστος)	Σπάνιος (ελάχιστος)
Κοβελλίνης	Ασυνήθης (ελάχιστος)	Κοινός (ελάχιστος)

Πίνακας 3. Εμφανίσεις σύνδρομων ορυκτών στα κοιτάσματα (White and Hedenquist, 1995)

Α.Π.Θ	Χαμηλής Θείωσης	Υψηλής Θείωσης
Χαλαζίας	Ευρύς (άφθονος)	Ευρύς (άφθονος)
Χαλκηδόνιος	Κοινός (μεταβλητός)	Ασυνήθης (ελάχιστος)
Ασβεστίτης	Κοινός (μεταβλητός)	Απών
Αδουλάριος	Κοινός (μεταβλητός)	Απών
Ιλλίτης	Κοινός (άφθονος)	Ασυνήθης (ελάχιστος)
Καολινίτης	Σπάνιος	Κοινός (ελάχιστος)
Πυροφυλλίτης - Διάσπορο	Απών	Κοινός (μεταβλητός)

3.3 Επιθερμικά Κοιτάσματα Ενδιάμεσης Θείωσης (IS)

Ο σχηματισμός των ενδιάμεσης θείωσης επιθερμικών κοιτασμάτων γίνεται σε ένα μεταβατικό στάδιο μεταξύ των HS και LS κοιτασμάτων. Τα IS χαρακτηρίζονται από την συγκέντρωση σιδηροπυρίτη-τετραεδρίτη/τενναντίτη-χαλκοπυρίτη και χαμηλού σε Fe σφαλερίτη. Τα IS κοιτάσματα είναι πλούσια σε Ag σε αντίθεση με το πλούσιο σε Au HS κοιτάσμα. Επίσης περιέχουν και άλλα μεταλλικά στοιχεία όπως Au Zn και Pb σε σφαλερίτη (Jeffrey W. Hedenquist, 2000). Τα IS κοιτάσματα σχετίζονται συνήθως με οξειδωμένο ασβέστιο και ασβεσταλκαλικό μαγματισμό. Επιπλέον σχηματίζουν φλέβες και breccia με τραχιά υφή και ταινιωτή μορφή. Τα ορυκτά που εμφανίζονται εδώ και έχουν σημασία είναι ο τενναντίτης, τετραεδρίτης, χαλκοπυρίτης και σφαλερίτης (Fe-φτωχός). Οι βασικές εξαλλοιώσεις είναι ο ροδοχρωσίτης ($MnCO_3$) και ο ανυδρίτης ($CaCO_3$) σε σχέση με χαλκηδόνιο και αδουλάριο.

4. ΕΞΑΛΛΟΙΩΣΕΙΣ ΚΑΙ ΖΩΝΩΣΗ

Οι ορυκτολογικές εξαλλοιώσεις και η ζώνωση είναι πολύ σημαντικοί παράγοντες για να καταλάβουμε τον τύπο του επιθερμικού κοιτάσματος. Τα υψηλής θείωσης κοιτάσματα παρουσιάζουν σημαντικές διαφορές από τα χαμηλής σχετικά με τις

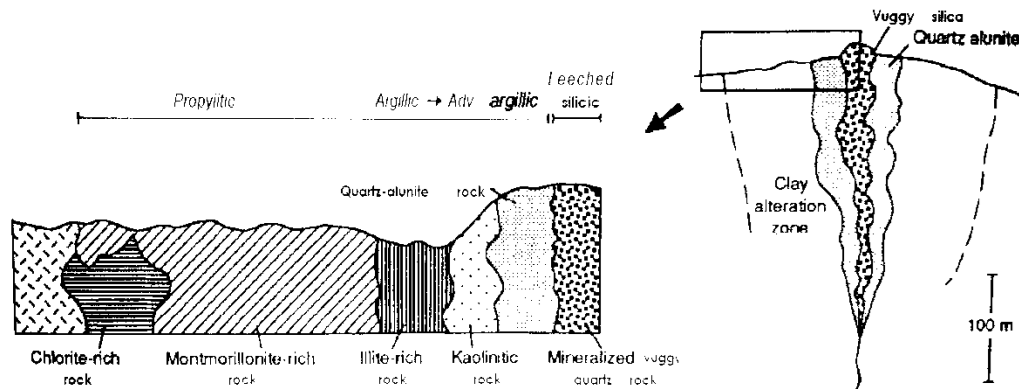
εξαλλοιώσεις. Παρατηρούμε στον πίνακα 4 τις εξαλλοιώσεις που σχετίζονται με τα επιθερμικά κοιτάσματα.

Πίνακας 4. Εξαλλοιώσεις που σχετίζονται με τα επιθερμικά κοιτάσματα (Τροποποιημένο από Hedenquist 2.000).

Εξαλλοίωση	Χαμηλής Θείωσης (LS)	Υψηλής Θείωσης (HS)
Πυριτίωση	Φλέβες χαλαζία, πυριτίωση σε μικρό βάθος, συμπαγή μορφή. Χαλκηδόνιος, οπάλλιος	Υπολειμματικά σώματα χαλαζία, χαλκηδόνιος, βαρύτης με συμπαγή, σκωριώδη μορφή
Προχωρημένη αργλική	Αλλουνίτης, καολινίτης (ιλλίτης, σμεκτίτης)	Χαλαζίας, αλλουνίτης, καολινίτης, πυροφυλλίτης
Αργλική ή Σερικιτική	Ιλλίτης, σμεκτίτης	Εμφάνιση ανάμεσα στην προχωρημένη αργλική και στην προπυλιτική
Προπυλιτική	Ασβεστίτης, επίδοτο, χλωρίτη, ιλλίτη κ.ά. Αύξηση βάθους και θερμοκρασίας	Ασβεστίτης, χλωρίτης, επίδοτο κ.ά. Βάθη >500m

4.1 Εξαλλοιώσεις στα HS κοιτάσματα

Στο σχήμα 5 παρατηρούμε την τομή εξαλλοιώσεων των υψηλής θείωσης επιθερμικών κοιτασμάτων. Η ζώνωση από το κέντρο προς την περιφέρεια είναι πυριτίωση κατά μήκος των διαρρήξεων, με χαλαζία, χαλκηδόνιο κ.ά. Επίσης παρατηρείται προχωρημένη αργλική, αργλική/ σερικιτική με χαλαζία, χαλκηδόνιο και τέλος προπυλιτική με ασβεστίτη χλωρίτη, επίδοτο, αλβίτη η οποία είναι μια εξωτερική ζώνη εξαλλοίωσης.

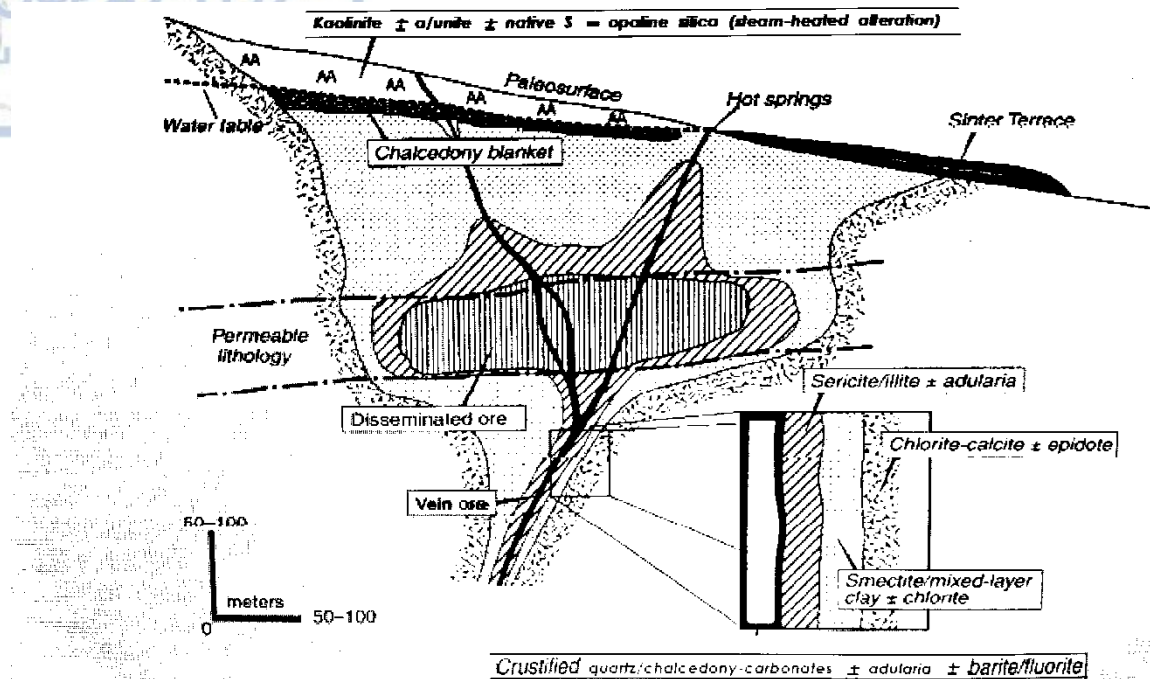


Σχήμα 5. Τομή Υδροθερμικών εξαλλοιώσεων στα υψηλής θεώσης κοιτάσματα (Jeffrey W. Hedenquist, 2000).

4.2 Εξαλλοιώσεις στα LS κοιτάσματα

Στις εξαλλοιώσεις των LS κοιτασμάτων κυριαρχούν τα αργιλικά ορυκτά. Τα LS κοιτάσματα επηρεάζονται από ουδέτερου pH θερμικά νερά, με την αύξηση της θερμοκρασίας και τη μείωση του βάθους.

Η ζώνωση από το κέντρο ως την περιφέρεια (σχήμα 6) είναι πυριτώση κατά μήκος των διαρρήξεων με χαλαζία, χαλκηδόνιο, σιδηροπυρίτη κ.ά. και έχει συμπαγή μορφή και ταινιωτή σε φλέβες. Στη συνέχεια, σερικιτική με σχηματισμό υδροθερμικού καλιούχου αστρίου. Εξαλλοιώνει τα τοιχώματα των γύρω από τις φλέβες πετρωμάτων και ζώνες αντικατάστασης σε περατά πετρώματα. Προπυλιτική με ασβεστίτη, χλωρίτη, επίδοτο, ιλλίτη κ.ά. Η συγκεκριμένη καλύπτει μεγάλη περιοχή, και οι ορυκτολογικές αλλαγές που λαμβάνουν χώρα, υποδεικνύουν αύξηση του βάθους και της θερμοκρασίας. Στις εικόνες 1 με 3 παρατηρούμε κάποιες από τις εξαλλοιώσεις σε πετρώματα.



Σχήμα 6. Μοντέλο ζώνωσης για χαμηλής θείωσης επιθερμικά κοιτάσματα (Jeffrey W. Hedenquist, 2000).



Εικόνα 1. Προχωρημένη υδροθερμική εξαλλοίωση (Μέλφος-Επιθερμικά κοιτάσματα)



Εικόνα 2. Αδουλάριος με ρόδινο χρώμα (Michaud 2015a)



Εικόνα 3. Πυροφυλλίτης (Michaud 2015a)

4.3 Επιθερμικά υγρά και διεργασίες

Πολλά γεωθερμικά συστήματα του κόσμου μας δίνουν άφθονες πληροφορίες για τις σχέσεις της θερμοκρασίας και του βάθους (Henley et al., 1984). Η ροή στα περισσότερα συστήματα παρουσιάζει μία θερμική κλίση η οποία δείχνει συνθήκες βρασμού που σε

πολλές περιπτώσεις σχετίζονται με το πλούσιο σε αέριο υγρό (σχήμα 4α). Οι υψηλές ποσότητες αερίου συμβάλλουν στην πίεση του ατμού, ωθώντας έτσι ένα ισόθερμο σε μεγαλύτερα βάθη. Για παράδειγμα, μεγάλες συγκεντρώσεις CO₂ σε διάλυμα, μπορούν να προκαλέσουν βρασμό ενός υγρού 300°C σε βάθος μέχρι και 1500 μέτρα, αντί για 1000 μέτρα για καθαρό νερό (Henley et al., 1984). Αντιθέτως, η αντίσταση στη ροή σε μία ρωγμή οδηγεί σε 10 τις εκατό μεγαλύτερες υδροδυναμικές πιέσεις παρά υδροστατικές (Hedenquist and Henley, 1985a). Σε ορισμένες περιπτώσεις, η απόθεση ορυκτών έχει ως αποτέλεσμα να περιορίζει την ροή, προκαλώντας έτσι σχεδόν διπλάσια αύξηση πίεσης από αυτή στο υδροστατικό προφίλ (e.g., Sulphur Bank και McLaughlin, California; Moore et al., 2000). Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη συμπίεση των ισόθερμων πιο κοντά στην επιφάνεια. Η υψηλή πίεση μπορεί να συμβάλλει επίσης στην πιθανότητα υδραυλικής θραύσης καθώς και πιθανή υδροθερμική έκρηξη όπως έχει συμβεί στα γεωθερμικά συστήματα Yellowstone, Wyoming και Waiotapu στη Νέα Ζηλανδία (Hedenquist and Henley, 1985b). Αντίθετα, η υψηλή αλατότητα μειώνει το βάθος σε θερμοκρασία βρασμού αλλά αυτή η δράση είναι περιορισμένη σε χαρακτηριστικές χαμηλές αλατότητες των επιθερμικών υγρών που είναι πλούσια σε Au (Hedenquist and Henley, 1985a).

Ο βρασμός και η ανάμιξη είναι οι δύο κύριες διεργασίες που συμβαίνουν στα γεωθερμικά συστήματα (Giggenbach and Stewart, 1982) μαζί με τη συμπύκνωση ατμών κοντά στην επιφάνεια. Σε υδροθερμικά συστήματα υψηλής ροής, η άνοδος του υγρού γίνεται αρκετά γρήγορα. Στα γεωθερμικά συστήματα καθώς και στα αντίστοιχα χαμηλής θείωσης συστήματα, ο κύριος έλεγχος του pH του υγρού είναι η συγκέντρωση CO₂ σε διάλυμα, μαζί με την αλατότητα (Henley, et al., 1984). Έτσι, ο βρασμός και η απώλεια CO στον ατμό, οδηγεί σε αύξηση του pH.

5. ΠΑΓΚΟΣΜΙΑ ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ

Τα επιθερμικά κοιτάσματα εμφανίζονται σε όλο το μήκος των δυτικών και ανατολικών ακτών του Ειρηνικού σχηματίζοντας το γνωστό δαχτυλίδι της φωτιάς. Η ηφαιστειότητα που λαμβάνει χώρα έχει ηλικία Κρητιδικό – Τριαδικό. Με την ίδια ηλικία παρατηρούνται κοιτάσματα στην δυτική Μεσόγειο και στο Κάρπαθο – Βαλκανικό τόξο. Στην Παταγονία εμφανίζονται με ηλικίες μέσου Μεσοζωικού. Στην Ανατολική Αυστραλία, Βόρεια Αμερική και στην Κεντρική Ασία έχουν Παλαιοζωική ηλικία. Στην πλειονότητά τους διαχωρίζονται σε τρεις κατηγορίες :

Α. Χαμηλού βαθμού LS και οξειδωμένων λόγω έκπλυσης HS (Round Mountain, Nevada)

Β. HS επιθερμικά κοιτάσματα (Frieda River, Papua New Guinea)

Γ. Μέσου βαθμού μη οξειδωμένα HS κοιτάσματα (Pueblo Viejo, Colorado)

5.1 Round Mountain, Nevada

Το επιθερμικό κοιτάσμα Round Mountain (εικόνα 4), εμφανίζεται πάνω σε ένα σύνθετο υπόβαθρο από Παλαιοζωικά ιζήματα με διεισδύσεις από Κρητιδικούς γρανίτες, τα οποία παρουσιάζουν πολλές πτυχώσεις και διαρρήξεις καθώς κόβονται από μία σειρά ανδεσιτικών και δακιτικών φλεβών με ΒΑ κλίσεις, που χρονολογήθηκαν στα 35 εκ. χρόνια. Οι αποθέσεις φλεβικού μεταλλεύματος γίνονται επάνω σε Ολιγοκαινικές – Κ. Μειοκαινικές ροές λάβας και τέφρας.

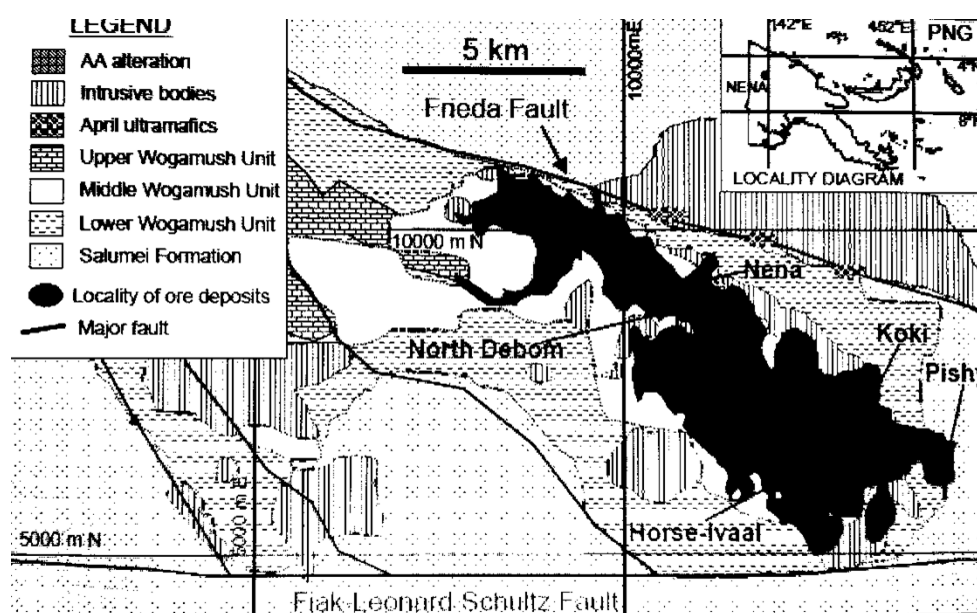
Πάνω από τις τόφφους βρίσκεται μία στρώση πυροκλαστικών υλικών και επικλαστικών πετρωμάτων λόγω του αέρα. Το παραπάνω στρώμα της ροής τέφρας είναι συγκολλημένο ενώ το κατώτερο φιλοξενεί το διαδεδομένο μετάλλευμα αφού είχε μια σχετικά υψηλή αρχική διαπερατότητα. Λεπτά ενστρωματωμένοι τόφφοι έχουν εξαλλοιωθεί σε πυριτικό χαλκηδόνιο.



Εικόνα 4. Περιοχή Round Mt, Nevada (wikipedia.org, 2020)

5.2 Frieda River, Papua New Guinea

Το Cu-Au κοίτασμα Nena βρίσκεται στην περιοχή Frieda River της Βορειοδυτικής Παπούα Γουινέας (σχήμα 7). Η Γουινέα αποτελεί ένα δομικά και λιθολογικά σύνθετο σύστημα υψηλής θείωσης (HS). Το κοίτασμα ανακαλύφθηκε το 1975.



Σχήμα 7. Τοποθεσία και απλοποιημένη γεωλογία της περιοχής Frieda River (Hitchman, S. P. and Espi, 1997).

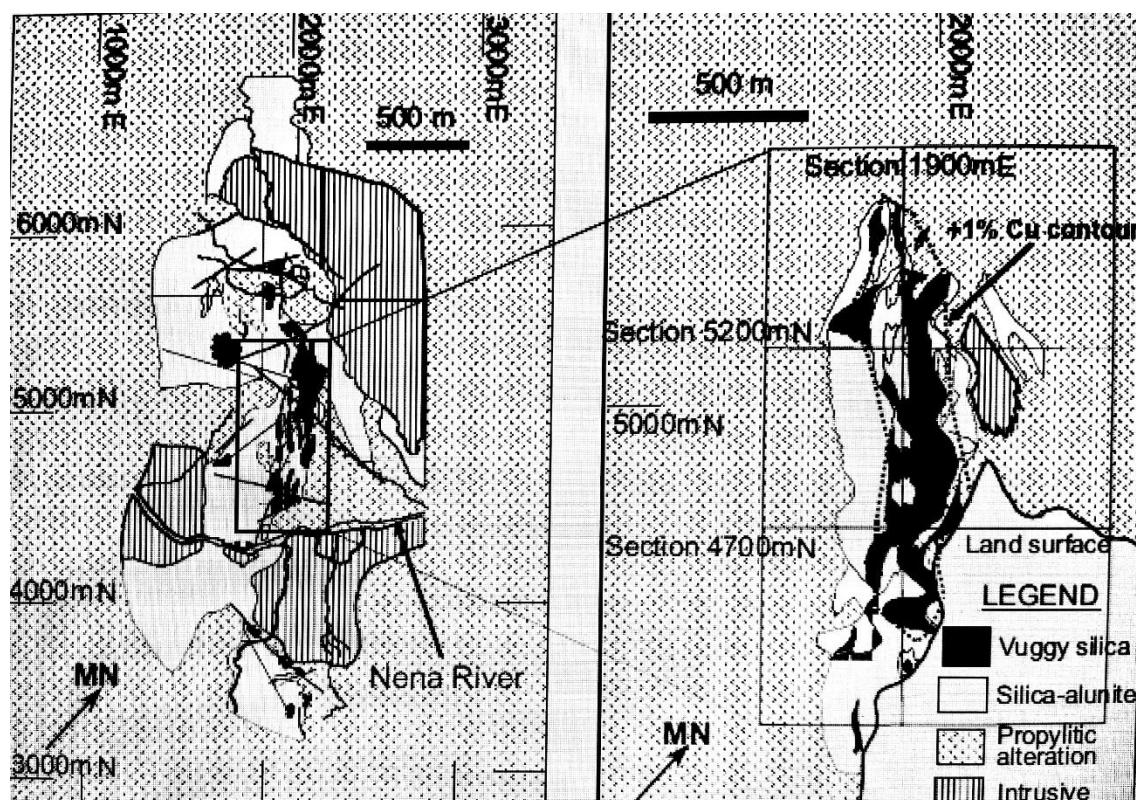
Στρωματογραφία

Ένας σχηματισμός του Άνω Κρητιδικού-Ηώκαινου που ονομάζεται Salumei, αποτελεί το υπόβαθρο του κοιτάσματος (Ok Binai Phyllite; Hall et al., 1990). Αυτό αποτελείται από βασικά ηφαιστειακά πετρώματα και ψαμμίτη, που έχει μεταμορφωθεί σε σχιστόλιθο, πρασινοσχιστόλιθο και φυλλίτη. Η μεταμόρφωση αυτών των πετρωμάτων χρονολογείται περίπου στα 27 με 25 Ma.

Σχηματισμός Μειοκαίνου (Wogamush Formation) επικαλύπτει το υπόβαθρο (σχήμα 8). Ο σχηματισμός αυτός χωρίζεται στρωματογραφικά σε Lower Wogamush Unit (LWU), Middle Wogamush Unit (MWU) and Upper Wogamush Unit (UWU).

Ο LWU αποτελείται από βασικά πετρώματα, ασβεστόλιθο και σχιστόλιθο. Στον MWU σχηματισμό ο οποίος φιλοξενεί και το Nena κοίτασμα, κυριαρχούν ανδεσιτικά, πυροκλαστικά πετρώματα και μικρές ροές λάβας με πυριτικούς ορίζοντες. Τέλος, ασβεστόλιθος και ψαμμίτης είναι τα κύρια πετρώματα του UWU σχηματισμού.

Τεταρτογενείς αποθέσεις αποτελούμενες από λάσπη, άμμο και χαλίκια επικαλύπτουν τους παραπάνω σχηματισμούς.



Σχήμα 8. Απλοποιημένη γεωλογία του HS Cu-Au κοιτάσματος Nena (Espí et al. 2002).

Υδροθερμικές εξαλλοιώσεις

Η υδροθερμική επίδραση στο κοίτασμα Nena χωρίζεται σε κάποιες κατηγορίες. Συγκεκριμένα σε προπυλιτική εξαλλοίωση, σε επιθερμική φλέβα χαλαζία, ζώνη υψηλής θείωσης εξαλλοίωσης, φάση χαλαζία – αλουνίτη – βαρύτη και σε φυσικό θείο. Η ζώνη υψηλής θείωσης εξαλλοίωσης αποτελεί τον πιο εμφανή τύπο.

5.3 Hishikari, Japan, El Indio, Chile

Το Hishikari τοποθετείται 45 km ΒΔ της Kagoshima στο Kyushu (εικόνα 5) όπου δίδυμες κεκλιμένες μετακινήσεις οδήγησαν στην ζωνώδη κρυστάλλωση. Το

τωρινό μετάλλευμα βρίσκεται από 0-100m πάνω από το επίπεδο της θάλασσας και αποτελείται από ηφαιστειακά Νεογενή πετρώματα (εικόνα 6).

Στρωματογραφία

Το υπόβαθρο με ψαμμίτες και στρώματα σχιστολίθων αποτελεί την ομάδα Shimanto και πάνω από αυτό είναι στρωμένοι οι παλαιότεροι ανδεσίτες Hokusatsu. Οι φλέβες της περιοχής είναι ανάλογες με τα μητρικά πετρώματα. Για την ομάδα Shimanto οι φλέβες είναι γαλακτώδεις λευκές ή τεφρόλευκες ομογενείς ή ταινιωτές χαλαζιακές φλέβες. Παρατηρείται χαλαζίας και καλιούχοι άστριοι ή και σιδηροπυρίτης ή και καολινίτης. Επίσης, ασβεστίτης σε τμήματα φλεβών ευρέως πλακώδους χαλαζία και δολομίτης σε κάποιες φλέβες.

Στους ανδεσίτες Hokusatsu εμφανίζονται αργλικές φλέβες κυρίως χαλαζία και ασβεστίτη που συσχετίζονται με ζεόλιθους. Βαϊρακίτης κοντά στα όρια ασυμφωνίας, μοντμοριλονίτης και άργιλος στις υψηλότερες φλέβες. Στην ομάδα Shimanto οι σχιστόλιθοι περιλαμβάνουν χαλαζία, πλαγιόκλαστο – πράσινο τόφφο – σελενίτη.



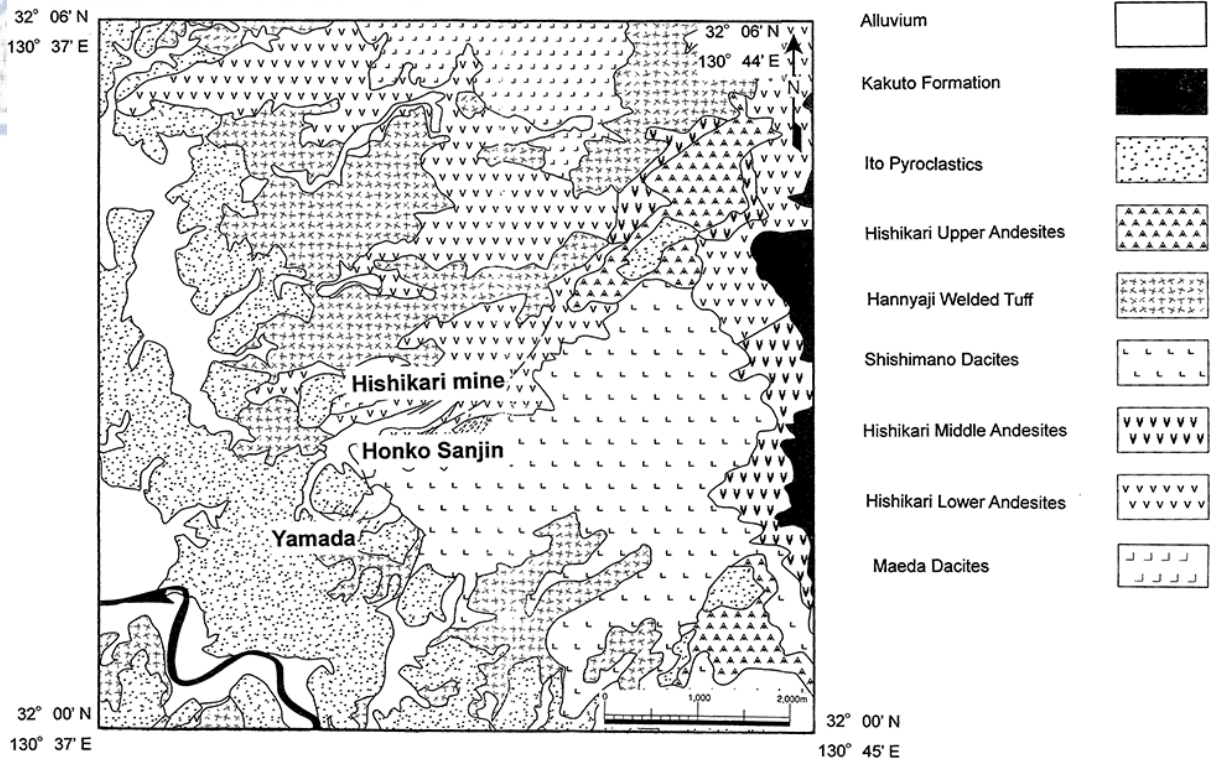
Εικόνα 5. Περιοχή Hishikari στον χάρτη (Wikipedia.org, 2020)

Υδροθερμικές εξαλλοιώσεις

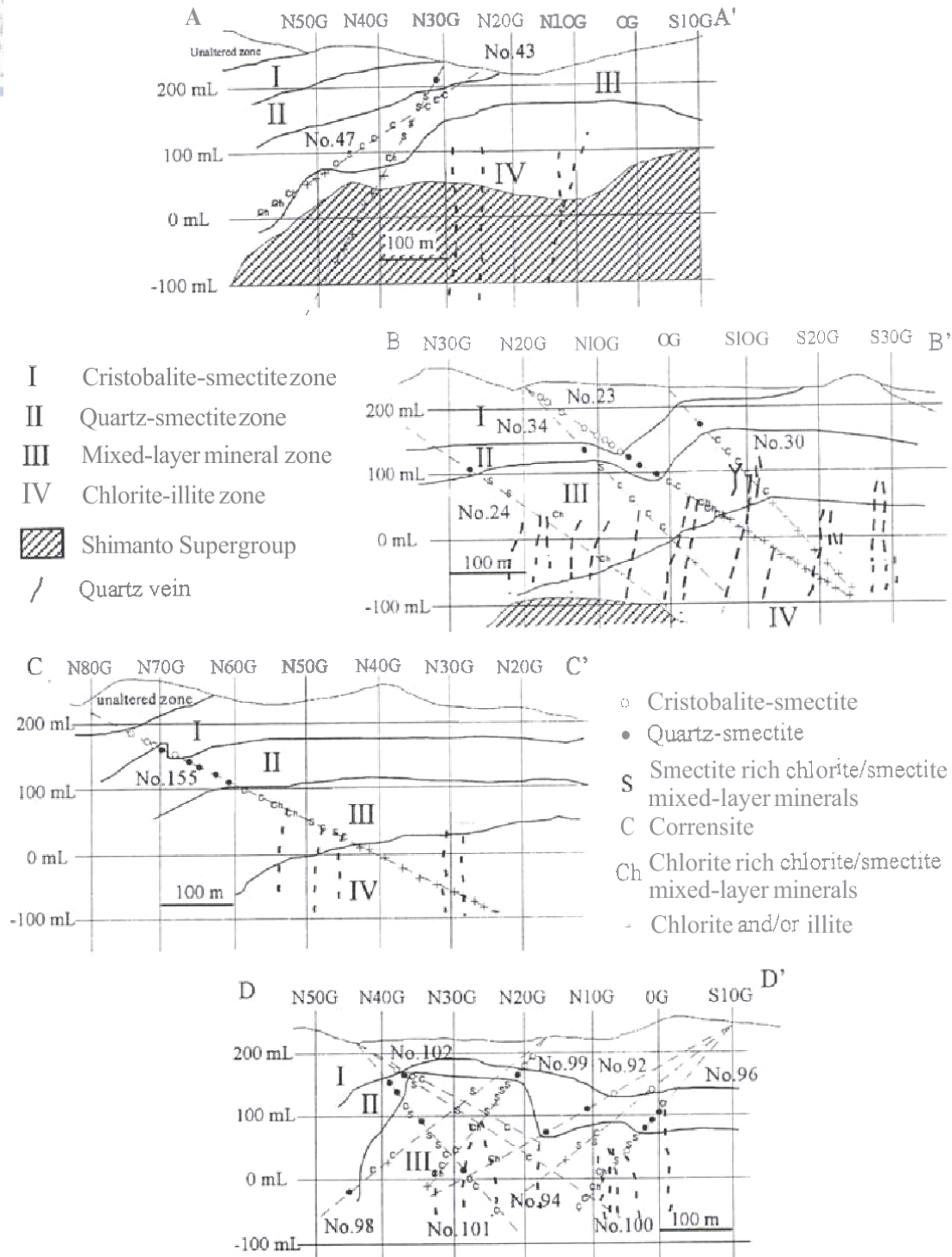
Κοντά στα όρια της ασυμφωνίας παρατηρούνται υδροθερμικές εξαλλοιώσεις ενώ συχνά σχηματίζονται καλιούχοι άστριοι και στρώματα με σερικήτη και μοντμοριλονίτη (σχήμα 10). Στους ανδεδίτες Hokusatsu παρατηρείται έντονη παρουσία χλωριτίωσης, πυριτίωσης και δημιουργία αργίλων γύρω από τις φλέβες, οι οποίες είναι ιδιαίτερα ευδιάκριτες στον ιστό των λατυποποιημένων τόφων.



Εικόνα 6. Ορυχείο της περιοχής Hishikari (wikipedia.org, 2020)



Σχήμα 9. Τομή περιοχής με περιβάλλοντα πετρώματα και εμφάνιση του σημείου του ορυχείου (Shikazono., and Takahashi 2010)

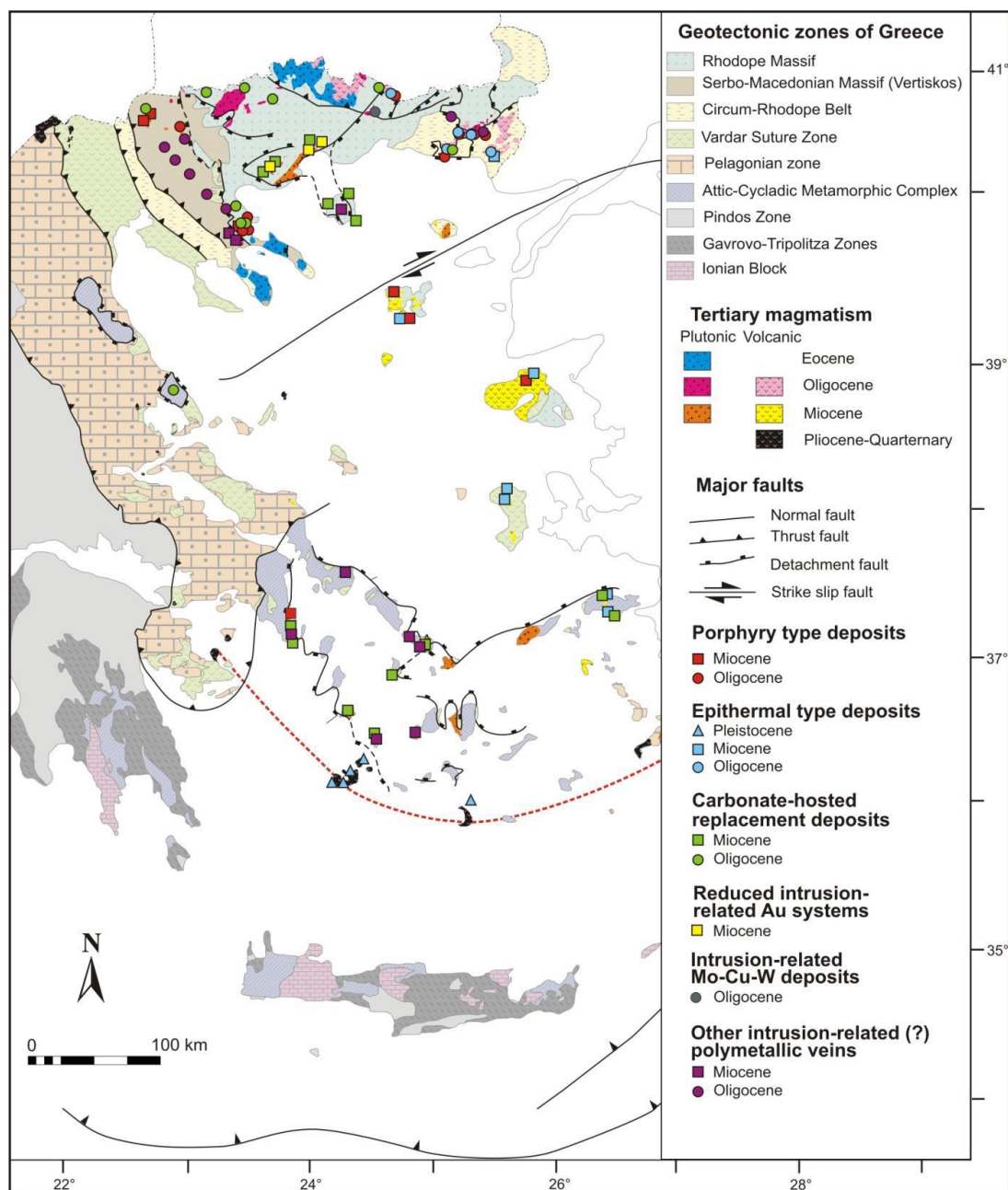


Σχήμα 10. Τομή ζώνωσης εξαλλοιώσεων (Yasuhara et al. 2003)

6. ΕΛΛΗΝΙΚΑ ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ

Στην Ελλάδα παρατηρείται μία ποικιλία μαγματικών και υδροθερμικών μεταλλευμάτων πορφυριτικού και επιθερμικού τύπου, τα οποία διαδραματίζουν

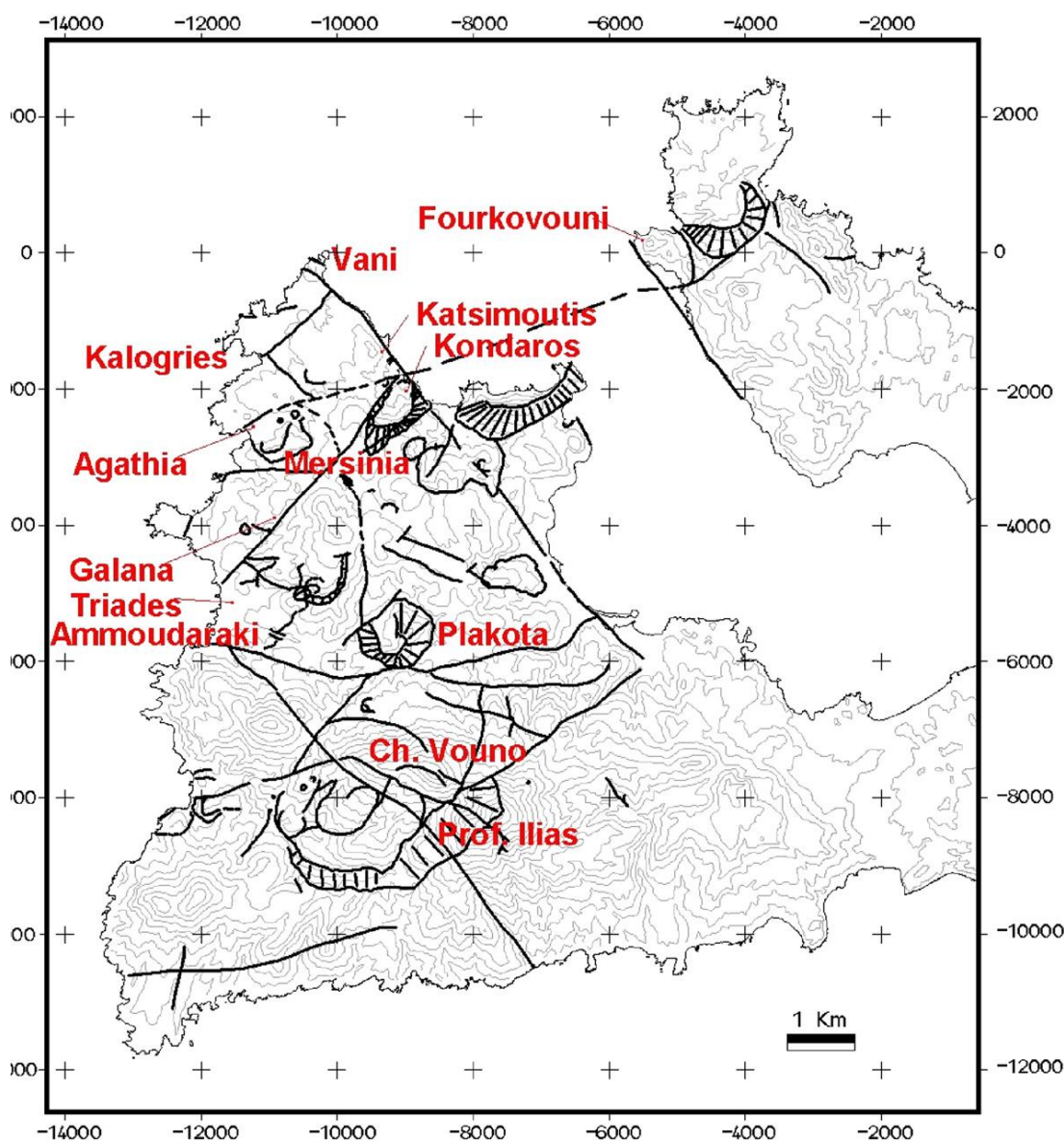
σημαντικό ρόλο για την Ελληνική οικονομία (εικόνα 7). Αυτοί οι τύποι μεταλλεύματος συγκεντρώνονται κυρίως σε δύο περιοχές, στην μάζα της Ροδόπης και στην Αττικοκυκλαδική ζώνη και σχηματίστηκαν περίπου από 33 Ma έως το Πλειστόκαινο ως αποτέλεσμα της έκτασης οπισθόταφρων στο Αιγαίο, σχηματισμού συμπλέγματος μεταμορφικού πυρήνα και συγχρόνως μιας υποβύθισης και δημιουργίας τόξου μαγματισμού.



Εικόνα 7. Εμφάνισεις επιθερμικών κοιτασμάτων στην Ελλάδα (Melfos & Voudouris, 2017)

Μήλος

Η Μήλος είναι τοποθετημένη στο κεντρικό τμήμα της πρώιμης Πλειοκαινικής έως σύγχρονης ενεργής δράσης του ηφαιστειακού τόξου του Ν. Αιγαίου (εικόνα 8). Χαρακτηρίζεται από IS και HS επιθερμικά Au – Ag – Te και βασικών μετάλλων κοιτάσματα που εμφανίζουν χαρακτηριστικά στην υφή της μεταλλοφορίας από επιθερμικού τύπου και VMS (Alfieris et al., 2013).



Εικόνα 8. Χάρτης τοποθεσιών και τα κυριότερα δομικά χαρακτηριστικά της Μήλου (Alfieris 2004)

Πιο συγκεκριμένα για τις περιοχές της Μήλου υπάρχουν τα παρακάτω επιθερμικά κοιτάσματα:



Κοίτασμα Προφήτη Ηλεία με συνολική ποσότητα 5 Mt. Σχετίζεται με επιθερμικές φλέβες χαλαζία, που φιλοξενούνται σε πυροκλαστικά και ρυολιθικά πετρώματα. Η μεταλλοφορία περιέχει πολύτιμα μέταλλα όπως ήλεκτρο και τελλουρίδια Au – Ag και θειικά άλατα.

Στο **κοίτασμα Χονδρό βουνό** οι ενότητες τόφων του Προφήτη Ηλεία καθώς και ο ιγκνιμβρίτης εμφανίζονται ισχυρά αργιλιωμένοι (καολινιωμένα). Υπάρχουν δύο κύριες ομάδες φλεβών, εκ των οποίων η μία είναι περιέχει περιορισμένη μεταλλοφορία και βρίσκεται ΒΔ, ενώ η δεύτερη βρίσκεται ΝΑ και είναι πλούσια σε μεταλλοφορία (εικόνα 9).

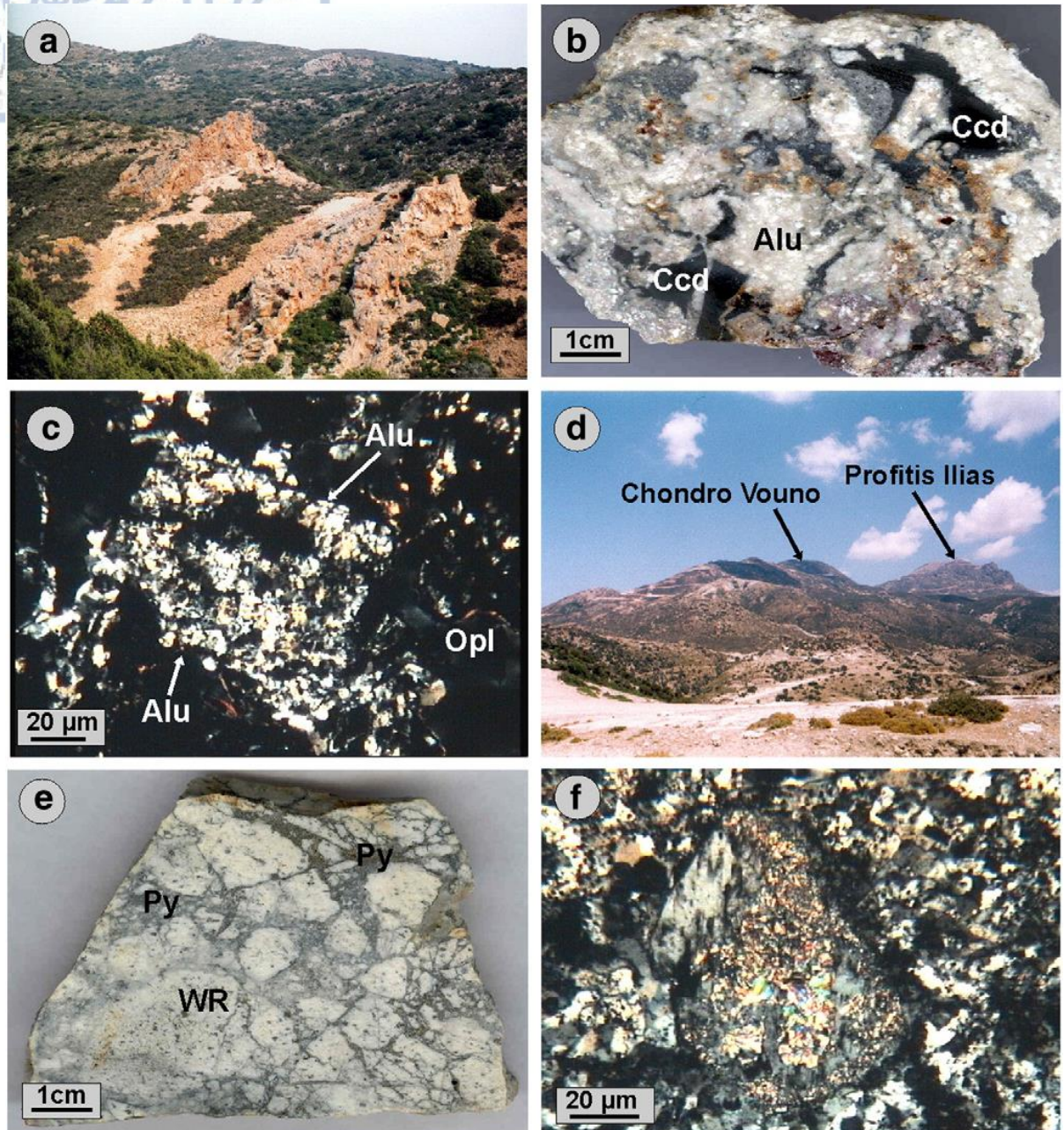
Κοίτασμα στις Τριάδες – Γαλανά με εμφάνιση Pb – Zn – Cu – Ag – Au και το οποίο αποτελεί πηγή 1.2 Mt εκ των οποίων 1 g/t Au και 124 ppm Ag. Σχετίζονται με ενεργά γεωθερμικά συστήματα που χαρακτηρίζονται από μίξη θαλασσινού νερού, μετεωρικού και μαγματικού (Naden et. al, 2005, Alfieris et. al, 2013, Papavassiliou et. al, 2017).

Κοίτασμα Ag στη Βάνη, είναι ένα υψηλού βαθμού IS επιθερμικό κοίτασμα, που τοποθετείται ανάμεσα στα ρήγματα με κλίσεις ΒΔ και ΒΑ και η μεταλλοφορία περιλαμβάνει αυτοφυή Ag, αργεντινίτη/ακανθίτη, αλογονίδια Ag και αργυρούχο κοβελλίνη μαζί με γαληνίτη και σφαλερίτη.

Στην εικόνα 10 βλέπουμε μικροσκοπικές και μακροσκοπικές εμφανίσεις των τύπων υδροθερμικής εξαλλοίωσης στη Δυτική Μήλο.



Εικόνα 9. Φλέβες χαλαζία – χαλκηδόνιου – βαρύτη κατά μήκος της κορυφής χονδρό βουνό σε ΒΒΔ – ΝΝΑ κατεύθυνση.



Εικόνα 10. Μικροσκοπικές και μακροσκοπικές εμφανίσεις των τύπων υδροθερμικής εξαλλοίωσης στη Δυτική Μήλο (Alfieris 2013)

Ροδόπη

Η περιοχή της Ροδόπης περιλαμβάνει κυρίως HS ή/και IS, όπως το Λόφο Περάματος, Μαυροκορυφή, Σάμπες-Κασσίτερες, Παγώνη Ράχη, Αγ. Φίλιππο, Πεύκα, με χαλκό και εμπλουτισμό είτε σε χρυσό, είτε σε άργυρο (Voudouris, 2006, Moritz et. al, 2010).



Το υψηλής θείωσης επιθερμικό κοίτασμα της Μαυροκορυφής Cu-Ag-Au-Te περιέχεται μέσα σε ανδεσιτικούς δόμους λάβας και υαλοκλαστίτες. Περιέχει έως 1.5 g/t Au και έως 162 ppm Ag και σχηματίζεται κάτω από πολύ οξειδωτικές συνθήκες στους 200-250°C.

Σάπες – Κασσιτερές

Η περιοχή περιλαμβάνει πάνω από 20 μεταλλεύματα HS/IS/LS που φιλοξενούνται από ηφαιστειακά πετρώματα Ολιγοκαίνου. Οι πιο σημαντικές είναι οι Οχιά, Άγιος Δημήτριος, Scarp, Καμένο, Γαλαξίας, Αγία Βαρβάρα. Το συνολικό απόθεμα είναι 0.83 Moz τα οποία περιέχουν 9.8 g/t Au.

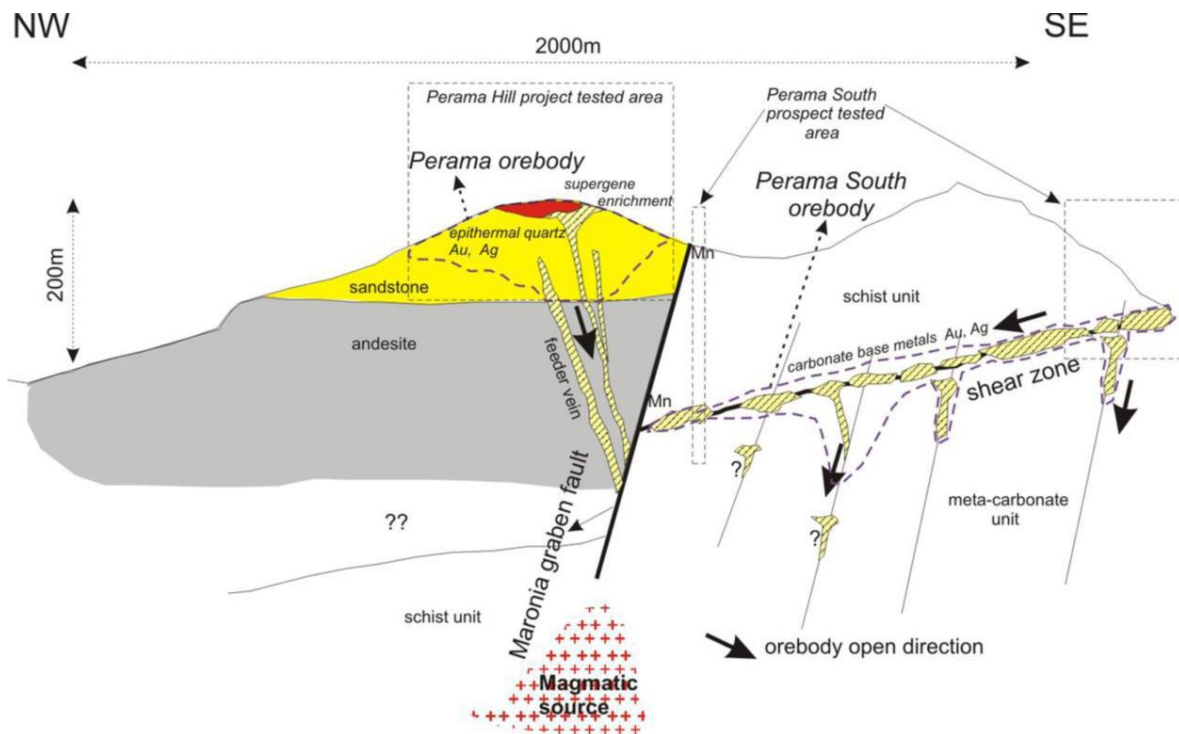
Η Οχιά περιέχει υψηλού βαθμού Au σουλφίδια, εμπλουτισμένα με πυρίτη, χαλκοπυρίτη, γαληνίτη, εναργίτη, τετραεδρίτη, τενναντίτη, τελλουρίδια Au, Ag, και χρυσό σε βάθος 200 – 250μ. Η κρυστάλλωση εμφανίζεται αρχικά σε ένα στάδιο μαζικής και υπολειπόμενης πυριτίωσης, με αλουνίτη και σιδηροπυρίτη, όπως και σε κολλώδεις ταινιωτές φλέβες χαλκηδόνιου-χαλαζία (εικόνα 12).

Ο Άγιος Δημήτριος περιέχει χαμηλότερη περιεκτικότητα σε χρυσό η οποία σχετίζεται με οξειδωμένη μεταλλοφορία. Τα κοιτάσματα του Αγ. Δημητρίου φιλοξενούνται σε γρανοδιοριτικό πορφύρη και ηφαιστειακά πετρώματα. Η μεταλλοφορία περιλαμβάνει γαλακτώδεις λατυποποιημένες και ταινιωτές χαλαζιακές φλέβες, μαζί με προχωρημένη αργιλική και πυριτική εξαλλοίωση (Border, A., Constantinides, D., Michael, 1999).

Λόφος Περάματος

Στο Λόφο Περάματος, τα επιθερμικά κοιτάσματα HS/IS, Au-Ag-Te-Se (Voudouris et. al. 2011) βρίσκονται σε μήκος της ανατολικής πλαγιάς του τεκτονικού βυθίσματος (εικόνα 11). Η ποσότητα χρυσού είναι περίπου 1.382.000 oz Au, με 3.46 g/t μέση περιεκτικότητα στο μετάλλευμα. Το μετάλλευμα βρίσκεται σε πυριτικά και αργιλικά εξαλλοιωμένα ανδεσιτικά πετρώματα και εμφανίζεται να καλύπτει συσσωματώματα και ψαμμίτες. Το κοίτασμα προέρχεται από ένα αρχικό στάδιο πυριτίου – σιδηροπυρίτη και αργιλικής εξαλλοίωσης και ακολουθεί η απόθεση σουλφιδίων, θειικών αλάτων, φλεβών

και πλεγμάτων φλεβών που φέρουν τελλουρίδια – χαλαζία – βαρύτη. Χαρακτηρίζεται από HS τύπου εναργίτη παραγένεση, ακολουθούμενη από σχηματισμό IS τύπου παραγένεση με γαληνίτη – τενναντίτη, τελλουρίδια Au – Ag και ήλεκτρο.



Εικόνα 11. Γεωλογική τομή περιοχής λόφου Περάματος.



Εικόνα 12. Δείγμα από την περιοχή Οχιάς. Διοξειδίο του πυριτίου με χαλκηδόνιο χαλαζία και αλουνίτη με σιδηροπυρίτη (Melfos and Voudouris 2017).



Εικόνα 13. Λεπιωειδής υφή χαλαζία, λόγω αντικατάστασης από ασβεστίτη, Σάπες (Μέλφος-Επιθερμικά συστήματα).

Βιβλιογραφία

- Κίλιας Σ. (2006). Έρευνα εντοπισμού για επιθερμικά κοιτάσματα Au (Cu,Ag).
- Μέλφος Β., Επιθερμικά κοιτάσματα ευγενών και βασικών μετάλλων - [PDF Document]
- Alfieris, D., Voudouris, P., & Spry, P. G. (2013). Shallow submarine epithermal Pb-Zn-Cu-Au-Ag-Te mineralization on western Milos Island, Aegean Volcanic Arc, Greece: Mineralogical, geological and geochemical constraints. *Ore Geology Reviews*, 53, 159–180. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2013.01.007>
- Border, A., Constantinides, D., Michael, C. (1999). *Discovery and evaluation of the Sappes gold deposit, northeastern Greece*, in: Currie, D., Nielsen, K.No Title.
- Chang, Z., Hedenquist, J. W., White, N. C., Cooke, D. R., Roach, M., Deyell, C. L., Garcia, J., Gemmell, J. B., McKnight, S., & Cuisson, A. L. (2011). Exploration tools for linked porphyry and epithermal deposits: Example from the mankayan intrusion-centered Cu-Au district, Luzon, Philippines. *Economic Geology*, 106(8), 1365–1398. <https://doi.org/10.2113/econgeo.106.8.1365>
- Hedenquist, J.W., Izawa, E., Arribas Jr, A., & White, N. C. (1995). Epithermal gold deposits: Styles, Characteristics, and Exploration: Resource Geology Special Publication. *SEG Newsletter*, 23, 9–13.
- Hedenquist, Jeffrey W. (2000). Exploration for Epithermal Gold Deposits Chapter 7 Exploration for Epithermal Gold Deposits. *Reviews in Economic Geology*, 13(1), 245–277.
- Hitchman, S. P. and Espi, J. O. (1997). *Zonation, mineralization, paragenesis and rock types of Nena high sulfidation copper-gold deposit, Papua New Guinea*.
- Melfos, V., & Voudouris, P. (2017). Cenozoic metallogeny of Greece and potential for precious, critical and rare metals exploration. *Ore Geology Reviews*, 89, 1030–1057. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2017.05.029>
- Sillitoe, R. H. (2015). Epithermal paleosurfaces. *Mineralium Deposita*, 50(7), 767–793. <https://doi.org/10.1007/s00126-015-0614-z>
- White, N. C., and Hedenquist, J. W. (1990). Epithermal environments and styles of mineralization: variations and their causes, and guidelines for exploration. *Journal of Geochemical Exploration*, 36(1-3), 445-474.