



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



ΤΣΟΝΙΔΟΥ Α. ΕΥΡΥΚΛΕΙΑ

ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΑ ΕΠΙΘΕΡΜΙΚΟΥ ΤΥΠΟΥ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ



ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ
2020





ΤΣΟΝΙΔΟΥ Α. ΕΥΡΥΚΛΕΙΑ

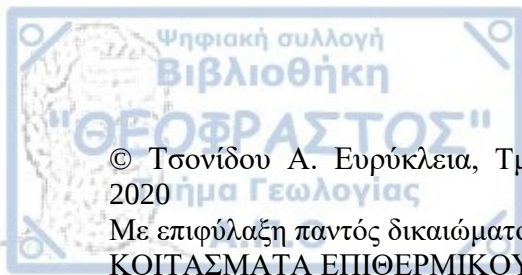
ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΑ ΕΠΙΘΕΡΜΙΚΟΥ ΤΥΠΟΥ

Υποβλήθηκε στο Τμήμα Γεωλογίας
Τομέας Ορυκτολογίας - Πετρολογίας - Κοιτασματολογίας

Επιβλέπων Καθηγητής

Μέλφος Βασίλειος, Αναπληρωτής Καθηγητής

© Τσονίδου Α. Ευρύκλεια, 2020
Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All right reserved.



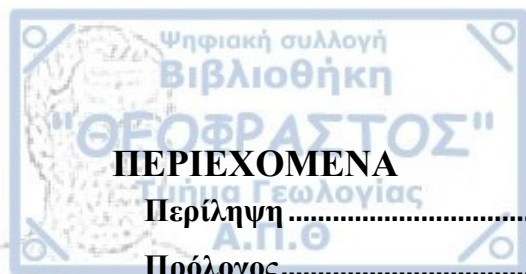
© Τσονίδου Α. Ευρύκλεια, Τμήμα Γεωλογίας Α.Π.Θ., Τομέας Ορυκτολογίας-Πετρολογίας, 2020
Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος.
ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΑ ΕΠΙΘΕΡΜΙΚΟΥ ΤΥΠΟΥ – *Διπλωματική Εργασία*

© Tsonidou A. Evrykleia, School of Geology A.U.Th., Dept. of Mineralogy and Petrology, 2020
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.

Εικόνα Εξωφύλλου: Χρυσός από το Hishikari, Japan (Gwinnett 2019)



ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Περύληψη	1
Πρόλογος	3
1. Εισαγωγή	4
2. Γεωτεκτονικά περιβάλλοντα σχηματισμού Επιθερμικών κοιτασμάτων	5
3. Ταξινόμηση και χαρακτηριστικά γνωρίσματα	8
3.1. Υψηλής θείωσης επιθερμικά κοιτάσματα (HS)	9
3.2. Χαμηλής θείωσης επιθερμικά κοιτάσματα (LS)	9
3.3. Ενδιάμεσης θείωσης επιθερμικά κοιτάσματα (IS)	11
4. Υδροθερμικές εξαλλοιώσεις	13
5. Παγκόσμια Παραδείγματα	18
6. Ελληνικά παραδείγματα	29
7. Βιβλιογραφία	37



Περίληψη

Τίτλος: Κοιτάσματα Επιθερμικού τύπου

Όνομα: Τσονίδου Ευρύκλεια

Η παρακάτω εργασία αποτελεί μια σύνοψη όλων των γνωρισμάτων που χαρακτηρίζουν ένα κοιτάσμα επιθερμικού τύπου. Η εμφάνισή τους λαμβάνει χώρα σε ένα γεωτεκτονικό περιβάλλον υποβύθισης μίας ωκεάνιας τεκτονικής πλάκας κάτω από μια άλλη ηπειρωτική, και την ταυτόχρονη άνοδο μάγματος και μεταφορά ρευστών, ώστε τέλος να προκύψουν αυτού του είδους τα κοιτάσματα. Επιπλέον, αναφέρονται όλα τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά τους, όπως ορυκτά της μεταλλοφορίας, μορφή των μεταλλοφόρων σωμάτων, πηγή προέλευσης των ρευστών, μητρικό πέτρωμα ξενιστής κ.ά., στοιχεία τα οποία είναι και αυτά που οδηγούν στην κατηγοριοποίηση των επιθερμικών κοιτασμάτων σε τρεις μεγάλες ομάδες. Στη συνέχεια, γίνεται λόγος για τις υδροθερμικές εξαλλοιώσεις που είτε προϋπάρχουν στα ορυκτά του πετρώματος ξενιστές, είτε αναπτύσσονται κατά τη δημιουργία της μεταλλοφορίας. Τέλος, παρατίθενται μερικά παραδείγματα τόσο παγκόσμιων όσο και Ελληνικών εμφανίσεων των κοιτασμάτων επιθερμικού τύπου.



The following diploma thesis is a summary of all the features that characterize an epithermal type deposit. They 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. All these lead to the formation of epithermal deposits. 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 separate them from other types of deposits and also to discriminate the epithermal deposits in subtypes based on the sulfidation state. Subsequently, the different types of hydrothermal alteration are mentioned, 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 worldwide and Greek epithermal type deposits, are briefly described.



Η παρούσα πτυχιακή εργασία αναφέρεται στα επιθερμικά κοιτάσματα, τα οποία έχουν ιδιαίτερη οικονομική σημασία όχι μόνο για όλο τον κόσμο, αλλά και για την Ελλάδα, αφού και υπάρχουν εμφανίσεις με σημαντική ποσότητα αποθεμάτων για μελλοντική εκμετάλλευση.

Επιπλέον, η ενασχόληση με τις εμφανίσεις κοιτασμάτων και συγκεκριμένα επιθερμικού τύπου είναι ένα θέμα πολύ ενδιαφέρον, αφού η προέλευσή τους σχετίζεται και με ηφαιστειακά πετρώματα.

Σε αυτή την εργασία θα κάνουμε μία γενική αναφορά στα κοιτάσματα επιθερμικού τύπου, με σκοπό την συγκέντρωση όλων των στοιχείων που τα χαρακτηρίζουν και παραδείγματα εμφάνισής τους, σε μία έρευνα.

Τέλος, θα ήθελα να τονίσω, πως η συνεργασία μου με τον επιβλέποντα Καθηγητή του Τομέα Ορυκτολογίας – Πετρολογίας – Κοιτασματολογίας, κ. Βασίλη Μέλφο, ήταν ένας βασικός παράγοντας για την επιλογή του θέματος αυτού.

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

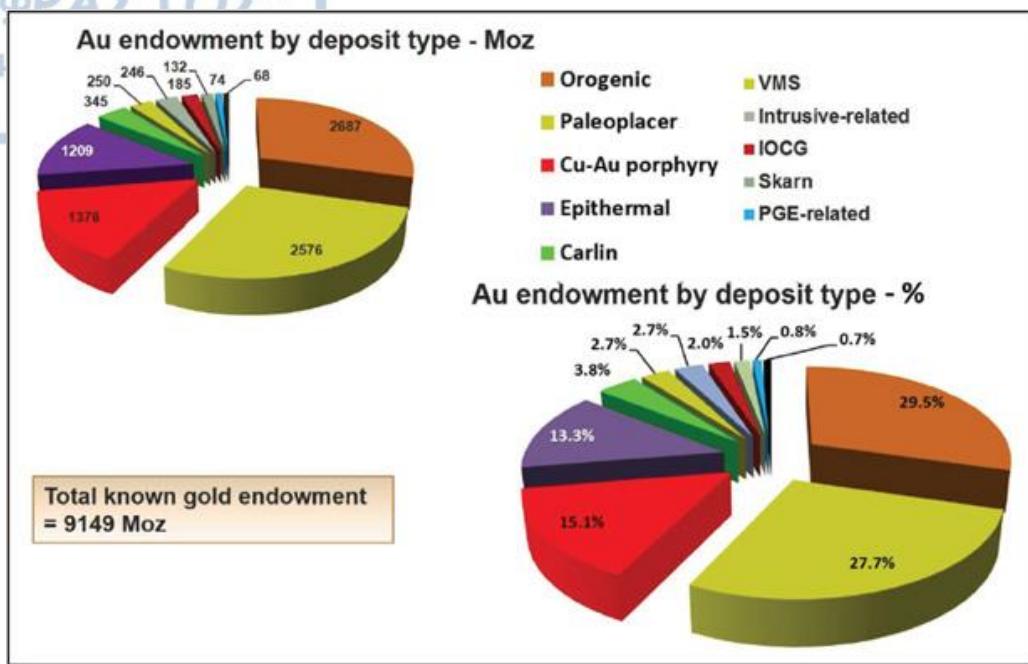
1. Εισαγωγή

Ο όρος «επιθερμικά» κοιτάσματα, προέρχεται από τη σύνθετη λέξη «επί+θέρμες» που σημαίνει πάνω σε θερμές πηγές. Αναφερόμαστε λοιπόν 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.

Το γεωτεκτονικό περιβάλλον όπου εμφανίζονται αυτού του είδους τα κοιτάσματα είναι συνήθως ορογενετικές ζώνες, ηπειρωτικά περιθώρια ή νησιωτικά τόξα. Σε αυτές τις συνθήκες λαμβάνει χώρα η υποβύθιση μίας λιθοσφαιρικής πλάκας, είτε ηπειρωτική είτε ωκεάνια, και μαγματισμός έχει ασβεσταλκαλικό χαρακτήρα. Ανάλογα τώρα τις συνθήκες σχηματισμού, καθώς και τα επιμέρους ορυκτολογικά χαρακτηριστικά, χωρίζονται και σε δύο μεγάλες κατηγορίες. Τα υψηλής θείωσης επιθερμικά κοιτάσματα και τα χαμηλής θείωσης, όπου ανήκουν και τα ενδιάμεσης θείωσης αφού και δεν είναι απολύτως ξεκάθαρες οι διαφορές τους αφού σχηματίζονται σε μία μεταβατική ζώνη των ανωτέρω.

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.

Είναι σημαντικό επίσης να αναφερθεί η μεγάλη οικονομική τους σημασία αφού και αποτελούν πηγή προέλευσης μεγάλης ποσότητας χρυσού και άλλων οικονομικών στοιχείων (Εικόνα 1., διαγράμματα κατά Lipson, 2014, συνολικής ποσότητας εμπλουτισμού Au σε παγκόσμια κλίμακα).

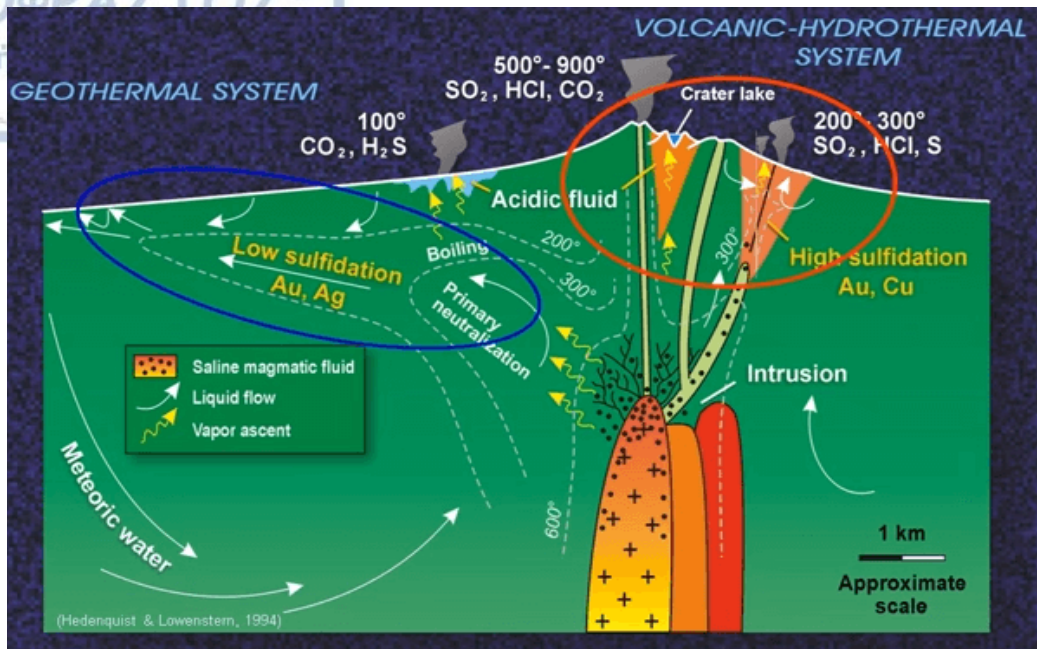


Εικόνα 1. Συνολικός εμπλουτισμός σε Au σε Moz και %, σε παγκόσμια εμφάνιση (διάγραμμα του Lipson, 2014)

2. Γεωτεκτονικά περιβάλλοντα σχηματισμού επιθερμικών κοιτασμάτων

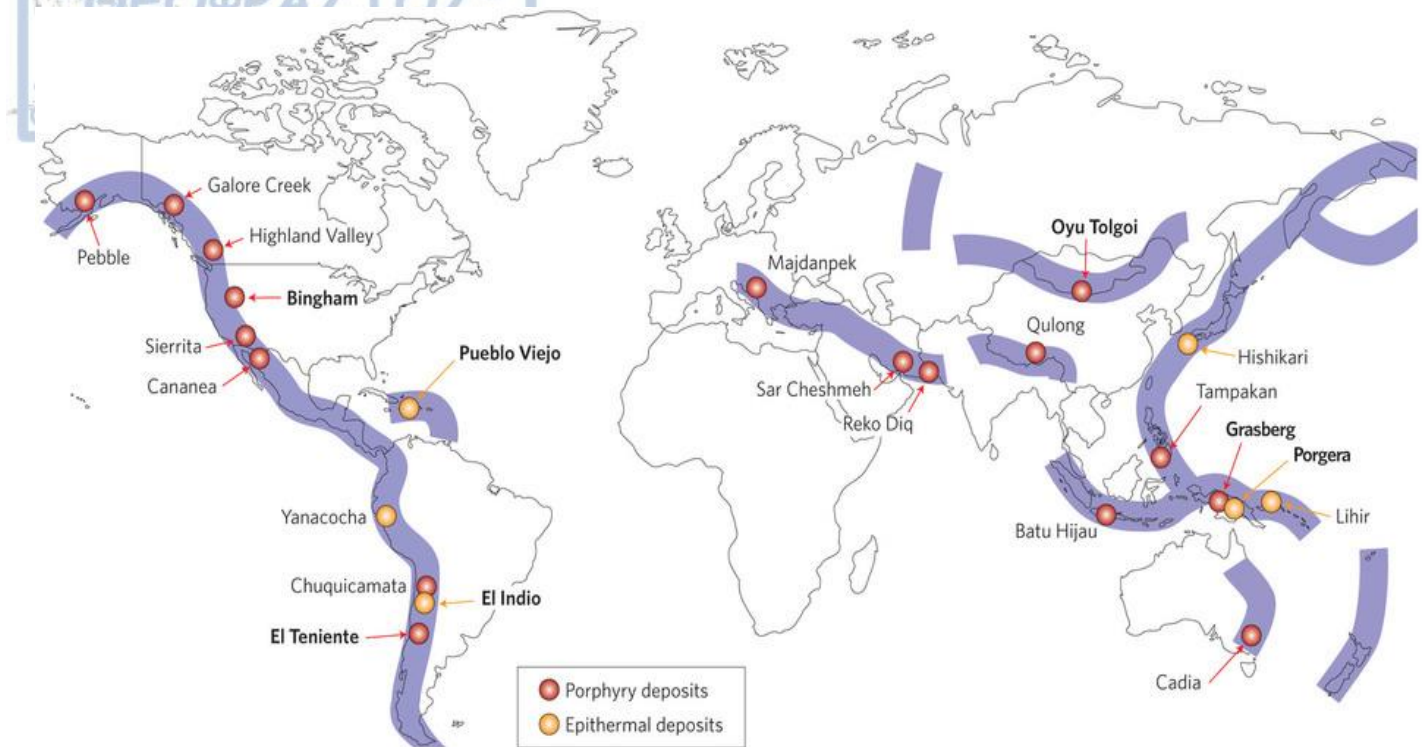
Τα επιθερμικά κοιτάσματα εμφανίζονται σε ορογενετικές ζώνες εντός των ηπειρωτικών περιθωρίων ή νησιωτικών τόξων. Ο μαγματισμός που λαμβάνει χώρα κατά την δημιουργία αυτών, είναι ασβεσταλκαλικός και αυτό μας δείχνει πως ταυτόχρονα συμβαίνει μία υποβύθιση μιας λιθοσφαιρικής πλάκας.

Η ηφαιστειότητα στα καταστροφικά περιθώρια της πλάκας, αποτελείται από δύο τύπους, ανάλογα το είδος της λιθοσφαιρικής πλάκας που καταβυθίζεται. Εάν συγκρούονται δύο ωκεάνιες λιθοσφαιρικές πλάκες, η ηφαιστειότητα θα είναι bi-modal με πετρώματα ανδεσιτικής σύστασης (είτε ανδεσίτες, είτε τα ισοδύναμα πλουτωνικά τους). Όταν όμως, μία ωκεάνια πλάκα βυθίζεται κάτω από μία ηπειρωτική, τότε λαμβάνει χώρα μια έντονα bi-modal κατανομή ηφαιστειακών πετρωμάτων, με ανδεσίτες που συχνά συνυπάρχουν ταυτόχρονα με συμπαγείς ρυολιθικές μάζες. Στην Εικόνα 2, φαίνεται αναλυτικά το περιβάλλον σχηματισμού των επιθερμικών κοιτασμάτων, καθώς και ο διαχωρισμός τους ανάλογα το ποσοστό και τον βαθμό αλληλεπίδρασης μεταξύ μαγματικού ρευστού, υπόγειου νερού και πετρωμάτων-ξενιστών (κατά Hedenquist and Lowerstern, 1994).



Εικόνα 2. Γεωτεκτονικό περιβάλλον σχηματισμού επιθερμικών κοιτασμάτων (Hedenquist and Lowenstern, 1994)

Σε παγκόσμιο επίπεδο παρατηρείται η εμφάνιση των κοιτασμάτων αυτών σε όλο το μήκος της Δυτικής Ακτής της Βόρειας και Νότιας Αμερικής. Επιπλέον, στην άλλη άκρη του Ειρηνικού ωκεανού από πολύ βόρεια (π.χ. Ιαπωνία, Ινδονησία, Νέα Γουινέα κ.ά.) έως και νότια στη Νέα Ζηλανδία παρατηρούνται κοιτάσματα επιθερμικού τύπου (Εικόνα 3).



Εικόνα 3. Παγκόσμια εμφάνιση επιθερμικών και πορφυριτικών κοιτασμάτων (Richards, 2013)

παραγένεση, τις υδροθερμικές εξαλλοιώσεις και τις συνθήκες σχηματισμού (Hedenquist, 2002). Έτσι παρατηρούμε τις παρακάτω τρεις κατηγορίες:

1. Υψηλής θείωσης (High Sulfidation)
2. Χαμηλής θείωσης (Low Sulfidation)
3. Ενδιάμεσης θείωσης (Intermediate Sulfidation)

3.1. Υψηλής θείωσης επιθερμικά κοιτάσματα (HS)

Τα κοιτάσματα αυτού του τύπου σχετίζονται με ανδεσιτικά ηφαιστεια, τα οποία εκδηλώνουν στην επιφάνειά τους φουμαρόλες υψηλής θερμοκρασίας καθώς και με όξινα θειϊκά άλατα και χλωρίδια θερμών πηγών και κρατήρων λιμνών. Τα πετρώματα στα οποία μέσα εμφανίζονται, είναι ενδιάμεσης σύστασης ηφαιστειακά πετρώματα. Γενικά, βρίσκονται κοντά σε κάποια μαγματική πηγή όπου υπάρχουν και οξειδωτικά υδροθερμικά διαλύματα με $pH < 2$ (όξινα). Τα ρευστά θα βρουν χώρους όπως διαρρήξεις / ρήγματα για να ανέβουν στην επιφάνεια και να αποθέσουν τα υλικά τους. Η μορφή της μεταλλοφορίας είναι διάσπαρτη, σε φλέβες ή φλεβίδια ή πλέγματα φλεβών όπως και αντικατάστασης. Καθώς λοιπόν τα ρευστά ανεβαίνουν και φτάνουν σε θερμοκρασίες περί τους $200^{\circ}-300^{\circ} C$ αποθέτουν τα θειούχα ορυκτά τους στα περιβάλλοντα πετρώματα ασβεσταλκαλικής σύστασης και εξαλλοιώνουν τα υπάρχοντα. Συγκεκριμένα παρατηρούνται σιδηροπυρίτης (py), χαλκοπυρίτης (cpy), τενναντίτης (ten), εναργίτης (en), λουζονίτης (luz), φαματινίτης (fam), κοβελλίνης (cov), τελλουρίδια και χρυσός. Τα πιο σημαντικά αυτής της κατηγορίας είναι ο εναργίτης και ο σιδηροπυρίτης (και ο χαμηλής θερμοκρασίας δίμορφος λουζονίτης). Τα σύνδρομα ορυκτά εκ των οποίων κυρίαρχος είναι ο λεπτόκοκκος χαλαζίας, είναι επίσης ο βαρύτης, καολίνη, αλουνίτης, πυροφυλλίτης κ.ά.. Τα πιο σημαντικά μεταλλικά στοιχεία που περιλαμβάνουν τα HS επιθερμικά κοιτάσματα είναι ο χαλκός (Cu), χρυσός (Au), άργυρος (Ag), αρσενικό (As) και επίσης μόλυβδος (Pb), υδράργυρος (Hg), αντιμόνιο (Sb), τελλούριο (Te), κασσίτερος (Sn), μολυβδαίνιο (Mo) και βισμούθιο (Bi).

3.2. Χαμηλής θείωσης επιθερμικά κοιτάσματα (LS)

Τα χαμηλής θείωσης κοιτάσματα σχηματίζονται από ουδέτερου pH, περιορισμένων υδροθερμικών υγρών (πλούσια σε H_2S), που εμφανίζουν στην κορυφή πυριτικών αποθέσεων θερμές πηγές και μια εξαλλοίωση όξινων θεικών αλάτων από υδρατμούς. Είναι αυτά που έχουν κάποια απόσταση από μαγματικές πηγές. Το περιβάλλον σχηματισμού είναι ουδέτερο και επικρατούν αναγωγικές συνθήκες. Το υδροθερμικό υγρό των χαμηλής θείωσης επιθερμικών κοιτασμάτων είναι κυρίως μετεωρικής προέλευσης, όμως σε κάποια συστήματα

παρατηρούνται μαγματικά ενεργά αέρια (Hedenquist and Lowerstern, 1994). Η διαδικασία σχηματισμού είναι η εξής : το αναγωγικό ρευστό με ουδέτερο pH βρίσκεται σε βάθος 1-2 km και μάλιστα σε ισορροπία με το γειτονικό πέτρωμα σε μεγαλύτερα βάθη. Καθώς το ρευστό που βρίσκεται σε κατάσταση βαρσμού ανεβαίνει και διέρχεται περατές ζώνες, αποθέτει μετάλλευμα και σύνδρομα ορυκτά. Τα βασικά μεταλλικά ορυκτά που εμφανίζονται εδώ είναι ο σιδηροπυρίτης (py), χαλκοπυρίτης (cpry), γαληνίτης (ga), τετραεδρίτης (tet), αρσеноπυρίτης (apy), χρυσός (au), σφαλερίτης (sph, Fe-πλούσιος) ενώ οι μορφές μεταλλοφορίας είναι κυρίως φλέβες πληρώσεις κενών χώρων, λατυποπαγή (breccia), ταινιωτής υφής (banded). Όσον αφορά τα σύνδρομα ορυκτά που παρατηρούνται είναι ο χαλαζίας (Qtz), (ως υπολειμματικός-vuggy silica), χαλκηδόνιος, ασβεστίτης (Cc), ιλλίτης (ill), αδουλάριος, ανθρακικά κ.ά.. Τέλος, όπως και στα HS έτσι και εδώ υπάρχουν και τα μεταλλικά στοιχεία που έχουν μεγάλη σημασία και είναι ο Au, Ag, Zn, Pb, όπως και ο Cu, Sb, As, Hg, Se.

Στον Πίνακα 1 εμφανίζονται συγκεντρωμένα τα χαρακτηριστικά ορυκτά που σχηματίζονται με την μεταλλοφορία στις δύο ξεχωριστές κατηγορίες LS και HS επιθερμικών κοιτασμάτων (White and Hedenquist, 1995). Τα συμπεράσματα που βγάζουμε με μία πρώτη ματιά σε μερικά από τα χαρακτηριστικά αυτά ορυκτά είναι πως, όπως έχει ήδη αναφερθεί παραπάνω ο εναργίτης-λουζονίτης είναι τυπικό χαρακτηριστικό ορυκτό των επιθερμικών κοιτασμάτων υψηλής θεώσης, ενώ ο αρσеноπυρίτης είναι αυτός που σπανίζει στα χαμηλής θεώσης. Αμέσως μετά στον Πίνακα 2 αναφέρονται τα σύνδρομα ορυκτά που χαρακτηρίζουν κάθε κατηγορία (White and Hedenquist, 1995). Παρατηρούμε έναν άτυπο διαχωρισμό, με την πρώτη κατηγορία (LS) να εμφανίζει σημαντικές ποσότητες χαλκηδονίου, ασβεστίτη, αδουλάριου και ιλλίτη, έναντι της κατηγορίας των HS επιθερμικών κοιτασμάτων, στην οποία τα πιο κοινά σύνδρομα ορυκτά είναι ο καολίνης, ο πυροφυλλίτης, ο αλουνίτης και ο βαρύτης.

Πίνακας 1. Εμφανίσεις ορυκτών μετάλλων στα κοιτάσματα (White and Hedenquist, 1995)

	Low Sulfidation	High Sulfidation
Σιδηροπυρίτης	Ευρύς (άφθονος)	Ευρύς (άφθονος)
Σφαλερίτης	Κοινός (μεταβλητός)	Κοινός (πολύ ελάχιστος)
Γαληνίτης	Κοινός (μεταβλητός)	Κοινός (πολύ ελάχιστος)
Χαλκοπυρίτης	Κοινός (πολύ ελάχιστος)	Κοινός (ελάχιστος)
Εναργίτης-Λουζονίτης	Σπάνιος (πολύ ελάχιστος)	Ευρύς (μεταβλητός)
Αρσеноπυρίτης	Κοινός (ελάχιστος)	Σπάνιος (πολύ ελάχιστος)
Κοβελλίνης	Ασυνήθης (πολύ ελάχιστος)	Κοινός (ελάχιστος)

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

	Low Sulfidation	High Sulfidation
Χαλαζίας	Ευρύς (άφθονος)	Ευρύς (άφθονος)
Ασβεστίτης	Κοινός (μεταβλητός)	Απών (εκτός ιχνών)
Χαλκηδόνιος	Κοινός (μεταβλητός)	Ασυνήθης (ελάχιστος)
Αδουλάριος	Κοινός (μεταβλητός)	Απών
Ιλλίτης	Κοινός (άφθονος)	Ασυνήθης (ελάχιστος)
Καολινίτης	Σπάνιος (εκτός ιχνών)	Κοινός (ελάχιστος)
Πυροφυλλίτης-Διάσπορο	Απών (εκτός ιχνών)	Κοινός (μεταβλητός)
Αλουνίτης	Απών (εκτός ιχνών)	Κοινός (ελάχιστος)
Βαρύτης	Κοινός (πολύ ελάχιστος)	Κοινός (ελάχιστος)

3.3. Ενδιάμεσης θείωσης επιθερμικά κοιτάσματα (IS)

Για αυτού του είδους τα κοιτάσματα δεν υπάρχουν πολλές και ξεκάθαρες πληροφορίες, όπως συμβαίνει με τις δύο προηγούμενες κατηγορίες. Ο σχηματισμός τους γίνεται σε ένα μεταβατικό στάδιο μεταξύ των HS και LS, με ένα βαθμό διάλυσης από τα υπόγεια ύδατα, όχι όμως με την ίδια έκταση όπως στα LS. Γενικά, σχηματίζουν φλέβες και breccia, με μια τραχιά υφή και ταινιωτή μορφή. Παρόλα αυτά, περιέχουν αλουνίτη όπως τα HS. Επιπλέον, στα μεταλλικά τους στοιχεία εκτός από Au, παρατηρείται και σημαντική ποσότητα Ag, Zn (σε γαληνίτη), Pb (σε σφαλερίτη) σε βάθος. Η απόθεση χρυσού και αργύρου ελέγχεται από το βρασμό και η απόθεση των βασικών μετάλλων από τη μίξη

ρευστών και ψύξη, αφού και αυτά δημιουργούν συμπλέγματα με χλωρίδια και ταξιιδεύουν. 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.

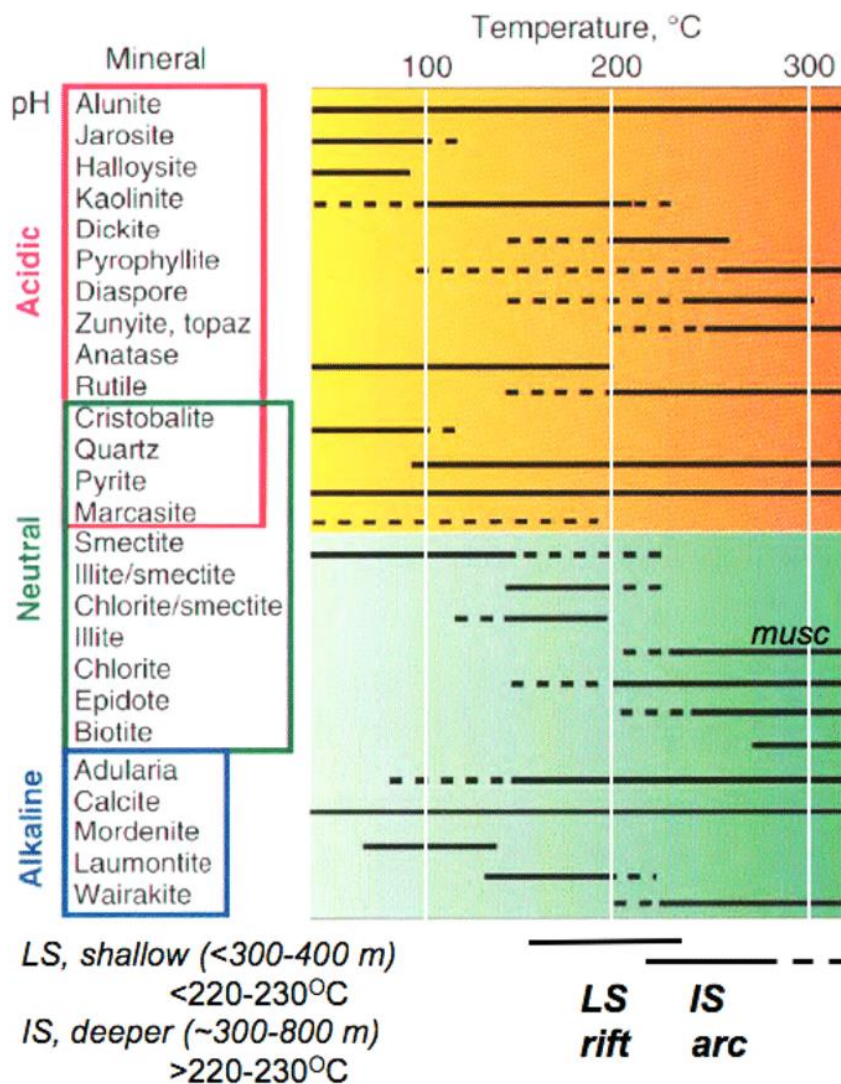
Ο παρακάτω Πίνακας 3, συνοψίζει τις χαρακτηριστικές υφές για τα υψηλής θείωσης (ενδιάμεσου pH και μετεωρικής προέλευσης νερό) και χαμηλής θείωσης (όξινο pH και μαγματικής προέλευσης νερό) επιθερμικά κοιτάσματα κατά White and Hedenquist (1995).

Πίνακας 3. Χαρακτηριστικές υφές LS και HS επιθερμικών κοιτασμάτων (White and Hedenquist, 1995)

Low Sulfidation	High Sulfidation
Ταινιωτές φλέβες (banded veins)	«υπολλειπόμενος χαλαζίας» (vuggy quartz)
Λατυποποιημένες φλέβες (breccia veins)	Μαζώδης χαλαζίας (massive quartz)
Υφή με κοιλότητες (drusy cavities)	Μαζώδεις θειϊκές φλέβες (massive sulfide veins)
Υφή μορφής κρούστας (crustification)	Γωνιώδεις ταινιωτές φλέβες (crudely banded veins)
Υφή μορφής πλέγματος (lattice texture)	

4. Υδροθερμικές εξαλλιώσεις

Η ορυκτολογία και η ζώνωση των παραγενέσεων των υδροθερμικών εξαλλιώσεων είναι ένα βασικό χαρακτηριστικό που μας βοηθάει να ξεχωρίσουμε τον τύπο του επιθερμικού κοιτάσματος. Πολλά ορυκτά των εξαλλιώσεων είναι σταθερά σε συγκεκριμένες θερμοκρασίες (Εικόνα 5) ή/και pH και γι αυτό μας παρέχουν πληροφορίες ώστε να ανασυνθέσουμε τη θερμική και γεωχημική δομή των υδροθερμικών συστημάτων.



Εικόνα 5. Ποικιλία στη σταθερότητα των ορυκτών με τη θερμοκρασία σε κατάσταση διαλυτότητας χαλαζία (οι διακεκομμένες γραμμές αναφέρονται για συνθήκες διαλυτότητας άμορφου πυριτίου). Τροποποιημένο από Hedenquist et al., 2000

Για την αναφορά στις υδροθερμικές εξαλλιώσεις θα χρειαστεί να ληφθεί εξ αρχής υπόψη ο διαχωρισμός σε HS και LS επιθερμικά κοιτάσματα, αφού και αυτές οι κατηγορίες εμφανίζουν διαφορετικές εξαλλιώσεις.

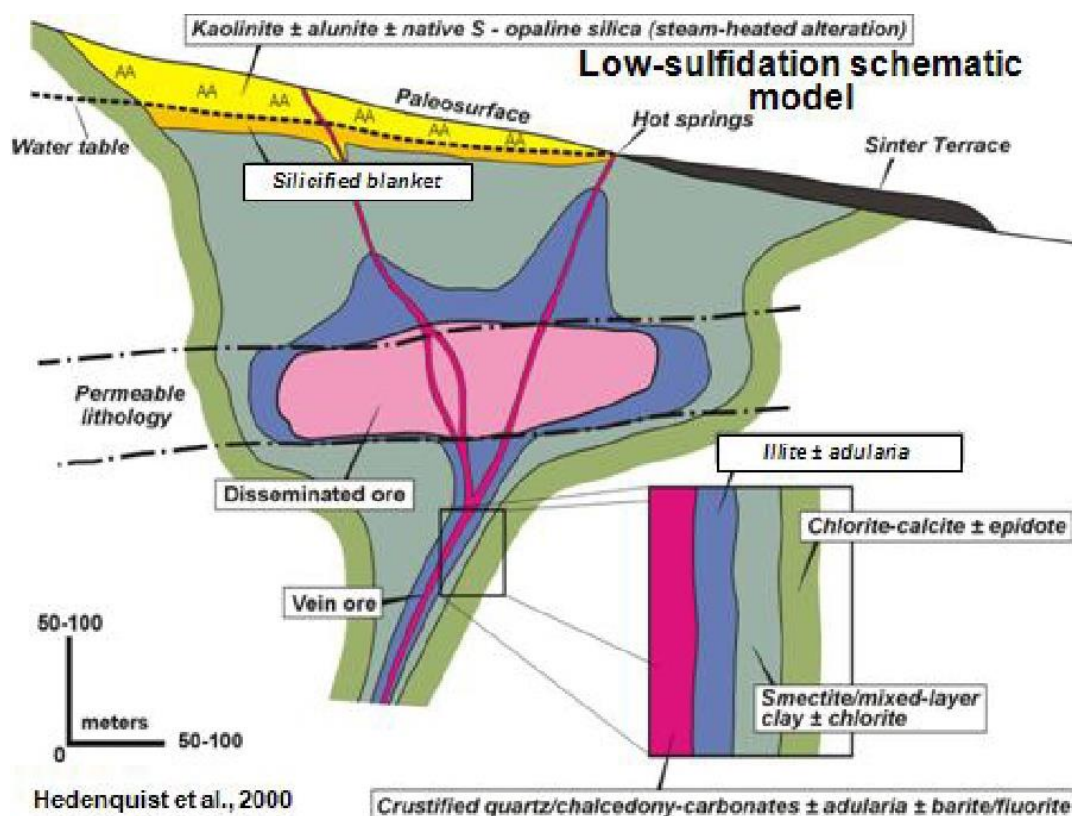
Τα LS κοιτάσματα επηρεάζονται από ουδέτερου σχετικά pH θερμικά νερά, με την αύξηση της θερμοκρασίας και τη μείωση του βάθους καθώς όμως απομακρύνονται και από τον αγωγό της ροής των ρευστών. Στις εξαλλοιώσεις κυριαρχούν τα ορυκτά της αργίλου. Η ζώνωση από το κέντρο προς την περιφέρεια είναι η εξής :

1. Πυριτίωση κατά μήκος των διαρρήξεων που ακολουθούν τα υδροθερμικά διαλύματα. Περιλαμβάνει χαλαζία, χαλκηδόνιο, σιδηροπυρίτη κ.ά. και έχει συμπαγή μορφή και ταινιωτή σε φλέβες

2. Σερικιτική με σχηματισμό υδροθερμικού καλιούχου αστρίου (αδουλάριος). Εξαλλοιώνει τα τοιχώματα των γύρω από τις φλέβες πετρωμάτων και ζώνες αντικατάστασης σε περατά πετρώματα.

3. Προπυλιτική. Σχηματίζει ασβεστίτη, επίδοτο, χλωρίτη, ιλλίτη κ.ά.. Είναι εκτεταμένη περιοχικά και η ορυκτολογικές αλλαγές από πλούσιες σε ζεολίθους σε προπυλιτικές παραγενέσεις υποδεικνύουν αύξηση του βάθους και της θερμοκρασίας. Τέλος η συγκέντρωση CO₂ επηρεάζει και αυτή την σταθερότητα των ζεολίθων και την σχετική σπουδαιότητα του ασβεστίτη συγκριτικά με το επίδοτο.

Η παρακάτω Εικόνα 6, παρουσιάζει ένα μοντέλο της ζώνωσης που σχηματίζεται με τις εξαλλοιώσεις για τα χαμηλής θείωσης επιθερμικά κοιτάσματα.



Εικόνα 6. Μοντέλο ζώνωσης για επιθερμικά κοιτάσματα χαμηλής θείωσης (Hedenquist et al., 2000)

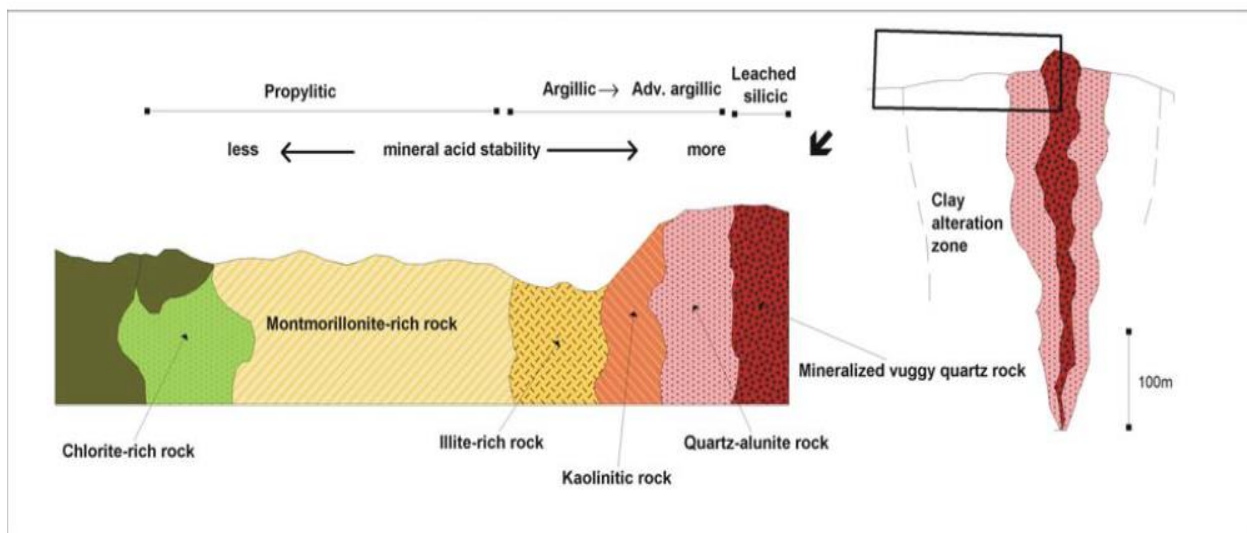
Στα HS το μέταλλευμα είναι κυρίως συνδεδεμένο με τη ζώνη της πιο όξινης εξαλλοίωσης και περιτριγυρίζεται από παραγενέσεις ορυκτών που δείχνουν λιγότερο όξινες συνθήκες. Η ζώνωση από το κέντρο προς την περιφέρεια είναι η εξής (Εικόνα 7) :

1. Πυριτίωση, κατά μήκος των διαρρήξεων που ακολουθούν τα υδροθερμικά διαλύματα. Σχηματίζεται χαλαζίας, χαλκηδόνιος, αλουνίτης, βαρίτης κ.ά. με μία συμπαγή και σκωριώδη μορφή. Παρατηρείται δηλαδή προσθήκη πυριτίου (Si) στο πέτρωμα λόγω αντικατάστασης ή πιο συχνά από την πλήρωση κενών τα οποία δημιουργήθηκαν κατά την έκλυση.

2. Προχωρημένη αργλική (ΠΑΕ). Εμφανίζεται χαλαζίας, αλουνίτης, καολινίτης, πυροφυλλίτης. Η εμφάνισή της είναι περιορισμένη σαν «φωτοστέφανο» γύρω από τα HS επιθερμικά κοιτάσματα (Εικόνα 8).

3. Αργλική ή σερικιτική, μπορεί να εμφανίζεται ανάμεσα στην ΠΑΕ και στην προπυλιτική ζώνη. Εδώ παρατηρούνται καολινίτης, χαλαζίας κ.ά..

4. Προπυλιτική όπου διακρίνεται ασβεστίτης, χλωρίτης, επίδοτο, αλβίτης κ.ά.. Μπορεί να εμφανίζεται ως μία εξωτερική περιοχικά εκτεταμένη ζώνη εξαλλοίωσης σε βάθη > 500m.



Εικόνα 7. Τομή εξαλλοιώσεων HS επιθερμικών κοιτασμάτων (Μέλφος- Επιθερμικά συστήματα)



Εικόνα 8. Προχωρημένη αργιλική εξαλλοίωση, Σάππες (Μέλφος-Επιθερμικά συστήματα)

Παρακάτω αναφέρονται συνοπτικά τα τρία πιο χαρακτηριστικά ορυκτά των HS και LS κοιτασμάτων, καθώς είναι και αυτά τα οποία με την εμφάνισή τους μας βοηθούν να αναγνωρίσουμε τον τύπο κοιτάσματος. Ο αδουλάριος (Εικόνα 9), ο οποίος είναι τυπικό ορυκτό των χαμηλής θείωσης επιθερμικών κοιτασμάτων εμφανίζεται στα εξαλλοιωμένα τοιχώματα των πετρωμάτων γύρω από φλέβες, ρωγμές και πορώδεις ζώνες. Συνδέεται με βρασμό και είναι σύνηθες σε μεσαία και ρηχά βάθη. Ο πυροφυλλίτης (Εικόνα 10) συνδέεται με διεισδυτικό επιθερμικό περιβάλλον. Είναι χαρακτηριστικό ορυκτό της ΠΑΕ και είναι αποτέλεσμα της αντίδρασης των χαμηλών pH υγρών με τα πετρώματα. Η θερμοκρασία σχηματισμού είναι ενδιάμεση (200°-350°C) μεταξύ καολίνη και ανδαλουσίτη. Εμφανίζεται και σε μερικά κοιτάσματα χρυσού που σχετίζονται με ισχυρές μεταμορφώσεις, παρόλο που ο χρόνος σχηματισμού του δεν είναι βέβαιος. Σχηματίζεται μέσω της μεταμόρφωσης αργιλικών πετρωμάτων τα οποία μπορεί να αντιπροσωπεύουν παλαιότερες εξαλλοιώσεις, διαβρωμένα εδαφικά καλύμματα ή πλούσια σε Al (αργίλιο) ιζηματογενή πετρώματα. Για τον αλουνίτη (Εικόνα 11) που σχετίζεται με διεισδυτικό περιβάλλον ισχύουν τα εξής. Λόγω της δυσαναλογίας μαγματικού SO₂ στην παρουσία νερού, γεννά H₂S και H₂SO₄, τα οποία μαζί με HCl αντιδρούν με πετρώματα για να δημιουργήσουν εκτεταμένες ζώνες ΠΑΕ που φέρουν αλουνίτη. Η υψηλής θείωσης τύπου κρυστάλλωση Au-As συνδέεται απευθείας με ζώνες που περιλαμβάνουν χαλαζία, αλουνίτη ή και εναργίτη και συχνά κατέχουν σχετικά μικρά τμήματα μεγαλύτερων ζωνών ΠΑΕ. Ο αλουνίτης που προέρχεται από επιθερμικό περιβάλλον

σχηματίζεται με την παρακάτω διαδικασία. Οι ΠΑΕ υδρατμών ή όξινης έκπλυσης σχηματίζονται κοντά στην επιφάνεια πάνω από τον υδροφόρο ορίζοντα (ζώνη κορεσμού) από συμπύκνωση και οξείδωση H_2S και αντίδρασης του επακόλουθου H_2SO_4 με τα πετρώματα. Το H_2S μεταφέρεται μέσω της απελευθέρωσης ατμών λόγω βρασμού υδροθερμικών υγρών κάτω από τον υδροφόρο. Σχηματίζεται μία ζώνη «κουβέρτα» της ΠΑΕ από αλουνίτη, χριστοβαλίτη ή και καολίνη ή και αυτοφυούς S (θείου). Τα βαθύτερα υγρά σε αυτά τα υδροθερμικά συστήματα μπορεί να είναι είτε χλωρίδια με ουδέτερο pH πιθανώς συνδεδεμένα με LS πολύτιμα μεταλλικά ορυκτά, είτε χαμηλού pH όξινα θειικά άλατα πιθανότατα συνδεδεμένα με HS κοιτάσματα.



Εικόνα 9. Αδουλάριος με χαρακτηριστικό ρόδινο χρώμα (Michaud 2015a)



Εικόνα 10. Πυροφυλλίτης (Παπούλης 2011)



Εικόνα 11. Αλουνίτης (Jame St. J., 2020)

5. Παγκόσμια Παραδείγματα

Όπως έχει ήδη αναφερθεί 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 Καρπαθο – 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 :

- A. Χαμηλού βαθμού LS και οξειδωμένων λόγω έκπλυσης HS (Round Mountain, Nevada)
- B. Δομικά ελεγχόμενες υψηλού βαθμού LS φλέβες ή φλέβες μεταλλεύματος HS (Hishikari, Japan, El Indio, Chile)
- Γ. Μέσου βαθμού μη οξειδωμένα HS κοιτάσματα (Pueblo Viejo, Colorado)

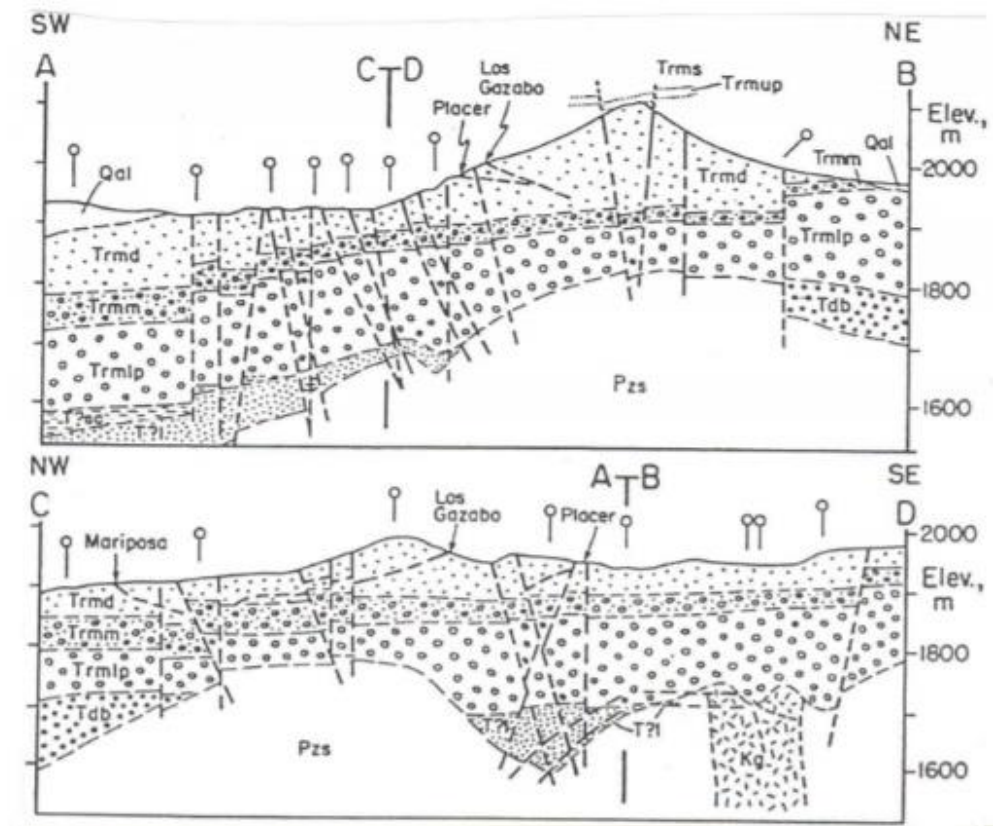
Το Round Mountain τοποθετείται 80 km νότια της Tonopah, Nevada. Ανακαλύφθηκε γύρω στα 1980 ενώ στις αρχές των 1900 πολλά ορυχεία λειτουργούσαν στην περιοχή. Η παραγωγή προέρχονταν κυρίως από πολύ ψηλού βαθμού φλεβίδια όπως και από μεταλλοφόρα εδάφη. Η συνολική παραγωγή ήταν γύρω στο 1 εκ. τόνο μεταλλεύματος με 10 εκ. ουγγιές χρυσού (Εικόνα 12).



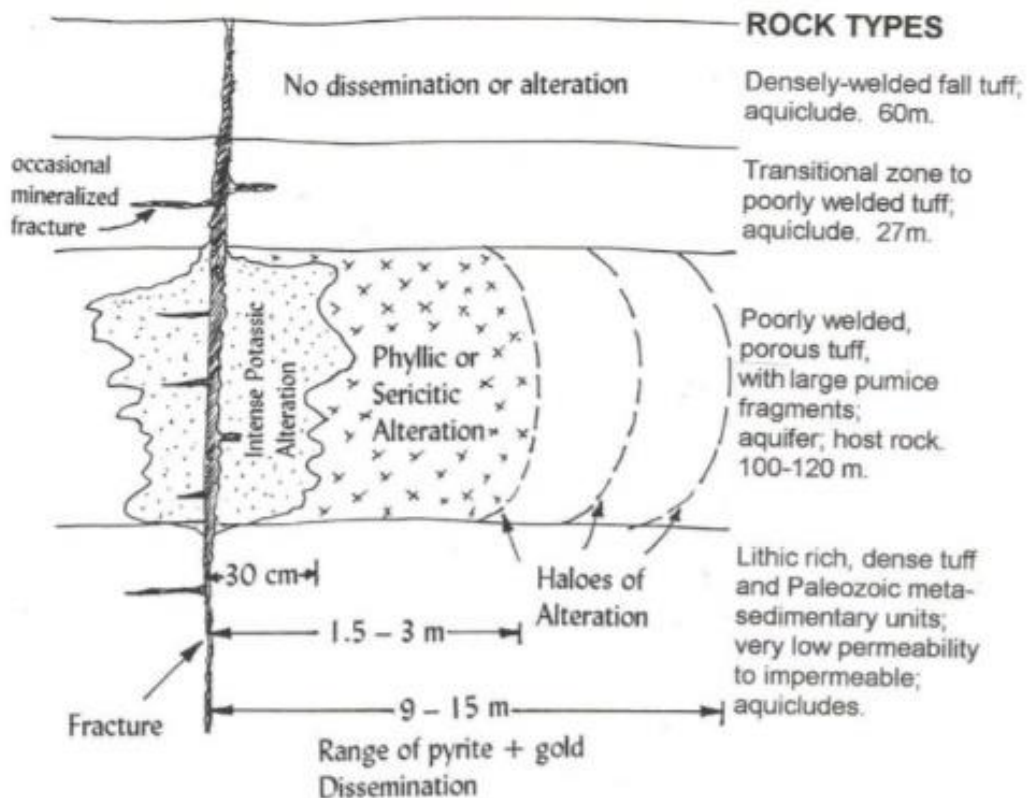
Εικόνα 12. Σημερινή εμφάνιση ορυχείου της περιοχής Round Mt, Nevada (En.wikipedia.org, 2020)

Το υπόβαθρο είναι σύνθετο από Παλαιοζωικά ιζήματα (τώρα σχιστόλιθοι, αργιλλίτες, χαλαζίτες και ασβεστόλιθοι) με διεισδύσεις από Κρητιδικούς γρανίτες και είναι πολύπλοκα πτυχωμένο και διαρρηγμένο καθώς κόβονται από μία σειρά ανδεσιτικών και δακτιτικών φλεβών με ΒΑ κλίσεις, που χρονολογήθηκαν στα 35 εκ. χρόνια. Ολιγοκαινικές – Κ. Μειοκαινικές ροές τέφρας – τόφφων χρησιμεύουν ως οικοδεσπότες για τις αποθέσεις φλεβικού μεταλλεύματος. Πάνω από το υπόβαθρο και την μεγαλατυποπαγή δομή υπάρχει μία δομή τόφφων στα 400 m πάχος. Πάνω της βρίσκεται μία λεπτότερη στρώση πυροκλαστικών υλικών και επικλαστικών πετρωμάτων λόγω του αέρα. Το παραπάνω στρώμα της ροής τέφρας είναι συγκολλημένο ενώ το κατώτερο φιλοξενεί το διαδεδομένο μέταλλευμα αφού είχε μια σχετικά υψηλή αρχική διαπερατότητα. Λεπτά ενστρωματωμένοι τόφφοι έχουν εξαλλοιωθεί σε πυριτικό χαλκηδόνιο. Αυτή η ενότητα έχει λατυποποιηθεί μετά από την πυριτίωση και επαναπληρωθεί με χαλαζία. Η λατυποποίηση των τοιχωμάτων μειώνεται όσο απομακρυνόμαστε από τα ρήγματα. Υπάρχουν ομάδες κοντά στα κατακόρυφα ρήγματα που παρουσιάζονται στην περιοχή εξόρυξης με δύο ΒΔ κλινόμενα ρήγματα που σχετίζονται με την κρυστάλλωση (Εικόνα 13). Επιπλέον εμφανίζονται λατύπες που μοιάζουν με σωλήνες σε διασταυρούμενες δομές και ερμηνεύονται ως λατυποποιημένοι αγωγοί που

οδηγούν σε κρατήρες υδροθερμικών εκρήξεων. Στην επιφάνεια είναι καλά πυριτωμένες και κόβονται από φλέβες υπολειπόμενου χαλαζία.



Εικόνα 13. Σχηματική γεωλογική τομή με τη λιθοστρωματογραφία και την τεκτονική της περιοχής (Sander et. al, 1990)

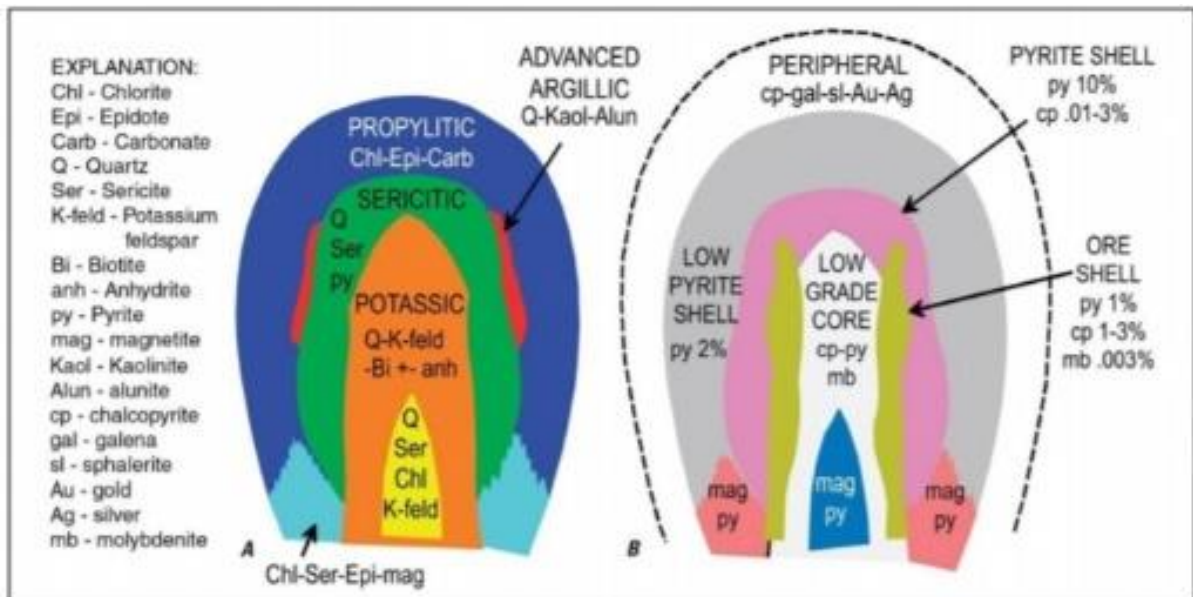


Εικόνα 14. Κατακόρυφη τομή της περιοχής με τη λιθοστρωματογραφία και τις εξαλλοιώσεις στους διάφορους τύπους πετρωμάτων (Lobo-Guerrero, 2001)

Η ταξινόμηση των εξαλλοιώσεων προς τα έξω ξεκινά με φλέβες ή λατύπες κεντρικά, από πυριτίωση σε αργλική εξαλλοίωση, σε προπυλιτική (Εικόνα 14).

Ο αλουνίτης είναι περιορισμένος μέσα και πάνω στις σωληνοειδής δομές λατύπων και εμφανίζεται με χαρακτηριστικά της τελευταίας φάσης. Η περιοχική προπυλιτική εξαλλοίωση έχει μία ακανόνιστη διανομή και ο χλωρίτης και σερίκίτης αποτελούν συχνές εξαλλοιώσεις των βιοτίτη και πλαγιокλάστου. Η αργλική εξαλλοίωση είναι ξεθωριασμένη και ασβεστοποιημένη. Η εξαλλοίωση αλουνίτη – χαλαζία σχετίζεται με κέντρα υδροθερμικής δραστηριότητας και αντικατοπτρίζει την εισβολή επιφανειακών ρευστών όξινων θεϊκών αλάτων μέσω υδροπερατών δομών, πιθανόν προ – κρυστάλλωσης. Ο αλουνίτης χρονολογείται στα 10εκ. χρόνια και ο αδουλάριος και σερίκίτης στα 25εκ. χρόνια. Τα κατώτερα στρώματα μη συγκολλημένων τόφφων είναι αργιλοποιημένα. Ο χρυσός εμφανίζεται ως «ήλεκτρον» και συσχετίζεται με αδουλάριο και χαλαζία. Εκτός από αρσενικό (As), θάλλιο (Th) και υδράργυρο (Hg) ο χρυσός και ο άργυρος σχετίζονται και με φθόριο (F) μολυβδαίνιο (Mo) και βολφράμιο (Wo). Γενικά παρατηρείται μία αύξηση του λόγου Ag/Au με το βάθος, μείωση As, Sb και αύξηση των Mo, Wo. Το Round Mt είναι μία περιοχή με έντονη εξαλλοίωση και παρατηρείται εξάντληση του ασβεστίου (Ca) και μαγγανίου (Mn) και

εμπλουτισμός σε As, Sb, Tl, Mo. Στην Εικόνα 15 αναφέρονται οι τυπικές εξαλλοιώσεις και τα μεταλλικά ορυκτά που σχηματίζονται στα επιθερμικά κοιτάσματα Au-Ag.



Εικόνα 15. Εμφάνιση των εξαλλοιώσεων για ένα επιθερμικό κοιτάσμα Au-As (Lowell and Guilbert, 1970 τροποποιημένο από John et. al, 2010)

Στο El Indio βόρεια στην Χιλή ανακαλύφθηκε τον Ιούνιο 1975 ένα κοιτάσμα χρυσού χαλκού με ύψος 4.000m κοντά στα σύνορα με την Αργεντινή, και εκτείνεται σχεδόν σε όλο το μήκος της ακτής, σχηματίζοντας την Ζώνη El Indio (Εικόνα 16). Αποτελεί ένα υψηλής θείωσης μεταλλικό επιθερμικό κοιτάσμα.

Βρίσκεται σε μία απότομη περιοχή με υψηλό ανάγλυφο. Το κοιτάσμα είναι μέσα σε μία μακρόστενη ζώνη διακοπτόμενης εξαλλοίωσης μήκους 200 km, με φορά B-N και ποικίλου πλάτους από 1-10 km. Το υπόβαθρο αποτελείται από Ιουρασικού – Μ. Κρητιδικού ιζήματα έντονα πτυχωμένα και ακουμπάνε ασύμφωνα πάνω σε ηφαιστειακά – υποηφαιστειακά κυρίως στους Μ. Κρητιδικούς ανδεσίτες «Banos del Toro». Τα ηφαιστειακά είναι κυρίως τόφφοι, breccia και συσσωματώματα που περιλαμβάνουν δακίτες και ρυόλιθους. Επιπλέον, υπάρχουν και ελάχιστες ποσότητες διεισδύσεων γρανοδιοριτών – διοριτών (Εικόνα 17, απεικόνιση των πετρωμάτων της περιοχής μαζί με την τεκτονική τους). Οι ξενιστές ανδεσίτες και δακίτες (υποηφαιστειακά και προπυλιτωμένα) χρονολογήθηκαν με K/Ar στα 10.7 ± 0.7 εκ. χρόνια, με σερικιτική εξαλλοίωση σε φλέβα με ηλικία 8.6 ± 0.4 εκ. χρόνια, που δείχνει μία στενή χρονικά σχέση μεταξύ ηφαιστειότητας, διεισδύσεων και υδροθερμικών εξαλλοιώσεων και ορυκτολογίας. Οι φλέβες του El Indio εκτίνονται σε μία

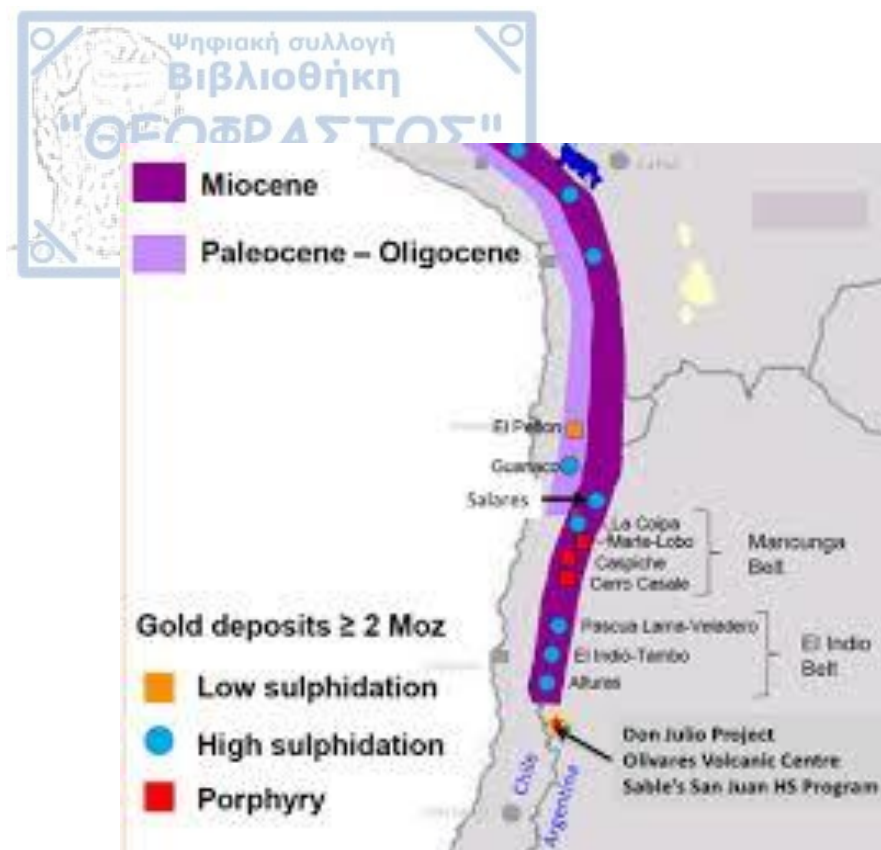
περιοχή περίπου 5km², παρόλα αυτά η εξόρυξη γίνεται σε ένα μπλοκ μετρώντας 500 από 100 m, οριοθετημένο από δύο ΒΑ κλινόμενα ρήγματα.

Παρατηρούνται δύο τύποι κρυστάλλωσης. Χαλαζιακές φλέβες με ή χωρίς έμφυτο Au και τεράστιες φλέβες σουλφιδίων (κυρίως εναργίτη, σιδηροπυρίτη, χαλαζία ως φλέβες ή stockwork), οι οποίες μπορεί και να έχουν εκπλυθεί τελείως στην επιφάνεια έως ότου γίνουν ένα στείο κάλυμμα γύψου. Επικρατεί ένα σύστημα φλεβών με επαναλαμβανόμενη κρυστάλλωση. Κολλοειδής υφή σε ταινιωτούς χαλαζίες και υφές αντικατάστασης, καθώς και λατυποποίηση είναι πολύ συχνά είτε γειτονικά είτε εσωτερικά των φλεβών.

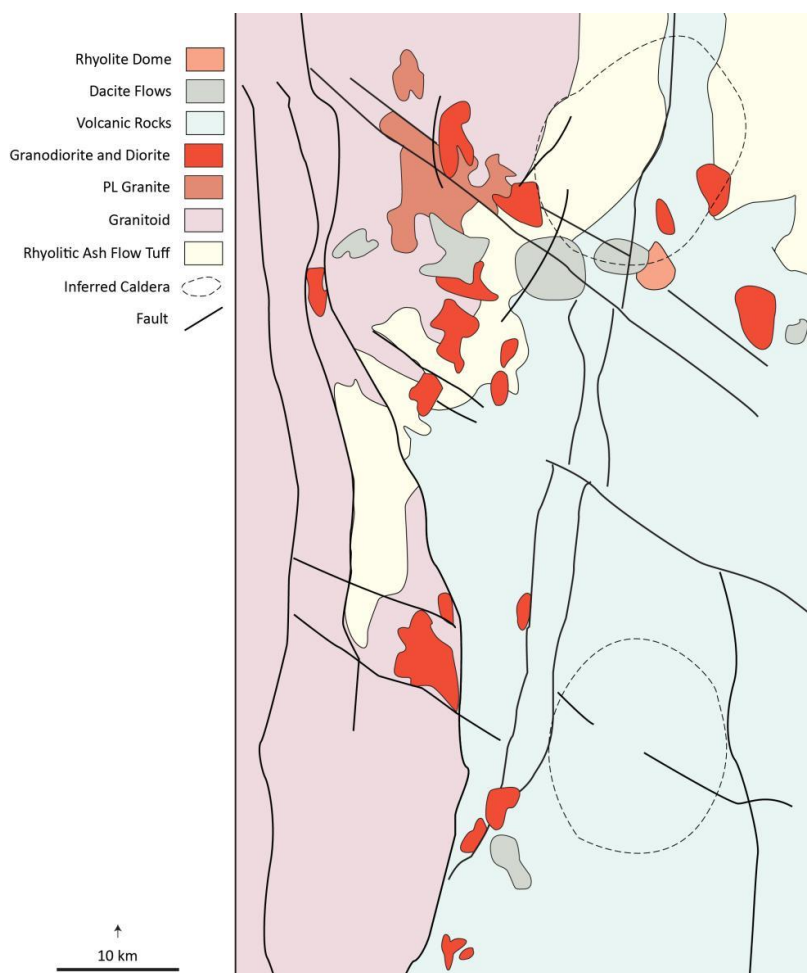
Η προπυλιτική εξαλλοίωση (πιθανώς περιοχική και προ-κρυστάλλωσης) είναι αυτή που κυριαρχεί πέρα από τα όρια των ρηγμάτων, ενώ μέσα σε αυτά επικρατούν η αργιλική και η χαλαζία – σερική, με διαβρωμένη πυριτίωση. Μεγαλύτερες φλέβες χαλαζία – χρυσού περιβάλλονται από χαλαζιακή – σερική, ενώ οι συμπαγείς φλέβες σουλφιδίων συνήθως σχετίζονται με αργιλική εξαλλοίωση.

Ο αλουνίτης είναι κοινός στα υψηλότερα υψόμετρα και έτσι στο εν λόγω κοίτασμα είναι σχετικά ελάχιστος. Χωρίς τη διαβρωτική χαλαζία – σερική και την πυριτική εξαλλοίωση η αξία του χρυσού πέφτει. Ο βαρύτης δεν είναι συνήθης. Οι φλέβες συμπαγών σουλφιδίων μπορούν να φτάσουν έως 10 m πλάτος με γωνία βύθισης 45° (πολύ μικρότερη των χαλαζιακών – χρυσού φλεβών). Χαλκοπυρίτης μαζί με εναργίτη και σιδηροπυρίτη, τενναντίτη – τετραεδρίτη, σφαλερίτη, γαληνίτη, κοβελλίνη, διγενίτη, εμφανίζονται σε βάθος. Όπου εμφανίζεται χρυσός είναι στις νεώτερες φλέβες που κόβουν τα σουλφίδια. Ο εναργίτης έχει εκπλυθεί σε βάθος έως 120 m, με πυριτικά σύνδρομα ορυκτά και πορώδη «boxwork» υφή, ή αλλιώς σκωριώδης.

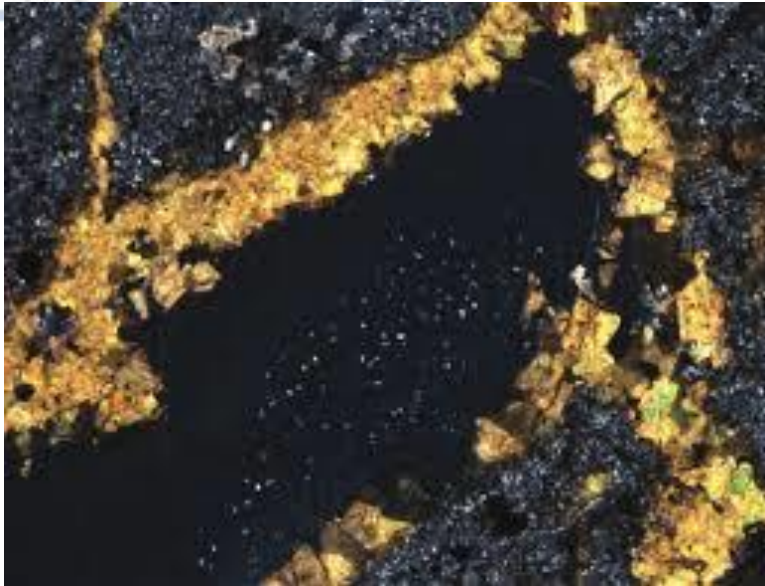
Οι χαλαζιακές φλέβες είναι σημαντικές για την αξία του χρυσού, έχουν πλάτος 2 m και βύθιση ΒΔ 65°, πιο συχνά κοντά στα ρήγματα οριοθέτησης. Είναι λατυποποιημένες και πληρωμένες με πυρίτιο. Ο χρυσός βρίσκεται συνήθως σε κλάστες γύρω από παλαιότερους χαλαζίες ή σουλφίδια (Εικόνα 18).



Εικόνα 16. Ζώνη El Indio και εμάνιση HS επιθερμικών κοιτασμάτων στην περιοχή (Sableresources.com, 2020)



Εικόνα 17. Κάτοψη της περιοχής της Χιλής, με τα επιμέρους πετρώματα και ρήγματα (Wilson C. and Tunningley A.)



Εικόνα 18. Χρυσός από την περιοχή Veladero, El Indio (Holley, E., Bissig, T. and Monecke, T., 2016).

Το Hishikari τοποθετείται 45 km ΒΔ της Kagoshima στο Kyushu. Δίδυμες κεκλιμένες μετακινήσεις οδήγησαν στην ζωνώδη κρυστάλλωση. Το τωρινό μέταλλευμα βρίσκεται από 0-100m πάνω από το επίπεδο της θάλασσας. Το ορυχείο είναι ανοιχτό και φαίνεται στην Εικόνα 19. Στην αμέσως επόμενη Εικόνα 20, απεικονίζεται η κάτοψη της ευρύτερης περιοχής, μαζί με τα πετρώματα που την αποτελούν, αλλά φαίνεται και η τοποθέτηση στο χάρτη της περιοχής εξόρυξης. Τα πετρώματα της περιοχής είναι ηφαιστειακά Νεογενή. Το υπόβαθρο με ψαμμίτες και στρώματα σχιστολίθων αποτελεί την ομάδα Shimanto. Πάνω από αυτό είναι στρωμένοι η παλαιότερη ανδεσίτες Hokusatsu. Οι φλέβες της περιοχής είναι ανάλογες με τα μετρικά 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. 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. Οι ψαμμίτες περιλαμβάνουν χαλαζία, πλαγιόκλαστο με μικρότερη ποσότητα πράσινων τόφφων και σερικίτη. Το πλαγιόκλαστο από έρευνες φαίνεται να είναι χαμηλής θερμοκρασίας αλβίτης.

Είναι εμφανής η υδροθερμική εξαλλοίωση κοντά στα όρια της ασυμφωνίας και σε μερικές περιπτώσεις καλιούχοι άστριοι και στρώματα με σερικήτη/μοντμοριλονίτη σχηματίζονται.

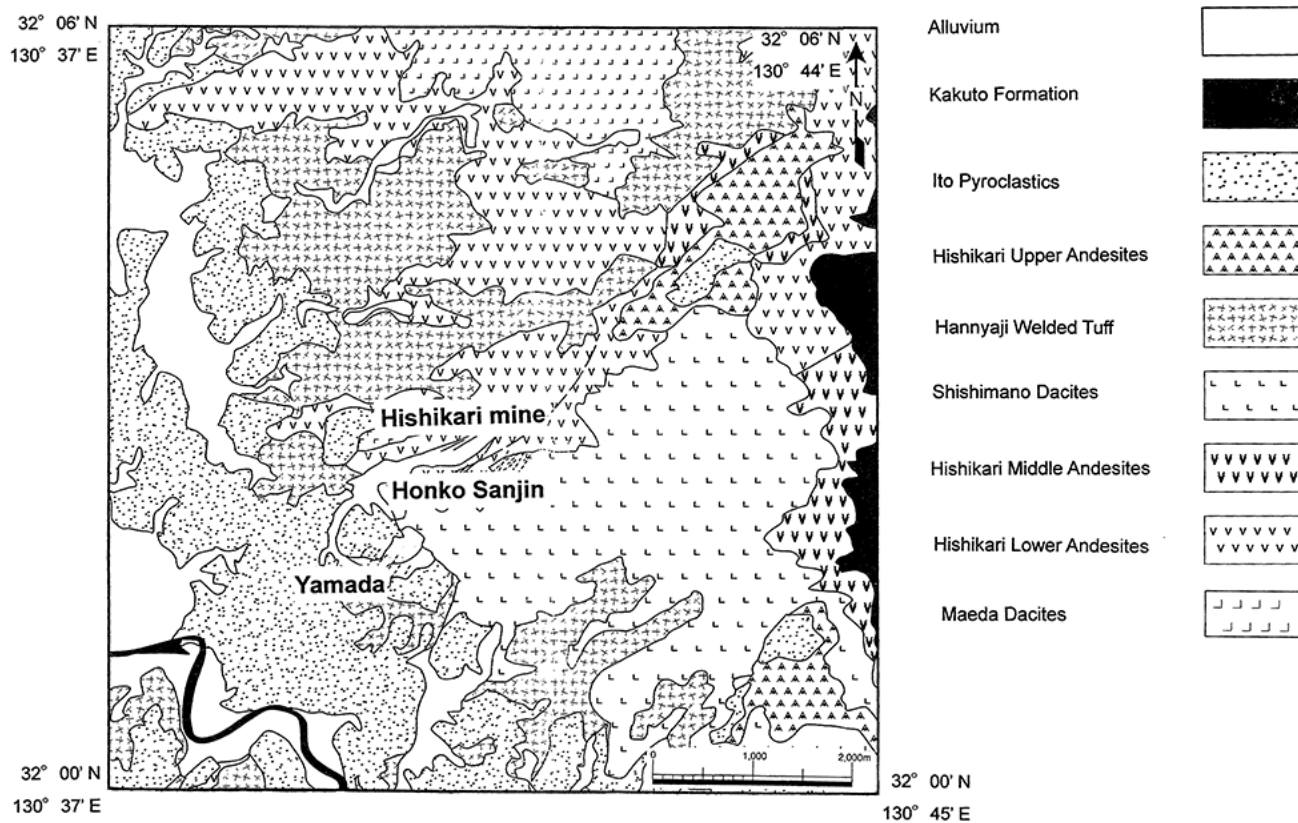
Στους Hokusatsu ανδεσίτες παρατηρείται έντονη παρουσία χλωριτίωσης, πυριτίωσης και δημιουργία αργίλων γύρω από τις φλέβες, οι οποίες είναι ιδιαίτερα ευδιάκριτες στον ιστό των λατυποποιημένων τόφφων.

Η ζώνωση συνεχίζεται (Εικόνα 21) κατά την προπυλιτική εξαλλοίωση που σχηματίζεται χαμηλής θερμοκρασίας πλαγιόκλαστο και πράσινος χλωρίτης πλούσιος σε Fe. Καλιούχοι άστριοι, πράσινος χλωρίτης/σαπωνίτης καθώς και αναμιγμένα στρώματα σερικήτη/μοντμοριλονίτη είναι προϊόντα εξαλλοίωσης που σχετίζεται με κρυστάλλωση. Επιπλέον, ζεόλιθοι και μοντμοριλονίτης σχηματίζονται. Τα χαρακτηριστικά της υδροθερμικής δραστηριότητας συμπεραίνονται από τα γνωρίσματα των ορυκτών που συνθέτουν το περιβάλλον πέτρωμα και τις φλέβες. Στην περιοχή Hishikari η άνοδος του υπαβάθρου γίνεται με αντικλινικές δομές, σχηματισμό ρηγμάτων καθώς λαμβάνει χώρα και άνοδος από βάθος υδροθερμικών υγρών. Αυτά, ανεβαίνουν μέσω διαρρήξεων στην ομάδα Shimanto, διεισδύουν μέσω ρηγμάτων στις ηφαιστειακές τέφρες και μέσω σχισμών στους ανδεσίτες. Ο σχιστόλιθος της ομάδας αυτής περιέχει μεγάλες ποσότητες ασβεστιτικής ύλης και γι αυτό τα υδροθερμικά υγρά που ανεβαίνουν από βάθος βρίσκονται σε αναγωγική φάση. Η θερμοκρασία είναι περί τους 250°C και εάν οι καλιούχοι άστριοι στη φλέβα και ο σερικήτης στα τοιχώματα του πετρώματος διατηρούν ισοροπία το pH των νερών θα είναι ελαφρώς βασικό έως ουδέτερο.

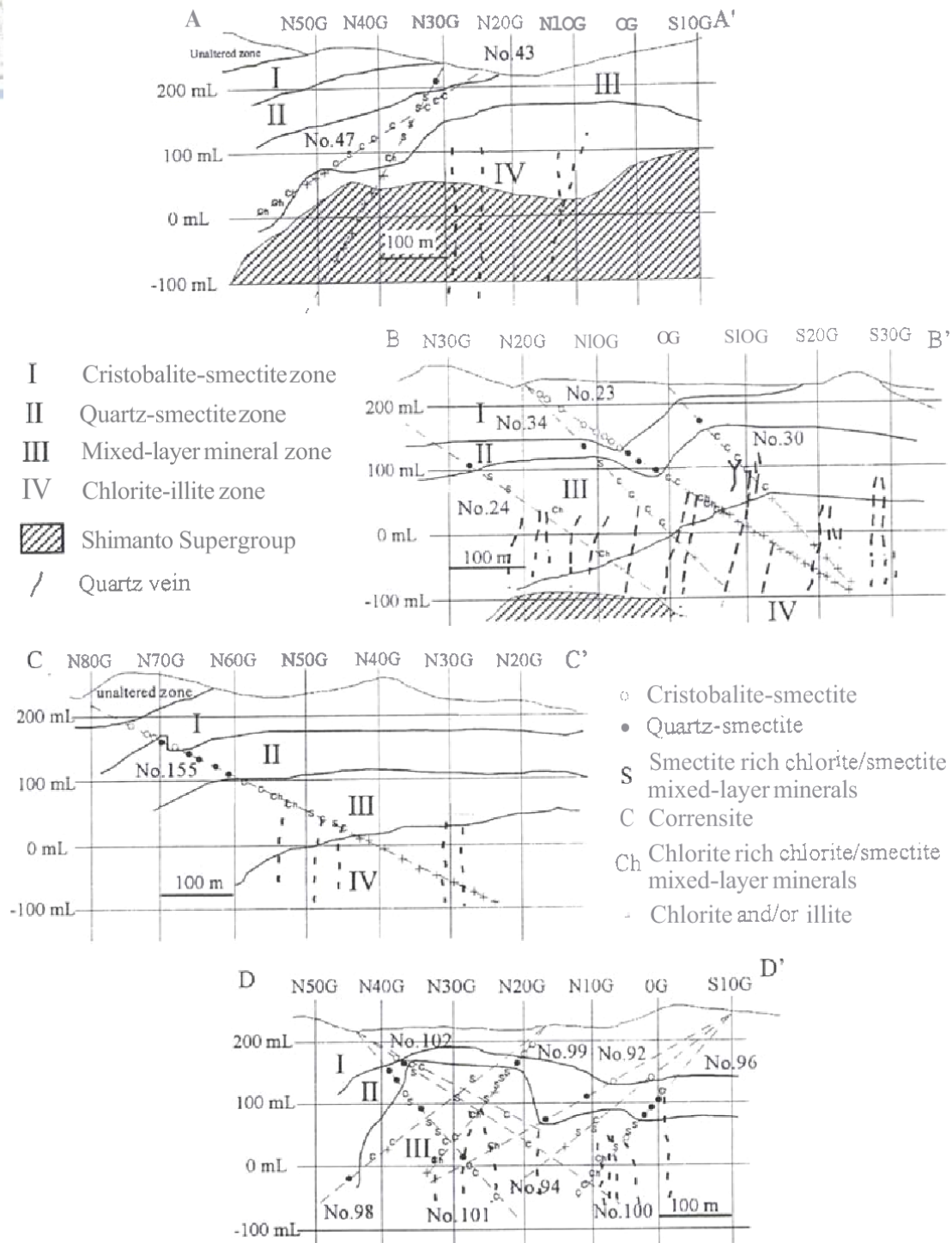
Χρυσός και άργυρος αποτίθενται λόγω της μείωσης θερμοκρασίας και pH των υδροθερμικών υγρών (Εικόνα 22). Όσο οι δραστηριότητες των βαθιά αυτών υγρών χάνονται, τόσο το επιφανειακό νερό εισχωρεί στο υπέδαφος και έτσι σταματάει η κρυστάλλωση του χρυσού. Στο τέλος η θερμοκρασία του υδροθερμικού νερού είναι < 150°C, και έτσι σχηματίζονται ζεολιθικές-ασβεστιτικές φλέβες κάτω από συνθήκες ουδέτερου – ελαφρώς βασικού pH.



Εικόνα 19. Ορυχείο της περιοχής Hishikari, Japan (National Institute of Advanced Industrial Science and Technology(AIST) and Sumitomo Metal Mining Co., Ltd)



Εικόνα 20. Τομή περιοχής με περιβάλλοντα πετρώματα και εμφάνιση του σημείου του ορυχείου (Shikazono, N., and Takahashi, H. 2010)



Εικόνα 21. Τομή ζώνωσης εξαλλοιώσεων στα επιμέρους πετρώματα (Yasuhara et al. 2003)

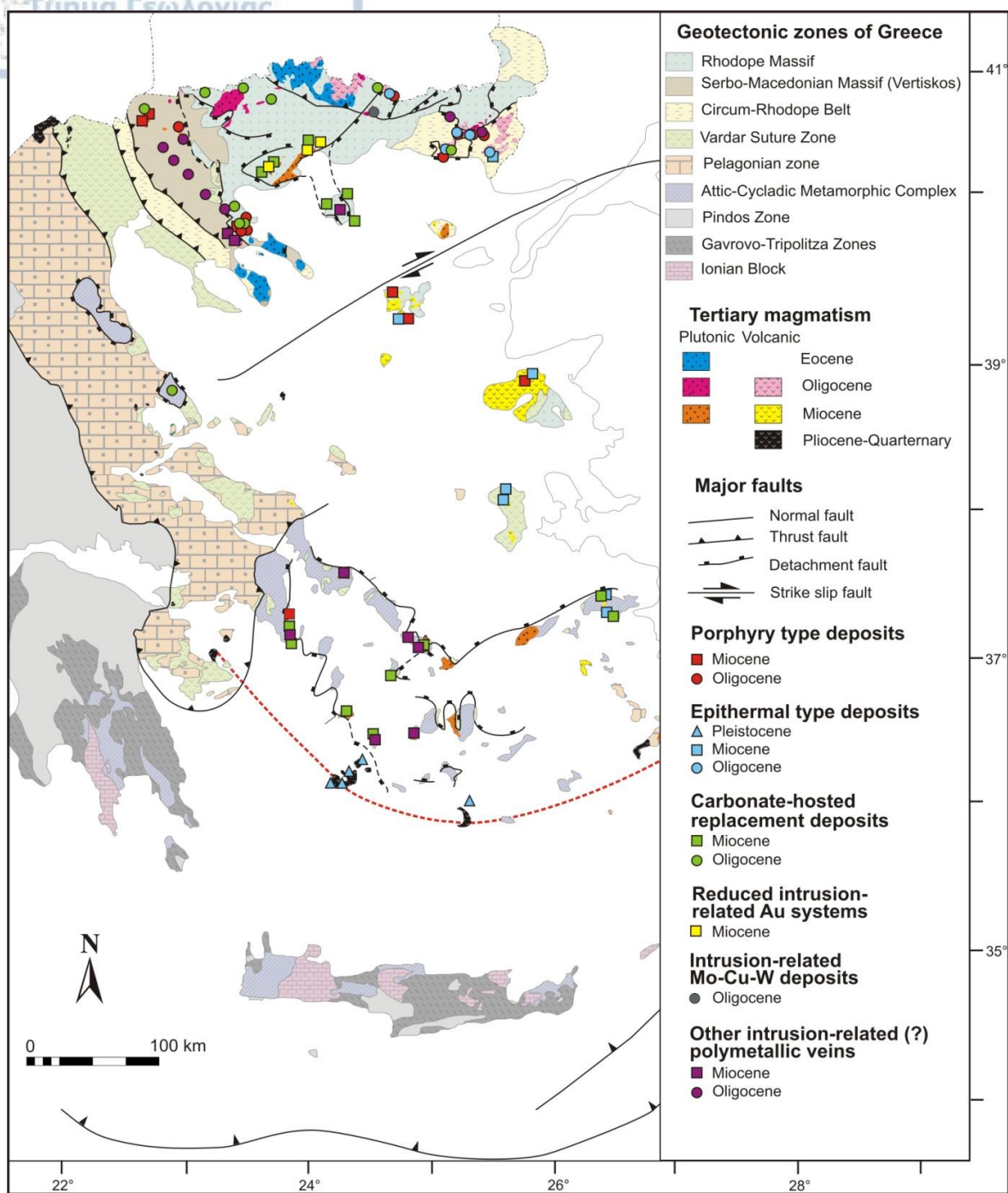


Εικόνα 22. Φλέβα Au σε γραουβάκη, στο Hishikari. Από Heden et. al, 1996.

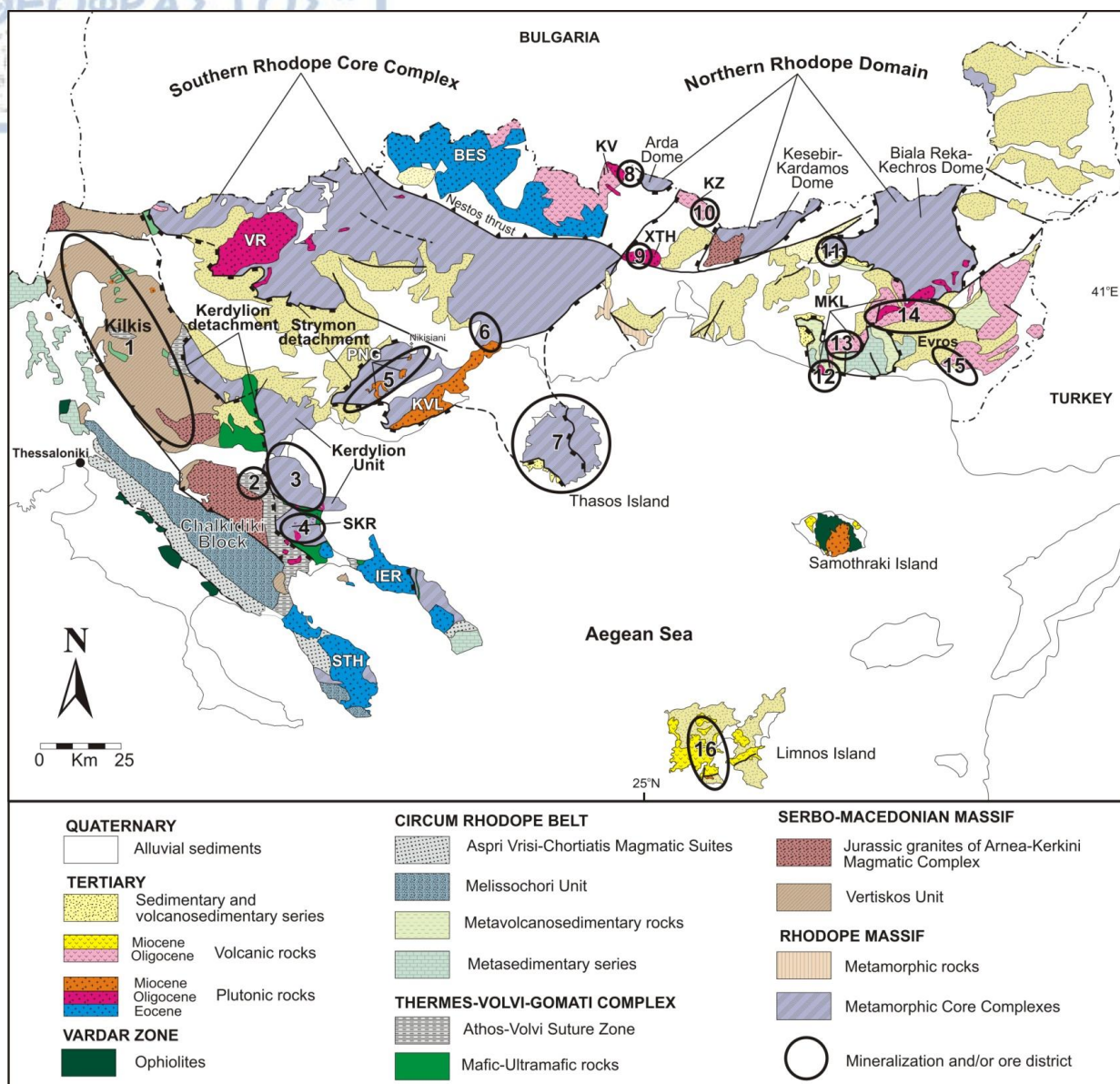
6. Ελληνικά παραδείγματα

Στον Ελλαδικό χώρο, τα επιθερμικά κοιτάσματα εμφανίζονται σε δύο κύριες ζώνες και παίζουν πολύ σημαντικό ρόλο στην ενίσχυση της ελληνικής οικονομίας αφού και αποτελούν μια πολλά υποσχόμενη περιοχή για μελλοντική εξόρυξη χρυσού στην Ευρώπη (Baker, 2019).

Επιθερμικά κοιτάσματα παρατηρούμε γενικά στην μάζα της Ροδόπης όπως και στην Αττικο-Κυκλαδική ζώνη με ηλικίες σχηματισμού από 33 εκ. χρόνια έως και το Πλειστόκαινο, και είναι αποτελέσματα έκτασης οπισθόταφρων στο Αιγαίο, σχηματισμού συμπλέγματος μεταμορφικού πυρήνα και συγχρόνως μιας ύστερης υποβύθισης και δημιουργίας μαγματισμού τόξου (Εικόνες 23-24).



Εικόνα 23. Εμφανίσεις επιθερμικών κοιτασμάτων στην Ελλάδα (Melfos and Voudouris 2017).



Εικόνα 24. Επιθερμικά κοιτάσματα στην Θράκη και στην Κεντρική και Ανατολική Μακεδονία (Melfos and Voudouris 2017).

Αναλυτικότερα τώρα θα αναφερθούμε σε μερικά παραδείγματα της περιοχής της Ροδόπης, που 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).

Η επιθερμική μεταλλοφορία στις Σάμπες-Κασσίτερες περιλαμβάνει πάνω από 20 μεταλλεύματα που φέρουν Au, τα μεγαλύτερα στα οποία ανήκουν η Οχιά (Viper), Scarp, Αγ. Δημήτριο, Αγ. Βαρβάρα. Τα αποθέματα των εξορύξεων στην περιοχή είναι 1.3 Mt, όπου 15 g/t Au για 637 koz (70% της πηγής είναι το Viper, Eldorado Gold).

Η Οχιά περιέχει υψηλού βαθμού Au σουλφίδια σε βάθος 200-250m, ενώ στον Αγ. Δημήτριο σχετίζονται με την οξειδωμένη μεταλλοφορία της επιφάνειας. Το κοιτάσμα της

Οχιάς δεν βρίσκεται στην επιφάνεια, όμως είναι βαθιά στη γη και έγινε γνωστό από γεωτρήσεις. Η κρυστάλλωση εμφανίζεται αρχικά σε ένα στάδιο μαζικής και υπολειπόμενης πυριτίωσης, με αλουνίτη και σιδηροπυρίτη, όπως και σε κολλώδεις ταινιωτές φλέβες χαλκηδόνιου-χαλαζία. Τα κοιτάσματα του Αγ. Δημητρίου φιλοξενούνται σε γρανοδιοριτικό πορφύρη, ηφαιστειακά πετρώματα. Η μεταλλοφορία περιλαμβάνει φλέβες γαλακτώδεις λατυποποιημένες και ταινιωτές χαλαζιακές, μαζί με προχωρημένη αργιλική και πυριτική εξαλλοίωση. Στα σύνδρομα ορυκτά περιλαμβάνονται ο ιλλίτης, σερικήτης, αλουνίτης κ.ά.

Στην Αγ. Βαρβάρα τα επιθερμικά συστήματα είναι HS/IS και φιλοξενούνται σε δακτιτικές – ανδεσιτικές λάβες, πυροκλαστικά και διεισδυτικά πετρώματα. Η όξινη έκπλυση οδήγησε στην συμπαγή πυριτίωση με υπολειμματικό χαλαζία, και περιβάλλεται από προχωρημένη αργιλική, ύστερα σερικήτης – αργιλική και στην περιφέρεια ενδιάμεσης αργιλικής εξαλλοίωσης παραγενέσεις. Μαγματικού ατμού αλουνίτης εμφανίζεται σε ταινιωτές φλέβες με βαρύτη ή και χαλκηδόνιο και γεμίζει τα κενά στον υπολειμματικό χαλαζία (Voudouris, 1993). Σε βάθος IS γαλακτώδεις χαλαζιακές – ασβεστιτικές φλέβες που φέρουν τελλουρίδια βρίσκονται σε σερικήτης – αργιλικά και ενδιάμεσα αργιλικά εξαλλοιωμένα πετρώματα. Από αναλύσεις σε δείγματα της επιφάνειας ο Voudouris et. al, 2006, βρήκε αυξημένες συγκεντρώσεις σε Au (έως 11g-t), Ag (έως 21 ppm), Cu (370 ppm), Pb (έως 950 ppm), As (έως 820 ppm), Bi (έως 640 ppm), Mo (έως 72 ppm), Te (έως 13 ppm) και Se (έως 23 ppm).

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. Σύμφωνα με την Eldorado Gold (2012, 2017) η ποσότητα χρυσού είναι περίπου 1.382.000 oz Au, με 3.46 g/t μέση περιεκτικότητα στο μέταλλευμα. Το μέταλλευμα βρίσκεται σε πυριτικά και αργιλικά εξαλλοιωμένα ανδεσιτικά πετρώματα και εμφανίζεται να καλύπτει συσσωματώματα και ψαμμίτες. Η μεταλλοφορία είναι σε φλέβες στους ανδεσίτες και ως πλούσια σε χρυσό οξειδωμένα «stratabound» στα επικείμενα ιζηματογενή πετρώματα. το κοιτάσμα εξελίσσεται από ένα πρόωρο στάδιο πυριτίου – σιδηροπυρίτη και αργιλικής εξαλλοίωσης ακολουθώντας η απόθεση σουλφιδίων, θειικών αλάτων και 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. Τα σύνδρομα ορυκτά είναι χαλαζίας, βαρύτης, καολίνης, σερικήτης και ορυκτά αργιλικά – φωσφορικά και θειικά άλατα.

Στην Μαυροκορυφή στο κέντρο του τεκτονικού βυθίσματος Πετρωτών, περιέχεται ρηχή HS επιθερμική Ag-Cu-Te μεταλλοφορία μέσα σε ανδεσιτικούς δόμους λάβας και

υαλοκλαστίτες. Τα σημαντικά μέταλλα μεταφέρονται με μαγματικούς ατμούς σύγχρονους με την ΠΑΕ (Voudouris, 2001). Η μεταλλοφορία προκύπτει ως συμπαγή σώματα σουλφιδίων σε ζώνες πυριτικές και ΠΑΕ που κυρίως περιλαμβάνουν χαλαζία, αλουνίτη, καολίνη κ.ά.. Περιέχει έως 1.5 g/t Au και έως 162 ppm Ag. Σχηματίζεται κάτω από πολύ οξειδωτικές συνθήκες στους 200-250°C, ενώ το περιβάλλον σχηματισμού είναι ρηχό υπόγειο και θυμίζει ένα μεταβατικό στάδιο μεταξύ των HS επιθερμικών κοιτασμάτων και ηφαιστειογενών μαζικών σουλφιδίων (VMS).

Το IS/HS φλεβικό με Pb – Zn – Ag – Bi – Sn – Ga – Ge – In, του Αγίου Φιλίππου στην περιοχή της Κίρκης φιλοξενείται από Ηωκαινικά ιζήματα και γενετικά συσχετισμένα με μικρογρανίτη πορφύρη (Voudouris et al.2013). Η πρώιμη απόθεση σιδηροπυρίτη και σφαλερίτη, βουρτσίτη, ακολουθείται από βισμούθινίτη, ιορδανίτη και γαλινίτη ύστερα από εναργίτη κ.ά. και τέλος από χαλκοπυρίτη, τενναντίτη κ.ά.. Οι παραγενέσεις αυτές δείχνουν μία εξέλιξη από HS έως IS στάδιο. Οι εμφανίσεις δικίτη, αλουνίτη, πυροφυλλίτη και βαρύτη ως σύνδρομα ορυκτά (Dimou, 1993, Skarpelis, 1999) στην πρώιμη μεταλλοφορία και ασβεστίτη στα τελικά στάδια, συμφωνούν με τα παραπάνω. Νέες έρευνες δείχνουν ποσότητες έως και 2,5 g/t Au, και έως 35 ppm Se συγκριτικά με τις αναλύσεις των Voudouris et al.2013 που έδειξαν έως 0,3 g/t Au και Se έως και 12 ppm.

Η περιοχή των Πεύκων χαρακτηρίζεται από HS/IS Cu – Au – Ag – Te μεταλλοφορία, που φιλοξενείται σε ανδεσιτικά πετρώματα. Παρατηρούνται δύο ξεχωριστά αποθέματα 1) HS χαλαζιακές με εναργίτη και χρυσό φλέβες με κλίση BBA, το οποίο είναι πρώιμο και 2) ύστερες BA κλίσης IS ασβεστίτη – τενναντίτη και τελλουριδιακές φλέβες. Ο εναργίτης, ο χρυσός και οι ασβεστιτικές και τελλουριδιακές φλέβες περιβάλλονται από σερικιτική – αργιλική και ενδιάμεση αργιλική εξαλλοίωση του γειτονικού πετρώματος. Παρατηρείται μία υπερβολή στην ποσότητα Cu που αποτίθεται στην μεταφορά μεταξύ HS και IS ρευστών. Συνεχής εξέλιξη στα υδροθερμικά κοιτάσματα από αρχικής υψηλής θερμοκρασίας (> 280°C) HS, οξειδωτικές συνθήκες σε χαμηλότερης θερμοκρασίας και LS αναγωγικές συνθήκες. Οι έρευνες δείχνουν ότι περιλαμβάνουν έως 3 g/t Au, >100 ppm Ag κ.ά. Οι ανωμαλίες στο Mo επιδεικνύουν ένα θαμμένο σε βάθος πορφυριτικού τύπου κοίτασμα.

Πολυμεταλλικές επιθερμικές έως υποεπιθερμικές τύπου φλέβες κόβουν τα μεταμορφικά πετρώματα στην Αττικο – Κυκλαδική μάζα, και πιστεύεται ότι έχουν σχηματιστεί λόγω της Κενοζωϊκής εκτατικής τεκτονικής στην θάλασσα του Αιγαίου.

Για την περιοχή του Λαυρίου παρατηρούμε δύο μεγάλα επιθερμικά στυλ φλεβικής μεταλλοφορίας. Το κοίτασμα της Πλάκας, Vein 80, είναι μία ταινιωτή φλέβα Pb – As – Sb – Cu – Ag πλούσια, με συγγενικές επιθερμικές που κόβουν εγκάρσια κερατίτες που φέρουν

πυροτίτη και η κρυστάλλωσή τους γίνεται με ασβεστιτική αντικατάσταση. Περιέχει ορυκτά θειικά άλατα του αργύρου στον γαληνίτη και σχετίζεται με αυτοφυή As και στιβνίτη. Τα σύνδρομα ορυκτά είναι κυρίως χαλαζίας, σιδερίτης, φθορίτης και ασβεστίτης. Η συνολική παραγωγή από αυτή τη φλέβα εκτιμάται στους 90.000 t εκ των οποίων 500 ppm Ag και 14 -15 wt% Pb + Zn (Conorphagos, 1980).

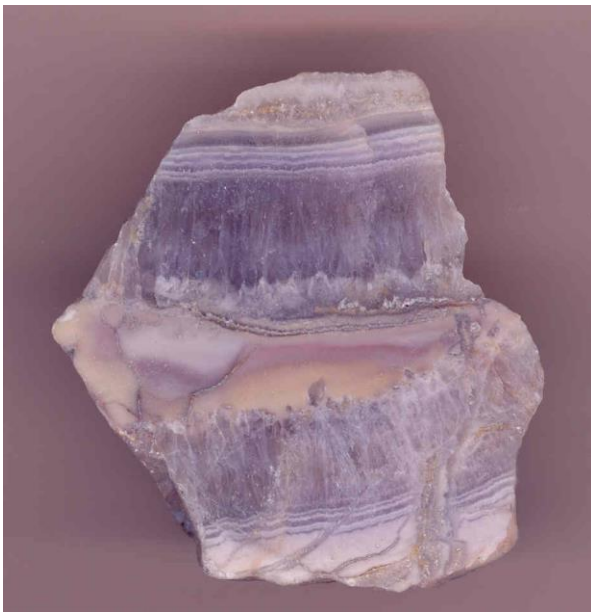
Στην περιοχή Καλλιανοί της Ευβοίας, υπάρχει ένα κοίτασμα Au – Ag που περιέχει πολλές ΒΔ χαλαζιακές φλέβες που φέρουν χρυσό και κόβουν εγκάρσια τη μεταμορφική δομή των μεταπηλιτών και των μαρμάρων των Κυκλαδικών Κυανών Σχιστολίθων (Alexoudi – Livaditi, 1978, Vavelidis and Michailidis, 1990, Skarpelis, 2002, Voudouris et. al, 2011). Η μεταλλοφορία περιλαμβάνει βασικά μεταλλικά σουλφίδια, θειικά άλατα, φυσικά στοιχεία όπως και τελλουρίδια.

Τέλος, θα αναφερθούμε στη Μήλο, η οποία είναι τοποθετημένη στο κεντρικό τμήμα της πρώιμης Πλειοκαινικής έως σύγχρονης ενεργής δράσης του ηφαιστειακού τόξου του Ν. Αιγαίου. 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 (Vavelidis and Melfos, 1998, Kiliyas et. al, 2001, Naden et. al, 2005, Alfieris et. al, 2013, Papavassiliou et. al, 2017, Smith et. al, 2018). Στη μεταλλοφορία της Μήλου περιλαμβάνεται το κοίτασμα του Προφήτη Ηλία, με συνολική ποσότητα 5 Mt εκ των οποίων 4.4 g/t Au και το Χονδρό Βουνό, το 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, και το κοίτασμα Κονδάρως – Κατσιμούτη – Βάνη. 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). Στον Προφήτη Ηλία και τις Τριάδες η μεταλλοφορία περιέχει πολύτιμα μέταλλα, όπως ήλεκτρο και τελλουρίδια Au – Ag και θειικά άλατα που φέρουν Ag. Για το κοίτασμα Ag στη Βάνη, ισχύει η άποψη πως 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.

Στις εικόνες που ακολουθούν (Εικόνα 25-32) παρουσιάζονται μερικά χαρακτηριστικά ορυκτά και υφές των Ελληνικών επιθερμικών κοιτασμάτων, όπως και στις Εικόνες 33-34, η μακροσκοπική εμφάνιση του επιθερμικού κοιτάσματος του Περάματος και μια γεωλογική τομή όπου απεικονίζεται ο σχηματισμός αυτού, αντίστοιχα.



Εικόνα 25. Υδροθερμικός χαλαζίας, Αγ. Δημήτριος, Σάπες (Μέλφος-Επιθερμικά συστήματα)



Εικόνα 26. Ταινιωτή υφή αμεθύστου, Ασημένιο-Σάπες (Μέλφος-Επιθερμικά συστήματα)



Εικόνα 27. Βαρύτης, Λουτρός Έβρου (Μέλφος-Επιθερμικά συστήματα)



Εικόνα 28. Λεπιωειδής υφή χαλαζία, λόγω αντικατάστασης από ασβεστίτη, Σάππες (Μέλφος-Επιθερμικά συστήματα)



Εικόνα 29. Λατυποπαγές (breccia), Λουτρός, Έβρου (Μέλφος-Επιθερμικά συστήματα)



Εικόνα 30. Πλέγμα φλεβιδίων, Σάππες (Μέλφος-Επιθερμικά συστήματα)



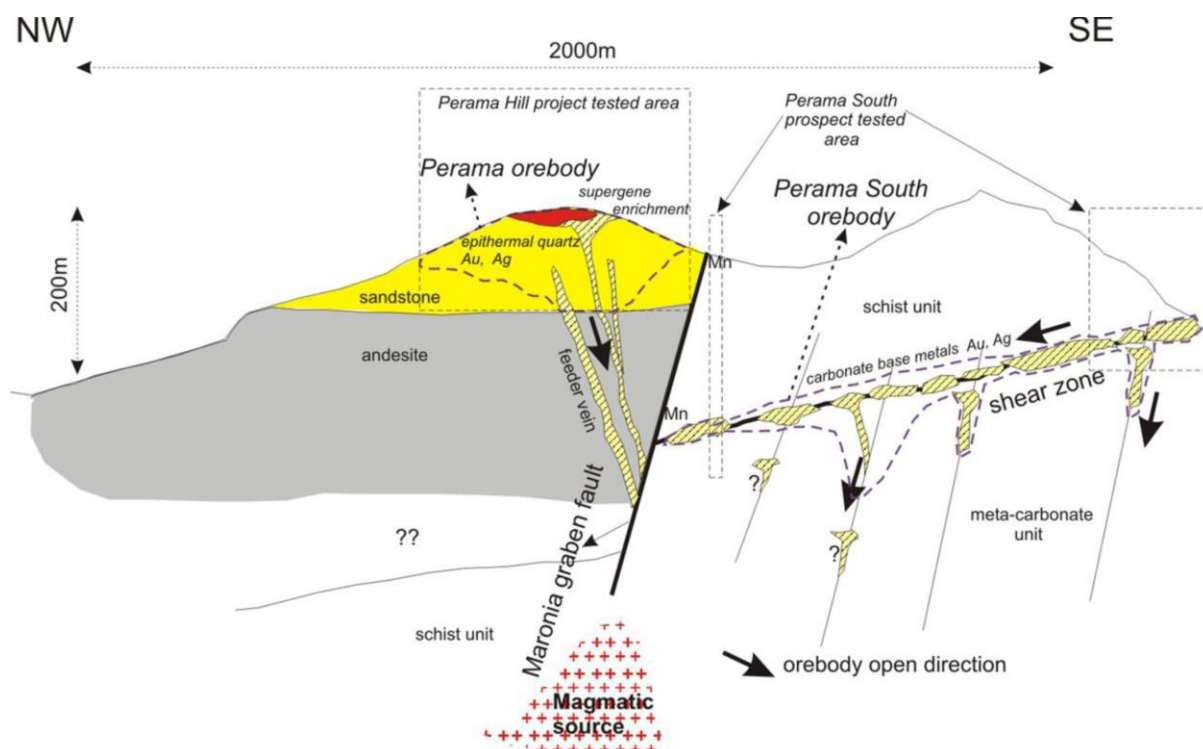
Εικόνα 31. Υπολειμματικός χαλαζίας-vuggy silica (Álvarez R.R.)



Εικόνα 32. Υδροθερμικά breccia, Λόφος Περάματος (Μέλφος-Επιθερμικά συστήματα)



Εικόνα 33. Επιθερμική μεταλλοφορία χρυσού, Λόφος Περάματος (Μέλφος-Επιθερμικά συστήματα)



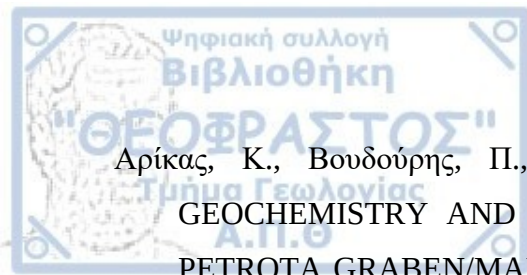
Εικόνα 34. Γεωλογική τομή εμφάνισης κοιτάσματος Λόφου Περάματος (Μέλφος-Επιθερμικά συστήματα)

7. Βιβλιογραφία

- Álvarez R.R. Epitermales. Available at: <https://www.medellin.unal.edu.co/~rrodriguez/Ore-Genesis-Notes/Epithermal%20Au-Ag.htm> [Accessed 25 Feb. 2020].
- Arribas Jr, A. (1995). Characteristics of high-sulfidation epithermal deposits, and their relation to magmatic fluid. Mineralogical Association of Canada Short Course, 23, 419-454.
- Arribas, A., Hedenquist, J. and Gonzalez-Urien, E. (2000). Exploration for Epithermal Deposits. Reviews in Economic Geology, 13(2), 45-77.
- Charchafli, D., Tosdal, R. and Mortensen, J. (2007). Geologic Framework of the Veladero High-Sulfidation Epithermal Deposit Area, Cordillera Frontal, Argentina. Economic Geology, 102(2), 171-192.
- Chouinard, A., Williams-Jones, A. E., Leonardson, R. W., Hodgson, C. J., Silva, P., Téllez, C., ... and Rojas, F. (2005). Geology and genesis of the multistage high-sulfidation epithermal Pascua Au-Ag-Cu deposit, Chile and Argentina. Economic Geology, 100(3), 463-490.
- Dong, G., Morrison, G., and Jaireth, S. (1995). Quartz textures in epithermal veins, Queensland; classification, origin and implication. Economic Geology, 90(6), 1841-1856.
- Einaudi, M. T., Hedenquist, J. W., and Inan, E. E. (2003). Sulfidation state of fluids in active and extinct hydrothermal systems: Transitions from porphyry to epithermal environments. Special Publication-Society of Economic Geologists, 10, 285-314.
- En.wikipedia.org. (2020). Round Mountain Gold Mine. [online] Available at: https://en.wikipedia.org/wiki/Round_Mountain_Gold_Mine [Accessed 25 Feb. 2020].
- Faure, K., Matsuhisa, Y., Metsugi, H., Mizota, C. and Hayashi, S. (2002). The Hishikari Au-Ag Epithermal Deposit, Japan: Oxygen and Hydrogen Isotope Evidence in Determining the Source of Paleohydrothermal Fluids. Economic Geology, 97(3), 481-498.
- Gwinnett Γ. (2019) Japan Gold on acquisition spree again as it picks up five more gold projects. Available at: <https://ca.proactiveinvestors.com/companies/news/902309/japan-gold-on-acquisition-sprees-again-as-it-picks-up-five-more-gold-projects-902309.html> [Accessed 25 Feb. 2020].

- Hedenquist J.W. (2011) Lithocaps and high-sulfidation epithermal deposits. Available at: <http://www.sociedadgeologica.cl/wp-content/uploads/2011/07/3HighSulfidationSantiago.pdf> [Accessed 7 Feb. 2020].
- Hedenquist, J. W., and Arribas, R. A. (2017). Epithermal ore deposits: first-order features relevant to exploration and assessment. *Mineral Resources to Discover*, 1, 47-50.
- Hedenquist, J. W., and Reid, F. (1985). Epithermal gold. Earth Resources Foundation, University of Sydney.
- Holley, E., Bissig, T. and Monecke, T. (2016). The Veladero High-Sulfidation Epithermal Gold Deposit, El Indio-Pascua Belt, Argentina: Geochronology of Alunite and Jarosite. *Economic Geology*, 111(2), 311-330.
- Izawa, E., Urashima, Y., Ibaraki, K., Suzuki, R., Yokoyama, T., Kawasaki, K., ... and Taguchi, S. (1990). The Hishikari gold deposit: high-grade epithermal veins in Quaternary volcanics of southern Kyushu, Japan. *Journal of Geochemical Exploration*, 36(1-3), 1-56.
- Jame St. J. Alunite (Miocene, 21 Ma; Marysvale area, Utah, USA). Available at: <https://www.flickr.com/photos/jsjgeology/32244268115> [Accessed 25 Feb. 2020].
- Kelley, K. D., and Spry, P. G. (2016). Critical elements in alkaline igneous rock-related epithermal gold deposits. *Reviews in Economic Geology*, 18, 195-216.
- Kesler, S. E., and Wilkinson, B. H. (2009). Resources of gold in Phanerozoic epithermal deposits. *Economic Geology*, 104(5), 623-633.
- Kilias, S. P., Naden, J., Cheliotis, I., Shepherd, T. J., Constandinidou, H., Crossing, J., and Simos, I. (2001). Epithermal gold mineralisation in the active Aegean volcanic arc: The Profitis Ilias deposit, Milos Island, Greece. *Mineralium Deposita*, 36(1), 32-44.
- Melfos V., Voudouris P. (2017). Cenozoic metallogeny of Greece and potential for precious, critical and rare metals exploration. *Ore Geology Reviews*, 89, 1030–1057.
- Michaud D. (2015). Epithermal Gold Deposits Characteristics. In: *Mineral Processing and Metallurgy*. Available at: <https://www.911metallurgist.com/blog/epithermal-gold-deposits-characteristics> [Accessed 13 Feb. 2020].
- Naden, J., Kilias, S. P., Leng, M. J., Cheliotis, I., Shepherd, T. J., and Spiro, B. (1999). The Profitis Ilias deposit, Milos island, Greece: A case study of boiling in an epithermal system recorded by stable isotope and fluid inclusion data. *Balkema*, 63-66.
- Sander, M. V., and Einaudi, M. T. (1990). Epithermal deposition of gold during transition from propylitic to potassic alteration at Round Mountain, Nevada. *Economic Geology*, 85(2), 285-311.

- Saunders, J. (2012). Textural Evidence of Episodic Introduction of Metallic Nanoparticles into Bonanza Epithermal Ores. *Minerals*, 2(3), 228-243.
- Shikazono, N., and Takahashi, H. (2010). Compositional Variation of Hydrothermally Altered Volcanic Rocks in Hishikari Gold Epithermal System: A Useful Geochemical Indicator of Gold–Silver Epithermal Mineralization. *Resource geology*, 60(2), 117-128.
- Sidorov, A., Volkov, A. and Savva, N. (2015). Volcanism and epithermal deposits. *Journal of Volcanology and Seismology*, 9(6), 349-357.
- Sillitoe, R. H. (2015). Epithermal paleosurfaces. *Mineralium Deposita*, 50(7), 767-793.
- Sillitoe, R. H., Hannington, M. D., and Thompson, J. F. (1996). High sulfidation deposits in the volcanogenic massive sulfide environment. *Economic Geology*, 91(1), 204-212.
- Smith, D. J., Naden, J., Jenkin, G. R., and Keith, M. (2017). Hydrothermal alteration and fluid pH in alkaline-hosted epithermal systems. *Ore Geology Reviews*, 89, 772-779.
- Taylor, B. E. (2007). Epithermal gold deposits. *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*, 5, 113-139.
- vdocuments.mx. (2020). EPITHERMAL GOLD DEPOSITS. Available at: <https://vdocuments.mx/epithermal-gold-deposits-aduppt.html> [Accessed 25 Feb. 2020].
- Voudouris, P., Mavrogonatos, C., Spry, P., Baker, T., Melfos, V., Klemm, 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. and Melfou, M. (2019). Porphyry and epithermal deposits in Greece: An overview, new discoveries, and mineralogical constraints on their genesis. *Ore Geology Reviews*, 107, pp.654-691.
- 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.
- White, N. C., and Hedenquist, J. W. (1995). Epithermal gold deposits: styles, characteristics and exploration. *SEG newsletter*, 23(1), 9-13.
- Wilson C. and Tunningley A. High Sulphidation Epithermal Deposits. Available at: <https://docplayer.net/79603319-High-sulphidation-epithermal-deposits.html> [Accessed 25 Feb. 2020].
- Yasuhara S. Watanabe, K. and Izawa, E. (2003). Zoning of hydrothermal alteration in the western part of the Hishikari epithermal gold deposit, Southern Kyushu, Japan.



Αρίκας, Κ., Βουδούρης, Π., Kloos, M. and Tesch, C. (2004). PETROLOGY - GEOCHEMISTRY AND METALLOGENESIS OF VOLCANIC ROCKS IN THE PETROTA GRABEN/MARONIA, W.THRACE. Bulletin of the Geological Society of Greece, 36(1), 482.

Κίλιας Σ. (2006). Έρευνα εντοπισμού για επιθερμικά κοιτάσματα Au (Cu,Ag). Σημειώσεις. Τμήμα Γεωλογίας. Πανεπιστήμιο Αθηνών, σελ. 85.

Μέλφος Β., Επιθερμικά κοιτάσματα ευγενών και βασικών μετάλλων - [PDF Document].

Μουντράκης Δ (2010) Γεωλογία και γεωτεκτονική εξέλιξη της Ελλάδας, University Studio Press, Θεσσαλονίκη, 374 σελ.

Παπούλης Δ. (2011) ΥΛΙΚΑ ΤΗΣ ΓΗΣ II : Κρυσταλλοχημεία και Συστηματική των Ορυκτών. Available at: <https://docplayer.gr/45963369-Ylika-tis-gis-ii-krystallohimeia-kai-systimatiki-ton-orykton.html> [Accessed 25 Feb. 2020].

Τριανταφυλλίδης Σ. (2015) ΜΑΘΗΜΑ 5ο. ΥΔΡΟΘΕΡΜΙΚΑ ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΑ. Available at: <https://ocw.aoc.ntua.gr/modules/document/file.php/METAL114/ydrothermika%20koitasmata.pdf> [Accessed 7 Feb. 2020].