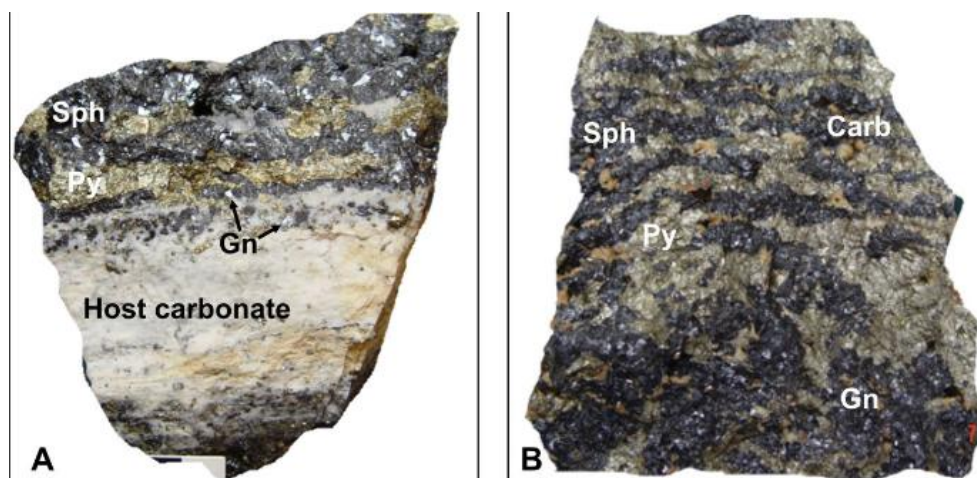




Τριανταφυλλίδου Χρυσούλα

ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΑ ΤΥΠΟΥ ΜΕΤΑΣΩΜΑΤΩΣΗΣ- ΠΕΤΡΟΓΡΑΦΙΑ-ΜΕΤΑΛΛΟΓΕΝΕΣΗ-ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ ΣΤΟΝ ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΧΩΡΟ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ



Επιβλέποντες Καθηγητές: Βασίλειος Μέλφος, Λαμπρινή
Παπαδοπούλου

ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ
2020





ΤΡΙΑΝΤΑΦΥΛΛΙΔΟΥ ΧΡΥΣΟΥΛΑ

ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΑ ΤΥΠΟΥ ΜΕΤΑΣΩΜΑΤΩΣΗΣ- ΠΕΤΡΟΓΡΑΦΙΑ-ΜΕΤΑΛΛΟΓΕΝΕΣΗ- ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ ΣΤΟΝ ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΧΩΡΟ

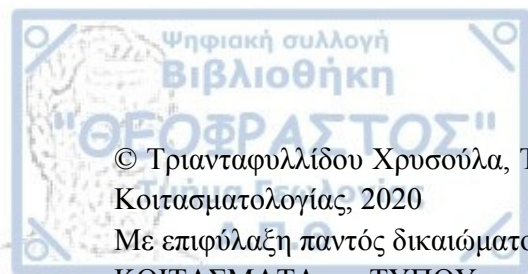
Υποβλήθηκε στο Τμήμα Γεωλογίας
Τομέας Ορυκτολογίας - Πετρολογίας - Κοιτασματολογίας

Επιβλέποντες Καθηγητές

Καθηγητής: Βασίλειος Μέλφος, Λαμπρινή Παπαδοπούλου

© Τριανταφυλλίδου Χρυσούλα , 2020
Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All right reserved.





© Τριανταφυλλίδου Χρυσούλα, Τμήμα Γεωλογίας Α.Π.Θ., Τομέας Ορυκτολογίας, Πετρολογίας, Κοιτασματολογίας, 2020

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος.

ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΑ ΤΥΠΟΥ ΜΕΤΑΣΩΜΑΤΩΣΗΣ-ΠΕΤΡΟΓΡΑΦΙΑ-ΜΕΤΑΛΛΟΓΕΝΕΣΗ- ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ ΣΤΟΝ ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΧΩΡΟ– *Διπλωματική Εργασία*

© Triantafyllidou Chrysoula School of Geology, Department of Mineralogy, Petrology, Economic Geology, 2020

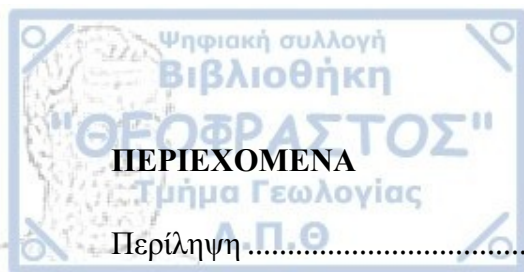
All rights reserved.

Carbonate Replacement Deposits-Petrography-Metallogenesis-Examples from Greece

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
Abstract	2
1. Πρόλογος – Αντικείμενο Εργασίας	3
2. Προέλευση Μεταμορφωμένων πετρωμάτων	4
2.1 Τι είναι η μετασώματωση	4
2.1.1 Υδροθερμικά διαλύματα	5
2.1.2 Τρόποι απόθεσης της μεταλλοφορίας	6
2.3. Σημαντικότεροι χώροι που διευκολύνουν την απόθεση της μεταλλοφορίας	6
2.3.1. ΑΙΤΙΑ ΑΠΟΒΟΛΗΣ ΤΩΝ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΟΡΥΚΤΩΝ	7
3. ΕΙΔΗ ΜΕΤΑΣΩΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ	7
4. ΤΥΠΟΙ ΜΕΤΑΣΩΜΑΤΙΣΜΟΥ	8
5. ΤΥΠΟΙ ΜΕΤΑΣΩΜΑΤΙΣΜΟΥ ΑΝΑΛΟΓΑ ΜΕ ΤΗ ΓΕΩΛΟΓΙΚΗ ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗ	8
6. ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΤΩΝ ΜΕΤΑΣΩΜΑΤΙΚΩΝ ΠΕΤΡΩΜΑΤΩΝ	9
7. ΓΕΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΩΝ ΜΕΤΑΣΩΜΑΤΙΚΩΝ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΩΝ	10
8. ΠΕΝΤΕ ΟΜΑΔΕΣ ΟΡΥΚΤΩΝ ΠΟΥ ΣΥΜΒΑΛΛΟΥΝ ΣΤΗ ΣΥΝΘΕΣΗ ΤΩΝ ΜΕΤΑΣΩΜΑΤΙΤΩΝ	10
9. ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΤΗΣ ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗΣ ΤΩΝ ΜΕΤΑΣΩΜΑΤΙΤΩΝ	11
10. ΥΔΡΟΘΕΡΜΙΚΟΣ ΚΥΚΛΟΣ, ΤΑ ΣΤΑΔΙΑ ΤΟΥ ΚΑΙ Η ΣΧΕΣΗ ΤΟΥ ΜΕ ΤΟΝ ΜΑΓΜΑΤΙΣΜΟ ΚΑΙ ΤΗΝ ΜΕΤΑΛΛΟΓΕΝΕΣΗ	13
11. ΜΕΤΑΣΩΜΑΤΙΚΟΙ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΙ	14
12. ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ ΣΤΟΝ ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΧΩΡΟ	24
12.1 Καινοζωική Μεταλλογένεση της Ελλάδας και δυνατότητα για πολύτιμες, κρίσιμες και σπάνιες εξερευνήσεις μετάλλων	24
12.2 Μετασωματικά Κοιτάσματα στην περιοχή της Ολυμπιάδας Χαλκιδικής	26
12.3. Μετασωματικά Κοιτάσματα στην Περιοχή του Λαυρίου	29
Βιβλιογραφία	33



Τα μετασωματικά κοιτάσματα ,προέρχονται από μια αλλοχημική μεταμορφική διεργασία κατά την οποία η χημική σύνθεση των πετρωμάτων αλλοιώνεται με διαβρωτικό τρόπο ως αποτέλεσμα της αλληλεπίδρασης του πετρώματος με υδροθερμικά διαλύματα. Τα διαλύματα αυτά αποτελούν θερμά υδάτινα ή αέρια διαλύματα και σχηματίζονται μετά από την τελική κρυστάλλωση ενός ενδιάμεσου ή όξινου μίγματος. Υπάρχουν δύο είδη μετασωμάτωσης ο διαχυτικός και ο διηθητικός. Επιπλέον Μεταξύ των διαφόρων τύπων σχηματισμού μετασωματικών κοιτασμάτων υπάρχουν διάφορες αμοιβαίες χωροχρονικές γενετικές σχέσεις. Αυτές οι σχέσεις βοηθούν στη μεταλλογενετική ανάλυση και ακολούθως στον εντοπισμό κοιτασμάτων. Υδροθερμικός κύκλος σημαίνει μια τερματισμένη περίοδο υδροθερμικής δραστηριότητας η οποία χαρακτηρίζεται από μία εξελικτική σύσταση των ιδιοτήτων των μαγματικών διαλυμάτων. Διάφοροι μετασωματικοί σχηματισμοί είναι: φενίτης, skarn, ροντιγκίτης, greissen, μπερεσίτης, προπυλίτης. Τέλος, η Καινοζωική μεταλλογέννεση στην Ελλάδα περιλαμβάνει πολυάριθμα κύρια και μη υδροθερμικά μεταλλοφόρα κοιτάσματα, τα οποία συνδέονται με το κλείσιμο του ωκεανού της Τηθύος και την σύγκρουση της Ευρασιατικής ηπειρωτικής πλάκας στο Αιγαίο πέλαγος. Όπως είναι τα κοιτάσματα κοιτάσματα συμπαγών σουλφιδίων Pb-Zn στο Μαντέμ Λάκκο και στις Μαύρες Πέτρες, και Pb-Zn(Au,Ag) στην Ολυμπιάδα Χαλκιδικής που αναπτύχθηκαν μέσα σε ανθρακικά μάρμαρα του Παλαιοζωικού ή σε παλαιότερους σχηματισμούς των Κερδυλλίων, στην ανατολική χερσόνησο της Χαλκιδικής, στην Βόρεια Ελλάδα. Αλλά σημαντικά είναι και τα κοιτάσματα αργύρου στο Λαύριο , περίπου 50 Km νοτιοανατολικά της Αθήνας.



Abstract

Title: Carbonate Replacement Deposits – Petrography - Metallogenesis-examples from Greece

By Chrysoula Triantafyllidou

Carbonate-hosted base metal deposits originate from chemical metasomatic processes of the host rocks, because of the interaction of the rocks with hydrothermal fluids. These fluids include hot water or gaseous solution and are formed after the final crystallization of the magmas or because of an acidic mixture. There are two mechanisms of carbonate replacement type deposits: diffusion and infiltration. Also among the different types of carbonate replacement, there are several mutual spatio-genetic relationships. These relationships help in metallogenetic analysis and subsequently in locating ore deposits. Hydrothermal cycle means a terminated period of hydrothermal activity characterized by an evolutionary composition of the properties of magmatic fluids. Various metasomatic rock formations include: phenite, skarn, rhodigite, greissen, beresite, propylite. The metallogeny of Cenozoic in Greece is characterized by many economic or subeconomic hydrothermal deposits, which are related with the closure of the Tethyan Ocean and the collision with the Eurasian continent. These deposits are extended in the Rhodope and the Attic-Cycladic massifs. In this geotectonic regime some important deposits such as the Olympias, Μαντέμ Λάκκος and Μάυρες Πέτρες Pb-Zn(Au,Ag) sulfide ore deposits are developed in calcitic marbles of the Paleozoic or older age at the Kerdilia Formation, in NE Chalkidiki Peninsula, Northern Greece. Also silver-rich deposits in Lavrion are very important, located about 50 km SE of Athens.

1. Πρόλογος – Αντικείμενο Εργασίας

Αντικείμενο της παρούσας πτυχιακής διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη των μετασωματικών κοιτασμάτων και οι εμφανίσεις αυτών σε διάφορες περιοχές της Ελλάδας.

Η παρούσα εργασία έχει ως σκοπό:

- Την αναφορά στην γεωλογική δομή και το σχηματισμό των μετασωματικών κοιτασμάτων.
- Ποια είναι η προέλευση των μετασωματικών κοιτάσματος.
- Την ταξινόμηση και την ορυκτολογική-γεωχημική μελέτη των τύπων ορυκτών των μετασωματικών κοιτασμάτων.
- Την καταγραφή των μετασωματικών κοιτασμάτων που έχουν εντοπιστεί σε περιοχές της Ελλάδας.

Στο σημείο αυτό θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους όσους συνέβαλαν στη περάτωση της παρούσας εργασίας.

Τους επιβλέποντες Καθηγητές του Τομέα Ορυκτολογίας – Πετρολογίας – Κοιτασματολογίας, κ. Βασίλη Μέλφο και κα. Λαμπρινή Παπαδοπούλου, ευχαριστώ θερμά για την ανάθεση του θέματος, το αμείωτο ενδιαφέρον και τις χρήσιμες συμβουλές τους.

Τις θερμές μου ευχαριστίες επίσης στον Αναπληρωτή Καθηγητή του Τομέα Ορυκτολογίας – Πετρολογίας – Κοιτασματολογίας, κ. Βασίλειο Μέλφο, για το ενδιαφέρον, τις υποδείξεις, τα σχόλια και τη συνολική υποστήριξη σε όλα τα στάδια της παρούσας εργασίας.

Σημαντική ήταν επίσης η συμβολή της Αναπληρώτριας Καθηγήτριας κ. Λαμπρινής Παπαδοπούλου κατά τη πετρολογική μελέτη του θέματος της εργασίας.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω την Διεύθυνση του Τομέα Ορυκτολογίας -Πετρολογίας - Κοιτασματολογίας για τη διάθεση των χώρων εργασίας και τη χρήση του τεχνικού εξοπλισμού.

2. Προέλευση Μεταμορφωμένων πετρωμάτων

Τα μεταμορφωμένα πετρώματα προέρχονται από μεταμόρφωση προϋπαρχόντων πετρωμάτων σε συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας υψηλότερες από εκείνες που επικρατούν στην επιφάνεια της Γης. Τα αρχικά πετρώματα τροποποιήθηκαν ορυκτολογικά, ιστολογικά ή και χημικά χωρίς να περάσουν από το στάδιο της τήξης, από ένα σύνολο διεργασιών που ονομάζουμε μεταμόρφωση. Τα αρχικά πετρώματα λέγονται πρωτόλιθοι.

Είδη πρωτόλιθων:

1. Υπερμαφικοί: πολύ μεγάλη αναλογία σε Mg, Fe, Ni, Cr.
2. Μαφικοί: πολύ μεγάλη αναλογία σε Mg, Fe, Ca
3. Σχιστοπηλοί: μεγάλη αναλογία σε Al, K, Si
4. Ανθρακικοί: μεγάλη αναλογία σε Ca, $MgCO_2$
5. Χαλαζιακοί: μόνο SiO_2
6. Χαλαζιο-αστριούχοι: μεγάλη αναλογία σε Si, Na, K, Al

Ανάλογα με τις αλλαγές η μεταμόρφωση είναι:

1. Ισοφασική: μεταβολή μόνο του ιστού
2. Αλλοφασική: μεταβολή του ιστού και των ορυκτών
3. Αλλοχημική: η χημική σύσταση μεταβάλλεται
4. Ισοχημική: η χημική σύσταση παραμένει ίδια.

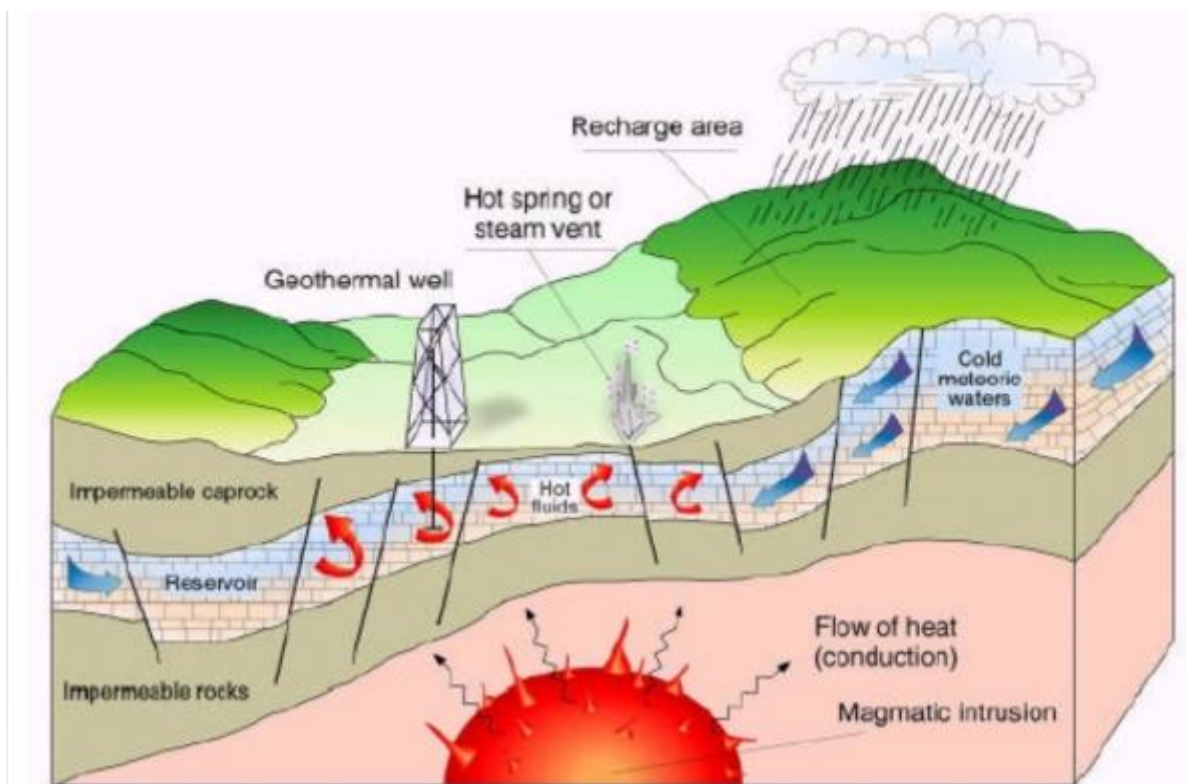
2.1 Τι είναι η μετασώματωση

Είναι μια αλλοχημική μεταμορφική διεργασία κατά την οποία η χημική σύνθεση των πετρωμάτων αλλοιώνεται με διαβρωτικό τρόπο ο οποίος προκαλεί την εισαγωγή ή/και την εξαγωγή χημικών συστατικών ως αποτέλεσμα της αλληλεπίδρασης του πετρώματος με υδατικά διαλύματα. Πρόκειται για μια ταυτόχρονη διάλυση και επανατοποθέτηση, κατά τη διάρκεια του

μετασώματωσης το πέτρωμα παραμένει σε στερεά κατάσταση. Όπως προκύπτει από τον ορισμό της η μετασώματωση συνεπάγεται μεταβολές στη χημική σύσταση των αρχικών πετρωμάτων και τον σχηματισμό νέων αλλάζοντας τα χαρακτηριστικά των πετρογενετικών συστατικών τους. Οι μεταβολές αυτές δεν είναι αναστρέψιμες.

2.1.1 Υδροθερμικά διαλύματα

Τα υδατικά αυτά διαλύματα που προκαλούν τη μετασώματωση είναι τα υδροθερμικά. Τα οποία αποτελούν θερμά υδάτινα ή αέρια διαλύματα και σχηματίζονται μετά από την τελική κρυστάλλωση ενός ενδιάμεσου ή οξινού μάγματος. Το υδροθερμικό στάδιο αρχίζει από την στιγμή που επέρχεται η υγροποίηση του νερού και συμπύκνωση σε αυτό των μεταλλικών συστατικών. Κατά την άνοδο του τα διαλύματα μετακινούνται μέσα στα πετρώματα κατά μήκος των διακλάσεων, των πόρων του πετρώματος και των ορίων των κόκκων των ορυκτών. Αυτό σημαίνει ότι τα θερμά διαλύματα έρχονται σε επαφή με τα πετρώματα μέσα από τα οποία περνούν και αντιδρούν με αυτά, προσλαμβάνουν επιπλέον πτητικά συστατικά και μεταλλικά στοιχεία.



Εικόνα: απεικονίζεται το υδροθερμικό στάδιο

2.1.2 Τρόποι απόθεσης της μεταλλοφορίας

Τα υδροθερμικά διαλύματα μετά την απομάκρυνση τους από το μάγμα ή και μέσα στο μαγματικό πέτρωμα, σχηματίζουν μεταλλοφορίες με διαφορετικούς τρόπους:

α) Με αντίδραση και αντικατάσταση του γειτονικού πετρώματος (μετασωμάτωση): καθορίζεται από το είδος του πετρώματος.

β) Με απόθεση των μεταλλικών στοιχείων σε κενούς χώρους των πετρωμάτων :προϋποθέτει την παρουσία ή δημιουργία των κενών χώρων.

Για την απόθεση μεταλλοφορίας απαιτείται μία “προετοιμασία” δηλαδή μια αύξηση του πορώδους και της διαπερατότητας του πετρώματος ξενιστή ή αύξηση της ικανότητας του για να αντιδράσει με τα μεταλλοφόρα διαλύματα.



Εικόνα: παράδειγμα απεικόνισης της μεταλλοφορίας στην Ολυμπιάδα Χαλκιδικής

2.3. Σημαντικότεροι χώροι που διευκολύνουν την απόθεση της μεταλλοφορίας

1. Πόροι του πετρώματος
2. Επιφάνειες απόψυξης κατά τη στερεοποίηση του πετρώματος
3. Χώροι από έντονα κατακλαστικά φαινόμενα

4. Ρήγματα

5. Άλλες τεκτονικές δομές (π.χ πτυχώσεις)

6. Στρωματογραφικές δομές: επίπεδα στρωμάτωσης, σχιστότητας .

2.3.1. ΑΙΤΙΑ ΑΠΟΒΟΛΗΣ ΤΩΝ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΟΡΥΚΤΩΝ

Τα μάγματα που προσφέρουν μεταλλοφόρα ρευστά προς τα περιβάλλοντα πετρώματα είναι τα ενδιάμεσης σύστασης μάγματα που δίνουν πετρώματα: χαλαζιακοί μονζονίτες, μονζονίτες, γρανοδιορίτες, χαλαζιακοί διορίτες και προκαλούν μετασωματικά κοιτάσματα.

3. ΕΙΔΗ ΜΕΤΑΣΩΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ

Υπάρχουν δύο βασικά είδη μετασωμάτωσης:

Διαχυτικός (diffusional) μετασωμάτωση: πραγματοποιείται από τη διάχυση ενός προς διάλυση υλικού μέσω μιας στάσιμης διάλυσης (υγρό). Η διάχυση συντελείται από χημική δραστηριότητα με την εισχώρηση στους πόρους του πετρώματος.

Διηθητικός (infiltrational) μετασωμάτωση: πραγματοποιείται από τη μεταφορά του διαλυμένου υλικού καθώς διηθείται (φιλτράρεται) διαμέσου των πετρωμάτων που το περιέχουν. Η διήθηση συντελείται από την πίεση και τη συγκέντρωση όπου το προϊόν της διήθησης εισχωρεί στους πόρους του πετρώματος.

Η μετασωμάτωση, γενικά, περιορίζεται από υδροθερμικές συνθήκες που σχετίζονται με ενδογενείς διαδικασίες στον φλοιό αλλά και στον μανδύα όπου μεταβολές, με πλήρως καθορισμένες διαδικασίες σε υψηλές πιέσεις και θερμοκρασίες, συσχετίζονται με συμπυκνωμένα υγρά των οποίων οι ιδιότητες είναι σε ενδιάμεση κατάσταση (μεταξύ υγρών και μάγματος). Αυτές οι διεργασίες αναφέρονται ως μανδυακός μετασωμάτωση.

4. ΤΥΠΟΙ ΜΕΤΑΣΩΜΑΤΙΣΜΟΥ

Ο Korzhinskii (1953) θεωρώντας σημαντική τη σχέση του μετασώματωσης και του μαγματισμού τον διαχώρισε σε δύο στάδια:

1. Μετασώματωση του μαγματικού σταδίου

2. Μετασώματωση του μεταμαγματικού σταδίου

Στο πρώτο στάδιο ανήκουν τα μετασωματικά κοιτάσματα που σχηματίστηκαν στα περιβάλλοντα πετρώματα σε περιόδους όπου τα διαλύματα μαγματικών τηγμάτων διαχωρίστηκαν από την υγρή μαγματική μάζα. Στο δεύτερο στάδιο οι μετασωματικές διεργασίες είναι αμφίδρομες και πραγματοποιούνται μετά τη στερεοποίηση και κρυστάλλωση των διεισδυτικών όγκων και συσχετίζονται με υδροθερμικά διαλύματα που προέρχονται από το ψυχόμενο μάγμα και/ή από άλλες εξωγενείς θερμές πηγές που οφείλονται, για παράδειγμα στην ανάμιξη μαγματικών υγρών με ύδατα κατακρήμνισης.

Στη συνέχεια υποδιείρεσε τις μεταμαγματικές μετασωματικές διεργασίες σε τρία υποστάδια:

- α) Του πρώιμου αλκαλικού σταδίου
- β) Της απόπλυσης των οξέων και των αποθέσεων
- γ) του τελικού υδροθερμικού σταδίου

Η διαφοροποίηση αυτή οφείλεται ,στις μεταβολές της οξύτητας των μαγματογενών υγρών των οποίων η οξύτητα φθάνει σε ένα μέγιστο και μετά μειώνεται.

5. ΤΥΠΟΙ ΜΕΤΑΣΩΜΑΤΙΣΜΟΥ ΑΝΑΛΟΓΑ ΜΕ ΤΗ ΓΕΩΛΟΓΙΚΗ ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗ

1. **Αυτομετασώματωση** :σχηματίζεται στη κορυφή ή κοντά στις φλέβες του μαγματικού σώματος κατά τη διάρκεια του πρώιμου μεταμαγματικού σταδίου. Τυπικές διεργασίες αυτομετασώματωσης είναι για παράδειγμα, η αλβιτίωση σε γρανιτικά πλουτωνικά πετρώματα και η σερπεντινίωση των υπερβασικών πετρωμάτων.

2. **Μετασωμάτωση επαφής:** πραγματοποιείται στο πρώιμο μεταμαγματικό στάδιο ,στην επαφή διείσδυσης μεταξύ δύο διαφορετικών πετρωμάτων και μεταξύ ενός μαγματικού σώματος με πέτρωμα ,το οποίο μπορεί να συμβεί σε διάφορα στάδια της μαγματικής εξέλιξης.

3. **Διμετασωμάτωση:** προκαλεί αμφίδρομη διάχυση διαφορετικών συστατικών μεταξύ των πετρωμάτων κατά μήκος της εφαιπτόμενης επιφάνειας.

4. **Παραφλέβιος μετασωμάτωση:** αναπτύσσεται σε διάφορα γεωλογικά περιβάλλοντα καταλαμβάνοντας μεγάλες εκτάσεις. Συνήθως σχηματίζει αλκαλικά μετασωματικά πετρώματα κατά τη διάρκεια των μαγματικών και πρώιμων μεταμαγματικών σταδίων. Τα περιοχικά μεταμορφωμένα πετρώματα των μεσαίων και ρηχών βαθών του φλοιού σχηματίζουν τις εξωτερικές ζώνες όπου πραγματοποιούνται διεργασίες δημιουργίας κοιτασμάτων μετάλλων όπως greisen, πετρώματα χαλαζιο-σερικίτη. Αν και υπάρχουν δυσκολίες να διακρίνουμε τις εξωτερικές μετασωματικές ζώνες από εκείνες του μεταμορφισμού, αυτό όμως δείχνει και τη στενή γενετική συγγένεια μεταξύ μεταμορφισμού και μετασωμάτωσης στο μαγματικό ορίζοντα μη οποία οφείλεται στις αλληλένδετες διεργασίες του μεταμορφισμού, μετασωμάτωσης και μαγματισμού.

6. ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΤΩΝ ΜΕΤΑΣΩΜΑΤΙΚΩΝ ΠΕΤΡΩΜΑΤΩΝ

Για να προσδιορίσουμε ένα μαγματικό πέτρωμα αρκεί να έχουμε γνώση των ορυκτολογικών και χημικών συνθέσεων καθώς επίσης και τα χαρακτηριστικά της δόμησης τους όπως γίνεται στα ιζηματογενή και μεταμορφωμένα πετρώματα. Όμως στην περίπτωση των μετασωματικών πετρωμάτων αυτές οι γνώσεις είναι ανεπαρκής διότι αυτά εξαρτώνται από τη ταυτόχρονη επίδραση των αντικατεστημένων πετρωμάτων ,ως προς το πόσο έχει "προχωρήσει" η μετασωμάτωση και από τις ιδιότητες των διαλυμάτων. Έτσι για να προσδιοριστούν με ακρίβεια οι μετασωματίτες ,τα κριτήρια που θα χαρακτηρίσουν τις πετρογενετικές διαδικασίες και κυρίων τις ιδιότητες των διαλυμάτων ,είναι θεμελιώδους σπουδαιότητας .

7. ΓΕΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΩΝ ΜΕΤΑΣΩΜΑΤΙΚΩΝ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΩΝ

Κάθε μετασωματικό σώμα που σχηματίζεται από τη δράση των υδροθερμικών διαλυμάτων ενός συγκεκριμένου γενετικού τύπου ,έχει μια ζωνώδη δομή η οποία χαρακτηρίζεται είτε ως μετασωματική στήλη ,άν το μετασωματικό σώμα σχηματίζεται σε ομογενές περιβάλλον ή μετασωματικές στήλες ,άν σχηματίζεται σε ανομοιογενές περιβάλλον.Η σύνθεση μια εσωτερικής ζώνης που χαρακτηρίζει μία κατάσταση ισορροπίας μεταξύ του πετρώματος και της αρχικής διάλυσης προσδιορίζεται από τις ιδιότητες της διάλυσης.Η σύνθεση μια εξωτερικής ζώνης που χαρακτηρίζει μια κατάσταση ισορροπίας μεταξύ του πετρώματος και της εξατμισμενης διάλυσης προσδιορίζεται από τη σύνθεση του πετρώματος που υπόκειται σε υποκατάσταση.

Σε κάθε υδροθερμική διεργασία μετασωμάτωσης διακρίνονται, αφενός ένα πρώιμο στάδιο μετασωμάτωσης στο πέτρωμα και αφετέρου τα τελικά στάδια στα οποία σχηματίζονται οι φλέβες, πληρώνονται τα ρήγματα και οι υδροθερμικές τροποποιήσεις υπερτίθενται των νωρίτερα σχηματιζόμενων μετασωματίτων .

8. ΠΕΝΤΕ ΟΜΑΔΕΣ ΟΡΥΚΤΩΝ ΠΟΥ ΣΥΜΒΑΛΛΟΥΝ ΣΤΗ ΣΥΝΘΕΣΗ ΤΩΝ ΜΕΤΑΣΩΜΑΤΙΤΩΝ:

- 1.Τα ορυκτά που σχηματίζονται στα πρώιμα στάδια του υδροθερμικού μετασωμάτωσης.
- 2.Τα ορυκτά του αρχικού πετρώματος παραμένουν σταθερά κατά τη διάρκεια του μετασωμάτωσης.
- 3.Υπόλοιπα ορυκτών ,τα οποία δεν συμμετείχαν στην αντικατάσταση, παρά τη σταθερότητα τους κατά τη διάρκεια του μετασωμάτωσης αλλά και απέτρεψαν την ολοκλήρωση των μετασωματικών αντιδράσεων, διατηρήθηκαν στα μετασωματικά πετρώματα.
- 4.Τα ορυκτά που σχηματίστηκαν στα τελικά στάδια των οποίων η ανάπτυξη δεν ξεκίνησε στα πρώιμα στάδια

5. Τα ορυκτά τα οποία συνετέλεσαν στη σύνθεση των φλεβών, στη τσιμεντοποίηση των ρηγμάτων και είχαν σχηματιστεί εξαιτίας της πλήρωσης των ελεύθερων κοιλοτήτων.

9. ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΤΗΣ ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗΣ ΤΩΝ ΜΕΤΑΣΩΜΑΤΙΤΩΝ

Η έννοια των συσχετιζόμενων ομάδων μετασωματικών φάσεων ή σχηματισμών, επέτρεψε την ανάπτυξη μιας ιεραρχικής γεωλογικής δομής, που καθορίζει το σύστημα της ταξινόμησης, όπου κάθε μετασωματικός σχηματισμός περιλαμβάνει ένα σύνολο πετρωμάτων με κοινό χαρακτηριστικό μια συγκεκριμένη πετρογενετική διεργασία.

Η ιεραρχική δόμηση αποτελείται ως ακολούθως:

A. Μετασωματική ζώνη: αντιπροσωπεύει ένα φυσικό σώμα που σχηματίστηκε από μία σταθερή παραγένεση ορυκτών σε ισορροπία. Αυτή η ζώνη θεωρείται ως το αρχικό στοιχείο της ιεραρχικής κλίμακας για την ταξινόμηση.

B. Η μετασωματική φάση: αντιπροσωπεύει την ολότητα των μεταμορφικών ζωνών, οι οποίες αναπτύσσονται κάτω από τις ίδιες φυσικοχημικές συνθήκες οι οποίες είναι: η σύνθεση των αρχικών και μεταμορφωμένων πετρωμάτων, οι συνθήκες θερμοκρασίας και πίεσης, pH, Eh και η σύνθεση των μετασωματικών διαλυμάτων.

Γ. Ο μετασωματικός σχηματισμός : αντιπροσωπεύει μια ολότητα μεταμορφικών φάσεων οι οποίες σχηματίστηκαν από διαλύματα συγκεκριμένου πετρογενετικού τύπου. Αυτές οι φάσεις διαφέρουν μεταξύ τους από την εμφάνιση ή εξαφάνιση ορυκτολογικών παραγενέσεων ή μετασωματικών ζωνών που χαρακτηρίζονται από την διαφοροποίηση ενός ή περισσότερων φυσικοχημικών παραμέτρων.

Δ. Η ομάδα των μετασωματικών σχηματισμών: αντιπροσωπεύει μετασωματίτες, με γνωστά γενετικά χαρακτηριστικά, διαδοχικής επεξεργασίας οι οποίοι ανήκουν σε ποικίλους τύπους μετασχηματισμών αλλά του ίδιου υδροθερμικού κύκλου. Τέτοιες ομάδες διακρίνονται για την εξάρτησή τους από ένα τύπο μαγματισμού και από το βάθος εμφάνισής του. Για παράδειγμα μια γρανιτική εισχώρηση σε ένα τύπο μαγματισμού, σχηματίζει πυριτικο-αλκαλικούς μετασωματίτες, μαγνησιούχα skarns, αστριούχους μετασωματίτες,

ασβεστο-skarns και greisens τα οποία διαμορφώνουν μια ομάδα από συσχετιζόμενους μετασωματικούς σχηματισμούς. Η βασική έννοια των μεταμορφικών σχηματισμών είναι η οξινο-βασική αντίδραση των υδροθερμικών υγρών και η εν γένει διαχρονική τους εξέλιξη καθώς ψύχονται από ασθενώς αλκαλικά σε όξινα και ακολούθως σε πλήρως αλκαλικά υποστάδια. Η σχετικά μετασωματική διεργασία συνεπάγεται μεταβολή στη συνολική μάζα που οφείλεται στην τροφοδοσία/απώλεια των όξινων και αλκαλικών βασικών συστατικών. Τα όξινα μετασωματικά πετρώματα διακρίνονται για:

α) Τον εμπλουτισμό με όξινα συστατικά

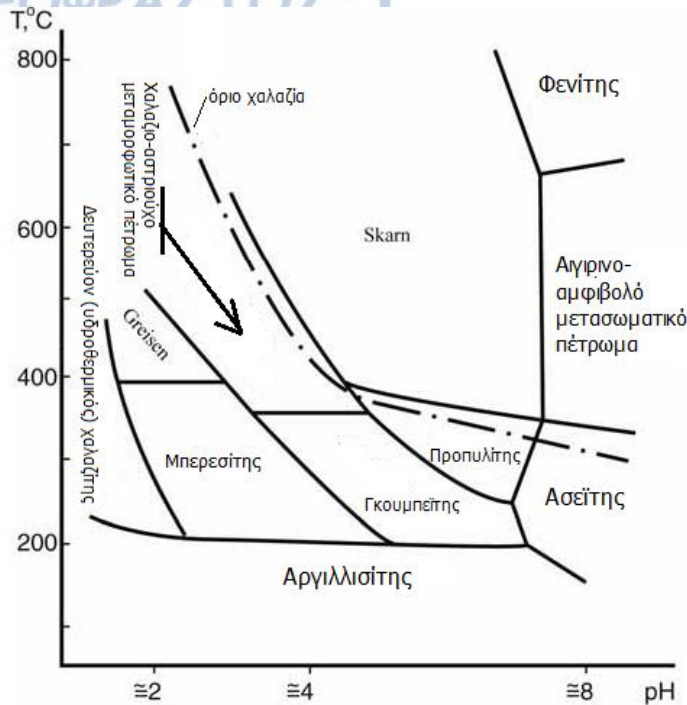
β) Την εξάντληση των αλκαλίων και των αλκαλικών γαιών που συσχετίζονται με τα αρχικά πετρώματα.

Κάθε ένας από τους μετασωματικούς σχηματισμούς σχετίζεται με τα αρχικά πετρώματα. Ο αλκαλικός και βασικός μεταμορφισμός συντελεί στην αντιθέτου φοράς ανταλλαγής μάζας. Έτσι κάθε μετασωματικός σχηματισμός διαχωρίζεται ευκρινώς σε συγκεκριμένες τιμές T-pH και οι πιο κοινοί σχηματισμοί φαίνονται στο σχήμα:

Τα πεδία του σχήματος κατατάσσονται σε δύο κατηγορίες σύμφωνα με το αν έχουν χαλαζία ή όχι .

Η όξινη κατηγορία διαιρείται περαιτέρω σε τρεις υποκατηγορίες σχηματίζοντας ενότητες ίδιας περίπου οξύτητας σύμφωνα με την σταθερότητα των:

- 1) αργιλικών ορυκτών
- 2) μοσχοβίτη υδρο-μαρμαρυγιών
- 3) αστρίων



Εικόνα: διάγραμμα θερμοκρασίας και pH

Η αλκαλική κατηγορία διαιρείται με τον ίδιο τρόπο σε υποκατηγορίες σταθερών παραγενέσεων σύμφωνα με το περιεχόμενο σε :αστρίους και αστροειδή

10. ΥΔΡΟΘΕΡΜΙΚΟΣ ΚΥΚΛΟΣ, ΤΑ ΣΤΑΔΙΑ ΤΟΥ ΚΑΙ Η ΣΧΕΣΗ ΤΟΥ ΜΕ ΤΟΝ ΜΑΓΜΑΤΙΣΜΟ ΚΑΙ ΤΗΝ ΜΕΤΑΛΛΟΓΕΝΕΣΗ

Μεταξύ των διαφόρων τύπων σχηματισμού μετασωματίτων υπάρχουν διάφορες αμοιβαίες χωροχρονικές γενετικές σχέσεις. Μερικές απ' αυτές είναι διαδοχικές μεταμαγματικές παραγωγικές δραστηριότητες και άλλες ανήκουν σε στάδια διαφορετικών χρονικών περιόδων. Αυτές οι σχέσεις βοηθούν στη μεταλλογενετική ανάλυση και ακολούθως στον εντοπισμό κοιτασμάτων. Υδροθερμικός κύκλος σημαίνει μια τερματισμένη περίοδο υδροθερμικής δραστηριότητας η οποία χαρακτηρίζεται από μία εξελικτική σύσταση των ιδιοτήτων των μαγματικών διαλυμάτων.

Η έννοια του υδροθερμικού κύκλου μας επιτρέπει όχι μόνο να περιγράψουμε μια φυσική ομάδα υδροθερμικών μετασωματικών διεργασιών αλλά και να καθιερώσει μια παραλληλότητα μεταξύ της υδροθερμικής δραστηριότητας και άλλων γεωλογικών διεργασιών, όπως ο μαγματισμός. Αυτό

δεικνύει ότι η υδροθερμική δραστηριότητα, προφανώς, συνδέεται με συμπαγείς μαγματικούς όγκους καθώς επίσης και με όλα τα χαρακτηριστικά του μαγματικού συμπλέγματος, καθένα από τα οποία προσδιορίζει ένα στάδιο του τεκτονο-μαγματικού κύκλου.

Οι περισσότεροι από τους γνωστούς τύπους μετασωματίτων χαρακτηρίζονται για την σύνδεσή τους με τέτοιους μαγματικούς σχηματισμούς. Σε κάποιες περιπτώσεις η σχέση είναι άμεση, γενετική και εκφράζεται με τη επαφή των μετασωματίτων με μαγματικά σώματα καθορισμένης σύνθεσης. Σ' άλλες περιπτώσεις οι μετασωματίτες βρίσκονται πολύ μακριά από τα μαγματικά σώματα κατά το χρόνο του σχηματισμού τους. Ακόμη έχει παρατηρηθεί σχέση μεταξύ του μετασωματικού τύπου και της φύσης των σχηματισμών. Σ' αυτή την περίπτωση ομιλούμε για παραγενετικές συνδέσεις. Οι εν λόγω αλληλεξαρτήσεις θεωρούνται, γενικώς, υπεύθυνες για τους υδροθερμικούς μετασωματικούς σχηματισμούς οι οποίοι αναπτύσσονται σε περιοχές με μαγματισμό γρανιτοειδών, αλκαλικών και υπερβασικών διεισδύσεων ή σε περιοχές με όξινη η αλκαλική ηφαιστειότητα.

Υπάρχουν μεταξύ των διεργασιών του μετασώματωσης, μετασχηματισμού και των ορυκτολογικών κοιτασμάτων οι ακόλουθες σχέσεις:

α) εμφανίζονται συγχρόνως και η μεταλλογένεση εντοπίζεται σε συγκεκριμένες ζώνες της μετασωματικής στήλης,

β) η μεταλλογένεση λαμβάνει χώρα λίγο αργότερα από ότι στους μετασωματίτες ως αποτέλεσμα κοινής υδροθερμικής διεργασίας και

γ) οι μετασωματίτες και η μεταλλογένεση δεν συνδέονται γενετικά αν και ο μετασώματωση συμμετέχει στην μεταλλογένεση.

11. ΜΕΤΑΣΩΜΑΤΙΚΟΙ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΙ

11.1. Φενίτης: Οι φενίτες είναι υψηλής θερμοκρασίας μετασωματικά πετρώματα, τα οποία σχηματίζονται στο μαγματικό στάδιο κατά την διείσδυση αλκαλικών σε πυριτικά πετρώματα, με σύνθεση K-Na αστρίους (περθίτες-αντιπερθίτες), αλβίτη, νεφελίνη, αλκαλικούς πυρόξενους (αιγιρίνη, διοψίδιο, αιγιρινοαυγίτη), αλκαλικούς αμφίβολους [ριμπεκίτη, χαστινγκσίτη (hastingsite), ριχτερίτη, αρφβεδσονίτη (arfvedsonite)] και με επουσιώδη βιοτίτη, φλογοπίτη, μαρμαρυγίες, ιλμενίτη, τιτανίτη, απατίτη και μερικές φορές ασβεστίτη.



Εικόνα: πέτρωμα φενίτης

11.2 Skarn: είναι ένα μετασωματικό πέτρωμα που σχηματίζεται κατά την επαφή μεταξύ πυριτικού (ή μαγματικού τήγματος) με ένα ανθρακικό πέτρωμα. Αποτελείται από Ca-Mg-Fe-Mn πυριτικά τα οποία είναι σχεδόν άνυδρα. Τα skarns (Goldschmidt, 1911) μπορούν να σχηματίσουν επίπεδα σώματα κατά μήκος της επαφής (skarns επαφής) ή αναπτύσσονται με την μορφή φλεβών και σωληνών εισχωρώντας σε ανθρακικά ή/και πυριτικά πετρώματα (φλεβικά skarns). Ακόμη σχηματίζονται είτε από μαγματικά ή άλλα πυριτικά πετρώματα και ονομάζονται ένδοσκαρνς (endoskarns), ή από ανθρακικά και ονομάζονται έξωσκαρνς (exoskarns). Σύμφωνα με την σύνθεσή τους και τα γενετικά χαρακτηριστικά τους τα skarns διαιρούνται σε δύο μεγάλες ομάδες τα μαγνησιακά skarns τα οποία αναπτύσσονται στις επαφές με μαγνησιο-ανθρακικά πετρώματα (δολομίτες ή μαγνησίτες), και τα ασβεστο-skarns τα οποία σχηματίζονται σε επαφές με ασβεστόλιθους και μάρμαρα φτωχά σε Mg.

11.2.1 Μαγνησιακά skarns : είναι υψηλής θερμοκρασίας πετρώματα περιέχοντα φορστερίτη, διοψίδιο, σπινέλλιο, περίκλαστο, κλινοχουμίτη, φλογοπίτη, παργασίτη. Συνήθως φιλοξενούν κοιτάσματα σιδήρου, φλογοπίτη καθώς και Cu, Au, Fe-Mg βορικά.

Οι παρακάτω κύριοι τύποι μετασωματικών στηλών είναι οι πλέον διαδομένοι των μαγνησιακών skarns του **μαγματικού σταδίου**

1. μάγμα – κλινοπυρόξενος + σπινέλλιος – ολιβίνης + σπινέλλιος + περίκλαστο – δολομίτης;

2. μάγμα – κλινοπυρόξενος + σπινέλλιος – κλινοπυρόξενος + ολιβίνης – σπινέλλιος – ολιβίνης + σπινέλλιος + ασβεστίτης – ολιβίνης + σπινέλλιος + δολομίτης + ασβεστίτης – δολομίτης;

3. μάγμα – κλινοπυρόξενος + πλαγιόκλαστο – κλινοπυρόξενος + σπινέλλιος – φορστερίτης + σπινέλλιος – φορστερίτης + σπινέλλιος + δολομίτης – δολομίτης.

Τα μαγνησιακά skarns, τα οποία συσχετίζονται με μεταμαγματικά στάδια, έχουν μελετηθεί σε γνευσιακά συμπλέγματα του Προκάμβριου. Σχηματίζονται με αντιδράσεις επαφής δολομιτών και αργίλλοπυριτικών πετρωμάτων μέσω μηχανισμών διάχυσης και διήθησης και λειτουργούν συνήθως ως αντικαταστάτες (μερικώς ή ολικώς) των πρώην μαγνησιακών skarns που αναπτύχθηκαν κατά το μαγματικό.

Η παραγενετική ανάλυση δείχνει ότι καθοριστικής σημασίας του σχηματισμού τους, εκτός από το βάθος, είναι το αλκαλικό και σιδηρούχο περιβάλλον. Ο φάσεις που επηρεάζονται από το εν λόγω περιβάλλον είναι:

α) φάσεις πυρόξενου - σπινέλλιου σε συνθήκες χαμηλής αλκαλικότητας και περιεκτικότητας σε σίδηρο,

β) φάσεις σπινέλλιου – παργασίτη σε συνθήκες αυξανόμενης περιεκτικότητας σε σίδηρο αλλά όχι υψηλής αλκαλικότητας,

γ) φάσεις φλογοπίτη χαρακτηριζόμενες από μέση αλκαλικότητα και χαμηλή περιεκτικότητα σε σίδηρο και

δ) φάσεις φλογοπίτη - παργασίτη σε συνθήκες αυξανόμενης περιεκτικότητας και κανονικής αλκαλικότητας

Η ιδιαιτερότητα της ζώνωσης είναι ότι καθορίζεται από την αλληλεπίδραση των αδρανών συστατικών, από τον μηχανισμό ανάμιξή τους, από το περιβάλλον των μεταμαγματικών διαλυμάτων και από το βαθμό αλκαλικότητας και περιεκτικότητας σε σίδηρο.

Διακρίνονται οι παρακάτω τύποι μετασωματικών στηλών του μεταμαγματικού σταδίου των μαγνησιακών skarns:

1. γνεύσιος – σχιστόλιθοι: κλινοπυρόξενος + πλαγιόκλαστο + σκαπόλιθος → κλινοπυρόξενος + σκαπόλιθος → κλινοπυρόξενος + σπινέλλιος → κλινοπυρόξενος → φορστερίτης + ασβεστίτης + δολομίτης.

2. γνεύσιος – κλινοπυρόξενος + πλαγιόκλαστο + σκαπόλιθος → κλινοπυρόξενος + σκαπόλιθος → κλινοπυρόξενος + παραγασίτης → κλινοπυρόξενος + σπινέλλιος → κλινοπυρόξενος + φορστερίτης + ασβεστίτης → δολομίτης.

3. γνεύσιος → κλινοπυρόξενος + πλαγιόκλαστο + σκαπόλιθος → κλινοπυρόξενος + σκαπόλιθος → κλινοπυρόξενος + φλογοπίτης → φλογοπίτης → κλινοπυρόξενος → φορστερίτης + ασβεστίτης → δολομίτης.



Εικόνα: μαγνησιούχο πέτρωμα Skarn

11.2.2 Ασβεστο-skarn: είναι υψηλής έως μέσης θερμοκρασίας πέτρωμα του οποίου η ορυκτολογική σύνθεση χαρακτηρίζεται από την υποχρεωτική παρουσία ασβεστο-πυρόξενου παράλληλα με διοψίδιο – χεδενμπεργκίτη (hedenbergite) καθώς και ασβεστο-γρανάτες με γροσσουλάριο – ανδραδίτη. Όλα τα ασβεστο-skarn ανήκουν στο μεταμαγματικό στάδιο. Ουσιώδη ορυκτά είναι γρανιτικός γρανάτης, βεζουανίτης, κλινοπυρόξενος, βολλαστονίτης, ροδονίτης (rhodonite), μπουσταμίτης (bustamite), επίδοτο, σκαπόλιθος, πλαγιόκλαστο και επουσιώδη είναι πιο υψηλής θερμοκρασίας πυριτικά με αναλογία $Ca/Si \geq 1.5$. Μπορεί να εγκλείουν κοιτάσματα Fe, Cu, W, Mo, Be, B, U, REE. Η αλληλουχία των φάσεων, χαρακτηρίζεται από μία ζώνη δύο ορυκτών: ένα από ανδραδίτη ή σκαπόλιθο ή K-άστριο και ένα από σαλίτη ή γροσσουλάριο ή επίδοτο, ακολουθούμενο από ζώνη ενός ορυκτού (γρανιτικός γρανάτης ή ασβεστο-πυρόξενος). Οι συγκεκριμένες ορυκτολογικές συνθέσεις εξαρτώνται και από τις τιμές πίεσης και θερμοκρασίας καθώς επίσης και από τις χημικές δραστηριότητες των Na_2O , K_2O , F_2 , Cl_2 , SO_3 , FeO , O_2 , CO_2 .



Εικόνα: ασβεστούχο πέτρωμα Skarn

11.3 Ροντιγκίτης (Rodingite): είναι μετασωματικό πέτρωμα αποτελούμενο κυρίως από γροσσουλαριακό ανδραδίτη, γρανάτη και από κοιτάσματα ασβεστο-πυρόξενου, βεζουβιανού, σκαπόλιθου και κοιτάσματα σιδήρου. Αντικαθιστά εγκλείσματα βασικών πετρωμάτων εντός σερπερντινωμένων υπερβασικών σωμάτων όπως ηφαιστειακά πετρώματα και αμφιβολίτες. Η ορυκτολογική σύνθεση των σχηματισμών του ροντιγκίτη αποτελείται από γροσσουλάριο, κλινοπυρόξενο, βεζουβιανίτη, επίδοτο, σκαπόλιθο, και μαγνητίτη ή αιματίτη. Ο σχηματισμός τους απαιτεί παρουσία του CaO . Οι ροντιγκίτες συνήθως βρίσκονται εντός σερπεντινωμένων μαζών έχοντας προφανώς αντικαταστήσει σώματα βασικών πετρωμάτων.

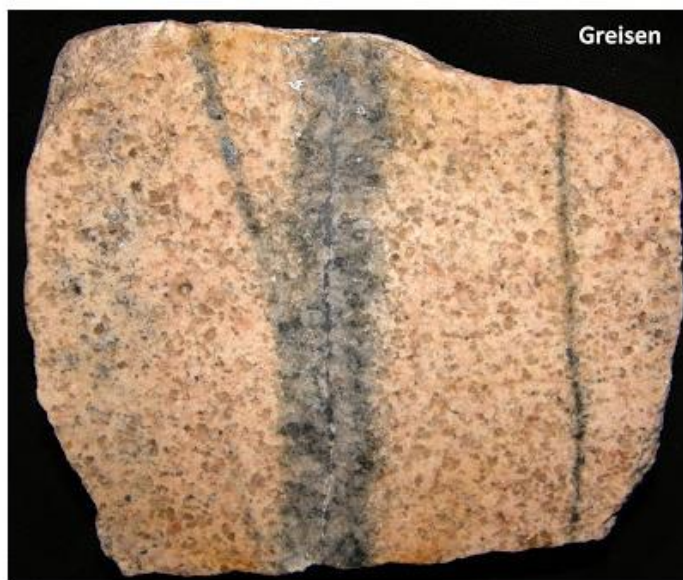


Εικόνα : πέτρωμα ροδινγκίτης

11.4 Greisen: είναι υψηλής έως μέτριας θερμοκρασίας μετασωματικό πέτρωμα που χαρακτηρίζεται από χαλαζία και μαρμαρυγίες καθώς επίσης από τοπάξι φθορίτη, τουρμαλίνη και δευτερευόντως αμαζονίτη, ορθόκλαστο, ανδαλουσίτη και διάσπορο. Φιλοξενούν κοιτάσματα Be, W, Mo, Sn και Ta. Συσχετίζονται με τους υψηλού βαθμού ορογενετικούς λευκογρανίτες και αντικαθιστούν γρανίτες, ψαμμίτες και μαρμαρυγιακούς σχιστόλιθους.

Ο όρος εισήχθη από τον V.I. Smirnov ως «κοιτάσματα greisen» και αρχικά καθόριζε πετρώματα χαλαζιο-μοσχοβίτη τα οποία είχαν σχηματιστεί με μετασωματισμό γρανιτικών πετρωμάτων, ψαμμίτων, σχιστόλιθων καθώς και ηφαιστειογενών. Αργότερα, με ευρύτερη έννοια, προσδιορίζεται ως greisen:

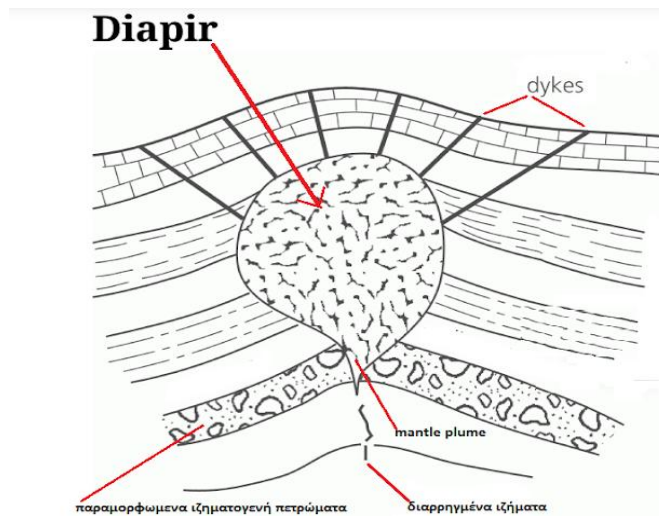
- 1) μια στενή χρονική και γενετική σχέση με υπερόξινους γρανίτες,
- 2) μια συγκεκριμένη συλλογή σπανίων μετάλλων (Be, W, Mo, Sn, Bi),
- 3) χαρακτηριστικές κοιτασματολογικές μεταβολές όπως η ανάπτυξη από γκρεϊνσενιτίωση, χαλαζία, λευκομαρμαρυγίες, τοπάξι, φθορίτη, τουρμαλίνη και
- 4) υψηλή συμμετοχή στις διεργασίες σχηματισμού ορυκτών από πτητικά και όξινα συστατικά:



Εικόνα: πέτρωμα Greisen

Οι γρανίτες με τους οποίους συσχετίζονται τα greisens είναι μεταορογενετικού τύπου. Αυτό δημιουργεί περιοχές σταθερότητας, όπου

αναπτύσσονται διάπυρα (diapirs) (σχήμα) έχοντας στη βάση τους μία μανδυακή εισχώρηση (mantle plume) και ζώνες μικρότερης πυκνότητας στον μανδύα και στον κατώτερο φλοιό γεγονός που διευκολύνει στη δημιουργία φλεβών.



Εικόνα: απεικονίζεται ο τρόπος σχηματισμού των διαπύρων με σχήμα

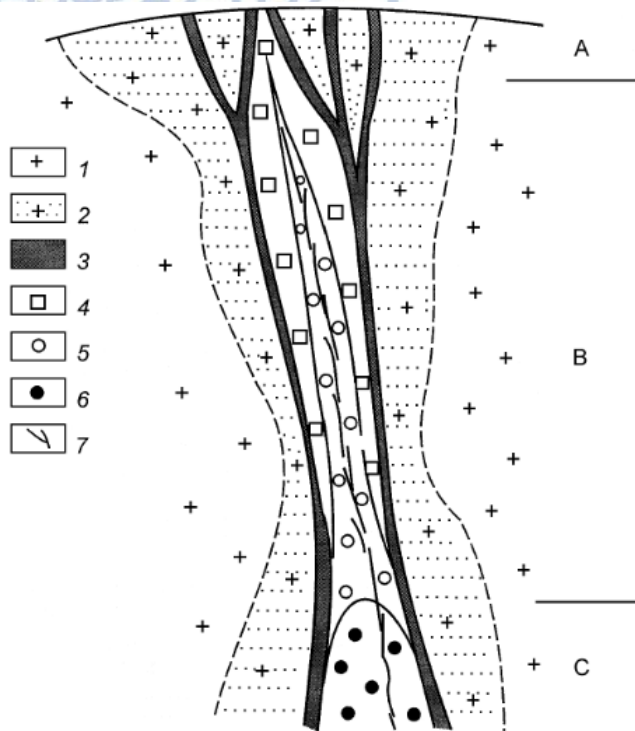
Το χρονικό διάστημα, μεταξύ του πλήρους σχηματισμού του γεωσύγκλινου και της εισχώρησης των μεταορογενετικών γρανίτων, υπολογίζεται σε 75-100Ma.

Τα greisens πετρώματα επεκτείνονται πλησίον των ζωνών επαφής και στη οροφή των γρανιτοειδών εισχωρήσεων, κυρίως, σε εκείνες με μεγάλο ποσοστό σύνθεσης SiO_2 .

Τα περισσότερα κοιτάσματα greisen περιορίζονται σε γρανιτικά σώματα σε σχετικά μικρή αναλογία και τα greisens των εξω-επαφών σχετίζονται μερικώς με ζώνες.

Ακόμη διαιρούνται σε δύο κατηγορίες: σ' αυτά που αντικαθιστούν Al-Si πετρώματα (φάσεων χαλαζία, χαλαζία-μοσχοβίτη, μοσχοβίτη - K-άστριους, χαλαζία – τουρμαλίνη και χαλαζία-τοπάζι) και σ' αυτά που αντικαθιστούν Al-Si ακόρεστα πετρώματα (φάσεων φθορίτη – μοσχοβίτη και άστριων- φθορίτη).

Στο παρακάτω σχήμα απεικονίζεται πλευρικά και κάθετα η μετασωματική ζώνωση των κυρίων βιομηχανικών greisen όγκων στο Akchatau (Kazakhstan). Αποτελεί και παράδειγμα ζώνωσης.



1. μεσόκκοκοι γρανίτες,
2. γκρεΐνσενιτιωμένοι γρανίτες,
3. χαλαζιο-μοσκοβιτικοί greisens.
4. χαλαζιο-τοπάζι greisens,
5. χαλαζιο- greisens συμπαγείς,
- 6, χαλαζιο- greisens πορώδεις
7. φλέβες με κοιτάσματα χαλαζία,
8. τα όρια της μετασωματικής ζώνης (α: απότομό, β: βαθμιαίο).

A, B, C: επίπεδα με σώματα greisens με διαφορετικούς τύπους της πλευρικής ζώνωσης.

11.5 Μπερεσίτης (Beresite): είναι χαμηλής θερμοκρασίας μετασωματικό πέτρωμα που χαρακτηρίζεται από χαλαζία, σερικήτη, ανκερίτη και πυρίτη ως αποτέλεσμα αντικατάστασης πυριγενών και ιζηματογενών πρωτόλιθων. Ο σερικήτης είναι το βασικό ορυκτό και η σερικιτίωση είναι συνώνυμο της μπερεσιτίωσης, η οποία είναι από τους πλέον διαδιδόμενους παραφλέβιους μετασχηματισμούς σε κοιτάσματα Au, Au-Ag, Ag-Pb, Mo, F και U. Οι

σχηματισμοί μπερεσίτη είναι αποτέλεσμα όξινου μετασώματωσης με υψηλή διασταλτικότητα (fugacity*) CO₂ καθώς και από διεισδύσεις ηφαιστειακών και ηφαιστειογενών ιζηματογενών πετρωμάτων στο ίδιο όξινο περιβάλλον. Οι μπερεσίτες άρχισαν να σχηματίζονται από το τέλος του Προκάμβιου μέχρι το Μεσοζωικό όπου είχαν τη μεγαλύτερη ανάπτυξη. Η διαδικασία δημιουργία τους πραγματοποιήθηκε μετά από την ολοκλήρωση της μαγματικής διείσδυσης και διάχυσης του μαγματισμού και προηγήθηκαν της εμφάνισης του μετασώματωσης κατά το μαγματικό στάδιο. Οι περιοχές επέκτασης αυτών των μετασωματίτων συνέπεσαν με αυτές της ανάπτυξης των γρανιτοειδών διεισδύσεων.



Εικόνα:πέτρωμα μπερεσιτης

11.6 Προπυλίτης (Propylite): είναι χαμηλής με μεσαίας θερμοκρασίας μετασωματικό γρανοβλαστικό πέτρωμα που σχηματίζεται υδροθερμικά από πράσινους ανδεσίτες, στο μεταμαγματικό στάδιο.

Οι προπυλίτες στο στάδιο σχηματισμού τους επηρεάζονται από τον γρανιτοειδή μαγματισμό του ορογενετικού σταδίου και της ανάπτυξης του φλοιού στις περιοχές των ηπειρωτικών περιθωρίων, των νησιωτικών τόξων και στις ζώνες της διηπειρωτικής τεκτονομαγματικής δραστηριότητας.

Η μεταλλογένεση των προφυλιτικών πετρωμάτων συνήθως βρίσκεται σε σχηματισμούς φλεβών ή φλεβικών ζωνών. Η χαρακτηριστική ιδιότητα του σχηματισμού του προφυλίτη είναι ότι αναπτύσσεται σε ηφαιστειακές μάζες ως αποτέλεσμα υδροθερμικής διεργασίας και της διείσδυσης πορφυρικών γρανιτοειδών με αυξημένη περιεκτικότητα σε αλκαλικά μέταλλα. Στον σχηματισμό προφυλίτων δημιουργείται μια μετασωματική ζώνωση συνεχόμενη με κερατίτες επαφής, η οποία περιλαμβάνεται στη φάση βιοτίτη – αλβίτη – ακτινόλιθου και χαρακτηρίζεται με την προσθήκη μαγνησίου. Παρόμοιες ζώνες είναι ενδεικτικές πεδίων με προφυλιτικά κοιτάσματά.



Εικόνα: πέτρωμα Προφυλίτης

12. ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ ΣΤΟΝ ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΧΩΡΟ

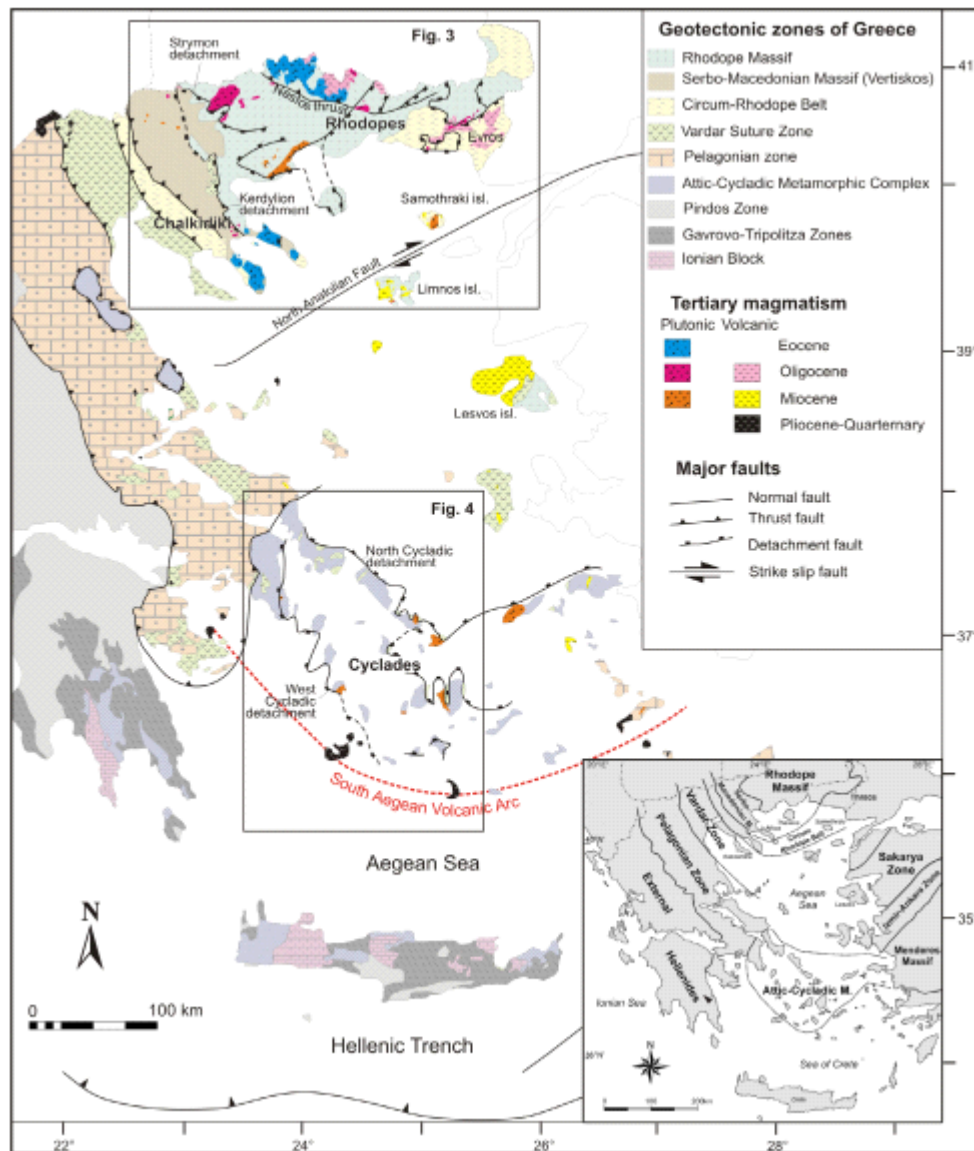
12.1 Καινοζωική Μεταλλογένεση της Ελλάδας και δυνατότητα για πολύτιμες, κρίσιμες και σπάνιες εξερευνήσεις μετάλλων.

Η Καινοζωική μεταλλογένεση στην Ελλάδα περιλαμβάνει πολυάριθμα κύρια και μη υδροθερμικά μεταλλοφόρα κοιτάσματα. Τα κοιτάσματα αυτά συνδέονται στενά με το κλείσιμο του δυτικού ωκεανού της Τηθύος και την σύγκρουση της Ευρασιατικής ηπειρωτικής πλάκας στο Αιγαίο πέλαγος. Το γεγονός αυτό ξεκίνησε στο Κρητιδικό και συνεχίζεται μέχρι σήμερα. Τα μεταλλοφόρα κοιτάσματα σχηματίστηκαν σε τέσσερις κύριες περιόδους: Ολιγόκαινο (33-25 Ma), άνω Μειόκαινο (22-19Ma), μέσω έως κάτω Μειόκαινο (14-7 Ma) και Πλειόκαινο-Πλειστόκαινο (3-1,5 Ma).

Αυτές οι περίοδοι μεταλλογένεσης εμφανίστηκαν ως απάντηση στην επαναφορά της πλάκας και τη μετανάστευση από μετα-σύγκρουση ασβεστοαλκαλικού σε σωσσονιτικού μαγματισμού, μέσα σε μια προέκταση του οπισθοτόξιου τόξου από τη Ροδόπη μέχρι τις Κυκλάδες και συνδέεται με τον μαγματισμό του τόξου κατά μήκος του ενεργού ηφαιστειακού τόξου στο Αιγαίο. Η ασθενοσφαιρική εισβολή λιώνει μέσα στον κατώτερο φλοιό εξαιτίας της υποχώρησης της πλάκας, και είναι υπεύθυνη για τη μερική τήξη της μετασωματικής λιθόσφαιρας και των κατώτερων κρυσταλλικών σωρών. Τα γεωδυναμικά αυτά γεγονότα έλαβαν χώρα κατά τη διάρκεια της κατάρρευσης του Ελληνικού ορογενούς κατά μήκος ενός μεγάλου ρήγματος αποκόλλησης. Το οποίο εκτόξευσε εκτεταμένα μεταμορφικά σύμπλοκα του πυρήνα, τα οποία χωρίζονται σε δύο κύριες περιοχές: τη Ροδόπη και τις Κυκλάδες.

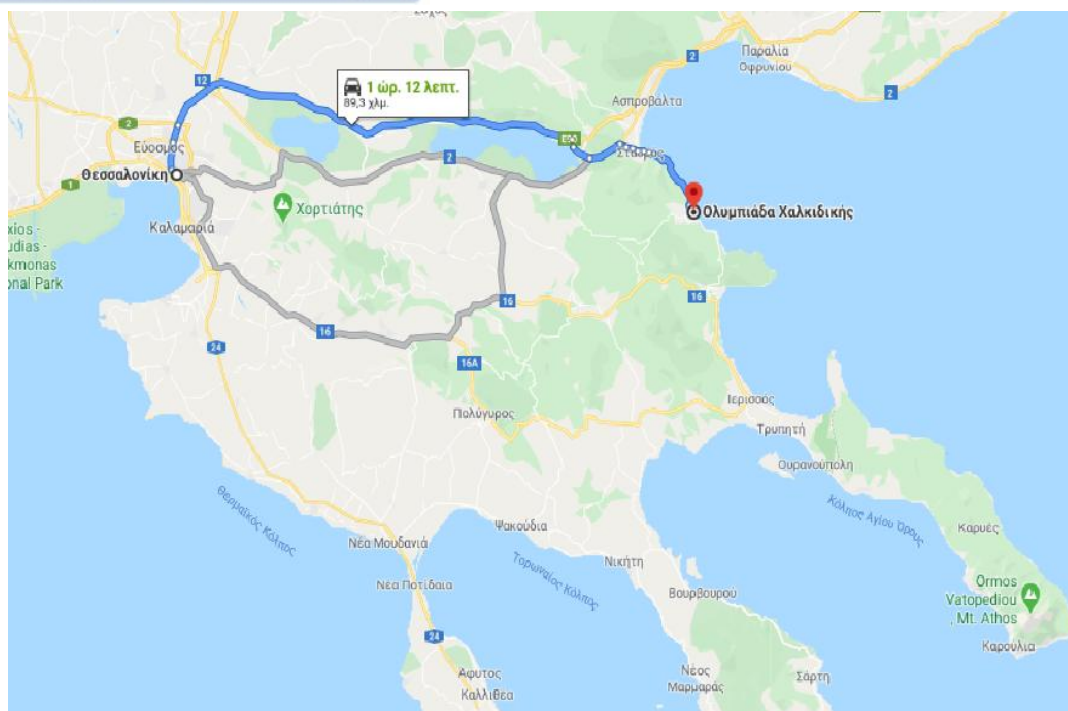
Τα ρήγματα αποκόλλησης και οι υπεράνω-αποκόλλησης λεκάνες ελέγχουν: την τοποθέτηση του μάγματος, την κυκλοφορία του υγρού και την μεταλλοφορία. Οι κύριες μορφές μεταλλοφορίας περιλαμβάνουν πορφύρη, επιθερμική, κοιτάσματα αντικατάστασης, μειωμένη διείσδυση που σχετίζεται με χρυσό, διείσδυση που σχετίζεται με Mo-W και πολυμεταλλικές φλέβες. Τα πορφυρικά και επιθερμικά κοιτάσματα κοινώς συσχετίζονται με εκτεταμένες αλογόνες υδροθερμικές αλλοιώσεις. Ενώ σε άλλες περιπτώσεις η αλλοίωση είναι περιορισμένης ανάπτυξης και δομικά ελεγχόμενη. Τα πορφυρικά κοιτάσματα περιλαμβάνουν: Cu-Au-, Cu-Mo-Au-Re, Mo-Re, και παραλλαγές Mo-W. Τα επιθερμικά κοιτάσματα περιλαμβάνουν κυρίως υψηλού και ενδιάμεσου τύπου σουλφίδια (HS και IS), τα οποία φιλοξενούνται μέσα σε

ηφαιστειακά πετρώματα. Μολονότι, τα ιζηματογενή και μεταμορφωμένα πετρώματα φιλοξενούν μεταλλοφόρες φλέβες, breccias και οι disseminations είναι επίσης παρούσες. Οι κύριες μεταλλικές ενώσεις είναι Cu-Au-Ag-Te και Pb-Zn-Au-Ag-Te μέσα σε HS και IS επιθερμικά κοιτάσματα αντίστοιχα. Τα κύρια μετασωματικά κοιτάσματα στην Κασσάνδρα και το Λαύριο είναι πλούσια σε Au και Ag. Και μαζί με συστήματα μειωμένων διεισδύσεων χρυσού αποτέλεσαν σημαντικό ρόλο στην αρχαία οικονομία. Τελικά ,εκατοντάδες πολυμεταλλικές φλέβες που φιλοξενούνται από μεταμορφωμένα πετρώματα στη Ροδόπη και στις Κυκλάδες προστίθενται σημαντικά στη μεταλλική κληρονομιά της Ελλάδας.



Εικόνα: Χάρτης με τις Γεωτεκτονικές ζώνες στην Ελλάδα

12.2 Μετασωματικά Κοιτάσματα στην περιοχή της Ολυμπιάδας Χαλκιδικής



Εικόνα: χάρτης περιοχής Ολυμπιάδας

Τα κοιτάσματα συμπαγών σουλφιδίων Pb-Zn στο Μαντέμ Λάκκο και στις Μαύρες Πέτρες και Pb-Zn-(Au-Ag) στην Ολυμπιάδα Χαλκιδικής σχηματίστηκαν μέσα σε ασβεστιτικά μάρμαρα του Παλαιοζωικού ή σε παλαιότερους σχηματισμούς των Κερδυλλίων, στην ανατολική χερσόνησο της Χαλκιδικής στην Β. Ελλάδα. Η περιφερειακή κατανομή των ορυκτών είναι τεκτονικά ελεγχόμενη. Η γεωλογική δομή των πετρωμάτων αποτελείται κυρίως από μάρμαρα, βιοτιτικό-αμφιβολιτικό γνεύσιο και αμφιβολίτη. Αυτά τα πετρώματα έχουν παραμορφωθεί και μεταμορφωθεί στην αμφιβολιτική φάση μεταμόρφωσης. Το γεγονός αυτό στο σχηματισμό των Κερδυλλίων φαίνεται να διήρκεσε μέχρι το ανώτερο Τριαδικό και κορυφώθηκε σε μερική τήξη και ασβεστολιθικό μαγματισμό. Τα φαινόμενα αυτά αντιπροσωπεύονται από παραμορφωμένες και μη παραμορφωμένες ποικιλίες πηγματιτών-απλιτών, λαμπροφυρικών φλεβών και του γρανοδιορίτη του Στρατωνίου, ηλικίας 30 Ma.



KERDILIA FORMATION	VERTISKOS FORMATION

Εικόνα: Απεικονίζει τη λιθοστρωματογραφική στήλη των Κερδυλλίων

Γεωχημικές και ορυκτολογικές μελέτες έδειξαν ότι οι βιοτιτικοί γενεύσιοι είναι ιζηματογενούς ή πυριγενούς προέλευσης. Οι αμφιβολίτες έχουν προέλθει από βασαλτικούς έως βασαλτικούς-ανδεσιτικούς πρωτόλιθους. Οι πηγματίτες-απλίτες προέρχονται από ανάτηξη μάγματος το οποίο παράγεται σε βαθύτερα επίπεδα στον στερεό φλοιό της Γης. Οι λαμπροφυρικές φλέβες θεωρείται ότι έχουν παραχθεί από τον μανδύα και οι γρανοδιορίτες του Στρατωνίου έχουν σχηματιστεί από υβριδικής φύσης μάγμα που αποτελείται από φυσικά συστατικά του μανδύα και φλοιού.

Τα κοιτάσματα της Ολυμπιάδας, είναι γενικά διαστρωμένα ή τεκτονισμένα. Διαμορφώνονται κατά μήκος της επαφής της ανώτερης και κατώτερης ενότητας του μαρμάρου μαζί με τον υπερκείμενο βιοτιτικό γενεύσιο μεταξύ του μαρμάρου. Εμφανίζεται βόρειο-βορειοανατολικά για 1500 μέτρα, βυθίζεται 30 έως 35 μοίρες νοτιοανατολικά σε βάθος τουλάχιστον 300 μέτρων και με μέσο πάχος 12 μέτρων. Οι επαφές μεταξύ του μεταλλεύματος και του ξενιστή μαρμάρου είναι απότομες, σύμφωνες ή ασύμφωνες της φύλλωσης.

Ωστόσο σε κάθε περίπτωση υπάρχει χημική αντίδραση με το μάρμαρο.

Τα κοιτάσματα της Ολυμπιάδας εμφανίζονται σε μεταμορφωμένες και μη ποικιλίες. Οι πρώτες κυριαρχούν σε διάφορες μορφές όπως κοιλότητες και πλήρωση ρωγμών, ταινίες ή είναι διάσπαρτες. Οι εμφανίσεις των τελευταίων είναι περιορισμένες και εμφανίζονται με μορφή ταινίας ή φλεβών. Παρουσιάζουν διάτμηση και brecciation. Η παραμόρφωση S-τύπου μέσα σε skarn δίπλα στον γρανοδιορίτη του Στρατωνίου ηλικίας 30Ma και τα δεδομένα χωρικής παραμόρφωσης μεταμορφισμού μπορούν να οριοθετήσουν τον χρόνο του σχηματισμού του μεταλλεύματος κατά το Τριτογενές.

Ο ίδιος τύπος παραμόρφωσης παρατηρείται μέσα σε ορυκτά skarn ,που σχετίζονται στενά με το κοιτάσμα του Μαντέμ Λάκκου. Η κύρια μεταλλοφορία κοιτάσματος στην Ολυμπιάδα, ανεξαρτήτως παραμόρφωσης είναι: σφαλερίτης, γαληνίτης και αρσеноπύριτης με χαλαζία, ασβεστίτη και ροδοχρωσίτη ως κύρια ορυκτά. Τα ισοτοπικά δεδομένα Pb από παραμορφωμένα και μη κοιτάσματα γαληνίτη αποδεικνύουν μια κρυσταλλική πηγή και είναι ομοιογενείς και πανομοιότυπες με τον K-ούχο άστριο από τον γρανοδιορίτη του Στρατωνίου μέχρι και άλλους τριτογενείς ελληνικούς ορογενετικούς γρανίτες.

Τα παραπάνω δεδομένα μας δείχνουν ότι η κύρια πηγή του κοιτάσματος θα πρέπει να αναζητηθεί στην κύρια πηγή του μάγματος. Επιπλέον η κρυσταλλική συγγένεια και ομοιογένεια από τα ισότοπα μολύβδου που έχουν μελετηθεί βρίσκονται σε συμφωνία με τη σύσταση του φλοιού που συμβάλλει στο σχηματισμό του Τριτογενούς γρανίτη. Παρόλο που η απόπλυση του μολύβδου από τα πετρώματα του φλοιού δεν μπορεί να αγνοηθεί πλήρως. Το στενό εύρος των ισοτόπων του θείου σε όλα τα σουλφίδια και η εγγύτητα του συνδυάζεται με περιορισμένες συγγενικές εμφανίσεις θεικών στο Μαντέμ Λάκκο και μπορεί να προτείνει τον συνδυασμό υψηλού αναγωγικού/οξειδωμένου θείου με σχετικά υψηλή θερμοκρασία. Έτσι υποδηλώνεται για το θείο μια μαγματική προέλευση.

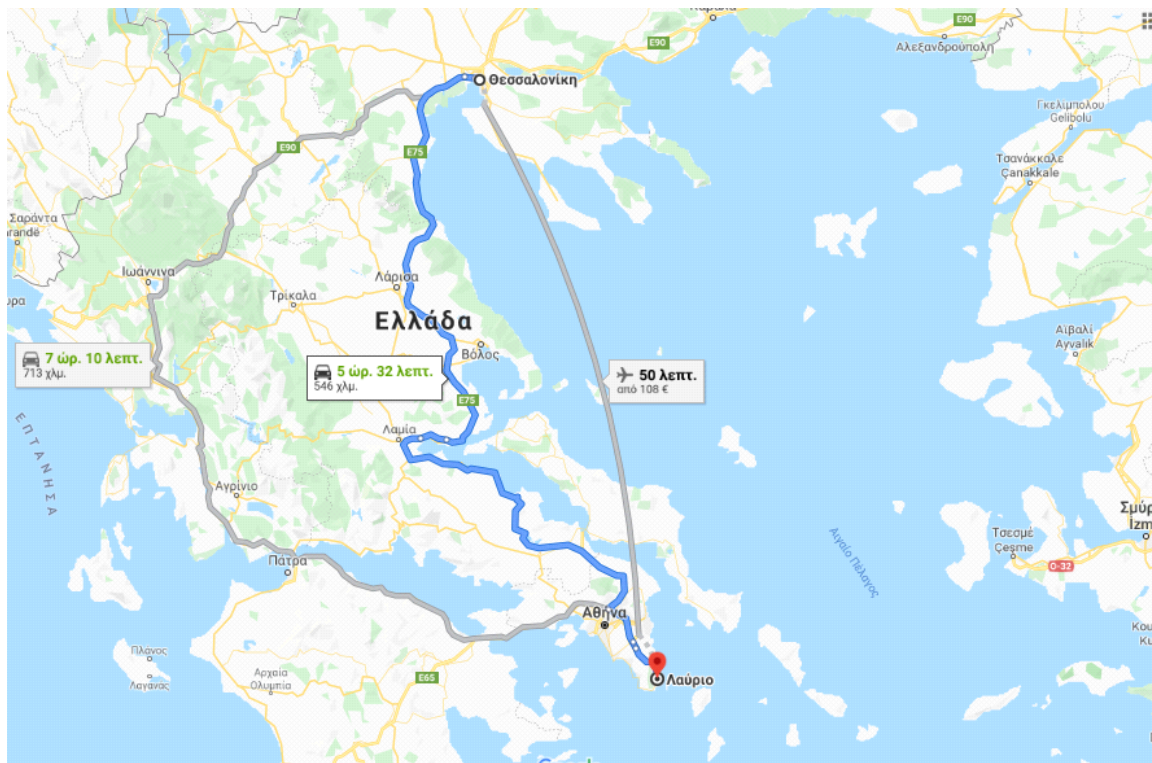
Οι μεταλλοφορίες έχουν σχηματιστεί από τα ίδια ρευστά που φέρουν διοξείδιο του άνθρακα και νερό με χαμηλή έως μέση αλατότητα σε θερμοκρασίες από 300 έως 400 βαθμούς κελσίου και πιέσεις από 300 έως 800 bar. Προκαταρκτικά δεδομένα από ρευστά εγκλείσματα του κοιτάσματος Μαντέμ Λάκκος δείχνουν υψηλότερη θερμοκρασία ομογενοποίησης μέχρι 480 βαθμούς κελσίου και περιεκτικό σύμπλεγμα αλάτων (NaCl-KCl-CaCl₂).

Αναλύσεις από τα ισότοπα οξυγόνου των κοιτασμάτων που σχετίζονται με χαλαζία και ασβέστιο συνδυάζονται με θερμομετρικά δεδομένα από υγρά εγκλείσματα με σύσταση αρσеноπυρίτη. Οι αναλύσεις αυτές έδειξαν ότι η

μεταλλοφορία ήταν είτε μαγματική είτε μεταμορφική καταγωγή με καθυστερημένη ανάμειξη μετεωρικών νερών. Ισοτοπικές αναλύσεις οξυγόνου και άνθρακα από το ανώτερο μάρμαρο ξενιστή μέχρι τα κοιτάσματα που σχετίζονται με ασβεστίτη δείχνουν μείωση κυρίως του οξυγόνου το οποίο υποδεικνύει μια ισοτοπική ανταλλαγή με διαποτισμένο νερό που εξουδετερώνει τη μεταλλοφορία των ρευστών.

Η μείωση αυτή συσχετίζεται με το βαθμό της υδροθερμικής μεταβολής και εκφράζεται από τον εμπλουτισμό στο κοίτασμα ξενιστή που περιέχει μάρμαρο ,συγκριτικά με τον ανώτερο ορίζοντα του μαρμάρου. Συνεπώς, η προτεινόμενη ερμηνεία είναι ότι τόσο οι παραμορφωμένες όσο και οι μη παραμορφωμένες μελέτες των υγρών εγκλεισμάτων στο κοίτασμα ,σχετίζεται με χαλαζία της Ολυμπιάδας και δείχνει ότι οι παραμορφωμένες και μη ποικιλίες κοιτασμάτων στην περιοχή της Ολυμπιάδας δημιουργήθηκαν κατά τη διάρκεια του ίδιου Τριτογενούς μεταλλογενετικού συμβάντος αντικατάστασης skarn από ρευστά κυρίως μαγματικής προέλευσης. Δια μέσου αντίδρασης με τα μάρμαρα ξενιστές σε χαμηλές πιέσεις (300-800 bars) και σε σχετικά υψηλές θερμοκρασίες.

12.3. Μετασωματικά Κοιτάσματα στην Περιοχή του Λαυρίου



Εικόνα: Χάρτης στην περιοχή του Λαυρίου

Τα κοιτάσματα αργύρου του Λαυρίου, τοποθετούνται περίπου 50km νοτιοανατολικά της Αθήνας (Ελλάδα), περιέχουν μια ποικιλία από μεταλλοφόρα σώματα συμπεριλαμβανομένων φιλοξενούμενων-διεισδύσεων, σκαρν-, μετασωματικών-κοιτασμάτων και φλεβοειδών τύπων κοιτασμάτων. Η περιοχή του Λαυρίου είναι μέρος του μεταμορφικού συμπλέγματος του πυρήνα της Αττικό-Κυκλαδικής ζώνης. Το σύμπλεγμα αυτό περιέχει βασικά και πολύτιμα μέταλλα με την μορφή κοιτασμάτων τύπου σκάρν, συσχετιζόμενων διεισδύσεων και επιθερμικής μεταλλοφορίας στην Νότια Εύβοια και στα νησιά Σίφνο, Μύκονο, Τήνο και Κύθνο.

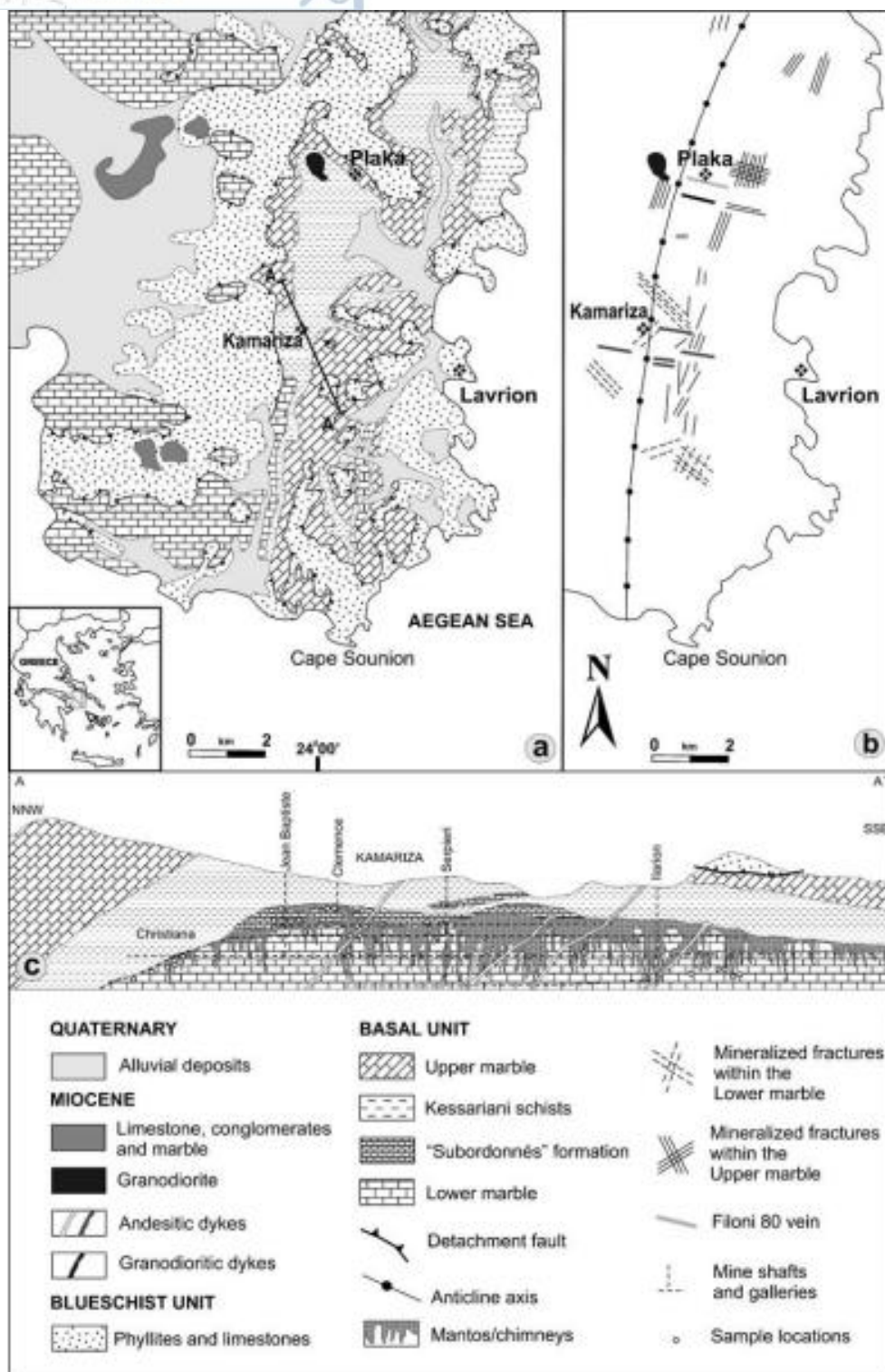
Γενικά συσχετίζονται με την τοποθέτηση Μειοκαινικών ανδεσιτικών φλεβών μέσα σε μια ταχείας εκτεινόμενη ηπειρωτική οπισθοτόξια λεκάνη, η οποία σχηματίστηκε κατά τη διάρκεια της έκχυσης στην επιφάνεια του εδάφους της Αττικό-Κυκλαδικής κρυσταλλικής ζώνης. Στο Λαύριο οι φλέβες αντικατάστασης γνωστές και ως καμινάδες και mantos από συμπαγή σουλφίδια είναι τα κύρια μεταλλοφόρα σώματα. Η μεταλλοφορία είναι παρόμοια μεταξύ των διαφόρων τύπων από μεταλλοφόρα σώματα στην περιοχή της Καμαρίζας και περιέχουν: σουλφίδια, σουλφοαρσενίδια, μέταλλα της περιοχής (Au και Bi), θειοάλατα και σουλφοβισμούθια από Ag, Bi, Cu, Pb, As, Sb.

Ο συσχετισμός του Bi, Au και Ag είναι κοινός. Η παραγένεση gersdorffite-bismuthinite-native gold και native gold-native bismuth δείχνει συνεισφορά των μαγματικών συστατικών σε ένα υδροθερμικό σύστημα. Η διακύμανση των σουλφιδικών σταδίων των υγρών κοιτασμάτων κατά τη διάρκεια της εξέλιξης του συστήματος στην Καμαρίζα είναι στοιχείο της απόθεσης των κοιτασμάτων των νεότερων αρσеноπυριτών, καθώς και του εναργίτη-λουζονίτη αλλά και του χαμηλού έως υψηλού σιδήρου σφαλερίτη στα ίδια δείγματα.

Η μικροθερμομετρία των ρευστών εγκλεισμάτων δείχνει ότι η μεταλλοφορία των κοιτασμάτων αντικατάστασης μετασωματικών κοιτασμάτων κυμαίνεται από 100°C έως 400°C από ρευστά με χαμηλή έως μέτρια αλατότητα (1.8 - 17.3 wt% NaCl equiv).

Οι ευτηκτικές θερμοκρασίες των ρευστών εγκλεισμάτων υποδηλώνουν την επιπλέον παρουσία NaCl και CaCl₂ στο ρευστό από το οποίο σχηματίστηκε το κοίτασμα. Το κοίτασμα στην περιοχή της Καμαρίζας είναι απομακρυσμένο από τη διεισδυτική γρανοδιοριτική πλάκα και σχετίζεται με πορφυρική-Mo

μεταλλοφορία, αλλά είναι πιθανό να σχετίζεται γενετικά με θαμμένο γρανιτοειδή σε ορισμένο βάθος.



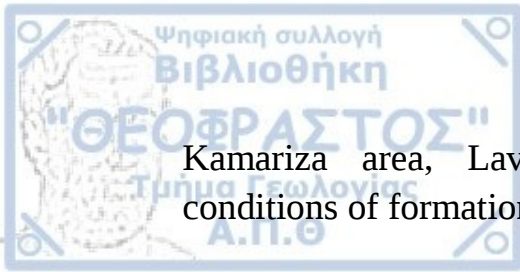
Εικόνα: Γεωλογικός Χάρτης στην περιοχή του Λαυρίου και η γεωλογική τομή της περιοχής.



Εικόνα: Μεταλλοφόρα Κοιτάσματα στην περιοχή του Λαυρίου.

Βιβλιογραφία

- Bonsall, T. A., Spry, P. G., Voudouris, P. C., Tombros, S., Seymour, K. S., & Melfos, V. (2011). The geochemistry of carbonate-replacement Pb-Zn-Ag mineralization in the Lavrion district, Attica, Greece: Fluid inclusion, stable isotope, and rare earth element studies. *Economic Geology*, 106(4), 619-651.
- Chemical Transport in Metasomatic Processes, edited by Harold C. Helgeson
Dictionary of Geology and Earth Sciences, Oxford University Press, 2013
- Frei R. (1992). Isotope (Pb, Rb-Sr, S, O, C, U-Pb) geochemical investigations on Tertiary intrusives and related mineralizations in the Serbomacedonian Pb-Zn, Sb+Cu-Mo metallogenetic province in Northern Greece, PhD Thesis, ETH Zurich, 231p.
- Gilg A.G. (1993). Geochronology (K-Ar), fluid inclusion and stable isotope (C, O, H) studies of skarn, porphyry copper, and carbonate-hosted Pb-Zn (Ag-Au) replacement deposits in the Kassandra mining district (Eastern Chalkidiki, Greece), PhD Thesis, ETH Zurich, 152p.
- Lindgren W. (1925) Metasomatism. *Bull. Geol. Soc. Amer.*, 36. 1-114
- Melfos V., Voudouris P.C. (2012). Geological, Mineralogical and Geochemical Aspects for Critical and Rare Metals in Greece. *Minerals*, 2, 300-317; doi:10.3390/min2040300
- Palinkaš, S. S., Palinkaš, L. A., Renac, C., Spangenberg, J. E., Lüders, V., Molnar, F., & Maliqi, G. (2013). Metallogenic model of the Trepča Pb-Zn-Ag Skarn Deposit, Kosovo: Evidence from fluid inclusions, rare earth elements, and stable isotope data. *Economic Geology*, 108(1), 135-162.
- The radiogenic hypothesis of formation of periphery zones of hematitization in hydrothermal uranium deposits. T. V. Tkacheva, Ye. M. Shmariovich, V. M. Rekharskaya & P. Ya. Lazunov Pages 197-205 | published online: 29 Jun 2010 *International Geologic Review*
- V.A. Zharikov, V.L. Rusinov, A.A. Marakushev, G.P. Zaisky, B.I. Omelianenko, N.N. Pertsev, I.T. Rass, O.V. Andreeva, S.S. Abramov, K.V. Podlessky, Y.B. Shapovalov, M.S. Seredkin, V.A. Golovina, (2015). *Metasomatism and metasomatic rocks: Russian Academy of Sciences* (ISBN 5-891 176 -038-X).
- Voudouris, P., Melfos, V., Spry, P. G., Bonsall, T. A., Tarkian, M., & Solomos, C. (2008). Carbonate-replacement Pb-Zn-Ag±Au mineralization in the



Kamariza area, Lavrion, Greece: mineralogy and thermochemical conditions of formation. *Mineralogy and Petrology*, 94(1-2), 85-106.