



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



ΝΙΚΟΛΕΤΑ Γ. ΠΑΣΣΑΛΗ

**ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΑ ΠΟΥ ΣΧΕΤΙΖΟΝΤΑΙ ΜΕ ΜΑΓΜΑΤΙΚΕΣ
ΔΙΕΙΣΔΥΣΕΙΣ
INTRUSION RELATED MAGMATIC-HYDROTHERMAL ORE
SYSTEMS**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ



ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ
2023





ΝΙΚΟΛΕΤΑ Γ. ΠΑΣΣΑΛΗ

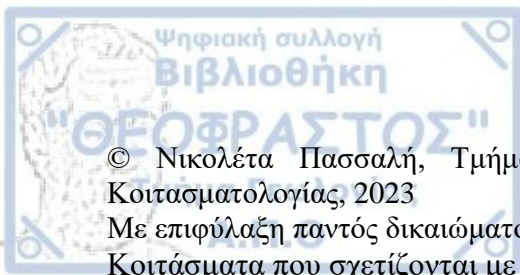
Κοιτάσματα που σχετίζονται με μαγματικές διεισδύσεις

Υποβλήθηκε στο Τμήμα Γεωλογίας
Τομέας Ορυκτολογίας - Πετρολογίας - Κοιτασματολογίας

Επιβλέπων Καθηγητής

Μέλφος Βασίλειος

© Νικολέτα Πασσαλή, 2023
Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All right reserved.



© Νικολέτα Πασσαλή, Τμήμα Γεωλογίας Α.Π.Θ., Τομέας Ορυκτολογίας-Πετρολογίας-Κοιτασματολογίας, 2023
Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος.
Κοιτάσματα που σχετίζονται με μαγματικές διεισδύσεις- *Διπλωματική Εργασία*

© Nikoleta Passali, School of Geology, Dept. of Mineralogy-Petrology-Economic Geology, 2023
All rights reserved.
Intrusion related magmatic-hydrothermal ore systems/Intrusion related gold deposits- *Bachelor Thesis*

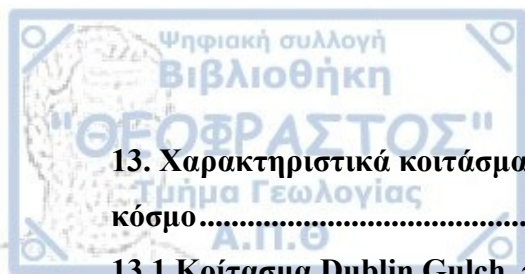
Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται 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.



Περιεχόμενα

Περίληψη	1
Abstract.....	2
Πρόλογος - Αντικείμενο της Εργασίας.....	3
1. Εισαγωγή	4
2. Το Μάγμα	6
3. Τα Μαγματογενή κοιτάσματα	8
4. Γεωτεκτονικό περιβάλλον σχηματισμού των κοιτασμάτων που σχετίζονται με μαγματικές διεισδύσεις.....	10
5. Μαγματικές Διεργασίες	13
5.1 Σύσταση του μάγματος και χαρακτήρας του πλουτωνίτη	14
5.2 Πηγή προέλευσης του μάγματος.....	14
5.3 Ο ρόλος της διαδικασίας της κλασματικής κρυστάλλωσης	16
6. Κύρια χαρακτηριστικά των κοιτασμάτων που σχετίζονται με μαγματικές διεισδύσεις.	17
7. Γενετικό μοντέλο των κοιτασμάτων που σχετίζονται με μαγματικές διεισδύσεις.....	21
8. Εμπειρικό Μοντέλο των κοιτασμάτων που σχετίζονται με μαγματικές διεισδύσεις...	22
9. Ορυκτολογικές παραγενέσεις των κοιτασμάτων που σχετίζονται με μαγματικές διεισδύσεις.	24
10. Βάθος, χρόνος σχηματισμού και σχήμα του πλουτωνίτη που φιλοξενεί τα κοιτάσματα που σχετίζονται με μαγματικές διεισδύσεις.	28
10.1 Βάθος σχηματισμού	28
10.2 Χρόνος σχηματισμού	29
10.3 Σχήμα του πλουτωνίτη που φιλοξενεί τα κοιτάσματα που σχετίζονται με μαγματικές διεισδύσεις	30
11. Γεωχημεία και πηγή των υδροθερμικών διαλυμάτων.....	31
11.1 Γεωχημεία των υδροθερμικών διαλυμάτων.....	31
11.2 Πηγή των υδροθερμικών διαλυμάτων	33
12. Υδροθερμικές εξαλλιώσεις των κοιτασμάτων που σχετίζονται με μαγματικές διεισδύσεις	34



13. Χαρακτηριστικά κοιτάσματα που σχετίζονται με μαγματικές διεισδύσεις στον κόσμο.....	35
13.1 Κοίτασμα Dublin Gulch, πλουτωνική σειρά Tombstone, Yukon, Καναδάς.....	35
13.1.1 Γεωλογία της περιοχής.....	36
13.1.2 Τύποι μεταλλοφορίας στο κοιτάσμα του Dublin Gulch.....	37
13.1.3 Ζώνη Eagle.....	37
13.2 Κοίτασματα Timbarra, NEFB, New South Wales, Αυστραλία.....	38
13.2.1 Γεωλογία της περιοχής.....	40
13.2.2 Γεωλογία των πέντε κοιτασμάτων.....	40
13.2.3 Τύποι μεταλλοφορίας στο κοιτάσμα του Timbarra.....	41
13.3 Κοίτασμα Scheelite Dome, πλουτωνική σειρά Tombstone, Yukon, Καναδάς.....	41
13.3.1 Γεωλογία της περιοχής.....	42
13.3.3 Τύποι μεταλλοφορίας στο κοιτάσμα του Scheelite Dome.....	43
14. Κοιτάσματα που σχετίζονται με μαγματικές διεισδύσεις στον Ελληνικό χώρο.....	43
14.1 Κοίτασμα της Παλαιάς Καβάλας, Μάζα Ροδόπης.....	43
14.1.1 Γεωλογία της περιοχής.....	44
14.1.2 Τύποι μεταλλοφορίας στο κοιτάσμα της Παλαιάς Καβάλας.....	45
15. Συζήτηση – Συμπεράσματα.....	47
16. Βιβλιογραφία.....	48



Περίληψη

Τίτλος: Κοιτάσματα που σχετίζονται με μαγματικές διεισδύσεις

Όνομα: Νικολέτα Πασσαλή.

Η παρούσα πτυχιακή εργασία αποτελεί το προϊόν μιας βιβλιογραφικής έρευνας για τα κοιτάσματα που σχετίζονται με μαγματικές διεισδύσεις. Αποτελούν έναν νέο τύπο κοιτασμάτων, που βρέθηκαν να απασχολούν ιδιαίτερα τις μεταλλευτικές εταιρείες τα τελευταία 25 χρόνια. Γνωστά παραδείγματα είναι τα κοιτάσματα της μεταλλογενετικής επαρχίας χρυσού Tintina στα βόρεια της Βορειοαμερικανικής Cordillera. Τα βασικότερα χαρακτηριστικά τους είναι (1) Μεταλκαλικές, υποαλκαλικές μαγματικές διεισδύσεις όξινης με ενδιάμεσης σύστασης, στα όρια μεταξύ της σειράς μαγνητίτη-ιλμενίτη. (2) Μεταλλοφορία Au, Bi, Te, W, As, Mo, Sb με μικρή να είναι η συγκέντρωση των βασικών μετάλλων. (3) Ανθρακικά υδροθερμικά διαλύματα (4) Μικρή περιεκτικότητα σουλφιδίων <5%, με μεταλλοφορία που συνήθως περιλαμβάνει αρσενοπυρίτη και σιδηροπυρίτη, όπου λείπουν ο μαγνητίτης και ο αιματίτης (5) Συνήθως ασθενής υδροθερμική εξαλλοίωση, εκτός από τα συστήματα μικρότερων βαθών όπου εκεί είναι μεγαλύτερη (6) Σχηματίζονται σε συγκλίνοντα περιθώρια, όπου ο ηπειρωτικός μαγματισμός περιέχει ταυτόχρονες διεισδύσεις μεταλκαλικής, αλκαλικής, ασβεσταλκαλικής σύστασης (7) Θέση στις μαγματικές επαρχίες γνωστή για την ύπαρξη κοιτασμάτων βολφραμίου ή και κασσιτέρου (8) Ζωνώδης κατανομή της μεταλλοφορίας, όπου κατατάσσεται σε μεταλλοφορία εντός του πλουτωνίτη και της μαγματικής διείσδυσης, σε μικρή απόσταση από την μαγματική διείσδυση και σε μεγαλύτερη απόσταση από την μαγματική διείσδυση, με ποικίλους τύπους μεταλλοφορίας. Στόχος της πτυχιακής εργασίας είναι η κατανόηση και η παρουσίαση των χαρακτηριστικών γνωρισμάτων των κοιτασμάτων που σχετίζονται με μαγματικές διεισδύσεις.



Abstract

Title: Intrusion related magmatic-hydrothermal ore systems/Intrusion related gold systems

By: Nikoleta Passali.

This diploma thesis is the product of a bibliographic research on the intrusion related gold systems. They are a new type of deposits that has been of particular interest to mining companies for the past 25 years. Well-known examples are the deposits in the Tintina Gold Province in the north of the North American Cordillera. Their main characteristics are (1) Metaluminous, subalkaline intrusions of felsic to intermediate composition, near the boundary between the magnetite-ilmenite series. (2) Au, Bi, Te, W, As, Mo, Sb mineralization with low concentration of base metals (3) Carbonic hydrothermal fluids (4) Low sulfide content <5%, with mineralization usually including arsenopyrite and pyrite, where magnetite and hematite are absent (5) Usually weak hydrothermal alteration, except in shallower depth systems where it is greater (6) Formed at convergent margins, where continental magmatism contains coeval intrusions of metaluminous, alkaline, calc-alkaline in situ (7) Known for the existence of tungsten or tin deposits (8) Metal zoning, where the metal zones develop within the plutonite and the magmatic intrusion, at a proximal distance from the magmatic intrusion, and at a greater distance from the magmatic intrusion, with various types of mineralization. The aim of the thesis is to understand and present the characteristics of intrusion related gold systems.



Πρόλογος - Αντικείμενο της Εργασίας

Σκοπός της εργασίας είναι η κατανόηση του μοντέλου αυτών των κοιτασμάτων και η παρουσίαση των χαρακτηριστικών τους. Εξετάζεται το γεωτεκτονικό περιβάλλον σχηματισμού τους, τα βασικά στοιχεία τους, η πηγή των υδροθερμικών διαλυμάτων τους. Αναλύεται επίσης η κατανομή τους, τα ορυκτά και οι μορφές της μεταλλοφορίας, το βάθος σχηματισμού και σχήμα τους, καθώς και οι υδροθερμικές εξαλλοιώσεις. Τέλος αναφέρονται ορισμένα σημαντικά κοιτάσματα αυτού του τύπου στον κόσμο αλλά και στην Ελλάδα.

Το θέμα ανατέθηκε τον Οκτώβριο του 2021 από τον Καθηγητή κ. Βασίλειο Μέλφο του Τομέα Ορυκτολογίας-Πετρολογίας-Κοιτασματολογίας του Τμήματος Γεωλογίας, της Σχολής Θετικών Επιστημών, του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης.

Ευχαριστώ ιδιαίτερα τον Καθηγητή κ. Βασίλειο Μέλφο, επιβλέποντα της εργασίας, για την ανάθεση ενός τόσο ενδιαφέροντος θέματος, καθώς και για την καθοδήγηση και βοήθεια που έλαβα κατά τη συγγραφή.

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω την οικογένεια μου για την στήριξη τους καθ' όλη την διάρκεια των ακαδημαϊκών μου χρόνων.



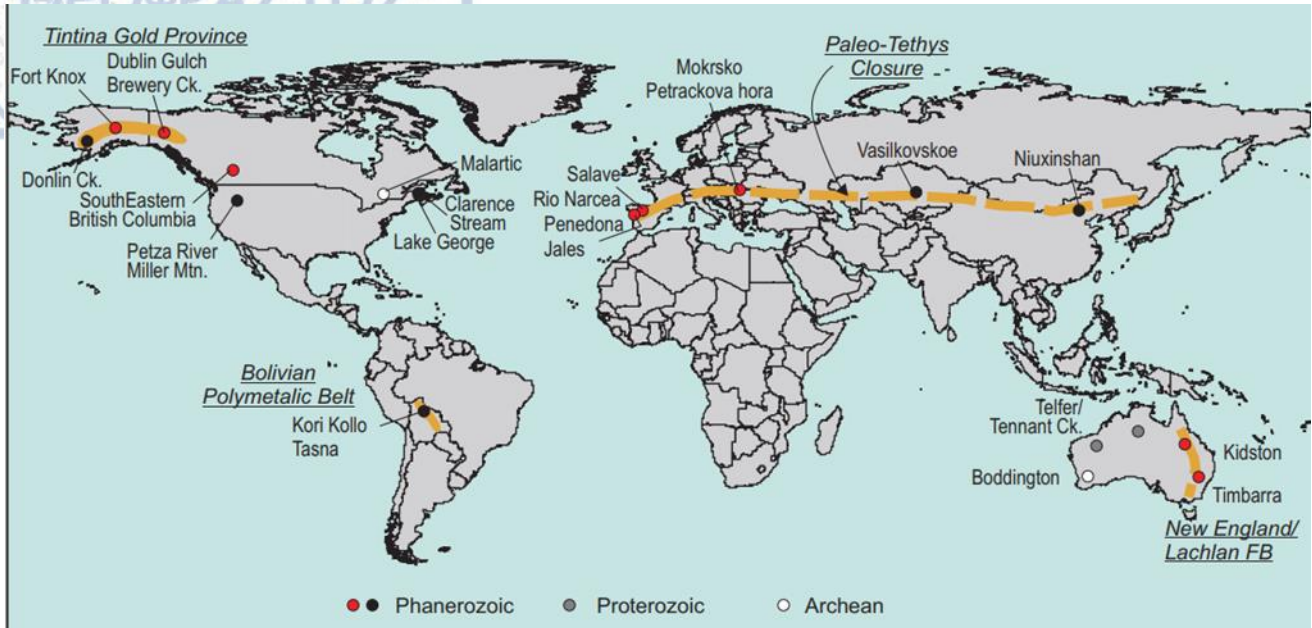
1. Εισαγωγή

Τα κοιτάσματα που σχετίζονται με μαγματικές διεισδύσεις, δηλαδή τα Intrusion Related Gold Systems (IRGD) όπως είναι σήμερα η επίσημη ονομασία τους, εντάσσονται στα μαγματογενή κοιτάσματα και είναι πλούσια σε χρυσό μαγματικά-υδροθερμικά συστήματα. Βρίσκονται στον στόχο των μεταλλευτικών εταιρειών τα τελευταία περίπου 25 χρόνια, ακριβώς για την παρουσία αυτή του χρυσού. Ορίστηκαν σαν κατηγορία κοιτασμάτων το 2000 από τους Lang et al. και το μοντέλο αναπτύχθηκε κυρίως με βάση παρατηρήσεις και μελέτες που έγιναν επάνω στα κοιτάσματα της Κεντρικής Αλάσκα και του Υυκον, όπου συντελούν την μεγαλύτερη παραγωγή χρυσού στον κόσμο. Ωστόσο είναι ακόμα σε πρώιμο στάδιο κατανόησης σε σύγκριση με άλλους τύπους κοιτασμάτων, αλλά με συνεχή και ραγδαία συγκέντρωση νέων δεδομένων και πληροφοριών.

Είναι Φανεροζωϊκής ηλικίας, με κάποιες περιπτώσεις Πρωτεροζωϊκής ή Αρχαϊκής. Σχηματίζονται σε περιθώρια σύγκλισης λιθосφαιρικών πλακών, στο εσωτερικό ηπειρωτικής πλάκας. Έχουν άμεση γενετική σχέση με όξινης-ενδιάμεσης σύστασης διεισδύσεις, I-τύπου, σε αναγωγικές συνθήκες, στα όρια της σειράς μαγνητίτη-ιλμενίτη. Οι τύποι μεταλλοφορίας ποικίλλουν όπως skarn, παράλληλες φλέβες, σύστημα φλεβιδίων, αντικατάστασης, εντός του πλουτωνίτη και διάσπαρτη, γι' αυτό και αποτελούν περισσότερο ένα σύστημα, παρά ένα απλό κοιτάσμα. Η πιο διαδεδομένη μορφή μεταλλοφορίας είναι αυτή μέσα στην διείσδυση και οι λεπτές παράλληλες φλέβες χαλαζία, με Au-Bi-Te-W.

Το IRGD μοντέλο κοιτασμάτων χρησιμοποιήθηκε αρκετά τα τελευταία χρόνια για να εξηγήσει την γένεση ενός μεγάλου αριθμού κοιτασμάτων χρυσού σε όλο τον κόσμο, συμπεριλαμβανομένου μερικών που προηγουμένως ταξινομούσαν ως ορογενετικού χρυσού ή μεταμορφικής προέλευσης.

Παρακάτω (Σχ1.) παρουσιάζεται ένας χάρτης με τις χώρες με τα πιο σημαντικά κοιτάσματα που σχετίζονται με μαγματικές διεισδύσεις στον κόσμο, καθώς και ένας πίνακας (Πίνακας 1) με ορισμένα βασικά χαρακτηριστικά μερικών γνωστών κοιτασμάτων αυτού του τύπου.



Σχ.1 Θέσεις των κοιτάσμων που σχετίζονται με μαγματικές διεισδύσεις. Craig J.R. Hart

Πίνακας 1: Βασικά χαρακτηριστικά μερικών γνωστών κοιτάσμων που σχετίζονται με μαγματικές διεισδύσεις.

ΚΟΙΤΑΣΜΑ	ΒΑΘΜΟΣ (g/t Au)	ΠΕΤΡΩΜΑ ΠΟΥ ΦΙΛΟΞΕΝΕΙ	ΤΥΠΟΣ ΜΕΤΑΛΛΟΦΟΡΙΑΣ	ΜΕΤΑΛΛΟΦΟΡΙΑ	ΟΡΥΚΤΟΛΟΓΙΚΗ ΠΑΡΑΓΕΝΕΣΗ
Kori Kollo, Bolivia	2,3	Δακτυλικός θόλος	Παράλληλες φλέβες	Ag, As, Sb, Sn, Bi, Cu, Zn, Pb, W	Py, Apy, Ccp, Gal, Bim, Sbn, Sph
Brewery Creek, Yukon	1,4	Μονζονιτικές φλέβες	Φλεβίδια	As, Sb, (Hg)	Py, Po, Sbn, Apy
Donlin Creek, Alaska	2,9	Ρυολιτικές φλέβες	Φλέβες-φλεβίδια	Ag, As, Sb, Hg	Py, Apy, Sbn
Kidston, Australia	1,48	Ρυόλιθος	Breccia και παράλληλες φλέβες	Bi, Mo, W, As, Te, Zn, Cu, Pb, Sn	Py, Po, Apy, Bim, Ccp, Sph, Mol, Gal
Fort Knox, Alaska	0,83	Πορφυροειδής γρανίτης	Sheeted	Bi, Te, Mo, As, Sb, W	Apy, Py, Sbn, Sch, Po, Lo, Mol, Bim
Vasilkovskoe, Kazakstan	3,7	Γρανодиорίτης	Sheeted	As, Sb, W, Pb, Cu, Bi, Te	Py, Po, Bim, Ccp, Sph, Gal, Mol, Sbn, Sch
Dublin Gultch, Yukon	0,93	Γρανодиорίτης	Sheeted	Bi, Te, Mo, As, Sb, W, Pb, Cu	Py, Po, Apy, Bim, Sch, Gal, Pb-Bi-Te-S

Py= Σιδηροπυρίτης, Apy= Αρσενοπυρίτης, Gal= Γαληνίτης, Bim= Βισμούθινίτης, Sph= Σφαλερίτης
Ccp= Χαλκοπυρίτης, Lo= Λολλινγκίτης, Mol= Μολυβδαινίτης, Po= Μαγνητοπυρίτης, Sbn= Αντιμονίτης Sch= Σεελίτης

Το μάγμα είναι ένα φυσικό διάλυμα, όπου περιέχει μέσα του στερεά υλικά ή διαλυμένα αέρια. Η σύσταση του μάγματος εκφράζεται σε βάρος επί τοις εκατό ορισμένων οξειδίων (SiO_2 , Al_2O_3 , FeO , MgO , CaO , Na_2O , K_2O , TiO_2 , P_2O_5) και σε μέρη ανά εκατομμύριο (ppm) ορισμένων ιχνοστοιχείων (Sr, Ba, Rb, Ni, Cr, Cu, U κ.λπ.). Στο μάγμα περιέχονται επίσης και πτητικά συστατικά, εκ των οποίων τα κυριότερα είναι το H_2O , το CO_2 και το SO_2 .

Το μάγμα χωρίζεται σε τέσσερις κατηγορίες, ανάλογα με την περιεκτικότητά του σε SiO_2 . Όταν το ποσοστό SiO_2 ξεπερνά το 63% το μάγμα είναι όξινο, ενώ όταν κυμαίνεται μεταξύ 63-52% το μάγμα είναι ενδιάμεσο. Βασικό μάγμα θεωρείται εκείνο με ποσοστό του SiO_2 μικρότερο του 52% αλλά μεγαλύτερο του 45%, ενώ υπερβασικό εκείνο με ποσοστό 45% και λιγότερο.

Το ιξώδες του μάγματος, δηλαδή η ιδιότητα του να αντιστέκεται στη ροή καθορίζεται από το ποσοστό του SiO_2 . Όσο πιο όξινο το μάγμα τόσο πιο μεγάλο ιξώδες έχει. Ωστόσο επηρεάζεται και από άλλους παράγοντες όπως το νερό, που μειώνει το ιξώδες και η θερμοκρασία, που επίσης το ελαττώνει.

Η θερμοκρασία του μάγματος κυμαίνεται ανάμεσα στους 700°C με 1200°C , κοντά στην επιφάνεια της Γης, με τα βασικά μάγματα να έχουν τις υψηλότερες θερμοκρασίες. Βαθύτερα, οι θερμοκρασίες είναι ελαφρώς πιο χαμηλές, $650-1200^\circ\text{C}$. Η πυκνότητα του μάγματος ανέρχεται περίπου στα 2,2 με $3\text{gr}/\text{cm}^3$.

Το μάγμα δημιουργείται μέσω της διεργασίας της μερικής τήξης, ενώ την εξέλιξη του επηρεάζουν ορισμένες δευτερογενείς διεργασίες: α) Διαφοροποίηση ομογενούς μάγματος, όταν δηλαδή από ένα ομογενές μάγμα προκύπτουν υγρά ή στερεά κλάσματα διαφορετικής σύστασης. β) Αφομοίωση, η ενσωμάτωση δηλαδή πετρωμάτων στο μάγμα, όπου λόγω της - πολλές φορές - διαφορετικής σύστασής τους αλλάζουν την σύσταση του μάγματος. γ) Μίξη δύο διαφορετικών μαγμάτων, απ' όπου προκύπτουν κυρίως ηφαιστειακά ή υποηφαιστειακά πετρώματα και συμβαίνει κυρίως σε βασικά μάγματα.

Από την κρυστάλλωση του μάγματος προκύπτουν τα πυριγενή πετρώματα. Όπου ανάλογα με την σύστασή τους, το ποσοστό δηλαδή σε SiO_2 χωρίζονται σε όξινα, βασικά και υπερβασικά και ανάλογα με το βάθος σχηματισμού τους σε πλουτωνικά (στερεοποιούνται σε μεγάλο βάθος), σε υποηφαιστειακά ή φλεβικά (σε μικρότερο βάθος) και σε ηφαιστειακά ή εκριξηγενή (σε μικρό βάθος κοντά στην επιφάνεια). Επιπλέον, το μάγμα δημιουργείται σε

διάφορα γεωτεκτονικά περιβάλλοντα, παραδείγματος χάρη τα βασικά μάγματα δημιουργούνται σε αποκλίνοντα γεωτεκτονικά περιβάλλοντα, ενώ τα όξινα και ενδιάμεσα σε συγκλίνοντα. Σε ενδοηπειρωτικές περιοχές δημιουργούνται επίσης βασικά μάγματα, που προέρχονται από το κατώτερο στρώμα του μανδύα (D'').

Παρακάτω παρουσιάζεται ένας πίνακας (Πίνακας 2) με τα βασικότερα πυριγενή πετρώματα.

	ΟΞΙΝΑ	ΕΝΔΙΑΜΕΣΑ	ΒΑΣΙΚΑ	ΥΠΕΡΒΑΣΙΚΑ
ΠΛΟΥΤΩΝΙΚΑ	Γρανίτης Γρανοδιορίτης Τοναλίτης	Συνηίτης Μονζονίτης Διορίτης	Γάββρος Νορίτης Τροκτόλιθος Ανορθοσίτης	Δουνίτης Πυροξενίτης Περιδοτίτης
ΥΠΟΗΦΑΙΣΤΕΙΑΚΑ	Πηγματίτης Απλίτης		Δολερίτης	
ΗΦΑΙΣΤΕΙΑΚΑ	Ρυόλιθος Δακίτης Οψιδιανός Κίσσηρις	Τραχείτης Λατίτης Ανδεσίτης	Βασάλτης	

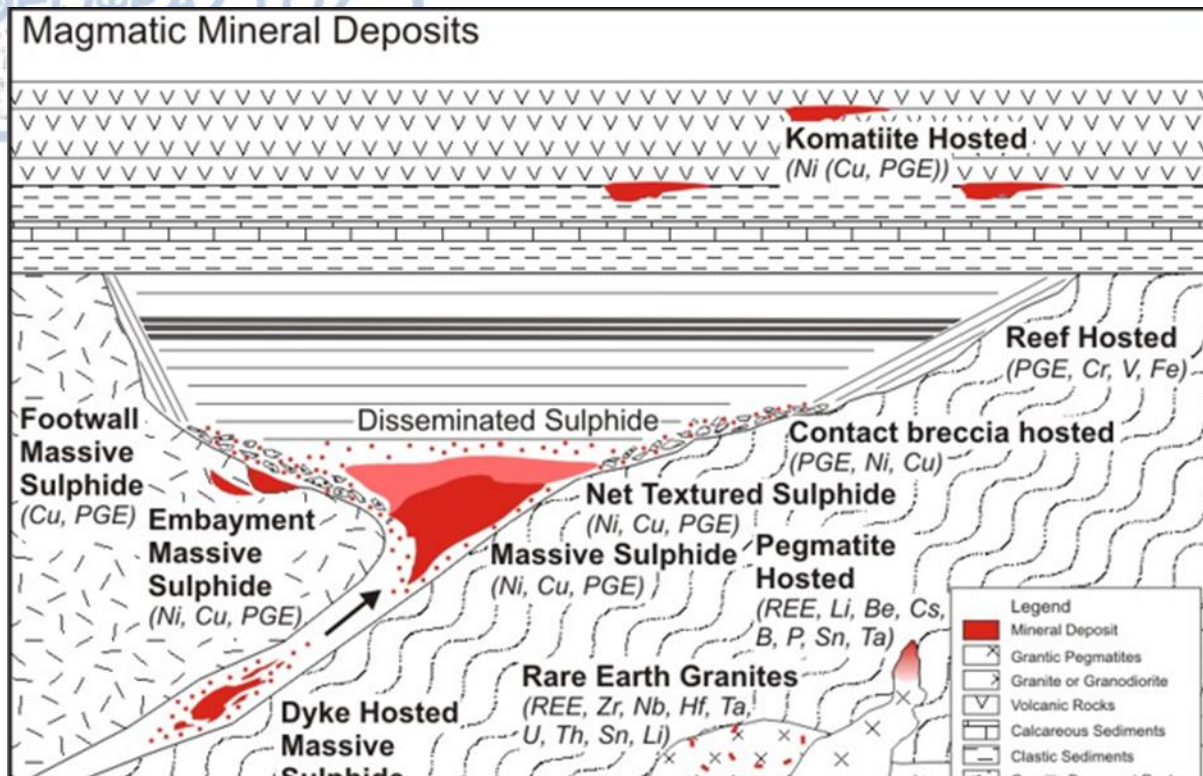
3. Τα Μαγματογενή κοιτάσματα

Τα κοιτάσματα χωρίζονται σε τέσσερις βασικές κατηγορίες. Η δημιουργία των κοιτασμάτων καθορίζεται σημαντικά και επηρεάζεται από τις πετρογενετικές διαδικασίες έτσι, τα φαινόμενα τα οποία προκαλούν τον σχηματισμό των τριών κατηγοριών πετρωμάτων (πυριγενή, ιζηματογενή, μεταμορφωμένα), είναι υπεύθυνα εν μέρη και για την σχηματισμό των κοιτασμάτων. Έτσι τα κοιτάσματα ταξινομούνται σε: α) Μαγματογενή κοιτάσματα β) Ιζηματογενή κοιτάσματα γ) Κοιτάσματα από αποσάθρωση δ) Κοιτάσματα από μεταμόρφωση.

Η πλειοψηφία των κοιτασμάτων ανήκουν την κατηγορία των μαγματογενών κοιτασμάτων, όπως τα κοιτάσματα που σχετίζονται με μαγματικές διεισδύσεις, τα κοιτάσματα χρωμίτη, τα κοιτάσματα πλατίνας (PGM), τα κοιτάσματα νικελίου-χαλκού, τα επιθερμικά κοιτάσματα, τα πηγματιτικά κ.λπ. Σχηματίζονται σε διάφορα γεωτεκτονικά περιβάλλοντα, όπως σε αποκλίνοντα ή συγκλίνοντα περιθώρια ή και σε ενδοηπειρωτικές περιοχές.

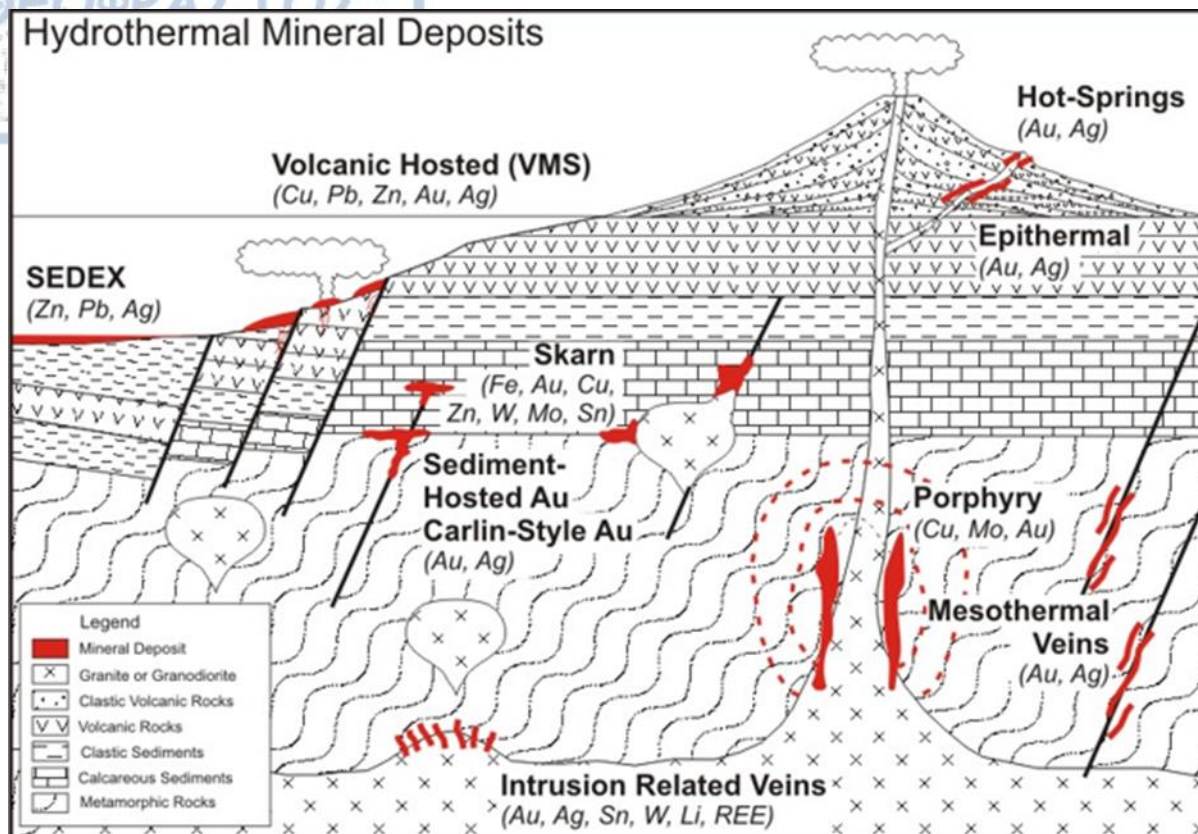
Ανάλογα με το βάθος σχηματισμού τους ταξινομούνται σε κοιτάσματα που σχετίζονται πλουτώνεια, υποηφαιστειακή και ηφαιστειακή μαγματική δράση και ανάλογα με τη φύση του μαγματικού πετρώματος σε κοιτάσματα που σχετίζονται με όξινα, ενδιάμεσα, βασικά, υπερβασικά πετρώματα.

Η κυριότερη διαδικασία εξέλιξης του μάγματος είναι η διαφοροποίηση με κλασματική κρυστάλλωση. Το μάγμα κρυσταλλώνεται σε διάφορες θερμοκρασίες και όχι μόνο σε μια συγκεκριμένη. Έτσι διαφορετικά ορυκτά κρυσταλλώνονται σε διαφορετικές θερμοκρασίες. Στην αρχική κρυστάλλωση του μάγματος, στο ορθομαγματικό στάδιο, όπου και κρυσταλλώνεται το μεγαλύτερο ποσοστό του μάγματος (90%), σχηματίζονται τα ορθομαγματικά κοιτάσματα. Κρυσταλλώνονται μεταλλικά ορυκτά όπως μαγνητίτης και ο χρωμίτης και δημιουργούνται τα κοιτάσματα νικελίου-χαλκού, χρωμίτη, πλατινών (PGE), τιτανίου, οι κιμπερλίτες, τα κοιτάσματα νιοβίου, χαλκού, σπάνιων γαιών (REE) (Σχ. 2).



Σχ. 2: Τα κοιτάσματα που δημιουργούνται κατά το ορθομαγματικό στάδιο κρυστάλλωσης του μάγματος - Earth Science Australia

Κατά την κύρια κρυστάλλωση του μάγματος δεν δημιουργούνται κοιτάσματα και κρυσταλλώνονται μόνο τα δύστηκτα πυριτικά ορυκτά. Στα τελευταία στάδια κρυστάλλωσης του μάγματος, λαμβάνουν χώρα το πηγματιτικό - πνευματολιτικό και υδροθερμικό στάδιο, όπου τα πτητικά συστατικά παίζουν πολύ μεγάλο ρόλο. Το υπολειμματικό υγρό εμπλουτίζεται στα πτητικά συστατικά, έτσι το ιξώδες του ελαττώνεται και εισχωρεί σε ρωγμές περιβαλλόντων πετρωμάτων και δημιουργούνται πηγματίτες και απλίτες σε μορφή φλεβών. Σε σύνθετους πηγματίτες, μπορούν να βρεθούν σπάνια στοιχεία όπως το λίθιο, που έχει μεγάλη οικονομική σημασία. Όταν η θερμοκρασία πέσει κάτω από τους 374°C, τα αέρια μετατρέπονται σε υγρά διαλύματα και σχηματίζονται τα υδροθερμικά κοιτάσματα, με αποβολή ορυκτών όπως ο σιδηροπυρίτης, σφαλερίτης, γαληνίτης, βορνίτης, βεζουβιανίτης, βολλαστονίτης κ.α. και δημιουργούνται κοιτάσματα όπως τα VMS, IRGD, τα επιθερμικά, τα κοιτάσματα πορφυριτικού χαλκού, skarn κ.λπ (Σχ. 3).

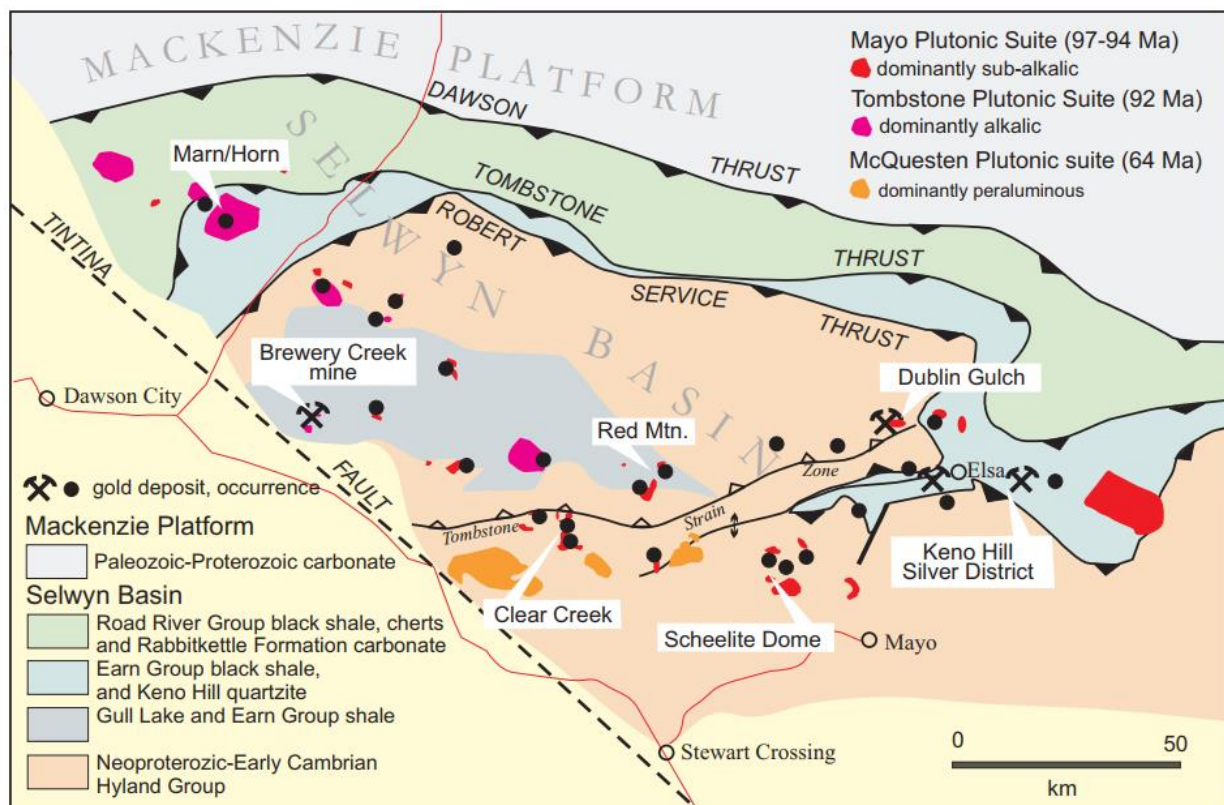


Σχ. 3 Τύποι κοιτασμάτων που δημιουργούνται κατά το υδροθερμικό στάδιο κρυστάλλωσης του μάγματος - Earth Science Australia

4. Γεωτεκτονικό περιβάλλον σχηματισμού των κοιτασμάτων που σχετίζονται με μαγματικές διεισδύσεις

Λόγω της συνεχώς εξελισσόμενης προσπάθειας για μια ολοκληρωμένη κατανόηση των κοιτασμάτων που σχετίζονται με μαγματικές διεισδύσεις οι γεωτεκτονικές συνθήκες που συνδέονται με την δημιουργία τους δεν έχουν απαντηθεί πλήρως. Οι οπισθοτόξιες λεκάνες, οι ζώνες πύχωσης στις λεκάνες μπροστά από το τόξο, οι συνθήκες σύγκρουσης, μετά τη σύγκρουση και τα μαγματικά τόξα σε ορογενετικές ζώνες έχουν προταθεί (Thompson et al., 1999). Παραδείγματα ποικίλων παγκοσμίων περιβαλλόντων που φιλοξενούν μεγάλα κοιτάσματα αυτού του τύπου περιλαμβάνουν την ένωση των ηπείρων της Παλαιό-Τηθύος, βορειοανατολικά κρατονικά περιθώρια της Κίνας, του ορογενές του Tasman, το βόρειο μέρος της βορειοαμερικανικής Κορδιέρα και τις Άνδεις (Thompson et al., 1999; Lang et al., 2000; Thompson και Newberry 2000). Ωστόσο, το γεωτεκτονικό περιβάλλον των καλύτερα μελετημένων κοιτασμάτων που σχετίζεται με μαγματικές διεισδύσεις είναι τα κοιτάσματα της

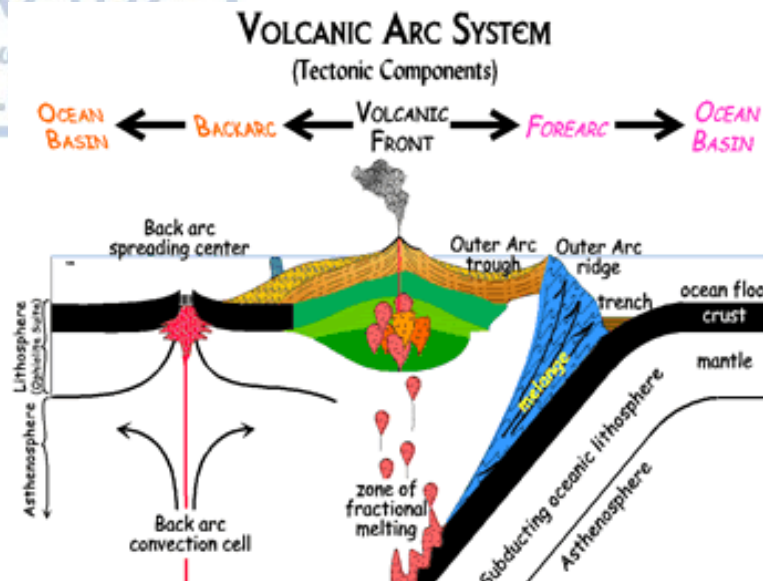
πλουτωνικής σειράς Tombstone. Σχετιζόμενα κοιτάσματα αυτού τύπου και εμφανίσεις στην ευρύτερη περιοχή του Yukon, έχουν άμεση σχέση με αυτή την πλουτωνική σειρά, τοποθετημένα μέσα σε παλιά Παλαιοζωικά και παλαιότερα γεωσυγκλινικά στρώματα, υπερκείμενα του κρατονικού περιθωρίου. Τα πλουτωνικά πετρώματα έχουν διεισδύσει κυρίως μέσα σε κλαστικά και τοπικά σε ανθρακικά ιζήματα της λεκάνης Selwyn και δεν εμφανίζονται μέσα στον πιθανώς παχύτερο φλοιό της γειτονικής ανθρακικής πλατφόρμας. Παρακάτω (Σχ. 4) παρουσιάζεται ο γεωλογικός χάρτης της δυτικής ζώνης χρυσού του Tombstone.



Σχ. 4 Γεωλογικός χάρτης της δυτικής ζώνης χρυσού Tombstone, στο δυτικό-κεντρικό Yukon. Η περιοχή κυριαρχείται από παλιά κλαστικά ιζήματα της λεκάνης Selwyn. Τα ανθρακικά της πλατφόρμας Mackenzie κυριαρχούν βόρεια του ρήγματος επώθησης Dawson. Ο τεκτονισμός κορυφώθηκε περίπου στα 105 Ma (Mair et al., 2006) και ακολούθησε η τοποθέτηση της πλουτωνικής σειράς Mayo και τέλος της πλουτωνικής σειράς Tombstone, κατά τη διάρκεια μιας περιόδου επέκτασης του φλοιού στο τέλος του μέσου Κρητιδικού. Craig J.R. Hart

Οι διεισδύσεις πιθανολογείται πως τοποθετήθηκαν, στα παραπάνω σε μια περίοδο εφελκυσμού, που εμφανίστηκε ως μια σύντομη φάση σε ένα περιβάλλον πάχυνσης του φλοιού κατά τη διάρκεια μια κυρίως συμπιεστικής κατάστασης (Murphy, 1997). Οι Buntzen και Miller (1997) με δεδομένα από την μεταλλογενετική ζώνη Kuskokwim της νοτιοδυτικής Αλάσκα υποστηρίζουν πως η διεισδυση των Ύστερο Κρητιδικών και Τριτογενών πλουτωνιτών που σχετίζονται με χρυσό, έγινε σε συνθήκες υποβύθισης, σε ένα περιβάλλον οπισθοτόξιας

λεκάνης, παρόμοιο με αυτό που προτάθηκε για την μεταλλογενετική ζώνη της Βολιβίας (κοίτασμα Kori Kollo) από τους Lamb et al., 1997. Πιθανά κοιτάσματα που σχετίζονται με μαγματικές διεισδύσεις στην πλατφόρμα της Βόρειας Κίνας (Miller et al., 1998) δημιουργήθηκαν κατά τη διάρκεια δύο μεγάλων περιόδων σε περίπλοκες και ανεπαρκώς κατανοητές τεκτονικές συνθήκες, όπου περιλαμβάνουν συμπίεση, εφελκυσμό και τόξο. Οι Goldfarb et al., 2000 μελέτησαν πολλές πλουτωνικές επαρχίες που φιλοξενούν τα κοιτάσματα αυτού του τύπου και κατέληξαν στο συμπέρασμα πως τα ορογενή που σχετίζονται με σύγκρουση και υποβύθιση είναι τα πιο ευνοϊκά γεωτεκτονικά περιβάλλοντα. Δύο μεγάλα παραδείγματα όπως αυτό, αποτελούν η πλατφόρμα της Βόρειας Κίνας όπως ειπώθηκε παραπάνω και το Παλαιοζωικό Βαρίσκειο ορογενές που εκτείνεται από την Ιβηρική χερσόνησο μέχρι την Κεντρική Ασία και την Βόρεια Κίνα (e.g., Fernandez-Suarez, 1998; Goldfarb et al., 2000). Όμως, ο ανασχηματισμός της μεταλλογενετικής επαρχίας Tintina από τους Flanigan et al. (2000), έδειξε ότι ακόμα μέσα και στην ίδια μεταλλογενετική επαρχία, τα κοιτάσματα που σχετίζονται με μαγματικές διεισδύσεις μπορούν να σχηματιστούν σε ένα γεωτεκτονικό περιβάλλον που το στυλ του ποικίλει στον χώρο και στον χρόνο. Για παράδειγμα, η πλουτωνική σειρά του Tombstone σχηματίστηκε στο βορειοανατολικό κομμάτι της Μεσο-Κρητιδικής πλουτωνικής ζώνης στην ζώνη χρυσού Tintina. Αποτελείται από τοπικές αλκαλικές, μεσοαργιλικές, ασβεσταλκαλικές και υπεραργιλικές διεισδύσεις μέσα σε παλιό ηπειρωτικό φλοιό, πιθανότατα κατά την διάρκεια ενός εφελκυστικού επεισοδίου, όπου ακολούθησε την κίνηση μεγάλων επωθητικών ρηγμάτων (e.g. Murphy, 1997; Marsh et al., 1999) και θυμίζει ένα περιβάλλον λεκάνης οπισθοτόξιας ή προχώρας. Σε αντίθεση με τις Ύστερο-Κρητιδικές διεισδύσεις της νοτιοδυτικής Αλάσκα που έχουν κυρίως μια πιο άμεση σχέση με περιβάλλον υποβύθισης (e.g., Buntzen και Miller, 1997; McCoy et al., 1997; Flanigan et al., 2000; Goldfarb et al., 2000; Newberry, 2000). Το γεωτεκτονικό μοντέλο αντικατοπτρίζεται στο Σχ.5.



Σχ. 5 Γεωτεκτονικό μοντέλο που δείχνει τα στοιχεία που συντελούν το μαγματικό τόξο.
Wikipedia

Παρά τις αβεβαιότητες μεταξύ και εντός των μεταλλογενετικών επαρχιών, τα περισσότερα γνωστά κοιτάσματα που σχετίζονται με μαγματικές διεισδύσεις, όπου έχουν μελετηθεί (Kori Kollo της Βολιβίας, Fort Knox στην Αλάσκα, Kidston και Timbarra της Αυστραλίας κ.λπ.) δημιουργήθηκαν εντός ή υπερκείμενα σε παλιό, κρατονικό ηπειρωτικό φλοιό (Thompson et al., 1999), σε απόσταση από τα συγκλίνοντα περιθώρια που ήταν ενεργά κατά την διάρκεια του μαγματισμού και κάποια από αυτά πιθανότητα συνδέονται και με εφελκυσμό. Παρ' όλο που οι συζητήσεις και οι προτάσεις πάνω σε αυτό το ζήτημα δεν θα σταματήσουν, ο φαινομενικός σχηματισμός των παρόμοιων σε στυλ γνωστών κοιτασμάτων που σχετίζονται με μαγματικές διεισδύσεις γίνεται σε ένα εύρος τεκτονικών συνθηκών και προτείνεται ότι δεν υπάρχει κάποιο συγκεκριμένο τεκτονικό καθεστώς που χρειάζεται για να δημιουργηθούν.

5. Μαγματικές Διεργασίες

Ο ρόλος του μάγματος και γενικότερα οι μαγματικές διεργασίες είναι από τα πιο σημαντικά κομμάτια των κοιτασμάτων που σχετίζονται με μαγματικές διεισδύσεις και ταυτόχρονα το λιγότερο κατανοητό. Οι διαδικασίες οι οποίες θα πρέπει να αναφερθούν είναι τρεις: 1) Σύσταση του μάγματος και χαρακτήρας του πλουτωνίτη 2) Η πηγή προέλευσης του μάγματος και 3) Ο ρόλος της διαδικασίας της κλασματικής κρυστάλλωσης.

5.1 Σύσταση του μάγματος και χαρακτήρας του πλουτωνίτη

Οι πλουτωνίτες των κοιτασμάτων που σχετίζονται με μαγματικές διεισδύσεις είναι μεταργιλικό έως ασθενά υπεραργιλικό, ασβεσταλκαλικό, υποαλκαλικό. Η συνεπάγουσα κατάσταση οξείδωσης των περισσότερων διεισδύσεων πλανάται μεταξύ υψηλά οξειδωμένων διεισδύσεων στην σειρά μαγνητίτη που είναι στενά συνδεδεμένα με τα πορφυριτικά συστήματα και σε διεισδύσεις στην σειρά ιλμενίτη με έντονη επικράτηση των αναγωγικών συνθηκών, που είναι συχνά σχετιζόμενες με κοιτάσματα λιθόφιλων στοιχείων (Σχ. 6). Κατά μέσο όρο, περιέχονται μόνο μικρές συγκεντρώσεις μαγνητίτη-ιλμενίτη, αλλά υπάρχουν και κοιτάσματα που είναι πολύ πλούσια σε ιλμενίτη. Οι περισσότερες διεισδύσεις βρίσκονται να ανήκουν στην σειρά του ιλμενίτη, με εξαίρεση όμως να αποτελεί το κοίτασμα Timbarra που είναι πολύ οξειδωμένο.

Γενικά, η καλύτερη και πιο αντιπροσώπευσα περιγραφή που μπορεί να δοθεί στις διεισδύσεις είναι I-τύπου μάγματα, σε αναγωγικές συνθήκες (Chappell και White, 1974), στο όριο μεταξύ μαγνητίτη και ιλμενίτη. Είναι ενδιάμεσες με όξινης και το μάγμα είναι πλούσιο σε διοξείδιο του πυριτίου (64-72%), όπου σχηματίζονται κυρίως γρανίτες και γρανοδιορίτες, αλλά και χαλαζιακοί μονζογρανίτες, μονζονίτες ενώ εμφανίζονται φάσεις μονζοδιορίτη ή χαλαζιακού συνηίτη.

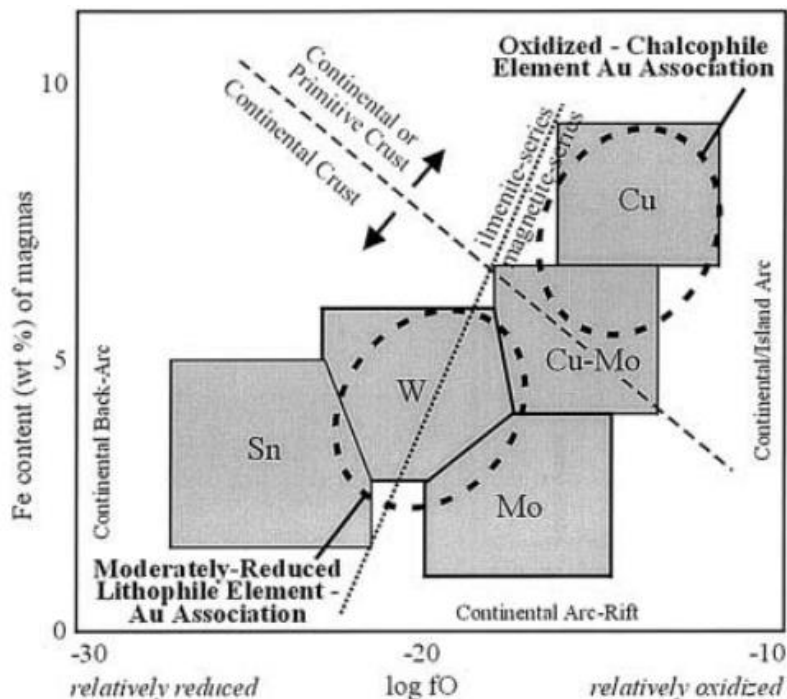
Ο βιοτίτης είναι το επικρατέστερο φεμικό ορυκτό, με ελάχιστη έως καθόλου κερυστίλβη, ενώ η παρουσία πυρόξενου είναι συνήθης. Οι ισχυρά διαφοροποιημένες υπεραργιλικές φάσεις μπορεί να περιέχουν επίσης μοσχοβίτη, γρανάτες και τουρμαλίνη.

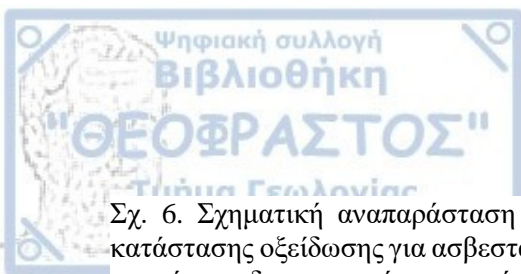
Οι απλιτικές και πηγματιτικές φλέβες, καθώς και πιο βασικές φάσεις, όπως ασβεσταλκαλικοί λαμπροφύρες είναι πιθανό να υπάρξουν.

5.2 Πηγή προέλευσης του μάγματος

Η πηγή προέλευσης του μάγματος που οδηγεί στον σχηματισμό των κοιτασμάτων που σχετίζονται με μαγματικές διεισδύσεις δεν είναι πλήρως κατανοήσιμη. Στην πλουτωνική πετρογραφική σειρά του Tombstone, δεδομένα από τα ραδιενεργά ισότοπα των διεισδύσεων συστήνουν προέλευση του μάγματος είτε από ανάτηξη είτε από μόλυνση μανδουακού υλικού από παλιό ηπειρωτικό φλοιό. Οι Duncan (1999) και Coulson et al. (μη δημοσιευμένα δεδομένα) χρησιμοποίησαν τη σύσταση ιχνοστοιχείων και την επικάλυψη ιστοτοπικής υπογραφής μεταξύ βασικές, υποκορεσμένες σε πυρίτιο, αλκαλικές διεισδύσεις και σε γειτονικούς όξινους, υποαλκαλικούς πλουτωνίτες στο Yukon και πρότειναν ότι οι μεταργιλικές διεισδύσεις δείχνουν μια αρχική μίξη μεταξύ ασθενοσφαιρικών και λιθοσφαιρικών τηγμάτων,

ακολουθούμενη από μόλυνση από παλιό ηπειρωτικό φλοιό. Η παρουσία λιθοσφαιρικού μανδουακού υλικού, θα μπορούσε έτσι να εξηγήσει την ύπαρξη μεγάλων αποθεμάτων ουρανίου στις υποκορεσμένες σε πυρίτιο, αλκαλικές διεισδύσεις στο Tombstone (Ollade και Goodfellow, 1978) και τις πλούσιες σε μολυβδαίνιο φλέβες που υπάρχουν σε πολλές αλκαλικές διεισδύσεις. Επίσης, οι McCoy et al. (1997) προτιμούν σαν εξήγηση την μόλυνση ασθενοσφαιρικού μανδουακού τήγματος από ηπειρωτικό φλοιό. Μέχρι στιγμής δεν υπάρχουν γεωχημικά κριτήρια που να συνδέονται με την πιθανή πηγή των συστατικών αυτών των κοιτασμάτων που θα μπορούσαν να προσφέρουν ουσιαστική βοήθεια στην αναγνώριση μεταξύ εμπλουτισμένων σε μέταλλα και στείρων πλουτωνιτών σε μελλοντικές επαρχίες. Ωστόσο, η σχεδόν πανταχού παρουσία λαμπροφυρικών φλεβών στις διεισδύσεις της πλουτωνικής πετρογενετικής σειράς του Tombstone, γεννούν την ερώτηση για το αν η διείσδυση βασικών, αλκαλικών μαγμάτων μέσα σε μεταργιλικά, ασβεσταλκαλικά τήγματα, έρχονται σε συμφωνία με τον με μοντέλο που προτάθηκε από τους Keith et al. (1998) για το φαράγγι του Bingham και μερικά κοιτάσματα μολυβδαίνιου της Cordillera και αν έχουν πιθανόν επηρεάσει την μεταλλογένεση και την εξέλιξη των πτητικών συστατικών. Εάν αυτό το μοντέλο, ισχύει για τα περιβάλλοντα των κοιτασμάτων που σχετίζονται με μαγματικές διεισδύσεις, τότε και η παραμικρή ύπαρξη βασικών αλκαλικών πετρωμάτων, μπορεί να αποτελέσει ένδειξη για δυνητική εξερεύνηση.

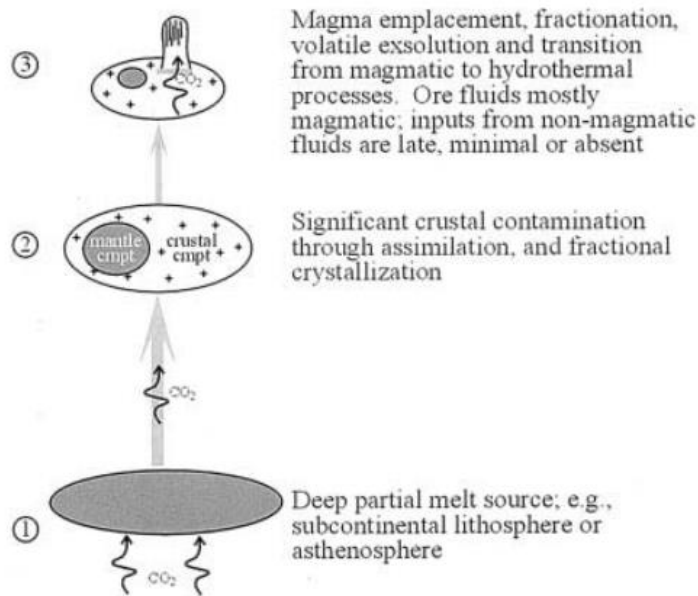




Σχ. 6. Σχηματική αναπαράσταση της σχέσης μεταξύ του δείκτη κλασματικής κρυστάλλωσης και της κατάστασης οξειδωσης για ασβεσταλκαλικά με αλκαλικά μάγματα σχετιζόμενα με μαγματικά-υδροθερμικά συστήματα διαφορετικής υπεροχής μεταλλοφοριών. James R. Lang, Timothy Baker

5.3 Ο ρόλος της διαδικασίας της κλασματικής κρυστάλλωσης

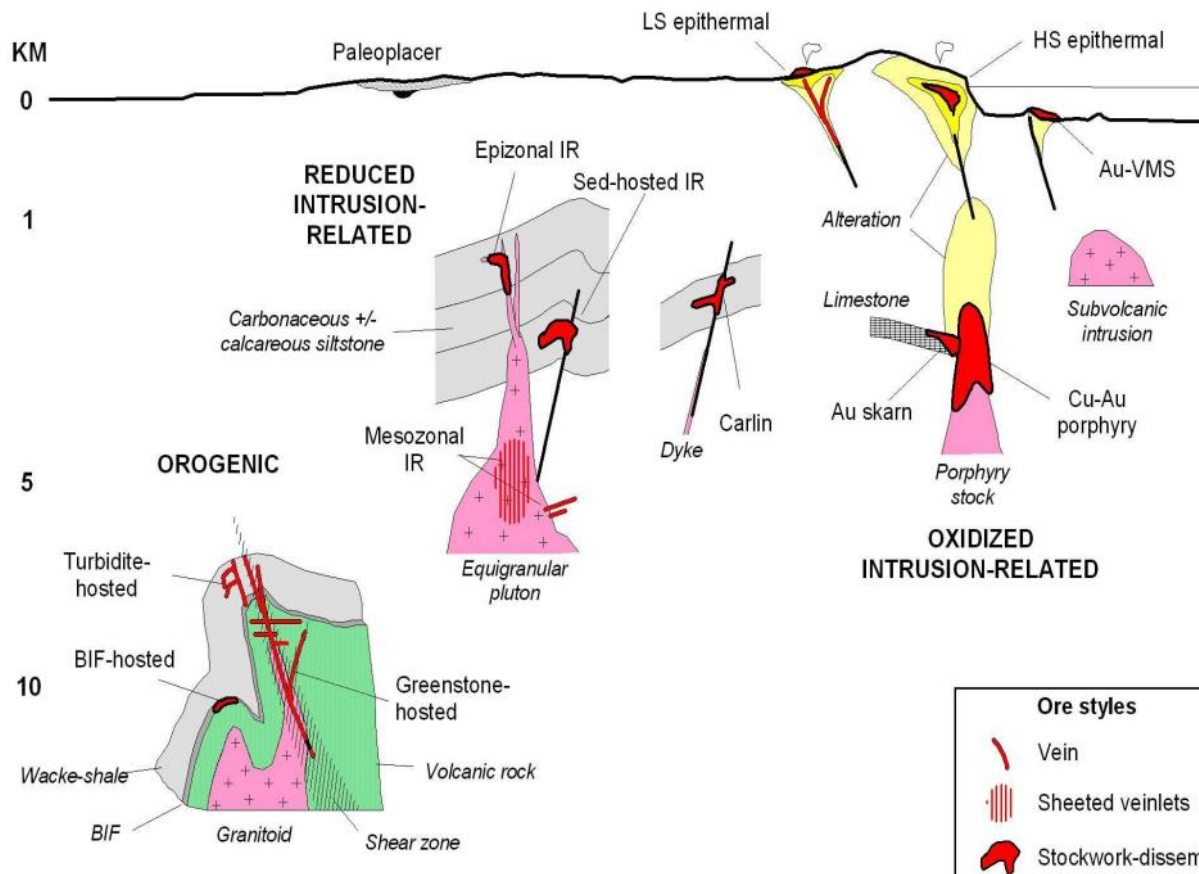
Οι πλουτωνίτες που συνδέονται με τα κοιτάσματα που σχετίζονται με μαγματικές διεισδύσεις καλύπτουν ένα ευρύ φάσμα σύστασης, όμως οι γρανίτες και γρανοδιορίτες αποτελούν τα πιο ευνοϊκά πετρώματα για την φιλοξενία τους. Η κλασματική κρυστάλλωση αποτελεί μια πολύ σημαντική διαδικασία για πολλά κοιτάσματα που σχετίζονται με μαγματικές διεισδύσεις, όπως το Fort Knox (McCoy et al. 1997) και το Timbarra (Mustard, 2001). Και στις δύο περιπτώσεις ο χρυσός συνδέεται με αυτή. Η σημαντικότητα των ύστερων φάσεων της κλασματικής κρυστάλλωσης και η ταυτόχρονη μετάβαση από το μαγματικό στο υδροθερμικό στάδιο υποστηρίζεται επίσης από πολλά συστήματα στην περιοχή του Yukon και του Timbarra, με την παρουσία πηγματιτών, απλιτών και τουρμαλίνη και μεταγενέστερα με την εμφάνιση χρυσοφόρων φλεβών χαλαζία. Επιπλέον, ορυκτολογικά και χημικά δεδομένα από βιοτίτη και απατίτη του Emerald Lake πλουτωνίτη στο Yukon, έδειξαν ότι ουσιαστικές αλλαγές στην δραστηριότητα των πτητικών συστατικών, συνοδεύουν ακόμη και την ανεπαίσθητη κλασματική κρυστάλλωση του μάγματος. Η συνεισφορά της όμως στον σχηματισμό μεταλλεύματος παραμένει μη πλήρως κατανοήσιμη. Η γεωχημεία των διεισδύσεων στην περιοχή Fairbanks στην Αλάσκα, οδήγησε τους McCoy et al. (1997) στην πρόταση πως το μεγαλύτερο μέρος της μεταλλοφορίας του χρυσού συνδέεται με διεισδύσεις με βαθμό κλασματικής κρυστάλλωσης μεγαλύτερο του 80, αλλά τα δεδομένα από άλλες περιοχές δεν είναι επαρκή για να καθοριστεί εάν αυτή η σχέση μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως ένα γενικευμένο κριτήριο εξερεύνησης αυτών των κοιτασμάτων. Παρόμοια, λόγος Fe_2O_3/FeO μικρότερος του 0,5, όπου έχει συσχετιστεί με δείκτη αλκαλικότητας, έχει προταθεί ως ένδειξη για διεισδύσεις ευνοϊκές να φιλοξενήσουν κοιτάσματα χρυσού (Leveille et al., 1988; Mutschler et al., 1985). Παρ' όλο που στην περιοχή Yukon της Αλάσκα, οι περισσότερες διεισδύσεις που είναι σύμφωνες με αυτό το μοτίβο συνδέονται με κοιτάσματα χρυσού (Bundtzen and Miller, 1997; McCoy et al., 1997), πολλές διεισδύσεις που παρουσιάζουν την παραπάνω γεωχημεία δεν είναι προς το παρόν γνωστό να σχετίζονται με χρυσό.



Σχ. 7 Σχηματικό μοντέλο που απεικονίζει τις διαδικασίες με τις οποίες το μάγμα συνδέεται με τα κοιτάσματα που σχετίζονται με μαγματικές διεισδύσεις: 1. Παραγωγή αρχικών μαγμάτων κατά τη μερική τήξη της υποηπειρωτικής λιθόσφαιρας ή και της ασθενόσφαιρας. Το διοξείδιο του άνθρακα παίζει πολύ σημαντικό ρόλο στη δημιουργία μαγμάτων πλούσια σε αλκάλια (Kaszuba και Wendlandt, 2000). 2. Το μάγμα ανεβαίνει μέσα από τον φλοιό και υποβάλλεται σε αφομοίωση και κλασματική κρυστάλλωση που συμπεράθηκε από ισότοπα Nd και Sr και από γεωχημεία (e.g., Duncan et al., 1999; Lang et al., 2000). 3. Διείσδυση του μάγματος, κλασματική κρυστάλλωση και απελευθέρωση μιας πλούσιας σε διοξείδιο του άνθρακα πτητικής φάσης, με αποτέλεσμα τη δημιουργία της μεταλλοφορίας των κοιτασμάτων που σχετίζονται με μαγματικές διεισδύσεις. James R. Lang, Timothy Baker

6. Κύρια χαρακτηριστικά των κοιτασμάτων που σχετίζονται με μαγματικές διεισδύσεις.

Τα κοιτάσματα που σχετίζονται με μαγματικές διεισδύσεις, όπως έχει ήδη ειπωθεί, είναι ένας νέος τύπος κοιτασμάτων και αρκετά φτωχά κατανοητός. Ουκ ολίγες φορές αυτός ο τύπος κοιτασμάτων έχει λανθασμένα ταυτιστεί με άλλους τύπους, όπως αυτός του ορογενετικού χρυσού. Τα χαρακτηριστικά των κοιτασμάτων που σχετίζονται με μαγματικές διεισδύσεις, όπως συντάχθηκε από τους Lang και Baker (2001), με συνεισφορές από τους Lang et al. (2000) και Thompson and Newberry (2000) παρατίθενται παρακάτω, πολλά εκ των οποίων θα αναλυθούν περαιτέρω σε επόμενα κεφάλαια. Έμφαση δίνεται στα καλύτερα μελετημένα παραδείγματα από την Αλάσκα και το Yukon.



Σχ. 8 Σχηματική τομή όπου παρουσιάζονται δύο τύποι κοιτασμάτων που περιέχουν χρυσό σε σύγκριση με τα κοιτάσματα που σχετίζονται με μαγματικές διεισδύσεις. Σημείωση: το βάθος αντικατοπτρίζεται σε λογαριθμική κλίμακα. Robert F. et al.

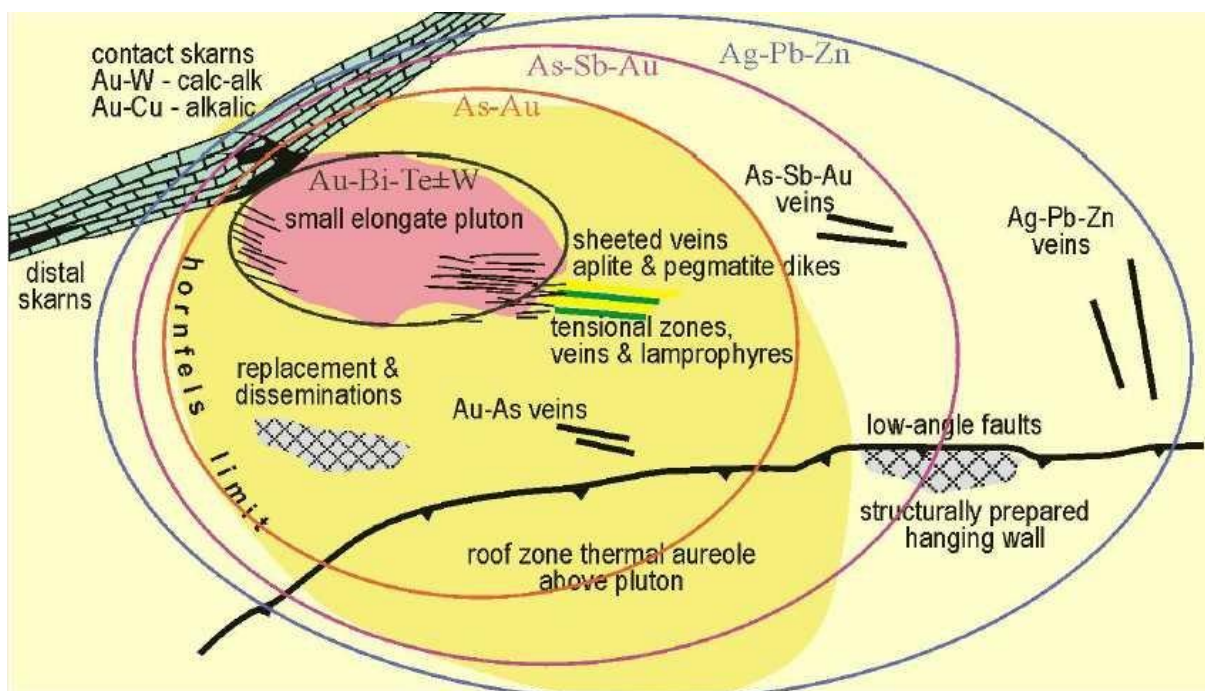
1. Μεταργιλικές, υποαλκαλικές διεισδύσεις όξινης με ενδιάμεσης σύστασης που ισορροπούν στο όριο μεταξύ ιλμενίτη και μαγνητίτη.
2. Ανθρακικά υδροθερμικά διαλύματα
3. Μεταλλοφορία που μεταβλητά συνδυάζει τον χρυσό με Bi, Te, W, As, Mo ή/και Sb και χαμηλές συγκεντρώσεις βασικών μετάλλων.
4. Χαμηλή περιεκτικότητα σε σουλφίδια, συνήθως κάτω από 5%, περιέχοντας κυρίως αρσενοπυρίτη, σιδηροπυρίτη, μαγνητοπυρίτη, ενώ απουσιάζουν ο αιματίτης και ο μαγνητίτης.
5. Περιορισμένη υδροθερμική εξαλλοίωση.
6. Στο εσωτερικό συγκλινόντων περιθωρίων
7. Τοποθεσία στην μαγματική επαρχία γνωστή για την παρουσία κοιτασμάτων κασιτερίτη ή/και βολφραμίτη.

Από τα παραπάνω χαρακτηριστικά που αναφέρθηκαν τα πρώτα τέσσερα ισχύουν και τα κοιτάσματα ορογενετικού χρυσού, με μόνο τα δύο τελευταία να αποτελούν γνωρίσματα των

κοιτασμάτων που σχετίζονται με μαγματικές διεισδύσεις. Παρακάτω παρουσιάζονται περισσότερα χαρακτηριστικά γνωρίσματα τους.

Τεκτονικό καθεστώς: Ο σχηματισμός των κοιτασμάτων που σχετίζονται με μαγματικές διεισδύσεις ευνοείται καλύτερα όταν το μάγμα διεισδύει σε παλιά ηπειρωτικά περιθώρια πίσω από ορογενή και σε μαγματικά τόξα που συνδέονται με υποβύθιση. Τα ιζηματογενή πετρώματα που φιλοξενούν την μαγματική διείσδυση μέσα στην οποία φιλοξενείται το κοίτασμα, αποτελούνται από μειωγεωσυγκλινικά ιζήματα αναγωγικών συνθηκών ή είναι μετα-ιζηματογενή πετρώματα.

Ζωνώδης μεταλλοφορία: Η ζωνώδης κατανομή της μεταλλοφορίας δείχνει την εξέλιξη της θερμοκρασίας. Η μείωση της λοιπόν (και της πίεσης), είναι απότομη με αποτέλεσμα να δημιουργούνται ομόκεντρες μεταλλικές ζώνες προς τα εξωτερικά του πλουτωνίτη σε αποστάσεις μέχρι και μερικών χιλιομέτρων. Η μεταλλοφορία μέσα στον πλουτωνικό όγκο χαρακτηρίζεται από $Au \pm Bi \pm Te \pm W$ και εντοπίζονται παράλληλες φλέβες χαλαζία. Σε κοντινή απόσταση από τον πλουτωνίτη εμφανίζεται μια μεταλλοφορία $Au-As \pm Sb$ και σε πιο μακρινή απόσταση $Au-As$, $Au-As-Sb$, $Pb-Zn-Ag$ (Σχ.9).



Σχ. 9 Γενικευμένο μοντέλο των κοιτασμάτων που σχετίζονται με μαγματικές διεισδύσεις που έγινε με βάση τη μεταλλογενετική επαρχία χρυσού Tintina. Craig J.R. Hart.

Ποικίλες μορφές μεταλλοφορίας: Τα υδροθερμικά διαλύματα που εξέρχονται από τον πλουτωνίτη ψύχονται γρήγορα και έτσι τα μεταλλικά στοιχεία αποβάλλονται σε πολλαπλά διαθέσιμα περιβάλλοντα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα η μεταλλοφορία να εμφανίζεται με

διαφορετικές μορφές. Περιλαμβάνονται η μεταλλοφορία εντός του μαγματικού πετρώματος, η μεταλλοφορία skarn, καθώς και αντικατάστασης, διάσπαρτη μεταλλοφορία, αλλά και φλέβες και φλεβίδια. Ο χρυσός χαρακτηρίζεται από ένα ευρύ φάσμα βαθμών χρυσού, με όγκους που μπορούν να εξορυχθούν στα 0,8 με 1,5 ppm ανά τόνο (π.χ. Fort Knox) (Σχ.9).

Sheeted veins: Η πιο χαρακτηριστική μορφή μεταλλοφορίας των κοιτασμάτων που σχετίζονται με μαγματικές διεισδύσεις είναι οι φλέβες χαλάζια, όπου εμφανίζεται και χρυσός. Βρίσκονται μεταξύ δεκάδων και εκατοντάδων μέτρων από τον πλουτωνίτη και πιο πιθανό είναι να βρεθούν στον θόλο του (Σχ.10).

Χρόνος: Τα κοιτάσματα που σχετίζονται με μαγματικές διεισδύσεις σχηματίζονται ταυτόχρονα (± 2 εκατομμύρια χρόνια) με τον σχετιζόμενο με αυτά πλουτωνίτη.



Σχ. 10 Sheeted veins χαλάζια από το κοιτάσμα Fort Knox της Αλάσκα (Estelle Gold Project, Nova minerals).

7. Γενετικό μοντέλο των κοιτασμάτων που σχετίζονται με μαγματικές διεισδύσεις

Η γένεση των κοιτασμάτων που σχετίζονται με μαγματικές διεισδύσεις απαιτεί ο πλουτωνίτης που θα φιλοξενήσει το κοίτασμα να είναι κορεσμένος σε πτητικά και υδροθερμικά διαλύματα να εξέρχονται από το τήγμα. Τα μεταλλικά στοιχεία και τα πτητικά συστατικά, όπως το θείο και τα αλογόνα, διαχωρίζονται από το τήγμα ως μία εξερχόμενη υδατική-ανθρακική υδροθερμική φάση. Η πίεση και το βάθος κατέχουν ένα πολύ σημαντικό ρόλο στο πόσο κορεσμένο σε πτητικά θα είναι το μάγμα, γιατί αυτά διαλύονται ευκολότερα σε όξινα τήγματα κάτω από υψηλές πιέσεις (Burnham and Ohmoto, 1980).

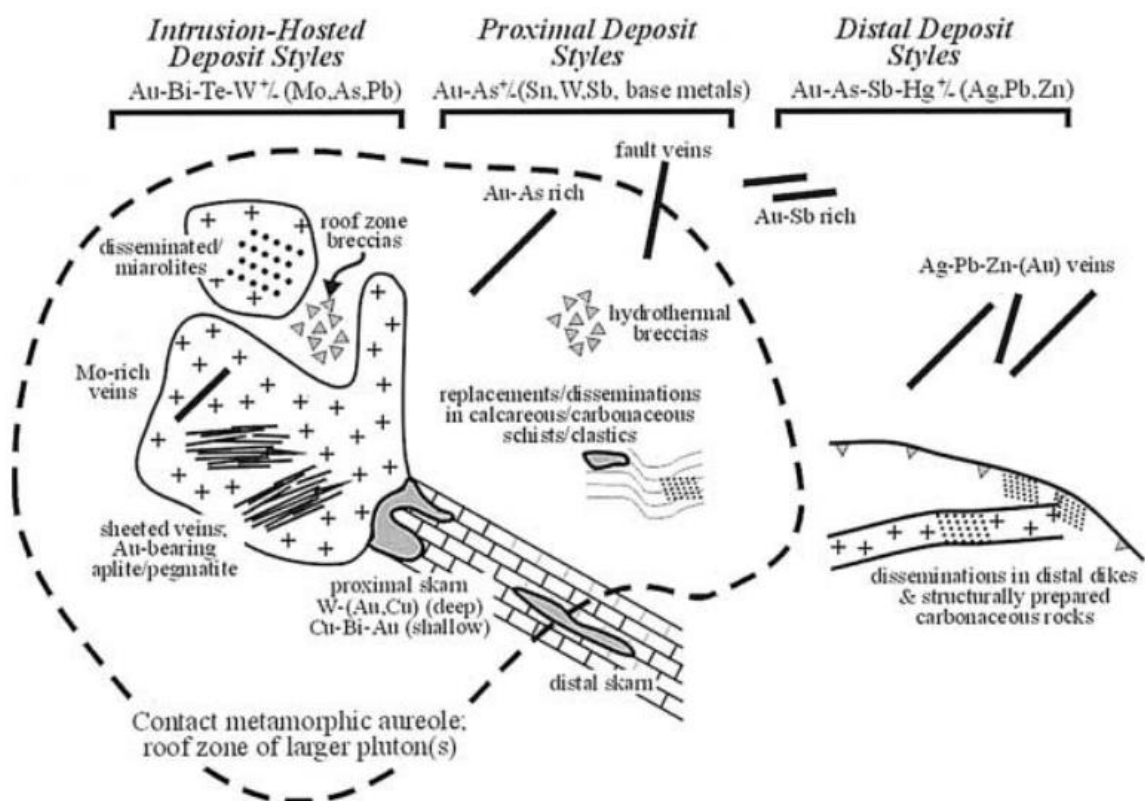
Η μεταλλοφορία περιορίζεται σε περιοχές πάνω και προς τα έξω από την θέση του πτητικού κορεσμού. Έχοντας μικρότερη πυκνότητα από το τήγμα, τα υδροθερμικά διαλύματα μεταναστεύουν προς τον πλούσια σε πτητικά μαγματικό θόλο (Candela and Blevin, 1995), εισβάλλουν σε διακλάσεις, διαρρέουν και αντιδρούν με τα γειτονικά πετρώματα.

Η μεταλλογένεση στα κοιτάσματα που σχετίζονται με μαγματικές διεισδύσεις ελέγχεται κυρίως από την κατάσταση οξειδωσης (Ishihara, 1981) και τον βαθμό κλασματικής κρυστάλλωσης του σχετιζόμενου μάγματος (Thompson et. al., 1999) (Σχ.6). Υψηλά οξειδωμένα μάγματα σε περιβάλλοντα μαγματικού τόξου, δεν έχουν υποστεί τόσο έντονη κλασματική κρυστάλλωση είναι εμπλουτισμένα σε χαλκό και πιθανόν σε χρυσό. Αντίθετα, στα μάγματα που επικρατούν αναγωγικές συνθήκες, ο χαλκός αφαιρείται στα αρχικά στάδια, ενώ το βολφράμιο συμπεριφέρεται ασυμβίβαστα και ως εκ τούτου εμπλουτίζεται κατά τη κλασματική κρυστάλλωση. Η συμμετοχή του χρυσού στα μαγματικά συστήματα δεν έχει κατανοηθεί πλήρως, αλλά εμπειρικά συνδέεται και με υψηλά οξειδωμένα και με συστήματα που επικρατούν κυρίως αναγωγικές συνθήκες (e.g., Leveille et al., 1988; Rowins, 2000; Mungall, 2002).

Η συγκέντρωση των μετάλλων στο μάγμα μέσω της διαδικασίας της κλασματικής κρυστάλλωσης προτάθηκε αρχικά από τους McCoy et al. (1997) για τα κοιτάσματα που σχετίζονται με μαγματικές διεισδύσεις της Αλάσκα. Ο Mair (2005), δουλεύοντας στο Yukon, πρότεινε πως η προσθήκη πλούσιων σε πτητικά βασικών μαγμάτων ήταν υπεύθυνη για τον εμπλουτισμό σε αυτά και βοήθησε τα αρχικά λιγότερο πλούσια σε πτητικά, πυριτικά μάγματα να φτάσουν τον κορεσμό σε υδροθερμικά διαλύματα. Δεν είναι σίγουρο, αλλά είναι πιθανό πως αυτή η μίξη μαγμάτων έπαιξε ένα ρόλο στον εμπλουτισμό σε μέταλλα.

8. Εμπειρικό Μοντέλο των κοιτασμάτων που σχετίζονται με μαγματικές διεισδύσεις

Τα κοιτάσματα που σχετίζονται με μαγματικές διεισδύσεις χαρακτηρίζονται από μια ποικιλία μορφών μεταλλοφορίας και θέσης σε σχέση με το μαγματικό κέντρο. Ένα από τα βασικότερα χαρακτηριστικά τους είναι η κάθετη ζωνώδης κατανομή αυτής της μεταλλοφορίας (Σχ.12), κάτι που δείχνει την μείωση της θερμοκρασίας και της πίεσης. Οι McCoy et al. (1997), Thompson et al. (2000), Lang et al. (2000) και Newberry (2000) περιέγραψαν τα πιο κοινά γνωρίσματα αυτής της ζωνώδους μεταλλοφορίας (Σχ.11 και Σχ.9)



Σχ. 11 Σχηματικό γεωλογικό και ερευνητικό μοντέλο των κοιτασμάτων που σχετίζονται με μαγματικές διεισδύσεις και αντικατοπτρίζει την ποικιλία των μορφών της μεταλλοφορίας, από αυτή που βρίσκεται εντός του μαγματικού πετρώματος που φιλοξενεί το κοιτάσμα, σε μικρή απόσταση από την διείσδυση και σε αυτή σε απομακρυσμένη απόσταση από τη διείσδυση. James R. Lang, Timothy Baker.

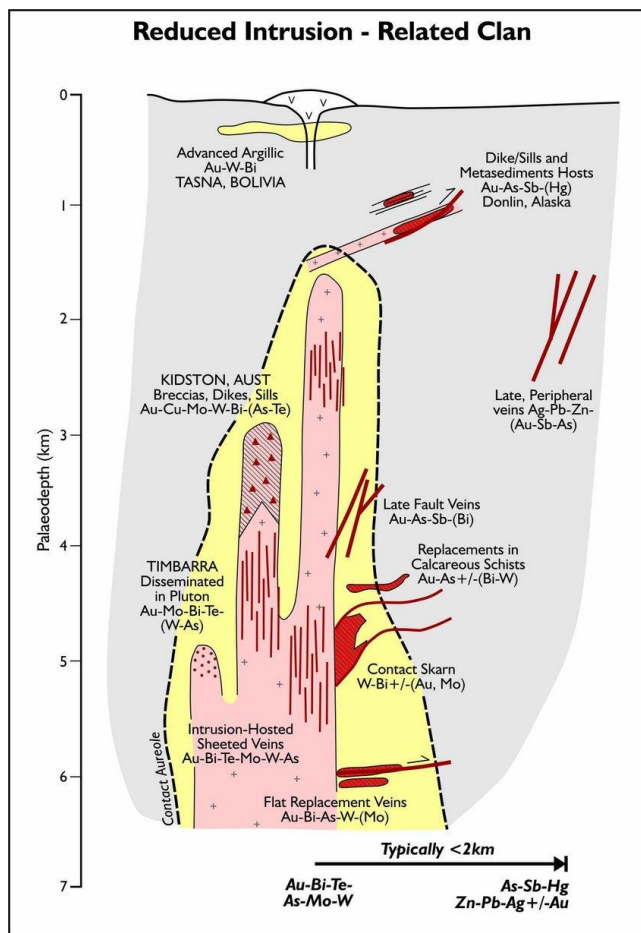
Οι Hart et al. (2000) ξεχώρισαν τρεις κατηγορίες, που βασίζονται στην απόσταση που έχουν από την μαγματική διείσδυση:

Μεταλλοφορία εντός της μαγματικής διείσδυσης: Η μεταλλοφορία περιλαμβάνει κυρίως χρυσοφόρες, παράλληλες φλέβες που χαρακτηρίζεται $Au-Bi \pm Te \pm As \pm Mo \pm W$. Αντανακλά το αρχικό στάδιο της τελικής κρυστάλλωσης. Ο χρυσός μπορεί να βρεθεί επίσης να γεμίζει

κοιλότητες μέσα στον πλουτωνίτη ή και σε φλέβες πηγματίτη και απλίτη που κόβουν τις διεισδύσεις.

Σε κοντινή απόσταση από την μαγματική διείσδυση: Η μεταλλοφορία εντοπίζεται στην επαφή με γειτονικά ανθρακικά πετρώματα του πλουτωνικού πετρώματος ή λίγο απομακρυσμένα απ' αυτό, αλλά εντός της μεταμορφικής άλου. Κοινή μεταλλοφορία αυτής της μορφής είναι η $W \pm Cu \pm Au$ και $Cu-Bi-Au \pm W$ skarn, υψηλής έως χαμηλής αντικατάστασης σουλφιδίων ανθρακικών πετρωμάτων, με κασσιτερίτη, πλούσιο σε breccia χαλκού και φλέβες στα περιβάλλοντα μεταμορφωμένα (ιζηματογενή) πετρώματα.

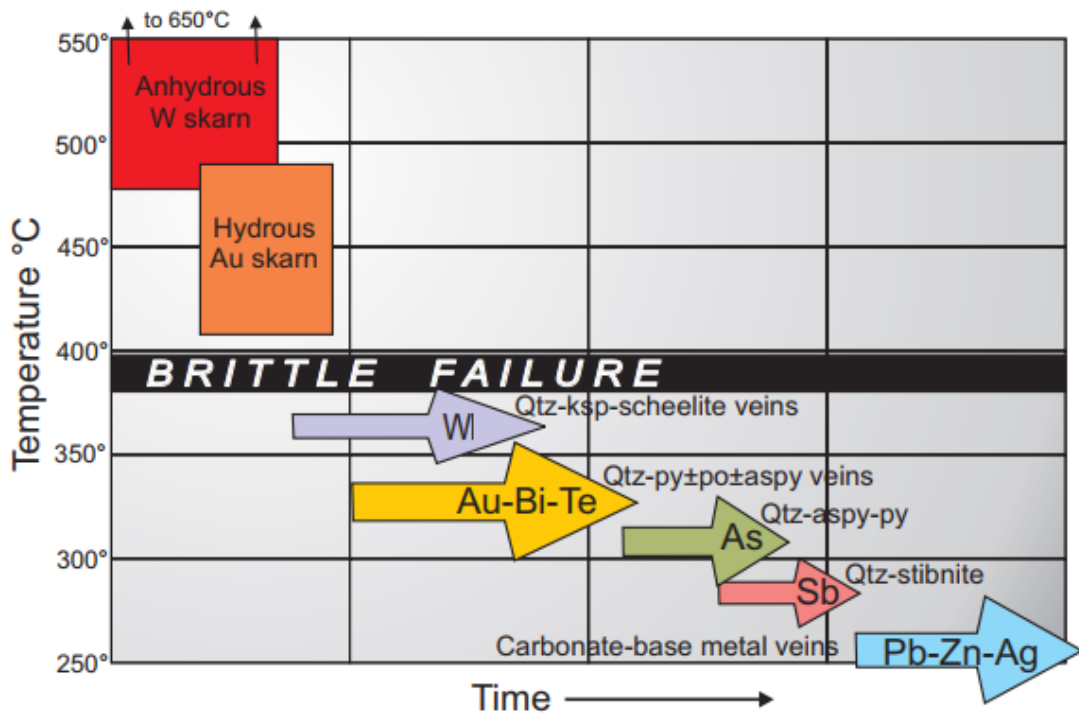
Σε απομακρυσμένη απόσταση από την μαγματική διείσδυση: Η μεταλλοφορία βρίσκεται πέρα από το εξωτερικό όριο του κερατίτη. Περιλαμβάνει χρυσοφόρες, μεσοθερμικές έως επιθερμικές φλέβες χαλαζία-σουλφιδίων, υδροθερμικά λατυποπαγή, φλέβες βασικών μετάλλων εμπλουτισμένες σε $Ag \pm Au$, καθώς και διάσπαρτη μεταλλοφορία χρυσού σε ιζηματογενή πετρώματα, τα οποία επίσης χαρακτηρίζονται από φλέβες $Au-As-Sb \pm Hg$ και $Ag-Pb-Zn$.



Σχ. 12 Σχηματικό γεωλογικό και ερευνητικό μοντέλο που δίνει έμφαση στην οριζόντια κατανομή της στο χώρο σε σχέση με το βάθος και στη μεταλλοφορία του κοιτάσματος. Robert F. et al.

9. Ορυκτολογικές παραγενέσεις των κοιτασμάτων που σχετίζονται με μαγματικές διεισδύσεις.

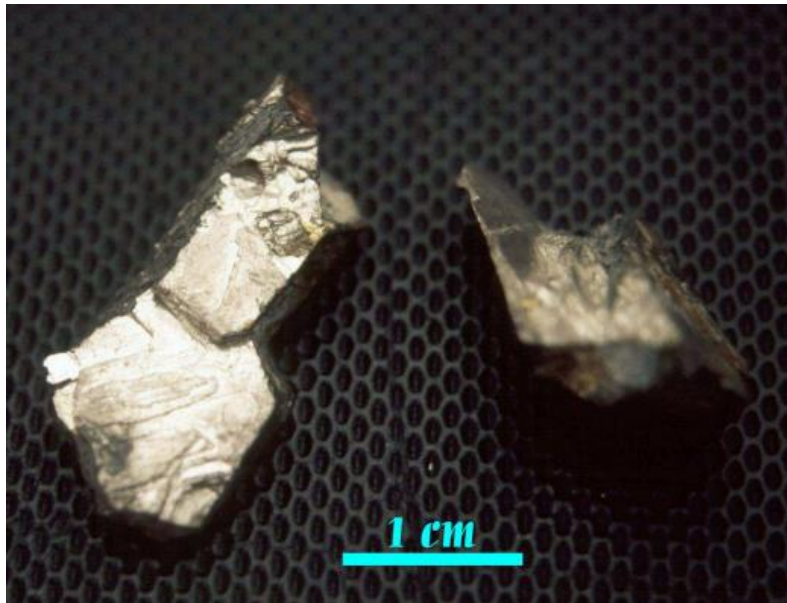
Οι ορυκτολογικές παραγενέσεις των κοιτασμάτων που σχετίζονται με μαγματικές διεισδύσεις ελέγχονται από την θερμοκρασία των υδροθερμικών διαλυμάτων κατά την αποβολή των ορυκτών και τις αντιδράσεις μεταξύ διαλυμάτων και πετρωμάτων (fluid wallrock interactions). Έτσι τα ορυκτολογικά στάδια χαρακτηρίζονται από ποικίλες μεταλλοφορίες που διαφέρουν στο χώρο και στο χρόνο και σχηματίζονται εντός της μαγματικής διείσδυσης αλλά και σε απόσταση από αυτή. Οι τέσσερις πιο κοινοί τύποι είναι οι εξής: (1) Παράλληλες χρυσοφόρες φλέβες χαλαζία εντός της μαγματικής διείσδυσης (2) $W \pm Cu \pm Zn \pm Au$ και $Au-Bi-Te \pm W$ skarn γειτονικά του πλουτωνίτη (3) Διάσπαρτη και αντικατάστασης μεταλλοφορία $Au \pm As \pm Sb$ στα περιβάλλοντα μετα-ιζηματογενή πετρώματα (4) $Ag-Pb-Zn \pm Au$ φλέβες περιφερειακά τοποθετημένες.



Σχ. 13 Σχηματική αναπαράσταση των παραγενέσεων και της μεταλλοφορίας σε ένα τυπικό κοίτασμα που σχετίζεται με μαγματικές διεισδύσεις. Ο οριζόντιος άξονας εκτός από τον χρόνο μπορεί να αντιπροσωπεύει και την απόσταση από την πηγή των υδροθερμικών διαλυμάτων. Craig J.R. Hart, 2007

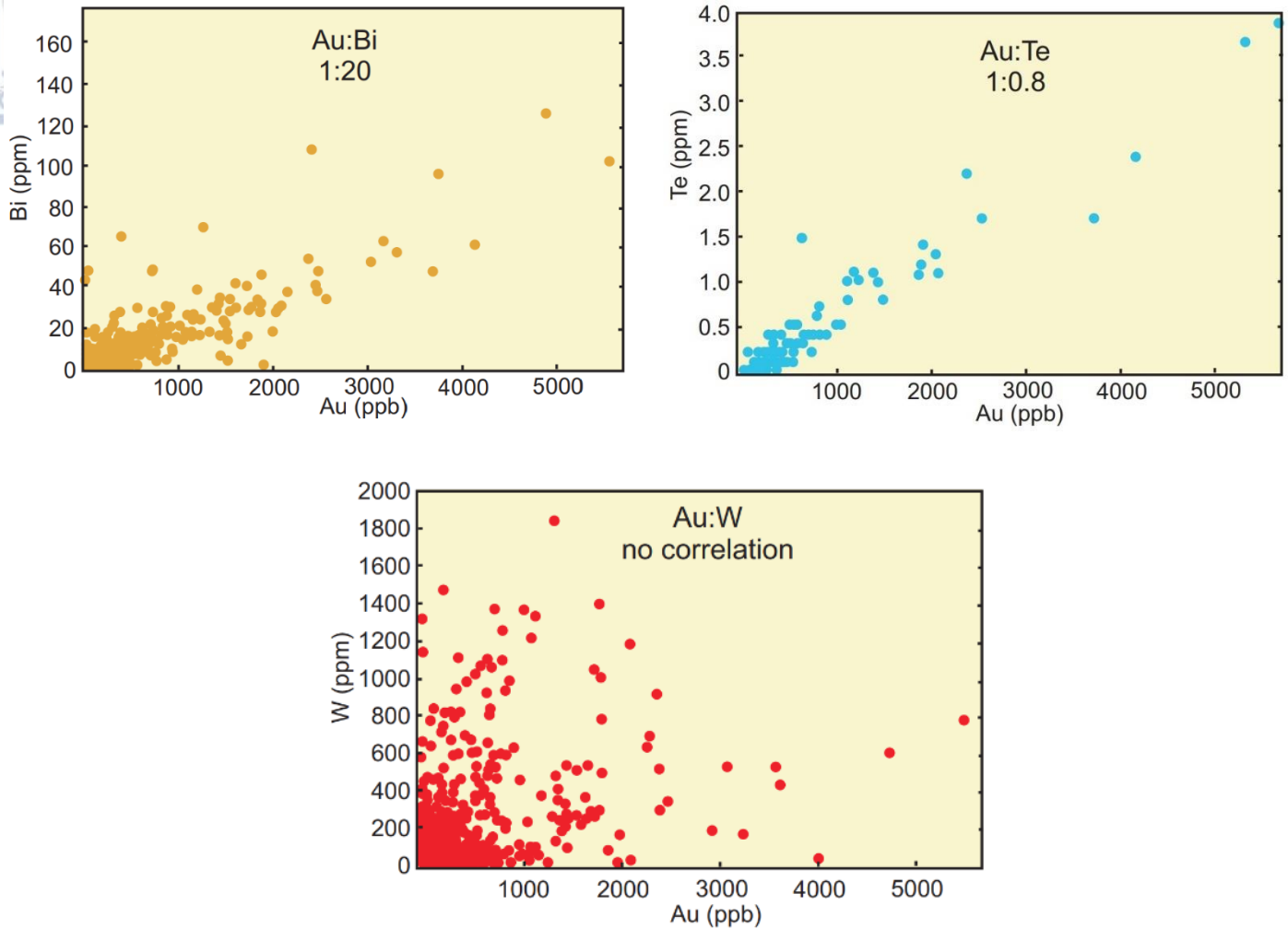
Ορυκτολογικές παραγενέσεις εντός της μαγματικής διείσδυσης: Ο χρυσός βρίσκεται σε μαρολιθικές κοιλότητες, σε πηγματιτικές και απλιτικές φλέβες. Σε πηγματίτες μπορεί να

περιέχονται τουλάχιστον 20 ppm χρυσού και χαρακτηρίζονται από μια ορυκτολογία με ορθόκλαστο, βιοτίτη, μοσχοβίτη, χαλαζία ± κεροστίλβη, τιτανίτη, απατίτη, τουρμαλίνη. Έχουν συνήθως περίπου 1 μέτρο πλάτος και δεκάδες μέτρα μήκος. Ο χρυσός σχετίζεται με μολυβδαινίτη, μαγνητοπυρίτη, σιδηροπυρίτη, χαλκοπυρίτη, αλλά κυρίως με βισμούθινίτη, αυτοφυές βισμούθιο και Bi-Te. Στους απλίτες παρατηρείται μια παρόμοια ορυκτολογία, αλλά όχι σε τόση αφθονία όση στους πηγματίτες.



Σχ. 14 Κρύσταλλοι βισμούθινίτη από μεταλλογενείς κοιλάδες, από Hart και Goldfarb.

Ορυκτολογικές παραγενέσεις στα sheeted veins εντός της μαγματικής διείσδυσης: Οι παράλληλες φλέβες είναι συνήθως συγκεντρωμένες στα επάνω μέρη ή στα περιθώρια του πλουτωνικού πετρώματος. Επίσης τις περισσότερες φορές περιέχουν δύο ορυκτολογικές παραγενέσεις. Οι αρχικές παράλληλες φλέβες έχουν μια ελικοειδή μορφή και δεν συνδέονται άμεσα με τον χρυσό. Περιέχουν χαλαζία, ορθόκλαστο ± αλβίτη και μικρές ποσότητες από σιδηροπυρίτη, μαγνητοπυρίτη, αρσενόπυρίτη, σεελίτη ± μολυβδαινίτη, όπου τα σουλφίδια κατέχουν λιγότερο από το 2% των φλεβών. Οι αρχικές αυτές φλέβες, κόβονται από μεταγενέστερες πιο επίπεδες παράλληλες φλέβες, οι οποίες περιέχουν χαλαζία, ανθρακικά ορυκτά ± ορθόκλαστο.

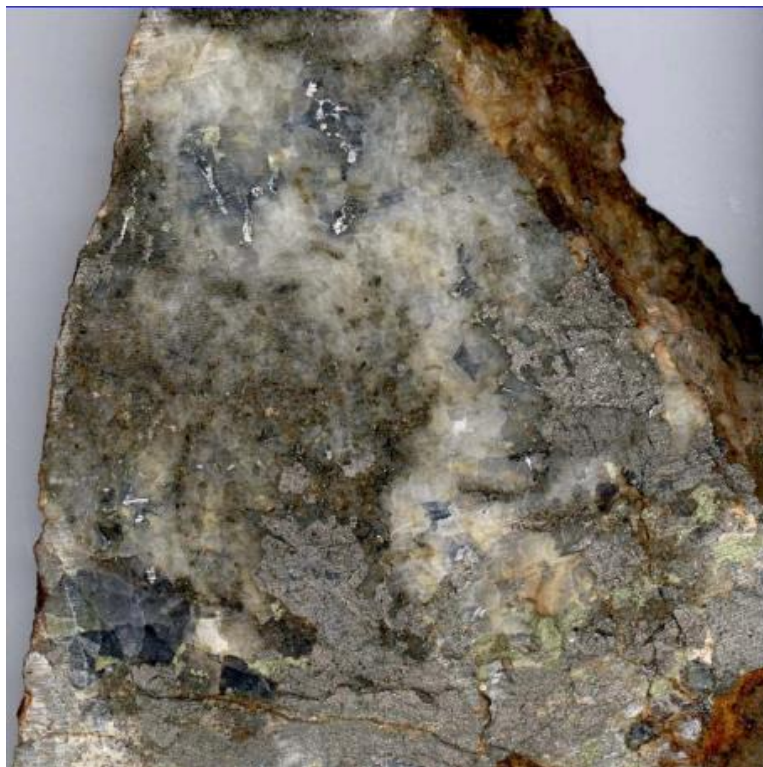


Σχ. 15 Διαγράμματα που δείχνουν την σχέση Au με Bi, Te, W, από κοιτάσμα που σχετίζεται με μαγματικές διεισδύσεις, εντός της μαγματικής διείσδυσης, όπου επικρατούν τα sheeted veins. Ο χρυσός παρουσιάζει μια θετική σχέση με τα Bi και Te, αλλά όχι με το W. Τα δεδομένα είναι από τη ζώνη Rhosgobel του κοιτάσματος Clear Creek (Yukon). Το κάθε σημείο αντιπροσωπεύει έναν πυρήνα 1,5 μέτρου. Οι περιεκτικότητες σε τελλούριο είναι χαμηλότερες. Craig J.R. Hart, 2007.

Ορυκτολογικές παραγενέσεις στο skarn στην επαφή με ανθρακικά πετρώματα: Τα κοιτάσματα skarn βρίσκονται στην επαφή του πλουτανίτη με ανθρακικά πετρώματα. Η ορυκτολογικές παραγενέσεις χαρακτηρίζονται από άνυδρο πυρόξενο, γρανάτες, χαλαζία και βολλαστονίτη στο έξω-skarn και από αμιφβόλους, βιοτίτη, ασβεστίτη, χαλαζία, πλαγιόκλαστο, σκαπόλιθο, καθώς και μαγνητοπυρίτη, σιδηροπυρίτη, σεελίτη, χαλκοπυρίτη και σφαλερίτη στο ένδο-skarn.



Σχ. 16 Παράλληλες φλέβες χαλαζία του πλουτωνίτη Rhosgobel, στο κοίτασμα Clear Creek, Yukon. Οι φλέβες 1-3cm περιέχουν μικρές ποσότητες σουλφιδίων. Οι μεγαλύτερες ξεχωριστές φλέβες μπορεί να περιέχουν και 50 g/t Au. Craig J.R. Hart, 2007



Σχ. 17 Βισμουθινίτης, σε πλούσιο σε πυροττίτη skarn. Hart και Goldfarb.

Ορυκτολογικές παραγενέσεις στα μετα-ιζηματογενή πετρώματα, σε απόσταση απ' την μαγματική διείσδυση: Κυριαρχεί μια ορυκτολογία που περιέχει σιδηροπυρίτη, αρσеноπυρίτη και αντιμονίτη. Χωρίς χαλαζία, και η οξειδωση αντιπροσωπεύεται από λειμωνίτη. Ο χρυσός συνδέεται με βελονοειδή αρσеноπυρίτη. Οι φλέβες αντιμονίτη είναι πολύ συνηθισμένες, αλλά η σχέση τους με τον χρυσό είναι αβέβαιη. Περίπου το 80% του χρυσού εμφανίζεται σε μικροδομές, σε φλέβες και φλεβίδια, ή σε διάσπαρτη μεταλλοφορία.

Ορυκτολογικές παραγενέσεις στην περιφερειακή ζώνη, σε απόσταση από την μαγματική διείσδυση: Η ορυκτολογία της περιφερειακής ζώνης που βρίσκεται απομακρυσμένα από τον πλουτωνίτη, περιλαμβάνει αρσеноπυρίτη, γαληνίτη, σφαλερίτη, βουλανζεριτή, σιδερίτη, ιαμεσονίτη, ακανθίτη και Ag-θειοάλατα. Αντιπροσωπεύουν το νεότερο επεισόδιο μεταλλογένεσης.

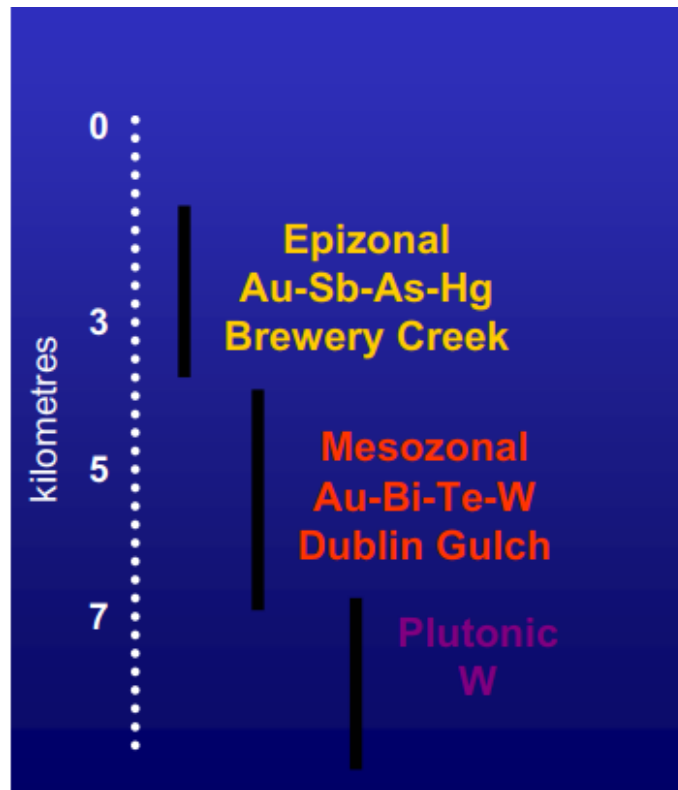
10. Βάθος, χρόνος σχηματισμού και σχήμα του πλουτωνίτη που φιλοξενεί τα κοιτάσματα που σχετίζονται με μαγματικές διεισδύσεις.

Τα χαρακτηριστικά των κοιτασμάτων που σχετίζονται με μαγματικές διεισδύσεις καλύπτουν ένα ευρύ φάσμα τόσο στο χώρο όσο και στο χρόνο, και οι μέθοδοι αναζήτησής τους διαφέρουν ανάλογα την εταιρεία. Παρακάτω παρουσιάζονται μερικά επιπλέον αναγνωριστικά στοιχεία αυτού του τύπου κοιτασμάτων.

10.1 Βάθος σχηματισμού

Το βάθος της μαγματικής διείσδυσης κατέχει ένα πολύ σημαντικό ρόλο στον σχηματισμό αυτών των κοιτασμάτων. Η σχετιζόμενη με αυτή μεταλλοφορία διαφέρει ανάλογα με το βάθος που έλαβαν χώρα τα μαγματικά και υδροθερμικά γεγονότα, με ένα εύρος ανάμεσα σε 1 με 8 χιλιόμετρα, με τα περισσότερα κοιτάσματα να σχηματίζονται μεταξύ 4 με 6 χιλιόμετρα. Τα πιο ρηχά μαγματικά-υδροθερμικά συστήματα καταλαμβάνονται από φλέβες και φλεβίδια με μεταλλοφορίες και αλλοιώσεις πιο χαμηλής θερμοκρασίας. Όπως η μεταλλοφορία Au-As-Sb ± Hg και Ag, Pb, Zn που εντοπίζεται περιφερειακά και σε απόσταση από τη μαγματική διείσδυση, αλλά και κοντινά σε αυτή συστήματα εμπλουτισμένα σε βασικά μέταλλα κυρίως Cu, που συνοδεύονται από Au-Bi. Χαρακτηριστική μεταλλοφορία μεγαλύτερων βαθών είναι

η Au-Bi-W, με Te, Mo, As, όπου κοντά στην διείσδυση υπάρχει τέλεια συσχέτιση μεταξύ Au-Bi και Au-Te. Οι πιέσεις κατάλληλες για τον σχηματισμό κοιτασμάτων που σχετίζονται με μαγματικές διεισδύσεις ποικίλλουν από 0,3 με 3,5kbar (e.g. Baker και Lang, 2001, Mair, 2004) κάτι που επιβεβαιώνει το μεγάλο εύρος των βαθών.



Σχ. 18 Απλό σχηματικό διάγραμμα, όπου φαίνονται τα ενδεικτικά βάθη σχηματισμού των κύριων μεταλλοφοριών των κοιτασμάτων που σχετίζονται με μαγματικές διεισδύσεις

10.2 Χρόνος σχηματισμού

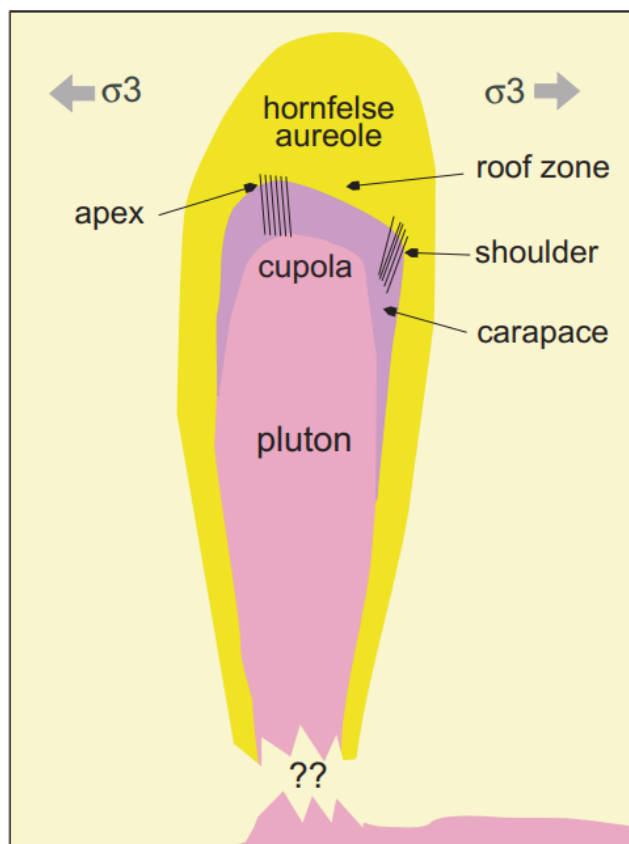
Η ηλικία των σημερινών αναγνωρισμένων κοιτασμάτων που σχετίζονται με μαγματικές διεισδύσεις εκτείνεται από το Δεβόνιο μέχρι το Τριτογενές (Thompson et al., 1999), αλλά υπάρχουν παραδείγματα και από Αρχαϊκά κοιτάσματα, τα οποία ακόμη παραμένουν υπό διερεύνηση. Ωστόσο, το μέσο Κρητιδικό αποτέλεσε την πιο ευνοϊκή περίοδο σχηματισμού τους. Το τυπικό βάθος σχηματισμού τους δείχνει ότι μπορούν να διατηρηθούν καλά στον γεωλογικό χρόνο.

Η μαγματική διείσδυση και η σχετιζόμενη με αυτή μεταλλοφορία έχουν σχεδόν την ίδια ηλικία. Από ισοτοπικά δεδομένα, με γεωχρονολογήσεις U-Pb και Ar-Ar αποδείχθηκε ότι τα κοιτάσματα δημιουργήθηκαν μέσα σε 2 εκατομμύρια χρόνια από την κρυστάλλωση του πλουτωνικού πετρώματος που τα φιλοξενεί.

10.3 Σχήμα του πλουτωνίτη που φιλοξενεί τα κοιτάσματα που σχετίζονται με μαγματικές διεσόδσεις

Τα κοιτάσματα που σχετίζονται με μαγματικές διεσόδσεις είναι πιο πιθανό να σχηματιστούν και να περιβάλλουν πλουτωνικά πετρώματα κυλινδρικού σχήματος που διείσδυσε σε ιζηματογενή ή μετα-ιζηματογενή περιβάλλοντα πετρώματα. Το μέγεθος του πλουτωνίτη κατέχει επίσης σημαντικό ρόλο, καθώς οι βαθύλιθοι δεν είναι πιθανό να αναπτυχθούν σε μεταλλοφόρα συστήματα. Σχηματίζονται ευκολότερα σε μικρούς (<2km²), απομονωμένους πλουτωνίτες. Οι μεγαλύτεροι (2-10km²), μπορεί να έχουν κάποια απόφυση ή μεταγενέστερες φάσεις που θα αναπτύξουν μεταλλοφορία.

Η γεωμετρία του πλουτωνίτη είναι επίσης σημαντική. Τα επιμήκη πλουτωνικά πετρώματα δείχνουν μια κυρίαρχη κατεύθυνση, κάτι το οποίο μπορεί να αποβεί σημαντικό στον εντοπισμό της μεταλλοφορίας. Ακόμη, οι κυλινδρικοί πλουτωνίτες με απότομες πλευρές και οροφή που μοιάζει με θόλο, αποτελούν πιθανές γεωμετρίες, γιατί ενισχύουν την συγκέντρωση των υδροθερμικών διαλυμάτων (Σχ.19).



Σχ. 19 Υποθετική σχηματική τομή ενός μικρού πλουτωνίτη (100m-5km) ικανού να φιλοξενήσει ένα κοιτάσμα που σχετίζεται με μαγματικές διεσόδσεις. Craig J.R. Hart

11. Γεωχημεία και πηγή των υδροθερμικών διαλυμάτων

Η γεωχημεία των υδροθερμικών διαλυμάτων υπεύθυνων για τον σχηματισμό των κοιτασμάτων που σχετίζονται με μαγματικές διεisdύσεις μελετήθηκε από τους Baker και Lang (2001), Baker (2002), Marsh et al. (2003) και Mair et al. (2006). Μελέτησαν την περιοχή του Yukon, όμως τα αποτελέσματα είναι αντιπροσωπευτικά γενικά για τα κοιτάσματα αυτού του τύπου (Thompson, 1999)

11.1 Γεωχημεία των υδροθερμικών διαλυμάτων

Οι περισσότερες φλέβες Au-Bi-Te-W που βρίσκονται εντός της μαγματικής διεisdυσης αποτελούνται από πρώιμα, υψηλής θερμοκρασίας (300°-380°C), πλούσια σε CO₂ (5%-14%), χαμηλής αλατότητας (2-6 wt% NaCl) υδατικά ανθρακικά υδροθερμικά διαλύματα με CH₄ και N₂. Τα διαλύματα αυτά ψύχονται και δεν αναμειγνύονται, για να αποδώσουν χαμηλότερης θερμοκρασίας (250°-280°C, έως και 160°C) μη αναμίξιμα χαμηλής (0,2 wt% NaCl) και υψηλής (6-15 wt% NaCl) αλατότητας υδροθερμικά διαλύματα, ελλιπή σε CO₂, τα οποία σχημάτισαν τις φλέβες As-Sb ± Hg και Ag-Pb-Zn.

Διαλύματα πλούσια σε CO₂, είναι άφθονα στις παράλληλες φλέβες εντός της μαγματικής διεisdυσης, σε όλες τις παλαιοπιέσεις και αποτελούν στοιχείο μιας φάσης μη αναμειξιμότητας και διαχωρισμού σε διαλύματα υψηλής και χαμηλής περιεκτικότητας σε CO₂. Διαλύματα διαφορετικού τύπου συσχετίζονται και με τις πιέσεις. Υδατικά διαλύματα υψηλής αλατότητας εντοπίζονται μόνο σε συστήματα με πιέσεις ~0,5-1,5kbar. Επίσης αποτελούν ένδειξη μη αναμειξιμότητας και η φασματοσκοπία Ραμάν έδειξε πως περιέχουν λίγο έως καθόλου CH₄ και N₂ (Baker και Lang, 1999). Σε αντίθεση, τα CH₄ και N₂ εντοπίζονται σε τουλάχιστον μικρές συγκεντρώσεις μέσα σε ανθρακικά υδροθερμικά διαλύματα, εγκλωβισμένα σε πιέσεις μεγαλύτερες του 1,5kbar, όπου από αυτά τα συστήματα μεγαλύτερων πιέσεων λείπουν τα διαλύματα αλατότητας.

Τα υδροθερμικά διαλύματα υπεύθυνα για την αποβολή της μεταλλοφορίας σε κοντινή απόσταση από την μαγματική διεisdυση και σε μετα-ιζηματογενή πετρώματα είναι διαφορετικά. Στα skarn, στις φλέβες και στα ζώνες αντικατάστασης στα μετα-ιζηματογενή πετρώματα (Pierce, 1996; Baker και Lang, 1999), τα διαλύματα περιέχουν σημαντικά μεγαλύτερες ποσότητες CH₄, απ' ό,τι στις φλέβες που βρίσκονται εντός της μαγματικής διεisdυσης. Αυτό συμβαίνει λόγω των αντιδράσεων μεταξύ των διαλυμάτων και των μετα-ιζηματογενών πετρωμάτων, έτσι στα διαλύματα οι συνθήκες γίνονται πιο αναγωγικές. Η

θερμοκρασία ομογενοποίησης στα skarn αγγίζει τους 600°C και τα διαλύματα έχουν μεσαία (~10 wt% NaCl) έως υψηλή (>35 wt% NaCl) αλατότητα. Σε αντικατάστασης φλέβες στα περιβάλλοντα μετα-ιζηματογενή η θερμοκρασία ομογενοποίησης κυμαίνεται στα 310°-570°C και πιέσεις μεταξύ 1,7 με 2kbar, ενώ οι ποσότητες CO₂ και CH₄ ανέρχονται στα 50mol% το καθένα.

Από την βαρομετρία σε ρευστά εγκλείσματα αποδείχθηκε ότι ο χρυσός αποβάλλεται σε βάθη 3 με 9 χιλιόμετρα (κυρίως 5-7).

Περιοχή	P(kbar)	CO ₂ ρευστά	Αλατότητα	CH ₄	N ₂
Mike Lake: sheeted veins	~0,5	Άφθονα	Άφθονη	Ελάχιστο	Καθόλου
Emerald Lake: sheeted veins	>1	Άφθονα	Εμφανίζεται	Ελάχιστο	Καθόλου
Dublin Gulch: sheeted veins	>1,5	Άφθονα	Εμφανίζεται	Αρκετό	Αρκετό
Dublin Gulch: W skarn	??	Ελάχιστα	Καθόλου	Άφθονο	Ελάχιστο
Fort Knox: sheeted veins ¹	1,25-1,5	Άφθονα	Ελάχιστη	Ελάχιστο	??
Scheelite dome: sheeted veins	~2,5	Άφθονα	Καθόλου	Αρκετό	Αρκετό
Scheelite dome: φλέβες σε μετα-ιζηματογενή	~2,5	Άφθονα	Καθόλου	Αρκετό	Καθόλου
MacTung: sheeted veins	>2,3	Άφθονα	Καθόλου	Αρκετό	Αρκετό
MacTung: W skarn	2-2,5	Ελάχιστα	Καθόλου	Άφθονο	Ελάχιστο
Pogo: φλέβες και αντικατάστασης ²	1,7-2	Άφθονα	Καθόλου	Άφθονο	??

Πίνακας 2 Σύνοψη των ρευστών εγκλεισμάτων και των ενδεικτικών πιέσεων (από τους Baker και Lang, μη δημοσιευμένα δεδομένα) ¹ Δεδομένα σύμφωνα με πληροφορίες των McCoy et al. (1997) ² Δεδομένα σύμφωνα με πληροφορίες των Smith et al. (1999).

11.2 Πηγή των υδροθερμικών διαλυμάτων

Η προέλευση και η εξέλιξη των υδροθερμικών ρευστών υπεύθυνων για τον σχηματισμό των κοιτασμάτων που σχετίζονται με μαγματικές διεισδύσεις έχει συζητηθεί πολύ έντονα. Αρκετοί ερευνητές πρότειναν μεταμορφική προέλευση για τα $\text{CO}_2 \pm \text{CH}_4$ (e.g. Moravek, 1995, Spiridonov, 1996), ενώ οι McCoy et al. (1997), Thompson et al. (1999) και Baker και Lang (1999, μη δημοσιευμένα δεδομένα) υποστηρίζουν μια κυρίως μαγματική προέλευση της αλατότητας και των ανθρακικών ρευστών. Συστήματα όπου τα ρευστά εγκλείσματα υποδεικνύουν πιέσεις μεγαλύτερες του 1,5kbar παρουσιάζουν ένα μοτίβο όπου τα ανθρακικά ρευστά δίνουν αργότερα αλατούχα ρευστά, σύμφωνο με την πορεία των εξερχόμενων πτητικών συστατικών του μάγματος που προβλέφθηκε από πειραματικό έλεγχο (e.g. Blank et al., 1993) και από παρατηρήσεις στη φύση (Nablek και Ternes, 1997). Συνυπάρχοντα ρευστά υψηλής αλατότητας και ανθρακικά βρίσκονται σε συστήματα με πιέσεις κάτω από 1,5kbar και είναι συμβατά με μη ανάμειξιμη φάση διαχωρισμού ομογενούς ρευστού και ασύμβατα με τη μίξη δύο διακριτών ρευστών.

Η μαγματική προέλευση βρίσκεται να ταιριάζει με τις υπολογισμένες ισοτοπικές συστάσεις των υδροθερμικών ρευστών ($\delta^{18}\text{O}$, 5 έως 10‰; δD , -47 έως -100‰; και $\delta^{34}\text{S}$, $0 \pm 5\%$; McCoy et al., 1997). Οι υψηλές συγκεντρώσεις CH_4 σε περιβάλλοντα εκτός των διεισδύσεων προτείνουν ότι μια συμμετοχή από ρευστά είτε μεταμορφικής είτε μετεωρικής προέλευσης που ισορροπούν ανθρακικά πετρώματα είναι πιθανή. Μάλιστα οι Lynch et al. (1990) πρότειναν ότι ρευστά μετεωρικής προέλευσης συντέλεσαν σημαντικά στην δημιουργία των φλεβών $\text{Ag-Pb-Zn} \pm \text{Au}$ στην περιοχή Keno Hill του Yukon.

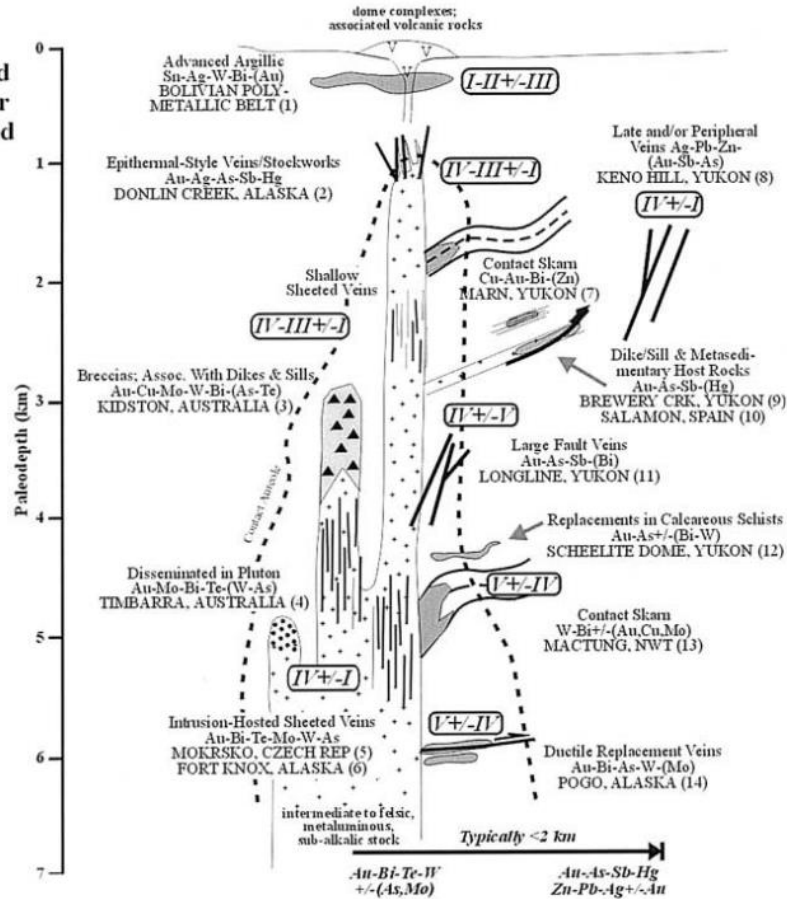
Η μεταμορφική προέλευση των ρευστών προτείνεται κυρίως για μαγματική-υδροθερμική δραστηριότητα που επικαλύπτει γεγονότα περιοχικής μεταμόρφωσης. Σε σύγκριση με αυτό, τα κοιτάσματα της ζώνης χρυσού Tintina χρονολογούνται έως και 15 εκατομμύρια χρόνια μετά τα μεταμορφικά και παραμορφωτικά επεισόδια και φαίνεται να έχουν σχηματιστεί καθαρά από ρευστά μαγματικής προέλευσης (McCoy et al., 1997; Baker και Lang, 2001). Παρομοίως, η παρουσία σχεδόν εντελώς πλούσιων σε CO_2 ρευστών στις διεισδύσεις του Timbarra (Mustard, 2001), καταγράφουν την παρουσία ανθρακικών ρευστών κατά την φάση που ο σχετιζόμενος πλουτωνίτης ήταν ακόμη τήγμα.

Ωστόσο, επιπλέον δεδομένα είναι απαραίτητα για να διακριθεί με σιγουριά εάν η προέλευση των ρευστών είναι μεταμορφική ή μαγματική.

Spatial Geological and Exploration Model for Intrusion-Related Gold Systems

Hydrothermal Fluids	
I	Liquid-rich, aqueous, low to moderate salinity
II	Vapour-rich, aqueous, low salinity
III	High salinity, halite-bearing
IV	CO ₂ -H ₂ O+/-CH ₄
V	CH ₄ -CO ₂ -H ₂ O

Deposit References	
1	Sillitoe et al. 1998
2	Ebert et al. 2000
3	Baker and Andrew 1991
4	Mustard, this volume
5	Moravek 1995
6	Bakke 1995
7	Brown and Nesbitt 1987
8	Lynch et al. 1990
9	Diment and Craig 1998
10	Crespo 1998
11	Ritcey et al. 2000
12	O'Dea et al. 2000
13	Dick and Hodgson 1982
14	Smith et al. 1999



Σχ. 20 Σχηματικό γεωλογικό και ερευνητικό μοντέλο που δίνει έμφαση στην οριζόντια κατανομή της στο χώρο σε σχέση με το βάθος, στα υδροθερμικά ρευστά και στη μεταλλοφορία του κοιτάσματος. James R. Lang, Timothy Baker

12. Υδροθερμικές εξαλλοιώσεις των κοιτασμάτων που σχετίζονται με μαγματικές διεισδύσεις

Η αλλοιώσεις των κοιτασμάτων που σχετίζονται με μαγματικές διεισδύσεις είναι περιορισμένες. Εντός της μαγματικής διείσδυσης η αλλοίωση δεν είναι ούτε εκτενής ούτε έντονη. Εντός της μαγματικής διείσδυσης και σε κοντινή απόσταση από αυτή, εντοπίζονται ποτασική εξαλλοίωσή, πυριτίωση, greisen (γκρεϊζενίωση), μετασωματική εξαλλοίωση όπου σχηματίζονται ασβεστοπυριτικά ορυκτά και αργιλική εξαλλοίωση. Η ποτασική εξαλλοίωση κυριαρχείται από καλιούχους άστριους και αλβίτη και παρουσιάζεται παντού και είναι κατά κανόνα πρώιμη. Σχετίζεται συχνά με βολφραμίτη και μολυβδαινίτη και σε πολλές περιπτώσεις η σχέση της με τον χρυσό είναι ασθενής. Τα μέταλλα με τα οποία ο χρυσός συνδέεται περισσότερο, σχετίζονται συνήθως με μία μεταγενέστερη σερικιτική εξαλλοίωση (e.g. Maloof

et al., 2001, Mustard, 2001) ή σε κάποιες περιπτώσεις με greisen (e.g. Fernandez-Catuxo, 1998, Yao et al., 1999) και τυπικά περιέχεται χλωρίτης, ανθρακικά και αλβίτης. Η πυριτιώση εμφανίζεται μόνο τοπικά. Η εξαλλοίωση μετασώματωσης όπου σχηματίζονται ασβεστοπυρτικά ορυκτά, περιορίζεται στα μετασωματικά skarn. Προχωρημένη αργλική εξαλλοίωση εντοπίζεται μόνο σε κοιτάσματα της πολυμεταλλικής ζώνης της Βολιβίας, όπως το Kori Kollo και το Tasna (Sillitoe et al., 1998). Οι εξαλλοιώσεις εντός των διεισδύσεων είναι τις περισσότερες φορές περιορισμένες σε στενά επίπεδα εξαλλοίωσης γύρω από τις φλέβες και η ροή των ρευστών είναι χαμηλή ή πολύ περιορισμένη. Σε μερικές περιπτώσεις τα επίπεδα μπορεί να αναπτυχθούν σε πιο εκτεταμένες ζώνες διαβρωτικής εξαλλοίωσης, εκτός από το κοίτασμα Kori Kollo της Βολιβίας. Η χλωριτική εξαλλοίωση εμφανίζεται σε πιο απομακρυσμένη απόσταση από τη διείσδυση. Η πρόδρομη εξαλλοίωση των περιβαλλόντων πετρωμάτων με βιοτίτη-χαλαζία ± μαγνητοπυρίτη είναι συνηθισμένη, αλλά και η ανάδρομη εξαλλοίωση μπορεί να είναι διαδεδομένη. Γενικά όμως η εξαλλοιώσεις αλλάζουν με το βάθος. Η σερικιτική εξαλλοίωση βρίσκεται σε ρηχά συστήματα, ενώ η ποτασσική στα πιο βαθιά συστήματα.

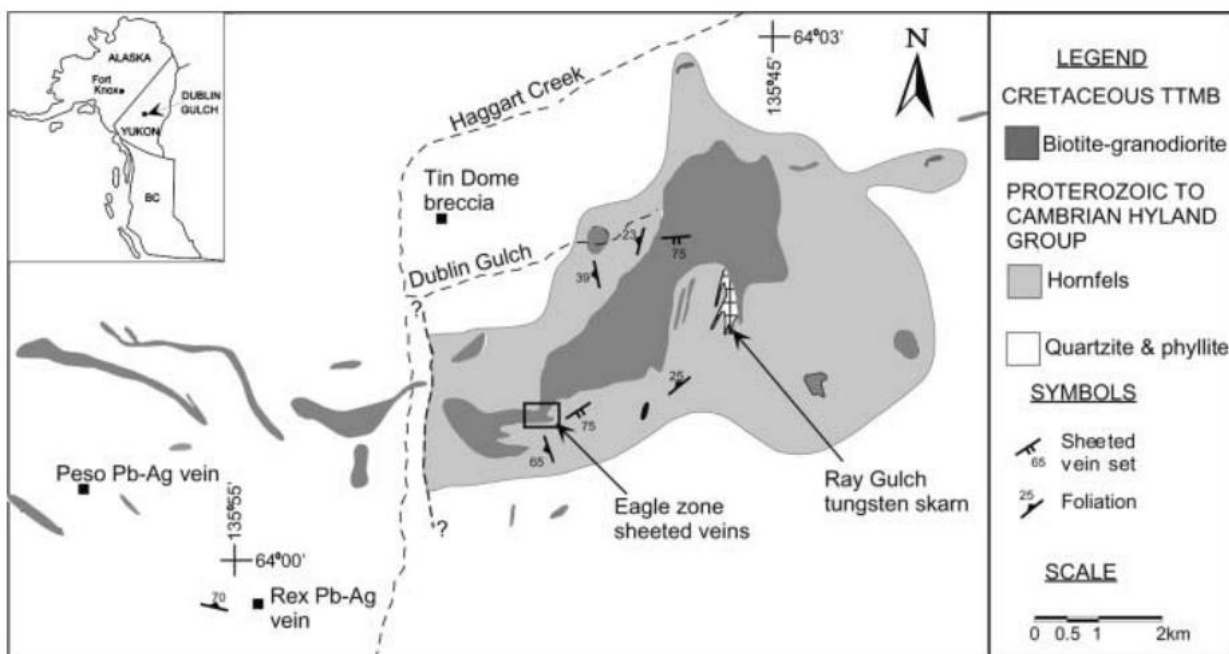
13. Χαρακτηριστικά κοιτάσματα που σχετίζονται με μαγματικές διεισδύσεις στον κόσμο

Υπάρχουν πολλά χαρακτηριστικά παραδείγματα κοιτασμάτων που σχετίζονται με μαγματικές διεισδύσεις σε όλο τον κόσμο. Παρακάτω θα εξεταστούν τρία από αυτά.

13.1 Κοίτασμα Dublin Gulch, πλουτωνική σειρά Tombstone, Yukon, Καναδάς

Το κοίτασμα Dublin Gulch είναι μέλος της πλουτωνικής σειράς του Tombstone, μια γραμμική ζώνη μαγματικών διεισδύσεων μέσο-Κρητιδικής ηλικίας που εκτείνεται στην περιοχή του Yukon στον Καναδά. Σχετίζεται με διάφορες ζώνες μεταλλοφορίας χρυσού και βολφραμίτη εντός και γειτονικά της διείσδυσης. Η μεταλλοφορία χρυσού της διείσδυσης Dublin Gulch έχει πολλές ομοιότητες με το κοίτασμα Fort Knox. Την πιο σημαντική συγκέντρωση χρυσού κατέχει η ζώνη Eagle, που βρίσκεται στο νοτιοδυτικό μέρος του Dublin Gulch (50,3 Mt @ 0,93 g/t χρυσού). Επιπλέον, εμφανίζονται και άλλοι τύποι μεταλλοφορίας όπως η ζώνη Ray Gulch βολφραμίτη skarn, οι Rex Peso φλέβες άργυρου-μόλυβδου-ψευδαργύρου και αρκετές φλέβες χαλαζία και ζώνες ρηγμάτων που περιέχουν μεταλλοφορία χρυσού-αρσеноπυρίτη. Ο χρυσός εμφανίζεται σε μια σειρά παράλληλων φλεβών με μια Α-Δ

διεύθυνση και απότομη κλίση προς τον νότο. Οι φλέβες περιέχουν χαλαζία-σεελίτη ± μαγνητοπυρίτη ± σιδηροπυρίτη ± αρσενοπυρίτη και σχετίζονται με επιφάνειες εξαλλοίωσης με Καλιούχο άστριο ± αλβίτη. Ο χρυσός εμφανίζεται με μολυβδαινίτη, μόλυβδο-βισμούθιο ± θειοάλατα αντιμονίου, γαληνίτη και βισμούθινίτη. Ο χρυσός έχει καλή συσχέτιση με το βισμούθιο ($r^2=0,9$), αλλά όχι με τα άλλα στοιχεία. Οι πρώιμες φλέβες σεελίτη-χαλαζία περιέχουν ρευστά εγκλείσματα CO_2 , ενώ τα μεταγενέστερα υδροθερμικά ρευστά χαρακτηρίζονται από υψηλή αλατότητα (15 wt% NaCl) και λιγότερο CO_2 . Το προτεινόμενο γενετικό μοντέλο, αναφέρεται σε πρώιμα υδροθερμικά ρευστά πλούσια σε CO_2 τα οποία εξήλθαν από ένα μάγμα, επίσης πλούσιο σε CO_2 , τα οποία σταδιακά μετατράπηκαν σε ρευστά με πιο υψηλή αλατότητα και H_2O .



Σχ. 21 Γεωλογικός χάρτης του πλουτωνίτη Dublin Gulch και της ευρύτερης περιοχής, Maloof et al., 2001

13.1.1 Γεωλογία της περιοχής

Ο πλουτωνίτης του Dublin Gulch έχει διεισδύσει μέσα σε ιζηματογενή πετρώματα της λεκάνης Selwyn, τα οποία αποτέθηκαν κατά μήκος του ηπειρωτικού περιθωρίου της Βόρειας Αμερικής από το ύστερο Προτεροζωικό μέχρι το μέσο Παλαιοζωικό (Gordey και Anderson, 1993; Murphy, 1997). Η λεκάνη Selwyn βρίσκεται ανάμεσα σε δύο τεκτονικά λείπια. Το Tombstone τεκτονικό λείπι που περιλαμβάνει χαλαζίτες, σχιστόλιθους και φυλλίτες και υπόκειται του Robert Service τεκτονικού λειπού με παραμορφωμένα κλαστικά και μερικούς ανθρακικά πετρώματα. Η διείσδυση Dublin Gulch έχει ηλικία $92,8 \pm 0,5$ εκατομμύρια χρόνια

(Murphy, 1997) και έχει διεύθυνση 070° Α-Δ και μια σύσταση βιοτιτικού κεροστιλβικού γρανοδιορίτη. Φλέβες διορίτη και απλίτη κόβουν τον γρανοδιορίτη και πολλές φλέβες και μικρότερες διεισδύσεις βρίσκονται εντός των ιζηματογενών πετρωμάτων της περιοχής. Μεταλλοφορία skarn με πυρόξενο εμφανίζεται τοπικά σε ανθρακικά πετρώματα (Lennan, 1983).

13.1.2 Τύποι μεταλλοφορίας στο κοίτασμα του Dublin Gulch

Διάφοροι τύποι μεταλλοφορίας εμφανίζονται εντός και γύρω από τον πλουτωνίτη Dublin Gulch. Περιλαμβάνονται διάφοροι τύποι φλεβών και breccia εντός των μετα-ιζηματογενών πετρωμάτων, skarn κοντά στην διείσδυση και πολλά διαφορετικά συμπλέγματα παράλληλων φλεβών εντός και γειτονικά της διείσδυσης (Σχ.21). Χρυσοφόρες παράλληλες φλέβες χαλαζία εμφανίζονται σε τέσσερις διαφορετικές τοποθεσίες εντός της διείσδυσης και της άλως επαφής. Αυτές είναι γνωστές ως Eagle, Olive, Shamrock και Steiner ζώνες (Σχ.21). Οι τυπικές φλέβες έχουν περίπου 50 εκατοστά πλάτος και διεύθυνση Α-Δ.

Μεταλλοφορία βολφραμίου skarn στη ζώνη βολφραμίου Ray Gulch εμφανίζεται σε γειτονικά πετρώματα στο νότιο άκρο του πλουτωνίτη Dublin Gulch. Έξι ακόμη ρηχότερα, δυτικής διεύθυνσης skarn με πυρόξενο-σεελίτη εντοπίζονται εντός ανθρακικών ενοτήτων (Orssich, 1981; Lennan, 1983). Ο βαθμός του βολφραμίου τυπικά αυξάνεται με το βάθος.

Κασσιτερίτης εμφανίζεται σε μικρά breccia τουρμαλίνη-χλωρίτη, 2 χιλιόμετρα βορειοδυτικά του πλουτωνίτη Dublin Gulch (Σχ.21). Οι φλέβες χαλαζία Rex και Peso βρίσκονται 4-6 χιλιόμετρα δυτικά της διείσδυσης. Έχουν πλάτος 1-4 μέτρα και περιέχουν χαλαζία-σιδερίτη-ιαμεσονίτη-αρσενοπυρίτη, όπου κοντά στην επιφάνεια έχουν οξειδωθεί σε δευτερογενή ορυκτά. (Hitchins και Orssich, 1995). Κάποιες φλέβες περιέχουν έως και 1,8 g/t χρυσού και 1.500 g/t βισμούθιου.

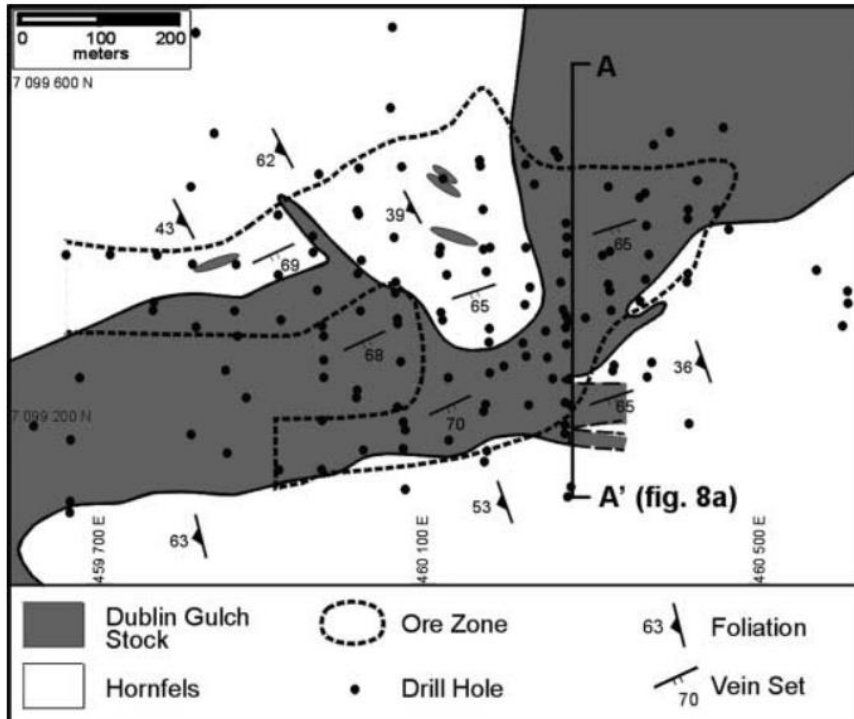
13.1.3 Ζώνη Eagle

Η ζώνη Eagle φιλοξενεί παράλληλες φλέβες χαλαζία εντός της νοτιοδυτικής κορυφής του πλουτωνίτη Dublin Gulch (Σχ. 21 και 22). Η ζώνη μεταλλοφορίας έχει περίπου μήκος 600 μέτρα και πλάτος 400 μέτρα και είναι περισσότερο εκτεθειμένη στην επιφάνεια. Το βόρειο-κεντρικό κομμάτι του κοιτάσματος καλύπτεται από μια λεπτή επένδυση μετα-ιζηματογενών πετρωμάτων.

Οι υποπαράλληλες φλέβες χαλαζία φιλοξενούν το μεγαλύτερο μέρος του χρυσού. Οι φλέβες αποτελούνται από λευκό ή γκρι χαλαζία με λιγότερους καλιούχους άστριους. Οι φλέβες έχουν από 0,5 με 10 εκατοστά πάχος, με μέσο όρο 2-3. Σουλφίδια εμφανίζονται σε ποσοστό

κάτω από 5% με τα πιο συνηθισμένα ορυκτά να αποτελούν ο μαγνητοπυρίτης, ο σιδηροπυρίτης, ο σεελίτης, ο αρσενοπυρίτης, ο σφαλερίτης, ο βισμούθινίτης και ο γαληνίτης.

Στις περισσότερες επιφάνειες εξαλλοιώσεις ο δευτερογενής καλιούχος άστριος είναι το κυρίαρχο ορυκτό, ενώ εμφανίζονται και μικρές ποσότητες αλβίτη.

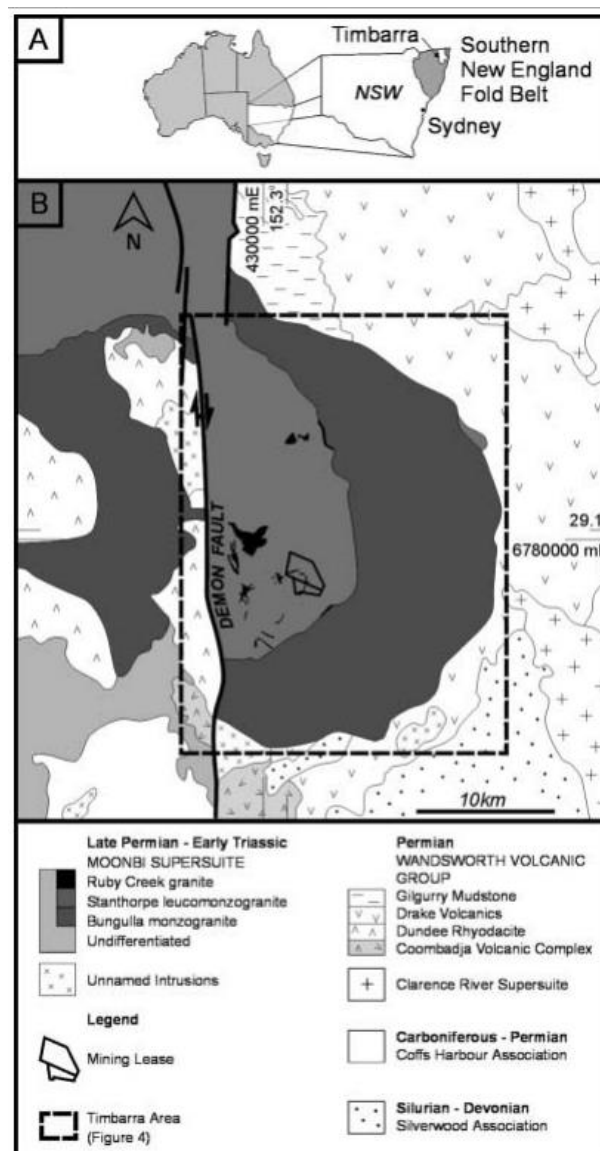


Σχ. 22 Γεωλογικός χάρτης της ζώνης Eagle, Maloof et al., 2001

13.2 Κοιτάσματα Timbarra, NEFB, New South Wales, Αυστραλία

Τα κοιτάσματα Timbarra βρίσκονται στη νότια ζώνη πτυχών New England (NEFB), της New South Wales στην Αυστραλία. Τα πέντε γνωστά κοιτάσματα περιέχουν αποθέματα χρυσού της τάξης των 16,8 Mt σε 0,73 g/t χρυσό. Οι γρανίτες της περιοχής Timbarra σχηματίζουν ένα πολύπλοκο πλουτωνίτη. Τα κοιτάσματα εντοπίζονται μέσα στον λευκομονζογρανίτη Stanthrope (242 με 238 εκατομμύρια χρόνια), ο οποίος διείσδυσε και σχημάτισε έναν πυρήνα στον πιο βασικό, άγονο μονζογρανίτη Bungulla (248 με 243 εκατομμύρια χρόνια). Ο χρυσός εντοπίζεται σε διάσπαρτη μεταλλοφορία, παρούσα και στα πέντε κοιτάσματα. Όλος ο χρυσός εντοπίζεται μέσα στον εκτεταμένο λευκομονζογρανίτη και φιλοξενείται από έναν πορφυροειδή γρανίτη. Η διάσπαρτη αυτή μεταλλοφορία περιλαμβάνει μια εξαλλοίωση με μοσχοβίτη-χλωρίτη-ανθρακικά και χρυσό. Χαλαζίας, περθίτης, ελάχιστος βιοτίτης, και αλβίτης είναι τα πρώιμα ορυκτά και τα πιο διαδεδομένα. Δευτερογενή ορυκτά είναι ο αρσενοπυρίτης, σιδηροπυρίτης, φθορίτης, μολυβδαινίτης. Τα μεταγενέστερα ορυκτά

περιλαμβάνουν χρυσό, μοσχοβίτη, γλωρίτη, ασβεσίτη, τελλουρίδια άργυρου-βισμούθιου, τελλουρίδια μολύβδου-βισμούθιου και σπάνια γαληνίτη και χαλκοπυρίτη. Τα σουλφίδια αποτελούν λιγότερο από το 1% των κοιτασμάτων. Περιλαμβάνονται μεγάλες ποσότητες Ag, Bi, Te, As, Mo, Sb, όπου ο χρυσός συνδέεται με Bi, Ag, Te και όχι τόσο με As, Mo, Sb. Τα υδροθερμικά ρευστά είναι ανθρακικά, χαμηλής αλατότητας, ο γρανίτης είναι Ι-τύπου, ελαφρώς οξειδωμένος, με χαμηλά ποσοστά σουλφιδίων και με Au-Bi-Ag-Te μεταλλοφορία. Όλα αυτά τα χαρακτηριστικά κατατάσσουν το Timbarra στα κοιτάσματα που σχετίζονται με μαγματικές διεισδύσεις.



Σχ. 23 Α. Χάρτης της NEFB που δείχνει την τοποθεσία του Timbarra. Β. Γεωλογικός χάρτης της περιοχής του Timbarra. Mustard, 2001.

13.2.1 Γεωλογία της περιοχής

Ο New England βαθύλιθος του ύστερου Λιθανθρακοφόρου καταλαμβάνει περίπου 15.000km² και διεισδύσε στο πρίσμα επαύξησης της ζώνης πτυχών New England (Shaw και Flood, 1981). Ο βαθύλιθος αποτελείται από συνορογενετικές, υπεραργλικές διεισδύσεις S-τύπου γρανιτοειδών του άνω Λιθανθρακοφόρου και μεταορογενετικές, Περμοτριάδικές, I-τύπου διεισδύσεις. Οι I-τύπου διεισδύσεις σχηματίζουν μια βόρειο-βορειοανατολική ζώνη, έκτασης 300 επί 60 χιλιομέτρων και ερμηνεύονται ως προϊόντα του μαγματικού τόξου των Άνδεων (Chappell, 1994).

Ο Bungulla μονζογρανίτης και ο Stanthrope λευκομονζογρανίτης είναι μέρος της πλουτωνικής σειράς Moonbi (Chappell και Bryant, 1994, Σχ.23). Οι λευκομονζογρανίτες έχουν υψηλά ποσοστά σε Rb, Y, Ga, Nb, Pb, HREE, Th, U, Cs και σχετικά απεμπλουτισμένα Ba, Sr, Eu, LREE (Blevin και Chappell, 1993). Είναι το πιο σημαντικό είδος διεισδύσεων στην NEFB και έχουν σχηματίσει κοιτάσματα Sn, W, Mo, Ag, As, Bi, Cu, Pb, Zn, Au, φθορίτη, τοπάζιου (Blevin και Chappell, 1993, 1996; Brown και Stroud, 1993).

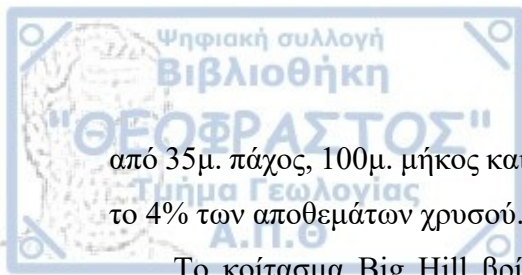
Οι γρανίτες με υψηλά ποσοστά καλίου της σειράς Moonbi ονομάστηκαν ως Stanthrope group από τους Blevin και Chappell (1996) και χωρίζονται σε: (1) Bungulla τύπου, 243-248 εκατ. Χρόνια (2) Stanthrope τύπου, 238-242 εκατ. χρόνια (3) Ruby Creek τύπου, 239-241 εκατ. χρόνια, των οποίων η κρυστάλλωση απείχε μόλις 2-3 εκατομμύρια χρόνια.

13.2.2 Γεωλογία των πέντε κοιτασμάτων

Τα πέντε κοιτάσματα βρίσκονται στο νότιο μέρος του Timbrarra. Βρίσκονται στο άνω μέρος του Stanthrope πλουτωνίτη. Τα Poverty Hill, RMT, Leeds-Poulsons, Big Hill κοιτάσματα βρίσκονται μέσα στον κύριο πυρήνα λευκομονζογρανίτη. Το κοιτάσμα Hortons βρίσκεται σε υψόμετρο 880μ. εντός ενός μικρού πλουτωνίτη, 8χλμ νοτιοδυτικά του Poverty Hill. Το Poverty Hill βρίσκεται στον λευκομονζογρανίτη Stanthrope σε υψόμετρο 990μ. Εμφανίζονται διάφορες απλιτικές φλέβες και φλέβες χαλαζία-μολυβδαινίτη σε διαρρήξεις του λευκομονζογρανίτη. Έχει μικρή, κλίση προς τα δυτικά και έχει τραπεζοειδή μορφή. Έχει πάχος μικρότερο από 50μ., μήκος 400μ. και πλάτος 200μ. Περιέχει το 15% των αποθεμάτων χρυσού.

Το κοιτάσμα RMT βρίσκεται 700μ. νότια του Poverty Hill σε υψόμετρο 960μ. Εμφανίζονται φλέβες χαλαζία-μολυβδαινίτη εντός του λευκομονζογρανίτη. Έχει φακοειδή μορφή και πάχος λιγότερο από 45μ. (μέσος όρος 25μ.), μήκος 280μ. και πλάτος 185μ. Περιέχει περίπου το 14% των αποθεμάτων χρυσού.

Το κοιτάσμα Leeds-Poulson βρίσκεται 500μ. νότιο-νοτιοδυτικά του Poverty Hill σε υψόμετρο 980μ. Εμφανίζονται φλέβες χαλαζία εντός απλιτικών σωμάτων και έχει λιγότερο



από 35μ. πάχος, 100μ. μήκος και 35μ. πλάτος. Είναι το μικρότερο κοίτασμα και περιέχει μόλις το 4% των αποθεμάτων χρυσού.

Το κοίτασμα Big Hill βρίσκεται σε κατώτερο μέρος του λευκομονζογρανίτη από τα προηγούμενα, 1χλμ ανατολικά του Poverty Hill και σε υψόμετρο 870μ., κάτω από λεπτά απλιτικά επίπεδα. Έχει 350μ. μήκος και 50 με 70μ. πλάτος. Επίσης περιέχει το μεγαλύτερο απόθεμα χρυσού με ποσοστό 62%.

Το κοίτασμα Hortons βρίσκεται μέσα σε ένα μικρό πλουτωνίτη, 8χλμ νοτιοδυτικά του Poverty Hill σε υψόμετρο 880μ. Ο πλουτωνίτης έχει 500μ. μήκος και 90μ. πλάτος και διεισδύσει εντός του Bungulla μονζογρανίτη. Έχει σχήμα σωλήνα και μήκος 100μ., 35μ. πλάτος και 65μ. πάχος. Περιέχει περίπου το 5% των αποθεμάτων χρυσού.

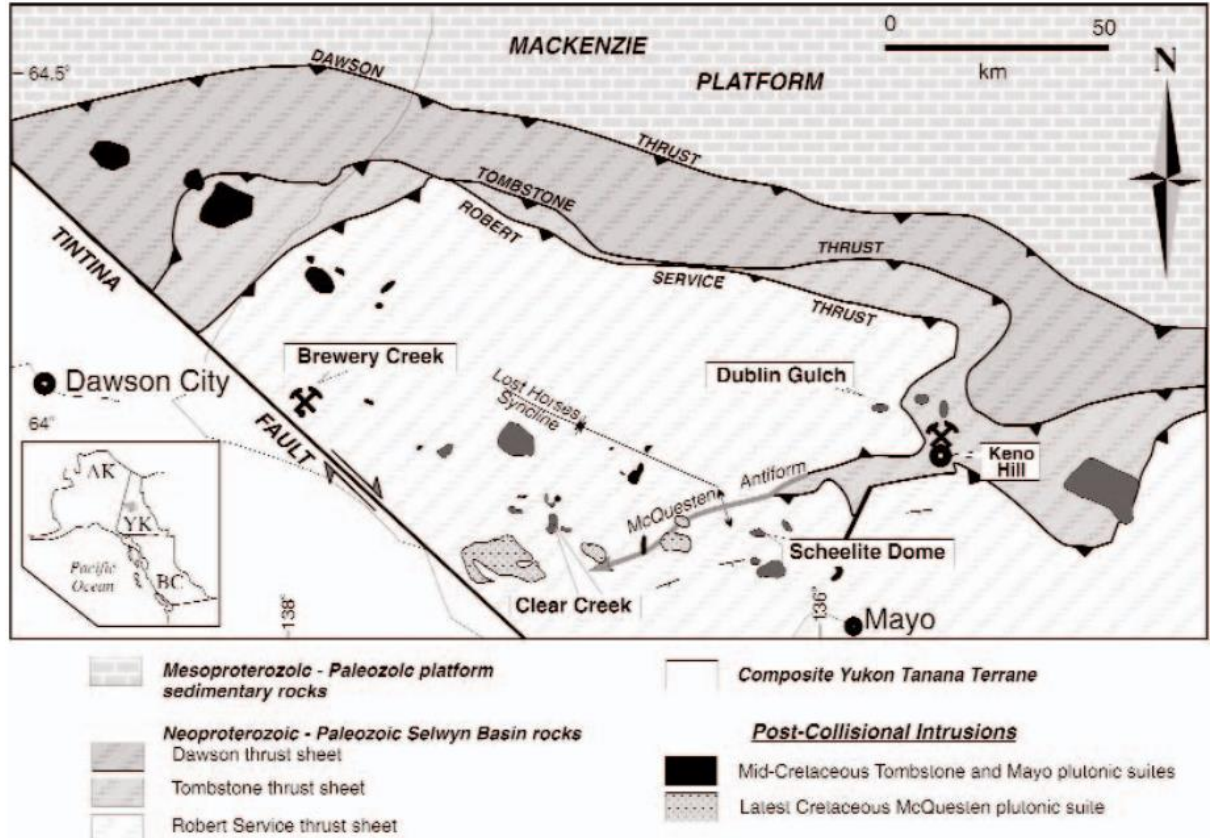
13.2.3 Τύποι μεταλλοφορίας στο κοίτασμα του Timbarra

Εντοπίζονται φλέβες χαλαζία-μολυβδαινίτη, εξαλλοίωση με μοσχοβίτη-χλωρίτη-ανθρακικά, φλέβες σκωριώδη χαλαζία και φλέβες χαλκηδόνη-χαλαζία, τα οποία είναι όλα υδροθερμικά χαρακτηριστικά. Οι τύποι μεταλλοφορίας περιλαμβάνουν διάσπαρτη μεταλλοφορία (εξαλλοίωση με μοσχοβίτη-χλωρίτη-ανθρακικά που γεμίζουν μιαιολιθικές κοιλότητες), και μεταλλοφορία με μορφή φλεβών και φλεβιδίων. Τα ορυκτά χαλαζίας, περθίτης, ελάχιστος βιοτίτης, αλβίτης είναι τα πιο άφθονα και τα πιο πρώιμα. Ως δευτερογενή ορυκτά εμφανίζονται αρσενοπυρίτης, σιδηροπυρίτης, φθορίτης, μολυβδαινίτης. Τα πιο μεταγενέστερα ορυκτά περιλαμβάνουν χρυσό, μοσχοβίτη, χλωρίτη, ασβεστίτη, τελλουρίδια άργυρου-βισμούθιου, τελλουρίδια μολύβδου-βισμούθιου και σπάνια γαληνίτη και χαλκοπυρίτη.

13.3 Κοίτασμα Scheelite Dome, πλουτωνική σειρά Tombstone, Yukon, Καναδάς

Το κοίτασμα Scheelite Dome εμφανίζεται στο δυτικό μέρος της λεκάνης Selwyn, στην περιοχή Yukon του Καναδά και φιλοξενείται από κερατολιθικά μετα-ιζηματογενή πετρώματα. Τα ιζηματογενή αυτά πετρώματα βρίσκονται δίπλα από τις εκτεθειμένες κορυφές ενός μονζογρανίτη της μέσο-Κρητιδικής πλουτωνικής σειράς Tombstone, στην μεταλλογενετική επαρχία Tintina. Εμφανίζεται μια ποικιλία μεταλλοφοριών, συμπεριλαμβανόμενων skarn πλούσια σε Au-W, Au-W και φλέβες χαλαζία πλούσιες σε Ag-Pb-Zn-Sb. Η αποβολή του χρυσού έγινε 2 εκατομμύρια χρόνια μετά την διείσδυση του μάγματος. Τα υδροθερμικά ορυκτά σχηματίστηκαν σε βάθη 6 με 9 χιλιόμετρα και σε θερμοκρασία μεταξύ 300°C και 550°C. Ο χρυσός συνδέεται με Bi, Te, W και As. Οι φλέβες Pb-Zn-Ag-Sb δεν περιέχουν χρυσό

και αντιπροσωπεύουν την τελευταία υδροθερμική φάση με την χαμηλότερη θερμοκρασία. Τα υδροθερμικά ρευστά υπεύθυνα για την μεταλλοφορία είναι χαμηλής αλατότητας (≤ 4 wt% NaCl).



Σχ. 24 Γεωλογικός χάρτης της δυτικής λεκάνης Selwyn. Murphy, 1997

13.3.1 Γεωλογία της περιοχής

Η περιοχή που βρίσκεται το κοίτασμα Scheelite Dome βρίσκεται στα 1.750 μέτρα από την επιφάνεια της θάλασσας. Υπόκειται από έντονα παραμορφωμένα μετα-ιζηματογενή πετρώματα στο τεκτονικό λέπι Robert Service (Hart et al., 2004). Τα μετα-ιζηματογενή πετρώματα εντάσσονται στην Νεοπρωτεροζωική με πρώιμα Κάμβρια ενότητα Hyland και αποτελούνται από φυλλίτες, χαλαζίτες, λιγότερο από ανθρακικά και ελάχιστα από γραφίτες.

Δύο μεγάλες μονζογρανιτικές διεισδύσεις εμφανίζονται στην περιοχή. Ο βόρειο-βορειοδυτικής παράταξης Morrison Creek πλουτωνίτης και ο Α-Δ παράταξης Scheelite Dome πλουτωνίτης. Ο Morrison Creek, είναι γενικά ομογενής, ενώ στον Scheelite Dome και τα μετα-ιζηματογενή πετρώματα στα νότια, έχουν διεισδύσει χαλαζιακός μονζονίτης και χαλαζιακός μονζοδιορίτης. Απλιτικές και πηγματιτικές φλέβες κόβουν και τους δύο πλουτωνίτες.

13.3.3 Τύποι μεταλλοφορίας στο κοίτασμα του Scheelite Dome

Η περιοχή του Scheelite Dome φιλοξενεί skarn πλούσια σε W, παράλληλες φλέβες χαλαζία, skarn πλούσια σε χρυσό, φλέβες χαλαζία καθώς και φλέβες πλούσιες σε Ag-Pb-Zn-Sb. Τα skarn πλούσια σε βολφράμιο εμφανίζονται στη βόρεια και νότια πλευρά του πλουτωνίτη Scheelite Dome, ενώ τα πλούσια σε χρυσό skarn σχηματίζονται κυρίως στην νότια πλευρά. Οι πλούσιες σε βολφράμιο και φτωχές σε χρυσό παράλληλες φλέβες εντοπίζονται κυρίως εντός του πλουτωνίτη. Οι πλούσιες σε χρυσό φλέβες στα κερατιτικά μετα-ιζηματογενή πετρώματα νότια του Scheelite Dome και σε δευτερεύουσα φάση και εντός του. Οι Ag-Pb-Zn-Sb φλέβες εμφανίζονται μόνο στους κερατίτες.

14. Κοιτάσματα που σχετίζονται με μαγματικές διεισδύσεις στον Ελληνικό χώρο.

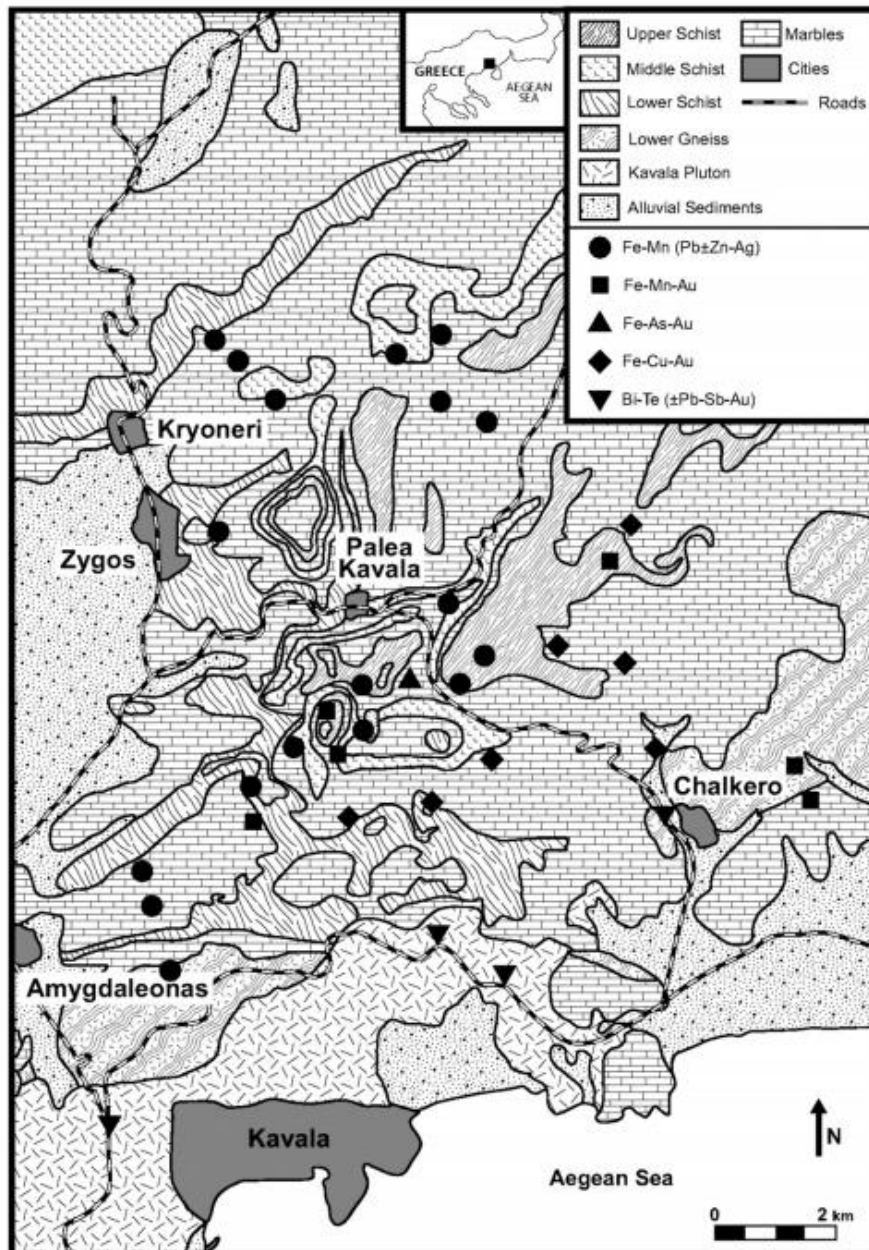
Διάφορα κοιτάσματα της Μάζας Ροδόπης έχουν προταθεί ως κοιτάσματα που σχετίζονται με μαγματικές διεισδύσεις (Hart et al., 2002; Baker et al., 2005), παρ' όλο που στο παρελθόν είχαν ταξινομηθεί ως άλλοι τύποι κοιτασμάτων. Το πιο σημαντικό κοιτάσμα που σχετίζεται με μαγματικές διεισδύσεις του Ελληνικού χώρου εμφανίζεται στο νότιο μεταμορφικό πυρήνα της μάζας Ροδόπης, το κοιτάσμα της Παλαιάς Καβάλας.

14.1 Κοίτασμα της Παλαιάς Καβάλας, Μάζα Ροδόπης

Το κοιτάσμα της Παλαιάς Καβάλας περιέχει Fe-Mn (Pb ± Zn ± Ag), Fe-Mn-Au, Fe-As-Au, Fe-Cu-Au, and Bi-Te-Au εμφανίσεις, οι οποίες εμφανίζονται πρωτίστως σε φλέβες χαλαζία-ασβεστίτη-σουλφιδίων (υπόγεια μεταλλοφορία) ή ως σώματα στον πλουτωνίτη της Καβάλας, ηλικίας ~21-22 εκατομμυρίων ετών, ο οποίος διείσδυσε σε μεταμορφωμένα πετρώματα του μεταμορφικού πυρήνα της μάζας Ροδόπης. Η σύσταση του πλουτωνίτη της Καβάλας είναι κυρίως αμφιβολιτικός-βιοτιτικός γρανοδιορίτης, με μικρές εμφανίσεις διορίτη, τοναλίτη, μονζοδιορίτη και εντοπίζεται κατά μήκος του ρήγματος Καβάλας-Κομοτηνής.

Πρόσφατα ανακαλύφθηκε, η όπως ονομάζεται φλέβα της Καβάλας, με μήκος περίπου 4 χιλιομέτρων και είναι ένα σύστημα παράλληλων φλεβών χαλαζία με μεταλλοφορία Bi-Te-Pb-Sb ± Au, η οποία κόβει τον πλουτωνίτη της Καβάλας και τους σχιστόλιθους και γενέσιους της μάζας Ροδόπης. Το σύστημα φλεβών Καβάλας περιέχει χαλαζία, καλιούχους αστρίους (αλλά σε μικρότερη ποσότητα), πλαγιόκλαστο και μοσχοβίτη.

Αρχαιομετρικές έρευνες από τους Βαβελίδης κ.ά. (1996, 1997) και Βαβελίδης και Ανδρέου (2008) έδειξαν ότι αυτά τα κοιτάσματα ήταν εκμεταλλεύσιμα κατά την αρχαιότητα για χρυσό ή μόλυβδο-άργυρο και κατά τη σημερινή εποχή για σίδηρο-μαγνήσιο, όπου η εκμετάλλευση ήταν τόσο υπόγειο όσο και υπαίθρια.



Σχ.25 Γεωλογικός χάρτης της Παλαιάς Καβάλας και της βορειοανατολικής Ελλάδας, όπου απεικονίζονται μερικές από τις εμφανίσεις της περιοχής. Fornadel et al., 2011.

14.1.1 Γεωλογία της περιοχής

Η γεωλογία της βορειοανατολικής Ελλάδας χαρακτηρίζεται από μάρμαρα, αμφιβολίτες και ορθογενείς της μάζας Ροδόπης. Η ηλικία των πρωτόλιθων των ορθογενέσιων υπολογίζεται από 310 με 270 εκατομμύρια χρόνια και συνεπάγεται ότι τα μετα-ιζηματογενή

πετρώματα και οι αμφιβολίτες είναι μεταμορφωμένα ιζήματα και ηφαιστειοϊζηματογενείς ενότητες υπερκείμενα του πλουτωνικού υπόβαθρου (Brun και Sokoutis, 2007; Liati και Fanning, 2005; Liati και Gebauer, 1999; Turpaud και Reischmann, 2003; Wawrzenitz και Krohe, 1998). Η μάζα της Ροδόπης διαχωρίστηκε σε δύο τεκτονικές ενότητες από τους Παπανικολάου και Παναγόπουλος (1981), Ζάχος και Δημάδης (1983), Δημάδης και Ζάχος (1989), Μπόσκος και Liati (1993), και Κυριακόπουλος κ.ά. (1996). Η κατώτερη τεκτονική ενότητα του Παγγαίου, χαρακτηρίζεται από μάρμαρα, γνεύσιους με μαρμαρυγίες, μαρμαρυγιακούς σχιστόλιθους, ασβεστοπυριτικούς σχιστόλιθους και αμφιβολίτες και μεταμορφώθηκε στις ανώτερη πρασινοσχιστολιθική-κατώτερη αμφιβολιτική φάσεις. Η ανώτερη τεκτονική ενότητα του Σιδηρόνερου είναι τοποθετημένη τεκτονικά επάνω από την ενότητα Παγγαίου και χαρακτηρίζεται από γνεύσιους, μυλωνίτες, αμφιβολίτες καθώς και από μια μικρή συμμετοχή από μάρμαρα και μιγαμίτες. Αυτά τα πετρώματα μεταμορφώθηκαν κατά την μέσω με άνω αμφιβολιτική φάση. Οι Brun and Σοκούτης (2007) πρότειναν ότι η εκταφή της μάζας Ροδόπης ήταν αποτέλεσμα μιας μεγάλης κλίμακας εφελκυστικής φάσης από το μέσο Ηώκαινο μέχρι το μέσο Ολιγόκαινο κατά μήκος του ρήγματος αποκόλλησης Κερδυλλίων, όπου εμφανίστηκε ως μεταμορφικός πυρήνας. Ο μαγματισμός στην μάζα Ροδόπης αποτελείται από μια ηφαιστειότητα στο Ολιγόκαινο-Μειόκαινο και από πλουτωνισμό στο Ηώκαινο-Μειόκαινο.

Η περιοχή της Παλαιάς Καβάλας εντάσσεται στην ενότητα Παγγαίου και στα πετρώματα της διείσδυσε ο πλουτωνίτης της Καβάλας (ή Συμβόλου), ηλικίας ~21-22 εκατομμυρίων ετών κατά μήκος του ρήγματος Καβάλας-Κομοτηνής. Ο πλουτωνίτης της Καβάλας χαρακτηρίζεται ως I-τύπου και αποτελείται κυρίως από έναν αμφιβολιτικό-βιοτιτικό γρανοδιορίτη με υφιστάμενες ποσότητες από διορίτη, τοναλίτη, μονζογρανίτη, μονζοδιορίτη. Ο γρανοδιορίτης της Καβάλας αποτελείται από μεσαίους μέχρι αδρούς κόκκους και περιέχονται κυρίως χαλαζίας, πλαγιόκλαστο ($An_{(16-35)}$), καλιούχοι άστριοι ($Or_{(75-99)}$), αμφίβολοι και βιοτίτης, με μικρές ποσότητες από τιτανίτη, αλλανίτη, απατίτη, ζιρκόνιο και επίδοτο (Neiva et al., 1996). Το οξειδίο του σιδήρου το οποίο έχει αναφερθεί από τους Fornadel et al. (2011) και Neiva et al. (1996) είναι ο μαγνητίτης, ενώ από τον Κυριακόπουλο (1989) αναφέρθηκαν επίσης ποσότητες ιλμενίτη, κάτι που καθιστά τον γρανοδιορίτη να βρίσκεται στο όριο μαγνητίτη-ιλμενίτη.

14.1.2 Τύποι μεταλλοφορίας στο κοίτασμα της Παλαιάς Καβάλας

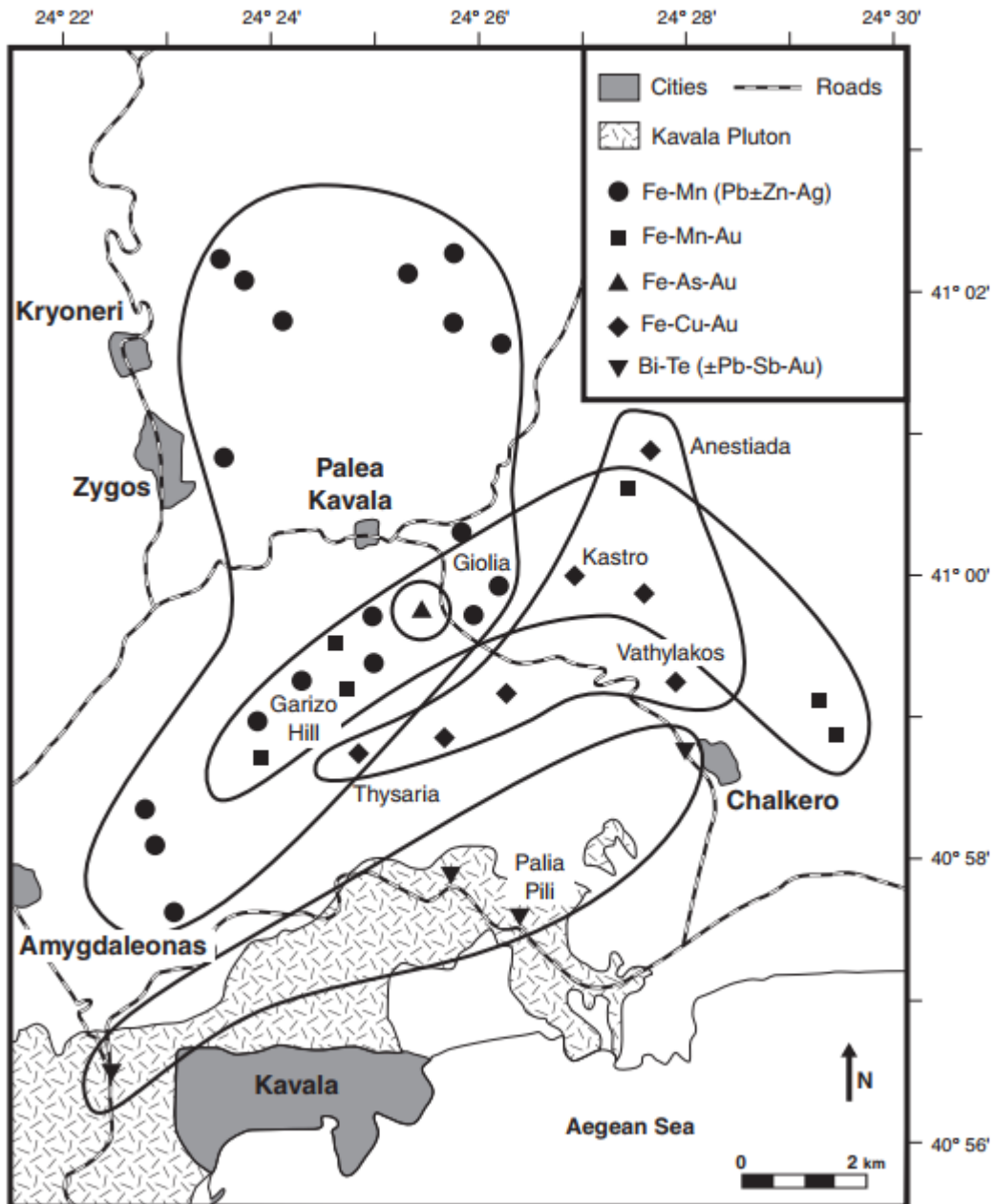
Τα οξειδωμένα Fe-Mn-Au και Fe-Mn ($Pb \pm Zn \pm Ag$) σώματα βρίσκονται στα μάρμαρα, τα Fe-As-Au, Fe-Cu-Au, και Bi-Te-Au σώματα βρίσκονται εντός των γνευσίων και των

γρανιτοειδών, όπως και κατά μήκος τη επαφής γνευσίων-μαρμάρων στην τεκτονική ενότητα Παγγαίου, μέσα σε φλέβες γαλακτώδη χαλαζία. Η φλέβα της Καβάλας, η οποία εντοπίζεται εντός ή κοντά στον γρανοδιορίτη της Καβάλας, χαρακτηρίζεται από μια μεταλλοφορία Bi-Te \pm Pb \pm Sb \pm Au, ενώ οι φλέβες εκτός του πλουτωνίτη δείχνουν τις ακόλουθες ζώνες: Fe-Mn-Au, Fe-Cu-Au και Fe-As-Au. Σε απομακρυσμένη απόσταση από τον γρανοδιορίτη, οι μεταλλικές ζώνες περιέχουν Fe-Mn (\pm Pb-Zn-Ag). Μεταλλοφορία Fe-As-Au, Fe-Cu-Au και Bi-Te-Au εμφανίζεται σε φλέβες χαλαζία ή χαλαζία-ακθρακικών (ασβεστίτη, ανκερίτη και σπάνια ροδοχρωσίτη), με πλάτος μέχρι και 20 μέτρα (συνήθως 2-3 μέτρα).

Τα μεταλλικά ορυκτά που συναντώνται στα κοιτάσματα Fe-As-Au είναι ο σιδηροπυρίτης, αρσеноπυρίτης, σφαλερίτης, γαληνίτης, κοζαλίτης, χαλκοπυρίτης και δευτερογενής κοβελλίνης, χαλκοσίνης, τετραεδρίτης-τενναντίτης, μαγνητοπυρίτης, αυτοφυής χρυσός, ενώ τα κοιτάσματα Fe-Cu-Au περιέχουν σιδηροπυρίτη, χαλκοπυρίτη, δευτερογενή κοβελλίνη και χαλκοσίνη, μαγνητοπυρίτη, βισμούθινίτη, τετραεδρίτη-τενναντίτη και αυτοφυή χρυσό (Βαβελίδης et al., 1997). Όπου υπάρχει, ο χρυσός εμφανίζεται ως έγκλεισμα σε χαλαζία, αρσеноπυρίτη και χαλκοπυρίτη στα Fe-As-Au και Fe-Cu-Au κοιτάσματα και σε χαλαζία στα οξειδωμένα κοιτάσματα. Τα μεταλλικά ορυκτά που απαντώνται στα Bi-Te-Au κοιτάσματα είναι ο σιδηροπυρίτης, τετραδυμίτης, βισμούθινίτης, κοζαλίτης, λιλλιανίτης. Επίσης στην περιοχή της Παλαιάς Καβάλας εντοπίζονται και τα ακόλουθα ορυκτά κυρίως στα κοιτάσματα Fe-Mn-Au και Fe-Mn (Pb \pm Zn \pm Ag), όπως δηλαδή ο αρσеноσιδηρίτης, σκοροδίτης, μιμητίτης, γκαιτίτης, πυρολουσίτης, μαγγανίτης, τοντοροκίτης, κρυπτομέλενας, νσουτίτης, χαλκοφανίτης, περμανίτης, μπεουδαντίτης, κερουσίτης, λεπιδοκροκίτης (Αρβανιτίδης κ.ά., 1989; Βαβελίδης κ.ά., 1997.) Τα πρώιμα σουλφίδια όπως γαληνίτης, αρσеноπυρίτης, σιδηροπυρίτης, διατηρούνται στις ζώνες οξείδωσης.

Η φλέβα της Καβάλας Bi-Te-Au κόβει τον πλουτωνίτη της Καβάλας κοντά στην επαφή του με τους σχιστόλιθους και τους γνεύσιους της τεκτονικής ενότητας Παγγαίου και χαρακτηρίζεται από πολλές παράλληλες και υποπαράλληλες φλέβες χαλαζία. Η ορυκτολογία της φλέβας της Καβάλας χαρακτηρίζεται από χαλαζία, με μικρότερες ποσότητες από καλιούχους άστριους, πλαγιόκλαστο, μοσχοβίτη και σιδηροπυρίτη. Αναπτύσσονται επίσης με τον σιδηροπυρίτη (<5% της φλέβας) και τετραδυμίτης, κοζαλίτης, βισμούθινίτης και πλούσιος σε αντιμόνιο λιλλιανίτης.

Η φλέβα του Χαλκερού, έχει μήκος ~30 μέτρα και πάχος ~0,5 με 1 μέτρο. Αποτελείται σχεδόν ολοκληρωτικά από χαλαζία, με μικρές ποσότητες καλιούχων αστρίων.



Σχ. 26 Γενικευμένος χάρτης που δείχνει την κατανομή της μεταλλοφορίας στην περιοχή της Παλαιάς Καβάλας. Οι φλέβες της Καβάλας και του Χαλκερού συγκροτούν την μεταλλοφορία Bi-Te (\pm Pb-Sb-Au) που εμφανίζεται εντός του πλουτωνίτη της Καβάλας. Fornadel et al., 2011

15. Συζήτηση – Συμπεράσματα

Τα κοιτάσματα που σχετίζονται με μαγματικές διεισδύσεις αποτελούν αδιαμφισβήτητα έναν σημαντικό τύπο κοιτασμάτων, που χρήζουν μεγάλης οικονομικής σημασίας λόγω της παρουσίας χρυσού και άλλων μετάλλων. Παρουσιάζουν μοναδικά χαρακτηριστικά, όπως η

κατακόρυφη ζωνώδης κατανομή της μεταλλοφορίας. Ωστόσο υπάρχουν ακόμη πολλά περιθώρια για περαιτέρω εξερεύνησή τους. Λόγω της πρόσφατης ανακάλυψής τους πολλές φορές έχουν ταξινομηθεί εσφαλμένα ως άλλοι τύποι κοιτασμάτων, όπως ως πορφυριτικά ή ως ορογενετικού χρυσού. Υπάρχουν ακόμη αρκετά κενά στο μοντέλο αυτών των κοιτασμάτων και ερωτήματα που πρέπει να απαντηθούν, όπως το γεωτεκτονικό τους περιβάλλον, η προέλευση του μάγματος, το εάν τα υδροθερμικά διαλύματα είναι μαγματικής ή μεταμορφικής προέλευσης, ο ρόλος του διοξειδίου του άνθρακα καθώς και ρόλος της κλασματικής κρυστάλλωσης. Καθώς όμως τα γεωλογικά και γεωχημικά δεδομένα θα συνεχίσουν να αυξάνονται τα επόμενα χρόνια, τα γενετικά μοντέλα και τα μοντέλα εξερεύνησης θα αναπτύσσονται και θα εμπλουτίζονται σημαντικά με μια ανάλογη αύξηση στην αποδοτικότητα και την επιτυχία των προγραμμάτων εξερεύνησης.

16. Βιβλιογραφία

- Κορωναίος Α., 2016, *Σημειώσεις Γεωλογίας Πυριγενών Πετρωμάτων*, 73-84
- Μέλφος Β., Βουδούρης Π., 2022, *Κοιτάσματα της Ελλάδος*, 12-22
- Μιχαηλίδης Κ., Βαβελίδης Μ., Φιλιππίδης Α., 1986, *Σημειώσεις Γενικής Κοιτασματολογίας I*, 6-17
- Baker T., 2002, *Emplacement depth and carbon dioxide-rich fluid inclusions in Intrusion-Related Gold Deposits*, *Economic Geology* Vol. 97, 2002, 1111–1117
- Baker T., Lang J., 2001, *Fluid Inclusion Characteristics of intrusion related gold mineralization, Tombstone-Tungsten magmatic belt, Yukon Territory, Canada*, *Mineralium Deposita* 36, 563-582
- Baker T. et al., 2005, *A Comparison of Granite-Related Tin, Tungsten, and Gold-Bismuth Deposits: Implications for Exploration*, *SEG Newsletter* No 61, 5-17
- Blevin P., 2015, *Intrusion Related Gold Deposits*
- Fornadel et al., 2011, *Is Palea Kavala Bi-Te-Pb-Sb ± Au district, northeastern Greece, an intrusion-related system?*, *Ore Geology Reviews* 39, 119–133
- Hart C., 2007, *Reduced Intrusion Related Gold Systems*, *Geological Association of Canada*, Mineral Deposits Division, Special Publication No. 5, 95-112
- Hart C., Goldfarb R., 2005, *Distinguishing intrusion-related from orogenic gold systems*
- Hart C., 2005, *Classifying, Distinguishing and Exploring for Intrusion-Related Gold Systems*, *Gangue* No. 87, 1-18



- Hart et al., 2004, *The Northern Cordilleran Mid-Cretaceous Plutonic Province: Ilmenite/Magnetite-series Granitoids and Intrusion-related Mineralization*, 2004, RESOURCE GEOLOGY, vol. 54, no. 3, 253–280
- Lang R., Baker T., 2001, *Intrusion Related Gold systems: the present level of understanding*, Mineralium Deposita 36, 477-489
- Lang et al., 2000, *An Exploration Model for Intrusion Related Gold Systems*, SEG Newsletter Number 40, 6-15
- Mair et al., 2006, *Geochemical Constraints on the Genesis of the Scheelite Dome Intrusion-Related Gold Deposit, Tombstone Gold Belt, Yukon, Canada*, Economic Geology 101 (3), 523–553
- Maloof et al., 2001, *The Dublin Gulch Intrusion-hosted gold deposit, Tombstone plutonic suite, Yukon Territory, Canada*, Mineralium Deposita 36, 583-593
- Melfos V., Voudouris P., 2017, *Cenozoic metallogeny of Greece and potential for precious, critical and rare metals exploration*, Ore Geology Reviews 89, 1030–1057
- Mustard R., 2001, *Granite-hosted gold mineralization at Timbarra, northern New South Wales, Australia*, Mineralium Deposita 36, 542-562
- Sillitoe R., Thompson J., 1998, *Intrusion-Related Vein Gold Deposits: Types, Tectono-Magmatic Settings and Difficulties of Distinction from Orogenic Gold Deposits*, RESOURCE GEOLOGY, vol. 48, no. 2, 237–250
- Robert et al., 2005, *Models and Exploration Methods for Major Gold Deposit Types*, Ore Deposits and Exploration Technology Paper 48, 691-711
- Thompson et al., 1999, *Intrusion-related gold deposits associated with tungsten-tin provinces*, Mineralium Deposita 34, 323-334