



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



ΜΟΥΣΙΩΝΗ ΣΤΕΛΑ
ΑΕΜ: 5586

ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΑ ΔΙΕΙΣΔΥΣΕΙΣ ΜΕ ΖΩΝΩΔΗ ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΓΥΡΩ ΑΠΟ
ΜΑΓΜΑΤΙΚΕΣ ΔΙΕΙΣΔΥΣΕΙΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ



Επιβλέπων Καθηγητής: Μέλφος Βασίλειος

ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ
2020





ΜΟΥΣΙΩΝΗ ΣΤΕΛΑ

ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΑ ΜΕ ΖΩΝΩΔΗ ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΓΥΡΩ ΑΠΟ ΜΑΓΜΑΤΙΚΕΣ ΔΙΕΙΣΔΥΣΕΙΣ

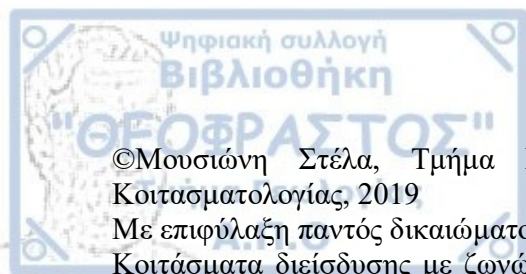
Υποβλήθηκε στο Τμήμα Γεωλογίας
Τομέας Ορυκτολογίας - Πετρολογίας - Κοιτασματολογίας

Επιβλέπων Καθηγητής

Βασίλης Μέλφος, Αναπληρωτής Καθηγητής

© Μουσιώνη Στέλα, 2020

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All right reserved.



©Μουσιώνη Στέλα, Τμήμα Γεωλογίας Α.Π.Θ., Τομέας Ορυκτολογίας, Πετρολογίας, Κοιτασματολογίας, 2019

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος.

Κοιτάσματα διείσδυσης με ζωνώδη ανάπτυξη γύρω από μαγματικές διεισδύσεις– *Διπλωματική Εργασία*

©Mousioni Stela, School of Geology, Department of Mineralogy, Petrology, Economic Geology, 2019

All rights reserved.

Deposits with zoning around magmatic intrusions– *Bachelor Thesis*

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς το συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν το συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευτεί ότι εκφράζουν τις επίσημες θέσεις του Α.Π.Θ.

Εικόνα Εξωφύλλου:





ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Περίληψη.....	1
Abstract	2
1.Πρόλογος – Αντικείμενο Εργασίας.....	3
1.Εισαγωγή	4
2. Κοιτάσματα χρυσού που συνδέονται με διείσδυση και σχετίζονται με επαρχίες Βολφραμίου-Κασσιτέρου	6
2.1 Κοιτάσματα χρυσού που σχετίζονται με τη διείσδυση με βισμούθιο, βολφράμιο και αρσενικό	8
2.1.1 Fort Knox, Αλάσκα	11
2.1.2 Mokrsko, Τσεχική Δημοκρατία	13
2.1.3 Salave, Ισπανία.....	15
2.1.4 Vasilkovskoe, Καζακστάν	15
2.1.5 Timbarra, Νέα Νότια Ουαλία, Αυστραλία	16
2.1.6 Kidston, Queensland, Αυστραλία	16
2.2.7 Kori Kollo, Βολιβία.....	18
2.2 Περιβάλλον Σχηματισμού των κοιτασμάτων	20
3. Το βάθος τοποθέτησης και τα ρευστά εγκλείσματα πλούσια σε διοξείδιο του άνθρακα σε κοιτάσματα χρυσού που σχετίζονται με την διείσδυση	24
3.1 Χαρακτηριστικά ρευστών εγκλεισμάτων σε κοιτάσματα χρυσού που σχετίζονται με διείσδυση	29
3.2 Ο Ρόλος του Διοξειδίου του Άνθρακα στα όξινα μάγματα και οι επιπτώσεις των κοιτασμάτων χρυσού που σχετίζονται με διείσδυση.	35
4. Ταξινόμηση, διάκριση και εξερεύνηση συστημάτων χρυσού που σχετίζονται με διείσδυση	40
5. Κατανομή των κοιτασμάτων διείσδυσης.....	44
6.Βιβλιογραφία	45



Κοιτάσματα διείσδυσης με ζωνώδη ανάπτυξη γύρω από μαγματικές διεισδύσεις

Μουσιώνη Στέλα

Στόχος της παρούσας πτυχιακής εργασίας είναι η μελέτη κοιτασμάτων διείσδυσης με ζωνώδη ανάπτυξη γύρω από μαγματικές διεισδύσεις. Στην μελέτη αναφέρονται κοιτάσματα χρυσού που συνδέονται με διείσδυση σε πολλές περιοχές παγκοσμίως. Μερικά κοιτάσματα χρυσού σχετίζονται με επαρχίες βολφραμίου-κασσιτέρου και με βισμούθιο-βολφράμιο-αρσενικό. Επιπλέον, προσκομίζονται τα χαρακτηριστικά των κοιτασμάτων, τα τεκτονικά περιβάλλοντα που σχηματίζονται, οι μορφές που εμφανίζονται και οι ζώνες μετάλλων. Επιπρόσθετα, περιγράφεται η σύνδεση των ρευστών εγκλεισμάτων με τα κοιτάσματα χρυσού που σχετίζονται με την διείσδυση. Παρουσιάζεται η ζωνώδη ανάπτυξη που δημιουργείται γύρω από κέντρο της μητρικής μεταλλογενετικής μαγματικής διείσδυσης. Τέλος, γίνεται αναφορά στον τρόπο που ταξινομούνται τέτοιου είδους κοιτάσματα.



Abstract

Deposits with zoning around magmatic intrusions

Mousioni Stela

The aim of this thesis is the study of intrusion-related deposits demonstrating a zoning around magmatic intrusions. The study describes intrusion-related gold deposits in many places globally. Some intrusion-related gold deposits are associated with tungsten-tin and bismuth-tungsten-arsenic provinces. In addition, the characteristics of these deposits, the tectonic environments that are formed, the styles and metal zones are described in details. Also, the role of fluids in the formation of gold and other metals is defined. The zones around the center of the magmatic intrusions are depicted. Finally, reference is made to the way in which such deposits are classified.



1.Πρόλογος – Αντικείμενο Εργασίας

Αντικείμενο της παρούσας πτυχιακής διπλωματικής εργασίας είναι τα κοιτάσματα διείσδυσης με ζωνώδη ανάπτυξη γύρω από μαγματικές διεισδύσεις. Σκοπός της εργασίας είναι η αναφορά σε διάφορα κοιτάσματα παγκοσμίως που σχετίζονται με διείσδυση. Στην μελέτη περιγράφονται αναλυτικά τα χαρακτηριστικά αυτών των κοιτασμάτων.

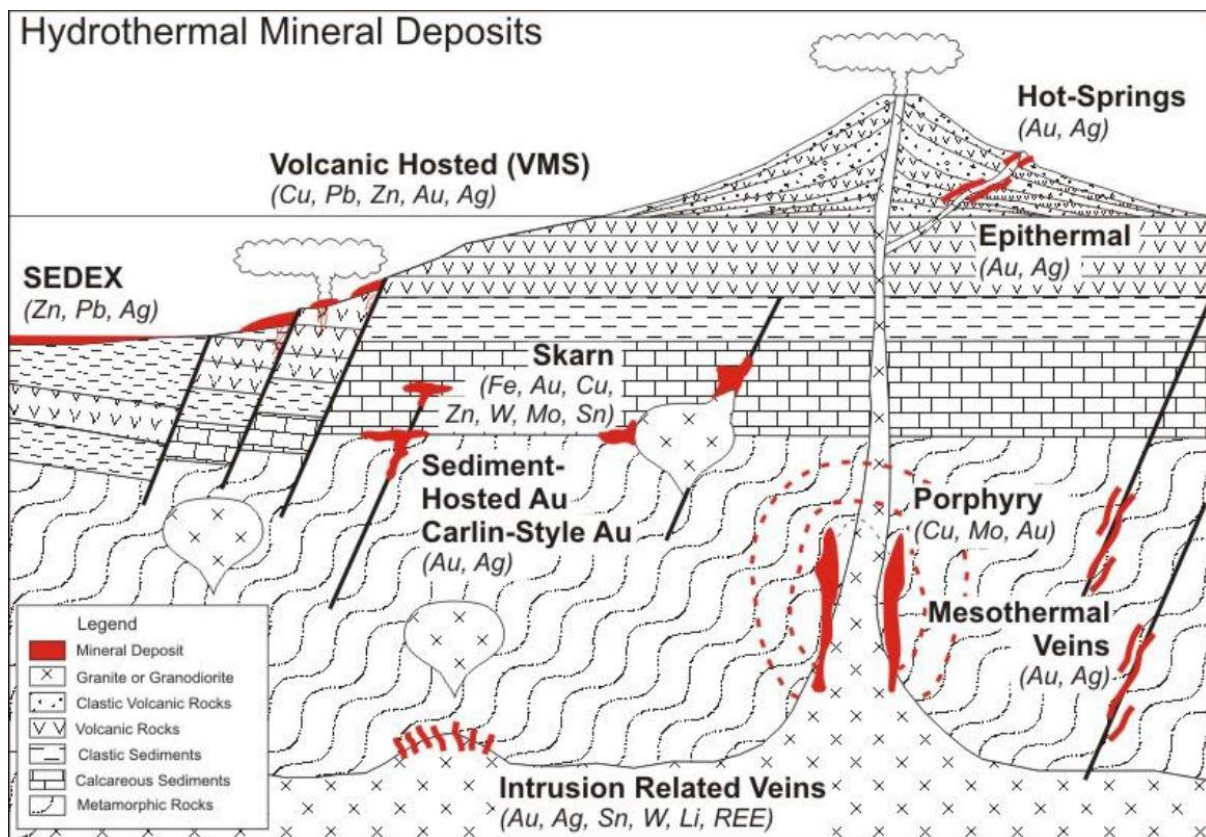
Σε αυτό το σημείο θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή του Τομέα Ορυκτολογίας-Πετρολογίας-Κοιτασματολογίας, κ. Μέλφο Βασίλειο για την ανάθεση του θέματος, το αμείωτο ενδιαφέρον του, τις χρήσιμες συμβουλές του, τις υποδείξεις του και την συνολική υποστήριξη σε όλα τα στάδια της παρούσας εργασίας.

Κλείνοντας, ευχαριστώ την οικογένεια και τους φίλους μου για την εμπύχωση και την στήριξή τους.

1.Εισαγωγή

Τα κοιτάσματα διείσδυσης συνδέονται με μαγματικά και υδροθερμικά κοιτάσματα (Εικόνα 1). Τα μαγματικά κοιτάσματα συσχετίζονται με τα διαφορετικά στάδια της κινητοποιήσεως και κρυσταλλώσεως ενός μάγματος και σχηματίζονται ως απευθείας προϊόντα της μαγματικής διαφοροποίησης. Τα υδροθερμικά κοιτάσματα δημιουργούνται από την υγροποίηση των ατμών και συμπύκνωση σε θερμά διαλύματα μεταλλοφόρα συστατικά. Τα υδροθερμικά διαλύματα απομακρύνονται από το μητρικό τους πέτρωμα και μπορούν να εισχωρήσουν και να αποτεθούν μεταλλικά στοιχεία σε κάθε μορφής κενούς χώρους. Οι σημαντικότεροι χώροι που διευκολύνουν την απόθεση μεταλλοφορίας είναι : οι πόροι του πετρώματος (πορώδες), οι επιφάνειες απόψυξης κατά την στερεοποίηση του πετρώματος (μικροφλεβίδια, πλέγμα φλεβιδίων), οι χώροι από έντονα κατακλαστικά φαινόμενα (λατυποπαγή ή breccia), ρήγματα, άλλες τεκτονικές δομές, όπως πτυχώσεις και στρωματογραφικές δομές: επίπεδα στρωμάτωσης, σχιστότητας κλπ. Συμπερασματικά για την δημιουργία ενός υδροθερμικού κοιτάσματος απαιτούνται οι παρακάτω προϋποθέσεις: ύπαρξη μεταλλοφόρων διαλυμάτων ικανών να διαλύσουν και να μεταφέρουν μεταλλικά στοιχεία και πτητικά συστατικά, παρουσία κενών χώρων για την κίνηση των διαλυμάτων, διαθέσιμος χώρος για την απόθεση της μεταλλοφορίας, δυνατότητα αντίδρασης για απόθεση των μεταλλικών ορυκτών, επαρκής συγκέντρωση χρήσιμων συστατικών ώστε η μεταλλοφορία να είναι εκμεταλλεύσιμη = κοιτάσμα. Τα μάγματα που προσφέρουν μεταλλοφόρα ρευστά προς τα περιβάλλοντα πετρώματα είναι τα ενδιάμεσης-όξινης σύστασης μάγματα που δίνουν πετρώματα όπως χαλαζιακούς μονζονίτες, μονζονίτες, γρανοδιορίτες, χαλαζιακούς διορίτες, γρανίτες. Από την επίδραση ρευστών στα πετρώματα προκαλούνται διάφορες εξαλλοιώσεις (όπως σερικιτική, αργιλική, K-ούχος εξαλλοίωση) μεταβολή της αρχικής ορυκτολογικής και χημικής σύστασης του πετρώματος. Τα υδροθερμικά διαλύματα που έδρασαν κατά το παρελθόν μπορούν να εντοπιστούν και να τα μελετηθούν από τα ρευστά εγκλείσματα (fluid inclusions). Τα ρευστά εγκλείσματα αποτελούν μικρές ποσότητες των ρευστών, τα οποία παγιδεύονται είτε κατά τη διάρκεια της ανάπτυξης των κρυστάλλων των ορυκτών, είτε μετά την κρυστάλλωση. Αποτελούν δηλαδή μοναδικά αντιπροσωπευτικά δείγματα των ρευστών από τα οποία σχηματίζονται τα ορυκτά. Τα μεταλλοφόρα διαλύματα καθώς απομακρύνονται από την μαγματική εστία και αρχίζουν να διεισδύουν, σταδιακά μεταβάλλονται χημικά, είτε με αντιδράσεις μεταξύ τους, είτε με τα γειτονικά πετρώματα. Στη συνέχεια αποβάλλουν θερμοκρασία, εισέρχονται σε περιοχές χαμηλότερης πίεσεως και σταδιακά αποβάλλονται μεταλλικά ορυκτά σε μια χρονολογική και χωροταξική σειρά. Έτσι, δημιουργούνται

ισογενετικές παραγενέσεις όταν τα ορυκτά οφείλουν τον σχηματισμό τους στην ίδια ορυκτογενετική αιτία. Πολλές φορές παρατηρείται οι ισογενετικές παραγενέσεις να τοποθετούνται σε συγκεντρικές ζώνες γύρω από το κέντρο της μητρικής μεταλλογενετικής μαγματικής διείσδυσης. Αυτό είναι γνωστό ως ζωνώδης κατανομή των μεταλλευμάτων ή ζωνώδης ανάπτυξη των κοιτασμάτων. Αυτή η ζώνωση εκδηλώνεται ως μια μεταβολή ορυκτολογική ή μεταβολή στα μεταλλικά κύρια στοιχεία ή ιχνοστοιχεία από τη μια ζώνη στην άλλη.



Εικόνα 1: Υδροθερμικά κοιτάσματα και φλέβες που σχετίζονται με διείσδυση (πηγή: <http://solidusgeo.com/wordpress/home-3/deposits>).

2. Κοιτάσματα χρυσού που συνδέονται με διείσδυση και σχετίζονται με επαρχίες Βολφραμίου-Κασσιτέρου

Ανεπαρκώς αναγνωρισμένα και οικονομικά σημαντικής τάξης κοιτάσματα χρυσού που σχετίζονται με διείσδυση, τα οποία απαντώνται μέσα στις μαγματικές επαρχίες που είναι περισσότερο γνωστά για την μεταλλοφορία του βολφραμίου ή/και του κασσιτέρου, περιγράφονται με αναφορά σε επτά μεγάλα κοιτάσματα (Fort Knox, Mokrsko, Salave, Vasilkovskoe, Timbarra, Kidston and Kori Kollo) (Εικόνα 2). Αυτά τα κοιτάσματα χρυσού περιέχουν μια μεταλλική ακολουθία που περιλαμβάνει κάποιο συνδυασμό βισμούθιου, βολφραμίου, αρσενικού, κασσιτέρου, μολυβδαινίου, τελλουρίου και αντιμονίου και έρχεται σε αντίθεση με εκείνα που βρέθηκαν στα πιο ευρέως αναπτυγμένα προφυρικά κοιτάσματα χαλκού πλούσια σε χρυσό. Τα κοιτάσματα χρυσού που συνδέονται με τις επαρχίες βολφραμίου ή/και κασσιτέρου βρίσκονται σε κρατονικά περιθώρια, σε μια θέση προς την ξηρά ή προς την οπισθοτόξια θέση που σχετίζεται με τόξα ηπειρωτικού περιθωρίου ή εντός του ηπειρωτικού περιβάλλοντος.

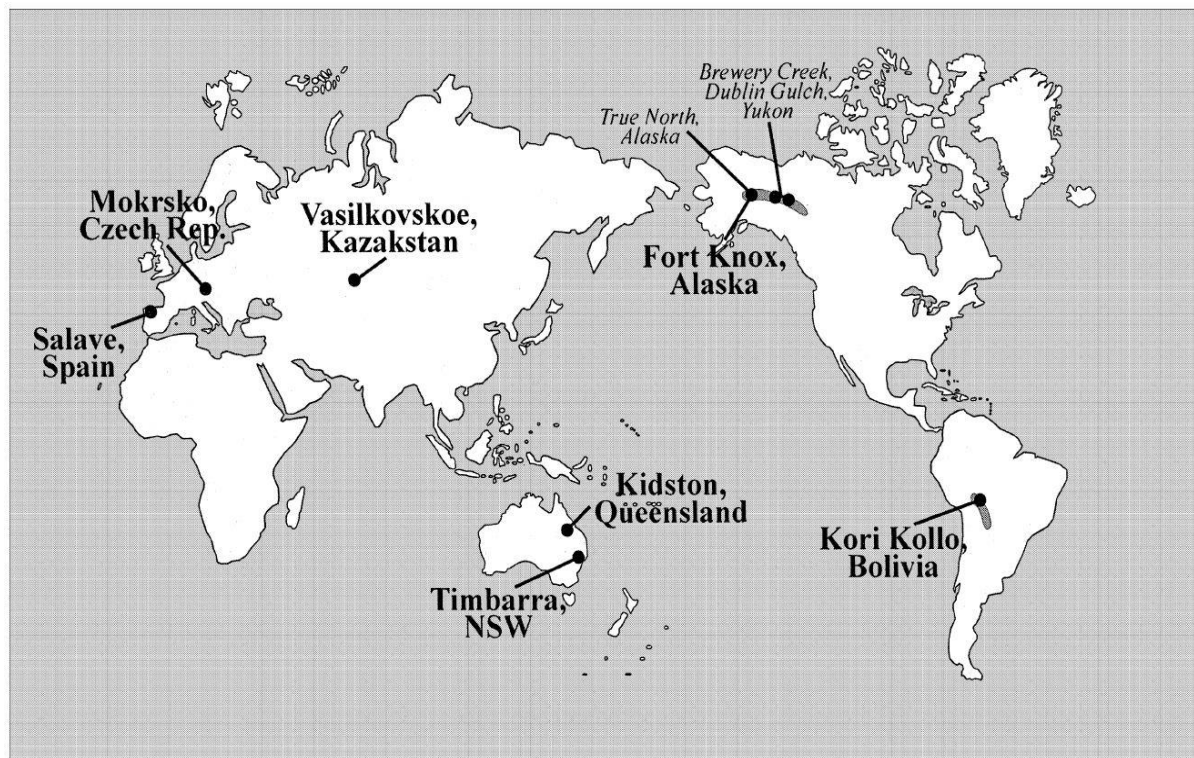
Τα κοιτάσματα συσχετίζονται γενετικά με όξινους πετρώματα ή πλουτωνικά ενδιάμεσης κατάστασης οξείδωσης, εκπροσωπούνται τόσο τα μάγματα της σειράς μαγνητίτη όσο και της σειράς ιλμενίτη. Τα κοιτάσματα χρυσού που φιλοξενούνται σε διείσδυση είναι συχνότερα τύπου παράλληλων φλεβών/μικρών φλεβών, αν και περιγράφονται επίσης ως κοιτάσματα που μοιάζουν με greisen, με διάσπαρτη μεταλλοφορία και breccia (λατυποπαγή). Ο χρυσός μπορεί να συγκεντρωθεί πιο απομακρυσμένα (1 ± 3 km) σε σχέση με τις διεισδύσεις, όπου τα κοιτάσματα μπορεί να είναι τύπου Skarn, διάσπαρτης μεταλλοφορίας ή φλέβες. Καλιούχες, αλβιτικές ή/και σερικιτικές εξαλλοιώσεις που συνήθως περιλαμβάνουν ανθρακικά, συνοδεύουν την μεταλλοφορία του χρυσού. Στις παράλληλες φλέβες, η εξαλλοίωση περιορίζεται κανονικά σε στενά στρώματα γύρω από τις φλέβες, ενώ παρατηρείται μεγαλύτερη διάχυση στα κοιτάσματα που είναι τύπου greisen, διάσπαρτη μεταλλοφορία και αβαθή (<3 km). Η απόθεση του χρυσού είναι συνήθως παρούσα με χαμηλή συνολική περιεκτικότητα σε θειούχα (<3%), κυρίως σιδηροπυρίτη και λιγότερο αρσеноπυρίτη. Σε πολλά κοιτάσματα τα ορυκτά βισμούθιου συνδέονται στενά με το χρυσό, ενώ υπάρχουν συσχετίσεις βισμούθιου-χρυσού και τελλουρίου-χρυσού. Τα περισσότερα κοιτάσματα περιέχουν βολφράμιο, κασσίτερο, μολυβδαίνιο και αντιμόνιο, αν και γενικά αυτά δεν συνδέονται με το χρυσό. Οι συγκεντρώσεις βολφραμίου και μολυβδαινίου μπορεί να αυξάνονται με το βάθος ή μπορεί να εμφανιστούν σε ξεχωριστές ζώνες. Τα βασικά μέταλλα είναι γενικά παρόντα σε μικρές ποσότητες (πχ <100 ppm Cu). Η ξεχωριστή χωρική συσχέτιση με τις όξινες διεισδύσεις, σε

συνδυασμό την μεταλλική υπογραφή, υποδηλώνει μαγματικές υδροθερμική προέλευση. Μια μελέτη ρευστών εγκλεισμάτων δείχνουν την παρουσία ρευστών υψηλής αλατότητας σε ορισμένα κοιτάσματα και χαμηλής αλατότητας και ανθρακικών ρευστών σε περισσότερα κοιτάσματα, παρόμοια με την σύσταση ρευστών σε κοιτάσματα βολφραμίου που σχετίζονται με τις διεισδύσεις. Οι μεταβολές στην μεταλλογένεση αντικατοπτρίζουν σε μεγάλο βαθμό το βάθος του σχηματισμού και της θέσης σε σχέση με το κέντρο διεισδύσεων. Αρκετά κοιτάσματα στην κατηγορία αυτήν περιέχουν >100 τόνους χρυσού (3 million oz), τονίζοντας έτσι το δυναμικό χρυσού των κοιτασμάτων που σχετίζονται με διείσδυση πέρα από τις πιο παραδοσιακά εξερευνημένες επαρχίες χρυσού και χαλκού.

Τα κοιτάσματα χρυσού που σχετίζονται με διείσδυση αποτελούν σημαντικό τύπο μεταλλεύματος, ειδικά σε Φανεροζωικά τόξα (e.g. Sillitoe 1991). Τα περισσότερα από αυτά τα κοιτάσματα είτε πορφυριτικού είτε μη πορφυριτικού τύπου, χαρακτηρίζονται από χαλκόφιλα μέταλλα. Τα μεγάλα κοιτάσματα πορφυριτικού τύπου χαρακτηρίζονται από χαλκό-χρυσό (Graberg, Indonesia) έως μόνο χρυσό (Refugio, Chile) και τυπικά συνδέονται με υψηλά οξειδωμένες, ασβεσταλκαλικές έως αλκαλικές, ενδιάμεσες (διορίτη-μονζονίτη) διεισδύσεις I-τύπου (Sillitoe 1993). Ο οξειδωμένος χαρακτήρας του μαγματικού ρευστού που ευθύνεται για την εισαγωγή χρυσού±χαλκού τονίζεται από μια κοινή αφθονία υδροθερμικού μαγνητίτη σε μετάλλευμα που φέρει Καλιούχο-πυριτική εξαλλοίωση (Sillitoe 1993). Τα κοιτάσματα χρυσού που σχετίζονται με διείσδυση μη πορφυριτικού τύπου σχετίζονται ευρέως με παρόμοιες διεισδύσεις I-τύπου, αλλά μπορεί να παρουσιάζουν συσχετισμούς με ψευδάργυρο, μόλυβδο, άργυρο παρά με χαλκό (e.g. Porgera, Parka New Gyinea, Richardw and Kerrich 1993). Ο εμπλουτισμός με χρυσό σε αυτά τα πορφυριτικά και μη-πορφυριτικά συστήματα έχει αποδοθεί σε διάφορους παράγοντες, συμπεριλαμβανομένης της παρουσίας μιας οξειδωμένης και μετασωματική μανδυακή πηγή (McInnes and Cameron 1994), ο κορεσμός της μαγματικής πηγής με θειικό και όχι με σουλφίδια (Candela 1989) και η μεταφορά χρυσού σε υψηλές θερμοκρασίες ως ένα υδάτινο σύμπλοκο χλωριδίου (e.g. Seward 1991).

Σε αντίθεση με αυτά τα πλούσια σε χρυσό πορφυριτικά και συναφή συστήματα, τα κοιτάσματα που σχετίζονται με την συμμετοχή σε μολυβδαίνιο, βολφράμιο και κασσίτερο συσχετίζονται τυπικά με περισσότερο όξινες (γρανοδιορίτης-γρανίτης) διεισδύσεις, οι οποίες στην περίπτωση του βολφραμίου και του κασσιτέρου τείνουν να είναι πιο μειωμένες και εν μέρη S-τύπου. Ο αριθμός των κοιτασμάτων χρυσού που σχετίζονται με διείσδυση σε παγκόσμιο επίπεδο (Πίνακα 1), συμπεριλαμβανομένων των Fort Knox στην Αλάσκα, Mokrsko στην Τσεχική Δημοκρατία, Salave στην Ισπανία, Vasilkovskoe στο Καζακστάν, Timbarra και Kidston στην Αυστραλία και Kori Kollo στην Βολιβία εμφανίζονται σε περιοχές που είναι

γνωστές για την παρουσία βολφραμίου-κασσίτερου που σχετίζεται με διείσδυση και διαθέτουν μεταλλική σύνδεση, παρόμοια με τα κοιτάσματα βολφραμίου-κασσίτερου (πχ βισμούθιο, βολφράμιο, αρσενικό, κασσίτερο, μολυβδαίνιο, τελλούριο και αντιμόνιο).



Εικόνα 2: Τοποθεσίες κύριων κοιτασμάτων χρυσού (Fort Knox, Mokrsko, Salave, Vasilkovskoe, Timbarra, Kidston and Kori Kollo). Σημειώνεται η παγκόσμια διανομή τους στον χάρτη (Thompson et al. 1999).

2.1 Κοιτάσματα χρυσού που σχετίζονται με τη διείσδυση με βισμούθιο, βολφράμιο και αρσενικό

Η μεταλλοφορία που σχετίζεται με την εισχώρηση χαρακτηρίζεται από μια μεταλλική συνάθροιση χρυσού, βισμούθιου, βολφραμίου και αρσενικού είναι αναγνωρισμένη σε πολλές περιοχές του κόσμου (Εικόνα 2). Η μεταλλοφορία φιλοξενείται ή σχετίζεται χωρικά με διεισδύσεις γρανοδιορίτη σε γρανιτική σύσταση που κυμαίνεται σχετικά από μεγάλους πλουτωνίτες σε μικρά πορφυριτικά κοιτάσματα. Η συσχέτιση μεταλλοφορίας σε αυτές τις διεισδύσεις με παρόμοια γεωχημική υπογραφή ανεξάρτητα από τον τύπο πετρώδη τοιχώματα και μεταλλευτικής ζώνης σε μερικά κοιτάσματα, υποδηλώνει μια γενετική, πέρα της χωρικής, σχέσης με τις μαγματικές διεργασίες. Άλλα μέταλλα που απαντώνται στα κοιτάσματα, περιλαμβάνουν κασσίτερο, μολυβδαίνιο, αντιμόνιο, άργυρο, ψευδάργυρο και μόλυβδο. Ο

βαθμός εμπλουτισμού σε διαφορετικά μέσα και γύρω από τις εισχωρήσεις μπορεί να αντανάκλα τη χημεία της μάζας, την εγγύτητα περιφερειακών μεταλλικών ζωνών με τις διεισδύσεις και τις τοπικές συνθήκες σχηματισμού μεταλλεύματος. Αν και πολλά από αυτά τα στοιχεία συνδέονται με τυπικά πορφυριτικά κοιτάσματα χαλκού-χρυσού, η θέση των κοιτασμάτων χρυσού που περιγράφονται εδώ μέσα σε επαρχίες λιθόφιλων στοιχείων και η κοινή συσχέτιση χρυσού με βισμούθιο και βολφράμιο αντιπαραβάλλεται με τυπικά πορφυριτικά κοιτάσματα χρυσού-χαλκού. Τα κρίσιμα χαρακτηριστικά των επτά αντιπροσωπευτικών κοιτασμάτων παρατίθενται στον πίνακα 1 (Πίνακα 1). Τα πρώτα πέντε κοιτάσματα φιλοξενούνται από διεισδύσεις και φαίνονται ότι έχουν σχηματιστεί από παρόμοια ρευστά σε παρόμοια παλαιά βάθη. Τα δύο τελευταία κοιτάσματα περιλαμβάνουν διαφορετικά στρώματα μεταλλοφορίας, τα οποία πιθανώς σχηματίστηκαν σε πιο ρηχά παλαιοβάθη. Εάν, όπως υποστηρίζεται, τα δύο τελευταία κοιτάσματα γίνονται αποδεκτά ως μέρος της τάξης αυτής, τότε ρηχά βάθη του σχηματισμού και οι σχετικές μορφές μεταλλοφορίας υποδεικνύουν μια σειρά χαρακτηριστικών παρόμοιων με εκείνα που απαντώνται στα συστήματα πορφυριτικού χαλκού-χρυσού διαφόρων παλαιοβάθων.

Πίνακας 1: Περιγραφή επιλεγμένων χαρακτηριστικών των κοιτασμάτων

Κοιτάσματα	Τόνοι (εκατομμύρια)	Βαθμός (g/t Au)	Πετρώματα περιοχής	Τύπος διείσδυσης	Τύπος κοιτάσματος	Ηλικία κοιτάσματος (Ma)	Μέταλλα	Αναφορά
<i>Fort Knox, Alaska, USA</i>	158	0,83	Μαρμαρυγιακός- χαλαζιακός σχιστόλιθος	Πορφυριτικός γρανίτης	Παράλληλες φλέβες	92	Bi, Te Mo, As, Sb, W	Bakke (1995)
<i>Mokrsko, Czech Republic</i>	66	1,5	Μαφικά και όξινα ρευστά και τόφοι	Γρανодиρίτης	Παράλληλες φλέβες	349±12	As, Bi, Te, Mo, W, Sb, Cu	Morávek (1995)
<i>Salave, Spain</i>	15	2	Χαλαζίτης, σχιστόλιθος, Γάββρος	Γρανодиρίτης	Διάσπαρτη μεταλλοφορία (greisen)	285	As, Sb, Mo, W, Zn, Cu	Harris (1980)
<i>Vasilkovskoe, Kazakstan</i>	80	3,7	Μεταϊζηματιγενή πετρώματα	Γρανодиρίτης	Παράλληλες φλέβες	443	As, Sb, W, Pb, Cu, Bi, Te	Burshtein (1996)
<i>Timbarra, NSW, Australia</i>	17	0,73	Πυριτικοκλαστικά μεταϊζηματογενή πετρώματα	Γρανίτης	Διάσπαρτη μεταλλοφορία	245-238	Bi, Mo, Sb, As Ag	Simmons et al. (1996)
<i>Kidston, Queensland, Australia</i>	94	1,48	Μεταμορφωμένα πετρώματα, γρανодиρίτης	Πορφυριτικός ρυόλιθος	Breccia	332	Zn, Cu, Mo, W, Pb, As, Bi, Te, Sn	Baker and Tullemans (1990)
<i>Kori Kollo, Bolivia</i>	64	2,26	Χαλαζίτης, Ιλυόλιθος, σχιστόλιθος	Πορφυριτικός δακίτης	Παράλληλες φλέβες και φλεβίδια	15,7	Ag, As, Sb, Sn, Bi, Cu, Zn, Pb, W	Long et al. (1992)

2.1.1 Fort Knox, Αλάσκα

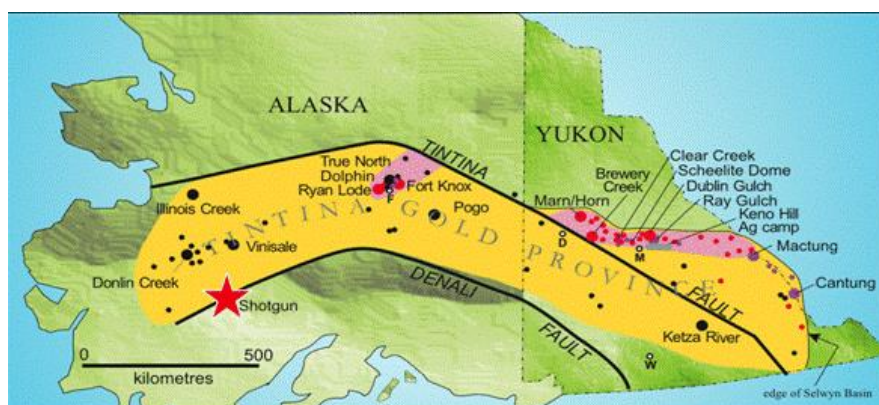
Το κοίτασμα χρυσού Fort Knox (>7 million oz) στην περιοχή Fairbanks της Αλάσκας, αποτελεί το πρώτο παράδειγμα αυτής της κατηγορίας κοιτασμάτων. Το κοίτασμα είναι ένας σημαντικός παραγωγός, έχει καλά καθιερωμένα χαρακτηριστικά (Bakke 1995) και εμφανίζεται σε μια εκτεταμένη ζώνη από Άνω Κρητιδικά κοιτάσματα και πλουτωνίτες, πολλά από τα οποία φιλοξενούν παρόμοια μεταλλοφορία (Newberry et al. 1995, Thompson et al. 1995, Mortensen et al. 1996, McCoy et al. 1997). Η διεισδυτική ζώνη διαιρείται στην πλουτωνική Tombstone suite του κεντρικού Yukon και στις διεισδύσεις του Fairbanks στην κεντρική Αλάσκα, που χωρίζονται από το ρήγμα Tintina (Εικόνα 3) (Mortensen et al. 1995, Newberry et al. 1995). Σε αυτήν τη μελέτη οι διεισδύσεις σε όλη τη ζώνη αναφέρονται συλλογικά ως Tombstone suite.

Οι διεισδύσεις Tombstone suite είναι υποαλκαλικές, μεταλλικές και κυμαίνονται από γρανοδιορίτη έως γρανίτη. Ο μαγνητίτης απουσιάζει από τις διεισδύσεις στην περιοχή Fairbanks και σπάνια σε εκείνες του Yukon, ενώ οι μικρές ποσότητες του ιλμενίτη είναι κοινές καθ' όλη τη διάρκεια του χρόνου, υποδηλώνοντας ότι οι εισχωρήσεις μειώνονται μετρίως και αποδίδονται στη σειρά ιλμενίτη (McCoy et al. 1997). Οι διεισδύσεις σε ολόκληρη την ζώνη τοποθετούνται σε ένα μικρό χρονικό διάστημα (95 ± 89 Ma με βάση ηλικίες ζirkονίου U-Pb, Mortensen et al. 1995, 93 ± 86 Ma με βάση τις ηλικίες ^{40}Ar - ^{39}Ar , McCoy et al. 1997) σε βασικές ιζηματογενείς αλληλουχίες Πρωτοζωικής και Παλαιοζωικής εποχής. Η διεισδυτική ζώνη εμφανίζεται στο κρατονικό περιθώριο του Κρητιδικού ορογενούς. Ο McCoy (1997) πρότεινε ότι ο μαγματισμός σχετίζεται με υποδιαιρέσεις, υποδηλώνοντας μια θέση οπισθοτόξιας λεκάνης, αλλά οι θέσεις της ζώνης υποβύθισης και του σχετικού ηφαιστειακού τόξου είναι αβέβαιες.

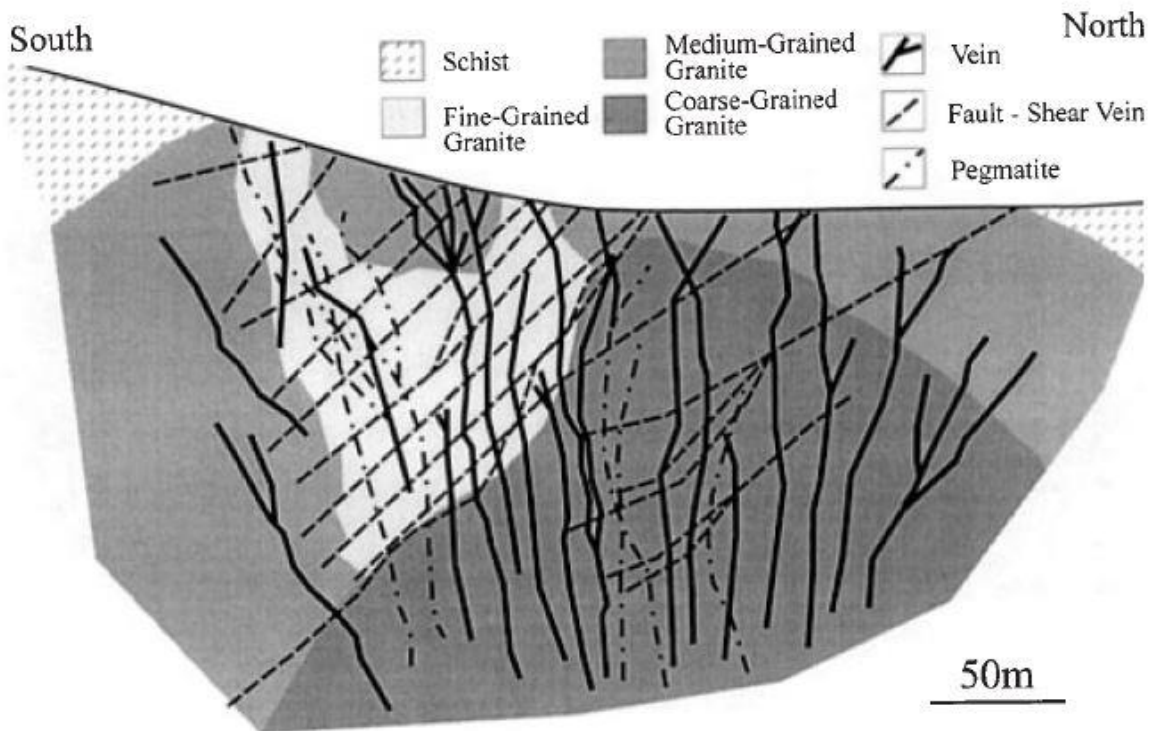
Η απόθεση του χρυσού στο Fort Knox συμβαίνει στις πρώιμες φλέβες πηγματίτη, στις παράλληλες φλέβες χαλαζία, στις φλέβες K-αστρίων και στις αργές χαλαζιακές φλέβες που κόβουν μία μικρή διείσδυση αποτελούμενη από 3 φάσεις πορφυριτικού γρανίτη συν απλιτικές/πηγματιτικές φλέβες. Οι κυρίαρχες παράλληλες φλέβες (Εικόνα 4) από χαλαζία έχουν πάχος 2 ± 5 cm, τυπικά 10 ± 50 cm και αντανakλούν στη δομή όλης της περιοχής (Bakke, 1995). Οι φλέβες έχουν χαμηλή συνολική περιεκτικότητα σε θειούχα (<0,5 vol %), κυρίως σιδηροπυρίτη, μαρκασίτη, μαγνητοπυρίτη, αρσеноπυρίτη, βισμούθινίτη, μολυβδαινίτη και εξαλλοιώσεις που κυριαρχούν είναι από K-άστιο, αλβίτη ή μοσχοβίτη. Οι φλέβες χαλαζία περιέχουν σημαντικό βισμούθιο (έως 2000 ppm), βολφράμιο (έως 600 ppm) και τελλούριο

(έως 20 ppm) (McCoy et al. 1997). Ο χρυσός συσχετίζεται καλά με βισμούθιο και τελλούριο, αλλά όχι με βολφράμιο, μολυβδαίνιο, αρσενικό ή αντιμόνιο (Bakke 1995, McCoy et al. 1997). Μελέτες αναγνωρισμένων ρευστών εγκλεισμάτων από τον McCoy (1997) έδειξαν ότι οι φλέβες πηγματίτη και χαλαζία στο Fort Knox περιέχουν ρευστό πλούσιο σε διοξείδιο του άνθρακα (CO₂) χαμηλής αλατότητας (2±8 wt.% NaCl equivalent), παγιδευμένο σε 1,25±1,5kbars και σε 270±330°C. Μερικά από τα άλλα στην Tombstone suite περιέχουν ρευστά εγκλείσματα υψηλής αλατότητας (30±40 wt.% NaCl equiv (20±50 wt.% NaCl equivalent, McCoy et al. 1997, Baker et al. 1998), αλλά παρόμοια εγκλείσματα δεν έχουν αναγνωριστεί κατά τη διάρκεια των μελετών αναγνώρισης ρευστών εγκλεισμάτων στο Fort Knox. Το βάθος σχηματισμού ποικίλει μεταξύ μεταλλικών διεισδύσεων στην Tombstone suite (0,5±3kbars McCoy et al. 1997, Baker et al. 1997).

Ξεχωριστές ζώνες μεταλλοφορίας βολφραμίου±χρυσού εμφανίζονται, συνήθως ως Skarn, δίπλα σε πολλές από τις διεισδύσεις που φέρουν χρυσό στη Tombstone suite (e.g. Dublin Gulch, Lennan 1986). Η μεταλλοφορία που είναι πιο απομακρυσμένη από τις εισχωρήσεις (1-3 km) και σχηματίζεται πέρα από την επαφή aureoles, όπως στο Brewery Creek στο Yukon και στο True North στην περιοχή Fairbanks, είναι πιο έντονα εμπλουτισμένη με αρσενικό και αντιμόνιο και στερείται της ένωσης βολφραμίου-βισμούθιου. Ο τύπος διάσπαρτης μεταλλοφορίας σε τμήματα αυτών των αποθέσεων είναι παρόμοιο με το χρυσό που φιλοξενείται σε ιζήματα τύπου (Poulsen 1996, Harris and Gorton 1998). Σε συστήματα με ζώνες (e.g. Dublin Gulch, Hitchens and Orssich 1995), οι εξωτερικές ζώνες μεταλλοφορίας (2±5 km από τη διείσδυση) κυριαρχούνται από ανθρακικές φλέβες χαλαζία εμπλουτισμένες σε μόλυβδο-ψευδάργυρο-άργυρο, παρόμοιες με τις εξωτερικές ζώνες γύρω από τα πιο τυπικά πορφυριτικά συστήματα κοιτασμάτων χαλκού και μολυβδαίνιου.



Εικόνα 3: Ρηξιγενής Ζώνη Tintina

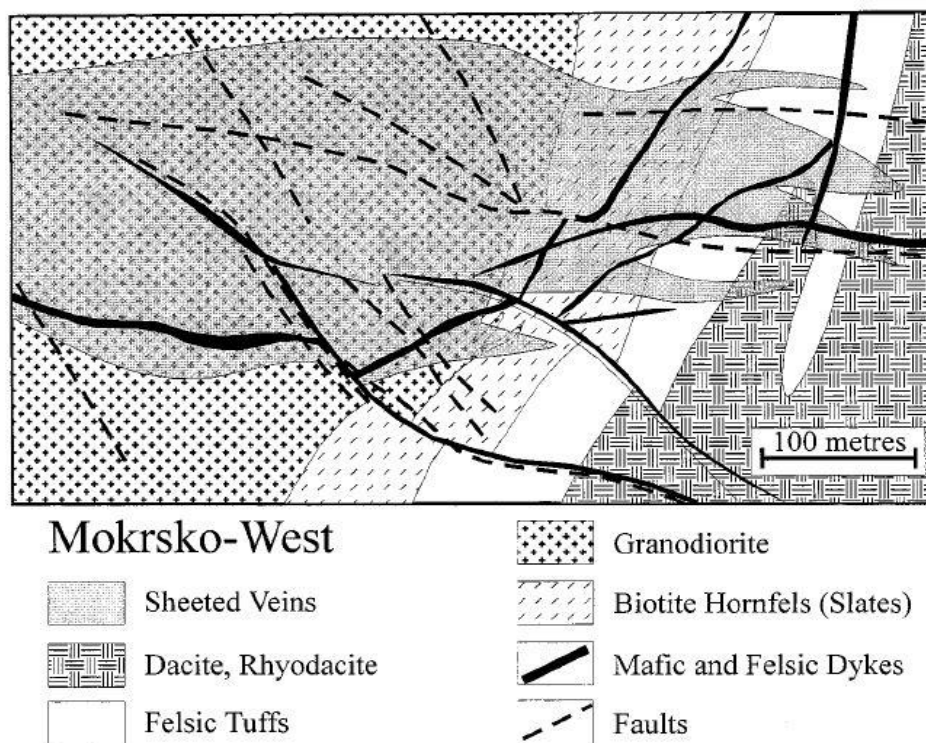


Εικόνα 4: Αντιπροσωπευτικό γεωλογικό τμήμα από το κοίτασμα Fort Knox, στην Αλάσκα που δείχνει παράλληλες φλέβες χαλαζία που φιλοξενούνται από τρεις κύριες φάσεις γρανίτη (modified from Bakke 1995).

2.1.2 Mokrsko, Τσεχική Δημοκρατία

Το κοίτασμα χρυσού Mokrsko είναι μέρος της μεταλλογενετικής ζώνης Central Bohemian, στην οποία η εξόρυξη χρυσού και βολφραμίου εκτείνεται στην επαφή μεταξύ υψηλού και χαμηλού βαθμού μεταμορφωμένων εδαφών. Τα κοιτάσματα κασσιτέρου-βολφραμίου παρόμοιας ηλικίας συγκεντρώνονται πιο βόρεια στον ορεινό όγκο Bohemian. Κατά τη διάρκεια των πρώιμων μετασυγκρουσιακών σταδίων της Hercynian ορογένειας, στα 350 ± 12 Ma (Holub 1997), τοποθετήθηκε ο πλουτωνίτης Central Bohemian. Ο πλουτωνίτης είναι ένα σύμπλεγμα Ι-τύπου ασβεσταλκαλικού γάββρου-διορίτη-τοναλίτη-γρανοδιορίτη-γρανίτη, με μια σύσταση που αντικατοπτρίζει την αλληλεπίδραση μανδύα-φλοιού κατά την επέκταση (Holub, 1995, 1997). Το κοίτασμα φιλοξενείται από μια πρώιμη απόφυση κερυστιλβικού-βιοτιτικού γρανοδιορίτη στον πλουτωνίτη, κατά την επαφή με ηφαιστειοϊζηματογενή πετρώματα πρασινοσχιστολιθικής φάσης στο Άνω Προτεροζωικό (Morâvek et al. 1989).

Ο γρανοδιωρίτης και τα άμεσα πετρώδη τοιχώματα στο Mokrsko έχουν κοπεί από μια απότομη ζώνη υποβύθισης 2 km από πορφυριτικό γρανίτη, απλίτη, φλέβες πηγματίτη, παράλληλες φλέβες χαλαζία και φλεβίδια, με την οποία συνδέεται η μεταλλοφορία του χρυσού (Εικόνα 5) (Morâvek et al. 1989, Morâvek 1995). Τα φλεβίδια, πάχους <1 cm, χαρακτηρίζουν τον γρανοδιωρίτη στην προεξέχουσα ζώνη Mokrsko-West, ενώ οι φλέβες πάχους 5±100 cm, υπάρχουν στα πετρώδη πετρώματα του Mokrsko-East. Η περιεκτικότητα σε θειούχα, κυρίως αρσеноπυρίτη, είναι γενικά <1 vol%. Σιδηροπυρίτης, μαγνητοπυρίτης, μολυβδαινίτης, σεελίτης και χαλκοπυρίτης είναι λιγότερο συνηθισμένα και ο χρυσός με υψηλή ποιότητα συνοδεύεται από μια σειρά ορυκτών βισμούθιου-τελλουρίου. Ο χρυσός παρουσιάζεται με αρσενικό, βισμούθιο, μολυβδαίνιο, βολφράμιο και άργυρο. Οι συγκεντρώσεις αρσενικού μειώνονται από <1000 ppm και οι συγκεντρώσεις βολφραμίου αυξάνονται >200 ppm προς τα κάτω σε τουλάχιστον 600m, καθώς οι σχηματισμοί χαλαζιακών φλεβών και η μεταλλοφορία χρυσού μειώνονται (Morâvek 1995). Οι φλέβες χαλαζία περιέχουν μικρές ποσότητες υδροθερμικών ορυκτών, μικροκλινή, αμφίβολο, βιοτίτη, που παρουσιάζονται σε περιορισμένες εξαλλοιώσεις γύρω από φλέβες και φλεβίδια (Morâvek 1995). Το κοίτασμα χρυσού δημιουργήθηκε από αραιό, πλούσιο σε CO₂ ρευστό, με κατώτερες θερμοκρασίες 330±20°C και πιέσεις 1±15kbars (Boiron et al. 1995).



Εικόνα 5: Γεωλογικός χάρτης της ζώνης Mokrsko-West, η κύρια ζώνη χρυσού στο κοίτασμα Mokrsko, στην Τσεχική Δημοκρατία (Thompson et al. 1999).

2.1.3 Salave, Ισπανία

Το κοίτασμα χρυσού Salave επικεντρώνεται σε ένα μικρό πλουτωνίτη βιοτιτικού γρανοδιορίτη από την άνω Hercynian, που τοποθετήθηκε σε πυριτικοκλαστικά μετα-ιζηματογενή πετρώματα Καμβρίου-Ορδοβισίου και σε ένα παλαιότερο σώμα γάββρου. Ο γρανοδιορίτης της σειράς-μαγνητίτη είναι μέρος της νεότερης ασβεσταλκαλικής πλουτωνικής Hercynian suite, η οποία τοποθετήθηκε στη βορειοδυτική Ισπανία μετά το κύριο γεγονός της Hercynian σύγκρουσης (Corretge et al. 1990).

Η μεταλλοφορία του χρυσού συμβαίνει την κορυφή του πλουτωνικού γρανοδιορίτη και στα άμεσα πετρώδη τοιχώματα τα οποία εξαλλοιώθηκαν σε καταστρεπτική υφή μοσχοβίτη-ανθρακικού (ασβεστίτη-δολομίτη)-αλβίτη-σουλφιδίων (Harris 1980). Η τραχεία σε μοσχοβίτη εξαλλοίωση θυμίζει greisen σε κοιτάσματα λιθόφιλων μετάλλων. Η εξαλλοίωση είχε ως αποτέλεσμα μια σημαντική μείωση της περιεκτικότητας σε χαλαζία στο γρανοδιορίτη (Harris 1980). Επίσης, υπάρχουν φλέβες που περιέχουν την ίδια σύσταση με την εξαλλοίωση. Τα σουλφίδια περιλαμβάνουν σιδηροπυρίτη, αρσενοπυρίτη, αντιμονίτη, μολυβδαινίτη, σφαλερίτη και χαλκοπυρίτη, τα οποία συνοδεύονται από χρυσό υψηλής ποιότητας. Το βολφράμιο είναι εμπλουτισμένο στη ζώνη μεταλλοφορίας. Τα εγκλείσματα χαλαζία που σχετίζονται με την εξόρυξη χρυσού περιέχουν ένα αραιό πλούσιο σε διοξείδιο του άνθρακα ρευστό (Harris 1980).

2.1.4 Vasilkovskoe, Καζακστάν

Το κοίτασμα χρυσού Vasilkovskoe, στο Βόρειο Καζακστάν, είναι μέρος του ορογενούς Altaid, που δημιουργήθηκε από Παλαιοζωικές διαδικασίες καταβύθισης και επαύξησης κατά μήκος του νότιου περιθωρίου του Σιβηρικού κρατώνα (Sengor et al. 1993). Το κοίτασμα φιλοξενείται από μια γρανοδιοριτική διείσδυση, η οποία ανήκει σε μια σειρά από ασβεσταλκαλικά, I-τύπου, μαγματικής σειράς πλουτωνιτών τοναλίτη-γρανοδιορίτη του Άνω Ορδοβισίου. Τα μάγματα τοποθετήθηκαν το Προκάμβριο μέσα στον ορεινό όγκο Kokshetau κατά τα τελευταία στάδια σύγκρουσης και επέκτασης (Burshtein 1996, Spiridinov 1996).

Το Vasilkovskoe αποτελείται από παράλληλες χαλαζιακές φλέβες και φλεβίδια με σερικιτική εξαλλοίωση. Η περιεκτικότητα σουλφιδίων στις φλέβες που φέρουν χρυσό είναι χαμηλή ($3\pm 5\%$) και περιλαμβάνουν αρσενοπυρίτη, σιδηροπυρίτη, μαγνητοπυρίτη, βισμούθινίτη, χαλκοπυρίτη, σφαλερίτη, γαληνίτη, μολυβδαινίτη, αντιμονίτη και τεναντίτη. Ορυκτά όπως σεελίτης και βισμούθιο-τελλούριο είναι επίσης παρόντα με το χρυσό (Bespaer 1996). Ο Spiridinov (1996) σημείωσε ότι η περιεκτικότητα αντιμονίου μειώνεται, ενώ η

περιεκτικότητα βισμούθιου, βολφραμίου, τελλουρίου και οι αναλογίες Au/Ag και As/Sb αυξάνονται όταν περνούν από ρηχά (<3 km) σε βαθύτερα τμήματα (>3 km) των συστημάτων χρυσού του Βόρειου Καζακστάν. Το ρευστό μετάλλευμα σε αυτά τα κοιτάσματα ήταν ψυχρό ($280\pm 370^{\circ}\text{C}$), αραιό (<11wt% NaCl) και σε πρώιμα παραγενετικά στάδια, ήταν πλούσιο σε διοξείδιο του άνθρακα (Spiridinov 1996).

2.1.5 Timbarra, Νέα Νότια Ουαλία, Αυστραλία

Το κοιτάσμα χρυσού Timbarra, που βρίσκεται στο νότιο τμήμα της ζώνης αναδίπλωσης της Νέας Αγγλίας, στη Νέα Νότια Ουαλία, φιλοξενείται από μια φάση Stanthorpe Adamellite, μέρος μιας σειράς μετα-ορογενέσεων, I-τύπου, υψηλού-K γρανίτες, ηλικίας Πέρμιο-Τριαδικής (Blevin and Chappell 1996). Οι διεισδύσεις γρανιτοειδών έκοψαν μια παραμορφωμένη πυριτοκλαστική ιζηματογενή σειρά που συσσωρεύτηκε ως πρίσμα κατά τη διάρκεια υποβύθισης. Η γρανιτική σειρά φιλοξενεί ορυκτές ζώνες που περιέχουν μολυβδαίνιο, κασσίτερο, βολφράμιο και βισμούθιο (Gilligan and Barnes 1990).

Το κοιτάσμα Timbarra φιλοξενείται από μια σειρά μαγνητίτη από metaluminous έως peraluminous γρανιτικό σώμα, το οποίο περιλαμβάνει δύο πορφυριτικές έως ισογραμμικές φάσεις που κόβονται από πηγματίτη, λεπτόκοκκο γρανίτη και υψηλές κλασματοποιημένες μικρογρανιτικές φλέβες (Simmons 1996). Η μεταλλοφορία του χρυσού συμβαίνει στη γρανοφυρική φάση του πιο κλασματοποιημένου γρανίτη, όπου υπάρχει σε πρωτογενείς μυαρολιτικές κοιλότητες, διαδίδονται μεταξύ ορυκτών του γρανίτη σε κοιλότητες διάλυσης του K-άστριου και σε μικρές παράλληλες φλέβες. Ο χρυσός εξορύχθηκε από πηγματιτικά φύλλα, όπου εμφανίζεται σε μικροθραύσματα χαλαζία (Simmons 1996). Η εξαλλοίωση αναπτύσσεται μόνο ασθενώς και χαρακτηρίζεται από αλβίτη, σερικήτη, χλωρίτη και ανθρακικά άλατα. Η διάδοση της μεταλλοφορίας χρυσού συνδέεται, αν και λιγότερο στενά με τον διαδεδομένο αρσеноπυρίτη και σιδηροπυρίτη. Τα ρευστά εγκλείσματα σε χαλαζία που έχουν κατατεθεί με χρυσό αποτελούνται από ρευστά, πλούσια σε διοξείδιο του άνθρακα και χαμηλής αλατότητας ($5\pm 7\text{wt\% NaCl}$) (Simmons 1996).

2.1.6 Kidston, Queensland, Αυστραλία

Το κοιτάσμα Kidston βρίσκεται στο Προτεροζωικό Georgetown Inlier, του βορειοανατολικού Queensland, και σχετίζεται με πυριγενή πετρώματα που ανήκουν σε μια μαγματική επαρχία Μέσου Λιθανθρακοφόρου-Πέρμιου που χαρακτηρίζεται από διείσδυση

γρανιτικών πλουτωνίων και μια έκρηξη συν-μαγματικών ηπειρωτικών πετρωμάτων. Τα διεισδυτικά πετρώματα κυμαίνονται από μικρές αποθέσεις, σύμπλεγμα δακτυλίων έως εκτεταμένους βαθύλιθους, είναι κυρίως πυριτικά I-τύπου (Richards 1980) και ερμηνεύεται ότι πηγή είναι ο φλοιός (Champion and Chappell 1992). Μια ποικιλία μεταλλοφορίας κασσιτέρου (Herberton-Irvinebank-Mount Garnet), βολφραμίου (Wolfram Camp), μολυβδαινίου, βισμούθινίου, χρυσού και βασικών μεταλλικών στοιχείων υπάρχει στην πυριγενή επαρχία, με τα κοιτάσματα χρυσού να συγκεντρώνονται στο Georgetown Inlier (Murray 1986). Η σχέση των διαδεδομένων κατά κύριο λόγο όξινων πυριγενών πετρωμάτων με τις διαδικασίες υποβύθισης είναι αβέβαιη.

Η μεταλλοφορία χρυσού Kidston εξορύσσεται από ένα ορθομαγματικό λατυποπαγή σωλήνα που σχετίζεται γενετικά με ένα μικρό πολυφασικό πορφυριτικό ρυόλιθο και ένα σύμπλεγμα διερριξηγενών φλεβών (Baker and Tullemans 1990). Ο σωλήνας περιέχει πετρώδη τοιχώματα μεταμορφικά και γρανοδιοριτικά, καθώς και ρυόλιθο και εκτείνεται σε βάθος τουλάχιστον 1300m. Η μεταλλοφορία χρυσού αναπτύσσεται καλύτερα σε άνω από 250m του σωλήνα, όπου υπάρχει με χαλαζία σε ομόκεντρα εσωτερικά βυθίσματα, θραύσματα με φύλλα και γεμίζει η κοιλότητα από κοντινό breccia (Baker and Tullemans 1990). Ο χρυσός εμφανίζεται με σιδηροπυρίτη, μαγνητοπυρίτη και μικρότερες ποσότητες σφαλερίτη, χαλκοπυρίτη, μολυβδαινίτη, γαληνίτη, αρσеноπυρίτη και βισμούθινίτη και συνδέεται με εξαλλοιώσεις χαλαζία-σερικήτη-ανθρακικών (Baker and Tullemans 1990). Αυτήν η μεταλλοφορία πλούσια σε χρυσό και βασικά μέταλλα καταλαμβάνει την κορυφή μιας ζώνης πάνω από μια βαθιά ζώνη μεταλλοφορίας μολυβδαινίου-βολφραμίου που αναπτύχθηκε εντός του σύνθετου πορφυριτικού κοιτάσματος (Morrison 1996).

Ένα ιστορικό σύνθετο ρευστό έχει τεκμηριωθεί στο Kidston (Baker and Andrew 1991). Οι πρώτες πρώιμες άλμες υψηλής θερμοκρασίας συνδέονται με μεταλλοφορία βολφραμίου-μολυβδαινίου σε πορφυριτικό ρυόλιθο, όπως υποδεικνύεται από ρευστά εγκλεισμάτων υψηλής αλατότητας (20 ± 50 wt.% NaCl equivalent) και υψηλής θερμοκρασίας ομογενοποίησης ($340 \pm 600^\circ\text{C}$). Ένα ρευστό χαμηλής αλατότητας που περιέχει διοξείδιο του άνθρακα σχετίζεται με φλέβες χαλαζία που σχηματίστηκαν πριν από το κύριο στάδιο εισαγωγής χρυσού. Το κύριο στάδιο χρυσού σχετίζεται με υδατικό ρευστό χαμηλής αλατότητας (2 ± 10 wt.% NaCl equivalent), χαμηλής θερμοκρασίας ($170 \pm 350^\circ\text{C}$) και ερμηνεύεται ότι έχει σχηματιστεί 3,5 km κάτω από την παλαιοεπιφάνεια από συμπίκνωση ατμών που παράγονται κατά την διάρκεια του διαχωρισμού φάσεων από μαγματική άλμη υψηλής θερμοκρασίας (Baker and Andrew 1991). Αν και η μορφή της μεταλλοφορίας στο Kidston διαφέρει από τα παραδείγματα της

μεταλλοφορίας χρυσού που φιλοξενείται με διείσδυση που περιεγράφηκε παραπάνω περιλαμβάνεται σε αυτήν την κατηγορία λόγω της θέσης του σε μια περιοχή γνωστή για τις αποθέσεις κασσιτέρου-βολφραμίου, την παρουσία βολφραμίου και μολυβδαινίου στο σύστημα Kidston, παρόμοιων συστάσεων ρευστών και της σύστασης χρυσού με ορυκτά βισμούθιου. Ο McCoy (1997) επισήμανε συγκεκριμένες ομοιότητες μεταξύ κοιτασμάτων Kidston και της μεταλλοφορίας χρυσού που σχετίζεται με διείσδυση στην περιοχή Fairbanks της Αλάσκας. Το Kidston διαφέρει από τα άλλα κοιτάσματα που περιγράφονται στην υψηλότερη περιεκτικότητά του σε βασικά μέταλλα μέσα σε χρυσοφόρες παράλληλες φλέβες.

2.2.7 Kori Kollo, Βολιβία

Το κοίτασμα χρυσού Kori Kollo, στην περιοχή La Joya της νοτιοδυτικής Βολιβίας, βρίσκεται σε μια ζώνη από πολυμεταλλικά φλεβικά κοιτάσματα Μειοκαίνου, τα περισσότερα από τα οποία κυριαρχούνται από κασσίτερο και άργυρο αλλά δεν έχουν χρυσό (e.g. Potosí, Turneure 1960). Τα κοιτάσματα συγκεντρώνονται σε δακτιλικές έως ρυολιθικές πορφυριτικές διεισδύσεις και ρηξιγενείς φλέβες, τα οποία είναι υψηλού-K ασβεσταλκαλικά έως ασθενώς αλκαλικά και I-τύπου. Τα διεισδυτικά πετρώματα συνήθως μειώνονται και αποδίδονται στην ιλμενιτική σειρά πιθανώς ως αποτέλεσμα της τοποθέτησης μέσω μιας υπερκείμενης ακολουθίας, πάχος έως 10 km, των Παλαιοζωικών πυριτικοκλαστικών μετα-ιζηματογενών πετρωμάτων πλούσιων σε οργανικό άνθρακα (Lehmann 1994). Ο μαγματισμός και η μεταλλοφορία συμβαίνει στην πολυμεταλλική ζώνη της Βολιβίας μετά την έναρξη της υποβύθισης με υψηλή ταχύτητα και μια σχετική μετατόπιση της δημιουργίας μάγματος στην ενδοχώρα σε μια ηπειρωτική οπισθοτόξια λεκάνη στο Άνω Ολιγόκαινο. Ταυτόχρονα, ο υπερκείμενος φλοιός συμπύκνεται και παχαίνει στα 75 km (Baby et al. 1997, Lamb et al. 1997). Τα πετροχημικά και ισοτοπικά δεδομένα ορίζουν μια κυρίως υπογραφή φλοιού ή μανδύα (Miller and Harris 1989, Davidson and de Silva 1992), ένα πιθανό αποτέλεσμα της παραγωγής μάγματος κατά την διάρκεια της πάχυνσης του φλοιού (Redwood and Rice 1997).

Το παραγόμενο κοίτασμα Kori Kollo φιλοξενείται από δυο φάσεις ενός πορφυριτικού δακτιλικού θόλου και περιλαμβάνει παράλληλες φλέβες σιδηροπυρίτη που φέρουν χρυσό (<1.5% του συνολικού πετρώματος) και συνορεύει με την εξαλλοίωση χαλαζία-σερικίτη-σιδηροπυρίτη (Redwood 1987, Columba and Cunningham 1993, Long et al. 1992). Οι φλέβες, πάχους 0,1±15 cm αποτελούνται από πρώιμο σιδηροπυρίτη με ίχνη αρσеноπυρίτη, χαλκοπυρίτη και μικρές ποσότητες (<1%) ιαμεσονίτη, γαληνίτη, κασσίτερο, βουρνονίτη, βισμούθινίτη-αντιμονίτη, σφαλερίτη, τετραεδρίτη και σανδαράχη (Petersen and Fitzmayer,

1998). Περίπου το 60% του χρυσού συνδέεται με τα πολυμεταλλικά σουλφίδια στις φλέβες, ενώ το υπόλοιπο με σιδηροπυρίτη στις φλέβες και στη διάσπαρτη μεταλλοφορία. Η αναλογία χρυσού/άργυρου είναι περίπου έξι και ο χρυσός εμφανίζεται με αυξημένη περιεκτικότητα αρσενικού, αντιμονίου, χαλκού, ψευδαργύρου, μόλυβδου, κασσίτερου, βολφραμίου και βισμούθιου (Long et al.1992). Σε αντίθεση με άλλα κοιτάσματα που περιγράφονται, ο χαλκός εμφανίζεται με χρυσό στο Kori Kollo. Ωστόσο, οι συγκεντρώσεις χαλκού στο κοιτάσμα είναι μέσο όρο <100 ppm. Τα ορυκτά στις φλέβες εναποτέθηκαν από αλατούχα ρευστά (10 ± 23 wt.% NaCl equivalent) σε θερμοκρασίες $300\pm 400^\circ\text{C}$ (Long et al. 1992; Petersen and Fitzmayer, 1998).

Οι Petersen and Fitzmayer (1998) περιέγραψαν την εξαλλοίωση αλουνίτη-σερικήτη από θόλους και ανέφεραν την παρουσία ορυκτών φωσφορικού-θεικού αργιλίου (APS) στο τελικό στάδιο της φλέβας στο Kori Kollo. Τα ορυκτά αλουνίτη και APS είναι άφθονα σε ορισμένα αργιλικά λιθοκαλύμματα (lithocaps) που διατηρούνται στα ρηχά μέρη (<1000m κάτω από την παλαιοεπιφάνεια) διαφόρων συστημάτων κασσίτερου –αργύρου αλλού στη νοτιοδυτική Βολιβία (Sillitoe1998). Χρησιμοποιώντας αποδεικτικά στοιχεία ρευστών εγκλεισμάτων, οι Petersen and Fitzmayer (1998) κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι η μεταλλοφορία χρυσού στο Kori Kollo σχηματίστηκε σε ρηχά βάθη ($400\pm 800\text{m}$). Το σύμπλεγμα θόλων, οι ορυκτολογικές εξαλλοιώσεις και η εκτίμηση βάθους υποδηλώνουν ότι η μεταλλοφορία Kori Kollo δημιουργήθηκε στη ριζική ζώνη ενός διαβρωμένου λιθοκαλύμματος.

Ο χρυσός εμφανίζεται σε μικρές ποσότητες σε αρκετά κοιτάσματα αργύρου-κασσίτερου στην πολυμεταλλική ζώνη της Βολιβίας το Μειόκαινο (e.g. Oruro, Pulacayo, Quisma Chata, Tasna and Ubina). Στην Tasna, η μεταλλοφορία χρυσού συνδέεται χωρικά με την προχωρημένη αργιλική εξαλλοίωση, την πιθανή ρίζα σε ένα λιθοκάλυμμα, ενώ τα βαθύτερα μέρη του συστήματος φλέβας κυριαρχούνται από βολφράμιο και βισμούθιο (Sillitoe et al.1998, Thompson et al. 1996).

2.2 Περιβάλλον Σχηματισμού των κοιτασμάτων

Τεκτονικό-Μαγματικό Περιβάλλον

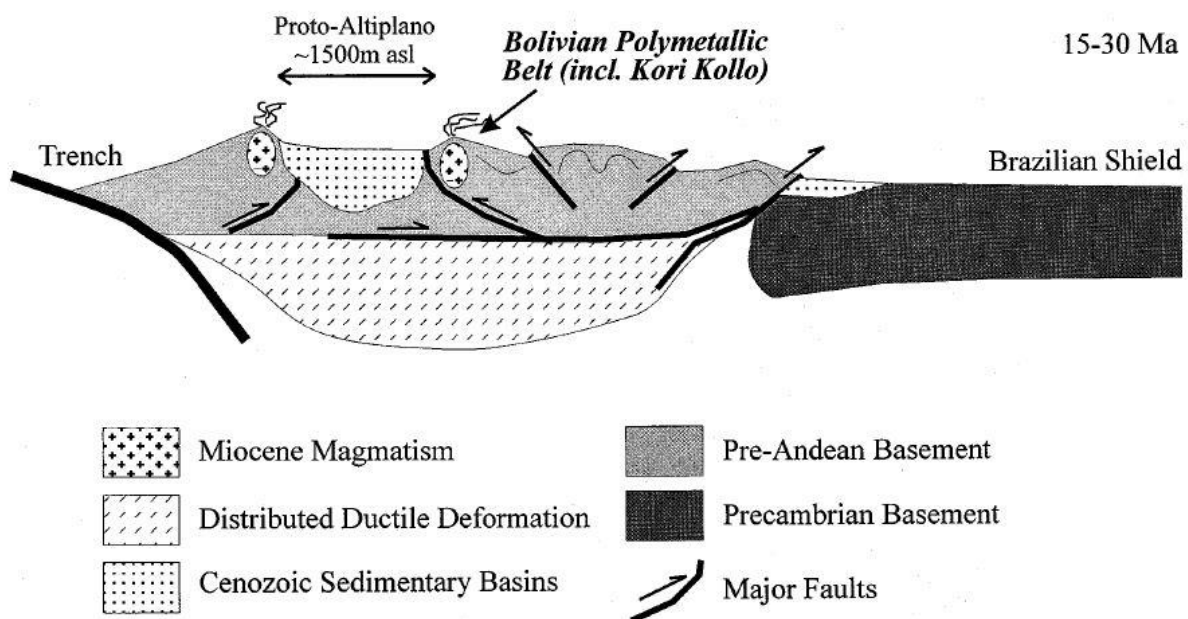
Το ακριβές τεκτονικό περιβάλλον των περισσότερων μεταλλοφοριών είναι δύσκολο να προσδιοριστεί, ιδίως σε σχέση με τις διαδικασίες και τον χρόνο που έλαβε χώρα η υποβύθιση. Οι μαγματικές ζώνες που φιλοξενούν τα κοιτάσματα χρυσού που περιγράφονται δημιουργήθηκαν στο εσωτερικό των ηπειρωτικών περιθωρίων και υποβλήθηκαν σε παλαιότερο βάθος. Σε ορισμένες περιπτώσεις, για παράδειγμα στη πλουτωνική Tombstone suite της Αλάσκας-Yukon οι διεισδύσεις που σχετίζονται με τη μεταλλοφορία χρυσού καταλαμβάνουν τα εσωτερικά μέρη των εκτεταμένων μαγματικών επαρχιών. Παρόλο που καταλαμβάνει μια εσωτερική θέση, ενός οπισθοτόξιου περιβάλλοντος, δεν είναι αποδεδειγμένο στις περισσότερες περιπτώσεις. Εξαίρεση αποτελεί το κοιτάσμα Kori Kollo, όπου ο Μειοκαινικός μαγματισμός της οπισθοτόξιας λεκάνης σχετίζεται άμεσα με την μείωση και με την πάχυνση του φλοιού (Εικόνα 6) (Baby et al. 1997, Lamb et al. 1997). Η χρονική τοποθέτηση της μεταλλοφορίας χρυσού και τις μαγματικής δραστηριότητας σε σχέση με τα τεκτονικά γεγονότα ποικίλει. Αρκετές από τις μαγματικές ζώνες που φέρουν χρυσό τοποθετήθηκαν σε περιβάλλον σύγκρουσης (Hercynian, northern Queensland, New England), και ο εφελκυσμός είναι εμφανής σε ορισμένες περιπτώσεις (parts of the Tombstone suite, Poulsen 1996).

Οι διεισδύσεις που φιλοξενούν ή σχετίζονται με αυτά τα κοιτάσματα χρυσού είναι τμήματα μαγματικών ακολουθιών που εμφανίζουν ποικίλες καταστάσεις οξειδωσης. Ορισμένες διεισδύσεις περιέχουν μαγνητίτη, ενώ άλλες φέρουν ιλμενίτη. Στο σύνολό τους, περιγράφονται καλύτερα ως μειωμένα μάγματα Ι-τύπου, όπως ορίζονται από τους Chappell and White (1974) με ενδιάμεσες καταστάσεις οξειδωσης γύρω από το όριο μεταξύ της σειράς μαγνητίτη και της σειράς ιλμενίτη του Ishihari (1977). Ο σχετικά μειωμένος χαρακτήρας των ακολουθιών που φέρουν χρυσό μπορεί να αντικατοπτρίζει τη διέλευση από παχιές ακολουθίες άνω φλοιού των θαλάσσιων πλαστικών πυριτικών πετρωμάτων, οι οποίες αποτελούν ξενιστή για πέντε από τα επτά κοιτάσματα χρυσού (Πίνακα 1). Η διακύμανση στην κατάσταση οξειδωσης μπορεί να συμβαδίζει με μια αλλαγή στη μεταλλογένεση από τα συστήματα πλούσια σε κασσίτερο και σε βολφράμιο-χρυσό (Εικόνα 7).

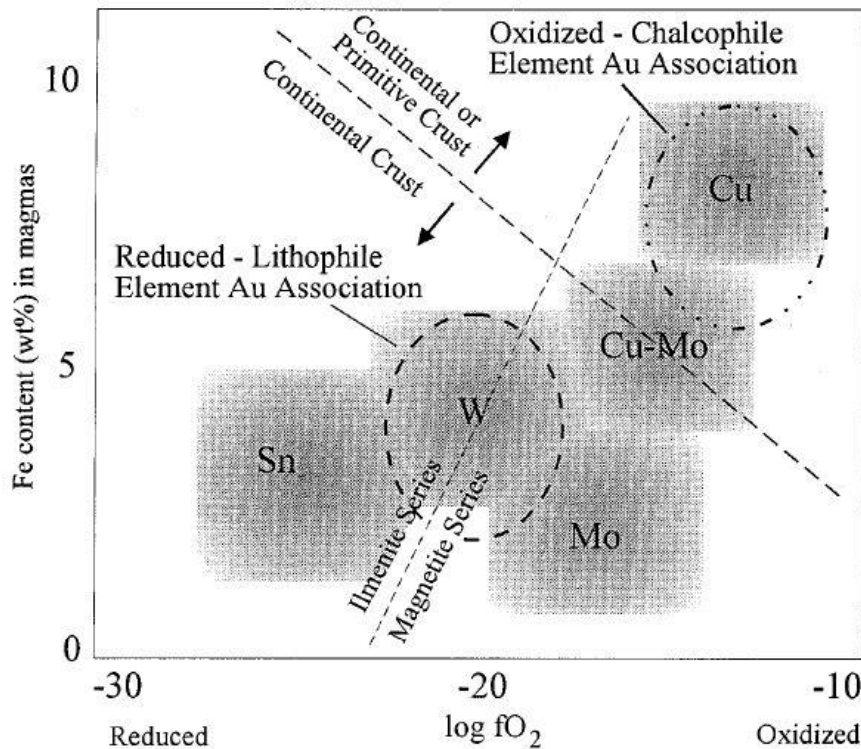
Οι διεισδύσεις είναι κατά κύριο λόγο όξινες, συνήθως κυμαίνονται από γρανοδιорίτη έως γρανίτη. McCoy (1997) τεκμηρίωσε στοιχεία από διεισδύσεις στην περιοχή Fairbanks, τη θέση του κοιτάσματος Fort Knox, για εμπλουτισμό χρυσού κατά την κλασμάτωση, ιδιαίτερα

πάνω από ένα δείκτη κλασματοποίησης 80, το οποίο αντικατοπτρίζει την ασυμβίβαστη συμπεριφορά χρυσού στα γρανιτικά μάγματα της σειράς ιλμενίτη.

Τα διαθέσιμα ισοτοπικά και γεωχημικά δεδομένα από αυτές τις ακολουθίες δείχνουν την παρουσία σημαντικών συστατικών φλοιού και η πηγή αυτών των συστατικών δεν έχει προσδιοριστεί. Μερικά μαφικά μάγματα πιθανής προέλευσης μανδύα και με αλκαλικό χαρακτήρα, εμφανίζονται σε αρκετές ζώνες (e.g. Tombstone suite, Bolivian belt). Η παρουσία πιο παλιών μαφικών μαγμάτων υποδηλώνει συμμετοχή ασθενόσφαιρας ή λιθόσφαιρας στη μαγματική διαδικασία και αυξάνει τις πιθανότητες ανάμειξης μάγματος και συμμετοχή περισσότερου νέου μάγματος στην μεταλλογένεση αυτών των ζωνών. Redwood and Rice (1997) τεκμηρίωσαν μαφικά σωσονιτικά μητρικά μάγματα, στην υψηλού-Κ ασβεσταλκαλική ακολουθία που δημιουργήσε την πολυμεταλλική ζώνη Βολιβίας και το κοιτάσμα χρυσού Kori Kollo. Επιπλέον, η γεωχημεία κύριων πετρωμάτων και τηγμάτων-διείσδυσης για την μεταλλοφορία κασσιτέρου δηλώνουν ότι τα μαφικά μάγματα προστέθηκαν σε ένα κλασματοποιημένο γρανιτικό τήγμα σε βάθος (Dietrich et al. 1997).



Εικόνα 6: Τεκτονική διατομή των κεντρικών Άνδεων για να δειχθεί το περιβάλλον του όξινου μαγματισμού και της πολυμεταλλικής μεταλλοφορίας, συμπεριλαμβανομένης και του κοιτάσματος Kori Kollo, της νοτιοδυτικής Βολιβίας (Lamb et al. 1997).



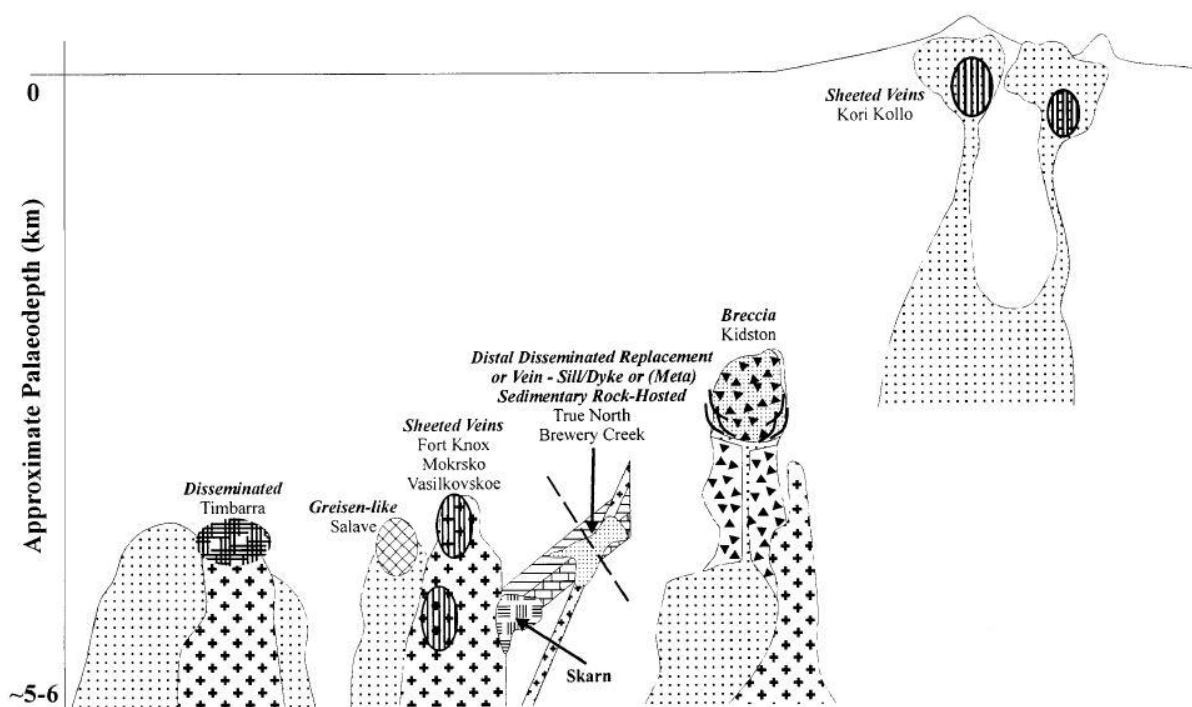
Εικόνα 7: Γραφική Παράσταση του βαθμού κρυστάλλωσης, που φαίνεται η περιεκτικότητα σιδήρου στο μάγμα, σε σχέση με την κατάσταση οξείδωσης για ασβεσταλκαλικά έως αλκαλικά μάγματα που σχετίζονται με μεταλλοφορίες μαγματικού-υδροθερμικού χαλκού, χαλκού-μολυβδαινίτη, μολυβδαινίτη, βολφραμίου και κασσιτέρου (Thompson et al. 1999).

Τύπος μεταλλοφορίας

Τα κοιτάσματα χρυσού που φιλοξενούνται από διείσδυση διαθέτουν μια σειρά από τύπους, οι οποίοι ερμηνεύονται για να αντικατοπτρίζουν τα βάθη της τοποθέτησης μάγματος ή/και της διάβρωσης με βάση γεωλογικά κριτήρια και δεδομένα ρευστών εγκλεισμάτων που συνοψίζονται (Εικόνα 8). Τα μικρότερα βάθη, πιθανότατα <1 km, αποκαλύπτουν παράλληλες χρυσοφόρες φλέβες σιδηροπυρίτη σε ένα σύμπλεγμα πορφυριτικού δακτινικού θόλου (Kori Kollo). Στα ενδιάμεσα επίπεδα, 3,5 km ή λιγότερο, η υδροθερμική μεταλλοφορία breccia σχετίζεται με μία διείσδυση ρυολίθου (Kidston). Τα ενδιάμεσα έως βαθιά επίπεδα (περίπου 3±6 km) χαρακτηρίζονται από παράλληλες φλέβες χαλαζία έως πορφυριτικά γρανιτικά πετρώματα (Fort Knox, Mokrsko, Vasilkovskoe) ή Greisen (Salave) και διάσπαρτη μεταλλοφορία (Timbarra). Ακόμα, σε μεμονωμένες ζώνες, όπως Tombstone suite, έχουν τεκμηριωθεί διαφορές σε βάθος σχηματισμού (McCoy et al. 1997, Baker et al. 1998). Η μείωση του βάθους στο σύστημα Tombstone suite συσχετίζεται με την αυξανόμενη σημασία των εύθραυστων ρηγμάτων, με την αύξηση του αντιμονίου και την μείωση του μολυβδαινίου και

του βολφραμίου. Παρόμοιες συσχετίσεις προτείνονται από άλλα κοιτάσματα (Mokrsko, Vasilkovskoe, Kidston). Η αυξανόμενη σημασία του σιδηροπυρίτη σε πολύ ρηχά επίπεδα (Kori Kollo) μπορεί να δείχνει την επίδραση διεργασιών κοντά στην επιφάνεια. Το εύρος των βαθών σχηματισμού που προτείνονται από αυτά τα κοιτάσματα είναι παρόμοιο με το εύρος που υποδεικνύεται για κοιτάσματα που σχετίζονται με διείσδυση, τα οποία δείχνουν διαφορές στη μορφή της μεταλλοφορίας με το βάθος σχηματισμού (Sillitoe 1991).

Οι μορφές μεταλλοφορίας θυμίζουν αυτές που εμφανίζονται σαν πλέγμα φλεβών που φιλοξενούνται από γρανίτη και κοίτασμα βολφραμίου και κασσιτέρου (e.g. Taylor 1979). Τέτοια κοιτάσματα έχουν σχηματιστεί κατά τη διάρκεια παθητικής ανόδου του μαγματικού ρευστού μέσω ρηγμάτων που σχετίζονται με περιοχές καταπόνησης. Η μεταλλοφορία χρυσού συμβαίνει και σε άλλες μορφές όπως φλέβες χαλαζία, διάσπαρτη μεταλλοφορία σε στρωματοειδή φλέβες, μεταϊζήματα και ασβεστούχα ιζήματα. Η μεταλλοφορία αυτών των τύπων μπορεί να συμβεί δίπλα ή πιο μακριά (0,5-3 km) από διεισδύσεις. Τέλος, και σε απομακρυσμένες περιπτώσεις, μπορεί να γίνει χωρική, χρονική και γεωχημική σύνδεση με διεισδύσεις (e.g. Brewery Creek, Poulsen 1996).



Εικόνα 8: Σχηματικό μοντέλο που δείχνει τους διαφορετικούς τύπους κοιτασμάτων χρυσού που περιγράφονται παραπάνω σε σχέση με το βάθος τοποθέτησης των σχετικών διεισδύσεών τους (Thompson et al. 1999).

Χαρακτηριστικά εξαλλοιώσεων και ρευστών

Ο χαρακτήρας της εξαλλοίωσης ποικίλουν ανάλογα τον τύπο της μεταλλοφορίας χρυσού που σχετίζεται με διείσδυση. Η εξαλλοίωση που σχετίζεται με τις παράλληλες φλέβες χαλαζία χαρακτηρίζεται από μοσχοβίτη, K-άστριο ή/και αλβίτη, που συνήθως συνοδεύεται από ανθρακικό άλας και γενικά περιορίζεται σε στενά περιβλήματα γύρω από μεμονωμένες φλέβες. Ωστόσο η πιο διαδεδομένη είναι σερικιτίωση και συμβαίνει σε πολλά κοιτάσματα, όπου μπορεί να σχετίζονται με την μεταλλοφορία (e.g. Salave, Kori Kollo, Kidston).

Δυο κύριοι τύποι συμπερίληψης ρευστών περιγράφονται από την μεταλλοφορία χρυσού στην Tombstone suite στο Yukon (Baker et al. 1997; Baker et al. 1998) και στην Αλάσκα (McCoy et al. 1997): ανθρακικά εγκλείσματα με αλατότητες 0 ± 12 wt.% NaCl equivalent και εγκλείσματα που φέρουν αλίτη με αλατότητες 30 ± 65 wt.% NaCl equivalent. Η σχετική σημασία αυτών των δυο τύπων μπορεί να αντικατοπτρίσει το βάθος, με τα ανθρακικά εγκλείσματα να είναι πιο σημαντικά σε βαθύτερα επίπεδα. Αυτό το συμπέρασμα θα εξηγούσε τα δεδομένα των αλατούχων εγκλεισμάτων σε ρηχά επίπεδα (Kori Kollo, early stages at Kidston), αλλά και των ανθρακικών εγκλεισμάτων σε πιο βαθιά τοποθετημένα κοιτάσματα (Fort Knox, Mokrsko, Vasilkovskoe, Salave, Timbarra).

3. Το βάθος τοποθέτησης και τα ρευστά εγκλείσματα πλούσια σε διοξείδιο του άνθρακα σε κοιτάσματα χρυσού που σχετίζονται με την διείσδυση

Φανεροζωικά κοιτάσματα που σχετίζονται με την διείσδυση έχουν πολλά χαρακτηριστικά, όπως μια χωρική και γεωχημική συσχέτιση με μειωμένες εισβολές I-τύπου (κυρίως σε ιλμενίτη). Τα κοιτάσματα παρουσιάζουν μια σειρά χαρακτηριστικών που ποικίλλουν σε ένα ευρύ φάσμα βάθους τοποθέτησης (<1-7 km). Κοιτάσματα σε ρηχά στρώματα (~<5 km) συνδέονται με διεισδύσεις, στρωματοειδείς φλέβες (sills), ρηξιγενείς φλέβες (dykes) και ηφαιστειακούς θόλους (volcanic domes) και περιλαμβάνουν συστήματα με επιθερμικές μορφές φλεβών breccia και πλέγμα φλεβών παρόμοια με πορφυριτικού τύπου ακολουθίες. Τα βαθύτερα στρώματα (~>5 km) έχουν χαρακτηριστικά μεσοθερμικού περιβάλλοντος και φιλοξενούνται από πλουτωνικά πετρώματα που περιέχουν παράλληλες φλέβες, greisen και ρηξιγενείς φλέβες χρυσού. Τα ρευστά χαρακτηριστικά ποικίλλουν επίσης ανάλογα με το βάθος. Οι κοιτάσματα σε αβαθή περιβάλλοντα περιέχουν υψηλή θερμοκρασία (> 350°C), μη αναμείξιμη άλμη (> 30 wt % NaCl equiv) και ατμός χαμηλής αλατότητας (<5 wt % NaCl equiv) που συνήθως περιέχει διοξείδιο του άνθρακα (CO₂). Οι καταθέσεις σε

βαθύτερα περιβάλλοντα περιέχουν σε αφθονία υδατικά ρευστά χαμηλής αλατότητας (<10 wt % NaCl equiv), πλούσια σε διοξείδιο του άνθρακα που σε ορισμένα κοιτάσματα η αλατότητα είναι μέτρια έως υψηλή (10-40 wt % NaCl equiv). Αυτοί οι αντίθετοι τύποι ρευστών ερμηνεύονται να είναι μαγματική προέλευση και είναι το αποτέλεσμα της πολύπλοκης αλληλεπίδρασης μεταξύ της εξάπλωσης των διαφορετικών πτητικών (διοξείδιο του άνθρακα, νερό και χλώριο) από όξινα μάγματα τοποθετημένα σε διαφορετικά επίπεδα φλοιού. Πειραματικές μελέτες έχουν δείξει ότι το διοξείδιο του άνθρακα θα εκλυθεί από τα όξινα μάγματα σε πολύ υψηλότερες πιέσεις από το νερό και το χλώριο, λόγω της μικρότερης διαλυτότητάς του στο τήγμα. Έτσι, τα κοιτάσματα σχηματίστηκαν από τα όξινα μάγματα σε βαθύτερα περιβάλλοντα που περιέχουν άφθονα, πλούσια σε διοξείδιο του άνθρακα ρευστά. Μεταγενέστερα ρευστά που απελευθερώνονται από το μάγμα είναι πιθανό να είναι πλούσια σε νερό και πιο αλατούχα. Τα όξινα μάγματα σε αβαθή περιβάλλοντα θα περιέχουν χαμηλότερες συγκεντρώσεις διοξειδίου του άνθρακα που θα χωριστούν στη φάση ατμών κατά τη διάρκεια του διαχωρισμού φάσης μεταξύ άλμης και ατμού.

Τα εμπλουτισμένα με χρυσό μαγματικά-υδροθερμικά συστήματα αποτέλεσαν σημαντικό ερευνητικό στόχο για τις εταιρείες εξόρυξης τα τελευταία 15 χρόνια. Μέσω αυτής της αυξημένης δραστηριότητας εξερεύνησης, έχει αναγνωριστεί ένας νέος τύπος αποθέματος χρυσού που σχετίζεται με την διείσδυση, τα χαρακτηριστικά του οποίου έχουν πρόσφατα τεκμηριωθεί από ερευνητές που εργάζονται στη ζώνη χρυσού Tintina, στο Yukon και στην Αλάσκα (Lang et al., 2000, πίνακας 2). Οι Thompson et al. (1999) και οι Lang and Baker (2001) έχουν επισημάνει την παγκόσμια διανομή των εν λόγω κοιτασμάτων και των χαρακτηριστικών τους. Τα κοιτάσματα είναι Φανεροζωικής ηλικίας και φιλοξενούνται από όξινες διεισδύσεις, I-τύπου (κυρίως της σειράς ιλμενίτη), τοποθετημένες σε μεταβατικά πετρώματα σε ηπειρωτικές τοποθεσίες και μέσα σε ένα συγκλίνον περιθώριο πλάκας. Τα κοιτάσματα χαρακτηρίζονται από μειωμένη συγκέντρωση μετάλλων (σταθερή με πυρολίτη χωρίς μαγνητίτη ή αιματίτη), χαμηλά σουλφίδια (<5 vol %). Το μέταλλευμα περιέχει ανώμαλο χρυσό, βισμούθιο, τελλούριο, βολφράμιο, μολυβδαίνιο, αρσενικό και αντιμόνιο και η συσχέτιση χρυσού-βισμούθιου είναι συνήθως ισχυρή (Πίνακα 2).

Τα κοιτάσματα φαίνεται να έχουν σχηματιστεί σε ένα ευρύ φάσμα βάθους (<1 km έως ίσως όσο 10 km, Πίνακας 2), ένα σημαντικό χαρακτηριστικό ιδιαίτερα είναι η σχέση επίδρασης της πίεσης στην έκλυση μαγματικών πτητικών. Οι Cline and Bodnar (1991) απευθύνουν αυτήν τη σχέση σε κοιτάσματα πορφυριτικού χαλκού και θεώρησαν τα κοιτάσματα που σχηματίστηκαν σε πιέσεις $<1,3$ kbars ως αβαθή συστήματα ($\sim <5$ km) και $>1,3$ kbars ως βαθιά συστήματα ($\sim > 5$ km). Μια παρόμοια ταξινόμηση έχει χρησιμοποιηθεί εδώ για καταθέσεις

χρυσού που σχετίζονται με την διείσδυση. Ωστόσο, πρέπει να σημειωθεί ότι εμφανίζονται πολλά από τα μεγαλύτερα κοιτάσματα χρυσού που σχετίζονται με διείσδυση να έχουν σχηματιστεί σε βαθύτερα περιβάλλοντα (>5 km), ενώ η πλειονότητα των κοιτασμάτων πορφυριτικού χαλκού σε αβαθή περιβάλλοντα (<5 km, Cline and Bodnar, 1991, Lang et al. 2000, Lang and Baker 2001).

Τα κοιτάσματα χρυσού που σχετίζονται με διείσδυση στο χώρο του φλοιού σχετίζονται με τις διεισδύσεις, τις στρωματοειδείς φλέβες, ρηξιγενείς φλέβες και ηφαιστειακούς θόλους. Περιλαμβάνουν συστήματα με επιθερμικές φλέβες breccia και πλέγμα φλεβιδίων που είναι χαρακτηριστικές για τα πορφυριτικού τύπου (Πίνακας 2). Τα βαθύτερα συστήματα έχουν χαρακτηριστικά μεσοθερμικά περιβάλλοντα, και φιλοξενούνται από πλουτωνίτες που περιέχουν παράλληλες φλέβες, greisen και διάσπαρτη μεταλλοφορία. Οι εξαλλοιώσεις διαφέρουν επίσης ανάλογα με το βάθος. Η εξαλλοίωση αργίλου και χαλαζία-ανθρακικού άλατος-σερικήτη είναι άφθονη στα ρηχά συστήματα, ενώ η πρώιμη εξαλλοίωση αστρίου, με αλβίτη είναι συνηθισμένη στα βαθύτερα συστήματα (Lang et al., 2000). Μέταλλα όπως το αντιμόνιο, το αρσενικό, το ασήμι, και ο υδράργυρος είναι πιο συχνά στα ρηχά περιβάλλοντα, ενώ το βολφράμιο, το μολυβδαίνιο, το βισμούθιο και το τελλούριο είναι κυριαρχεί στα βαθύτερα συστήματα. Χαλκός, μόλυβδος και ψευδάργυρος τυπικά έχουν χαμηλές συγκεντρώσεις σε κοιτάσματα χρυσού που σχετίζονται με διείσδυση. Ωστόσο, ο χαλκός φαίνεται να είναι πιο άφθονος σε ρηχά συστήματα. Μόλυβδος και ψευδάργυρος συνήθως εμπλουτίζονται σε πιο απομακρυσμένα περιβάλλοντα.

Μια άλλη σημαντική διαφορά μεταξύ κοιτασμάτων χρυσού που σχετίζονται με διεισδύσεις σε ρηχά και βαθιά περιβάλλοντα είναι οι τύποι υδροθερμικών ρευστών που συνάγονται πληροφορίες από τα ρευστά εγκλείσματα (Thompson et al., 1999, Lang et al., 2000, Baker and Lang, 2001, Lang and Baker, 2001). Τα κοιτάσματα που σχηματίστηκαν σε ρηχά περιβάλλοντα συνήθως περιέχουν υψηλή θερμοκρασία ($> 350^{\circ}\text{C}$), μη αναμειξίμη άλμη ($> 30\text{wt\% NaCl equiv}$), χαμηλή αλατότητα ($<5\text{wt\% NaCl equiv}$) και ατμούς διοξειδίου του άνθρακα (Εικόνα 11, Πίνακας 2). Κοιτάσματα στα βαθύτερα περιβάλλοντα περιέχουν άφθονα υδατικά ρευστά, χαμηλής αλατότητας ($<10\text{wt\% NaCl equiv}$), πλούσια σε διοξείδιο άνθρακα, ενώ μερικά έχουν μέτρια έως υψηλή αλατότητα ($10-40\text{ wt\% NaCl equiv}$, Σχήμα 1, Πίνακας 2). Χαρακτηριστικά ρευστών εγκλεισμάτων στα κοιτάσματα χρυσού που σχετίζονται με τη διείσδυση που σχηματίζονται σε ρηχά περιβάλλοντα συνάδουν με αποδεκτά μαγματικά-υδροθερμικά μοντέλα, όπου τα υδατικά ρευστά είναι πλούσια σε χλώριο, εκλύονται από τήγμα και διαχωρίζονται σε μη αναμειξίμη άλμη και ατμό (e.g. Burnham, 1979, Cline and Bodnar ,1991). Κοιτάσματα που σχηματίζονται σε βαθύτερα περιβάλλοντα δεν συμφωνούν με το

μαγματικό-υδροθερμικό μοντέλο και επομένως έχουν υποβληθεί σε συζήτηση σχετικά με την προέλευση των ρευστών (Sillitoe and Thompson, 1998, Thompson et al.1999). Τα βαθιά κοιτάσματα έχουν πολλά χαρακτηριστικά που αλληλεπικαλύπτονται με ορογενή κοιτάσματα χρυσού (Groves et al., 1998), και συγκεκριμένα η εμφάνιση ρευστών εγκλεισμάτων πλούσιων σε διοξείδιο του άνθρακα, χαμηλού βαθμού αλατότητας σε σύστημα χρυσού. Αυτά τα χαρακτηριστικά οδήγησαν αρκετούς εργαζόμενους να προτείνουν μη μαγματική προέλευση (Moràvek et al., 1989, Spiridinov, 1996, Goldfarb et al 1997, Groves 1998).

Σκοπός είναι λοιπόν η διερεύνηση της σχέσης μεταξύ βάθους τοποθέτησης και υδροθερμικών ρευστών σε κοιτάσματα χρυσού που σχετίζονται με την διείσδυση. Αξιολογώντας τα δημοσιευμένα δεδομένα ρευστών εγκλεισμάτων από ρηχές και βαθιές αποθέσεις αυτής της κατηγορίας υπό το πρίσμα δημοσιευμένων πειραματικών και θερμοδυναμικών δεδομένων που αφορούν τη συμπεριφορά των πτητικών ουσιών (ιδιαίτερα διοξείδιο του άνθρακα) σε συστήματα μαγματικών και υδροθερμικών συστημάτων ως συνάρτηση της πίεσης (Lowenstern, 2001). Επίσης, η αναφορά στα κοιτάσματα χρυσού που σχετίζονται με την διείσδυση συνεχίζεται και προτείνεται ότι οι μαγματικές-υδροθερμικές διεργασίες μπορούν να εξηγήσουν τις παραλλαγές που παρατηρήθηκαν χωρίς να ζητήσουν δύο ξεχωριστά γενετικά μοντέλα για βαθιά και ρηχά συστήματα.

Πίνακας 2: Χαρακτηριστικά κοιτασμάτων χρυσού που σχετίζονται με διείσδυση

Κοιτάσματα	Μέγεθος (Mt)	Βαθμός (g/t Au)	Ξενιστής διείσδυσης	Τύπος κοιτάσματος	Μεταλλικές ακολουθίες	Μετάλλευμα	Εξαλλοιώσεις	Πίεση (Kb)/Βάθος (km)	Αναφορές
Kori Kollo, Βολιβία	64	2,3	Δακτυλικός θόλος, I;	Παράλληλες φλέβες	Ag, As, Sb, Sn, Bi, Cu, Zn, Pb, W	Py, Apy, Ccp, Gal, Bim, Sbn, Sph	Argillic	<0,5/0,4-0,8	Petersen and Fitzmeyer (1998)
Brewery, Creek, Yukon	13,3	1,4	Μονζονιτικές στρωματοειδείς φλέβες, I>M	Διάσπαρτη μεταλλοφορία και φλεβίδια	As, Sb, (Hg)	Py, Po, Apy, Sbn	Qtz, Ser, Carb, Clay	~0,5/~2	Diment (1996), Dunne (1995)
Donlin, Creek, Αλάσκα	323	2,9	Ρυολιθικές στρωματοειδείς φλέβες/Ρηξιγενείς φλέβες, I	Φλέβες	Ag, As, Sb, Hg	Py, Apy, Sbn	Qtz, Ser, Carb, Clay	~0,5/~2	Ebert et al. (2000)
Shotgun, Αλάσκα	~1 oz		Γρανίτης, I	Πλέγμα φλεβιδίων και breccia	Bi, Te, Mo, As, Cu	Apy, Po, Lo, Py, Ccp, Sch	Ab, Ser, Qtz, Carb	~0,5/~2	Rombach and Newberry (2001)
Kidston, Αυστραλία	94	1,48	Πορφυριτικός ρυόλιθος, I>M	Παράλληλες φλέβες και breccia	Bi, Mo, W, As, Te, Zn, Cu, Pb, Sn	Py, Po, Apy, Bim, Ccp, Sph, Mol, Gal	Qtz, Ser, Carb	~0,8/~3	Baker and Andrew (1991)
Vasilkovskoe, Καζακστάν	80	3,7	Γρανодиוריτικός πλουτωνίτης, I	Παράλληλες φλέβες	As, Sb, W, Pb, Cu, Bi, Te	Py, Po, Bim, Ccp, Sph, Gal, Mol, Sbn, Sch	Ab, Qtz, Ser, Carb	>1/>3	Spiridonov (1996)
Dublin, Gulch, Yukon	50,3	0,93	Γρανодиוריτικός πλουτωνίτης, I	Παράλληλες φλέβες	Bi, Te, Mo, As, Sb, W, Pb, Cu	Py, Po, Apy, Bim, Sch, Gal, Pb-Bi-Te-S	Ksp>Ab, Ser, Carb, Qtz	>1,1/>3,5	Maloof et al. (2001)
Mokrsko, Τσεχική Δημοκρατία	66	1,5	Γρανодиוריτικός πλουτωνίτης, I	Παράλληλες φλέβες	As, Bi, Te, Mo, W, Sb	Py, Po, Apy, Mol, Sch, Bim	Ab, Amp, Bt, Qtz	~1,5/~5	Boiron et al. (1995)
Fort Knox, Αλάσκα	158	0,83	Πορφυριτικός γρανίτης, I	Παράλληλες φλέβες	Bi, Te, Mo, As, Sb, W	Apy, Py, Sbn, Sch, Po, Lo, Mol, Bim	Ab, Qtz, Ser, Carb	>1,5/>5	McCoy et al. (1997)
Pogo, Αλάσκα	10	~15	Γρανίτης, Απλίτης, I	Επίπεδες φλέβες	Bi, Te, As, Ag, Cu, Pb	Apy, Py, Po, Lo, Bim	Bt, Qtz, Ser, Carb	>1,7/>5	Smith et al. (1999)
Salave, Ισπανία	~15	~2	Γρανодиορίτης, I	Διάσπαρτη μεταλλοφορία (greisen)	As, Sb, Mo, W, Zn, Cu	Py, Po, Apy, Bim, Mol, Sph, Gal, Ccp	Ab, Ser, Carb		Harris (1980)
Timbarra, Αυστραλία	13	0,95	Γρανίτης, I	Διάσπαρτη μεταλλοφορία	Bi, Mo, Sb, As, Ag	Mol, Bim, Py, Apy	Ab, Qtz, Ser, Carb	~2/~7	Mustard (2001)
Jilau, Τατζικιστάν	54	1,1	Γρανодиορίτης, I	Παράλληλες φλέβες	Bi, Te, W, As, Cu	Bim, Sch, Cpy, Py, Apy	Qtz, Fsp, Carb, Ser	~2,2/~8	Cole et al. (2000)

3.1 Χαρακτηριστικά ρευστών εγκλεισμάτων σε κοιτάσματα χρυσού που σχετίζονται με διείσδυση

Αβαθή κοιτάσματα

Ρηξιγενείς φλέβες (dykes)/στρωματοειδείς φλέβες (sills)/θόλοι (domes) που φιλοξενούν κοιτάσματα: Το Donlin Creek στην Αλάσκα και ο Brewery Creek στο Yukon είναι παραδείγματα αβαθών επίπεδων που φιλοξενούνται από Κρητιδικές στρωματοειδείς και ρηξιγενείς φλέβες και εμφανίζουν χαρακτηριστικά παρόμοια με συστήματα επιθερμικών φλεβών (Diment, 1996, Ebert et al. 2000, πίνακας 2). Στο Donlin Creek, μελέτες ρευστών εγκλεισμάτων έχουν εντοπίσει πρώιμους μη αναμείξιμους ατμούς (με ελάχιστο διοξείδιο του άνθρακα) και άλμη που παγιδεύτηκαν σε θερμοκρασίες $>550^{\circ}\text{C}$ και πιέσεις $<0,5$ kbars. Ωστόσο, η πλειοψηφία του χρυσού εμφανίζεται να έχει κατατεθεί από αραιά ρευστά χαμηλής θερμοκρασίας ($150\text{-}260^{\circ}\text{C}$) (McCoy et al., 1999). Στο Brewery Creek, ο χρυσός εμφανίζεται κυρίως με αρσеноπυρίτη και οι άκρες είναι πλούσιες σε αρσενικό με σιδηροπυρίτη και, τοπικά, οι μικρές φλέβες είναι πληρωμένες με χαλαζία-ανθρακικό άλας-αρσеноπυρίτη-σιδηροπυρίτη. Οι μελέτες ρευστών εγκλεισμάτων διεξήχθησαν σε φαινοκρυστάλλους χαλαζία από στρωματοειδείς φλέβες χαλαζία-μονζονίτη (Baker, unpub. Data, Dunne, 1995), και από φλέβες χαλαζία-ασβεστίτη-σιδηροπυρίτη-αρσеноπυρίτη και φλέβες χαλαζία-αντιμονίτη (Dunne, 1995). Οι φαινοκρύσταλλοι περιέχουν δευτερογενή άλμη (> 30 wt % NaCl equiv) και ατμούς με διοξείδιο του άνθρακα σε θερμοκρασίες ομογενοποίησης πάνω από 450°C (Baker, unpub. Data). Τα εγκλείσματα εμφανίζονται στις ίδιες ομάδες, και τα εγκλείσματα που φέρουν αλίτη ομοιογενοποιούνται με εξαφάνιση ατμών. Αυτό, σε συνδυασμό με παρόμοιες θερμοκρασίες ομογενοποίησης τόσο για τους ατμούς όσο και για το αλατόνερο, υποδηλώνει ότι οι εγκλείσεις μπορεί να έχουν παγιδευτεί στο διφασικό μη αναμείξιμο πεδίο σε πιέσεις $\sim 0,5$ kbars. Τα ρευστά εγκλείσματα που σχετίζονται με τις μεταλλοφορίες φλεβών που παγιδεύουν πλούσια ρευστά (με λίγο διοξείδιο του άνθρακα), αραιά ($0\text{-}10$ wt % NaCl equiv), χαμηλής θερμοκρασίας ($100\text{-}350^{\circ}\text{C}$, Dunne, 1995). Thompson et al. (1999) ταξινομήσε το κοιτάσμα Kori Kollo (Βολιβία) ως κατάθεση χρυσού που σχετίζεται με διείσδυση σε αβαθές περιβάλλον. Το κοιτάσμα περιλαμβάνει παράλληλες φλέβες και φλεβίδια που σχηματίζονται σε $0,4\text{-}0,8$ km (Petersen and Fitzmeyer, 1998). Στις πρώτες υψηλές θερμοκρασίες ($300\text{-}700^{\circ}\text{C}$), η μαγματική άλμη ($8\text{-}45$ wt % NaCl equiv) παγιδεύεται σε φαινοκρυστάλλους χαλαζία, και αργότερα ρευστά εγκλείσματα που συνδέονται με πολύτιμο μέταλλευμα που σχηματίζεται σε θερμοκρασίες από $200\text{-}350^{\circ}\text{C}$ από ρευστά χαμηλής έως μέτριας αλατότητας ($5\text{-}15$ wt % NaCl

equiv). Δεν υπάρχουν δημοσιευμένα δεδομένα σχετικά με την περιεκτικότητα σε διοξείδιο του άνθρακα των ρευστών εγκλεισμάτων στο Kori Kollo.

Breccia/πλέγμα φλεβιδίων που φιλοξενούν κοιτάσματα: Το Kidston στην Queensland και το Shotgun στην Αλάσκα είναι παραδείγματα κοιτασμάτων χρυσού που φιλοξενούνται από πορφυριτικά κοιτάσματα χρυσού που σχετίζονται με διείσδυση, σε μορφή breccia και πλέγμα φλεβών. Οι Baker and Andrew (1991) ανέφεραν στοιχεία ρευστών εγκλεισμάτων από τα ανώτερα τμήματα των ζωνών breccia (<300 m). Οι πρώτες άλμες (20-50 wt % NaCl equiv) υψηλής θερμοκρασίας (340-600°C) συνδέονται με μεταλλογένεση μολυβδαινίου-βολφραμίου στο πορφυριτικό ρυόλιθο. Ρευστά χαμηλής αλατότητας που περιέχουν διοξείδιο του άνθρακα συνδέονται με φλέβες χαλαζία που σχηματίστηκαν πριν από το κύριο στάδιο εισαγωγής του χρυσού. Ο χρυσός ερμηνεύεται ότι σχετίζεται με ρευστά χαμηλής αλατότητας (2-10 wt % NaCl equiv), χαμηλής θερμοκρασίας (170-350°C) και πιστεύεται ότι έχει σχηματίσει 3,5 km κάτω από την επιφάνεια παλαιοεπιφάνεια από τη συμπύκνωση ατμών που δημιουργείται κατά τη διάρκεια του διαχωρισμού σε πρώιμο στάδιο. Πρόσφατη εργασία του Giles (1995) σε βαθιά γεώτρηση (έως 1.300m κάτω από την επιφάνεια) υποδηλώνει ότι τα πλούσια σε διοξείδιο του άνθρακα ρευστά εγκλείσματα γίνονται ολοένα και πιο άφθονα κάτω από τα 500m. Το κοίτασμα Shotgun φιλοξενείται από ένα υλικό από αποθέσεις πορφυριτικού γρανίτη της σειράς ιλμενίτη, Ι-τύπου, Άνω Κρητιδικής ηλικίας (70 Ma), με πλέγμα φλεβών από χαλαζία και breccia εντός της διεισδυτικής αλβίτης-σερικιτικής-χαλαζιακής-ανθρακικής εξαλλοίωσης (Rombach and Newberry, 2001). Συνυπάρχουσα άλμη (>40 wt % NaCl equiv) και πλούσια σε διοξείδιο του άνθρακα συμπύκνωση ατμών υποδεικνύει μη αναμειγμένες συνθήκες που εμφανίστηκαν σε θερμοκρασίες 350°C έως 650°C και σε πιέσεις περίπου 0,5 kbars (Rombach and Newberry, 2001).

Βαθιά κοιτάσματα

Παράλληλες φλέβες (Sheeted vein) που φιλοξενούν κοιτάσματα (Εικόνα 9, 10): Κοιτάσματα σε παράλληλες φλέβες είναι συνηθισμένες σε στρώσεις στα βαθύτερα συστήματα χρυσού που σχετίζονται με τη διείσδυση. Το μεγαλύτερο κοίτασμα αυτού του τύπου είναι το Fort Knox στην Αλάσκα, το οποίο χαρακτηρίζεται από μεταλλοφορία πηγματίτη και παράλληλες φλέβες που φιλοξενούνται από το Μέσο Κρητιδικό γρανοδιορίτη και γρανίτη (Bakke, 1995, McCoy et al., 1997, πίνακας 2). Μελέτες για τα ρευστά εγκλείσματα έγιναν από τον McCoy et al. (1997) έδειξαν ότι οι πηγματίτες και οι φλέβες χαλαζία στο Fort Knox περιέχουν μη αναμειγμένο ρευστό διοξειδίου του άνθρακα, χαμηλής αλατότητας (2-8 wt % NaCl equiv) παγιδευμένο σε ~1,5kbars και 270°C έως 330°C. Πολλές μικρότερες προοπτικές

στο Yukon μοιράζονται παρόμοια χαρακτηριστικά, ιδιαίτερα το Dublin Gulch (Baker and Lang, 2001, Maloof et al., 2001). Τα ρευστά εγκλείσματα σε φλέβες χρυσού περιέχουν άφθονα πρώιμα ρευστά, πλούσια σε διοξείδιο του άνθρακα ($\text{XCO}_2 = 0,18-0,75$) και αργότερα μέτρια ($<15 \text{ wt \% NaCl equiv}$) με σπάνια υδατικά εγκλείσματα, υψηλής αλατότητας. Οι θερμοκρασίες ομογενοποίησης ρευστών εγκλεισμάτων κυμαίνονται από 141°C έως 355°C και παγιδεύονται σε πιέσεις μεγαλύτερες από 1,1kbars (Baker and Lang, 2001, Πίνακας 2). Το κοίτασμα χρυσού Mokrsko (Τσεχική Δημοκρατία) έχει μορφή παράλληλων φλεβών που περιέχει αραιά, πλούσια σε διοξείδιο του άνθρακα ρευστά εγκλείσματα που σχηματίζονται σε ελάχιστες θερμοκρασίες $330\pm 20^\circ\text{C}$ και πιέσεις 1 έως 1,5kbars (Boiron et al. 1995). Το κοίτασμα χρυσού Vasilkovskoe, στο Καζακστάν, φιλοξενείται με γρανοδιοριτική διείσδυση και περιλαμβάνει παράλληλες φλέβες χαλαζία και μικρές φλέβες με σερικήτη ευρείες περιοχές εξαλλοίωσης των άστρων. Το μετάλλευμα αποτέθηκε σε θερμοκρασία 280°C έως 370°C και πιέσεις $>1 \text{ kbar}$ από αραιά ($<11 \text{ wt \% NaCl equiv}$), υδατικά ρευστά που φέρουν διοξείδιο του άνθρακα (Spiridonov, 1996). Το χρυσωρυχείο Jilau (Τατζικιστάν) αποτελείται από παράλληλες φλέβες που φιλοξενούνται από γρανοδιορίτη σε διεισδύσεις χαλαζία-μονζονίτη (Cole et al., 2000). Οι μελέτες ρευστών εγκλεισμάτων δείχνουν ότι τα πρώιμα ανθρακικά ρευστά, χαμηλής αλατότητας που φέρουν μεθάνιο παγιδεύτηκαν στο διαφασικό μη αναμειζίμο πεδίο υπό συνθήκες 2,2kbars και 300°C έως 450°C . Μεταγενέστερα αλατούχα υδατικά ρευστά (2-14 wt% NaCl equiv) ομογενοποιήθηκαν σε χαμηλότερες θερμοκρασίες μεταξύ 130°C και 300°C .



Εικόνα 9: Παράλληλες φλέβες χαλαζία, Clear Creek, Yukon. Η εξαλλοίωση περιορίζεται σε στενούς ιστούς που γειτνιάζουν με την φλέβα.

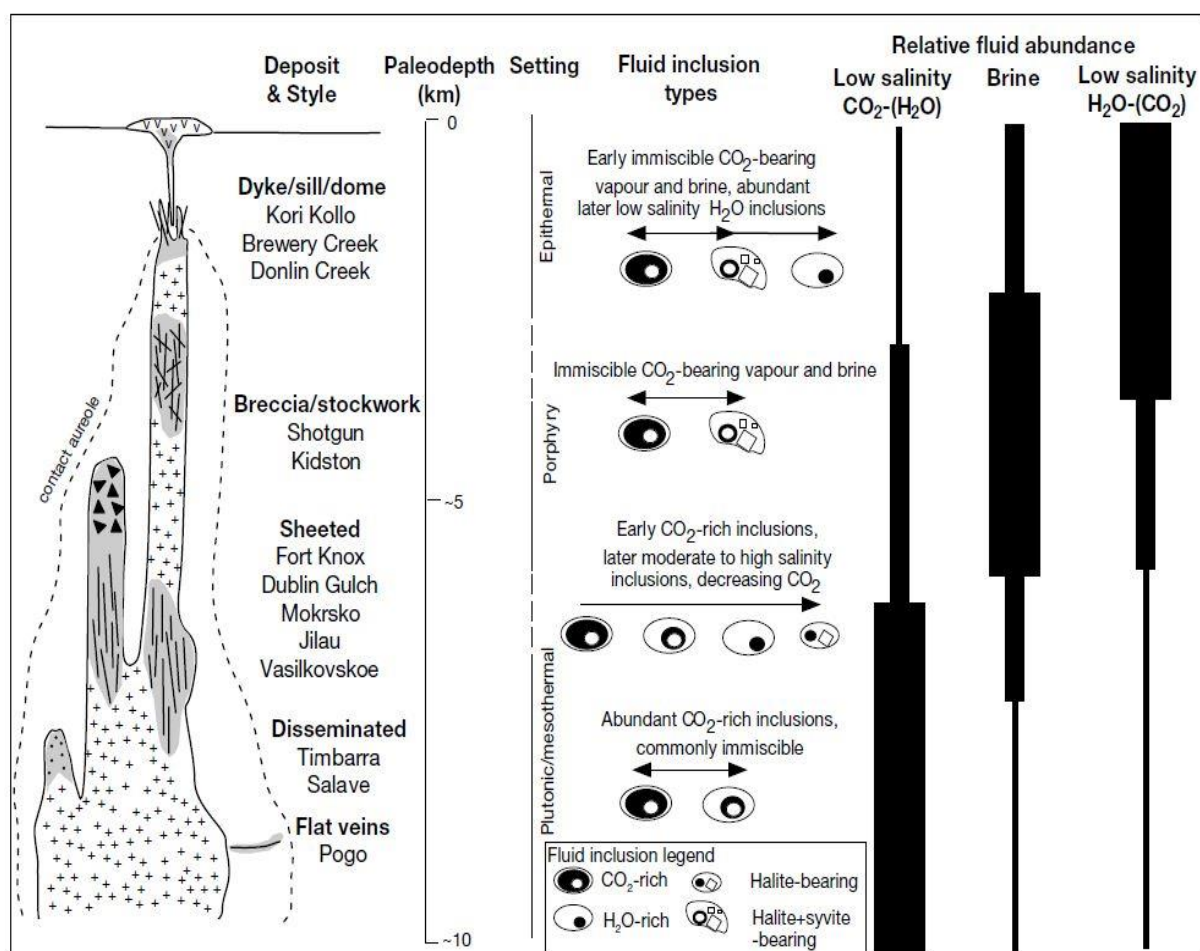


Εικόνα 10: Παράλληλες φλέβες στο κοίτασμα χρυσού Fort Knox, στην Αλάσκα, είναι λιγότερο παράλληλες και ελαφρώς πιο ακανόνιστες, αλλά εξακολουθούν να διακρίνονται ότι ανήκουν σε αυτών τον τύπο κοιτασμάτων.

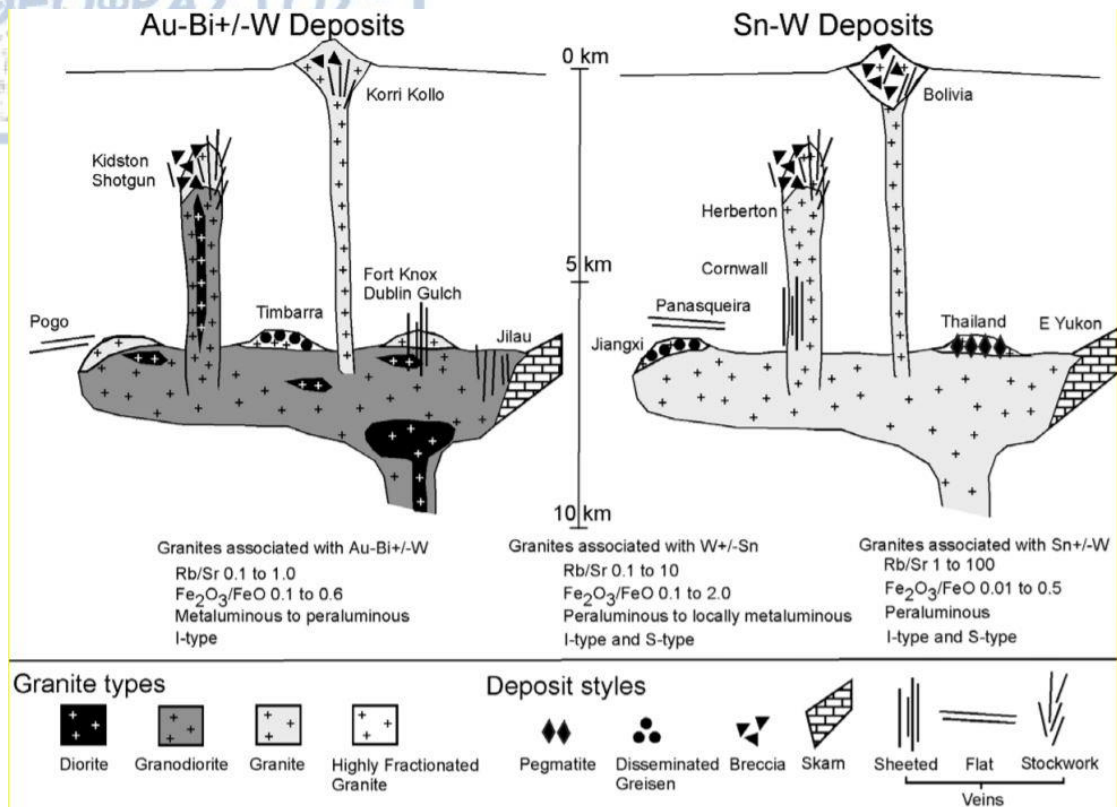
Διάσπαρτη μεταλλοφορία: Το κοίτασμα Timbarra, στη Νέα Νότια Ουαλία, είναι ένα παράδειγμα βαθιάς (~ 2 kbars), διάσπαρτης κατάθεσης χρυσού που σχετίζεται με διείδυση (Mustard et al., 1998, Mustard, 2001a, b). Ο χρυσός εμφανίζεται κατά κύριο λόγο διάσπαρτος σε εξαλλοιώσεις σερικήτη-αλβίτη-χαλαζία εντός του γρανίτη, αλλά και τοπικά σε πρωτογενείς μυαρολιτικές κοιλότητες, απλιτικές φλέβες, ρηξιγενείς φλέβες και φλέβες από χαλαζία-μολυβδαίνιο (Mustard, 2001a). Τα ρευστά εγκλείσματα περιέχουν ρευστά χαμηλής αλατότητας (<10 wt % NaCl equiv), πλούσια σε διοξείδιο του άνθρακα που παγιδεύτηκαν σε θερμοκρασίες 250°C έως 350 °C (Mustard, 2001b). Το Salave, στην Ισπανία, είναι ένα άλλο κοίτασμα διάσπαρτης μορφής, στο οποίο ο χρυσός εμφανίζεται στην κορυφή μιας βιοτιτικής-γρανοδιοριτικής πλουτωνικής οροσειράς Hercynian και στα πετρώδη τοιχώματά του (Harris, 1980). Τα ρευστά εγκλείσματα σε χαλαζία που σχετίζονται με την μεταλλοφορία του χρυσού είναι αραιά και πλούσια σε διοξειδίου του άνθρακα.

Επίπεδες φλέβες που φιλοξενούν κοιτάσματα: Το κοίτασμα χρυσού Rogo, στην Αλάσκα, έχει ερμηνευθεί ως μέρος της τάξης χρυσού που σχετίζεται με την εισβολή από τον Smith et al (1999), αλλά είναι αρκετά διαφορετική σε τύπους με πολλά από τα κοιτάσματα στη ζώνη χρυσού Tintina. Ομοιότητες με τα κοιτάσματα χρυσού που σχετίζονται με τη διείδυση περιλαμβάνουν ισχυρή συσχέτιση χρυσού-βισμούθιου, μειωμένο μέταλλευμα (μαγνητοπυρίτη), χαμηλή συγκέντρωση σουλφιδίων (<3vol%), πηγματίτη και απλίτη μέσα στο

κοίτασμα. Ωστόσο, βρίσκεται απομακρυσμένα (~1,5 km) από ένα σημαντικό Κρητιδικό διεισδυτικό σώμα, παρά μέσα από ένα πλουτωνίτη. Οι δύο επίπεδες κοιλότητες χαλαζία που φιλοξενούν το χρυσό περιέχουν χαμηλής αλατότητας, πλούσια σε διοξείδιου του άνθρακα ($\pm$ μεθάνιο) εγκλείσματα με θερμοκρασίες ομογενοποίησης που κυμαίνονται από 308°C έως 470°C και πιέσεις παγίδευσης εκτιμώμενες να είναι 1,7 έως 2kbars.



Εικόνα 11: Σχηματικό γεωλογικό μοντέλο που δείχνει την σχέση μεταξύ των κοιτασμάτων χρυσού που σχετίζονται με διείσδυση, τα βάθη και τα υδροθερμικά ρευστά (Baker et al. 2002).



Εικόνα 12: Κοιτάσματα χρυσού που σχετίζονται με διείσδυση



Εικόνα 13: Χάρτης μεγάλων κοιτασμάτων χρυσού που σχετίζονται με διείσδυση.

3.2 Ο Ρόλος του Διοξειδίου του Άνθρακα στα όξινα μάγματα και οι επιπτώσεις των κοιτασμάτων χρυσού που σχετίζονται με διείδυση.

Από τα χαρακτηριστικά των ρευστών εγκλεισμάτων στα κοιτάσματα χρυσού που σχετίζονται με διείδυση είναι προφανές ότι υπάρχει συστηματική μεταβολή στους υδροθερμικούς τύπους ρευστών με το βάθος (Εικόνα 11). Τα συστήματα αβαθών επιπέδων περιέχουν πρώιμα μη αναμείξιμη άλμη και ατμούς που με διοξείδιο του άνθρακα, τα οποία είναι ευρέως αποδεκτά ως μαγματικά. Ρευστά χαμηλής αλατότητας, μπορεί να υπάρχουν και να ερμηνεύονται ως μετεωρικά. Στα βαθύτερα περιβάλλοντα, το διοξείδιο του άνθρακα είναι πιο άφθονο, ενώ η άλμη είναι λιγότερο συνηθισμένη και συνήθως καθυστερούν όταν υπάρχουν. Η μαγματική προέλευση σε υδατικά ρευστά, πλούσια σε διοξείδιο του άνθρακα και χαμηλής αλατότητας δεν είναι ευρέως αποδεκτή σε μοντέλα κοιτασμάτων για διάφορους λόγους. Πρώτον, οι περισσότερες όξινες διειδύσεις δεν περιέχουν μαγματικά ορυκτά που φέρουν άνθρακα και επομένως είναι κοινώς υποτιθέμενο ότι τα μάγματα δεν θα μπορούσαν να παράγουν διοξείδιο του άνθρακα (π.χ., Phillips and Zhou, 1999). Δεύτερον, μια μεγάλη πρόσφατη έρευνα που σχετίζεται με την εισβολή επικεντρώνεται σε αποθέσεις πορφυριτικού χαλκού που συνήθως περιέχουν άλμη υψηλής περιεκτικότητας σε αλάτι και ατμό με χαμηλής αλατότητας, χωρίς αξιόλογο διοξείδιο του άνθρακα. Συνεπώς, αυτοί οι τύποι ρευστών συχνά θεωρούνται ότι είναι ένδειξη των μαγματικών υδροθερμικών ρευστών. Τρίτον, τα πλούσια σε διοξείδιο του άνθρακα υδατικά ρευστά χαμηλής αλατότητας που συνδέονται μόνο με κοιτάσματα χρυσού, ερμηνεύονται συνήθως να είναι μεταμορφωμένης προέλευσης (Phillips and Powell, 1993).

Ο Lowenstern (2000, 2001) υπογράμμισε το γεγονός ότι το διοξείδιο του άνθρακα είναι το πιο κοινό αέριο στις ηφαιστειακές εκπνοές μετά το νερό. Το πιο σημαντικό είναι ότι το διοξείδιο του άνθρακα που προέρχεται από το μάγμα είναι πιθανό να είναι ακόμη πιο άφθονο σε βαθύτερα περιβάλλοντα φλοιού, επειδή είναι περίπου 10 φορές λιγότερο διαλυτό σε όξινα τήγματα από το νερό (Fogel and Rutherford, 1990). Το διοξείδιο του άνθρακα εμφανίζεται στη μοριακή μορφή των όξινων τηγμάτων και η διαλυτότητά του μειώνεται, με τη μείωση της πίεσης και την αύξηση της θερμοκρασίας (Lowenstern, 2000, 2001). Η χαμηλή διαλυτότητα του διοξειδίου του άνθρακα θα οδηγήσει στην πρώιμη έκλυση πτητικών ουσιών από ένα μάγμα με πολύ υψηλές πιέσεις από εκείνες που προβλέπονται για μάγματα που περιέχουν μόνο νερό. Για παράδειγμα, ο Giggenbach (1997) προβλέπει ότι ένα γρανιτικό τήγμα με μόλις 1.000 mg / kg (0.1 wt %) διοξείδιο του άνθρακα θα αρχίσει να κάνει φυσαλίδες σε πίεση 2 kbars (7 km). Το ίδιο μάγμα με γεωλογικά εφικτή περιεκτικότητα σε διοξείδιο του άνθρακα 10.000 mg / kg

(1 wt %) θα εξαγάγει ατμούς διοξειδίου του άνθρακα σε πιέσεις 20 kbars (70 km). Κατά συνέπεια, πολλά μάγματα που φέρουν διοξείδιο του άνθρακα θα περιέχουν μια ξεχωριστή φάση ατμού καθ' όλη τη διάρκεια της ανόδου τους από την πηγή (Giggenbach, 1997). Το Lowenstern (2001, σχήμα 5) απεικόνισε τη διαδικασία απαέρωσης για το σύστημα ρύλιθος- H_2O - CO_2 . Στο παράδειγμα του, έχει δείξει ότι ένα κορεσμένο με ατμό τήγμα στους 750°C και ~ 4.6 kbars με 2.000 ppmw (parts per million by weight) CO_2 και 5 wt% H_2O θα εκλύσει ένα ρευστό πλούσιο σε νερό όλο και περισσότερο κατά την άνοδό του. Σε υψηλές πιέσεις (> 3 kbars), το συστατικό διοξείδιο του άνθρακα (mol %) του ατμού θα είναι ίσο ή μεγαλύτερο από αυτό του νερού. Σε χαμηλότερες πιέσεις (< 1 kbar) και σε αβαθή συστήματα, τα ρευστά θα κυριαρχούνται από νερό με μικρή περιεκτικότητα σε διοξείδιο του άνθρακα.

Το διοξείδιο του άνθρακα θα έχει σημαντική επίδραση στη συμπεριφορά άλλων πτητικών στο τήγμα. Τα όξινα τήγματα τα οποία εκλύουν πρώιμα ρευστά, πλούσια σε διοξείδιο του άνθρακα, σταδιακά θα καταστούν περισσότερο συγκεντρωμένα σε νερό. Η επακόλουθη πτητική απελευθέρωση θα είναι επομένως πλούσια σε νερό. Το χλώριο εξέρχεται από ένα μάγμα υπό συνθήκες χαμηλής πίεσης από ότι είτε το διοξείδιο του άνθρακα είτε το νερό (Giggenbach, 1997). Εάν το μάγμα έχει φθάσει σε ένα αρκετά μικρό βάθος, τότε το χλώριο μπορεί να καταστεί αδιάλυτο στο τήγμα και κατά προτίμηση διαχωρίζεται στην υδατική φάση λόγω της υψηλότερης διαλυτότητάς του σε νερό από το διοξείδιο του άνθρακα (Webster and Holloway, 1988). Συνεπώς, η σειρά της έκλυσης ρευστών από ένα μάγμα που φέρει διοξείδιο του άνθρακα θα είναι πλούσια σε διοξείδιο του άνθρακα πρώιμα, χαμηλής αλατότητας, ακολουθούμενα από προοδευτικά περισσότερο αλατούχα υδατικά ρευστά (Shinohara και Kazahayo, 1995). Μάγματα που δεν έχουν διοξείδιο του άνθρακα είναι το αντίστροφο της αναμενόμενης έκλυσης ρευστού. Η έρευνα που διεξήχθη σε κοιτάσματα πορφυριτικού χαλκού υποθέτει απλοποιημένη συμπεριφορά φάσης με βάση το σύστημα NaCl - H_2O (π.χ., Cline και Bodnar, 1991). Αυτή είναι μια λογική υπόθεση, λόγω της έλλειψης διοξειδίου του άνθρακα στις περισσότερες καταθέσεις χαλκού πορφυρού. Cline and Bodnar (1991) έδειξαν ότι σε υψηλές πιέσεις ($> 1,3$ kbars), τα μάγματα που φέρουν H_2O - NaCl εκλύουν πρώτα τα ρευστά με την υψηλότερη αλατότητα, ακολουθούμενα από προοδευτικά ρευστά χαμηλής αλατότητας. Υπό συνθήκες χαμηλής πίεσης ($< 1,3$ kbars), τα πρώτα ρευστά που θα εκλυθούν θα είναι χαμηλής αλατότητας, αλλά θα είναι ασταθή και θα γίνουν μη αναμείξιμα, παράγοντας συνυπάρχουσα άλμη και ατμούς.

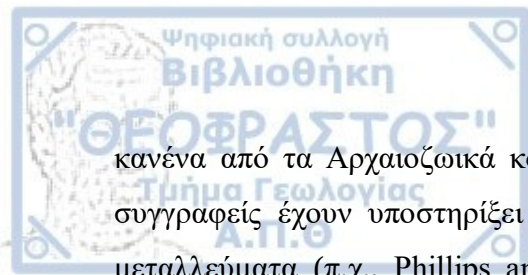
Η μη- αναμείξιμη συμπεριφορά στα κοιτάσματα χρυσού που σχετίζονται με διείδυση πρέπει να αξιολογηθεί στο σύστημα NaCl - H_2O - CO_2 . Η τυπική κλίμακα αλατότητας για ένα όξινο μάγμα είναι ~ 2 -10 wt % NaCl (Hedenquist et al., 1998). Bowers και Helgeson (1983)

έδειξαν ότι ένα ρευστό $\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2$ με αλατότητα 6 wt % NaCl θα σχηματίζει μη αναμειξιμη άλμη και χαμηλής αλατότητας ατμό που περιέχει διοξείδιο του άνθρακα σε χαμηλή πίεση (<1 kbar), ενώ σε υψηλότερη πίεση (>1 kbar), μη αναμειξιμες συμπεριφορές σχηματίζουν μίγματα $\text{CO}_2-\text{H}_2\text{O}$ που δεν έχουν άλμη. Αυτό συμβαδίζει με τις ενδείξεις ρευστοποίησης από κοιτάσματα χρυσού που σχετίζονται με τη διείσδυση, όπου η μη αναμειξιμότητα σε υδρατμούς-άλμη περιορίζεται σε αβαθή συστήματα. Ωστόσο, το πιο πρόσφατο έργο του Duan et al. (1995) πρότεινε ότι το πλούσιο σε άλμη πεδίο μη αναμειξιμότητας στο σύστημα $\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2-\text{NaCl}$ εκτείνεται σε συνθήκες υψηλότερης θερμοκρασίας και πίεσης από εκείνες που προβλέπονται από τους Bowers και Helgeson (1983). Επιπλέον, ο Lowenstern (2001) πρότεινε ότι η μη ανάμειξη ατμού-άλμης είναι πιθανό να είναι κοινή στα μεσαία και ανώτερα μαγματικά περιβάλλοντα που περιέχουν διοξείδιο του άνθρακα. Η έλλειψη μη αναμειξιμου ατμού-άλμη σε βαθύτερα κοιτάσματα χρυσού που σχετίζονται με την εισβολή μπορεί να οφείλεται στο χρονοδιάγραμμα της πτητικής απελευθέρωσης. Webster and Holloway (1988) έδειξαν ότι το διοξείδιο του άνθρακα σε μάγματα με πτητικά αυξάνει τη διαλυτότητα του χλωρίου και του νερού στο τήγμα. Έτσι, το αρχικό κλάσμα του ρευστού που εκλύεται από το τήγμα θα έχει διαφορετική σύνθεση από το τελευταίο, με διοξειδίου του άνθρακα να εκλύεται νωρίς και αργότερα το νερό και το χλώριο. Ένας άλλος παράγοντας που πρέπει να ληφθεί υπόψη είναι το κύριο μέρος σύνθεσης του τήγματος. Τα όξινα μάγματα που έχουν υψηλές περιεκτικότητες σε διοξείδιο του άνθρακα περιέχουν συνήθως μια σημαντική ποσότητα αφομοιωμένου φλοιού (όπως αυτές που σχετίζονται με τα κοιτάσματα χρυσού διείσδυσης, Lowenstern, 2000, 2001, Lang et al., 2000). Αυτά τα μάγματα θα έχουν χαμηλές αναλογίες $\text{Cl}/\text{H}_2\text{O}$ ($<0,035$, Candela και Piccoli, 1995), ενώ τα μάγματα που δεν έχουν σημαντική μόλυνση από το φλοιό (όπως αυτά που σχηματίζουν κοιτάσματα πορφυριτικού χαλκού) έχουν υψηλότερες αναλογίες $\text{Cl}/\text{H}_2\text{O}$ ($\sim 0,1$, Cline και Bodnar, 1991). Συνεπώς, η μαζική σύνθεση μαγματικού ρευστού σε μάγματα που σχετίζονται με κοιτάσματα χρυσού που έχουν σχέση με διεισδύσεις μπορεί να βρίσκεται στο κατώτερο άκρο της τυπικής περιοχής 2-10 wt % NaCl και να περιορίζει την ποσότητα διαθέσιμου χλωρίου για να σχηματίσει άλμη υπό μη αναμειξιμες συνθήκες.

Ένα σημαντικό σημείο που πρέπει να αντιμετωπιστεί, υπό το πρίσμα των αντιθέτων τύπων ρευστών, είναι το ζήτημα του τρόπου εμπλουτισμού του χρυσού και του τρόπου μεταφοράς του χρυσού σε κοιτάσματα χρυσού που σχετίζονται με διείσδυση. Seward and Barnes (1997) καταλήγουν στο συμπέρασμα ότι τα μεταλλικά ανθρακικά σύμπλοκα είναι συνήθως ασταθή. Στα βαθύτερα κοιτάσματα, ο χρυσός είναι πιθανόν να μεταφερθεί ως σύμπλοκο δισουλφιδίου λόγω των μειωμένων συνθηκών και της χαμηλής αλατότητας των ρευστών (Seward, 1991). Το βισμούθιο είναι πιθανό να μεταφερθεί και να κατακαθίσει με

παρόμοιο τρόπο, δεδομένης της ισχυρής συσχέτισης μεταξύ χρυσού και βισμούθιου στα βαθύτερα συστήματα (π.χ., Fort Knox, Dublin Gulch και Pogo, Πίνακας 1). Στα ρηχά συστήματα, η σύνθεση με χλωριούχα μπορεί να είναι σημαντική, αλλά μια ισχυρή συσχέτιση χρυσού-βισμούθιου στα κοιτάσματα ανεξάρτητα από τον ρευστό τύπο (π.χ. Shotgun) προτείνει παρόμοιους μηχανισμούς μεταφοράς. Η πρόσφατη αναλυτική εργασία για ρευστά εγκλείσματα σε κοιτάσματα πορφυριτικού χαλκού-χρυσού, πλούσια σε ατμούς υποδηλώνει ότι ο χρυσός είναι πιθανό να ευνοεί τη μεταφορά ατμών πιθανώς ως σύμπλεγμα δισουλφιδίων (Ulrich et al., 1999). Ένας παρόμοιος μηχανισμός μεταφοράς μπορεί να συναχθεί για αβαθή κοιτάσματα χρυσού που σχετίζονται με την εισβολή.

Τα δεδομένα αυτά δείχνουν ότι υπάρχουν αντίθετοι τύποι ρευστών σε κοιτάσματα χρυσού που σχετίζονται με διείσδυση και ότι το βάθος της τοποθέτησης είναι ένας σημαντικός παράγοντας στους τύπους ρευστών που εξελίσσονται από το μάγμα. Lowenstern (2001) επεσήμανε ότι το διοξείδιο του άνθρακα έχει μόνο έναν έμμεσο ρόλο στη μεταφορά και εναπόθεση χρυσού. Αυτό υποστηρίζεται από το γεγονός ότι ο εμπλουτισμός με χρυσό συμβαίνει στα χρυσά συστήματα που σχετίζονται με την εισβολή και τα οποία έχουν ευρύ φάσμα συγκέντρωσης διοξειδίου του άνθρακα. Αν και το διοξείδιο του άνθρακα μπορεί να μην έχει άμεσο ρόλο στη μεταφορά του χρυσού, είναι πιθανό να έχει σημαντικό ρόλο στην έκλυση και εξέλιξη του μαγματικού ρευστού. Οι υψηλές πιέσεις στις οποίες το διοξείδιο του άνθρακα μπορεί να εξαχθεί από ένα τήγμα επιτρέπουν την παραγωγή ρευστού σε μεγάλες βάσεις. Η πρόωρη απελευθέρωση διοξειδίου του άνθρακα από τα τήγματα θα αυξήσει τη σχετική συγκέντρωση άλλων πτητικών στο τήγμα (περιλαμβανομένων ενδεχομένων συμπλοκών δισουλφιδίων), έτσι ώστε τα ρευστά που σχηματίζουν μεταλλεύματα να μπορούν επίσης να παραχθούν σε ένα ευρύ φάσμα βάθους. Από αυτή την άποψη, τα κοιτάσματα χρυσού που σχετίζονται με την εισβολή είναι περισσότερο παρόμοια με τα κοιτάσματα κασσίτερου, βολφραμίου και μολυβδαινίου που σχετίζονται με διείσδυση, οι οποίες επίσης σχηματίζονται σε ένα ευρύ φάσμα βάθους και παρουσιάζουν παρόμοια περιοχή ρευστών τύπων (π.χ. Linnen, 1998). Για πολλά από τα κοιτάσματα χρυσού που φιλοξενούνται με εισβολή, το μη μαγματικό ορογενές μοντέλο χρυσού δεν μπορεί να εξηγήσει τους τύπους ρευστών που παρατηρήθηκαν. Πολλά Αρχαιοζωικά Καναδικά κοιτάσματα χρυσού συνδέονται επίσης με όξινες εισβολές και οι Cameron and Hattori (1987) πρότειναν ένα μαγματικό μοντέλο για τη γέννησή τους, παρόμοιο με αυτό που προτάθηκε εδώ. Οι Burrows and Spooner (1989) έδειξαν ότι ο χρυσός εμπλουτίστηκε προοδευτικά μέσω διαδικασιών κλασματικής κρυστάλλωσης στις περιοχές Val d'Or και Timmins με τρόπο παρόμοιο με αυτόν που παρατηρήθηκε στο Fort Knox (Bakke, 1995, McCoy et al., 1997) και Timbarra (Mustard et al., 1998, Mustard, 2001a). Ωστόσο,



κανένα από τα Αρχαιοζωικά κοιτάσματα δεν περιέχουν άλμη και, κατά συνέπεια, πολλοί συγγραφείς έχουν υποστηρίξει μια μη μαγματική πηγή για τα ρευστά που σχηματίζουν μεταλλεύματα (π.χ., Phillips and Powell, 1993). Επομένως, τα Φανεροζωικά κοιτάσματα χρυσού που σχετίζονται με διείσδυση μπορούν να παρέχουν την ελλιπή αναλογία μεταξύ των εισβολών και ορισμένων συστημάτων χρυσού του Αρχαιοζωικού.

4. Ταξινόμηση, διάκριση και εξερεύνηση συστημάτων χρυσού που σχετίζονται με διείσδυση

Τα συστήματα χρυσού που σχετίζονται με διείσδυση (IRGS) είναι μια πρόσφατη (1999) ταξινόμηση κοιτασμάτων (βασισμένη κυρίως σε καλά μελετημένα κοιτάσματα στην Αλάσκα και στο Yukon), η οποία όμως δεν είχε σωστή εφαρμογή. Τα κοιτάσματα χρυσού αποδίδονται λανθασμένα σε μια ταξινόμηση (IRGS) επειδή:

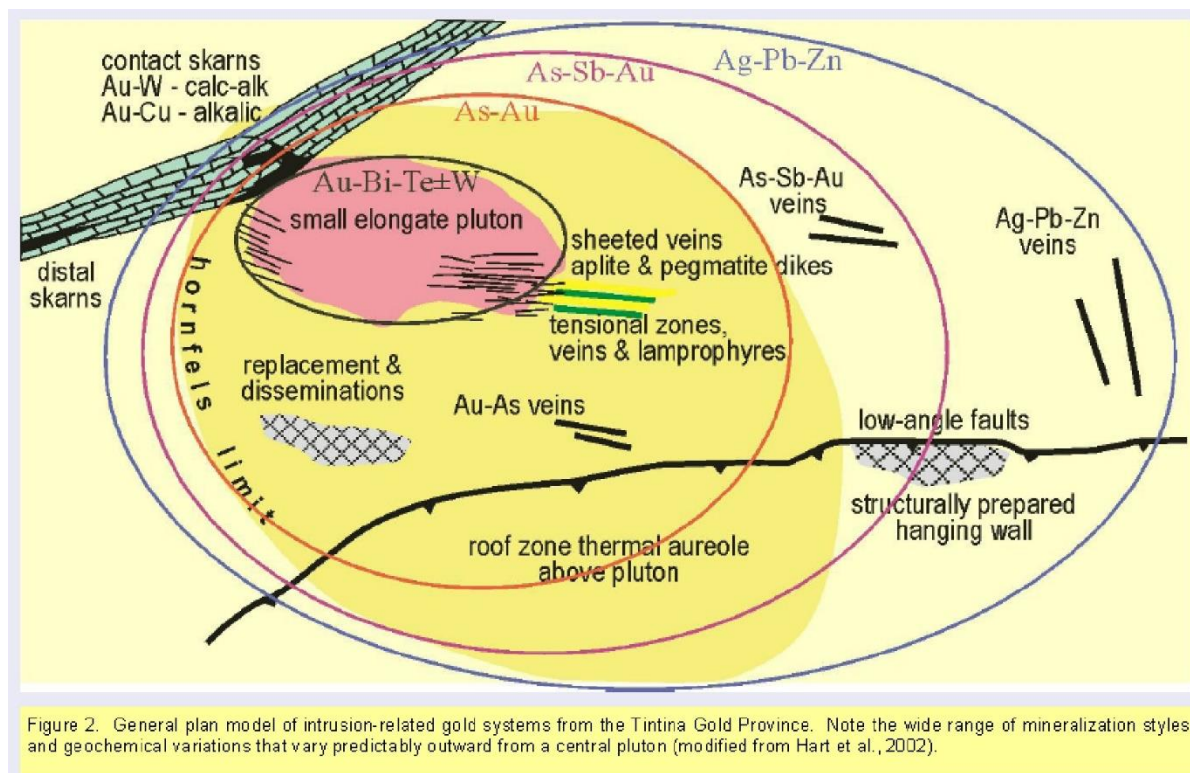
1. Η ονοματολογία των σχετικών με διείσδυση μοντέλων χρυσού εξελίχθηκε ταχέως.
2. Τα χαρακτηριστικά της ταξινόμησης καθορίζονται ευρέως ώστε να περιλαμβάνουν ένα ευρύ φάσμα τύπων κοιτασμάτων που αλληλεπικαλύπτονται με άλλους τύπους κοιτασμάτων χρυσού.
3. Οι γρανιτικές διεισδύσεις είναι κοινά χαρακτηριστικά των ορογενών ζωνών και είναι μια προφανής πηγή ρευστού για οποιαδήποτε εμφάνιση χρυσού.

Οι διφορούμενες ή κακώς καθορισμένες ταξινομήσεις μοντέλων κοιτασμάτων είναι η μεγαλύτερη αδυναμία του οικονομικού γεωλόγου, καθώς οδηγούν σε αναποτελεσματικές στρατηγικές εξερευνήσεις. Οι ταξινομήσεις κοιτασμάτων μπορούν να διαφοροποιηθούν καλύτερα, χρησιμοποιώντας μια σειρά χαρακτηριστικών και όχι χαρακτηριστικά που είναι κοινά για πολλούς τύπους υδροθερμικών κοιτασμάτων. Στη συνέχεια, παρουσιάζεται συνοπτικά η σημερινή κατάσταση των κοιτασμάτων χρυσού που σχετίζονται με διείσδυση και ολοκληρώνεται με ένα σύνολο χαρακτηριστικών με τα οποία τα συστήματα IRGS μπορεί να διακριθούν από άλλους τύπους κοιτασμάτων χρυσού σε γεωλογικά περιβάλλοντα.

Σημερινή κατάσταση

Τα κοιτάσματα χρυσού που σχετίζονται με διείσδυση, όπως χρησιμοποιούνται σήμερα στη γεωλογική βιβλιογραφία, αναφέρονται σε μια ασυνάρτητη ομάδα κοιτασμάτων με ευρύτατα χαρακτηριστικά, γρανιτοειδείς ενώσεις και τεκτονικά περιβάλλοντα. Η ταξινόμηση αφορά τα κοιτάσματα IRGS. Τα χαρακτηριστικά τους παρατίθεται παρακάτω, όπως καταρτίστηκαν από Lang and Baker (2001), με τις συνεισφορές από Lang et al. (2000) and Thompson and Newberry (2000). Έμφαση δίνεται σε καλά μελετημένα παραδείγματα από την Αλάσκα και το Yukon. Το σχέδιο προοπτικής του μοντέλου παρουσιάζεται στο σχήμα (Εικόνα 14). Ο κύριος λόγος για τη διάκριση μεταξύ ταξινομήσεων χρυσού που σχετίζονται με διείσδυση και ορογενή χρυσού είναι οι θεμελιώδεις διαφορετικές προσεγγίσεις στη μεθοδολογία εξερεύνησης χρυσού που απαντώνται από κάθε μοντέλο. Οι ταξινομήσεις χρυσού που σχετίζονται με τις εισχωρήσεις ποικίλουν σε μεγάλο βαθμό, αλλά μοιράζονται και ένα

μεγάλο αριθμό συναφών χαρακτηριστικών με τα ορογενή συστήματα χρυσού. Το μοντέλο IRGS συγκαταλέγεται στα καλύτερα καταγεγραμμένα μοντέλα που σχετίζονται με διείσδυση και διαφοροποιούνται εύκολα από άλλες ταξινομήσεις κοιτασμάτων χρυσού για ένα σύνολο διακριτών ιδιαίτερων χαρακτηριστικών που αφορούν την παραγωγή ρευστών σε ένα ψυγμένο πλουτωνίτη.



Εικόνα 14: Γενικό σχέδιο μοντέλου χρυσών συστημάτων που σχετίζονται με την εισβολή από την επαρχία χρυσού Tintina. Σημειώνεται το ευρύ φάσμα των μορφών μεταλλοφορίας και οι γεωχημικές παραλλαγές που ποικίλλουν από τον κεντρικό πλουτωνίτη.

1. Μεταλλική, υποαλκαλική διείσδυση ενδιάμεσων προς όξινων συνθέσεων που βρίσκονται κοντά στο όριο μεταξύ σειρών ιλμενίτη και μαγνητίτη.
2. Ανθρακικά υδροθερμικά ρευστά.
3. Μια μεταλλική συναρμολόγηση που συνδυάζει μεταβλητό χρυσό με αυξημένα Bi, W, As, Mo, Te ή/και Sb και χαμηλές συγκεντρώσεις βασικών μετάλλων.
4. Χαμηλή περιεκτικότητα σε θειούχα ορυκτά ως επί το πλείστον <5 vol % με μειωμένη συγκέντρωση μεταλλικών ορυκτών η οποία περιλαμβάνει αρσеноπυρίτη, μαγνητοπυρίτη και σιδηροπυρίτη, ενώ στερείται μαγνητίτη ή αιματίτη.
5. Περιορισμένη περιοδικά, συνήθως αδύναμη υδροθερμική εξαλλοίωση.
6. Τεκτονικό περιβάλλον καλά ενσωματωμένο σε υποθετικά ή αναγνωρισμένα συγκλίνοντα όρια πλακών.

7. Τοποθεσία σε μαγματικές επαρχίες που είναι καλύτερα ή παλαιότερα γνωστά για κοιτάσματα βολφραμίου ή/και κασσιτέρου.

Μεταξύ αυτών των χαρακτηριστικών που απαριθμούνται παραπάνω, τα πρώτα τέσσερα είναι κοινά χαρακτηριστικά που σχετίζονται με ορογενή κοιτάσματα και υπάρχει το ενδεχόμενο εσφαλμένης ταξινόμησης. Μόνο τα δυο τελευταία είναι ενδεχομένως διαγνωστικά. Παρακάτω, παρουσιάζονται άλλα διακριτά γνωρίσματα. Σχεδιάζονται για να διαφοροποιήσουν τα κοιτάσματα χρυσού που σχετίζονται με διείσδυση, τα οποία είναι προϊόντα ρευστών τοπικής κλίμακας που προέρχονται από ψυγμένο πλουτωνίτη, από ορογενή κοιτάσματα που θεωρούνται ότι προέρχονται από ρευστά κλίμακας φλοιού που παράγονται μέσω μεταμορφικής αφυδάτωσης (Groves et al., 1998; Stuwe, 1998). Μερικά χαρακτηριστικά διαφοροποιούν αποκλειστικά τα μειωμένα συστήματα IRGS. Όμως, κανένα δεν είναι διαγνωστικό, αλλά μια σειρά από αυτά είναι πιο αποτελεσματική για να αποδείξει την προέλευση που σχετίζεται με διείσδυση.

Ζώνωση μετάλλων

Οι θερμικές κλίσεις που περιβάλλουν τα ψυγμένα πλουτωνικά είναι απότομες και καταλήγουν σε θερμοκρασιακά εξαρτώμενες ομόκεντρες μεταλλικές ζώνες που αναπτύσσονται προς τα έξω από τα πλουτωνικά περιθώρια για αποστάσεις έως και μερικά χιλιόμετρα ή ακριβώς πέρα από την θερμική ζώνη επαφής. Η μεταλλοφορία στον πλησιέστερο πλουτωνίτη μπορεί να συσχετιστεί με μεταλλοφορία που φιλοξενείται από Bi, Te, W και στη ζώνη επαφής θα έχει As ή Sb και η περιφερειακή μεταλλοφορία μπορεί να συσχετίζεται με Ag-Pb-Zn (Εικόνα 14).

Χαρακτήρας πλουτωνιτών

Η μεταλλοφορία πλουτωνιτών έχουν χαρακτηριστεί “smoking gun”, που υποδηλώνουν την πιθανότητα δημιουργίας υδροθερμικών ρευστών. Τα φυσικά χαρακτηριστικά και η γεωχημική υποστήριξη θα πρέπει να υπάρχουν για υψηλά περιεχόμενα πτητικών, έκλυση ρευστών, απόδειξη ταχείας κλασμάτωσης, πλουτωνική ζώνη, πορφυριτική υφή, παρουσία απλιτών και πηγματιτικών διερριξηγενών φλεβών, φλέβες χαλαζία και τουρμαλίνη, εξαλλοιώσεις greisen, μυαρολιτικές κοιλότητες, κατά προτίμηση στις πλουτωνικές κορυφές (Εικόνα 15, 16).



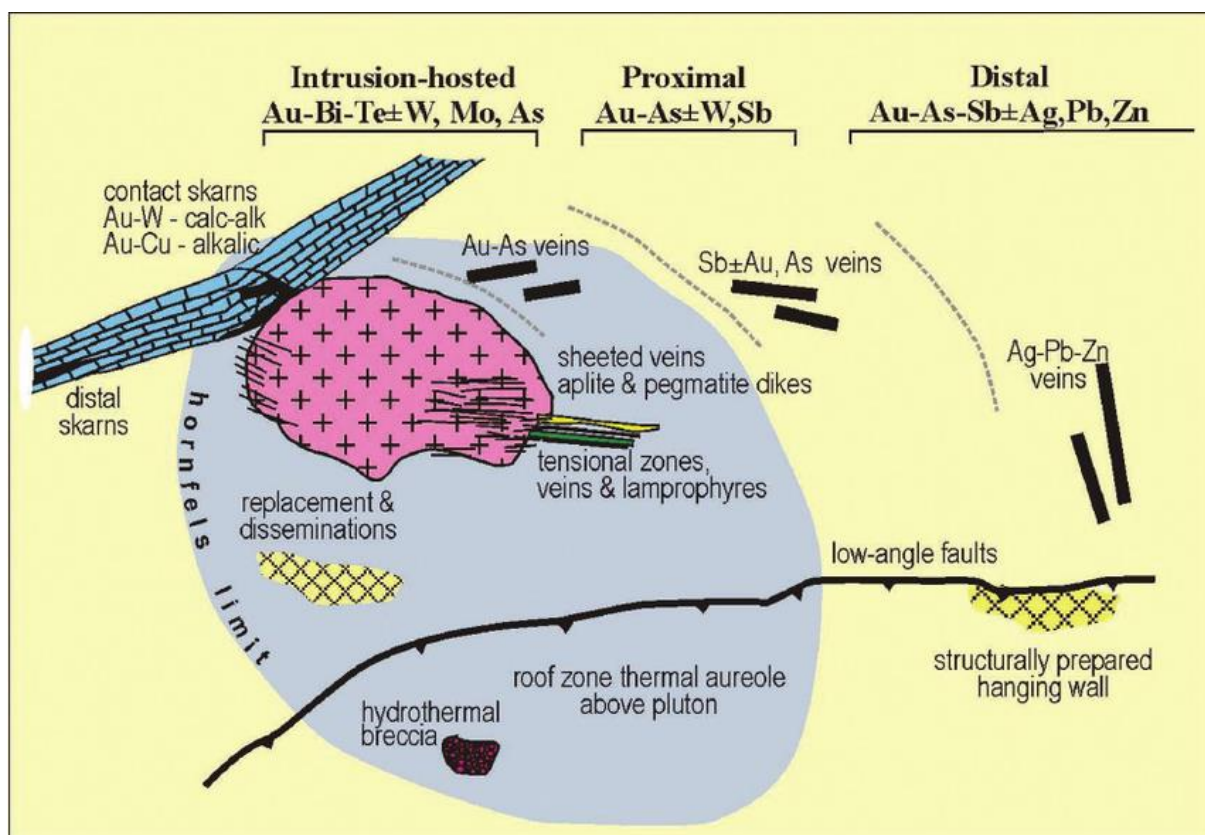
Εικόνα 15: Κοιλότητα από τον πλουτωνίτη στο Fort Knox που αποτέθηκε χαλαζίας, άστριοι και αμφίβολοι. Χαρακτηριστικά όπως αυτό είναι ενδεικτικά του ότι ο πλουτωνίτης έχει φτάσει σε κορεσμό ρευστών και έχει παραγάγει υδροθερμικό ρευστό και εμφανίζεται κοντά σε πηγματιτικές ή απλιτικές ρηξιγενείς φλέβες.



Εικόνα 16: Κοιλότητες που έχουν πληρωθεί με υδροθερμικά ρευστά.

5. Κατανομή των κοιτασμάτων διείσδυσης

Πολλές φορές οι ισογενετικές παραγενέσεις τοποθετούνται σε συγκεντρικές ζώνες (Εικόνα 14, 17) γύρω από το κέντρο της μητρικής μεταλλογενετικής μαγματικής διείσδυσης. Αυτό είναι γνωστό ως ζωνώδης κατανομή των μεταλλευμάτων ή ζωνώδης ανάπτυξη των κοιτασμάτων. Αυτή η ζώνωση εκδηλώνεται ως μια μεταβολή ορυκτολογική ή μεταβολή στα μεταλλικά κύρια στοιχεία ή ιχνοστοιχεία από τη μια ζώνη στην άλλη. Η μεταλλοφορία που σχετίζεται με διείσδυση και φιλοξενείται συνήθως περιέχει Au-Bi-Te±W, Mo, As. Η αμέσως κοντινή ζώνη έχει Au-As±W, Sb, ενώ η πιο απομακρυσμένη Au-As-Sb±Ag, Pb, Zn.



Εικόνα 17: Συστήματα χρυσού που σχετίζονται με διείσδυση.



6.Βιβλιογραφία

Baker, T. (2002). Emplacement depth and carbon dioxide-rich fluid inclusions in intrusion-related gold deposits. *Economic Geology*, 97(5), 1111-1117.

Hart, C. J. (2005). Classifying, distinguishing and exploring for intrusion-related gold systems. *The Gangue*, 87(1), 4-9.

Thompson, J. F. H., Sillitoe, R. H., Baker, T., Lang, J. R., & Mortensen, J. K. (1999). Intrusion-related gold deposits associated with tungsten-tin provinces. *Mineralium Deposita*, 34(4), 323-334.

<http://www.>

cmicapital.com/Doc_Server/SEEGF_Docs/SEEGF_2005/Short%20Courses/Baker_IRGS_SEEurope.pdf

https://www.google.com/search?q=intrusion%20related%20gold%20deposits%20in%20alaska&tbm=isch&tbs=rimg:CchL0v7e6Q8nYU8VLAyKC6_1N&rlz=1C1GCEA_enGR804GR804&hl=el&sa=X&ved=0CBwQuIBahcKEwiIlaL8iP3rAhUAAAAAHQAAAAAQKw&biw=1899&bih=882#imgsrc=QmiJyBcrO57mFM

https://www.google.com/search?q=intrusion%20related%20gold%20systems%20deposits&tbm=isch&hl=el&hl=el&tbs=rimg:CchL0v7e6Q8nYU8VLAyKC6_1N&rlz=1C1GCEA_enGR804GR804&sa=X&ved=0CAIQrnZqFwoTCJjpx-CN_esCFQAAAAAdAAAAABAH&biw=1899&bih=882#imgsrc=NobvBPq99mvUVM

https://www.google.com/search?q=intrusion+related+gold+deposits&tbm=isch&ved=2ahUKEwjA_LaC8YvsAhXK0oUKHbbjDpAQ2-cCegQIABAA&oq=intrusion+related+gold+deposits&gs_lcp=CgNpbWcQA1AAWABgmY4LaABwAHgAgAEAiAEAkGEAmAEAqgELZ3dzLXdpei1pbWc&sclient=img&ei=SdtxX4C0HMqllwS2x7uACQ&bih=943&biw=1920&rlz=1C1GCEA_enGR804GR804#imgsrc=iMsm-fBLPeZinM

https://www.google.com/search?q=intrusion+related+gold+deposits+&tbm=isch&ved=2ahUKEwiak7a6iv3rAhUDKHoKHSvQD5oQ2-cCegQIABAA&oq=intrusion+related+gold+deposits+&gs_lcp=CgNpbWcQAzIECCMQJzIECAAQHlDU5A1YufiNYOj3DWgAcAB4AIABvgGIAbgLkgEDMC45mAEAoAEBqgELZ3dzLXdpei1pbWfAAQE&sclient=img&ei=sRhqX9r2KoPUaKugv9AJ&bih=882&biw=1899&rlz=1C1GCEA_enGR804GR804&hl=el#imgsrc=yEvS_t7pDyfkEM



[https://www.google.com/search?q=intrusion+related+gold+deposits+in+alaska&tbm=isch&ved=2ahUKEwiEpOje7YvsAhVMZxoKHV6cBNoQ2-](https://www.google.com/search?q=intrusion+related+gold+deposits+in+alaska&tbm=isch&ved=2ahUKEwiEpOje7YvsAhVMZxoKHV6cBNoQ2-cCegQIABAA&oq=intrusion+related+gold+&gs_lcp=CgNpbWcQARgAMgQIIxAnMgQIABAEogcIIxDqAhAnOgUIABCxAzoCCABQtwFYyLoEYNm_BGgKcAB4BIAB2QGIAeI3kgEGMC40My4ymAE AoAEBqgELZ3dzLXdpei1pbWewAQrAAQE&sclient=img&ei=2ddxX8TTHMzOad64ktAN&bih=943&biw=1920&rlz=1C1GCEA_enGR804GR804#imgsrc=juE0VNeVvLTQIM)

[cCegQIABAA&oq=intrusion+related+gold+&gs_lcp=CgNpbWcQARgAMgQIIxAnMgQIABAEogcIIxDqAhAnOgUIABCxAzoCCABQtwFYyLoEYNm_BGgKcAB4BIAB2QGIAeI3kgEGMC40My4ymAE AoAEBqgELZ3dzLXdpei1pbWewAQrAAQE&sclient=img&ei=2ddxX8TTHMzOad64ktAN&bih=943&biw=1920&rlz=1C1GCEA_enGR804GR804#imgsrc=juE0VNeVvLTQIM](https://www.google.com/search?q=intrusion+related+gold+deposits+in+alaska&tbm=isch&ved=2ahUKEwiEpOje7YvsAhVMZxoKHV6cBNoQ2-cCegQIABAA&oq=intrusion+related+gold+&gs_lcp=CgNpbWcQARgAMgQIIxAnMgQIABAEogcIIxDqAhAnOgUIABCxAzoCCABQtwFYyLoEYNm_BGgKcAB4BIAB2QGIAeI3kgEGMC40My4ymAE AoAEBqgELZ3dzLXdpei1pbWewAQrAAQE&sclient=img&ei=2ddxX8TTHMzOad64ktAN&bih=943&biw=1920&rlz=1C1GCEA_enGR804GR804#imgsrc=juE0VNeVvLTQIM)

[https://www.google.com/search?q=intrusion+related+gold+deposits+in+alaska&tbm=isch&ved=2ahUKEwiEpOje7YvsAhVMZxoKHV6cBNoQ2-](https://www.google.com/search?q=intrusion+related+gold+deposits+in+alaska&tbm=isch&ved=2ahUKEwiEpOje7YvsAhVMZxoKHV6cBNoQ2-cCegQIABAA&oq=intrusion+related+gold+&gs_lcp=CgNpbWcQARgAMgQIIxAnMgQIABAEogcIIxDqAhAnOgUIABCxAzoCCABQtwFYyLoEYNm_BGgKcAB4BIAB2QGIAeI3kgEGMC40My4ymAE AoAEBqgELZ3dzLXdpei1pbWewAQrAAQE&sclient=img&ei=2ddxX8TTHMzOad64ktAN&bih=943&biw=1920&rlz=1C1GCEA_enGR804GR804#imgsrc=Tp7R5pYcPnY2EM)

[cCegQIABAA&oq=intrusion+related+gold+&gs_lcp=CgNpbWcQARgAMgQIIxAnMgQIABAEogcIIxDqAhAnOgUIABCxAzoCCABQtwFYyLoEYNm_BGgKcAB4BIAB2QGIAeI3kgEGMC40My4ymAE AoAEBqgELZ3dzLXdpei1pbWewAQrAAQE&sclient=img&ei=2ddxX8TTHMzOad64ktAN&bih=943&biw=1920&rlz=1C1GCEA_enGR804GR804#imgsrc=Tp7R5pYcPnY2EM](https://www.google.com/search?q=intrusion+related+gold+deposits+in+alaska&tbm=isch&ved=2ahUKEwiEpOje7YvsAhVMZxoKHV6cBNoQ2-cCegQIABAA&oq=intrusion+related+gold+&gs_lcp=CgNpbWcQARgAMgQIIxAnMgQIABAEogcIIxDqAhAnOgUIABCxAzoCCABQtwFYyLoEYNm_BGgKcAB4BIAB2QGIAeI3kgEGMC40My4ymAE AoAEBqgELZ3dzLXdpei1pbWewAQrAAQE&sclient=img&ei=2ddxX8TTHMzOad64ktAN&bih=943&biw=1920&rlz=1C1GCEA_enGR804GR804#imgsrc=Tp7R5pYcPnY2EM)

[https://www.google.com/search?q=intrusion+related+gold+deposits+in+alaska&tbm=isch&ved=2ahUKEwiEpOje7YvsAhVMZxoKHV6cBNoQ2-](https://www.google.com/search?q=intrusion+related+gold+deposits+in+alaska&tbm=isch&ved=2ahUKEwiEpOje7YvsAhVMZxoKHV6cBNoQ2-cCegQIABAA&oq=intrusion+related+gold+&gs_lcp=CgNpbWcQARgAMgQIIxAnMgQIABAEogcIIxDqAhAnOgUIABCxAzoCCABQtwFYyLoEYNm_BGgKcAB4BIAB2QGIAeI3kgEGMC40My4ymAE AoAEBqgELZ3dzLXdpei1pbWewAQrAAQE&sclient=img&ei=2ddxX8TTHMzOad64ktAN&bih=943&biw=1920&rlz=1C1GCEA_enGR804GR804#imgsrc=D M7PI93DwW7eQM)

[cCegQIABAA&oq=intrusion+related+gold+&gs_lcp=CgNpbWcQARgAMgQIIxAnMgQIABAEogcIIxDqAhAnOgUIABCxAzoCCABQtwFYyLoEYNm_BGgKcAB4BIAB2QGIAeI3kgEGMC40My4ymAE AoAEBqgELZ3dzLXdpei1pbWewAQrAAQE&sclient=img&ei=2ddxX8TTHMzOad64ktAN&bih=943&biw=1920&rlz=1C1GCEA_enGR804GR804#imgsrc=D M7PI93DwW7eQM](https://www.google.com/search?q=intrusion+related+gold+deposits+in+alaska&tbm=isch&ved=2ahUKEwiEpOje7YvsAhVMZxoKHV6cBNoQ2-cCegQIABAA&oq=intrusion+related+gold+&gs_lcp=CgNpbWcQARgAMgQIIxAnMgQIABAEogcIIxDqAhAnOgUIABCxAzoCCABQtwFYyLoEYNm_BGgKcAB4BIAB2QGIAeI3kgEGMC40My4ymAE AoAEBqgELZ3dzLXdpei1pbWewAQrAAQE&sclient=img&ei=2ddxX8TTHMzOad64ktAN&bih=943&biw=1920&rlz=1C1GCEA_enGR804GR804#imgsrc=D M7PI93DwW7eQM)