



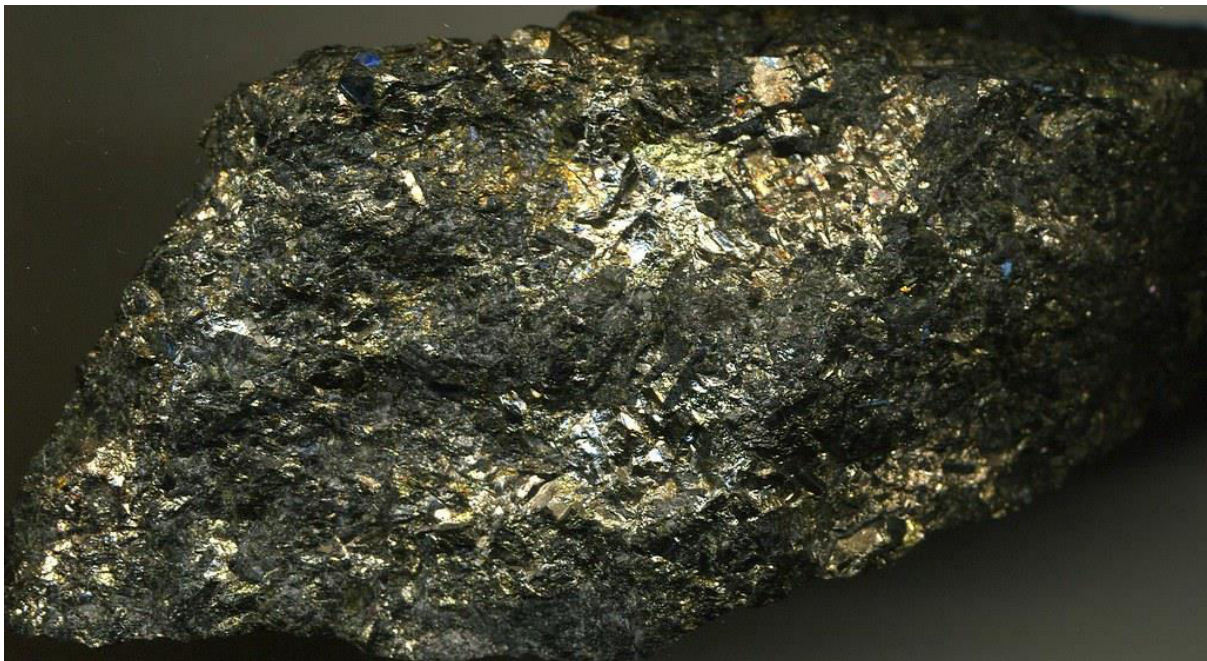
ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ
ΤΟΜΕΑΣ ΟΡΥΚΤΟΛΟΓΙΑΣ - ΠΕΤΡΟΛΟΓΙΑΣ -
ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΟΛΟΓΙΑΣ



ΑΓΓΕΛΟΣ Γ. ΓΚΑΤΣΟΣ

ΜΑΓΜΑΤΙΚΑ ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΑ ΣΟΥΛΦΙΔΙΩΝ Ni-Cu-Co-(PGE)

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ





ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ
2019





ΑΓΓΕΛΟΣ Γ. ΓΚΑΤΣΟΣ

ΜΑΓΜΑΤΙΚΑ ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΑ ΣΟΥΛΦΙΔΙΩΝ Ni-Cu-Co-(PGE)

Υποβλήθηκε στο Τμήμα Γεωλογίας
Τομέας Ορυκτολογίας - Πετρολογίας - Κοιτασματολογίας

Επιβλέπων Καθηγητής

Καθηγητής Βασίλειος Μέλφος

© Άγγελος Γ. Γκατσός, 2019
Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All right reserved.



© Άγγελος Γ. Γκάτσος, Τμήμα Γεωλογίας Α.Π.Θ., Τομέας Γεωφυσικής, 2019

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος.

ΜΑΓΜΑΤΙΚΑ ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΑ ΣΟΥΛΦΙΔΙΩΝ Ni-Cu-Co-(PGE) – *Διπλωματική Εργασία*

© Aggelos G. Gkatsos, School of Geology, Dept. of Petrology-Minerology-ore geology, 2019

All rights reserved.

MAGMATIC Ni-Cu-Co-(PGE) SULFIDE 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.



Contents

Περίληψη	1
1. Γενικά.....	4
2. Γεωτεκτονικό περιβάλλον	6
2.1 Γενικά.....	6
2.2. παράγοντες σχηματισμού κοιτάσματος Ni-Cu-(PGE).....	7
2.3 Τρόπος σχηματισμού κοιτασμάτων σουλφιδίων	8
2.3.1 Μεταφορά Θείου από την πηγή στο μάγμα	8
2.3.2 Χρονική στιγμή κορεσμού σουλφιδίων	9
3. Κοιτάσματα Ni-Cu-(PGE) στον κόσμο	14
3.1 Γενικά.....	14
3.2 Κοίτασμα του Noril'sk, Siberia	14
3.3. Κοίτασμα Voisey's Bay Ni-Cu-Co.....	17
3.4. Κοίτασμα Jinchuan, Κίνα	21
<i>Προέλευση της διείδυσης και ορυκτοποίηση</i>	22
3.4.1 Κοιτάσματα συγγενικά με κομματίτες, Norseman-Wiluna ζωνη, Δυτική Αυστραλία....	23
3.5. Ορυκτοποίηση του συμπλέγματος Duluth.....	25
3.6. Κοίτασμα Sudbury	26
3.6.1. Γεωλογικό περιβάλλον.....	27
3.6.2. Κοίτασμα μεταλλεύματος.....	29
3.6.3. Προέλευση του πυριγενούς συμπλέγματος του Sudbury και τα μεταλλεύματά του	30
3.6.4.Πιθανά μοντέλα για το πυριγενές σύμπλεγμα του Sudbury	32
3.6.5 Προέλευση των σουλφιδίων	33
3.7. Συμπεράσματα και εφαρμογές για Εξερεύνηση	34
4. Πετρώματα ξενιστές και μητρικά μάγματα	37
4.1. Γενικά.....	37
4.2. δυνητικότητα μεταλλοφορίας σε μάγματα	38
4.2.1. Σύσταση των μανδουακών μαγμάτων	38
4.2.2. Σύσταση της πηγής	39
4.2.4. Μηχανισμός τήξης	39
4.2.5.Περιεκτικότητα σε μέταλλα.....	40
4.2.3. Τήξη μανδύα	40
.....	41



Περίληψη

Τα μαγματικά κοιτάσματα σουλφιδίων Ni-Cu-(PGE) σχηματίζονται όταν μανδυακό βασικό και υπερβασικό μάγμα γίνεται κορεσμένο σε σουλφίδια και απομονώνει το μη μιγνυόμενο τήγμα σουλφιδίων, κατά την αλληλεπίδραση του μάγματος με τον φλοιό.

Τα σημαντικότερα μαγματικά κοιτάσματα Ni-Cu-(PGE) είναι: (1) το κοιτάσμα του Noril'sk στην Σιβηρία, (2) το κοιτάσμα Voisey's Bay στον Καναδά, (3) το κοιτάσμα Jinchuan στην Κίνα, (4) το σύμπλεγμα Duluth στην Μινεσότα των ΗΠΑ, (5) το Sudbury στον Καναδά. Καθένα από αυτά θεωρείται σημαντικό λόγω των γεωλογικών και γεωτεκτονικών συνθηκών που επικρατούν σε κάθε περίπτωση, αλλά και λόγω του οικονομικού ενδιαφέροντος που παρουσιάζουν, καθώς ο όγκος του μεταλλεύματος τους επιτρέπει την εκμετάλλευσή τους.

Όσον αφορά τα πετρώματα ξενιστές των κοιτασμάτων, με εξαίρεση το κοιτάσμα του Sudbury, το οποίο σχηματίστηκε από πρόσκρουση μετεωρίτη, τα μαγματικά κοιτάσματα Ni-Cu-(PGE) έχουν σαν ξενιστές έναν μεγάλο φάσμα ολιβινικών μανδυακών πετρωμάτων σε αυτή την κατηγορία ανήκουν: κοματίτες, κοματιτικοί βασάλτες, δολερίτες, αλκαλι-βασαλτες, αλκαλι-πικρίτες.



Abstract

Magmatic Ni-Cu-(PGE) sulfide deposits form when mafic and ultramafic magmas derived from the mantle, become saturated in sulfide and segregate immiscible sulfide liquid, this usually happens after the interaction of the magma with the crustal rock.

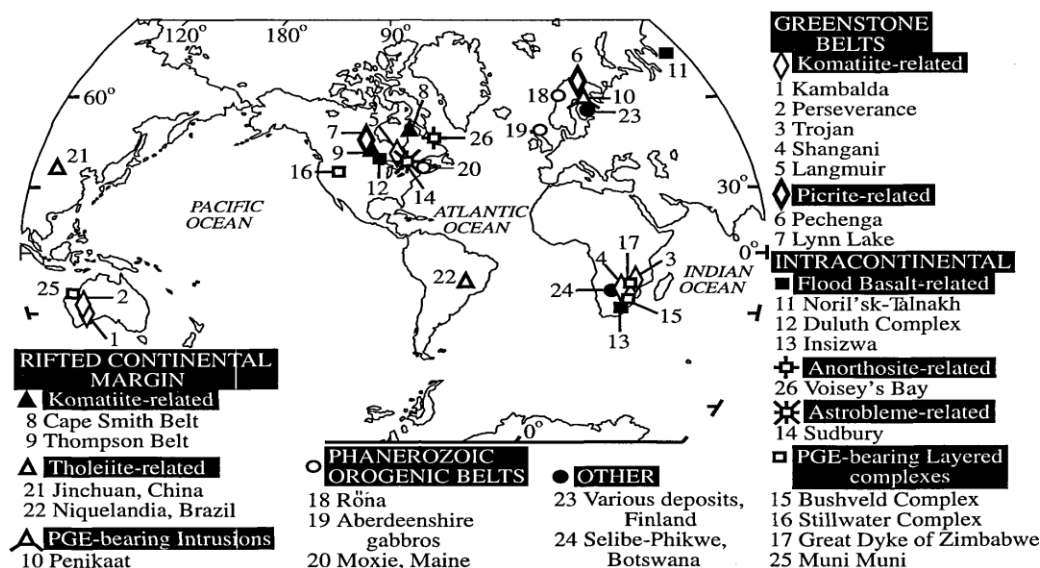
The most important magmatic Ni-Cu-(PGE) sulfide deposits in the world are; (1) Noril'sk deposit in Russia, (2) Voisey's Bay deposit in Canada, (3) Jinchuan deposit in China, (4) Duluth complex in Minnesota, USA, (5) Sudbury deposit in Canada. Those aforementioned are considered the most important due to their geological and geotectonic setting, but also due to the economic interest they represent, since the volume of their ores allows for their economic extraction.

The host units of the deposits of magmatic Ni-Cu-(PGE), excluding the Sudbury deposit which is an impact melt, constitute a wide range of olivine mantle-derived rocks such as; komatite, komatitic basalt, dolerite, alkali-picrite, alkali-basalt.



Όλα τα μαγματικά κοιτάσματα σουλφιδίων σχετίζονται στενά με σώματα βασικών και υπερβασικών πετρωμάτων, και ο πιο εύκολος τρόπος να καταταχθούν είναι με βάση του τύπου μάγματος με το οποίο συσχετίζονται μαζί με το τεκτονικό περιβάλλον μέσα στο οποίο το μάγμα εναποτέθηκε. Σημαντικά κοιτάσματα με βάση τις σχέσεις τους με αυτά τα χαρακτηριστικά φαίνονται στο Σχήμα. 0 το οποίο επίσης δείχνει τις τοποθεσίες τους στον κόσμο.

Τα σώματα κατατάσσονται με βάση την απόθεση τους σε περιβάλλον ηπειρωτικής διάρρηξης (Κατηγορία 2) σε κρατονικό περιβάλλον (κατηγορία 3) ή σε ενεργή ορογενετική ζώνη (κατηγορία 4). Αρχαϊκές πρασινοςχιστολιθικές ζώνες παραμένουν αινιγματικές σε θέμα σύγχρονης τεκτονικής. Για παράδειγμα, οι κοματίτες διαρρήξαν ηπειρωτικό φλοιό (Arndt and Jenner 1986; Compston et al. 1986) ή αντιπροσωπεύουν το επίπεδο ενός πρωτόγονου ωκεανού; Ως αποτέλεσμα μια νέα κατηγορία προστέθηκε (κατηγορία 1) για την ηφαιστειακή δραστηριότητα εκείνης της περιόδου.



Σχήμα. 0 Παγκόσμια κατανομή των μαγματικών σουλφιδίων με βάση τον τύπο τους.

Χρήσεις

Λόγω των ιδιοτήτων του το κράμα Cu-Ni έχει πολλαπλές εφαρμογές και χρήσεις. Η χρήση του εξαρτάται από τους εξής παράγοντες: (1)καλά χαρακτηριστικά επεξεργασίας, (2)σε πολλές περιπτώσεις σημαντικό είναι το ανοιχτό χρώμα των κραμάτων τα οποία περιέχουν περισσότερο από 15% Ni, (3) καλές μηχανικές ιδιότητες και σε χαμηλές και σε υψηλές θερμοκρασίες, (4) ειδικές φυσικές ιδιότητες, π.χ. υψηλή ηλεκτρική αντίσταση και χαμηλής θερμοκρασία συντελεστή, (5) να έχει αντίσταση στην οξείδωση και φθορά, (6) υψηλή αντοχή σε πίεση.

Η χρήση των κραμάτων Cu-Ni περιέχει:

- 1) για χρήση κατασκευής θερμαντικών συσκευών
- 2)για κατασκευές όπου είναι απαραίτητη η θερμική αντοχή ή παίζει σημαντικό ρόλο π.χ.
- 3)για κατασκευή θερμικών αντιστατών



4)για κατασκευή θερμοζευγών

5)επίσης χρησιμοποιείται εκτεταμένα στην ηλεκτρομηχανική.

6)σε ηλεκτρομαγνητικούς διακόπτες σε όργανα μέτρησης αποστάσεως και στην ναυσιπλοΐα

2. Γεωτεκτονικό περιβάλλον

2.1 Γενικά

Τα μαγματικά κοιτάσματα σουλφιδίων Ni-Cu-(PGE) σχηματίζονται όταν βασικά και υπερβασικά μάγματα του μανδύα κορεστούν από σουλφίδια και διαχωριστούν από τα τηγμένα σουλφίδια, συνήθως αυτό προκαλείται από την αλληλεπίδραση των μαγμάτων με τα πετρώματα του φλοιού. Παρότι η περιεκτικότητα των πρωτευόντων μαγμάτων σε μέταλλα επηρεάζει την σύσταση του κοιτάσματος, δεν ελέγχουν την διαδικασία σχηματισμού του κοιτάσματος διότι η περιεκτικότητα σε μέταλλα είναι υψηλή στο τήγμα σουλφιδίων και διότι τα περισσότερα μάγματα έχουν την ικανότητα να διαχωρίζουν τα μεταλλικά κοιτάσματα από το τήγμα σουλφιδίων. Οι πιο σημαντικοί συντελεστές είναι η θερμοκρασία, το ιξώδες, η ρευστότητα και ο τύπος σχηματισμού του μάγματος, τα οποία ελέγχουν την δυναμικότητα του μάγματος, όπως και την ψύξη του, και τέλος της αλληλεπίδρασής του με τον φλοιό. Με αυτόν τον τρόπο, υψηλής θερμοκρασίας, χαμηλού ιξώδους πετρώματα όπως Κοματίτες και θολεϊτικοί Πικρίτες είναι ικανοί να σχηματίσουν Ni-Cu-(PGE) κοιτάσματα, ενώ χαμηλής θερμοκρασίας, εύτηκτοι αλκαλί-Πικρίτες και Βασάλτες έχουν μικρότερη δυνατότητα σχηματισμού κοιτασμάτων Ni-Cu-(PGE). Στις περισσότερες αποθέσεις, ο σχηματισμός κοιτασμάτων είναι άμεσα συνδεδεμένος με την ενσωμάτωση μητρικών πετρωμάτων πλούσιων σε Θείο (S) και εμμεσα συνδεδεμένος με την μόλυνση από τον γρανιτικό φλοιό. Παρ'όλα αυτά η γεωχημική υπογραφή της μόλυνσης αναγνωρίζεται εύκολα και είναι ένας χρήσιμος οδηγός επειδή αποτελεί αναγνωριστικό στοιχείο μαγμάτων τα οποία μπορούν να απορροφήσουν υλικό του φλοιού. Πολλοί παράγοντες της διαδικασίας γένεσης των κοιτασμάτων παραμένουν δυσνόητοι, συμπεριλαμβανομένων και των συνθηκών τήξης μανδυακού υλικού και του περιεχόμενου PGE των βασικών-υπερβασικών μαγμάτων, την διαδικασία από την οποία το θείο (S) μεταφέρεται από τα τοιχώματα των πετρωμάτων στα κοιτάσματα (ενσωμάτωση, μεταφορά πτητικών συστατικών), οι αποστάσεις και οι διαδικασίες με τις οποίες πυκνά τήγματα σουλφιδίων μεταφέρονται από το σημείο σχηματισμού τους στο σημείο συγκέντρωσής τους (ως διάσπαρτες σταγόνες, αποφλοιώσεις, και επικεντρωμένες εισχωρήσεις τεραστίων συγκεντρώσεων σουλφιδίων) και τέλος τις δυναμικές διαδικασίες οι οποίες αυξάνουν το ποσοστό περιεκτικότητας των κοιτασμάτων σε μεταλλικά στοιχεία.

Οι κύριοι τύποι πρωτογενής μαγματικής Ni-Cu-(PGE) ορυκτοποίησης σε βασικά υπερβασικά πετρώματα

Ορυκτοποίηση τύπου Ni-Cu-(PGE) εμφανίζεται σε 3 κύριους πρωτογενής τύπους και 2 δευτερογενής τύπους (Leshner and Keays, 2002). Μόνο οι πρωτογενής τύποι θα αναφερθούν εδώ. Δεν θα περιγραφούν συγκεκριμένα κοιτάσματα παρά μόνο γενικά καθώς η συγκεκριμένη εργασία επικεντρώνεται στις διαδικασίες που είναι σημαντικές για την γένεση των κοιτασμάτων Ni-Cu-(PGE). Παρακάτω αναφέρονται τα βασικά χαρακτηριστικά των μαγματικών κοιτασμάτων Ni-Cu-(PGE) που αναφέρονται και στον Πίνακα. 1.

Τύπος 1 Η ορυκτοποίηση ξεκινάει στην αρχή της διαδικασίας κρυστάλλωσης του μητρικού σχηματισμού και αποτελείται από στρώσεις συμπαγής και/ή διεσπαρμένα σουλφίδια Fe-Ni-Cu-(PGE) κοντά ή στην βάση (τύπου 1α) και συσχετίζεται με τα στηρίγματα των υπερκείμενων πετρωμάτων (τύπου 2β). Τα κοιτάσματα αυτού του τύπου εμφανίζονται σε ένα φάσμα διαφορετικών γεωλογικών περιβαλλόντων, και η αλληλεπίδραση με τα γειτονικά πετρώματα παίζει βασικό ρόλο στον σχηματισμό των μεταλλευμάτων.

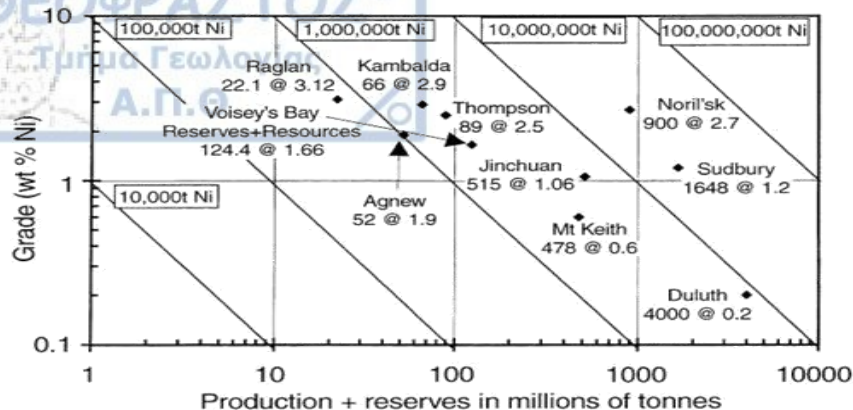
Τύπος 2 Η ορυκτοποίηση ξεκινάει προς το τέλος της διαδικασίας κρυστάλλωσης των μητρικών σχηματισμών και αποτελείται από στρωματώδης, διεσπαρμένα, φυσσαλώδης ή σφαιρικής υφής σουλφίδια (τύπου 2α), μικρόκοκκα διεσπαρμένα σουλφίδια (τύπου 2β), πολύ μικρόκοκκα νεφελώδης σουλφίδια (τύπου 3γ), ή διεσπαρμένα φλεβικά σουλφίδια (τύπου 2δ).

Τύπος 3 Η ορυκτοποίηση ξεκινάει κατά την κλασματική κρυστάλλωση ροών και κοιτών, και σχηματίζει σχετικά λεπτές στρωματώδης σχηματισμούς οι οποίοι συχνά είναι πλούσιοι σε PGE. Παρόλο που τα περισσότερα από αυτά είναι κάτω από το όριο εκμεταλλευσιμότητας, κάποιες διαδικασίες που γίνονται μέσα σε πολλές διεισδύσεις μεταξύ των στρωμάτων μπορεί να σχηματίσουν εκμεταλλεύσιμες συγκεντρώσεις. Παρόλ' αυτά πολλές από τις διαδικασίες σχηματισμού μεταλλευμάτων που αναφέρονται είναι σχετικές με το πρωταρχικό μάγμα του τύπου 3 PGE κοιτάσμα, ο σχηματισμός αυτών των σχηματισμών φαίνεται να περιείχε και διαδικασίες που δεν ήταν μαγματικές.

2.2. παράγοντες σχηματισμού κοιτάσματος Ni-Cu-(PGE)

Τα μαγματικά σουλφίδια θεωρείται ότι ανήκουν σε μία από τις δύο βασικές ομάδες (Naldrett et al. 1990), αυτή η οποία είναι πλουσιότερη σε σουλφίδια-και αυτή είναι μεγάλου ενδιαφέροντος κυρίως γιατί περιέχει Ni και Cu-και η δεύτερη βασική ομάδα η οποία περιέχει πολύ μικρότερη ποσότητα σουλφιδίων και της οποίας η PGE περιεκτικότητα του αποτελεί το μεγαλύτερο οικονομικό ενδιαφέρον. Η συγκεκριμένη έρευνα ασχολείται με την πρώτη ομάδα.

Η σχετική σημασία μιας συγκεκριμένης ομάδας των μεγαλύτερων αποθέσεων σουλφιδίων Ni-Cu φαίνεται στο σχήμα 1. Οι περιοχές του Noril'sk και Sudbury υπερέχουν στις ποσότητες Ni που περιέχουν, παρόλ' αυτά τα κοιτάσματα του Noril'sk περιέχουν μεγαλύτερες ποσότητες Χαλκού παρά τα κοιτάσματα του Sudbury, και η αναλογία PGE:Ni είναι πέντε φορές μεγαλύτερη αυτή του Sudbury, άρα η τιμή της ορυκτοποίησης είναι υψηλότερη. Το Duluth εκπροσωπεί ένα σημαντικό απόθεμα Ni, αλλά η χαμηλή ποιότητα (0,2% wt. Ni, 0,66 wt.% Cu) μαζί με τους περιβαλλοντικούς περιορισμούς σε θέμα εξορύξεως των μικρής ποιότητας αποθεμάτων σημαίνει ότι αποτελεί μικρής σημασίας οικονομική επένδυση. Το Jinchuan είναι τρίτο στον κόσμο όσον αφορά την περιεκτικότητα του σε Ni, με το Mt. Keith, Thompson, στο Voisey's Bay, Kampalda και το Agnew να βρίσκονται στην τέταρτη και όγδοη θέση αντίστοιχα.



Σχήμα. 1 Αναπαράσταση σχετικότητας μεταξύ βαθμού Wt.% Ni προς την παραγωγή+αποθέματα σε εκατομμύρια τόνους των κύριων κοιτασμάτων σουλφιδίων του Ni του κόσμου, τροποποιημένο από τον Naldrett (1994). Τα δεδομένα για το Sudbury συλλέχθηκαν μέσω των διαπροσωπικών επικοινωνιών μεταξύ των εταιριών INCO Ltd. και Falconbridge Ltd. (1990) : τα δεδομένα σχετικά με το Noril'sk είναι απλά εκτίμηση; για το Duluth τα δεδομένα προέρχονται από τους Listerud και Meineke (1997); για την περιοχή Jinchuan προέρχονται από τους Chai και Naldrett (1992a); Για την Kampalda, Agnew και Mt. Keith είναι από φυλλάδια της εταιρίας Western Mining στο 13^ο γεωλογικό συνέδριο, Canberra (φεβρουάριο του 1996) για το Thompson είναι από την διαπροσωπική επικοινωνία μεταξύ του O.R. Eckstrand (1990); Για το Voisey's Bay είναι αποθέματα συν τους πόρους που ανακοινώθηκαν από τον Mike Sopko, πρόεδρο της εταιρίας INCO Ltd. Τον Ιούλιο του 1998.

Ο διαχωρισμός του τήγματος σουλφιδίων, σε συνδυασμό με την κατακάθιση των σουλφιδίων, οπου σχηματίζει πλούσιες συγκεντρώσεις στην βάση των σχηματισμών, δεν αποτελεί μέρος του συνηθισμένου τρόπου κρυστάλλωσης του βασικού μάγματος. Τα σημαντικότερα κοιτάσματα Ni-Cu του κόσμου, σχηματίζονται σχεδόν αποκλειστικά στην βάση του πυριγενούς σώματος στο οποίο βρίσκονται, το οποίο σημαίνει το αρχικό μάγμα πριν ψυχθεί είχε κορεστεί σε σουλφίδια τα οποία και συγκράτησε μέχρι την τελική φάση διεύδυσης του μάγματος. Το υψηλό ποσοστό περιεκτικότητας σε PGE (1 ± 10 ppb Pt, Pd) των περισσότερων βασικών μαγμάτων εκτός των MORB αφήνει να εννοηθεί ότι τα μάγματα αυτά ήταν ακόρεστα σε σουλφίδια καθώς αφήνουν τον μανδύα ή κατά την διάρκεια άνωσης τους προς τον φλοιό (Naldrett and Barnes 1986). Μια σημαντική διεργασία πρέπει να συμβεί στις συγκεκριμένες ομάδες αυτών των μαγμάτων η οποία θα προκαλέσει κορεσμό σε σουλφίδια, αν πρόκειται να σχηματιστούν τα αντίστοιχα κοιτάσματα.

Άρα οι σημαντικότεροι παράγοντες στην γένεση των κοιτασμάτων μαγματικών σουλφιδίων είναι οι εξής:

(1) το μητρικό μάγμα γίνεται κορεσμένο σε σουλφίδια και διαχωρίζει τα μη μινυόμενα σουλφίδια.

(2) Αυτά τα σουλφίδια αντιδρούν με αρκετή ποσότητα μάγματος ώστε να συγκεντρωθούν χαλκόφιλα στοιχεία σε οικονομικό επίπεδο.

(3) Τα σουλφίδια είναι συγκεντρωμένα και τα ίδια σε περιορισμένους χώρους, οπου η ποσότητα τους είναι αρκετή ώστε να θεωρηθεί ότι σχηματίζουν κοιτάσμα.

Ενώ τα περισσότερα περιβάλλοντα σχηματισμού που θα συζητηθούν σχετίζονται μεταξύ τους, το Sudbury αποτελεί εξαίρεση, μιας και οι σχηματισμοί του, πιθανόν να σχηματίστηκαν από εξωγήινους παράγοντες π.χ πρόσκρουση μετεωρίτη (Naldrett 1999).

2.3 Τρόπος σχηματισμού κοιτασμάτων σουλφιδίων

Σε αυτό το σημείο θα γίνει αναφορά στο πως η αλληλεπίδραση μεταξύ των μητρικών πετρωμάτων και του μάγματος σχηματίζουν το σώμα σουλφιδίων μεταλλεύματος Ni-Cu-PGE). Είναι αποδεχτό ότι σε πολλές περιπτώσεις ο διαχωρισμός των σουλφιδίων ξεκινάει ή

τουλάχιστον διευκολύνεται από την προσθήκη S από εξωτερικές πηγές, παρακάτω αναφέρονται οι διαφορετικές πλευρές του θέματος.

2.3.1 Μεταφορά Θείου από την πηγή στο μάγμα

Όταν πρωτοαναφέρθηκε μια σύνδεση μεταξύ φλοιικής ενσωμάτωσης και ο διαχωρισμός σουλφιδίων (Naldrett, 1966; Prider, 1970) θεωρήθηκε ότι το S αποσπάστηκε από πλούσια σε S αυτόχθονα πετρώματα. Ως αποτέλεσμα αναγνωρίστηκε ότι υπάρχουν αρκετοί τρόποι μεταφοράς S από τα τοιχώματα των πετρωμάτων προς σχηματισμό μαγματικών σουλφιδίων (Leshner and Burnham, 2001). Στην μία πλευρά του φάσματος γίνεται ολοκληρωτική διάλυση όλου του διαθέσιμου S, το οποίο μπορεί να συμβεί αν το μάγμα έχει αρκετά υψηλή θερμοκρασία, αν είναι αρκετά ακόρεστο σε σουλφίδια, και αν το θείο (S) του ενσωματωμένου σώματος δεν είναι αρκετά υψηλό. Σε ενδιάμεσες καταστάσεις, τήξη σε ισορροπία, μερική τήξη, ή απομάκρυνση πτητικών συστατικών από τα τοιχώματα των πετρωμάτων, με ή χωρίς άλλα πτητικά και στοιχεία με χαμηλό σημείο τήξης, αποσπάει μερικώς ή όλο το θείο. Στην άλλη πλευρά του φάσματος, τα σουλφίδια αποσπώνται από τα τοιχώματα των πετρωμάτων ώστε να σχηματίσουν σφαιρίδια τήγματος που αναμιγνύονται με το όξινο μάγμα αλλά δεν διαλύονται μέσα σε αυτό. Αυτό μπορεί να συμβεί αν το μάγμα έχει αρκετά υψηλή θερμοκρασία ώστε να προκαλέσει τήξη στα σουλφίδια, αλλά ταυτόχρονα είναι ήδη κορεσμένο σε σουλφίδια. Όλες αυτές οι λειτουργίες φαίνεται να έχουν επιδράσει σε διαφορετικό βαθμό σε κάθε κοίτασμα (Leshner et al., 2001).

Όταν το ενσωματωμένο θείο είναι σε περιορισμένη μορφή, ως ιζηματογενές σουλφίδιο ή H_2S , η μετατροπή σε μαγματικό σουλφίδιο είναι άμεση, αλλά όταν το αλλόχθονο θείο είναι σε μορφή SO_2 , θα πρέπει να συμπυκνωθεί προτού μπορέσουν να σχηματιστούν τα σουλφίδια. Ο Naldrett (2004) πρότεινε ότι στην περιοχή Noril'sk-Talnakh, όπου τα ισότοπα του S προσφέρουν ισχυρή απόδειξη ενσωμάτωσης ανυδρίτη, ο άνθρακας από τα ηπειρωτικά ιζηματογενή πετρώματα του σχηματισμού Tungusskaya μπορεί να συμπεριφέρθηκε ως διαλύτης. Παρόλ'αυτά, αναγνωρίζεται (A.J. Naldrett, pers. Comm., 2004) το πρόβλημα που εμφανίζεται από την μεταλλοφόρα διείσδυση Kharaelakh, η οποία βρίσκεται στρωματογραφικά κάτω από τα ιζηματογενή πετρώματα του σχηματισμού της Tungusskaya, και τα οποία δεν θα ήταν δυνατόν να αντέδρασαν με τα στρώματα του άνθρακα. Μία πιθανή λύση μπορεί να βρεθεί στην φύση των παλαιότερων ιζηματογενών σωμάτων μέσω των οποίων θα πρέπει να πέρασε το μάγμα προτού φτάσει στους μεταλλοφόρους ορίζοντες. Αυτές οι μονάδες, θαλάσσιοι ή ηπειρωτικοί ανθρακίτες του δεβονίου, μάργες, ανυδρίτες και ψαμμίτες, συμπίπτουν με τα μητρικά πετρώματα των κύριων πεδίων φυσικού αερίου και πετρελαίου της δυτικής σιβηρικής λεκάνης (Clark et al., 1978). Βιταμινούχοι σχιστόλιθοι του ανώτερου δεβονίου του σχηματισμού Domanik περιέχει 1 με 5 % οργανικό υλικό. Δεν έχουν γνωστοποιηθεί γεωχημικά δεδομένα από τα ιζηματογενή πετρώματα της περιοχής Noril'sk-Talnakh, αλλά αν περιείχαν παρόμοια ποσότητα οργανικού υλικού, η ενσωμάτωσή τους μαζί με τους εβαπορίτες που περιέχουν σουλφίδια ίσως προσέφερε ένα μείγμα που θα οδηγούσε στον διαχωρισμό των σουλφιδίων μετάλλων.

Η φύση των διασπαζόμενων σουλφιδίων μπορεί να εξηγήσει την έλλειψη κοιτασμάτων σουλφιδίων Ni-Cu-(PGE) που σχετίζονται με αλκαλικά μάγματα. Αν αυτά τα μάγματα σχηματίστηκαν από σχετικά οξειδωμένη πηγή, το θείο θα είναι με την μορφή θειικού οξέος. Το συγκεκριμένο θείο για να μπορέσει να διαχωριστεί ως σουλφίδιο, θα πρέπει πρώτα να υποστεί διάλυση. Η απλή προσθήκη γρανιτικού υλικού, ή μία θερμοκρασιακή μείωση συνοδευόμενη από κρυστάλλωση, το οποίο μπορεί να οδηγήσει σε διαχωρισμό σουλφιδίων σε διαλυμένα μάγματα, δεν επαρκεί.

2.3.2 Χρονική στιγμή κορεσμού σουλφιδίων

Στα περισσότερα συστήματα η σουλφιδική φάση είναι τήγμα κατά την διάρκεια όλων των σταδίων κρυστάλλωσης, εκτός του τελευταίου σταδίου, των πυριτικών ορυκτών (Naldrett, 1989, 2004). Οι ομάδες σουλφιδικών ορυκτών και ορυκτών λευκόχρυσου περιέχονται σε συγκεκριμένα κοιτάσματα, αυτά τα κοιτάσματα αντιπροσωπεύουν χαμηλής θερμοκρασίας ανακρυστάλλωση και προϊόντα παραγένεσης υψηλότερων θερμοκρασιακών φάσεων, όπως πλούσια σε Fe-Ni στερεά διαλύματα.

Ο τύπος 1 βασικών σουλφιδίων (Πίνακας 2) διαχωρίζονται στην ή κοντά στις βάσεις των μητρικών πετρωμάτων, υποδεικνύει ότι ο κορεσμός των σουλφιδίων και ο διαχωρισμός συνέβη νωρίς στην διάρκεια της κρυστάλλωσης (Leshner and Keays, 2002). Η απουσία εκτεταμένης PGE έλλειψης στα περισσότερα μητρικά πετρώματα (π.χ. Keays, 1982: Leshner and Groves, 1986: Leshner and Stone, 1996: Leshner et al., 2001) δείχνει ότι τα σουλφίδια δεν θα μπορούσαν να είχαν μετακινηθεί απευθείας από τον μανδύα ή να είχαν διαχωριστεί κατά την άνοδο ή μέσα σε υποηφιαστικά μαγματικό θάλαμο. Η παρουσία τοπικής ρύπανσης και τοπικής έλλειψης PGE σε πολλά από τα μητρικά πετρώματα (Leshner et al., 2001: Li et al., 2003) υποδεικνύει ότι η ορυκτοποίηση σε πολλά τύπου 1 κοιτάσματα, σχηματίστηκαν κατά την έκρηξη και εναπόθεση τους. Επειδή η διαλυτότητα των σουλφιδίων σε βασικά-υπερβασικά μάγματα είναι χαμηλή (1000-3000 ppm: Naldrett, 2004), οι μεγάλες μάζες σουλφιδίων σε αυτά τα κοιτάσματα δεν θα μπορούσαν να είχαν διαλυθεί τελείως στο διαθέσιμο και σχετικά μικρό όγκο του μάγματος που αντιπροσωπεύεται από τις μητρικές ροές της διείσδυσης. Αντιθέτως, 1) ο διαχωρισμός των σουλφιδίων από πολύ μεγαλύτερου όγκου μάγμα το οποίο πέρασε μέσα από την διείσδυση, 2) το θείο προστέθηκε από εξωτερικές πηγές, και/ή 3) το τήγμα σουλφιδίων αποτέθηκε χωριστά.

Τα τύπου 2 στρωματώδη σουλφίδια βρίσκονται στα κεντρικά σημεία των μητρικών σχηματισμών, τα οποία, μαζί με την παρουσία πολλαπλών μεταλλοφόρων οριζόντων σε κάποια κοιτάσματα (π.χ. Katinniq: Gillies, 1993), δείχνουν ότι ο κορεσμός των σουλφιδίων συνέβη κατά την κρυστάλλωση των μητρικών πετρωμάτων (Duke, 1986: Leshner and Keays, 2002), τύπου 2α διεσπαρμένων φουσσαλδοειδών σουλφιδίων είναι υπερβολικά τραχιά (μέσο όρο 1 cm διάμετρο, τοπικά μέχρι και 5 cm) ώστε να παραμείνουν αδιάλυτα στο μάγμα εκτός κατά την ταχύ κατακόρυφη ροή, επίσης είναι αρκετά μεγάλα σε αριθμό (μέχρι και 30% σουλφίδια) ώστε να διασπαστούν στο μάγμα και να γίνει απόμειξη *in situ*, άρα ο σχηματισμός τους μπορεί να προκλήθηκε από κάποιου τύπου *in situ* διαδικασία συγκέντρωσης καθώς το μάγμα κυλούσε μέσω της μητρικής διείσδυσης, το οποίο συμφωνεί με τα σχετικά ομοιόμορφα σχήματα και κατανομή των συγκεντρώσεων των μητρικών πετρωμάτων (Leshner and Groves, 1986: Leshner and Keays, 2002).

Τύπου 2β ενδιάμεσα διεσπαρμένα σουλφίδια είναι επίσης μεγάλα σε αριθμό (1-3 %) ώστε να διασπαστούν στην μικρή ποσότητα του τήγματος, το οποίο δείχνει ότι αυτά τα σουλφίδια επίσης διαχωρίστηκαν κατά την κρυστάλλωση του ολιβίνη και συγκέντρωσής του. Ο Duke (1986) πρότεινε ότι μάγμα στην διείσδυση του Dumont κορέστηκε σε S όταν υπέστη κλασματική κρυστάλλωση, πλούσια σε θείο τήγμα συγκεντρώσεων ωθήθηκε προς τα πάνω από μερικώς τηγμένες υποεπιφανειακές προσχώσεις και αναμίχτηκε με λιγότερο πτυσσόμενο τήγμα στην προσωρινή κάτω επιφάνεια του μαγματικού θαλάμου. Σε αυτό το μοντέλο οι αναλογίες του ολιβίνη και των σουλφιδίων που αποχωρίζονται από το τήγμα περιορίζονται από την ποσότητα και διαλυτότητα των σουλφιδίων στο τήγμα και υπάρχει συγκεκριμένο όριο σουλφιδίων που μπορεί να μαζευτεί σαν πρόσχωση (Duke, 1986). Παρόλ'αυτά όπως δείχθηκε από τους Leshner και Keays (2002), δεν υπάρχει μία απλή συσχέτιση μεταξύ τις συγκεντρώσεις ολιβίνη και ο βαθμός ορυκτοποίησης σε πολλά από τα κοιτάσματα (π.χ., Katinniq: Gillies, 1993), και ο υπολογισμός της ισορροπίας της μάζας και των δεδομένων S/Se δείχνουν ότι το εξωτερικό θείο είναι απαραίτητο (Leshner and Keays, 2002). Ο τύπος 2γ (νεφελώδης-διεσπαρμένα) σουλφιδίων βρίσκεται παρών σε ποσοότητες αρκετά μικρές (<1%)

ώστε να διαλυθούν αρκετά στο ενδιάμεσο όξινο τήγμα (Lesher and Keays, 2002), αλλά επίσης φτωχά σε μέταλλα, υποδεικνύοντας ότι σχηματίστηκαν σε πολύ χαμηλό συντελεστή R (π.χ. Perseverance: Barnes et al., 1995) και/ή αντιπροσωπεύει σουλφιδικούς μαγνητίτες (π.χ., Katinniq: Gillies, 1993). Η προέλευση του τύπου 2δ σουλφιδίων δεν είναι γνωστή.

Τα τύπου 3 στρωματόμορφα εκτενώς-διεσπαρμένα σουλφίδια εμφανίζονται σε συγκεκριμένα διαστήματα στην στρωματογραφία του κεντρικού μέρους των μητρικών μονάδων, το οποίο δείχνει ότι το μετάλλευμα σχηματίστηκε κατά την κρυστάλλωση των μητρικών πετρωμάτων (Lesher and Keays, 2002). Παρ'όλα αυτά λεπτοί στρωματόμορφοι χρωμίτες και πλούσιοι σε PGE ορίζοντες σουλφιδίων μπορεί να σχηματιστούν ως αποτέλεσμα απλής κλασματικής κρυστάλλωσης (Lesher and Stone, 1996: Lesher and Keays, 2002), σχεδόν όλα είναι εκμεταλλεύσιμα και χρειάζονται άλλες διαδικασίες ώστε να σχηματιστούν τα κοιτάσματα μεταλλευμάτων. Υπάρχει ακόμα μεγάλη διαμάχη ως αναφορά τον σχηματισμό των στρωματόμορφων PGE κοιτασμάτων και αν ο σχηματισμός τους προκλήθηκε από μείξη μαγμάτων (π.χ., Campbell et al., 1983), από ρύπανση των τοιχωμάτων των πετρωμάτων ή τέλος από την αποχώρηση πτητικών από το τήγμα (Boundreau et al., 1986).

Μετακίνηση, εμπλουτισμός και συγκέντρωση σουλφιδίων

Οι Campbell και Naldrett (1979), Naldrett (1998a), και Naldrett et al. (1992) υπέδειξαν ότι η περιεκτικότητα του Ni, του Cu και του PGE σε πολλά από τα μεταλλεύματα είναι πολύ υψηλότερη απ'ότι είναι αναμενόμενο από σουλφίδια που αποχωρίστηκαν από την ποσότητα του μάγματος που αντιπροσωπεύεται από τις σχετικά μικρές μητρικές διεισδύσεις. Τα σουλφίδια θα πρέπει να αλληλεπίδρασαν με ένα αρκετά μεγαλύτερο σε όγκο πυριτικό τήγμα και να απέσπασαν μετάλλευμα από αυτό. Αυτή η διαδικασία εμπλουτισμού θα πρέπει να συνέβη στις διόδους λάβας και στις μαγματικές διόδους που έπηξαν και σχημάτισαν τις ροές και διεισδύσεις μέσα στις οποίες βρίσκονται τα μεταλλεύματα (Lesher and Campbell, 1993: Hawkeworth et al., 1995: Naldrett et al., 1992, 1996: Naldrett, 1999, Lightfoot et al., 1997, Ripley et al., 2003). Φαίνεται ότι νέα κύματα μάγματος έρευσαν μέσω των διόδων, και αλληλεπίδρασαν με σώματα σουλφιδίων που συγκεντρώθηκαν νωρίτερα και μεταφέρθηκαν έτσι χαλκόφιλλα στοιχεία από το μάγμα σε αυτά τα σουλφίδια.

Το πως ακριβώς το μάγμα αλληλεπιδρά με τα σουλφίδια δεν είναι ξεκάθαρο και πιθανόν μεταβάλλεται από κοιτάσμα σε κοιτάσμα. Το πιο σημαντικό είναι ο τρόπος με τον οποίο τα σουλφίδια μεταφέρονται από το μέρος σχηματισμού τους στο μέρος συγκέντρωσης του κοιτάσματος. Λάβα ή μάγμα μετακινείται μέσω των διόδων ή υπόγειων διαδρόμων πιθανόν αλληλεπίδρασε με μεγάλες ποσότητες πετρωμάτων με S (π.χ. σουλφιδικά ιζήματα στην Kambalda, εβαπορίτες στο Noril'sk) είτε στα ανάντη είτε στα βαθύτερα σημεία των συσσωρευμένων ιζηματογενών στρώσεων. Οι Lesher και Groves (1986) και οι de Bremond D'Ars et al. (2001) έδειξαν ότι σταγονίδια πυκνών σουλφιδίων σχεδόν 1 cm σε μέγεθος (το μέγεθος σταγονιδίων που παρατηρήθηκαν σε πολλά μαγματικά κοιτάσματα μεταλλευμάτων) μπορούν να μετακινηθούν προς τα ανάντη μέσω μάγματος, ρέοντας με ταχύ ρυθμό μέσω κάθετων διαδρόμων σταγονίδια έχουν μεγάλη επιφάνεια/όγκο αναλογία και ουσιαστικά συλλέγουν χαλκόφιλα στοιχεία κατά την μεταφορά τους από το ρεούμενο μάγμα ή την λάβα. Αν το μέσο μέγεθος των σταγονιδίων είναι μεγάλο ή αν η απόκρισή τους είναι χαμηλή, τότε τα σταγονίδια θα κατακαθίσουν στην βάση της ρεούμενης λάβας ή στις διόδους του μάγματος. Το μάγμα θα συνεχίσει να ρέει, αλλά επειδή η στρώση των σουλφιδίων έχει μικρή επιφάνεια/όγκο αναλογία, δεν θα γίνει ουσιαστική απόσπαση των χαλκόφιλων στοιχείων από

το υπερκείμενο πυριτικό τήγμα. Άρα, η αναλογία μαγμα/σουλφίδια (R factor) και ως αποτέλεσμα η εκμεταλλευσιμότητα του εφαρμόζεται κατά τα αρχικά στάδια εναπόθεσης των μεταλλευμάτων σουλφιδίων, όταν δηλαδή τα σουλφίδια βρίσκονται σε ακόρεστο στάδιο και είναι πιθανότερο να αναμιχθεί ιδανικά με το όξινο μάγμα (Leshner and Campbell, 1993).

Ερευνητές που δουλεύουν πάνω στο κοίτασμα του Jinchuan στην Κίνα (Tang, 1995), το κοίτασμα Aguablanca στην Ισπανία (Tornos et al., 2001), το κοίτασμα Vammala στην Φινλανδία (Papunen and Vormaa, 1985), και το Noril'sk (Kunilov, 1994; Stekhin, 1994) και το κοίτασμα του Voisey's Bay (Li and Naldrett, 1999), παρατήρησαν ότι τα τεράστια μεταλλεύματα σε αυτά τα κοιτάσματα τοπικά βγαίνουν έξω από τα όρια των μητρικών τους πετρωμάτων. Πρότειναν ότι αυτά τα μεταλλεύματα εισχώρησαν ως χωριστά κύματα τεράστιας ποσότητας τήγματος σουλφιδίων, στην θέση αυτή ή κοντά στην βάση των μητρικών διεισδύσεων, στοιχεία που στηρίζουν αυτή την άποψη βρίσκονται στο Noril'sk όπου δεν βρίσκουμε μεταβολές από διεσπαρμένα μεταλλεύματα σε συμπαγή (Zenko and Czamanske, 1994; Czamanske et al., 1995). Δεν είναι ξεκάθαρο, παρ'όλα αυτά, πως πυκνό, χαμηλού ιξώδους τήγμα σουλφιδίων μπορεί να αποσπαστηκε από σημεία συγκέντρωσης και να μετακινήθηκε στα ανάντη μέσω τα κατά πολύ λιγότερο πυκνά πετρώματα του φλοιού. Συχνές ιδέες που αναφέρονται στο αντικείμενο, περιέχουν την περίπτωση παραμόρφωσης κατά μήκος μεγάλου ρήγματος, ή την κατάρρευση της οροφής του μαγματικού σώματος διαφοροποιημένο με το βάθος, διαδικασίες που εξάγουν μίξεις όξινων τηγμάτων, ρηγματώδη ορυκτά, κομμάτια πετρωμάτων, και συσσωρεύσεις σουλφιδικών τηγμάτων. Εναλλακτικά, η ακόρεστη σχέση μπορεί να προκλήθηκε από μετακίνηση τηγμένων σουλφιδίων κατά τον σχηματισμό των διαφόρων πετρωμάτων γύρω από την μητρική διείσδυση.

3. Κοιτάσματα Ni-Cu-(PGE) στον κόσμο

3.1 Γενικά

Παρακάτω αναφέρονται 5 παραδείγματα κοιτασμάτων Ni-Cu-(PGE): (1) το κοίτασμα του Noril'sk στην Σιβηρία, (2) το κοίτασμα Voisey's Bay στον Καναδά, (3) το κοίτασμα Jinchuan στην Κίνα, (4) το σύμπλεγμα Duluth στην Μινεσσότα των ΗΠΑ, (5) το Sudbury στον Καναδά. Οι γεωδυναμικές συνθήκες, ο τρόπος σχηματισμού του κάθε κοιτάσματος. Αναφέρονται επίσης γεωχημικά στοιχεία που σχετίζονται με τον σχηματισμό αυτών όπως επίσης και πετρογραφικά και ορυκτολογικά στοιχεία.

3.2 Κοίτασμα του Noril'sk, Siberia

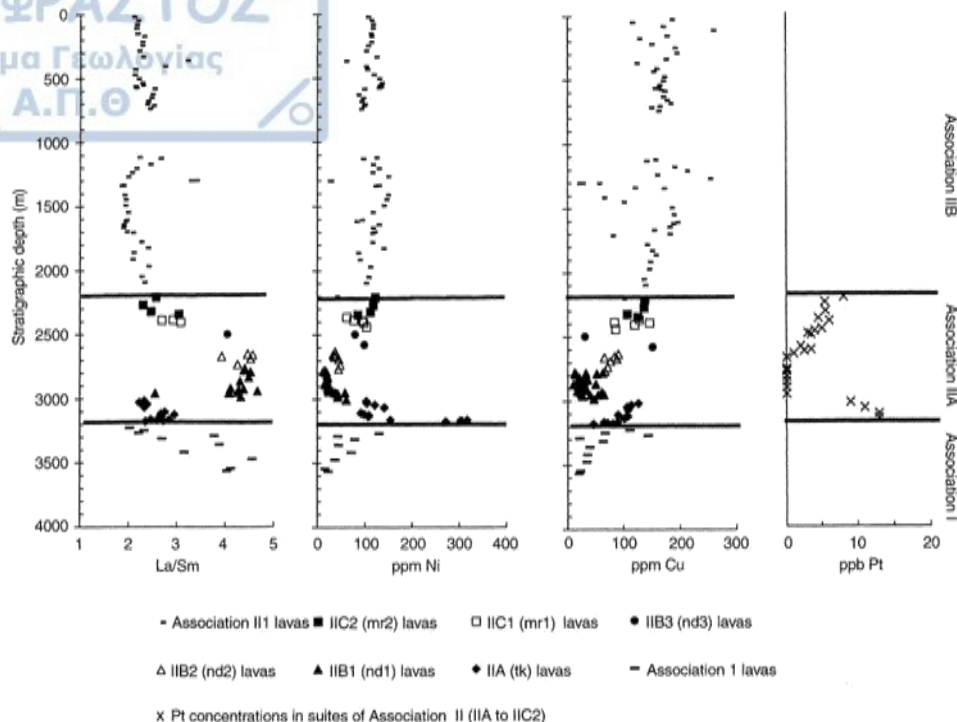
Τα κοιτάσματα της περιοχής του Noril'sk αποτελούνται από αυτά του ίδιου του Noril'sk και τα κοιτάσματα του Talnakh που ανακαλύφθηκαν σχετικά πρόσφατα (1962): εμφανίζονται στην βορειό-δυτική γωνία της Σιβηρικής πλατφόρμας, η οποία συνορεύει με την ράχη Khatanga στα βόρεια και την ράχη Yenesei στα δυτικά. Η περίοδος σχηματισμού τους συνοδεύεται από το μαγματικό γεγονός γνωστό ως "Siberian Trap" (εξώθηση περίπου $3 \cdot 10^6 \text{ km}^3$ βασάλτη). Στην ίδια χρονική περίοδο έλαβε χώρα και η σύγκρουση της ανατολικής Ευρωπαϊκής πλάκας με την σιβηρική. Αυτή η σύγκρουση είχε σαν αποτέλεσμα την τεκτονική ανύψωση της περιοχής των Ουραλίων τον σχηματισμό της αντίστοιχης οροσειράς.

Ο Naldrett et al. (1995) υποστήριξαν ότι τα κοιτάσματα σχηματίζονται μέσα σε φλέβες συγκεκριμένων φάσεων του 3,5 Km λάβας από το οποίο αποτελείται η "Σιβηρική παγίδα" στην περιοχή του Noril'sk. Οι εναλλαγές λάβας προσφέρουν μια ιστορική

καταγραφή ως προς τι συνέβαινε στα υπόγεια αποθέματα μάγματος όπως και των φλεβών που τρέφουν τα μαγματικά σώματα. Το σχήμα 2 δείχνει τις διακυμάνσεις των La/Sm, Ni, Cu και Pt με το βάθος κατά μήκος των εναλλαγών λάβας (Τα δεδομένα των La/Sm, Ni, Cu και Pt είναι από τους Lightfoot et al. 1990, 1993, 1994 και Hawkesworth et al. 1995: τα δεδομένα για το Pt είναι από τον Brugmann et al. 1993) των οποίων ο Lightfoot et al. (1994) χώρισαν σε 3 σχετικές κατηγορίες. Σημαντικό στην κατανόηση της ορυκτοποίησης είναι η ξαφνική αύξηση στην σχέση La/Sm στην βάση του σχηματισμού ΠΒ1, το οποίο συμπίπτει με εξίσου ξαφνικές αλλαγές σε άλλες παραμέτρους, συμπεριλαμβανομένων και των στοιχείων Sr, Nd, και το ποσοστό του SiO₂, τα οποία εξηγήθηκαν (Lightfoot et al. 1990, Wooden et al, 1993: Lightfoot et al. 1994: Fedorenko 1994: Hawkesworth et al. 1995: Naldrett et al 1996a) ως το αποτέλεσμα ρύπανσης του μάγματος από γρανιτικό ημίρρευστο υλικό (σε ποσοστό 8-15%) το οποίο είχε σαν πρωταρχική πηγή γνεύσιο του φλοιού. Η σταδιακή μείωση στην αναλογία La/Sm έχει σαν αίτιο (Lightfoot et al. 1994: Naldrett et al. 1995) συνεχές εισχωρήσεις μάγματος στο σύστημα φλεβών, και σταδιακά προκαλούσε διάλυση στα δομικά χαρακτηριστικά τα οποία προήλθαν από την ρύπανση.

Όπως φαίνεται στο σχήμα.2 η αύξηση στην σχέση La/Sm συμπίπτει με ανάλογη μείωση στην συγκέντρωση των στοιχείων Ni, Cu και PGE της λάβας.Ο Naldrett et al. (1992), ο Brugmann et al. (1993) και ο Fedorenko (1994) πρότειναν ότι τα χαλκόφιλα στοιχεία που λείπουν από τις λάβες είναι υπαίτια της άνωσης των μεταλλευμάτων. Οι συγκεκριμένοι συγγραφείς παρατηρούν ότι η έλλειψη χαλκόφιλων στοιχείων τόσο μεγάλης κλίμακας, μπορεί να εξηγηθεί μόνο σε εξισορρόπηση με τα σουλφίδια.

Η μη ανάμειξη των σουλφιδίων μπορεί να ξεκίνησε από μία από αυτές τις δύο διαδικασίες ή και τις δύο μαζί. Η ανάμειξη βασικού μάγματος με ένα ριπίδιο το οποίο είναι σιδηρούχο σώμα μπορεί επίσης να μειώσει την ικανότητα του μεικτού αυτού μάγματος να καταφέρει να διαλύσει τα σουλφίδια, αυτή η δυσκολία ανάμειξης μπορεί να επέλθει επίσης ακόμη και αν τα δύο μάγματα που συμμετέχουν στην διαδικασία μίξης είναι ακόρεστα σε σουλφίδια (Irvine 1975: Li and Naldrett 1993), επιπλέον, η βαριά ισοτοπική υπογραφή των μεταλλευμάτων δείχνει ότι η ρύπανση μπορεί να περιείχε και θείο του φλοιού από τους περιβάλλον ανυδρίτες, εβαπορίτες.

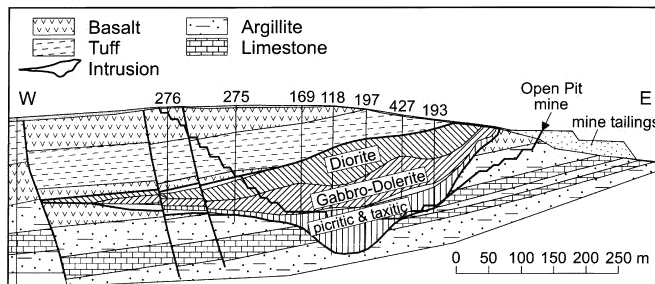


Σχήμα. 2 Στρωματογραφική μεταβολή των La/Sm, ppm Cu και ppb Pt κατά μήκος των 3,5 km κάθετη ακολουθία των καλυμμάτων βασαλτών στην περιοχή του Noril'sk (τα δεδομένα πάρθηκαν από τους Hawkesworth et al. 1995: Peter Lightfoot, διαπροσωπικές επικοινωνίες 1996).

Σημαντική ορυκτοποίηση συμβαίνει μόνο στις διεισδύσεις τύπου Noril'sk το οποίο βρίσκεται μέσα στα 7 Km του ρήγματος Noril'sk-Kharayelakh το οποίο φαίνεται να είναι ελαφρώς νεότερο από αυτό του κατωτέρου Talnakh. Μία εκτίμηση της ψυγμένης διείσδυσης μπορεί να ληφθεί από το ανοιχτό λατομείο Bears Brook στην διείσδυση του Noril'sk, όπου φαίνεται ότι το κύριο σώμα της διείσδυσης (ΚΣ) είναι διαφοροποιημένο και κόβει σε μεγάλη γωνία τα 200 m των ιζηματογενών στρωμάτων και των μητρικών ηφαιστειακών πετρωμάτων, ένα χαρακτηριστικό που μπορεί να εξηγηθεί μέσω θερμικής διάβρωσης (Σχήμα. 3). Το ΚΣ συνδέεται με περιφερειακές κοίτες οι οποίες φαίνεται να είναι διεισδύσεις που εισχώρησαν στα στρώματα. Η διείσδυση του Noril'sk είναι κατά πολλούς τρόπους ασυνήθιστη, συγκεκριμένα:

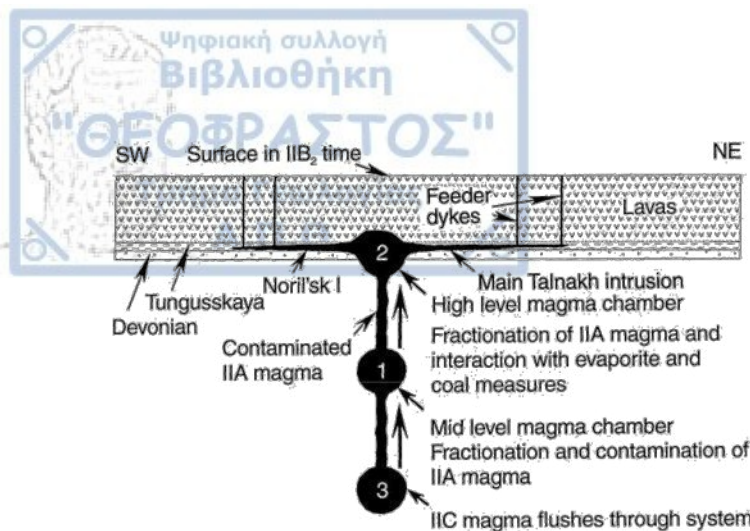
- 1) Περιέχουν ή συσχετίζονται με μεγάλες ποσότητες σουλφιδίων, αποτελούν 2-10 wt.% της συνολικής μάζας του σχηματισμού (Naldrett et al. 1992).
- 2) Αυτά τα σουλφίδια περιέχουν μεγάλες συγκεντρώσεις PGE όπου κατά τον Naldrett et al. (1992), πρέπει να προήλθαν από μάγμα μάζας 200 φορές μεγαλύτερη από αυτή της διείσδυσης.
- 3) Εχει τονιστεί επανειλημμένα στην Ρώσικη βιβλιογραφία σχετικά με το Noril'sk ότι η ψυγμένη διείσδυση, περιβάλλεται από ισχυρά μεταμορφωμένα και μετασωματομένα άλως (Genkin et al. 1981: Likhachev 1994). Σε πολλές περιπτώσεις αυτά επεκτείνονται πολύ περισσότερο στο εσωτερικό του μητρικού πετρώματος απότι η διείσδυση, σε κάποιες από αυτές τις περιπτώσεις φτάνει τα 400 m (Genkins et al. 1981).
- 4) Η Θειούχα ισοτοπική σύσταση των σουλφιδίων είναι αρκετά βαριά για μανδυακής προέλευσης Θείο, μεταξύ +8 με $12\delta^{34}\text{S}$ (Godlevsky and Grinenko, 1963: Grinenko, 1985).

Ο Naldrett et al. (1995) παρατήρησαν ότι οι ορυκτοποιημένες διεισδύσεις συμπεριφέρθηκαν σαν τροφοδότες για το ηφαιστειακό μάγμα έκτασης $5000 \pm 10000 \text{ km}^3$ το οποίο αντιπροσωπεύεται από τους σχηματισμούς ΠΒ1-ΠC2, και αν αρκετά από τα σουλφίδια σχηματίστηκαν στα πιο αβαθή σημεία του φλοιού, ουσιαστικά in situ. Με βάση τις αναλογίες La/Sm, Gd/Yb και Th/Ta μαζί με τα Nd ισοτοπικά δεδομένα, βγήκε το συμπέρασμα ότι το τελευταίο μάγμα που πέρασε μέσα από αυτά τα σώματα ήταν αυτό που τροφοδοτούσε τον ηφαιστειακό σχηματισμό ΠC2. Πρότειναν ότι παρότι η μάζα των χαλκόφιλων μετάλλων αποχωρίστηκε από το μάγμα ωθώντας τους σχηματισμούς λάβας ΠΒ1 και ΠΒ2, το μάγμα συνέχισε να ρέει μέσω του συστήματος ως και τον σχηματισμό λάβας ΠC2.



Σχήμα. 3 Κατακόρυφη τομή της ανατολικής πλευράς της διείσδυσης του Noril'sk του λατομείου του Bear's brook (απο Distler και Kunilov 1994)

Η ροή μεγάλων ποσοτήτων μάγματος μέσω ενός συστημάτων σωληνώσεων, οπού η ψυγμένη διείσδυση είναι μέρος αυτού, αποτελεί σημαντικός παράγοντας για τον μεγάλο όγκο πετρωμάτων που υπέστησαν μεταμόρφωση. Επίσης είναι υπεύθυνη για την μεγάλη αναλογία σουλφιδίων, και των PGE που σχετίζονται με τα σουλφίδια, ειδικά όταν συγκριθεί με τις ορυκτοποιημένες διεισδύσεις. Οι Naldrett et al. (1995) παρατήρησαν ότι τα γεωχημικά δεδομένα μπορούν να εξηγηθούν αν οι σχηματισμοί μάγματος ΠΒ1-ΠΒ2 πέρασαν από δύο στάδια ρύπανσης (σχήμα. 4), μια του μέσου φλοιού, η οποία ήταν υπεύθυνη για την αύξηση της μεγάλης αναλογίας La/Sm και τα υπόλοιπα γεωχημικά χαρακτηριστικά τα οποία υποδεικνύουν αλληλεπίδραση με τον φλοιό, και ένα δεύτερο στάδιο, στα παρόντα στάδια κρυσταλλοποίησης, μέσα σε έναν θάλαμο, ο οποίος σχηματίστηκε στο εσωτερικό των στρωμάτων ιλυολίθων, εβαποριτών και των ανθρακίτων, οπού οι ορυκτοποιημένη διείσδυση αποτελεί διόδους εξόδου για αυτά. Είναι πιθανόν το μάγμα να αποσάθρωσε τα τοιχώματα του θαλάμου σε αυτό το στάδιο, και ως αποτέλεσμα ενσωμάτωσε τους εβαπορίτες του Δεβονίου, και τους ανθρακούχους σχηματισμούς Tungussskaya, και μειώνοντας τους εβαπορίτες σχηματίζονταν σουλφίδια: αυτό μπορεί να εξηγήσει την υψηλή $d^{34}\text{S}$ ποσότητα των σουλφιδίων. Τα σουλφίδια στην συνέχεια μετατέθηκαν νότια από το κεντρικό μέρος του θαλάμου στην περίπτωση του Noril'sk και βόρεια στην περίπτωση του Talnakh, και συγκολλήθηκαν στα πυκνότερα, θερμικά διαβρωμένα μέρη των μαγματικών αγωγών. Στην συνέχεια νέο μάγμα κύλησε μέσω του συστήματος, παρασύροντας τα εγκλωβισμένα σουλφίδια, τα οποία αντέδρασαν με το μάγμα και μεταβλήθηκαν σε χαλκόφιλα μέταλλα. Η επέκταση αυτής της μεταβολής, ήταν ανάλογη με την ποσότητα του μάγματος που κυλούσε μέσω του συστήματος αγωγών. Σταδιακά μεταγενέστερα κύματα μάγματος συνάντησαν σουλφίδια στην πορεία τους με μεγαλύτερη συγκέντρωση Ni, Cu και PGE, το οποίο είχε σαν αποτέλεσμα το μάγμα να χάσει μικρότερες ποσότητες χαλκόφιλων στοιχείων. Αυτό εξηγεί την ανανέωση στις ποσότητες αυτών των μετάλλων στους σχηματισμούς λάβας ΠC1 μέχρι και τον ΠA (Σχήμα. 2)



Σχημα. 4 Ένα μοντέλο για την εξέλιξη της λάβας και της διείσδυσης στο Noril'sk κατά την έκρηξη των σχηματισμών IIB1 (nd1), IIB2 (nd2), IIB3 (nd3), IIC1 (mr1) και IIC2 (mr2), τροποποιημένο από τις απόψεις των Naldrett et al. (1995)

3.3. Κοίτασμα Voisey's Bay Ni-Cu-Co

Περιγραφή του κοιτάσματος

Το κοιτάσμα του Voisey's Bay (Naldrett et al. 1996b, 1997; Ryan 1997) σχετίζεται με σύμπλεγμα του Voisey's Bay ηλικίας 1,334 Ga (Amelin et al. 1997). Αποτελεί μέρος του πλουτωνικού σώματος Nain (1,35±1,29 Ga) το οποίο είναι σύμπλεγμα ορθοσίτη-γρανίτη-τροκτωλίτης-Fe-διορίτης που τέμνει το ανατολικής κλίσης όριο σύγκρουσης μεταξύ του γρανατικό-σιλλιμανίτη και χαλαζιακό-αστρίουχου Γνευσίου της επαρχίας Neip στα ανατολικά (Ryan et al. 1995).

Οι σύγχρονες γνώσεις που υπάρχουν στο αντικείμενο (Σχήμα. 5), υποδεικνύουν ότι τα κοιτάσματα του Voisey's Bay αποτελούνται από δύο, ανατολικής πτώσης διεισδύσεις (Reid Brook και Eastern Deeps διείσδυση), η μία βρίσκεται περίπου 2 km κάθετη απόσταση από την άλλη, όπου ενώνονται από της μεγάλης γωνίας πυριγενή στρώση. Η κατώτερη, Reid Brook, διείσδυση, βρίσκεται μέσα σε πρωτεροζωικό γνεύσιο. Μέχρι στιγμής το σώμα του Reid Brook τέμνεται στην δυτική πλευρά του ορυχείου, όπου φαίνεται να μικραίνει προς τα πάνω και να συγχωνεύεται με την πυριγενή στρώση που ενώνει τα δυο σώματα. Στο σημείο συγχώνευσης, η στρώση φαίνεται να συμπιέζεται από τους "αγωγούς breccia" όπου αποτελείται από διάφορα εγκλείσματα γνευσίου, ενώ το μητρικό πέτρωμα φαίνεται να αποτελείται από νορίτες και τροκτωλίτη μαζί με διάφορες ποσότητες σουλφιδίων.

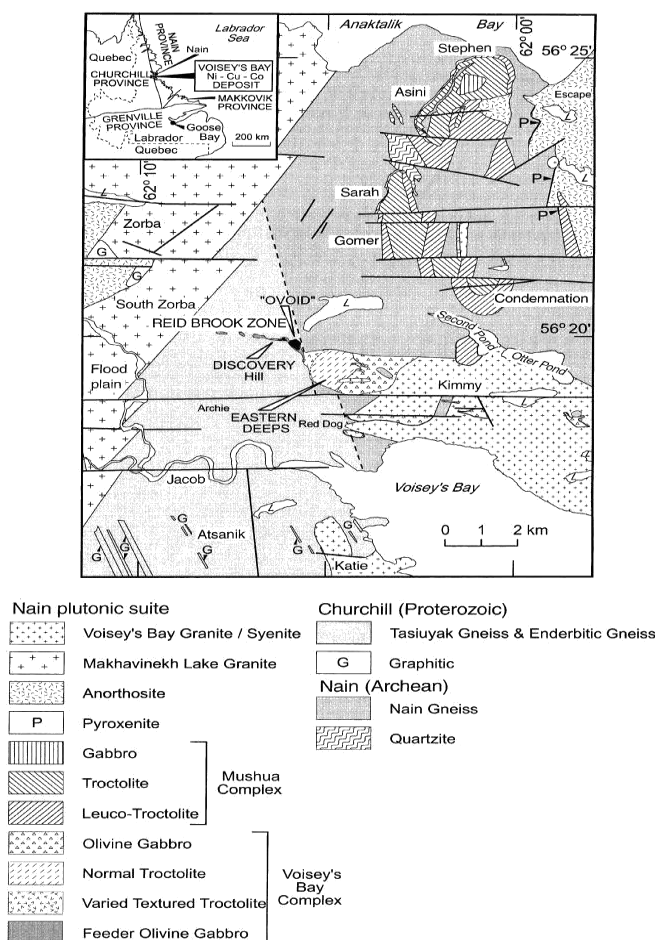
Η πυκνότητα της στρώσης ένωσης είναι μεταξύ 10+/-100 m. Η ορυκτοποίηση περιορίζεται στα πιο πλατιά σημεία της στρώσης, η οποία εμφανίζεται ως μια σειρά από πεπλατυσμένους ύαλους, μέσα στην κύρια μάζα της στρώσης. Στην ζώνη ανακάλυψης, όπου η κλίση της στρώσης είναι μεταξύ 70 και 40°N, η στρωματογραφία διαφαίνεται καθαρά, με την ανώτερη, ψυχρή ζώνη να υποχωρεί προς τα κάτω σε ένα σχηματισμό 5±20 m ολιβινικού γάββρου, και πιο κάτω σε έναν σχηματισμό τροκτωλίτης με 30-50% σουλφίδια ("Leopard Troctolite" LT). Ο LT βρίσκεται σε επαφή με την ακολουθία Basal Breccia (BBS, παρόμοιο με τους αγωγούς Breccia), η οποία αποτελείται από εγκλείσματα γνευσίου και τροκτωλίτης, πυροξενίτη και περιδοτίτη μέσα σε μητρικό πέτρωμα τροκτολίθου η νορίτη. Σε άλλο σημείο η στρώση είναι σχεδόν κατακόρυφη.

Η διείσδυση του Eastern Deeps εμφανίζεται στην επιφάνεια, με την βάση του να βυθίζεται 20-25° A-NA (Σχήμα. 6). Αρκετά δεκάδες μέτρα του BBS σχηματισμού

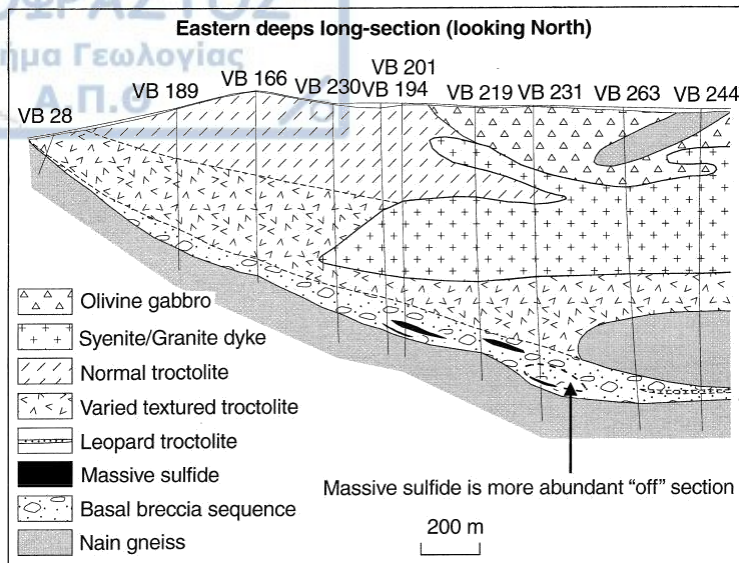
εμφανίζεται στην βάση, και καλύπτεται από τροκτωλίτη, με πολλαπλές διεισδύσεις, διάφορες ποσότητες (συνήθως 10-20 vol%) σουλφιδίων και διάφορες υφές (Varied Textured Troctolite "VTT"). Η διείσδυση ανεβαίνει προς τα πάνω μέσω ενός τροκτωλίτου, με ανάλογη υφή και λιγότερα σουλφίδια και εγκλείσματα (κανονικός τροκτωλίτης) η οποία φαίνεται να διεισδύει στο ανώτερο μέρος του Eastern Deeps σχηματισμού, δηλαδή τον ολιβινικό γάββρο. Ένα επίπεδο αγωγών τέμνει την βάση της διείσδυσης του Eastern Deeps κατά μήκος του μέρους του σχηματισμού που έχει μελετηθεί. Οι Naldrett et al. (1996b) έδειξαν ότι τεράστιες ποσότητες σουλφιδίων εμφανίζονται κατά μήκος σε σημαντική ποσότητα κοντά αλλά και γύρω του αγωγού.

Η πιο πλούσια σε ορυκτά ζώνη που ανακαλύφθηκε, ονομάζεται «Ovoid». Η ζώνη αυτή, είναι μια λεκάνη 300 με 600 m τεραστίων ποσοτήτων σουλφιδίων μέχρι και 110 m βαθιά, η οποία σχηματίστηκε πάνω και νότια της στρώσης-ένωση των δύο διεισδύσεων. Οι Naldrett et al. (1996b) το εξήγησαν ως την βάση του Eastern Deeps η οποία τώρα πια εμφανίζεται ως επιφανειακό στρώμα.

Οι Li and Naldrett (1997) αναφέρουν ότι οι ολιβίνες στους γάββρους και τροκτωλίτους του Voisey's Bay συμπλέγματος, αποτελούνται από δύο ομάδες χωρισμένες με βάση την περιεκτικότητα τους σε Ni. Ο ολιβινικός γάββρος στο ανώτερο μέρος της διείσδυσης Eastern Deeps, Το FOG και κάποιες ζώνες μέσα στον τροκτωλίτη του σώματος Reid Brook περιέχει φτωχό σε Ni ολιβίνη, ενώ οι σχηματισμοί NT και VTT του Eastern Deeps, και ο LT της στρώσης ένωσης περιέχει ολιβίνη με μεγαλύτερο ποσοστό Ni.

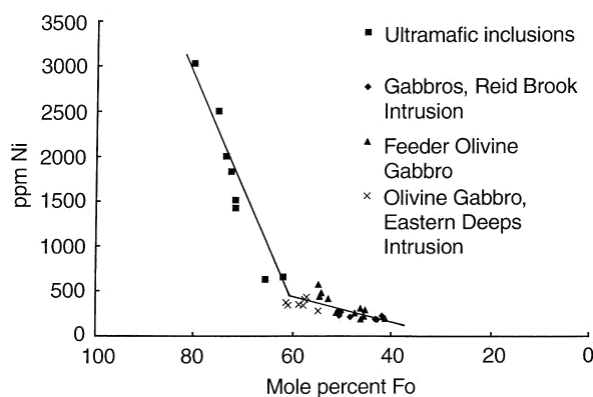


Σχήμα. 5 επιφανειακό σχέδιο του κοιτάσματος Voisey's Bay (των Li and Naldrett 1998)



Σχήμα. 6 ANA-ΔΒΔ περιοχή του Eastern Deeps (μοντελοποιήθηκε από τους Naldrett et al. (1996))

Ολιβίνες μέσα στα υπερβασικά-βασικά εγκλείσματα του σχηματισμού BBS ορίζουν μία τάση στο διάγραμμα Ni vs Fo (Σχήμα. 7) η οποία επιβεβαιώνεται την παρατεταμένη μερική κρυστάλλωση του ολιβίνη του τροκτωλιτικού μάγματος, οδηγώντας σε φτωχό σε Ni μάγμα (και ως αποτέλεσμα φτωχούς σε Ni ολιβίνες). Μερικοί γάββροι της διείσδυσης του Reid Brook, του Fog και ολιβινικοί γάββροι του eastern Deep βρίσκονται στην επέκταση αυτής της τάσης. Προτείνεται ένα μοντέλο, με δύο στάδια, της γένεσης των κοιτασμάτων. Τροκτωλιτικό μάγμα ανεβαίνει προς τα πάνω δημιουργώντας έναν θάλαμο (διείσδυση Reid Brook) μέσα στον γνεύσιο του Tasiuyak, όπου διαχωρίζεται, δίνοντας χώρο σε υπερβασικές συγκεντρώσεις, οι οποίες αντιδρούν με τον γνεύσιο του Tasiuyak, αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να κορεστεί από σουλφίδια. Εφαρμογή πειραματικών συντελεστών πάνω στους φτωχούς σε Ni ολιβίνες δείχνει ότι τα σουλφίδια που διαχωρίστηκαν από το φτωχό σε Ni μάγμα θα περιείχαν 1,5-2,0 wt.% Ni.



Σχήμα. 7 Σχεδιάγραμμα του Ni σε ppm σε ολιβίνες ως προς την περιεκτικότητα των ολιβίων σε Fo για τα υπερβασικά εγκλείσματα των τροκτωλιτών της διείσδυσης του Reid Brook και των αγωγών ολιβινικού γάββρου του Voisey's Bay, το διάγραμμα δείχνει σταθερότητα όσον αφορά την κρυσταλλοποίηση των ολιβίων από το τροκτωλιτικό μάγμα

Το μάγμα αυτό στην συνέχεια ανέβηκε πάνω από την στρώση ένωσης για να σχηματίσει το OG του πάνω (Eastern Deeps) θαλάμου: το FOG είναι υπόλειμμα του περάσματος του σχηματισμού το οποίο συγκολλήθηκε στα τοιχώματα της στρώσεως. Ταυτόχρονα, νέο μάγμα εισχωρούσε στα κατώτερα μέρη του θαλάμου, ανακινώντας τις συγκεντρώσεις και αναμιγνύοντάς τα με το εναπομείναντα μάγμα, Το BBS και τα σουλφίδια στο εσωτερικό του, εμπλουτίζοντάς τα σουλφίδια σε Ni και Cu, και τα μεταφέρει προς το την στρώση ένωσης, στο Onoid, το τεράστιο μέταλλευμα στην βάση του Eastern Deeps αλλά και στο διεσπαρμένο μέταλλευμα του VTT. Τα σουλφίδια συγκεντρώθηκαν σε φαρδύς ζώνες μέσα στη στρώση ένωσης και στο στόμιο των αγωγών μέσω του οποίου η μάζα του μάγματος κυλούσε και μειωνόταν καθώς το μάγμα εισχωρούσε στον θάλαμο.

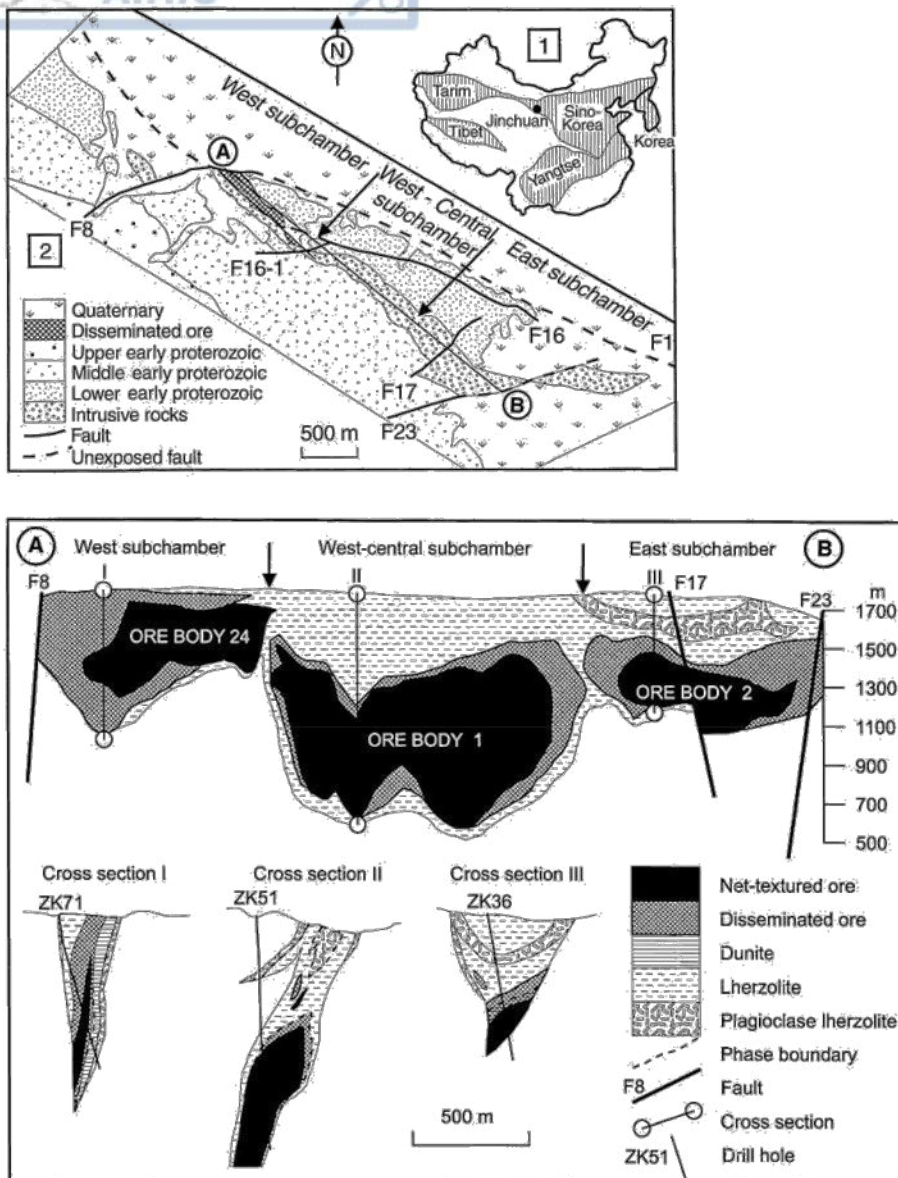
3.4. Κοίτασμα Jinchuan, Κίνα

Το κοίτασμα Jinchuan βρίσκεται στην ανατολική κεντρική Κίνα, στο εσωτερικό αλλά κοντά στο δυτικό όριο της σινο-κορεατικού κρατονικής πλατφόρμας. Βρίσκεται μέσα σε μία σειρά βασικών-υπερβασικών σωμάτων που εισχωρούν σε ένα περιθώριο, το οποίο είναι ανυψωμένη ζώνη, την ζώνη Longshoushan. Μιγματίτες κατώτερου πρωτεροζωϊκού, γνεύσιοι, σχιστόλιθοι και μάρμαρα σχηματίζουν μια μονοκλινή ακολουθία δυτικής κατεύθυνσης, στα νοτιοδυτικά της ακολουθίας επικάθονται κροκαλοπαγή του ανώτερου πρωτεροζωϊκού, ψαμμίτες, ασβεστόλιθοι και σχιστόλιθοι (Tang 1993). Μεγάλα βόρειο-ανατολικής κατεύθυνσης ρήγματα μετατόπισης εμφανίζονται μέσα στον ανυψωμένο τέμαχος, και το κύριο σώμα του jinchuan καταλαμβάνει ένα από αυτά που κόβει τα στρώματα του κατώτερου πρωτεροζωϊκού. Οι Tang et al. (1992) παραθέτουν μία Sm-Nd χρονολόγηση για την διείσδυση ηλικίας $1,501 < 0,031$ Ga. Οι Chaoi και Naldrett (1992b) συμπέραναν ότι η μητρική διείσδυση εναποτέθηκε στην ρωγματομένη ζώνη που σχηματίστηκε στο όριο μεταξύ της κρατονικής πλατφόρμας της Sino-Κορέας και του σχηματιζόμενου πρωτεροζωϊκού ωκεανού: αυτή στην συνέχεια έκλεισε με την συγκόλληση των πτυχωμένων στρωμάτων του πρωτεροζωϊκού πάνω στην κρατονική πλατφόρμα.

Το μητρικό πέτρωμα του κοιτάσματος αποτελείται από μία μάζα δουνιτών, λερζολιθών ολιβινικών βεπστεριτών και βεπστεριτών, έχει μήκος 6500 m και πλάτος από λίγα μέτρα μέχρι >500 m. Η διατομή του έχει σχήμα ν, στενεύει προς τα κάτω και κόβεται σε βάθος 500-1300 m. Τασικά ρήγματα βορειο-ανατολικής διεύθυνσης, μετατοπίζουν διαφορετικά τμήματα της διείσδυσης, όπου σχηματίστηκαν σε διαφορετικά τμήματα μεταλλεύματος (Σχήμα. 8).

Η εσωτερική δομή της διείσδυσης μεταβάλλεται κατά μήκος της, από τμήμα σε τμήμα. Στη βορειοδυτική άκρη οι επαφές είναι μεγάλης κλίσεως (Σχήμα. 8) με τον δουνίτη να είναι το κύριο πέτρωμα σε βάθος, και τον λερζολίθο να αυξάνεται προς την κορυφή, σχηματίζοντας τις οριακές ζώνες στον δουνίτη κατά βάθος. Στα κεντρικά και νοτιοανατολικά κομμάτια της διείσδυσης, ο δουνίτης είναι και πάλι το βασικό πέτρωμα στο βάθος, αλλά παρεμβάλλεται και μεταξύ του λερζολίθου, του πλαγιοκλαστικού λερζολίθου, του βεμπστερίτη και του ολιβινικού βεμπστερίτη με την μορφή στρώσεων, παράλληλα στα όρια

των σχηματισμών αλλά συμπίεζεται και γίνεται πιο οριζόντιο όσο πλησιάζουμε στον άξονα του σώματος (Σχήμα. 8).



Σχήμα. 8 (πάνω εικόνα) Γεωλογικός χάρτης της διείσδυσης Jinchuan:

(κάτω εικόνα) εγκάρσια και κατά μήκος τμήματα της διείσδυσης του Jinchuan η οποία δείχνει την κατανομή των διάφορων τύπων πετρωμάτων και την φύση της Ni-Cu ορυκτοποίησης που περιέχουν, από τους Chai and Naldrett (1992a)

Ο κυριότερος τύπος μεταλλεύματος είναι τα «δικτυωτά μεταλλεύματα», στα οποία οι κόκκοι ολιβίνοι είναι εγκλεισμένοι σε ένα δίκτυο από σουλφίδια και χαμηλότερης ποιότητας διεσπαρμένα μεταλλεύματα, όπου τα σουλφίδια εμφανίζονται ενδιάμεσα πυριτικών ορυκτών ή ως υγρά εγκλείσματα. Γενικά, ο δουνίτης είναι το κύριο μητρικό πέτρωμα στην ορυκτοποίηση, και ουσιαστικά οι δουνίτες είναι εκμεταλλεύσιμοι όσο αναφορά το κοίτασμα τους.

Προέλευση της διείσδυσης και ορυκτοποίηση

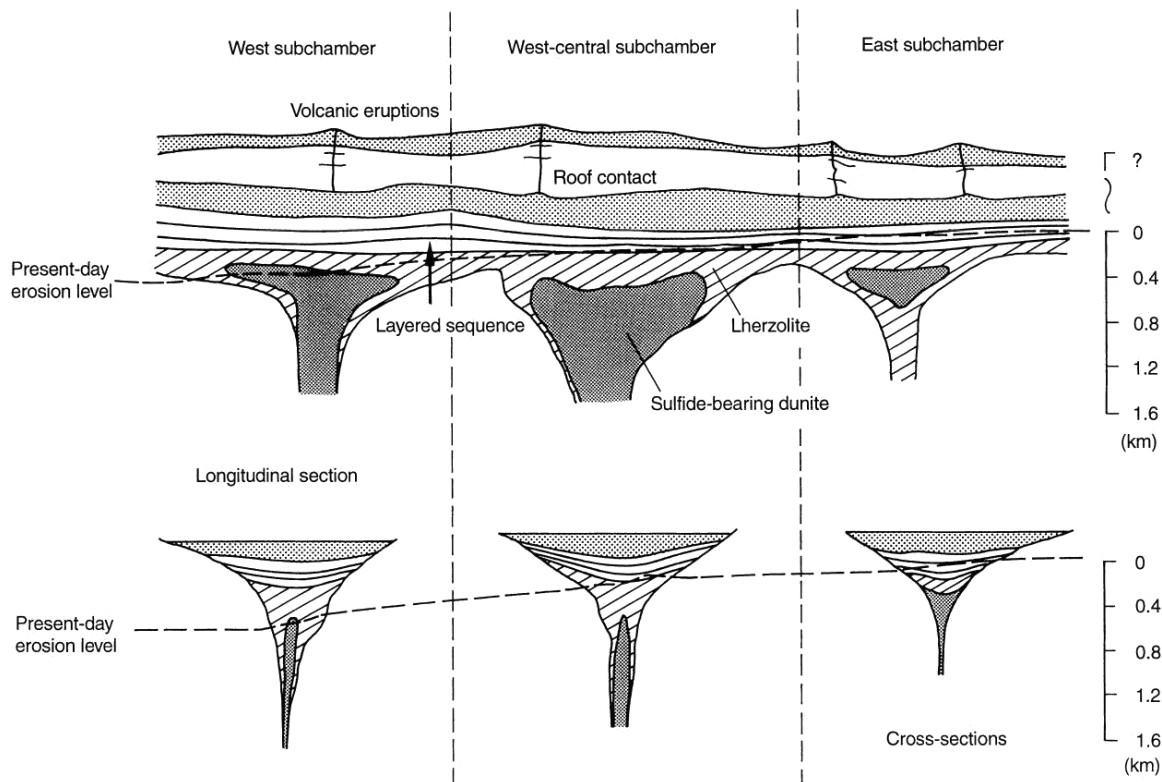
Η φύση του μάγματος η οποία είναι υπεύθυνη για το υπερβασικό μητρικό πέτρωμα της ορυκτοποίησης (βασικό ή υπερβασικό) αποτελεί αμφιλεγόμενο θέμα. Οι Chai και Naldrett (1992a) απέδειξαν χρησιμοποιώντας FeO έναντι MgO , ότι τα υγρά των διάκενων των ολιβίνων των περιδοτιτών, ο οποίο αποτελεί την διείσδυση, περιείχε 12 wt.% MgO και 11,5 wt.% FeO . Μαζί με άλλα γεωχημικά χαρακτηριστικά, όπως η αναλογία Ni/Cu με τιμή 1,5, και τα τύπου-γάββρου PGE στοιχεία (δηλαδή υψηλή ποσότητα $(\text{Pt}+\text{Pd})/(\text{Ru}+\text{Ir}+\text{Os})$), αποτελούν σημαντικά στοιχεία για το γεγονός ότι η σύσταση του αρχικού μάγματος του Jinchuan δεν ήταν υπερβασικό, αλλά Mg βασάλτης. Οι Chai και Naldrett (1992a) πρότειναν ότι τα γαββρικά Cu-mulates, τα οποία προήλθαν από διαφοροποιημένα μαγνησιακά βασάλτικα μάγματα, αφαιρέθηκαν από διάβρωση, και ότι το κύριο σώμα του Jinchuan σχηματισμού είναι η κύρια ζώνη ενός ευθυγραμμισμένου σώματος που αποτελείται κυρίως από γάββρο και τομές σχήματος σάλπιγγας, παρόμοια αλλά μικρότερα από αυτά που εμφανίζονται στον σχηματισμό του Great Dyke στην Zimbabwe, όπως φαίνεται και στο Σχήμα. 9. Οι ρίζες του σχηματισμού ερμηνεύονται σαν αγωγοί που τρέφουν την διείσδυση. Πυκνά σουλφίδια και ολιβίνες μετακινήθηκαν από την ταχύτερη κίνηση του μάγματος στους στενούς χώρους των αγωγών που τρέφουν την διείσδυση, τα σουλφίδια αυτά συγκεντρώθηκαν σε σημεία των αγωγών που πλάτυναν ή στις εξόδους των αγωγών προς το κύριο σώμα.

3.4.1 Κοιτάσματα συγγενικά με κομματίτες, Norseman-Wiluna ζώνη, Δυτική Αυστραλία

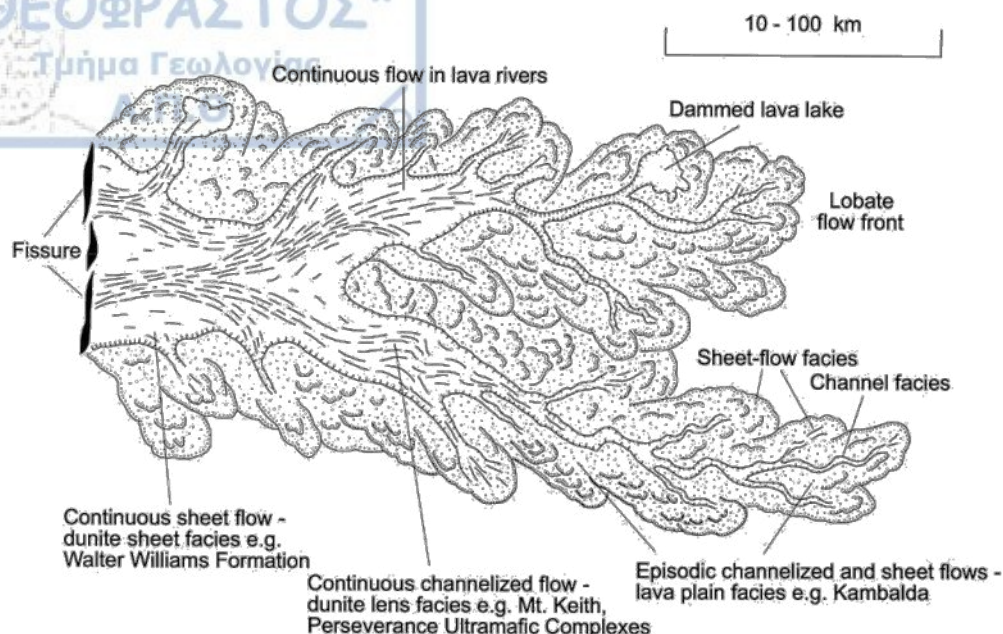
Κοιτάσματα κομματιτών της ζώνης Wiluna-Norseman μπορεί να θεωρηθεί, όπως και κάθε σχετικό κοιτάσμα με κομματίτες, ότι ανήκουν σε δύο ομάδες: η πρώτη ομάδα είναι σχετικά μικρή (1 μέχρι $5 \cdot 10^6$ tonnes), το κοιτάσμα είναι υψηλής περιεκτικότητας (1,5-3,5 Ni) εμφανίζεται στην βάση του τραχύ δουνίτη. Η δεύτερη ομάδα αποτελείται από μεγάλου μεγέθους ($100\text{-}500 \cdot 10^6$ tonnes) χαμηλής εκμετάλλευσης (0,6 Ni) κοιτάσμα διεσπαρμένων σουλφιδίων τα οποία συγκεντρώνονται σαν ροή υάλου μέσα σε δουνίτες. Παραδείγματα από τα κοιτάσματα της πρώτης ομάδας βρίσκονται στο Kampalda district (Ross and Hopkins 1975: Gresham and Loftus Hills 1981: Gresham 1986) και στο Widgiemooltha dome (Fisher 1979: McQueen 1981). Παραδείγματα από την δεύτερη ομάδα βρίσκονται στο Six Mile και Mt. Keith κοιτάσματα κοντά στην Yakabindie, Δυτική Αυστραλία (Burt and Sheppy 1975: Naldrett and Turner 1977: Hill et al. 1989: 1995).

Οι Hill et al. (1989:1990) και Hill (1997) αναφέρθηκαν στην εσωτερική δομή των κομματιτών και έδειξαν ότι οι κομματιτικές λάβες χωρίζονται σε διάφορα χαρακτηριστικά είδη, ο διαχωρισμός αυτός έχει να κάνει με την απόσταση από το σημείο έκρηξης αλλά και την κλίμακα έκρηξης (Σχήμα. 10). Ροές που βρίσκονται πιο κοντά στην πηγή, και ως αποτέλεσμα έχουν υψηλότερη θερμοκρασία, τείνουν να σχηματίζουν εκτεταμένα στρώματα (σε μερικές περιπτώσεις ξεπερνάν τα $35\text{-}150$ km κατά εκατοντάδες μέτρα πάχους) δουνίτη. Όταν αυτά τα είδη σχηματίζονται σε υπό-επιφανειακά στρώματα με χαμηλό σημείο τήξης, όπως όξινα ηφαιστειακά πετρώματα, η ροή μπορεί ρεύσει προς συγκεκριμένες περιορισμένες διόδους. Αυτοί οι δίοδοι έχουν σχηματιστεί στα υπόγεια υπό-επιφανειακά στρώματα με θερμική διάβρωση από το ρεούμενο κομματιτικό μάγμα (Huppert and Sparks 1985). Στα κατάντη, όπου η ροή έχει μικρότερη ταχύτητα και πιθανόν επίπεδη, σχηματίζονται «πεδιά λάβας» που αποτελούνται από στρώσεις δουνίτη με φαινοκρυστάλλους. Η ροή κάτω από αυτές τις συνθήκες σχηματίζει υάλλους μεσοκοκκούς ολιβίνες (αρκετά εκατοντάδες μέτρα πλάτος και μέχρι 100 μέτρα πάχος), οι οποίοι αντιπροσωπεύουν τα κύρια κανάλια χωρισμένα από τα πεδιά λάβας στα οποία τα ανώτερα μέρη των ροών έχουν οφειτικό ιστό.

Τα κοιτάσματα της πρώτης ομάδας συσχετίζονται με απομακρυσμένα σώματα κοματιτικών ρωών, όπου εμφανίζονται μέσα σε καλά σχηματισμένες ρωγμές από διάβρωση που σχηματίστηκαν στην βάση της ρέουσας λάβας όπου χαρακτηρίζεται από μεσόκοκκους ολιβίνες (40-44 wt.% MgO). Η δεύτερη ομάδα σχηματίζεται ως δουνιτικούς ύαλους οι οποίοι είναι ουσιαστικά ροές δουνιτικής λάβας (45-50 wt.% MgO).



Σχήμα. 9 Μοντέλο αναπαράστασης της διείσδυσης Jinchuan μετά την απόθεση της όπως προβλέφθηκε από τους Chai and Naldrett (1992b)



Σχήμα. 10 Σχηματική αναπαράσταση από ένα ηφαιστειακό σύμπλεγμα κοματίτη που σχηματίστηκε από κατακλυσμικές συνεχόμενες εκρήξεις. Σημειώνεται ότι δουνιτικές στρώσεις ρεούμενης λάβας σχηματίζονται πιο κοντά στο φρεάτιο. Στα κατάντη ψυγμένη λάβα δίνει την ευκαιρία στον σχηματισμό στρωμάτων συσσωμάτων και σχηματισμοί ροών. Κοντά στα όρια και τα άκρα το ηφαιστειακό σύμπλεγμα αποτελείται από πεδία λάβας τα οποία είναι ροές μαζί με λεπτές «Munro είδος» ροές (Hill et al. 1990).

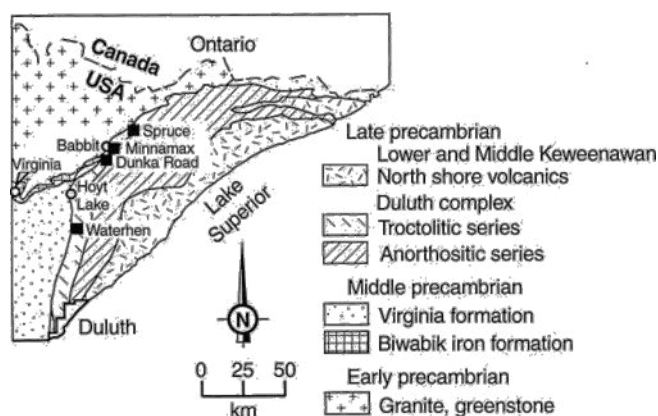
Η πηγή του θείου στις κοματιτικές ροές λάβας παραμένει άγνωστη. Οι τιμές του $d^{34}\text{S}$ στα κοιτάσματα Kambalda είναι μεταξύ 5 στα 10 ανά mil, το οποίο δεν αποτελεί αναγνωριστικό στοιχείο διότι οι ιζηματογενής πηγές των σουλφιδίων δείχνουν παρόμοιες διακυμάνσεις, παρ'όλα αυτά ο Leshner (1989) έδειξε ότι οι τιμές $d^{34}\text{S}$ στα κοιτάσματα και στα σουλφίδια της βάσης είναι παρόμοιες σε πολλά τοπικά σημεία, συμπεριλαμβανομένων και των περιοχών Kambalda και Mt. Windarra.

3.5. Ορυκτοποίηση του συμπλέγματος Duluth

Το σύμπλεγμα Duluth αποτελείται από μία μεγάλη σύνθετη διείσδυση τροκτωλιτικού, γαβρικού ανορθοσίτη, εμφανίζεται επιφανειακά ως ένα σώμα που εκτείνεται περίπου 240 km βόρειο-ανατολικά από το Duluth, Μινεσότα, στα σύνορα με τον Καναδά, κοντά στην βορειοδυτική ακτή της λίμνης Superior. Η λίμνη Superior βρίσκεται πάνω από τεκτονικό βύθισμα, το οποίο βρίσκεται μεταξύ δύο μεγάλων ρηγμάτων και πτυχές μεταξύ των οποίων ο αρχαϊκός φλοιός υπέστη λέπτυνση στο $\frac{1}{4}$ του αρχικού πάχους του και πάνω από 17 km ηφαιστειακών και ιζηματογενών πετρωμάτων συσσωρεύτηκαν. Βρίσκεται εκεί όπου η μέσο-ωκεάνια ράχη της βόρειας Αμερικής, η οποία χαρακτηρίζεται από βαρυτικές και μαγνητικές ανωμαλίες, αλλάζει την κατεύθυνσή της από τα νοτιοδυτικά-βορειοανατολικά στα βορειοδυτικά-νοτιοανατολικά, και πιθανόν αποτελεί τριπλό κόμβο ενός αποτυχημένου συστήματος ρήξης το οποίο σχηματίστηκε ως αντίδραση σε ένα υποκείμενο hot-spot.

Το σύμπλεγμα Duluth έχει 1,2 Ga ηλικία (Faure et al. 1969) είναι σύνθετη διείσδυση που μελετήθηκε από τους Grout (1918) Green et al. (1966), Bonnichsen (1972), Phinney (1970, 1972), Weiblen and Morey (1975, 1980), Martineau (1989), Severson (1988, 1991) και Severson and Hauck (1990) και έδειξαν ότι αποτελείται από δύο σειρές, μια παλαιότερη σειρά ανορθοσιτικών πετρωμάτων τα οποία είναι κομμένα προς το δυτικό όριο από μία σειρά νεότερων διεισδύσεων αποτελούμενες κυρίως από τροκτωλιτών. Συσχετίζεται στενά πετρογενετικά με τους βασάλτες Keewapawan της περιοχής της λίμνης Superior και διείσδυσε κοντά στην επαφή αυτών με το προκάμβριο υπόβαθρο τα οποία εμφανίζονται επιφανειακά στα βορειοδυτικά (Σχήμα. 11). Το υπόβαθρο αυτό, αποτελείται στα βόρεια από ένα σύμπλεγμα αρχαϊκών όξινων διεισδύσεων και ηφαιστειακά, κυρίως τον γρανίτη του Giants Range, τα οποία επικαλύπτονται στα δυτικά από τον σιδηρούχο σχηματισμό Biwabik ο οποίος έχει κατεύθυνση νότια. Ο σιδηρούχος σχηματισμός με την σειρά του επικαλύπτεται από μαύρους αργιλίτες, πηλίτες, ιλυόλιθοι, γραφιτικοί σχιστόλιθοι και σουλφίδια του σιδηρούχου σχηματισμού που αποτελεί τον σχηματισμό Virginia.

Το σύμπλεγμα είναι ξενιστής σε $4 \cdot 10^9$ τόννους ορυκτών που αποτελείται από κατά μέσο όρο 0,66 wt.% και Cu 0,2 wt.% Ni (listerud and Meineke 1977). Η ορυκτοποίηση συμβαίνει παράλληλα με τα δυτικά όρια της τροκτωλιτικής διείσδυσης η οποία ορίζει το δυτικό άκρο του συμπλέγματος (Σχήμα. 11). Στα περισσότερα κοιτάσματα, η ορυκτοποίηση αποτελείται από σιδηροπυρίτες, χαλκοπυρίτες, πεντδλαντίτες, και χαλκοσίνες ελαφρώς διεσπαρμένους σε τροκτωλίτους και νορίτες μέχρι και 300 m από την βάση του συμπλέγματος. Οι ζώνες ορυκτοποίησης χαρακτηρίζονται από διάφορα εγκλείσματα αυτοχθόνων πετρωμάτων αποτελούμενα από τους σχηματισμούς Hornfelsed Virginia και Biwabik, μαζί με γαββρους και περιδοτίτες. Στο κοιτάσμα Minna-max και στο κοιτάσμα Dunka Road (Σχήμα. 11), οι νορίτες επικρατούν ταυτόχρονα οι τροκτωλίτες είναι πιο σπάνιοι στην περιοχή των οριζόντων σουλφιδίων, αυτό επιβεβαιώνεται και από τις αντιδράσεις μεταξύ των τροκτωλιτών και των εγκλεισμάτων αυτοχθόνων πετρωμάτων. Ένα ιδιαίτερο χαρακτηριστικό πολλών κοιτασμάτων είναι η εμφάνιση έως και 10% γραφίτη σε κάποιες ζώνες. Άλλα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά του περιβάλλοντος των σουλφιδίων είναι η παρουσία πράσινου σπινέλιου (Mg-Al.) σε κάποιους τροκτωλίτες, όπως επίσης και η εμφάνιση τοπικά κορδιερίτη. Όπως και σε άλλα κοιτάσματα, εμφανίζονται πολλαπλά μερικώς απορροφημένα κομμάτια σχιστολίθου του σχηματισμού Hornfelsic Virginia μέσα σε τροκτωλίτους.



Σχήμα. 11 Χάρτης του δυτικού ορίου της λίμνης Superior, όπου βρίσκεται η τοποθεσία του συμπλέγματος Duluth και την σχέση του με τα αυτόχθονα πετρώματα (το σχέδιο είναι των Mainwaring and Naldrett 1977)

Η ποσότητα θείου στα κοιτάσματα Duluth είναι μεγάλη, με τιμές $d^{34}\text{S}$ μεταξύ 11-16 στην διείδυση Waterhen (Mainwaring and Naldrett 1977) και 0,2 με 15,3 ανά mil στο κοιτάσμα Dunka Road και 2-7 στο κοιτάσμα Babbit (Ripley 1981, 1986). Ο μαγνητοπυρίτης στον υποκείμενο σχηματισμό Virginia δείχνει ένα παρόμοιο εύρος τιμών στην ισοτοπική του σύσταση, επίσης τα αυτόχθονα πετρώματα αποτελούν πηγή για το θείο. Η ετερογενής κατανομή των ισοτοπικών τιμών του θείου μέσα στο κοιτάσμα, μαζί με ένα μεγάλο εύρος στην περιεκτικότητα σε Ni των ολιβίνων στην ορυκτοποιημένη ζώνη οδήγησαν τον Ripley (1986) στο να προτείνει ότι η εισχώρηση θείου συνέβη *in situ*, και ότι η εκτεταμένη εξισορρόπηση μεταξύ των σουλφιδίων και των πυριτικών στοιχείων δεν συνέβη. Αναφέροντας την έλλειψη γεωχημικών στοιχείων που να υποστηρίζουν εκτεταμένη αφομοίωση των σωμάτων, πρότεινε ότι το θείο εμφανίστηκε σε μια ασταθή φάση κατά την μεταμόρφωση των πετρωμάτων του κάτω τεμάχους του ρήγματος στην διάρκεια της διείδυσης. Αυτό υποστηρίζεται και από την συσχέτιση ένυδρων ορυκτών όπως βιοτίτης και αμφίβολος όπως και κομμάτια πηγματίτη μέσα στην ζώνη ορυκτοποίησης.

3.6. Κοίτασμα Sudbury

3.6.1. Γεωλογικό περιβάλλον

Το πυριγενές σύμπλεγμα του Sudbury βρίσκεται στην επαφή μεταξύ τοναλιτικού γνευσίου και χαλαζιακού μονζονίτη που διείδυσε, όλα είναι αρχαϊκής ηλικίας ($>2,5$ Ga) στον βορά, και τα πετρώματα της προτεροζωικής δυτικής επαρχίας, που επικαλύπτει το αρχαϊκά υποκείμενα, και μεγαλώνουν σε πάχος στα νότια (Σχήμα. 12). Οι γνεύσιοι παρουσιάζουν γρανουλιτική μεταμόρφωση σε μεγάλη περιοχή στα βόρεια και δυτικά όρια του συμπλέγματος. Τα πρωτεροζωικά πετρώματα ανήκουν στην Huronian υπερομάδα: στην περιοχή του Sudbury αποτελούνται από τοπικές συγκεντρώσεις βασικών και όξινων ηφαιστειακών, που επικαλύπτονται από ψαμμίτες και ιλύολιθοι, που με την σειρά τους επικαλύπτονται από αρενίτες.

Οι σχηματισμοί που έχουν να κάνουν με τα γεωλογικά γεγονότα στο Sudbury αποτελούνται από:

1) Τα Sudbury λατυποπαγές, που είναι λατυποπαγές αποτελούμενα από κομμάτια αυτόχθονων πετρωμάτων με μέγεθος κόκκων μικροσκοπικό έως 10 m σε διάμετρο, εμφανίζεται ως αναχώματα και ασυνήθιστες μάζες σε όλους τους σχηματισμούς παλαιότερους του συμπλέγματος πυριγενών του Sudbury έξω από το Sudbury. Σε μερικά μέρη δείχνει αρχικά σημάδια τήξης. Δεν έχει παρατηρηθεί να κόβει πετρώματα από το πυριγενές σύμπλεγμα του Sudbury, ή νεότερα πετρώματα.

2) Λατυποπαγές Footwall, ένα λατυποπαγές που αποτελείται από κομματιασμένα και θρυματισμένα αυτόχθονα πετρώματα που σχηματίζουν μια στρώση, με πάχος 100-500 m, βρίσκεται μεταξύ του συμπλέγματος του Sudbury και των γνευσίων και μονζονιτών του υπερκείμενου τεμάχους κατά μήκος του βόρειου τμήματος του Sudbury. Εκτείνεται και ως 10 m μέσα σε αυτά τα πετρώματα ως λεπτές αποφύσεις. Είναι επίσης παρών κατά μήκος του νότιου τμήματος αλλά είναι λιγότερο συχνή η εμφάνισή του (Grant and Bite, 1984).

3) Σχηματισμός Onaping, ένα λατυποπαγές που αποτελείται από κομμάτια αυτοχθόνων πετρωμάτων και ανακρυσταλλωμένα ορυκτα μέσα σε ένα χώρο υάλων (Muir and Peredery, 1984). Έχει ερμηνευτεί ως απόθεση πυροκλαστικής ροής ή αλλιώς "fall-back" λατυποπαγές από την πρόσκρουση του μετεωρίτη. Υποκείμενα αυτού βρίσκεται ένα άλλο λατυποπαγές αποτελούμενο από κομμάτια χαλαζίτη και γνευσίου σε συγκολλητικού υλικό

όξινου πυριγενούς ('melt rock': Muir and Peredery, 1984).

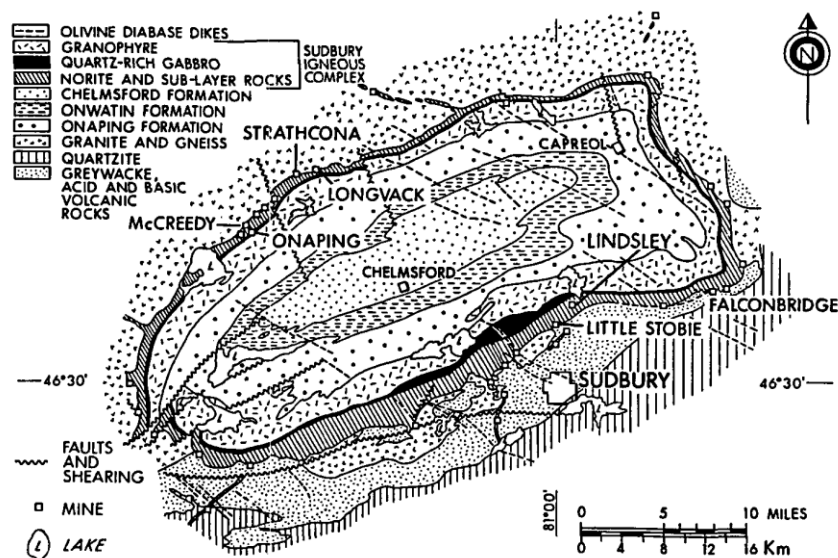
Το πυριγενές σύμπλεγμα του Sudbury είναι επωθημένο μεταξύ του Footwall λατυπολαγές και του Onaping λατυποπαγές και του συγγενικού "melt rock", τα κύρια σώματα του συμπλέγματος είναι: (α) το υπόστρωμα, (β) ο περιθωριακός νορίτης της νότιας περιοχής και ο βασικός νορίτης της βόρειας περιοχής, (γ) ο νορίτης της νότιας περιοχής και ο όξινος νορίτης, (δ) ο χαλαζιακός γάββρος και (ε) ο γρανοφύρης και ο πλαγιοκλαστικός γρανοφύρης. Όλοι οι σχηματισμοί εκτός του υποστρώματος αποτελούν την κύρια μάζα του συμπλέγματος.

Οι σχηματισμοί του πυριγενούς συμπλέγματος του Sudbury, και το υπερκείμενο στρώμα αυτού, εμφανίζονται στην επιφάνεια ως συγκεντρικά, σχεδόν ελλειπτικά δαχτυλίδια τα οποία κλίνουν προς το κέντρο του συμπλέγματος και σχηματίζουν μία λεκάνη (Σχήμα. 13). Παρ'όλα αυτά πρόσφατα σεισμικά δεδομένα (Milkereit et al., 1994) δείχνουν την βαθιά γεωμετρία των σχηματισμών του Sudbury η οποία είναι ασύμμετρη. Η σεισμική τομή κατά μήκος της βόρεια περιοχής δείχνει ότι τα ιζηματογενές πετρώματα και ο σχηματισμός Onaping πάνω από το σύμπλεγμα του Sudbury, τους σχηματισμούς του Sudbury, και έναν πυκνό σχηματισμό κάτω από το πυριγενές σύμπλεγμα του Sudbury, κλίνουν νότια με μέση τιμή 20° (Σχήμα.13). Η ανάκλαση από τα άνω στρώματα (τα ιζηματογενή πετρώματα και ο σχηματισμός Onaping) διακόπτονται από ρήγματα κοντά στον μεγάλο άξονα του συμπλέγματος του Sudbury: το κατώτερο στρώμα (νορίτες και γνεύσιοι) χαρακτηρίζεται από νότια κλίση νότια του νότιου ορίου του συμπλέγματος του Sudbury. Η βάση του συμπλέγματος θεωρείται ότι βρίσκεται σε βάθος 11-12 km. Σε αντίθεση, η σεισμική εικόνα της νότιας περιοχής δείχνει μία σειρά ανακλάσεων με μετρίως νότια κλίση: αυτό εξηγείται ως ανάστροφο ρήγμα και ζώνη διάτμησης όπου εντοπίζονται τηλεσκοπικά κοιτάσματα και επίσης εντοπίζεται σημαντική βορειοδυτική- νοτιοανατολική υποχώρηση του συμπλέγματος του Sudbury.

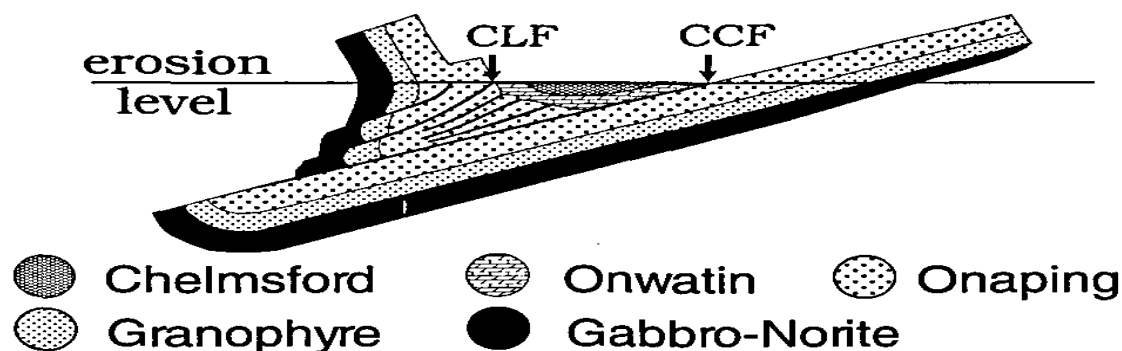
Πολλοί τομείς του γεωλογικού περιβάλλοντος του Sudbury υποδεικνύουν μία έκρηξη μεγάλης έντασης όπου σχημάτισε τον κρατήρα του Sudbury (Pye et al. 1984). Τα σχετικά στοιχεία είναι τα εξής:

(i) η γεωμορφολογία τύπου λεκάνης των σχετικών σχηματισμών της περιοχής που πάρθηκε από τις υπόγειες χαρτογραφήσεις και γεωτρήσεις όπως επίσης και από τα σεισμικά δεδομένα, (ii) μεταμόρφωση πρόσκρουσης που εμφανίζεται στα αυτόχθονα πετρώματα γύρω από τους σχηματισμούς (Dressler, 1984), (iii) το λατυποπαγές του Sudbury (αντίστοιχο με ψευδοταχυλίτες των σχηματισμών: Vredefort και Ries Dressler 1984) μέσα στα αυτόχθονα πετρώματα γύρω από τον σχηματισμό και το κροκαλοπαγές Footwall κάτω από το σύμπλεγμα, (iv) στοιχεία μεταμόρφωσης πρόσκρουσης σε εγκλείσματα αυτοχθόνων πετρωμάτων στο σχηματισμό Onaping (Muir and Peredery 1984) και (v) ο σχηματισμός Onaping 1800 m, το κατώτερό του μέρος θεωρείται ως ιγκνιβρίτης (Peredery and Morrison 1984: Muir 1984).

Οι γνώμες είναι διχασμένες μεταξύ εξωγήινους ή ενδογενής παράγοντες που οδήγησαν στον σχηματισμό του συμπλέγματος. Ίσως η πρόσκρουση μετεωρίτη μπορεί να θεωρηθεί η πιο πιθανή εξήγηση λόγω πολλών χαρακτηριστικών που παρατηρούνται στο Sudbury είναι κοινά με άλλες περιοχές πρόσκρουσης μετεωρίτη. Υπάρχουν βέβαια και πολλαπλές δυσκολίες που καθιστούν αυτή την εξήγηση ελλιπής οι οποίες εξηγούνται από τον Muir (1984).



Σχήμα. 12 Γεωλογικός χάρτης του πυριγενούς συμπλέγματος του Sudbury, δείχνει την τοποθεσία του McCreedy (δυτικά), Strathcona και Longvack κοιτάσμα. Το Barnet είναι μία μικρή εμφάνιση ανατολικά του Longvack.



Σχήμα.13 Γενική εγκάρσια τομή κατά μήκος των σχηματισμών του Sudbury, κατα τους Wu et al. (1995) με βάση τις ανακλάσεις των σεισμικών δεδομένων. Τα CCF και CLF είναι εγκάρσια ρήγματα που αναφέρθηκαν από τους Wu et al. (1995).

3.6.2. Κοίτασμα μεταλλεύματος

Το κοιτάσμα Ni-Cu του Sudbury μπορεί να χωριστεί σε 4 κατηγορίες: (i) το κοιτάσμα South range, (ii) το κοιτάσμα North Range, (iii) το κοιτάσμα Offset και (iv) η ομάδα των κροκαλοπαγών. Κάποιοι ερευνητές θεωρούν την ζώνη στο κατώτερο τέμαχος το οποίο είναι πλούσιο σε Cu ως χωριστό είδος κοιτάσματος, αν και συνήθως αυτά μπορούν να συσχετιστούν με ένα ή περισσότερα κοιτάσματα επαφής. Αναλυτικές περιγραφές πολλών

κοιτασμάτων έχουν δοθεί από τους South et al., (1969), Naldrett and Kullerud (1967), Cowan (1968), Pattison (1979), Pye et al. (1984), Moore and Nikolic (1994) και Binney et al., (1994).

Τα περιθωριακά κοιτάσματα του South Range έχουν μία ζώνη στα υπερκείμενα τεμάχια από ένα τεράστιο μέταλλευμα και διεσπαρμένα σουλφίδια. Το τεράστιο μέταλλευμα βρίσκεται στα πετρώματα του υποκείμενου τεμάχους και περιέχουν εγκλείσματα αυτού όπως και κομμάτια από γάββρο και περιδοτίτη. Τα μητρικά πετρώματα του διεσπαρμένου μεταλλεύματος είναι υποστρωματώδης νορίτης ο οποίος βρίσκεται σε επαφή με τους υπερκείμενους χαλαζιακούς νορίτες της κύριας μάζας.

Στα τυπικά North range περιθωριακά κοιτάσματα, η ορυκτοποίηση εμφανίζεται κυρίως μέσα σε λατυποπαγές αυτόχθονα πετρώματα στην επαφή με το πυριγενές σύμπλεγμα του Sudbury και σε ρωγμές σε αυτόχθονα πετρώματα κάτω υποκείμενα του λατυποπαγούς. Τα λατυποπαγής του υποκείμενου τεμάχους αποτελείται από κομμάτια αυτόχθονων πετρωμάτων, υπερβασικά εγκλείσματα, και σπάνιο νορίτη σε συγκολλητικό υλικό χαλαζιακό-ψαμμιτικό. Τα σουλφίδια βρίσκονται ως (i) λεπτόκοκκα και φυσαλώδης διεσπαρμένα και ως φλέβες μέσα στα λατυποπαγή του υποκείμενου τεμάχους, (ii) ως βλεβες σε ρωγμές του υποκείμενου τεμάχους και σπανίως (iii) ως διεσπαρμένα μέσα σε υπερκείμενα υποστρώματα νορίτη. Μέταλλευμα πλούσιο σε Cu-Ni ενός μεγάλου χαλκοπυρίτη οπού εγκλείει ένα μικρό ποσοστό πεντλανδίτη σε ρωγμές στο λατυποπαγές του Sudbury και γνεύσιο μέχρι και αρκετά εκατοντάδες μέτρα μακριά από την επαφή, βρίσκονται ένας μεγάλος αριθμός κοιτασμάτων κατά μήκος του North και East range, συμπεριλαμβανομένων και των Strathcona (Abel et al. 1979; Abel 1981; Li et al. 1992), McCreedy East και Victor-Nickel Rim (Morrison et al. 1994; Jago et al. 1994).

Το κοιτάσμα Offset εμφανίζεται σε απόκλιση με μορφή κοίτης που βρίσκεται μεταξύ των υποστρωμάτων του νορίτη και των γάββρων το οποίο εκτείνεται για αρκετά χιλιόμετρα μακριά από το σύμπλεγμα μέχρι και το υποκείμενο τέμαχος. Σε πολλές περιπτώσεις τα σουλφίδια σχηματίζουν ένα μεγάλης κλίσης σχηματισμό, αποτελούμενο από υλικά συμπαγή και διεσπαρμένα μεταλλεύματα που συνδυάζονται με μεγάλου ποσοστού εγκλεισμάτων στην κοίτη της απόκλισης.

Όπως αναφέρθηκε, υπάρχει μεγάλη ποικιλία στα χαρακτηριστικά των διαφόρων κοιτασμάτων, παρ'όλα αυτά υπάρχει μία σειρά χαρακτηριστικών κοινά σε αυτά. Τα οποία είναι:

(1) Αποθέσεις κρητιδικών μέχρι και τεταρτογενή ιζηματογενή και άλλα ασυνήθιστα φαινόμενα στην βάση του πυριγενούς συμπλέγματος στο Sudbury. Γενικά παρατηρείται μία αύξηση στην περιεκτικότητα των σουλφιδίων στην κατώτερη επαφή κατά μήκος όλου του συμπλέγματος, και στο σημείο που εμφανίζονται τα ασυνήθιστα φαινόμενα εκεί το πάχος της ζώνης των σουλφιδίων μεγαλώνει και είναι αρκετό ώστε να σχηματιστεί το μέταλλευμα.

(2) Η παρουσία του υποστρώματος. Η σχέση του μεταλλεύματος με τα πετρώματα του υποστρώματος είναι τέτοια ώστε τα σουλφίδια που αποτελούν το μέταλλευμα φαίνεται ότι βρίσκονται στο εξωτερικό των σωμάτων του υποστρώματος. Εμφανίζονται επίσης σουλφίδια σε περιορισμένες ποσότητες (γενικά <5 wt%) μέσα στους χαλαζιακούς και βασικούς νορίτες: αλλά εκτός από την θέση στην οποία μετακινήθηκαν με βοήθεια ρηγμάτων, τα μεταλλεύματα έχουν σταθερή σχέση με τα πετρώματα του υποστρώματος.

(3) Υπερβασικά εγκλείσματα μέσα σε μητρικά πετρώματα του υποστρώματος. Κάποιο μέρος του υποστρώματος είναι ορυκτοποιημένο, άλλες παραλλαγές φαίνεται να μην περιέχουν σουλφίδια. Υπάρχουν λιγοστά στοιχεία για την διάκριση μεταξύ ορυκτοποιημένου και μη ορυκτοποιημένου υποστρώματος σε θέμα υφής, η ορυκτολογία και η χημική σύσταση των πετρωμάτων είναι σχετική, εκτός φυσικά από την παρουσία ή απουσία σουλφιδίων. Όλα τα είδη των υποστρωμάτων περιέχουν εγκλείσματα, αλλά και στην επαφή και στην ζώνη μετατόπισης, η ορυκτοποίηση σχετίζεται με μητρικά πετρώματα του υποστρώματος που

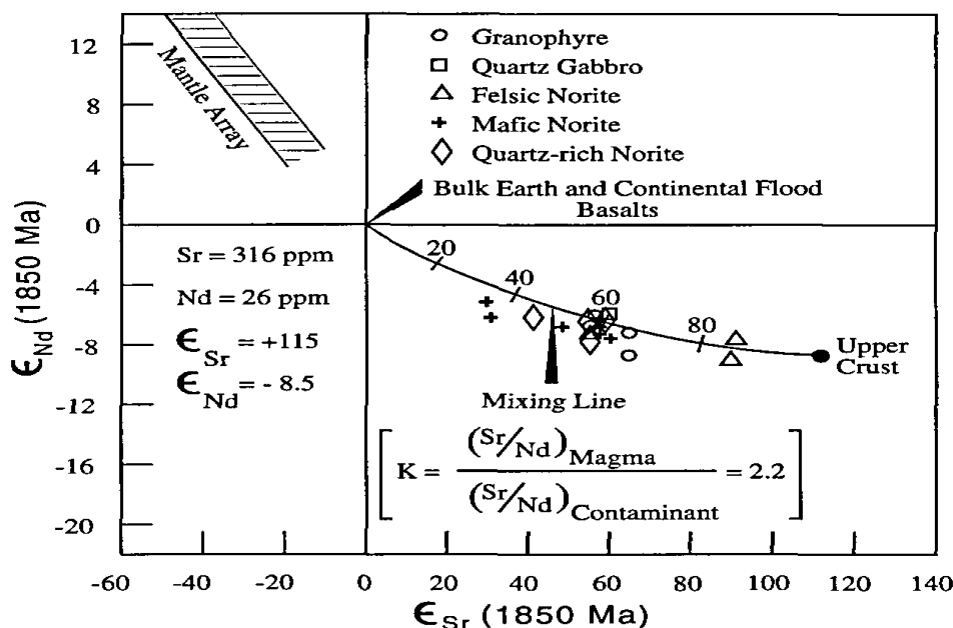
περιέχουν βασικά και υπερβασικά εγκλείσματα, όπου οι Scribbins et al. (1984) συμπέραναν ότι προέρχονταν από μία ή περισσότερες στρωματώδεις διεισδύσεις.

3.6.3. Προέλευση του πυριγενούς συμπλέγματος του Sudbury και τα μεταλλεύματά του

Η προέλευση του συμπλέγματος του Sudbury δημιούργησε έντονη αντιμαχία. Οι Naldrett et al. (1970) έδειξαν ότι η σύσταση των πλαγιокλάστων και των πυροξένων μέσα στο North Range έδειξε μία αύξηση στο ποσό FeO:MgO και επίσης μία μεταβολή παράλληλη με εκείνη του κυρτού υποκείμενου τεμάχους. Συμπαίρεναν ότι το σύμπλεγμα παρουσίαζε πολλά παρόμοια χαρακτηριστικά μίας πτυχωμένης κοίτης που ενώθηκε με μία χωνοειδής διεισδυση σε βάθος. Οι Kuo and Crocket (1979) και οι Naldrett et al. (1986) εστίασαν στο σύμπλεγμα του Sudbury και στο μεγάλο βαθμό ρύπανσης που έχει υποστεί, όπως δείχνει και ο εμπλουτισμός σε LREE και το διάγραμμα $e_{\text{Sr}}-e_{\text{Nd}}$ που φαίνεται στο Σχήμα. 14. Οι Naldrett et al. (1996a) πρότειναν ότι το πρωτογενές βασαλτικό μάγμα αναμείχθηκε με ίσης μάζας τήγμα πρόσκρουσης: πρότειναν ότι η μεταβολή του βασικού μάγματος προς όξινο που προήλθε από αυτή την μείξη προκάλεσε τον διαχωρισμό των σουλφιδίων και ήταν υπεύθυνη για την αφθονία σε πλούσιες σε σουλφίδια συγκεντρώσεις στην βάση του πυριγενούς συμπλέγματος του Sudbury. Η εκτεταμένη φλοιική ρύπανση φαίνεται επίσης από τον αρχικό λόγο $^{187}\text{Os}/^{186}\text{Os}$ ισοτόπων των σουλφιδίων, όπου οι Walker et al. (1991) έδειξαν ότι κυμαίνεται από 4,9 με 8,0%.

Οι Faggert et al. (1985) και Deutsch et al. (1989, 1990, 1992) ερμήνευσαν τα ισοτοπικά δεδομένα των Sr-Nd για να δείξουν ότι ολόκληρο το πυριγενές σύμπλεγμα του Sudbury είναι τήγμα πρόσκρουσης. Οι Grieve et al. (1991) και Grieve (1994) υποστήριξαν ότι το κατά πολύ μεγαλύτερο μέγεθος του κρατήρα πρόσκρουσης (περίπου 150 km σε διάμετρο), το οποίο συμπεραίνεται με τις ανακλάσεις των σεισμικών προφίλ, σε σχέση με το σημερινό μέγεθος του συμπλέγματος του Sudbury (30x60 km), ταιριάζει με την παραγωγή του όγκου τήγματος πρόσκρουσης που βρίσκεται στο σύμπλεγμα του Sudbury. Από την άλλη οι Chai and Eckstrand (1994) βρήκαν τις χημικές διαφορές μεταξύ των νοριτών (βασικοί, όξινοι και South Range νορίτες) και το υπερκείμενο στρώμα των γρανοφύρων που τους οδήγησε να συμπεράνουν ότι οι γρανοφύρες αντιπροσωπεύουν την στρώση τήγματος και ότι οι νορίτες σχηματίστηκαν από ριπίδιο με χημική σύσταση πρωτογενούς βασάλτη. Η πιο περιεκτική γεωχημική ισοτοπική έρευνα που έγινε στο Sudbury ήταν από τους Lightfoot et al. (1996), και απόδειξε χαρακτηριστική συνεκτικότητα ολόκληρης της κύριας μάζας. Ο ισχυρός εμπλουτισμός σε LREE, Sr, Nd και Pb ισότοπα και άλλα χαρακτηριστικά χημικά στοιχεία συμφωνεί με την φλοιική ρύπανση του πρωτογενή βασάλτη.

Μεγάλο μέρος της διαφωνίας σχετικά με την προέλευση του μεταλλεύματος επικεντρώθηκε στην προέλευση του υποστρώματος. Ο τύπος πετρώματος είναι γενικά μικρόκοκκος με υαλοφυρική υφή σε αντίθεση με οφειτική υφή που φαίνεται στους νορίτες της κύριας μάζας, γενικά περιέχει 5 wt% η παραπάνω σιδηροπυρίτη+πεντλανδιτη+χαλκοπυρίτη. Τα δεδομένα των Lightfoot et al. (1996) δείχνουν ότι το υπόστρωμα είναι γεωχημικά διαφορετικό της κύριας μάζας αλλά ακόμη και στην ίδια του την σύσταση παρουσιάζει παραλλαγές, συγκεκριμένα ομάδες δειγμάτων τοπικά παρουσιάζουν διαφορετικά χαρακτηριστικά από μέρος σε μέρος.



Σχήμα.14 Σχεδιάγραμμα των $\epsilon_{Nd}-\epsilon_{Sr}$ δειγμάτων της κύριας μάζας του συμπλέγματος του Sudbury το οποίο δείχνει πως επιβεβαιώνουν την μίξη ηπειρωτικών καλλυμάτων βασαλτών και του ανώτερου φλοιού (Naldrett et al. 1986).

Το υπόστρωμα επίσης περιέχει εγκλείσματα βασικά και υπερβασικά, που όπως αναφέρθηκε και παραπάνω προσφέρει καθοδήγηση όσον αφορά την παραγωγικότητα σε ορυκτοποίηση: στα σημεία που βρίσκονται τα εγκλείσματα υπάρχει μετάλλευμα, στα σημεία που δεν βρίσκονται εγκλείσματα, το μετάλλευμα επίσης λείπει (Naldrett et al. 1984). Κάποιοι παράγοντες της προέλευσης του τήγματος πρόσκρουσης του πυριγενούς συμπλέγματος του Sudbury δείχνουν (Grieve 1994) ότι τα εγκλείσματα προέρχονται από προϋπάρχουσες διεισδύσεις είτε Huronian βασάλτης (2,4 Ga) είτε Nipissing διαβάσης (2,25 Ga). Πρόσφατες γεωχρονολογήσεις Ζιρκονίου των εγκλεισμάτων (Corfu and Lightfoot) έδειξαν ότι έχουν την ίδια ηλικία με το Sudbury 1,85 Ga. Αυτό μαζί με τα δεδομένα των καθοδηγητικών στοιχείων που συγκεντρώθηκαν από τους Lightfoot et al. (1996) των εγκλεισμάτων, οδηγούν στο συμπέρασμα συγγένειας με τον σχηματισμό του πυριγενούς συμπλέγματος του Sudbury.

3.6.4. Πιθανά μοντέλα για το πυριγενές σύμπλεγμα του Sudbury

Γενικά υπάρχουν 2 μοντέλα που εξηγούν την προέλευση του πυριγενούς συμπλέγματος του Sudbury και της σχετικής ορυκτοποίησης. Το μοντέλο 1 βασίζεται στην ιδέα ότι η εκτόνωση της πίεσης που σχετίζεται με την πρόσκρουση και η ξαφνική αφαίρεση του 50% του πάχους του φλοιού ήταν αρκετό για να προκαλέσει τήξη στον υποκείμενο μανδύα και η ρωγμάτωση που σχετίζεται με το γεγονός αυτό επέτρεψε το μάγμα να ανέλθει στον φλοιό. Το μάγμα συνάντησε ζώνες τήγματος πρόσκρουσης κάτω από το επίπεδο του κρατήρα, όπου το τήγμα πρόσκρουσης εισχώρησε κατά την χαλάρωση του οικοδομήματος του κρατήρα. Και ως αποτέλεσμα υπέστη ρύπανση προτού φτάσει στον κρατήρα και κάποιο από αυτό κρυσταλλώθηκε και σχημάτισε τις βασικές και υπερβασικές κοίτες μέσα στον

υποκείμενο τέμαχος του κρατήρα. Λόγω της ρύπανσης, τα σουλφίδια διαχωρίστηκαν σε αρχικό επίπεδο μέσα στις κοίτες και σχημάτισαν πλούσιες συγκεντρώσεις παράλληλα στο επίπεδο, και υπερκείμενα αυτών βρίσκονται γαββρικά σώματα. Είναι πιθανόν αυτές οι κρυφές, βαθιές διεισδύσεις να εξηγούν τις επίπεδες ανακλάσεις που είναι ορατές σε βάθος 9,5-12 km στα σεισμικά προφίλ των Mikereit et al. (1994).

Οι Naldrett et al. (1984) πρότειναν ότι κλασματικό μάγμα που ανεβαίνει από τα κατώτερα μέρη αυτών των σωμάτων, στην άνοδό τους απορροφούν σουλφίδια και εγκλείσματα βασικών και υπερβασικών σωμάτων από τα υπερκείμενα πετρώματα. Αυτό το πλούσιο σε σουλφίδια και εγκλείσματα μάγμα συνέχισε να ανεβαίνει μέχρι την βάση του πυριγενούς συμπλέγματος του Sudbury και κατακάθισε εκεί ως το ορυκτοποιημένο σώμα του υποστρώματος. Το κύριο σώμα του βασαλτικού μάγματος εισχώρησε, εξαπλώθηκε και αναμίχτηκε με το τήγμα πρόσκρουσης καταλαμβάνοντας το κάτω μέρος του ίδιου του κρατήρα. Αυτή η μίξη κρυσταλλώθηκε και σχημάτισε έτσι την βασική στρώση (South Range νορίτης, όξινο νορίτης και χαλαζιακός γάββρος) του πυριγενούς συμπλέγματος του Sudbury.

Το μοντέλο 2 βασίζεται στην ιδέα ότι ολόκληρο το σύμπλεγμα του Sudbury είναι ένα στρώμα τήγματος πρόσκρουσης. Ενώ αυτή η πρόταση είναι αισθητικά αρεστή, ταυτόχρονα όμως είναι κατά κανόνα απλούστερη από την παραπάνω ιδέα και δεν προσφέρει απαντήσεις σε συγκεκριμένες ερωτήσεις. Αυτές είναι:

1) Ποια είναι η προέλευση του υποστρώματος; Γιατί η επαφή μεταξύ της κύριας μάζας νορίτη και του υποστρώματος είναι τόσο μεγάλης κλίσης στο North Range;

2) Ποια είναι η προέλευση των βασικών-υπερβασικών εγκλεισμάτων; Είναι προφανές ότι σχηματίστηκαν στον φλοιό μιας και περιέχουν πλαγιόκλαστα. Χρονολογήσεις (Lightfoot et al. 1996) και η ηλικία 1,85 Ga (Corfu and Lightfoot) δείχνουν ότι σχηματίστηκαν στον ίδιο χρόνο με το σύμπλεγμα. Αν το πυριγενές σύμπλεγμα του Sudbury είναι τήγμα πρόσκρουσης, γίνεται αρκετά δύσκολο να εξηγηθεί πως η σειρά υπερβασικών σωμάτων συσσωρεύτηκε ώστε να σχηματιστούν τα σώματα τα οποία αποτελούν την προέλευση των εγκλεισμάτων, καθώς η κύρια σύσταση της μάζας του συμπλέγματος είναι αρκετά πλούσια σε SiO_2 ώστε να κρυσταλλωθεί ολιβίνη.

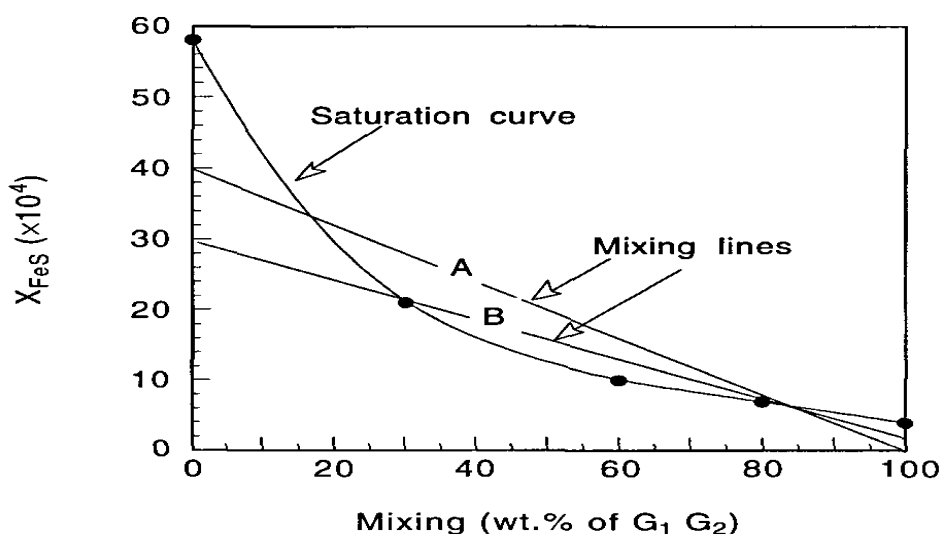
3) Ποια είναι η προέλευση των σουλφιδίων; Ο Grieves (1994) πρότεινε ότι προήλθαν από τα αυτόχθονα πετρώματα και κατακάθισε στο σύμπλεγμα του Sudbury πριν ψυχθεί. Παρ'όλα αυτά αυτό δεν εξηγεί επαρκώς την σχέση μεταξύ των σουλφιδίων και των εγκλεισμάτων. Η ισοτοπική σύσταση των σουλφιδίων (Thode et al. 1962) συμφωνεί με την ιδέα ότι προήλθε από μανδυακή πηγή. Από την άλλη όπως παρατήρησε ο Grieve (1994), οι μελέτες Re-Os των Walker et al. (1991) και των Dickin et al. (1992) αποδεικνύει ότι το Os στο μέταλλευμα έχει φλοιική προέλευση.

3.6.5 Προέλευση των σουλφιδίων

Ενώ η γενική αποδοχή όσο αναφορά την ακολουθία γεγονότων που οδήγησαν στον σχηματισμό του πυριγενούς συμπλέγματος του Sudbury είναι ελλιπής, μερικά από τα χαρακτηριστικά της είναι αδιαμφισβήτητα:

(i) Στοιχεία για την περιοχή διείσδυσης που δείχνουν ότι ήταν χώρος μίας καταστροφικής έκρηξης, πιθανόν το αποτέλεσμα της πρόσκρουσης ενός μετεωρίτη.

(ii) Η εκτεταμένη ρύπανση του συμπλέγματος, παρ'όλα αυτά δεν υπάρχουν αρκετά στοιχεία που να υποστηρίζουν ότι τα σουλφίδια μπορεί να έχουν φλοιική προέλευση.



Σχήμα. 15 Αριθμητική καμπύλη η οποία δείχνει τις μεταβολές στην διαλυτότητα του Θείου σε σχέση με την μίξη ηπειρωτικών καλυμμάτων βασαλτών (G_1) και του γρανιτικού τήγματος (G_2). Η καμπύλη σχηματίζει μια κοίλη, ώστε μέσα σε πλατιά όρια οποιαδήποτε μίξη των δύο μαγμάτων, τα οποία είναι ακόρεστα σε σουλφίδια, να περιέχεται μέσα σε αυτά κάτι παραπάνω από το όριο κορεσμού. Το A και το B είναι δύο υποθετικές γραμμές μίξης: στην περίπτωση του A, μίξεις μεταξύ 17 με 84 wt% των υλικών G_2 και G_1 θα είναι κορεσμένες, στην περίπτωση του B, μίξεις μεταξύ 30 με 84 wt% του G_2 θα είναι κορεσμένες (Li and Naldrett 1993).

(iii) Η παρουσία μεγάλης ποσότητας συγκέντρωσης ορυκτοποιημένων σουλφιδίων.

Ο Irvine (1975) παρατήρησε ότι η ενσωμάτωση πλούσιου σε SiO_2 από βασικό μάγμα μπορεί να μειώσει την διαλυτότητα του θείου μέσα σε αυτό, και πρότεινε ότι αυτή η διαδικασία συνέβη στο Sudbury. Οι Li and Naldrett (1993) έδειξαν ότι η διαλυτότητα του Θείου σε όξινα μάγματα μπορεί να μοντελοποιηθεί με το να θεωρηθεί ότι το θείο και το FeO στο μάγμα αλληλεπιδρούν θερμοδυναμικά. Οι μετρήσεις (Σχήμα. 15) δείχνουν ότι η μίξη καλυμμάτων βασαλτών που περιέχει θείο σε περίπου 2/3 από το όριο κορεσμού του και μιας παραλλαγής τοναλίτη-μονζονίτη χωρίς θείο να ρυπαίνει τους βασάλτες, όπως πρότειναν οι Naldrett et al. (1984), οδηγεί στον διαχωρισμό των συσσωμάτων των σουλφιδίων με ποσοστό μίξεως 20 με 80 wt% του τοναλίτη-μονζονίτη.

3.7. Συμπεράσματα και εφαρμογές για Εξερεύνηση

Με βάση τα στοιχεία που παρουσιάστηκαν στα προηγούμενα κεφάλαια, φαίνεται ότι υπάρχουν πολλά κοινά γεωλογικά χαρακτηριστικά μεταξύ των διάφορων συγκεντρώσεων Ni-Cu σουλφιδίων παγκοσμίως. Μερικά από αυτά παρουσιάζονται περιληπτικά στον Πίνακα 2. Συμπεριλαμβάνει (1) ένα μάγμα ικανό να κρυσταλοποιήσει αρκετή ποσότητα ολιβίνη, (2) ένα σημαντικό όριο μεταξύ 2 φλοιϊκών τεμαχών, (3) αρκετό θείο στα γειτονικά αυτόχθονα πετρώματα, (4) στοιχεία για έλλειψη χαλκόφιλων χημικών στοιχείων στα όξινα μάγματα, (5) στοιχεία αλληλεπίδρασης με τα αυτόχθονα πετρώματα και τέλος (6) η διαδικασία ορυκτοποίησης μέσα ή κοντά στις φλέβες μαζί με ποιά ροή μάγματος συγκεντρώθηκε.

Με την σειρά θα γίνει αναφορά στο κάθε χαρακτηριστικό, πρώτα τα πλούσια σε ολιβίνη μάγματα είναι σημαντικά στο Noril'sk, στο Voisey's Bay, στο Jinchuan, στην

Kambalda και στο Duluth. Κατά δεύτερον τα πετρώματα του πυριγενούς συμπλέγματος στο Sudbury διακρίνονται για την έλλειψη σε ολιβίνη, εκτός από κάποια εγκλείσματα τα οποία συνδέονται με ένα ορυκτοποιημένο υπόστρωμα. Ο ολιβίνης περιέχει μεγάλο ποσοστό φορστερίτη στους κοματίτες της Kambalda (Fo90-95) και αρκετό ποσοστό φορστερίτη στον σχηματισμό του Jinchuan (Fo80) και στο Noril'sk (Fo80) και μέτριο ποσοστό φορστερίτη στο Voisey's Bay (Fo50-65) και στο Duluth (Fo50-65). Η παρουσία του ολιβίνης θεωρείται σημαντική για 3 λόγους: (1) ολιβινικά μάγματα είναι υψηλότερης θερμοκρασίας από αυτά με μεγαλύτερη ποσότητα SiO_2 , (2) η περιεκτικότητα σε Ni των σιδηρούχων ολιβινικών μαγμάτων γενικά είναι μεγαλύτερη από τα μάγματα χωρίς σιδηρούχο ολιβίνη (η περιεκτικότητα σε Ni εξαρτάται φυσικά, από την περιεκτικότητα σε Fo των ολιβίνων, και από το αν το μάγμα έχει έλλειψη χαλκόφιλων στοιχείων), και τέλος (3) ένα μάγμα με σιδηρούχο ολιβίνη θα αντιδράσει με αυτόχθονα πετρώματα με έλλειψη σε SiO_2 πιο εύκολα από ότι αυτά που περιέχουν SiO_2 .

Βασικές ρήξεις του φλοιού παίζουν σημαντικό ρόλο στο να σχηματίζονται ζώνες αδυναμίας μέσω των οποίων το μάγμα ανεβαίνει προς τα επιφανειακά πετρώματα του φλοιού στο Noril'sk (ρήγμα Noril'sk Kharayelakh), στο Jinchuan (ρήγμα με κατεύθυνση προς την Σινο-Κορεάτικη πλατφόρμα) και στο Duluth (μέσο-ωκεάνια ράχη). Το σύμπλεγμα του Voisey's Bay βρίσκεται κοντά στην δυτική επέκταση του ρήγματος μετασχηματισμού Abloviak το οποίο σηματοδοτεί το σημείο σύγκλισης μεταξύ των επαρχιών Nain και Churchill (Ryan et al. 1995) και μαζί με την τελευταία παραμόρφωση που χρονολογείται στα 1,73-1,75 Ga (Van Kranendonk 1996): γίνεται πιθανό αυτή η εναπομείναντα ζώνη αδυναμίας να βοήθησε στην απόθεση του 1,35-1,29 Nain πλουτωνικού συστήματος. Αρχικά δομικά στοιχεία είναι αρκετά δύσκολο να αναγνωριστούν σε αρχαϊκά εδάφη, αλλά τα ανατολικά Goldfields χαρακτηρίζονται από μία σειρά ρηγμάτων μετασχηματισμού κλίσεως βόρειο-βορειοδυτικά τα οποία δύναται να ενεργοποιήσουν ξανά παλαιές ρωγμές, πιθανόν εκείνες που συσχετίζονται με παλαιές ρήξεις. Σε αντίθεση τα κοιτάσματα του Sudbury και τους κρατήρες μετεωριτών όπου η προέλευσή τους έρχεται από πάνω παρά από κάτω.

Αυτόχθονα πετρώματα με θείο γειτονικά των κοιτασμάτων βρίσκονται στο Noril'sk (εβαπορίτες μέσο- δεβονίου που περιέχουν ανυδρίτες ή γύψο), στο Voisey's Bay (σουλφίδια και γραφιτικοί γνεύσιοι του Tasiuyak), στην Kambalda (χημικά ιζηματογενή αποθεμένα σε βασάλτικα υποστρώματα κάτω από κοματιτικές λάβες) και στο Duluth (σιδηροπυρίτες και γραφιτικοί σχηματισμοί Virginia). Καμία φλοιϊκή πηγή θείου δεν είναι παρούσα στο Jinchuan ή στο Sudbury. Στο Noril'sk και στο Duluth, υπάρχουν ισχυρά ισοτοπικά στοιχεία που να υποδεικνύουν την ενσωμάτωση φλοιού θείου από το μέταλλευμα. Στο Voisey's Bay τα ισοτοπικά στοιχεία δείχνουν ότι θείο από τους γνευσίους του Tasiuyak παίζει ρόλο στον σχηματισμό του μεταλλεύματος (Ripley et al. 1997) και στην Kambalda τα ισοτοπικά δεδομένα του θείου είναι σύμφωνα με τις φλοιϊκές πηγές αλλά δεν παρέχει ισχυρά στοιχεία για αυτό. Οι τιμές του $\delta^{34}\text{S}$ στο κοιτάσμα του Sudbury είναι σχεδόν μηδενικές, και ως αποτέλεσμα δεν παρέχει στοιχεία περί φλοιϊκής πηγής.

Στο Noril'sk η έλλειψη χαλκόφιλων στοιχείων έχει παρατηρηθεί σε βασάλτες οι οποίο αντιπροσωπεύουν μάγμα το οποίο είναι παλαιότερο από το μητρικό πέτρωμα των μεταλλευμάτων αν και αυτό είναι λιγότερο προφανές στους βασάλτες που σχετίζονται με την ορυκτοποιημένη διείδυση. Το ίδιο ισχύει και στο Voisey's Bay, όπου το αρχικό μάγμα κυλάει μέσω του ελλιπής σε χαλκόφιλα στοιχεία συστήματα, αλλά το σύστημα που σχετίζεται άμεσα με την ορυκτοποίηση δεν είναι εξίσου ελλιπής. Οι Duke και Naldrett (1978) έδειξαν ότι οι κοματίτες και οι κοματιτικοί βασάλτες στείροι σε Ni σε τοπικό επίπεδο στην Kambalda, αλλά τα πετρώματα που σχετίζονται άμεσα με την ορυκτοποίηση και πάλι δεν δείχνουν τόσο μεγάλη έλλειψη, ακόμη και στην περιεκτικότητα σε PGE (Leshner 1989), τα οποία θα ήταν πιο ευαίσθητα στην έλλειψη χαλκόφιλων στοιχείων παρά Ni και/ή Cu. Σε κάθε από αυτές τις περιπτώσεις φαίνεται ότι νέο μάγμα κύλησε μέσω των ορυκτοποιημένων

διόδων και ως αποτέλεσμα εμφανίζει έλειψη σε χαλκόφιλα στοιχεία. Συγχρόνων στείρωση σε χαλκόφιλα στοιχεία δεν παρατηρείται στο Duluth, το Jinchuan ή στο Sudbury.

Α.Π. Τα γεωχημικά δεδομένα που συζητήθηκαν δείχνουν ισχυρή αλληλεπίδραση μεταξύ συγκεκριμένων μαγμάτων του Noril'sk και των φλοιϊκών πετρωμάτων. Επιπλέον ο ταξιτικός γάββρος, ο οποίος είναι ένα πέτρωμα με διάφορες υφές, περιέχει αρκετά μερικώς αφομοιωμένα εγκλείσματα αυτοχθόνων και φλεβικών πετρωμάτων τα οποία αποτελούν απόδειξη για την αλληλεπίδραση που αναφέρθηκε. Τα Re-Os δεδομένα των Lambert et al. (1997), και η ισχυρή αλλοίωση από τα εγκλείσματα στον σχηματισμό BBS αποτελούν ισχυρά στοιχεία ότι υπήρξε τέτοια αλληλεπίδραση στο Voisey's Bay. Τα γεωχημικά δεδομένα των Frost and Groves (1989), των Mcnaughton et al. (1988) και των Arndt and Jenner (1986) υποστηρίζουν την αλληλεπίδραση μεταξύ του κοματιτικού μάγματος και του φλοιού στην περιοχή Kambalda. Υπαίθριες παρατηρήσεις και τα χημικά και Ο ισοτοπικά δεδομένα του Ripley (1986) υποστηρίζουν έστω και μικρή αλληλεπίδραση στο Duluth. Έχει καταγραφεί φλοιϊκή επίδραση στο Jinchuan, παρόλο που χημικές και ισοτοπικές μετρήσεις που χρειάζονται για να αποδειχθεί δεν έχουν γίνει ακόμη. Η πιο εμφανής επίδραση είναι στο Sudbury, όπου οι Naldrett et al. (1986) πρότειναν ότι το SIC αποτελείται από κοίτες βασαλτικού μάγματος το οποίο έχει μολυνθεί κατά 50% από τήγμα πρόσκρουσης, οι Faggart et al. (1985) και ο Grieve (1994), μαζί με άλλους, πρότειναν ότι ολόκληρο το σύμπλεγμα είναι τήγμα πρόσκρουσης. Οι Naldrett et al. (1986) και οι Li and Naldrett (1993) πρότειναν μια ανάμιξη από 50% σουλφίδια, ακόρεστα πρώιμα μανδυακοί βασάλτες και όξινα τήγματα πρόσκρουσης μπορούν να προκαλέσουν κορεσμό σουλφιδίων, άρα εξηγείται η εκτεταμένη ορυκτοποίηση στο Sudbury.

Γυρνώντας στην σπουδαιότητα κάποιων μορφών μαγματικών σωλήνων, υποστηρίζεται επίσης ότι κανάλια φλεβών θερμικά διαβρωμένα υπερκείμενων ηφαιστειακών εξυπηρετούν ως παγίδες για σουλφίδια και τώρα πια συνιστούν τις ζώνες μεταλλεύματος. Κάποια από τα μεταλλεύματα στο Voisey's Bay βρίσκονται σε παρόμοιο περιβάλλον, τα υπόλοιπα μεταλλεύματα βρίσκονται στην είσοδο των φλεβών τροφοδοσίας της διείσδυσης. Τα μεταλλεύματα στο Jinchuan βρίσκεται μέσα σε φλέβα τροφοδοσίας της διείσδυσης σχήματος καπνοδόχου, η οποία έχει αφανιστεί από διάβρωση. Τα μεταλλεύματα στην Kambalda βρίσκονται στην βάση διόδων όπου μεγάλο μέρος της ροής της κομματιτικής λάβας κυλούσε. Μόνο στο Duluth και στο Sudbury οι μαγματικοί αγωγοί φαίνεται να ελέγχουν τα κύρια μεταλλεύματα. Υπάρχει η άποψη ότι το μάγμα με σουλφίδια στο Duluth συνέχισε να διεισδύει βαθύτερα, αφού αντέδρασε με τον σχηματισμό της Virginia και ως αποτέλεσμα έγινε διαχωρισμός σουλφιδίων, τα σχετικά κοιτάσματα πιθανόν έγιναν πλουσιότερα σε σουλφίδια και θα εξορύχτηκαν πολύ παλαιότερα. Το περιβάλλον του Sudbury είναι πολύ διαφορετικό, λόγω της πρόσκρουσης μετεωρίτη, και μέχρι στιγμής δεν υπάρχει καθαρή εικόνα για το που βρίσκεται το κοιτάσμα, αλλά όχι γιατί βρίσκεται εκεί που βρίσκεται.

Τρεις είναι οι κύριοι παράγοντες σχετικά με όσα αναφέρθηκαν ως τώρα. Ο πρώτος παράγοντας αφορά τα σουλφίδια και το πώς συντελέστηκε ο διαχωρισμός τους. Σε πολλά από τα κύρια λατομεία Ni-Cu που αναφέρθηκαν, φλοιϊκές ρωγματώσεις και ρήξεις επέτρεψαν την άνοδο πλούσιο σε ολιβίνη μάγμα μέσα στον φλοιό, όπου αντέδρασε με φλοιικά πετρώματα, ενσωμάτωσαν θείο. Επίσης εκτενής ενσωμάτωση φλοιού η ανάμιξη με φλοιικό τήγμα, καταγράφηκε σε κάθε περίπτωση εκτός από την περιοχή του Jinchuan, όπου δεν αναζητήθηκε καν. Στο Sudbury, όπου η προσθήκη φλοιού θείου δεν είναι πιθανή, η οξείδωση ενός βασικού τήγματος έχει προταθεί ως το αποτέλεσμα κορεσμού σουλφιδίων. Ο δεύτερος παράγοντας της συγκέντρωσης σουλφιδίων μεγάλου όγκου μάγματος, είναι η παγίδευση των σουλφιδίων μέσα στις μαγματικές διόδους φαίνεται να είναι πολύ σημαντική διαδικασία. Αυτό το χαρακτηριστικό πολλών κοιτασμάτων προσφέρει μία απάντηση στον τρίτο παράγοντα, ο οποίος είναι το πως τα σουλφίδια αλληλεπίδρασαν με αρκετό μάγμα για

να συγκεντρώσουν Ni, Cu και PGE ώστε το κοίτασμα να είναι εκμεταλλεύσιμο. Στο Noril'sk δείχθηκε ότι συνεχές ροή μάγματος περνάει μέσω των διόδων, μετά την απόθεση των σουλφιδίων και η συνεχής αλληλεπίδραση των σουλφιδίων με το συγκεκριμένο μάγμα είχε ως αποτέλεσμα την αναβάθμιση αυτού. Διάφορες μελέτες στο Voisey's Bay και στην Kambalda έδειξαν ότι αυτή η διαδικασία αναβάθμισης που επιτελέστηκε και σε αυτά τα κοιτάσματα, και ως αποτέλεσμα προσφέρει απάντηση στον τρίτο παράγοντα.

4. Πετρώματα ξενιστές και μητρικά μάγματα

4.1. Γενικά

Με εξαίρεση το κοίτασμα του Sudbury, το οποίο σχηματίστηκε από πρόσκρουση μετεωρίτη, τα μαγματικά κοιτάσματα Ni-Cu-(PGE) έχουν σαν ξενιστές έναν μεγάλο φάσμα ολιβινικών μανδυακών πετρωμάτων (Leshner and Stone, 1996: Leshner and Keays, 2002: Naldrett 1989: 2004). Επίσης σε αυτό το φάσμα περιέχονται Al-κοματίτες (π.χ. Στην Kambalda της Αυστραλίας και Alexo, και στο Thompson του Καναδά), στείροι σε Al κοματίτες (π.χ. Forrestania της Αυστραλίας), κοματιτικοί βασάλτες (π.χ. Raglan, Καναδάς), σιδηροπυρίτης (π.χ. Pechenga, Ρωσία), θολεϊτικοί πικρίτες (π.χ. Noril'sk-Talnakh, Ρωσία), και υψηλού Al-βασάλτες (π.χ. Voisey's Bay, Καναδάς). Τα ασυνήθιστα, πυριτικά μάγματα τα οποία είναι μητρικά του συμπλέγματος του Bushveld στην Νότια Αφρική και του συμπλέγματος Stillwater στις ΗΠΑ έχουν ερμηνευτεί ως κοματίτες μολυσμένοι από το φλοιό (Irvine, 1977: Barnes, 1989: Maier et al., 2000), δολερίτες (Hatton and Sharpe, 1988), ή μερικώς τηγμένο ενός μετασωματικού υπό-ηπειρωτική λιθόσφαιρα (Hamlyn and Keays, 1986: Lambert and Simmons, 1987). Γενικά λείπουν από το φάσμα βασικών και υπερβασικών πετρωμάτων, τα οποία είναι ξενιστές των σπουδαιότερων Ni-Cu-(PGE) κοιτασμάτων, αλκαλι-βασάλτες και αλκαλι-πικρίτες.

Με τόσα διαφορετικά είδη μαγμάτων δημιουργεί την ερώτηση ποια χαρακτηριστικά, αν υπάρχουν, προδιαθέτουν το μάγμα ώστε να σχηματίσει κοιτάσματα Ni-Cu-(PGE). Η σιβηρική κοίτη βασάλτη, η οποία είναι ξενιστής για τα κοιτάσματα του Noril'sk-Talnakh, είναι μια από τις πιο γνωστές ηπειρωτικές ηφαιστειακές επαρχίες, αλλά αποτελείται κυρίως από βασαλτικές μέχρι πικριτικές λάβες όπως άλλες σε ηφαιστειακές επαρχίες. Παρά την εκτεταμένη εξερεύνηση, παρόμοια μεταλλεύματα δεν έχουν ανακαλυφθεί κάπου αλλού. Υπάρχουν ωστόσο κάποιες διαφορές στην γενική τεκτονική εικόνα της περιοχής και στα είδη των πετρωμάτων μέσα στην ιζηματογενή σειρά (συγκεκριμένα παχύ στρώματα ανυδρίτη) υποκειμένα της διείσδυσης που είναι ξενιστής στο μέταλλευμα στην περιοχή του Noril'sk-Talnakh. Η ερώτηση που σχηματίζεται με βάση αυτά που ειπώθηκαν είναι η εξής: υπάρχει κάποιο χαρακτηριστικό του μανδυακού μάγματος το οποίο το κάνει ικανό να σχηματίσει εκμεταλλεύσιμο κοίτασμα Ni-Cu-(PGE) ή εξαρτάται ο σχηματισμός του κοιτάσματος τελείως από γεγονότα που επηρεάζουν το μάγμα κατά την δίοδο του από τον λιθοσφαιρικό μανδύα και τον φλοιό?

4.2. Δυνητικότητα μεταλλοφορίας σε μάγματα

Για τον σχηματισμό εκμεταλλεύσιμου κοιτάσματος Ni-Cu-(PGE), το αρχικό μανδυακό μάγμα θα πρέπει να περιέχει αρκετό μέταλλευμα και θα πρέπει να είναι ικανό να φτάσει σε σημείο κορεσμού ως αναφορά τα σουλφίδια. Αν το μάγμα είναι ακόρεστο σε σουλφίδια ή/και δεν αντιδράει με αρκετό εξωτερικό θείο (S), πιθανόν να μην φτάσει σε σημείο κορεσμού παρά μόνο σε τελικά στάδια της κρυστάλλωσης, ως αποτέλεσμα μόνο μικρές ποσότητες λεπτομερών διεσπαρμένων σουλφιδίων και πολύ λεπτομερών θαμπών σουλφιδίων

μπορούν να σχηματιστούν. Αν η μεταλλοφορία στο μάγμα είναι πολύ χαμηλή ή αν μία μεγάλη ποσότητα τήγματος σουλφιδίων αντιδράσει με μικρή ποσότητα μάγματος, τότε τα σουλφίδια μπορεί να μην περιέχουν αρκετή ποσότητα μετάλλων για να είναι εκμεταλεύσιμο. Το κύριο σημείο που πρέπει να αναφερθεί είναι ότι παρότι η φάση διαχωρισμού των σουλφιδίων είναι το φυσιολογικό αποτέλεσμα στα κύρια βασικά-υπερβασικά συστήματα, συνήθως διαχωρίζεται σε πολύ μικρές ποσότητες λόγω των περιορισμών της αφθονίας του S στο μάγμα, και συνήθως στο τελικό στάδιο κατά την κρυστάλλωση του μάγματος. Άρα το μάγμα πρέπει να φτάσει σε σημείο κορεσμού σουλφιδίων από ρύπανση, με ή χωρίς την προσθήκη εξωτερικού S, ώστε όχι μόνο να γίνει κορεσμός στο μάγμα από σουλφίδια, αλλά επίσης για σχηματιστεί αρκετά μεγάλη ποσότητα τηγμένων αδιαχώριστων σουλφιδίων (Leshner and Campbell, 1993).

Ως αποτέλεσμα, η δυνατότητα του μάγματος να σχηματίσει εκμεταλλεύσιμο κοίτασμα Ni-Cu-(PGE) ελέγχεται κυρίως από 1) την αφθονία του μεταλλεύματος στο μάγμα, 2) την κατάσταση κορεσμού των σουλφιδίων του μάγματος, και 3) η δυνατότητα του μάγματος να επιδράσει με το περιβάλλον. Στην πράξη, η δυνατότητα του μάγματος να αλληλεπιδράσει με τα τοιχώματα των πετρωμάτων, εξαρτάται από την φύση των τοιχωμάτων των πετρωμάτων, το είδος της απόθεσης, η σύσταση, η θερμοκρασία, το ιξώδες και η ευστάθεια των στοιχείων του μάγματος (Huppert and Sparks, 1985; Leshner et al., 2001).

4.2.1. Σύσταση των μανδουακών μαγμάτων

Η σύσταση των βασικών και υπερβασικών μαγμάτων επηρεάζονται από: 1) την σύσταση της πηγής, η οποία μεταβάλλεται αναλόγως τον βαθμό τήξης που προηγήθηκε ή τον τύπο και την έκταση του μετασωματισμού που επέδρασε, 2) ο τύπος της τήξης (μερική, ολική), 3) οι συνθήκες τήξης, συγκεκριμένα η θερμοκρασία, η πίεση, και το είδος και η περιεκτικότητα σε πτητικά στοιχεία, και 4) η φύση πιθανής ρύπανσης του μάγματος, μείξης ή διαδικασίες κρυστάλλωσης που συνέβησαν κατά την άνοδο και απόθεση. Σε συνδυασμό οι 3 πρώτοι παράγοντες ελέγχουν τον βαθμό μερικής τήξης, την σύσταση του πρωτογενούς μάγματος, και τα είδη και συστάσεις των υπολειμματικών φάσεων. Αρκετά σημαντικό στον σχηματισμό του μεταλλεύματος είναι η παρουσία ή η απουσία στο υπόλειμμα της μερικής τήξης, οξειδίων, σουλφιδίων και/ή αναμειγξεις που συγκεντρώνουν μεταλλεύματα.

Εμπειρικές και πειραματικές έρευνες (Carroll and Webster, 1994; Naldrett, 2004; Li and Ripley) έδειξαν ότι η διαλυτότητα των σουλφιδίων (δηλαδή η περιεκτικότητα του S²⁻ στον κορεσμό των σουλφιδίων) σε βασικά-υπερβασικά μάγματα αυξήθηκε ταυτόχρονα με την αυξημένη θερμοκρασία, αFeO και fS₂, και μειώθηκε με αυξημένη πίεση, fO₂, aSiO₂ και αλκαλικότητας. Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι η διαλυτότητα του S ως θειϊκή ένωση μπορεί να γίνει και 10 φορές μεγαλύτερη από ότι του S ως σουλφίδιο (Jugo et al., 2005). Παρ'όλα αυτά, επειδή όλο και περισσότερες μελέτες έχουν εφαρμοστεί πάνω σε βασαλτικές συστάσεις κάτω από συνθήκες συμπίκνωσης, η γνώση που πάρθηκε σχετικά με την διαλυτότητα του S στους βασάλτες είναι καλά εδραιωμένη, αλλά οι πληροφορίες που πάρθηκαν σχετικά με την διαλυτότητα του S σε άλλου τύπου μάγματα είναι λιγότερο επιβεβαιωμένη.

4.2.2. Σύσταση της πηγής

Μανδουακός περιδοτίτης, ο οποίος είναι η πηγή των περισσότερων βασικών-υπερβασικών μαγμάτων, έχει μεταβαλλόμενη σύσταση αλλά αποτελείται κατά κανόνα από ολιβίνη, ορθοπυρόξενο, κλινοπυρόξενο και μια Al φάση (πλαγιόκλαστο στα <0,9 GPa, σπινέλιο στα 0,9-0,3 GPa και γρανάτη στα >3 GPa). Δευτερεύοντες φάσεις αποτελούνται

από υδροπυριτικά, ανθρακίτες, άλλα οξείδια και κυρίως στην περίπτωση των κοιτασμάτων Ni-Cu-(PGE), σουλφίδια ή/και κράματα πλούσια σε PGE. Υπάρχει σημαντική διαμάχη σχετικά με την σύσταση και ετερογένεια του μανδύα και το πώς άλλαξε με τον χρόνο. Οι περισσότεροι κοματίτες, θολεϊτικοί πικρίτες και μέσο-ωκεάνιοι βασάλτες έχουν έλλειψη σε ισχυρώς ασυμβίβαστα λιθόφιλλα στοιχεία (Cs, Rb, U, Th, Nb και ελαφρές σπάνιες γαίες-LREE) σε σχέση με μετρίως ασυμβίβαστα λιθόφιλλα στοιχεία (Zr, Hf, Ti, HREE) και έχουν θετικό συντελεστή εNda, το οποίο δείχνει ότι προήλθαν από πηγές με μεγάλης διάρκειας έλλειψη σε αυτά τα στοιχεία. Από την άλλη σιδηροπικρίτες και πολλά αλκαλικά μάγματα, είναι πλούσια σε Fe, Ti και ισχυρώς ασυμβίβαστα λιθόφιλλα στοιχεία και θεωρείται ότι προέρχονται από σχετικές εμπλουτισμένες πηγές (Hanski, 1992; Gibson et al., 2000). Το θείο συμπεριφέρεται ως ασυμβίβαστο ή πτητικό στοιχείο και βρίσκεται σε μεγάλες συγκεντρώσεις σε εμπλουτισμένες πηγές. Αυτό έχει μεγάλη σημασία για να γίνει κατανοητή η συγκέντρωση χαλκόφυλλων στοιχείων σε μανδυακά μάγματα.

4.2.4. Μηχανισμός τήξης

Η τήξη συμβαίνει με διάφορες φυσικές διαδικασίες και είναι οι εξής: 1) τήξη σε ισορροπία όπου το τήγμα παραμένει σε ισορροπία με την πηγή, και έχει ως αποτέλεσμα μικρό διαχωρισμό υψηλών έως μέσων ασυμβίβαστων στοιχείων, 2) μερική τήξη, όπου το τήγμα συνεχώς διαφεύγει και απομονώνεται από την πηγή καθώς σχηματίζεται, και έχει ως αποτέλεσμα την σταδιακή ελάττωση των πιο ασυμβίβαστων στοιχείων και τον αποχωρισμό των υψηλά με μέσα ασυμβίβαστων στοιχείων, και 3) κρίσιμο σημείο τήξης, ένα είδος μερικής τήξης όπου ένα μέρος του τήγματος παραμένει στην πηγή, και ως αποτέλεσμα μικρότερος διαχωρισμός υψηλών με μέσων ασυμβίβαστων στοιχείων. Μετά τον αποχωρισμό, τα κλασματικά τήγματα σπανίως μόνο περνάν απευθείας στην επιφάνεια, συνήθως αναμιγνύονται με άλλα τήγματα, για τον σχηματισμό υβριδικών μαγμάτων παρόμοιας σύστασης με αυτά τα τήγματα από τήξη σε ισορροπία.

Οι περισσότεροι αρχαϊκοί κοματίτες είναι μετρίως εξαντλημένα σε ισχυρώς ασυμβίβαστα στοιχεία και έχει θεωρηθεί ότι σχηματίστηκαν από υψηλού ποσοστού (30-60%) μερική τήξη από στείρο μανδύα είτε μέσω τήξης σε ισορροπία (Herzberg and O'Hara, 1995; Sproule et al., 2001) ή μέσω μερικής τήξης (Arndt et al., 1998; Arndt, 2003). Κρητιδικόι κοματίτες και πικρίτες από τα νησιά Gorgona, μέρος του ωκεάνιου πλατό της Καραϊβικής, έχουν ισχυρή έλλειψη σε ισχυρώς ασυμβίβαστα στοιχεία, και έχει προταθεί ότι σχηματίστηκαν σαν ασυσώρευτο τήγμα από μερική τήξη (Arndt et al., 1998; Révillon et al., 2000). Σε αντίθεση οι πικρίτες του Curacao ένα άλλο κομμάτι του Καραϊβικού πλατό, έχουν επίπεδο REE προφίλ, και θεωρείται ότι σχηματίστηκαν ως συσσωρευμένο τήγμα από μερική τήξη (Révillon et al., 2000). Οι αλκαλι-βασάλτες και οι πικρίτες σχηματίζονται μέσω χαμηλού με μέσου βαθμού τήξη πηγών του ετερογενούς μανδύα που συχνά περιέχουν ανακυκλώσιμο ωκεάνιο φλοιό ή ιζήματα (Hofmann and White, 1982; Zindler and Hart, 1986).

4.2.5. Περιεκτικότητα σε μέταλλα

Η αφθονία του PGE στα μάγματα εξαρτάται κυρίως από την φύση και την αφθονία στο υπόλειμμα τήξης των διαφόρων φάσεων, όπως σουλφίδια, οξείδια, κράματα, οι οποίες είναι ικανές να διατηρήσουν αυτά τα στοιχεία. Η κατανομή του μεταλλεύματος μεταξύ αυτών των φάσεων ελέγχεται από συντελεστή συμμετοχής. Ο Keays (1982, 1995) χώρισε τα στοιχεία της ομάδας του λευκόχρυσου σε 2 ομάδες: την Pd- ομάδα PGE (PPGE: Pd, Pt και Rh) η οποία φιλοξενείται σε πλούσια σε Cu σουλφίδια σε περιδοτιτή κάτω από την στερεά

κατάσταση, και η δεύτερη ομάδα του Ir PGE (IPGE: Ru, Ir, Os). Η οποία βρίσκεται μέσα σε Fe-Ni σουλφίδια και μεταλλικά κράματα. Τα στοιχεία της ομάδας του λευκόχρυσου είναι αρκετά χαλκόφιλλα ($D_{\text{PGE}}^{\text{σουλφίδια-πυριτικά}} \sim 10^4-10^5$: Fleet et al., 1996: Ballhaus et al., 1994: Peach et al., 1994) και εξαιρετικά σιδηρόφιλα ($D_{\text{PGE}}^{\text{σουλφίδια-πυριτικά}} \sim 10^5-10^6$: O'Neil et al., 1995). Πειραματικές, θεωρητικές και εμπειρικές μελέτες (Peach et al., 1994: Fleet et al., 1996: Lesher and Campbell, 1993) έδειξαν ότι ο συντελεστής συμμετοχής των πυριτικών σουλφιδίων για τα χαλκόφιλλα στοιχεία μειώνεται με αύξηση των $f\text{O}_2/f\text{S}_2$. Παρόλο που ο συντελεστής συμμετοχής του Cu είναι μικρότερος από αυτός του PGE ($D_{\text{Cu}}^{\text{σουλφίδια-πυριτικά}} \sim 10^3$), το Cu επίσης φιλοξενείται στα σουλφίδια. Το Ni από την άλλη είναι και χαλκόφιλλο και λιθόφιλλο στοιχείο, και βρίσκεται μεταξύ σουλφιδίων ($D_{\text{Ni}}^{\text{σουλφίδια-πυριτικά}} \sim 10^2-10^3$) και ολιβίνη ($D_{\text{Ni}}^{\text{σουλφίδια-πυριτικά}} \sim 2$ σε πικριτικά και κοματιτικά τήγματα) (Kinzler et al., 1990). Η επίδραση της πίεσης στον συντελεστή συμμετοχής των πυριτικών σουλφιδίων δεν είναι επαρκώς περιορισμένη. Ο συντελεστής συμμετοχής των πυριτικών μετάλλων για το Ni και το Co μειώνεται με αύξηση της πίεσης (Dingwell et al., 1999), ενώ ο συντελεστής συμμετοχής των πυριτικών μετάλλων για τα στοιχεία Pd, Pt και Ir φαίνεται ότι είναι ανεξάρτητος της πίεσης (Holzheid et al., 1998).

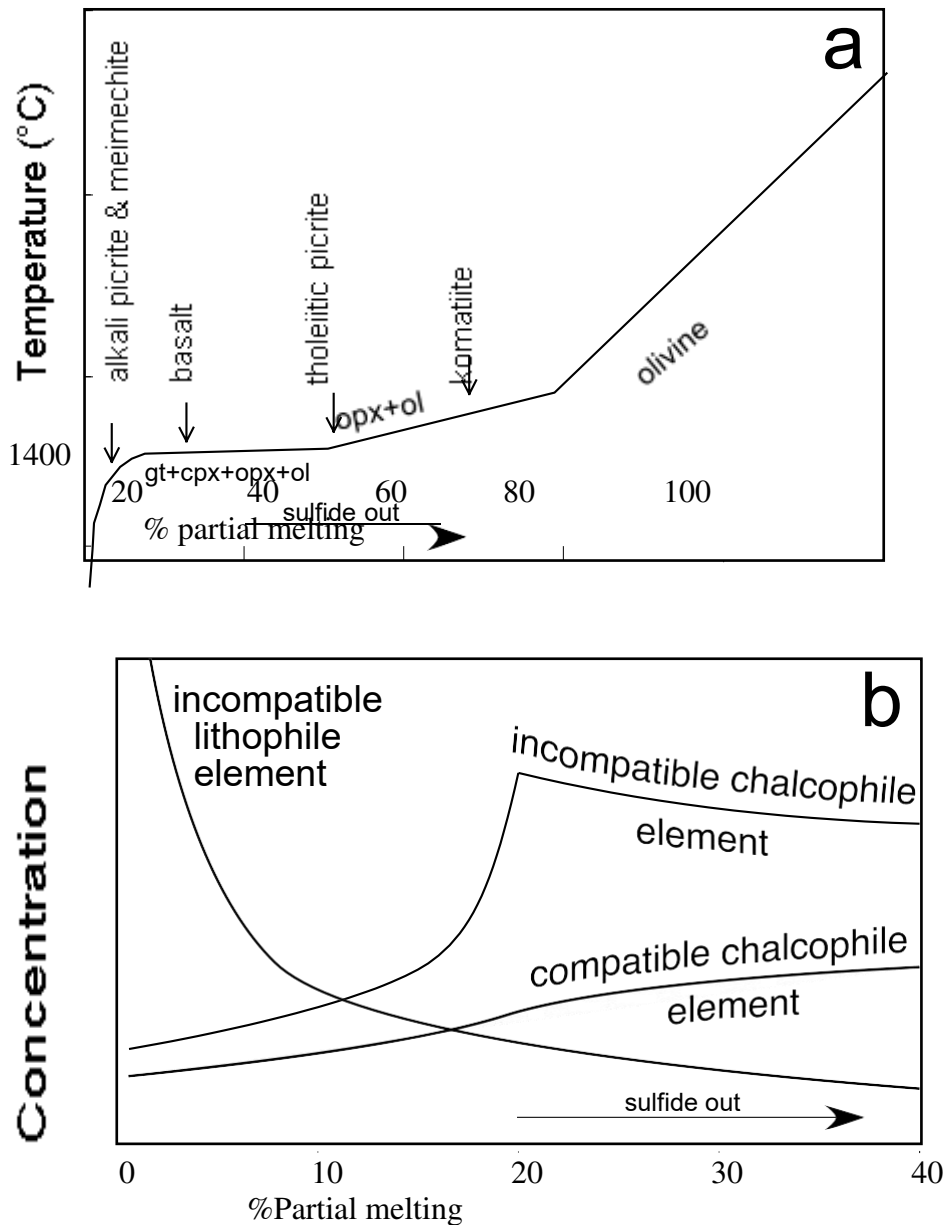
Αν τα σουλφίδια, τα οξειδία ή τα κράματα παραμείνουν στο υπόλειμα της μερικής τήξης του μανδύα, ένα σημαντικό ποσοστό των χαλκόφιλων στοιχείων θα παραμείνουν σε αυτές τις φάσεις και οι συγκεντρώσεις σε μερικά τήγματα θα είναι χαμηλές. Μόνο όταν αυτές οι φάσεις λείπουν το μάγμα έχει αυξημένη περιεκτικότητα σε στοιχεία όπως Ni, Cu και PGE.

4.2.3. Τήξη μανδύα

Η τήξη σε ισορροπία μανδυακών περιδοτίτων παρουσιάζεται στο Σχήμα. 16a. Σε χαμηλές πιέσεις και σε σχετικά χαμηλό βαθμό τήξης (μέχρι και 20%), όλες οι κύριες πυριτικές φάσεις όπως και οξειδία και σουλφίδια συνεισφέρουν στο τήγμα το οποίο έχει βασालτική σύσταση. Όσο ο βαθμός τήξης αυξάνεται, ο γρανάτης και ο κλινοπυρόξενος τήκονται τελείως, και όσο περισσότεροι Mg-ορθοπυρόξενοι και ολιβίνες εισχωρούν στο τήγμα, η μαγματική σύσταση αλλάζει σε πικριτική και τελικά σε κοματιτική. Η αύξηση της πίεσης αλλάζει τις σχέσεις των φάσεων σε τέτοιο σημείο ώστε σε υψηλές πιέσεις η σύσταση ενός χαμηλού βαθμού τήξης τήγμα αρχίζει να μοιάζει με πικρίτη ή ακόμη και με μείμειχτη (αλκαλική υπερβασική λάβα από την Σιβηρία: Arndt et al., 1995, 1998). Πολλές πειραματικές μελέτες δείχνουν ότι θερμοκρασίες πάνω από το solidus των συγκεντρώσεων των πυριτικών, τα σουλφίδια τήκονται ώστε να σχηματίσουν ομογενή αδιαχώριστα τήγματα (Naldrett, 2004)

Όσο ο βαθμός μερικής τήξης αυξάνει κατά τον σχηματισμό των πικριτικών και κοματιτικών μαγμάτων, οι οποίοι είναι ξενιστές για τα μαγματικά κοιτάσματα Ni-Cu-(PGE), η σουλφιδική φάση σταδιακά διαλύεται μέσα στο πυριτικό τήγμα (Σχήμα. 16b): όταν ο βαθμός τήξης ξεπεράσει το 15-25%, ανάλογα κυρίως από την περιεκτικότητα του περιδοτίτη σε S, τα σουλφίδια διαλύονται μέσα στο μερικό τήγμα (Wendlandt, 1982: Naldrett and Barnes, 1986: Keays, 1995: Rehkämpfer et al., 1999). Σε χαμηλό βαθμό τήξης, όταν τα σουλφίδια παραμένουν στο υπόλειμμα της μερικής τήξης, η περιεκτικότητα σε PGE του πυριτικού τήγματος είναι χαμηλή, και μόνο όταν τα σουλφίδια εξαλείφονται από την πηγή η περιεκτικότητα σε PGE φτάνει υψηλά επίπεδα (Σχήμα. 16b). Αλκαλικά μάγματα θεωρείται ότι σχηματίστηκαν από πιο οξειδωμένες πηγές (Carmichael, 1991), κάτω από συνθήκες υψηλής αλκαλικότητας και μεγάλου $f\text{O}_2$ που αποσταθεροποιεί τα υπολοιπούμενα σουλφίδια. Ως αποτέλεσμα τα σουλφίδια μπορεί να ενσωματωθούν σε χαμηλού βαθμού μερική τήξη (Carroll and Webster, 1994: Sisson, 2003: Jugo et al., 2005) και το τήγμα μπορεί να περιέχει

μεγάλη ποσότητα PGE. Σε κατάσταση συμπύκνωσης, PGE κράματα διατηρούνται στην υπολειμματική φάση σε υψηλού βαθμού μερική τήξη και αυτές οι φάσεις μπορούν να διαχωρίσουν τις διάφορες ομάδες του PGE. Ο Cr-Σπινέλιος, ο οποίος μπορεί να συγκεντρώνει IPGE, επίσης φαίνεται να παραμένει ως στερεά φάση στο υπόλειμμα σε σχετικά υψηλού βαθμού τήξη (Jacques et al., 1979).



Σχήμα. 16: Διαγράμματα που παρουσιάζουν τις αλλαγές στην θερμοκρασία και σύσταση των μερικών τηγμάτων του μανδρακού περιδοτίτη. (a) Μεταβολές στην φύση των μερικών τηγμάτων που προκλήθηκαν από συνεχές τήξεις των πρωτευόντων πυριτικών ορυκτών. (b) Σχήμα που δείχνει τις μεταβολές στις συγκεντρώσεις ασυμβίβαστων λιθόφιλων στοιχείων, ασυμβίβαστων χαλκόφιλων στοιχείων (Ni και Ir ομάδα PGE). Τα βέλη με όνομα "sulfide out" υποδεικνύει σχηματικά το σημείο της ολικής διάλυσης του υπολειπόμενου σουλφιδικού τήγματος (Keays, 1995, Rehkämper et al., 1999) για θολειτικούς βασάλτες, πικρίτες και κοματίτες.

5. Βιβλιογραφία

- Naldrett, A. J. (1999). World-class Ni-Cu-PGE deposits: key factors in their genesis. *Mineralium deposita*, 34(3), 227-240.
- Arndt, N., Lesher, C. M., & Czamanske, G. K. (2005). Mantle-derived magmas and magmatic Ni-Cu-(PGE) deposits.
- Naldrett, A. J. (1997). Key factors in the genesis of Noril'sk, Sudbury, Jinchuan, Voisey's Bay and other world-class Ni-Cu-PGE deposits: Implications for exploration. *Australian Journal of Earth Sciences*, 44(3), 283-315.
- Lightfoot, P. C., & Keays, R. R. (2005). Siderophile and chalcophile metal variations in flood basalts from the Siberian trap, Noril'sk region: Implications for the origin of the Ni-Cu-PGE sulfide ores. *Economic Geology*, 100(3), 439-462.
- Keays, R. R., & Lightfoot, P. C. (2004). Formation of Ni–Cu–platinum group element sulfide mineralization in the Sudbury impact melt sheet. *Mineralogy and Petrology*, 82(3-4), 217-258.
- Chai, G., & Naldrett, A. J. (1992). Characteristics of Ni-Cu-PGE mineralization and genesis of the Jinchuan deposit, northwest China. *Economic Geology*, 87(6), 1475-1495.
- Begg, G. C., Hronsky, J. A., Arndt, N. T., Griffin, W. L., O'Reilly, S. Y., & Hayward, N. (2010). Lithospheric, cratonic, and geodynamic setting of Ni-Cu-PGE sulfide deposits. *Economic geology*, 105(6), 1057-1070.
- Rajamani, V., & Naldrett, A. J. (1978). Partitioning of Fe, Co, Ni, and Cu between sulfide liquid and basaltic melts and the composition of Ni-Cu sulfide deposits. *Economic Geology*, 73(1), 82-93.