

ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ



ΤΟΜΕΑΣ ΟΡΥΚΤΟΛΟΓΙΑΣ - ΠΕΤΡΟΛΟΓΙΑΣ – ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΟΛΟΓΙΑΣ

# ΓΕΩΡΓΙΟΣ Ε. ΤΙΑΜΑΡΟΣ

Το κοίτασμα Cr- PGE στο Bushveld και τα κοιτάσματα σουλφιδίων Ni-Cu-PGE στο Sudbury και Norilsk

# ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ



ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ 2020

## $\label{eq:comparison} \Gamma E \Omega P \Gamma I O \Sigma ~ E. ~ TIAMAPO \Sigma$

Το κοίτασμα Cr- PGE στο Bushveld και τα κοιτάσματα σουλφιδίων Ni-Cu-PGE στο Sudbury και Norilsk

> Υποβλήθηκε στο Τμήμα Γεωλογίας Τομέας Ορυκτολογίας - Πετρολογίας - Κοιτασματολογίας

Επιβλέπων Καθηγητής

Μέλφος Βασίλειος

©Γεώργιος Ε. Τιάμαρος, 2020 Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All right reserved. © Γεώργιος Ε. Τιάμαρος, Τμήμα Γεωλογίας Α.Π.Θ., Τομέας Ορυκτολογίας-Πετρολογίας-Κοιτασματολογίας, 2020 Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. ΤΟ ΚΟΙΤΑΣΜΑ Cr-PGE ΣΤΟ BUSHVELD ΚΑΙ ΤΑ ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΑ ΣΟΥΛΦΙΔΙΩΝ Νi-Cu-PGE ΣΤΟ SUDBURY KAI NORILSK - Διπλωματική Εργασία

© Georgios E. Tiamaros, School of Geology, Dept. of Mineralogy- Petrology- Economic Geology.

All rights reserved.

THE Cr-PGE DEPOSIT AT BUSHVELD AND THE Ni-Cu-PGE SULFIDE DEPOSITS AT SUDBURY AND NORILSK - *Bachelor Thesis*.

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

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

# Περιεχόμενα

1. Εισαγωγή
1.1 Γενικά
1.2 Πρόλογος8
2. ΤΟ KOITAΣMA ΣΤΟ SUDBURY9
2. Sudbury Igneous Complex (SIC)9
2.1 Τρόπος σχηματισμού του SIC9
2.2 Ο τρόπος εξέλιξης του υποστρώματος του SIC 13
2.3 Το γενετικό μοντέλο δημιουργίας των offset dikes του SIC
3. ΤΟ ΚΟΙΤΑΣΜΑ ΣΤΟ NORILSK
3. Τρόπος σχηματισμού μεταλλοφορίας των σουλφιδικών κοιτασμάτων PGE-Ni-Cu στο Norilsk
3.1 Γεωλογική δομή και εξέλιξη της ευρύτερης περιοχής του Norilsk
3.2 Γεωλογικό υπόβαθρο και μέθοδοι μελέτης της περιοχής
3.3 Αντικείμενα και μέθοδοι μελέτης που χρησιμοποιήθηκαν
3.4 Δομή των ηφαιστειακών πετρωμάτων
3.5 Αποτελέσματα και συμπεράσματα31
4. ΤΟ ΚΟΙΤΑΣΜΑ ΣΤΟ BUSHVELD
4.0 Bushveld Complex
4.1 Γεωλογικό υπόβαθρο Bushveld complex
4.2 Κατανομή των στοιχείων PGE και της μεταλλογένεσης σουλφιδίων στο
4.3 Μεταλλοφορία PGE-BMS 43
4.4 Merensky Reef каі то коітаσµа Cr 46
5. Βιβλιογραφία

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

# Το κοίτασμα Cr- PGE στο Bushveld και τα κοιτάσματα σουλφιδίων Ni-Cu-PGE στο Sudbury και Norilsk

#### Τιάμαρος Γιώργος

Η παρούσα διπλωματική εργασία αφορά τα κοιτάσματα Cr, PGE και θειούχων Cu-Ni που συνδέονται με μαγματικές διεργασίες. Αποτελούν μεταλλοφορίες που συνδέονται με υπερβασικά πετρώματα. Τα γεωτεκτονικά περιβάλλοντα στα οποία λαμβάνουν χώρα αυτές οι διεργασίες είναι κυρίως ενδοπλακικές-κρατονικές περιοχές (στρωματόμορφα συμπλέγματα). Η ανάπτυξη του Cr γίνεται κυρίως σε κρατονικές περιοχές Προκάμβριας κυρίως ηλικίας, με μεγάλων διαστάσεων διεισδύσεις βασικής σύστασης μαγματικών όγκων από μερική τήξη του άνω μανδύα. Τα μέταλλα της ομάδας της πλατίνας (PGE - Rn, Rh, Pd, Os, Ir, Pt) αποτελούν μέταλλα στρατηγικής σημασίας με κύριες χρήσεις στην παγκόσμια αγορά όπως στη βιομηχανία πετρελαίου, κεραμικών υλικών, καταλύτες αυτοκινήτων κ.ά. Τα κοιτάσματα σε Norilsk, Sudbury και Bushveld (Merensky Reef και UG2) αποτελούν τις κυριότερες εμφανίσεις παγκοσμίως με κύρια χαρακτηριστικά να αποτελούν τα ορυκτά της μεταλλοφορίας όπως ο μαγνητοπυρίτης, πεντλαδίτης και χαλκοπυρίτης, τα PGE ως παραπροϊόντα και ότι αποτελούν τις σημαντικότερες πηγές Ni στον κόσμο. Τέλος τα σουλφίδια Ni-Cu με το μεγαλύτερο κοίτασμα να βρίσκεται στο Norilsk αφορά διείσδυση σύστασης μάγματος εντός Παλαιοζωικών πετρωμάτων γαββρικής σε περιβάλλον ενδοηπειρωτικής τάφρου. Η μορφή του κοιτάσματος είναι διάσπαρτη, συμπαγής και λατυποπαγής, με περιεκτικότητα σε Ni ~3,5% ενώ τα κοιτάσματα σουλφιδίων σε Ni στο Sudbury και Norilsk αποτελούν το >50% της παγκόσμια παραγωγής.

## ABSTRACT

# The Cr-PGE deposit at Bushveld and the Ni-Cu-PGE sulfide deposits at Sudbury and Norilsk

#### **Tiamaros Giorgos**

This diploma thesis focused on the Cr, PGE and Cu-Ni sulfide deposits associated with magmatic processes. These ores are associated with ultra-mafic magmatic rocks. The geotectonic environments in which these processes tooke place, are mainly intraplate-craton areas (stratified complexes). The development of Cr took place mainly in the cratonal areas of pre-Cambrian age, with huge intrusions of basic magmatic composition from partial melting of the upper mantle. Platinum group metals (PGE - Rn, Rh, Pd, Os, Ir, Pt) are metals of strategic importance with main uses in the world market such as in the oil industry, ceramics, car catalysts etc. The deposits in Norilsk, Sudbury and Bushveld (Merensky Reef and UG2) are the main occurrences worldwide and consist of pyrrhotite, pentlandite and chalcopyrite, PGE as by-products and the most important sources in Ni. The Ni-Cu sulfides, with the largest deposit being located in Norilsk, involve the intrusion of gabbroic magmas into Paleozoic rocks in an intercontinental trough environment. The deposit is mainly found as disseminations, massive bodies and breccias and contains ~ 3.5% Ni, while the sulfide Ni deposits in Sudbury and Norilsk constitute >50% of the Ni world production.

## 1. Εισαγωγή

#### 1.1 Γενικά

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στο πλαίσιο του προπτυχιακού προγράμματος σπουδών του Τμήματος Γεωλογίας, της Σχολής Θετικών Επιστημών, του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης.

## 1.2 Πρόλογος

Τα υγρομαγματικά κοιτάσματα δημιουργούνται κατά την αρχική κρυστάλλωση γαββρικού ή διοριτικού τήγματος και η δημιουργία τους προέρχεται από την άνοδο και κρυστάλλωση βασικού μάγματος. Τα ορυκτά που σχηματίζονται είναι ορυκτά της ομάδας των PGE, μεταλλεύματα οξειδίων Cr, Fe,Ti,V και μεταλλεύματα σουλφιδίων Fe,Cu,Ni,Co Προέρχονται από βάθη 50-150km όπου το υλικό που τήκεται είναι βασικός περιδοτίτης (χαρτσβουργίτης – λερζόλιθος). Τα γενικά χαρακτηριστικά που εντοπίζονται στα υγρομαγματικά κοιτάσματα είναι η ότι διαχωρίζονται στα ορθομαγματικά ή πρώιμα μαγματικά που οφείλεται σε πρώιμη κλασματική κρυστάλλωση λόγω βαρυτομετρικού διαχωρισμού και υστερο-μαγματικά που δημιουργούνται λόγω της παρουσίας ρευστής φάσης (H<sub>2</sub>O) και ανάπτυξης offset μορφών.

Αντικείμενο εργασίας της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η ανάλυση και επεξήγηση των κοιτασμάτων Cr-PGE που παρουσιάζονται σε μεγάλη έκταση στο σύμπλεγμα Bushveld της N. Αφρικής καθώς και σε κοιτάσματα σουλφιδίων Ni-Cu-PGE Sudbury του Kavaδά και Norilsk της Ρωσίας. Η σημασία του συγκεκριμένου τύπου μεταλλοφορίας έχει μεγάλη οικονομική σημασία. Τα PGE ή αλλιώς Platinum Group Minerals περιλαμβάνουν την ομάδα από (βαριά μέταλλα) Pt, Os, Ir και την ομάδα από τα (ελαφριά μέταλλα) Pd, Rh, Ru. Τα PGE εντοπίζονται στη φύση ως συστατικά υπερβασικών πετρωμάτων, κράματα, αυτοφυή μέταλλα, μορφές θειούχων ενώσεων και ως οξείδια ή υδροξείδια.

Στο σημείο αυτό θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον Αναπληρωτή Καθηγητή του Τομέα Ορυκτολογίας – Πετρολογίας – Κοιτασματολογίας, κ. Βασίλειο Μέλφο, για τις υποδείξεις, το ενδιαφέρον, τα σχόλια και τη συνολική υποστήριξη σε όλα τα στάδια της παρούσας εργασίας.

# 2. ΤΟ ΚΟΙΤΑΣΜΑ ΣΤΟ SUDBURY

- 2. Sudbury Igneous Complex (SIC)
- 2.1 Τρόπος σχηματισμού του SIC



Σχήμα 2. Παρουσίαση του τόπου δημιουργίας του SIC. (Bob, Marianne, Mia, Ruth, & Phil, 2015)

Σχήμα 1.. Αρχικός μέγεθος του κυκλικού κρατήρα, όπου στη συνέχεια λόγω των δυνάμεων συμπίεσης της γης και της διάβρωσης, έμεινε ένα μικρό μέρος του που υπάρχει σήμερα (Bob, Marianne, Mia, Ruth, & Phil, 2015)

Το σύμπλεγμα εξόρυξης του Sudbury αποτελεί ένα από τα μεγαλύτερα κοιτάσματα Ni-Cu- PGE στον κόσμο και τουλάχιστον τα τελευταία εκατό χρόνια αποτελεί αντικείμενο επιστημονικής μελέτης. Υπάρχουν σημαντικά στοιχεία, όπου αποδεικνύουν ότι η γένεση των κοιτασμάτων στο Sudbury σχετίζεται με σύγκρουση μετεωρίτη με τα γήινα πετρώματα του φλοιού περίπου πριν από 1,85 Ga (Lightfoot et al. 2002) Οι διεργασίες σχηματισμού ορυκτών στην SIC, ωστόσο, είναι παρόμοιες με άλλες μαγματικές αποθέσεις νικελίου που σχετίζονται με βασικά- υπερβασικά πετρώματα που προέρχονται από τον μανδύα στα οποία η πρωτογενής μεταλλοφορία ξεκινά από τον κορεσμό τηγμένων σουλφιδίων, συσσωμάτωση, συσσώρευση και τον διαχωρισμό τους από τα λιγότερα πυκνά βασικά- υπερβασικά τήγματα, που καθιζάνουν και συγκεντρώνονται στη βάση των βασικών- υπερβασικών πετρωμάτων ή στα κενά των αγωγών του μάγματος (Catharine et al. 2002).



Σχήμα 1. Γεωλογικός χάρτης της περιοχής του SIC που εμφανίζει την τοποθεσία και την λεπτομερή γεωλογία της περιοχής. (Kenny, Petrus, Whitehouse, Daly, & Kamber, October 2017)

Η γεωλογία της SIC και της περιβάλλουσας περιοχής είναι το κλειδί για την κατανόηση του σχηματισμού εναποθέσεων σουλφιδίων νικελίου στο Sudbury ακολουθώντας την ακολουθία των γεγονότων που προκύπτουν από τη διαδικασία των επιπτώσεων. Ανάμεσα στα ιζήματα δημιουργήθηκε λακκόλιθος (από πτώση μετεωρίτη) μήκους 60 km και πλάτους 27 km (Krogh et al. 1984). Τα πετρώματα που ήρθαν σε σύγκρουση με τον μετεωρίτη καθώς και τα προ σύγκρουσης βασικά- υπερβασικά πετρώματα των ηφαιστειακών πετρωμάτων που περιέχουν σουλφίδια, αποτελούν απαραίτητες προϋποθέσεις για τα συστατικά (μέταλλα, θείο) που σχηματίζουν εναποθέσεις θειούχου νικελίου. Η ανάτηξη των πετρωμάτων στο σημείο του άνω φλοιού που προκλήθηκε από την κρούση του μετεωρίτη δημιούργησε ένα δυναμικό και ευνοϊκό σε δημιουργία μεταλλοφορίας στρώματος τήξης (Prevec et al. 2002). Η τοποθέτηση, η κλασματοποίηση και η διαφοροποίηση του στρώματος τήξης κατά την απότομη πτώση της θερμοκρασίας είχε ως αποτέλεσμα τη δημιουργία του Sudbury Igneous Complex (SIC) το οποίο ομαδοποιείται σε γαρτογραφήσιμες υπομονάδες όπως είναι η κύρια μάζα (συμπεριλαμβανομένης του νοριτικού υποστρώματος, χαλαζιακού νορίτη, χαλαζιακού γάββρου, γρανίτη από την βάση προς την κορυφή), και Breccias Footwall (Το Breccia αποτελείται από θραύσματα πετρωμάτων της περιοχής που κυμαίνονται από μικροσκοποπική έως πάνω από 10μέτρα διάμετρο και εμφανίζονται ως ακανόνιστες μάζες πριν τη SIC έξω από το σύμπλεγμα του Sudbury, καθώς επίσης σε ορισμένα σημεία εμφανίζονται και σημάδια αρχικής τήξης) (Hurwitz et al. 2014).



Σχήμα 2. Σχηματική απεικόνιση του SIC που δείχνει τη θέση των melanorite σωμάτων. Ο χάρτης υποδιαιρείται σε δύο τομείς στο Νότιο τμήμα και στο Βορειοανατολικό τμήμα. Α)Απεικονίζεται η γεωμετρία των κύριων ενοτήτων της περιοχής και η θέση των ατομικών δειγματοληψιών (λευκές γραμμές) καθώς και η θέση των melanorite σωμάτων (κόκκινα αστέρια). Β) Γενικευμένη στρωματογραφική στήλη δια μέσου του SIC κατά μήκος της διαδρομής Creighton όπου εμφανίζει και την θέση των melanorite σωμάτων. (Latypov, Chistyakova, Grieve, & Huhma, 2019)



Σχήμα 5. Μία μακροσκοπική εικόνα όπου φαίνεται η προεξοχή του melanorite σώματος που φιλοξενείται σε όξινο νορίτη. Μήκος σφυριού 11cm. (Latypov, Chistyakova, Grieve, & Huhma, 2019)

Οι διάφορες μορφές των μεταλλοφόρων σουλφιδίων νικελίου-χαλκού-PGE που συνδέονται με σουλφίδια της διεισδύσεως, λόγω υψηλής περιεκτικότητας σε πτητικά συστατικά στερεοποιήθηκε μετά τα πυριτικά ορυκτά δηλαδή orebodies φιλοξενούνται στο υπόστρωμα της ζώνης επαφής των Offset (αποφύσεις της κύριας ζώνης του μεταλλεύματος με υψηλή περιεκτικότητα σε στοιχεία Ni-Co) φλέβες. Συνθήκες όπως καθιζήσεις, μαγματισμός, μεταμόρφωση και τεκτονικές κινήσεις είχαν ως αποτέλεσμα την μεταβολή του Sudbury. Τα μεταλλεύματα του Sudbury αποτελούν την μεγαλύτερη πηγή Ni στον κόσμο, γιατί περιέχει σημαντική ποσότητα οικονομικών ορυκτών όπως Cu, Co, Fe, Pt. Τέλος τα αποθέματα της περιοχής υπολογίζονται στους 430 Mt ενώ έχουν ήδη έχουν εξορυχτεί από αυτούς 500Mt (Vaughan et al. 2014).

#### 2.2 Ο τρόπος εξέλιξης του υποστρώματος του SIC

Τα ορυκτά του υποστρώματος στη βάση του Sudbury Igneous Complex (SIC) αποτελούνται από δύο τμήματα, τα νοριτικά τμήματα της υποζώνης και τους ακτινωτούς και ομόκεντρους χαλαζιακούς διορήτες των offset τμημάτων των φλεβών. Και τα δύο χαρακτηρίζονται από την σημαντική παρουσία σε ποσότητες σουλφιδίων Ni-Cu-PGE και από ένα μεγάλο αριθμό επανακρυσταλούμενων διαβασικών δομών και μελανοκρατικών έως υπερβασικών θραυσμάτων (Grant et al. 1984). Οι δύο παραλλαγές του υποστρώματος περιέχουν στη σύνθεση τους ευδιάκριτο αριθμό εγκλεισμάτων που φέρουν στο εσωτερικό τους. Η επαφή του υποστρώματος με τις αποφύσεις της κύριας ζώνης του μεταλλεύματος (offset) με τις μεταλλοφόρες φλέβες που φιλοξενούνται στο βόρειο τμήμα του συμπλέγματος στο κάτω τέμαχος του γρανιτικού τμήματος, είναι σπουδαιότερης σημασίας σε σχέση με εκείνα που φιλοξενούνται στο νότιο τμήμα των βασαλτικών και μετά-ιζηματογενών πετρωμάτων του συμπλέγματος (Lightfoot et al. 2016). Η μεταβολή της ορυκτολογικής σύστασης των πετρωμάτων του SIC μπορεί να περιγραφεί κάτω από συγκεκριμένες προϋπόθεσης των εκτεθειμένων πετρωμάτων κατά τη σύγκρουση και τη διαφοροποίηση των προκυπτόντων μαγμάτων.



Σχήμα 6. Α) Σχηματική απεικόνιση της διατομής που εμφανίζει τη γεωλογική τοποθέτηση του Βόρειου τμήματος και τη σχέση που έχει με την επαφή του με το Νί και του κάτω τεμάχους του Cu με σουλφιδικά θραύσματα. Β) Απεικόνιση της ορυκτολογίας της περιοχής του Νότιου τμήματος. (Gibson, 2010)

Ο πληθυσμός των βασαλτικών εγκλεισμάτων χαρακτηρίζεται από κερατιτική ανακρυστάλλωση των πλαγιοκλάστων και είναι γεωχημικά και ισοτοπικά ταυτόσημοί με τους Huronian (γεωλογικός χρόνος) βασάλτες οι οποίοι αποτελούν το νότιο τμήμα του συμπλέγματος με αναλογίες (Ce / Yb) Ν περίπου 2,5 και εΝd1850 μεταξύ -2 και -5. Τα μελανοκρατικά εγκλείσματα του υποστρώματος είναι συνήθως χονδρόκοκκα και μη

παραμορφωμένα, με περιεχόμενο ασυμβίβαστων στοιχείων και μείγματος ραδιενεργών ισοτόπων ενδιάμεσα μεταξύ των βασαλτικών εγκλεισμάτων και του τηγμένου στρώματος, το οποίο έχει αναλογίες (Ce / Yb) Ν περίπου 10 και εNd1850 περίπου στο -9 (Faggart et al. 1985). Τα υπολογισθέντα μοντέλα κρυστάλλωσης είναι ομοιόμορφα με την δημιουργία υπερβασικών εγκλεισμάτων με κρυστάλλωση από ένα μάγμα που αποτελεί ανάμειξη του λιωμένου βασαλτικού τμήματος του κάτω τεμάχους με το τηγμένο υπόστρωμα. Θεωρείται ότι το υπόστρωμα προήλθε από τη μετοπική σύγκρουση του μετεωρίτη ως αποτέλεσμα της ακαριαίας τήξης του κάτω τεμάχους του κατά τη σύγκρουση (Dickin et al. 1999). Αυτό το βασικό στρώμα εμπλουτίστηκε προοδευτικά σε σουλφίδια και βασικά πετρώματα από πάνω μέσω διαφοροποίησης κατά τη διάρκεια της ψύξης. Τα 'offsets' στην ουσία αποτελούν αποφύσεις της κυρίας ζώνης του μεταλλεύματος που βρίσκονται τοποθετημένα στα γειτονικά πετρώματα όπου το μάγμα ουσιαστικά απομακρύνεται από το σύστημα. Κατόπιν η συνεχόμενη εξέλιξη των περιθοριακών (facies) ιζηματογενών ακολουθιών παρήγαγε περισσότερα βασικά εγκλείσματα στην επαφή του με το υπόστρωμα. Κλείνοντας δεν υπάρχουν επιπλέον συστατικά εξώθησης (π.χ. μανδύας) για να εξηγηθούν οι κατανομές των πυριτικών στοιχείων στο SIC και των βασικών πυριγενών πετρωμάτων στο σημείο σύγκρουσης που εμπλέκονται ως πηγές μετάλλου για τις αποθέσεις του SIC (Nguyen et al. 1999).

#### 2.3 Το γενετικό μοντέλο δημιουργίας των offset dikes του SIC

To Worthington offset dike εκτείνεται για περίπου 15km (Σχ. 7). Από τα νοτιοδυτικά σημεία του Sudbury Igneous Complex. Η φλέβα είναι η ζώνη που θεωρείται ότι περιέχει εγκλείσματα και περιεκτικότητες σουλφιδίων. Ο περιθωριακός χαλαζιακός διορίτης αποτελεί μετάβαση για τον ημιφλεβικό χαλαζιακό διορίτη. Αυτά τα πετρώματα είναι υποκορεσμένα σε σουλφίδια, περιέχουν μικρά εγκλείσματα των πετρωδών τοιχωμάτων και διατηρούνται μαζί με την φλέβα (Lightfoot el al. 2002). Στο συγκεκριμένο μέρος, η φλέβα περιέχει έναν πυρήνα πλούσιο σε χαλαζιακό διορίτη ο οποίος μπορεί να βρίσκεται με εγκλείσματα που περιβάλλονται από ημισυμπαγή μέχρι συμπαγή σουλφίδια. Τα περισσότερα ορυκτά εγκλείσματα πλούσια σε χαλαζιακό διορίτη περιέχουν 10% με 75% των αμφιβολιτικών εγκλεισμάτων, τα οποία είναι πετρολογικά και γεωχημικά παρόμοια με τα γειτονικά πετρώματα της περιοχής (country rocks) αμφιβολιτιών που καλούνται ως γάββρος

του Sudbury (Sudbury gabbros). Οι ημισυμπαγής και τεράστιες σουλφιδικές ζώνες σχηματίζουν υπόγειους σωλήνες- αγωγούς, όπως και οι αποθέσεις του Copper Cliff offset dike που συνδέονται με εκείνες του Worthington dike εκτείνονται από 20-30m έως 50-80m. Οι μέσες μεταλλικές τιμές των σουλφιδίων με θείο (S)  $\geq$ 5% υπολογίζονται ότι είναι 7% Ni και 13% Cu. Έτσι τα μεταλλεύματα της φλέβας έχουν περισσότερο Cu/Ni σε σχέση με τα μεταλλεύματα που βρίσκονται μεταξύ της ζώνης επαφής του υποστρώματος (Cu/Ni ~1%) (Farrow et al. 2002).



Σχήμα 7.Αεροφωτογραφία που δείχνει την έκταση του Worthington Offset dyke. (McLean, 2013)

Ο χαλαζιακός διορίτης και τα πλούσια εγκλείσματα (inclusion-rich) σε χαλαζιακό διορίτη διαφέρουν σε αφθονία στα στοιχεία του Ni, Cu, Pt και Pb όμως παρόλα αυτά περιέχουν παρόμοια επίπεδα κύριων και λιθόφυλλων ιχνοστοιχείων, παρά το γεγονός ότι έχουν διαφορετικά εγκλείσματα και περιεκτικότητές σουλφιδίων. Ωστόσο η αφομοίωση των εγκλεισμάτων δεν έχει αλλάξει σημαντικά την αρχική σύνθεση των πυριτικών στοιχείων πλούσιων σε περιεκτικότητα χαλαζιακού διορίτη. Επίσης η σύνθεση των φτωχών εγκλεισμάτων (inclusion-poor) σε χαλαζιακό διορίτη είναι μία κοντινή προσέγγιση με την μέση αναλογία του φλοιού και αυτής που υπάρχει στη σύσταση στο όγκο του Sudbury Igneous Complex (SIC) (Szentpeteri et al. 2005).Επιπλέον οι διαφορές που εντοπίζονται στη γεωχημεία των offset εντοπίζονται ανάμεσα στο Βόρειο και Νότιο τμήμα των offset dikes, όμως εικάζεται ότι ο σχηματισμός των φτωχών και πλούσιων εγκλεισμάτων σε χαλαζιακό διορίτη πυριτικών μαγμάτων προκάλεσε σημαντική διαφοροποίηση του πυριτίου ή διαχωρισμό λόγω βαρύτητας των πυριτικών στοιχείων του στρώματος τήξης. Αυτές οι διαφορές που έχουν αναπτυχθεί ίσως αποτελούν μία απάντηση στις διαφορετικές αναλογίες που απαντώνται στα γρανιτοειδή του Αρχαϊκού σε σχέση με τα προτερωζωϊκά ιζήματα και ηφαιστειακά που συνέβαλαν στην τήξη στρώματος (melt sheet) στη Βόρεια και Νότια περιοχή του Sudbury Igneous Complex (SIC) (Lightfoot et al. 2002).

Το σύμπλεγμα του Sudbury Igneous Complex (SIC) είναι ένα καλά διαφοροποιημένο τηγμένο στρώμα το οποίο βρίσκεται κοντά στις επαρχίες Archean, Superior και Proterozoic Southern. Η εξωτερική επαφή (outer contact) και τα πετρώματα της περιοχής, περιέχουν τις κύριες πηγές των θειούχων ενώσεων Ni, Cu, Co μεταλλικών σουλφιδίων οι οποίες μπορούν να ομαδοποιηθούν σε τρεις κύριους τύπους:

- Πρώτον την επαφή των πλούσιων σε Fe-Ni κοιτασμάτων που σχετίζονται με τα πυριγενή πετρώματα της περιοχής με την ονομασία 'sub-layer'.
- Δεύτερων τα κοιτάσματα που είναι πλούσια σε Cu- Ni- PGE φιλοξενούνται μέσα στα λατυποπαγή της ενότητας του αναχώματος <footwall> κάτω από το SIC. Αυτά ονομάζονται 'footwall deposits'.
- Τέλος τα κοιτάσματα πλούσια σε Cu- Ni- PGE που βρίσκονται μέσα στο χαλαζιακό διορίτη όπου οι 'offset' φλέβες εκτείνονται μακριά από το SIC (Gibson, June 21-24, 2010)



Σχήμα 8. Τεχνικά χαρακτηριστικά του Worthington dike. a) Φωτογραφεία που δείχνει τη ζώνη της φλέβας του Worthington. Στο σκούρο σημείο φαίνεται ο πλούσιος διορίτης σε χαλαζία (IQD). B) Ανάμεικτες φάσεις του διοριτικού χαλαζία στο κεντρικό τμήμα της φλέβας. C) Λεπτό τμήμα που εμφανίζονται οι γραμμώσεις των μεταμορφωμένων ορυκτών καθώς και ένα επιμηκυμένο θραύσμα τμήματος ξενιστή. D) Φωτογραφία που παρουσιάζει διπλωμένα μεταβατικά στρώματα (metasedimentaty strata MS) προς την χλαζοδιοριτική φλέβα ως αποτέλεσμα καταπόνησης-επαφής. (Hecht, et al., 2008)

Αρχικά η πρώτη φάση με το πρώτο διοριτικό τήγμα σε χαλαζία ήταν υποκορεσμένα σουλφίδια χωρίς αμφιβολιτικά εγκλείσματα. Η δημιουργία του τήγματος αυτού έγινε κατά τη διάρκεια ή λίγο μετά τη δημιουργία του τηγμένου υποστρώματος και αντιπροσωπεύει μια εξαιρετικά γρήγορη διαδικασία δημιουργίας του διοριτικού τήγματος χαλαζία με σχηματισμό ακτινωτών και ομόκεντρων πετρωμάτων με διείσδυση των τοπικών μετάιζηματογενών εγκλεισμάτων (Pentek, 2009). Η δεύτερη φάση της δραστηριότητας περιελάβανε την σύσταση ενός σουλφιδικού τήγματος σε τμήματα του διοριτικού τήγματος σε χαλαζία που δεν πρόλαβε να κρυσταλλωθεί τελείως στο κέντρο της offset φλέβας. Αυτό παρήγαγε και την αφθονία εγκλεισμάτων σε χαλαζιακό διορίτη (Prevec et al. 2002). Ωστόσο το κύριο μέρος έκχυσης του σουλφιδικού τήγματος βοήθησε στη βελτίωση του διαχωρισμού των ζωνών με την εν μέρη κρυστάλλωση της φλέβας του χαλαζιακού διορίτη, που συχνά φαίνεται ότι αντιστοιχούν σε επαφές μεταξύ διαφορετικών πετρωμάτων και σουλφιδίων ειδικά στις περιοχές όπου υπάρχουν πετρώματα όπως το ' Sudbury gabbros'. Η έκχυση του σουλφιδικού τήγματος εικάζεται ότι έλαβε χώρα κατά μήκος των απότομων και προσανατολισμένων αγωγών που υπήρχαν στο υπόστρωμα μέσω των ιζηματογενών πετρωμάτων που προϋπήρχαν (Cawthorn et al. 2002). Έτσι εξηγείται η σχέση επαφής μεταξύ των άφθονων και φτωχών εγκλεισμάτων σε χαλαζιακό διορίτη, καθώς επίσης και ο κατακερματισμός που παρουσιάζεται στα εγλείσματα που είναι φτωχό σε χαλαζιακό διορίτη στα αμφιβολιτικά πετρώματα . Ολοκληρώνοντας η διείσδυση των σουλφιδίων μέσα στους αγωγούς θεωρείται ότι πραγματοποιήθηκε από το υπερκείμενο τηγμένο υπόστρωμα με υψηλά ποσοστά στα στοιχεία Cu/Ni καθώς και στα στοιχεία της ομάδας της πλατίνας (PGE) αυτών των σουλφιδίων, σε σύγκριση με τα σουλφίδια επαφής (contact-style sulfides), όπου αποδεικνύεται ότι μερικά από τα αυτά διαχωρίστηκαν νωρίτερα από το υπερκείμενο τηγμένο υπόστρωμα. (Lightfoot, 2002).



Σχήμα 9. Φωτογραφία που απεικονίζει την μορφολογία και την ορυκτολογία του Worthington Offset dike. Όπως απεικονίζει η φωτογραφία ύπαρξη σημαντικών αποθεμάτων περίπου κάθε 800m. (McLean, 2013)

Sample	W3-2d	W3-2d	W3-2d	W3-3c	W3-3c	W3-3c	W3-5b	W3-5b	W3-5b
Rock	QD(ch)	QD(ch)	QD(ch)	QD	QD	QD	IQD	IQD	IQD
Analysis no.	18	23	25	62	51	48	145	144	194
Mineral	Plg1	Plg1	Plg2	Plg1	Plg1	Plg2	Plg1	Plg1	Plg2
	core	rim	-	core	rim	-	core	rim	-
SiO <sub>2</sub> (wt%)	54.44	56.52	63.01	53.53	56.68	62.99	52.98	56.06	62.09
TiO <sub>2</sub>	<0.01	0.06	<0.01	0.06	0.04	0.03	0.04	0.03	< 0.01
$Al_2O_3$	29.32	27.85	23.72	29.59	27.91	23.71	29.47	27.47	23.64
FeO <sub>tot</sub>	0.40	0.25	0.04	0.72	0.15	0.12	0.68	0.14	0.14
MnO	<0.01	< 0.01	0.01	<0.01	<0.01	<0.01	< 0.01	0.01	0.02
MgO	0.05	0.04	<0.01	0.07	<0.01	< 0.01	0.03	0.01	< 0.01
CaO	11.29	9.50	4.67	11.57	9.02	4.20	11.49	9.55	4.95
$Na_2O$	5.10	5.75	8.87	4.43	5.77	8.13	4.20	5.83	8.27
K <sub>2</sub> O	0.15	0.13	0.08	0.17	0.07	0.08	0.22	0.07	0.08
Total	100.75	100.10	100.40	100.14	99.64	99.26	99.11	99.17	99.19
Si	9.772	10.134	11.099	9.679	10.178	11.168	9.673	10.146	11.070
Al	6.198	5.880	4.921	6.301	5.902	4.951	6.337	5.855	4.963
Ti	0.000	0.008	0.000	0.008	0.005	0.004	0.005	0.004	0.000
Fe	0.060	0.037	0.006	0.109	0.023	0.018	0.104	0.021	0.021
Mn	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.002	0.003
Mg	0.013	0.011	0.000	0.019	0.000	0.000	0.008	0.003	0.000
Ca	2.171	1.825	0.881	2.241	1.735	0.798	2.248	1.852	0.946
Na	1.775	1.999	3.030	1.553	2.009	2.795	1.487	2.046	2.859
K	0.034	0.030	0.018	0.039	0.016	0.018	0.051	0.016	0.018
Cations	20.023	19.924	19.956	19.949	19.868	19.752	19.913	19.945	19.880
Ab	44.6	51.9	77.1	40.5	53.4	77.4	39.3	52.3	74.8
An	54.5	47.4	22.4	58.5	46.1	22.1	59.4	47.3	24.7
Or	0.9	0.8	0.5	1.0	0.4	0.5	1.3	0.4	0.5
QD = quartz-diorite, IQD = inclusion-rich quartz-diorite, (ch) = chilled margin, Plg1 = primary plagioclase, Plg2 = subsolidus plagioclase.									

Σχήμα 10. Αντιπροσωπευτική μικροανάλυση πλαγιοκλάστου από το Worthington quartz diorite dike όπου φαίνονται λεπτομερώς η συμμετοχή των ιχνοστοιχείων στον πυρήνα και στα άκρα των δειγμάτων. (Hecht, και συν., 2008)

# **3. ΤΟ ΚΟΙΤΑΣΜΑ ΣΤΟ** NORILSK



Σχήμα 11. Περιοχή Σιβηρικής Πλατφόρμας

3. Τρόπος σχηματισμού μεταλλοφορίας των σουλφιδικών κοιτασμάτων PGE-Ni-Cu στο Norilsk.

3.1 Γεωλογική δομή και εξέλιξη της ευρύτερης περιοχής του Norilsk.

Το πλούσιο κοιτασματολογικό ενδιαφέρον που παρουσιάζεται στην περιοχή του Norilsk (Σχ. 11) το καθιστά ως μία περιοχή με ηγετικό ρόλο στην παγκόσμια οικονομία του μεταλλεύματος. Κύρια μεταλλευτικά στοιχεία που περιέχουν αυτά τα τεράστια αποθέματα σουλφιδίων είναι τα Cu-Ni-PGE. Τα αποθέματα αυτά αποτελούν έργο της παγίδευσης τεράστιας ποσότητας μάγματος μέσα στη Σιβηρική πλατφόρμα, κατά το φανερωζωϊκό που αποτελείται από περίπου 1.5εκ. km<sup>2</sup> έγχυσης βασαλτικού μάγματος σε αντίθεση με τις περισσότερες διεισδυτικές ζώνες που έλαβαν χώρα στο πρωτεροζωϊκό. Τεράστιες ποσότητες συμπαγών σουλφιδικών σωμάτων βρίσκονται στην περιοχή του Norilsk και βρίσκονται στην περιοχή αυτή με πάχη περίπου 100-150m που σχετίζονται με διεισδύσεις υποηφαιστειακών βασικών σωμάτων. Παρά την αφθονία όμως όλων αυτών των βασικών διεισδυτικών σωμάτων μόνο τρεις εξ αυτών αποτελούν σώματα με την μεγαλύτερη οικονομική σημασία σε Cu-Ni-PGE και εντοπίζονται στις περιοχές του Talnakh, Kharaelukh, Norilsk ενώ υπάρχουν και οι περιοχές με την λιγότερη οικονομική σημασία όπως: zub-Marksheydersky, Bolsaya, Barenaya, Michaugdinsky Nadezhda (Krivolutskaya, et al. 2019).

Ο σχηματισμός των αποθεμάτων σουλφιδίων PGE-Ni-Cu του Norilsk βρίσκεται στο ΒΔ τμήμα περιοχής σε βασαλτικά πετρώματα ηλικίας Τριαδικού όπου λειτουργούσαν σαν παγίδες στην Σιβηρική Πλατφόρμα. Αναλύσεις από έρευνες εμφανίζουν ότι τα στοιχεία του μεταλλεύματος της περιοχής προέρχονται κυρίως από το φλοιό παρά τον μανδύα. Λόγω της διείσδυσης βασαλτικών ρευστών όπου αναμίχθηκαν ξανά κάποια ορυκτά στοιχεία από Παλαιοπρωτεροζωϊκά ιζήματα και πετρώματα της Σιβηρικής πλατφόρμας. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα την ανάπτυξη κάποιων πιθανών κριτηρίων δημιουργίας των αποθεμάτων όπως:

 Η παρουσία μεγάλου ρήγματος κατά το Παλαιοπρωτεροζωϊκό και η συγγένεια της με παρουσία μάγματος, δηλαδή ηφαιστειότητα και δημιουργία φλεβών στον φλοιό όπου αναπτύχθηκε η μεταλλογένεση των σουλφιδίων Cu-Ni.

- Υπαρξη ορισμένων περιοχών που έχουν τεκτονιστεί και συνδέονται με παλαιά συστήματα ρηγμάτων.
- Περιοχές όπου συνδέονται με ενεργές ορογενετικές ζώνες, νησιωτικά τόξα και με ενεργά ηπειρωτικά περιθώρια όπου υπάρχει έντονη τεκτονική δράση και μαγματισμός.
- 4. Χρονικός συσχετισμός με γεγονότα του γεωλογικού χρόνου που σχετίζονται με τις διαδικασίες ηπειρωτικές διάρρηξης και μαγματισμού σε μεγάλη κλίμακα. Ο συνδυασμός κυρίως του πρώτου κριτηρίου όπου η παρουσία του είναι επιτακτική δημιουργούν ευνοϊκές συνθήκες για τη δημιουργία μεταλλεύματος.

3.2 Γεωλογικό υπόβαθρο και μέθοδοι μελέτης της περιοχής.

Η Σιβηρική παγίδα βρίσκεται στο κεντρικό κομμάτι της ανατολικής σιβηρικής πλατφόρμας και νότια της χερσονήσου Taimyr (Σχ. 12) όπου κατά το Προτεροζωϊκό ενώθηκαν σε μία ενιαία κρατονική περιοχή. Οι κύριες ενότητες που αποτελούν τους χώρους όπου υπάγεται η μεταλλοφορία σε όλη αυτή την περιοχή είναι:



Σχήμα 12. Τεκτονική απεικόνιση της Σιβηρικής πλατφόρμας με ζώνες ρηγμάτων (α) σχηματική απεικόνιση της ΝΔ περιοχής της Σιβηρικής πλατφόρμας (b) σεισμικό προφίλ 'Meteorite' κατά μήκος της περιοχής (c) (Minerals, 2019)

Οι περιοχές που βρίσκονται στην Tunguska, Viluy και Angara- Tasleva

- 1. Οι εκτάσεις στο Anabar και Aldan
- Και κυρίως οι περιοχές του Yenisef- Khatunga, Priyeniseysky και Norilsk-Kharaeklash (Anton V. Latyshev, Yana V. Bychkova 2019)

Η περιοχή αποτελείται αρχικά από ένα κρυσταλλικό υπόβαθρο το οποίο βρίσκεται εκτεθειμένο στην επιφάνεια μεταξύ των περιοχών Altan και Anabar. Η πλατφόρμα καλύπτει ένα σύμπλεγμα το οποίο αποτελείται από κλαστικά ανθρακικά πετρώματα που δημιουργήθηκαν από θαλάσσιους ορίζοντες κατά το Σιλούριο και Δεβόνιο (Σχ. 13) (ύπαρξη εβαποριτών και δόμων άλατος), από ιζηματογενή πετρώματα όπως της ομάδας της Tunguska (Σχ. 13) καθώς και διεισδυτικά σώματα που αργότερα διαχωρίστηκαν σε διαφορετικά συμπλέγματα σύμφωνα με την εσωτερική τους δομή και σύσταση. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα την μετατροπή της δομής. Επιπλέον η επίδραση των συνθηκών διάβρωσης είχαν ως αποτέλεσμα να αποκαλύψουν στην επιφάνεια δολεριτικά φλεβικά στρώματα που βρισκόντουσαν μέσα σε ιζηματογενή του Παλαιζωϊκού. Όλα αυτά όμως καλύφθηκαν από τα ηφαιστειακά πετρώματα (Σχ. 13) (τόφφοι και λάβες) εξαιτίας του εγκλωβισμού του μάγματος μέσα στον φλοιό. Αυτό είχε σαν αποτέλεσμα υπερβασικά και βασικά πετρώματα να βρίσκονται τοποθετημένα πάνω στα πετρώματα του Δεβονίου ή σε χαμηλότερες βασαλτικές ομάδες (Nadezhda Krivolutskaya et al. 2016). Επιπλέον από άλλες έρευνες που πραγματοποιήθηκαν για τα αποθέματα σουλφιδίων στο Norilsk αναφέρουν ότι σχηματίστηκαν σε ένα κλειστό μαγματικό σύστημα που περιελάβανε μαφικά υγρά πλούσια σε Mg και πτητικά συστατικά των ορυκτών του μεταλλεύματος που δημιουργήθηκαν κατά τη διάρκεια της μαγματικής παγίδευσης ως αποτέλεσμα ενός ανεξάρτητου μαγματικού κύκλου (Godlevshy, 1959). Η μεγαλύτερη ποσότητα υπερβασικών και βασικών πετρωμάτων βρίσκεται στο Yenisey-Khatunga. Την περιοχή αυτή υποδιαίρεσαν δύο ερευνητές σε τρεις μεγάλες ζώνες: Ζώνη 1) την βορειοκεντρική ζώνη όπου βρίσκονται κυρίως λάβες, Ζώνη 2) Νότια ζώνη που βρίσκονται κυρίως τόφφοι και Ζώνη 3) Αποτελούν ζώνες ορίων που βρίσκονται διεισδυτικά σώματα τοποθετημένα μέσα σε ιζηματογενή πετρώματα. Τα ηφαιστειακά πετρώματα (λάβες- τόφφοι) από την άλλη υποδιαιρούνται σε 11 υπό-ομάδες. Αρχικά έχουμε την υψηλή σε Ti φάση (high-Ti, TiO<sub>2</sub>> 2-3%) ύπο-αλκαλικοί βασάλτες και πικρίτες (πυροξενικοί περιδοτίτες με κύριο χαρακτηριστικό την παρουσία πλαγιοκλάστων) - Ivakinsky (iv), Syverminsky (sv), Gudchikhinsky (gd) και την γαμηλή σε Τi φάση (low-Ti, TiO<sub>2</sub> $\leq$  1%) θολεϊτική βασάλτες (αποτελούνται από φτωχοί σε Ca πυρόξενοι και με πλαγιόκλαστα κυρίως λαβραδόριο) - Khakanchansky (hk), Tuklonsky (tk), Nadezhdinsky (nd), Morongovsky (mr), Mokulaevsky (mk), Kharayelakhsky (hr), Kumginsky (km) and Samoyedsky (sm). Τέλος τα όρια μεταξύ των ύπο-ομάδων είναι διαφοροποιημένα σύμφωνα με το περιεχόμενο σε ιχνοστοιχεία και τα χαρακτηριστικά των ισοτόπων των πετρωμάτων.



Σχήμα 13. Γεωλογική τομή που δείχνει τα υπερκείμενους ηφαιστειακούς σχηματισμούς, τα υποκείμενα ιζηματογενή στρώματα της Tungusskaya καθώς και τα στρώματα του Δεβονίου.

Οι μελέτες που προσδιόρισαν την δομή της περιοχής βασίστηκαν κατά καιρούς σε διάφορα μοντέλα που προήλθαν με την βοήθεια γεωφυσικών μεθόδων. Τέτοιες μελέτες αποτελούν τα σεισμικά προφίλ όπου κυριότερα από αυτά αποτελούν το 'Cratun', 'Icimberlite που διασχίζουν τη δυτική και ανατολική Σιβηρική πλατφόρμα' και το (Σχ. 12) 'Meteorite' που φανερώνει το προφίλ από το Taimyr κοντά στη λίμνη Βαϊκάλη. Επίσης με μεταγενέστερα γεωφυσικά δεδομένα που ήρθαν στο φως έδειξαν διαφορές στη δομή της λιθόσφαιρας κάτω από το Yenisey- Khatunga και των περιοχών Angara- Taseava σε σύγκριση με αυτά των κρατονικών περιοχών της Σιβηρίας. Συνεπώς σύμφωνα με τα δεδομένα των γεωφυσικών μεθόδων εντοπίζονται σαφείς διαφορές μέσα στη δομή του φλοιού στα βόρεια και κεντρικά τμήματα της Σιβηρικής ενότητας (Σχ. 11). Επιπλέον τα σεισμικά προφίλ βοήθησαν στη δημιουργία μαγνητομετρικών και βαρυτομετρικών χαρτών, καθώς επίσης και με την χρήση μαγνητοτελουρικών κυμάτων που διαχώρισαν σε τρεις ζώνες τη δομή του φλοιού της γης στην περιοχή της Σιβηρικής Πλατφόρμας και βοήθησαν στον υπολογισμό του ποσοστού των βασικών πετρωμάτων (Anton V. Latyshev, 2019). Όπως εμφανίζονται τα στοιχεία στην παραπάνω εικόνα (Σχ. 14) παίρνουμε μια σαφέστερη εικόνα στον χάρτη των ισο-ανομαλιών του ψευδο-βαρυτικού πεδίου (Σχ.14β). Οι χάρτες του ψευδο-βαρυτικού πεδίου παρέχουν πιο λεπτομερείς εικόνες της γεωλογικής δομής μιας περιοχής διότι δεν επηρεάζονται από την επίδραση θετικών ή αρνητικών ανωμαλιών γειτονικών ανωμαλιών σε σχέση με τους χάρτες μαγνητικών πεδίων (Kazais, V.I 1997). Αυτές οι περιφερειακές δομές ερμηνεύονται για τον έλεγχο της τοποθεσίας των ορυκτών του μεταλλεύματος των διεισδύσεων της περιοχής του Norilsk (Bolsheavamsky), το ποτάμι Kulyumber (Siluriyskaya, Dyupkun), και το ποτάμι Kureyka που αποτελείται από το μεγάλο συμπαγείς σώμα με PGE-Cu-Ni και Fe (Tuganova, E.V, 2004) Έτσι προτείνεται ότι οι υποκείμενη σχηματισμοί στη Tunguska είναι πιθανόν να περιέχουν όμοιες καταθέσεις σε PGE-Ni-Cu.



Σχήμα 14. (a,b) Χάρτες που παρουσιάζουν τα ανωμαλίες στα μαγνητικά πεδία των ρηγμάτων στο Norlisk- Igarka από ύψος 20km. Σχηματίστηκαν κατά τη διάρκεια δημιουργίας των λιθοσφαιρικών πλακών που σχετίζονται με οριζόντια έκταση και σπασίματα επιπέδου λιθόσφαιρας. Χαρακτηρίζεται από ένα σύστημα πυκνών ρηγμάτων που επικοινωνούν με υλικά του μανδύα στα χαμηλότερα τμήματα του φλοιού. Ισοϋψείς ψευδό-μαγνητικών πεδίων. (Solid Earth, 2016)

3.3 Αντικείμενα και μέθοδοι μελέτης που χρησιμοποιήθηκαν.

Για την λεπτομερέστερη μελέτη των 'transitional series' ή μεταβατικών σειρών των ηφαιστειακών πετρωμάτων επιλέχθηκε το ανατολικό τμήμα της περιφέρειας του Norilsk (Lake Glubokoe) (Σχ. 15). Σε αυτή την περιοχή βρίσκεται η συγκλινική δομή της Tunguska και το ύβωμα στο Khantaysko- Rybnisky που αναπτύχθηκαν σε διαφορετικά κρυσταλλικά υπόβαθρα.



Σχήμα 15. Ανατολικό τμήμα της περιφέρειας του Νόρλισκ όπου μέσα στο μπλε τετράγωνο βρίσκεται η λίμνη Globokoe.

Ο προσδιορισμός των ιχνοστοιχείων μέσα στα ηφαιστειακά πετρώματα έγινε με δύο τρόπους. Πρώτον η μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε για τον προσδιορισμό των κύριων στοιχείων μέσα στα πετρώματα έγινε με τη χρήση φασματοσκοπίας φθορισμού ακτίνων X ή XRF που έγινε στο πανεπιστήμιο Γεωχημείας και Αναλυτικής Χημείας RAS με φασματόμερα διασποράς μεγαλύτερα του μήκους κύματος (Wavelength Dispresive) (Σχ. 16)



Σχήμα 16. Φασματοσκοπία με φθορισμό ακτίνων X και τρόπος λειτουργίας.

Δεύτερον με κατανομές ιχνοστοιχείων όπου η βιομηχανία σύμφωνα με τις κρατικές προδιαγραφές που ισχύουν χρησιμοποιούν τα χημικά δείγματα των πετρωμάτων προς επεξεργασία. Ο ποιοτικός έλεγχος αυτών των αποτελεσμάτων αποδεικνύει με βάση τις αναλύσεις που έχουν γίνει στα δείγματα. Σαν αποτέλεσμα έχουμε να παίρνουμε τις τυπικές αποκλίσεις των οξειδίων (Relative Standard Deviations or RSD) όπου τα ποσοστά των μεγαλύτερων οξειδίων φαίνονται στον πίνακα 1.

Πίνακας 2.	Περιεκτικότητες	των κύριων	οξειδίων.

SiO <sub>2</sub>	0.12%
TiO <sub>2</sub>	0.05%
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.12%
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.13%
MnO	0.005%
MgO	0.07%
CaO	0.08%
NaO	0.008%
K <sub>2</sub> O	0.03%
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.01%

Τα δεδομένα αυτής της κατανομής των ιχνοστοιχείων των ηφαιστειακών διεισδυτικών πετρωμάτων ελήφθησαν με τη βοήθεια φασματομετρικής μάζας επαγωγικού συζευγμεύνου πλάσματος (Inductively Coupled Plasma Spectoscopy or ICPS). Τέλος αξίζει να σημειωθεί ότι η μέθοδος XRF πλεονεκτεί κατά το ό,τι είναι μη καταστροφική, πολυστοιχειακή και ταχεία.

Πίνακας 3. Χημικές αναλύσεις των ηφαιστειακών πετρωμάτων (Λίμνη Globukoe). Τα οξείδια δίνονται σε (%) ενώ τα ιχνοστοιχεία σε ppm.

Sample	Gl-100/1	G-1	G-5/1	G-7	G-8/2	G-9	G-10	G-11
SiO <sub>2</sub>	50.43	52.75	52.07	53.23	52.70	48.1	48.33	48.86
TiO <sub>2</sub>	1.02	0.97	0.97	1.05	0.96	1.12	1.13	1.25
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	16.40	15.05	16.06	15.10	15.39	15.28	15.25	15.54
FeO	9.77	9.41	9.54	10.08	9.49	11.71	12.36	12.12
MnO	0.19	0.17	0.22	0.16	0.16	0.19	0.21	0.22
MgO	7.25	7.62	7.53	5.89	6.70	7.34	7.73	7.01
CaO	12.65	9.17	8.94	8.91	11.49	11.86	11.76	11.42
Na <sub>2</sub> O	1.96	3.72	2.31	2.77	1.81	1.24	0.95	1.04
K <sub>2</sub> O	0.25	0.42	1.68	1.94	0.46	0.19	0.44	0.57
$P_2O_5$	0.09	0.11	0.12	0.11	0.10	0.13	0.13	0.15
$Cr_2O_3$	-	-	-	-	-	0.012	0.009	0.022
Rb	2.9	11.1	50.9	72.3	6.9	7.24	4.42	4.02
Ba	144	280	639	495	324	154	156	144
Th	0.88	3.16	3.60	3.61	3.53	1.19	1.15	1.09
U	0.21	0.72	1.01	0.92	0.93	0.50	0.47	0.44
Nb	3.48	8.15	8.31	8.87	8.20	4.76	4.32	4.23
Ta	0.21	0.54	0.53	0.55	0.52	0.29	0.27	0.26
La	8.13	18.1	19.0	19.2	18.1	8.12	7.87	7.60
Ce	17.1	37.1	39.4	39.4	37.1	17.5	17.2	16.6
РЬ	4.74	10.83	7.59	7.23	9.76	3.14	2.51	3.62
Pr	2.20	4.52	4.66	4.75	4.44	2.39	2.37	2.29
Nd	10.02	18.6	19.0	19.3	18.4	11.32	11.06	10.83
Sr	314	287	323	394	285	192	198	200
Sm	2.68	3.99	4.24	4.22	4.02	3.16	3.01	2.91
Zr	73.7	132	136	142	135	85.2	77.3	75.7
Hf	1.97	3.27	3.54	3.61	3.43	2.13	1.98	1.92
Eu	1.09	1.16	1.17	1.13	1.09	1.15	1.11	1.10
Gd	3.20	4.19	4.37	4.47	4.29	3.68	3.44	3.33
Ть	0.53	0.66	0.70	0.72	0.67	0.61	0.59	0.57
Dy	3.51	4.36	4.52	4.51	4.44	4.18	3.94	3.89
Ho	0.71	0.86	0.92	0.90	0.90	0.84	0.83	0.79
Y	19.3	23.7	25.1	24.8	24.7	21.9	21.1	20.4
Er	2.06	2.53	2.71	2.56	2.63	2.40	2.34	2.22
Tm	0.30	0.36	0.38	0.37	0.37	0.35	0.32	0.32
Уb	1.98	2.42	2.57	2.56	2.45	2.45	2.38	2.34
Lu	0.28	0.35	0.38	0.38	0.39	0.36	0.34	0.34

#### 3.4 Δομή των ηφαιστειακών πετρωμάτων

Αρχικά η ανάλυση των ηφαιστειακών πετρωμάτων της περιοχής συμπεριλαμβανομένου και των ενδιάμεσων σειρών εντός της δομής του Mickasgnisky έγινε για να περιγραφεί καλύτερη η μαγματική εξέλιξη. Η περιοχή αυτή βρίσκεται σε ένα ύβωμα στο Khuntaysko-Rybinsky που συνδέεται με την λεκάνη του Norilsk- Kharaelakh και της συγκλινικής δομής του Tunguska. Περιοχές που αποτελούν σημεία ενδιαφέροντος των ηφαιστειακών πετρωμάτων με πάχος έως 560 m βρίσκονται στο νότιο τμήμα της λεκάνης του Iken όπου μελετήθηκαν από πλήθος γεωλόγων. Μέσα απ' όλες αυτές τις μελέτες εντοπίστηκαν 5 σχηματισμοί: το Syverminsky (T<sub>1</sub>sv), Gudchiknisky (T<sub>1</sub>gd), Khakanchasky, Nadezdinsky (T<sub>1</sub>nd) και Tuklonsky (T<sub>1</sub>tk) με τους τελευταίους τρεις σχηματισμούς να αποτελούν τους λεγόμενους ενδιάμεσους σχηματισμούς και να εμφανίζουν διαφορετικά γεωχημικά στοιχεία σε σύγκριση με τους άλλους (Wooden et al. 1993).

Σε αυτό το σημείο θα γίνει μία περεταίρω ανάλυση αναλύοντας μέσα από δεδομένα την δομή κάθε σχηματισμού. Ξεκινώντας ο σχηματισμός του Siverminsky (Σχ.17) με συνολικό πάχος μεγαλύτερο των 110 m αποτελείται από 12 βασαλτικές εκχύσεις καθώς και από τραχυβασάλτες (έκχυτα πετρώματα αστριοειδούχων γάββρων). Επίσης τα πετρώματα αυτά καλύπτονται από πυκρίτες της ακολουθίας του Gudnisky (Σχ.17) αποτελούμενα στο σύνολο από 2 εκχύσεις με πάχος περίπου πάνω από τα 45m. Ωστόσο σημαντικά στοιχεία προήλθαν για τους σχηματισμούς των Khakanchansky και Tuklonsky που περιλαμβάνουν τοφφικούς σχηματισμούς και λάβες. Σε αυτό το τμήμα της ακολουθίας εμπεριέχονται τρεις τοφφικοί ορίζοντες με πάχη 3,6,12m αντίστοιχα τα οποία είναι αποτέλεσμα τριών διαφορετικών εκγύσεων βασαλτικού μάγματος. Επιπλέον γαρακτηριστικό της δομής του Tuklonsky είναι το γεγονός ότι τα υπερκείμενα που βρίσκονται τοποθετημένα εκεί είναι αποτέλεσμα δώδεκα εκγύσεων ποικιλοφυτικών και πέντε θολεϊτικών λαβών με πάγος 170m. Ακόμα οι σχηματισμοί του Nadezhdinsky που είναι υπερκείμενοι αυτών του Tuklonsky απαρτίζονται από ανδεσιτικούς βασάλτες πορφυριτικού και αφυρικού ιστού. Η γεωχημική μελέτη των τόφφων αποδεικνύει ότι βρίσκονται στη σύνθεση των πετρωμάτων του Nadezhdinsky σε αντίθεση με αυτούς των διεισδυτικών βασαλτικών στρωμάτων που χαρακτηρίζει κυρίως την περιοχή του Tuklonsky. Συνοψίζοντας τα υλικά μεταφέρθηκαν από διάφορες ανατολικά και δυτικά αντίστοιγα σχηματίζοντας διαφορετικά πετρώματα στην ίδια περιοχή (Al'mukhamedov et al. 2004). Επίσης η αναλογία Gb/Yb μας αποδεικνύει ότι η τοποθεσία εμπίπτει με τα πετρώματα που αποτελούν αποτέλεσμα της μαγματικής διαφοροποίησης λόγω της διάρρηξης που έλαβε χώρα όπως ο σχηματισμός του Nadezhdinsky καθώς και των τεκτονικών καθεστώτων που έλαβαν χώρα στην πλατφόρμα όπως ο σχηματισμός του Tuklonsky (Krivolutskaya et al. 2016).



Σχήμα 17. Γεωλογική στήλη των σχηματισμών της περιοχής του Mickangdinsky όπου φαίνονται οι κύριες δομές (Minerals 2019).

#### 3.5 Αποτελέσματα και συμπεράσματα

Κάποια γενικά συμπεράσματα που προκύπτουν από τις μελέτες της γεωχημείας της γενικότερης σύνθεσης των ηφαιστειακών πετρωμάτων της περιοχής είναι ότι ποικίλουν από βασάλτη κάτι βασικό έως ανδεσίτη ένα μάγμα με ενδιάμεσο χαρακτήρα όπου το ποσοστό του SiO<sub>2</sub> κυμαίνεται από 49.1% έως >53% ενώ το ποσοστό των αλκαλιούχουν που εμπεριέχονται είναι της τάξης 2.1-4.8% (NaO>K<sub>2</sub>O).

Στις περιοχές του Norilsk και του Taimyr όπου εντοπίστηκαν για πρώτη φορά τα σουλφιδικά κοιτάσματα PGE-Ni-Cu στο βόρειο τμήμα της ανατολικής Σιβηρίας αναπτύχθηκε μια ιδέα όπου στην συνέχεια αποδείχθηκε και στην πράξη, της σύνδεσης των αποθεμάτων με αυτή των

ηφαιστειακών πετρωμάτων την ίδια χρονική περίοδο (Urvantcev, 1921). Μεταγενέστερες μελέτες έδειξαν τη συγκέντρωση των αποθεμάτων να βρίσκεται κυρίως στο βόρειο τμήμα της Σιβηρικής πλατφόρμας όπου χαρακτηρίζεται από ένα εύρος ζωνών ηφαιστειακών πετρωμάτων τα οποία στις περισσότερες των περιπτώσεων είναι καλυμμένα με ιζηματογενή πετρώματα καθιστώντας δύσκολο τον προσδιορισμό της μεταλλοφορίας. Εξαίρεση αποτελούν τα ηφαιστειακά πετρώματα που είναι εκτεθειμένα στην επιφάνεια και μπορούν να μας δώσουν πληροφορίες που συνδέουν την εμφάνιση των διεισδυτικών πετρωμάτων της περιοχής και του συχνού μαγματισμού των πηγών με τα πλουτωνικά πετρώματα (Urvantcev, 1974). Συνεπώς με τα ως τώρα δεδομένα συνεπάγεται η ύπαρξη δύο συστημάτων που έλαβαν χώρα στη βόρεια Σιβηρική παγίδα και την έναρξη σχηματισμού των αποθεμάτων σε PGE-Cu-Ni, πρώτον η ύπαρξη ενός προγενέστερου συστήματος ρηγμάτων και δεύτερον το μετέπειτα στάδιο του μαγματισμού της πλατφόρμας (Medvedev et al. 2004). Γενικά τα ηφαιστειακά πετρώματα εντοπίζονται κάτω από το έδαφος μέσα σε διάφορους σχηματισμούς ανά περιοχές (Πίνακας 4).

Συστήματα	Norilsk	Taimyr		
T1	Μάγματα	Μάγματα		
	Samoedsky	Fadiykudinsky		
	Kumgisny	Ayatarisnky		
	Kharaelakhsky			
	Mokulaevsky			
	Morongovsky	Μάγματα		
	Nadezhdinsky	Betlingsky		
	Tuklonsky	Zverisnky		
	Τόφφοι			
	Khakanchansky	Μάγματα		
	Gudchikhinsky	Labaksky		
	Syverminsky	Verkhnetamsky		
P3	Μάγματα	Μάγματα		
	Ivakinsky	Syradasaysky		

Πίνακας 4. Ηφαιστειακή σχηματισμοί μέσα στην περιοχή της Σιβηρικής παγίδας.

Σημαντικές διαφορές που εντοπίζονται μεταξύ των τμημάτων είναι η περιεκτικότητα τους σε MgO με ποσοστά που κυμαίνονται από 5.8-8.67% επομένως περισσότερο SiO<sub>2</sub> και χαμηλότερο TiO<sub>2</sub> (>32% και <1%). Διαφορές που εντοπίζονται στην high-Ti και στην low-Ti φάση της περιοχής του Norilsk όπως αναφέρθηκε πιο πάνω, εντοπίζονται σε ωκεάνια νησιά διότι η high-Ti φάση των ηφαιστειακών πετρωμάτων υπάγεται στην ενδοωκεάνια υποβύθιση της ωκεάνιας πλάκας κάτω από μία ηπειρωτική και τον σχηματισμό ηφαιστειακών νησιών (OTB), ενώ η low-Ti φάση προέρχεται από μάγμα προερχόμενο από τον μανδύα μέσα στο φλοιό όπου εκχύνεται πάνω στην ηπειρωτική λιθόσφαιρα (WPB). Επίσης έχει υποθεί ότι οι δύο ομάδες αυτές πετρωμάτων να προέρχονται ίσως από ένα αρχικό σύστημα διάρρηξης και μία μεταγενέστερη μαγματική δραστηριότητα της Σιβηρικής παγίδας. Συνεπώς βασισμένη στον εμπλουτισμό των μεταβατικών σειρών από ενδιάμεσα υλικά έχουν ταυτοποιηθεί οι παρακάτω σχηματισμοί των Khakanchraky, Tuklonsky, Nadezhdinsky και Lower Morongovsky.

Γενικά ο ιστός των πετρωμάτων παρουσιάζει σταδιακή αλλαγή από αφυρικό σε πορφυριτικό και glamoreporgyric (ιστός που περιέχει στη σύνθεση του φαινοκρυστάλλους αναμειγμένο με λεπτόκοκκο matrix), όπου στη συνέχεια έχουμε αντικατάσταση αυτών των φαινοκρυστάλλων που κυμαίνονται περίπου από 5-20% και αντικαθίστανται σε ένα μεγάλο ποσοστό που φτάνει το 90% από πλαγιόκλαστα. Τα πιο χαρακτηριστικά ορυκτά που απαρτίζουν τα πετρώματα αυτή της περιοχής είναι κυρίως πλαγιόκλαστα, κλινοπυρόξενους και ενίοτε ολιβίνη. Οι τρεις δομές όμως που παρουσιάζουν τη μεγαλύτερη ποικιλομορφία είναι αυτές της δομής του Ivakinsky που αποτελούνται από τραχυβασάλτες και ανδεσιτικούς βασάλτες, η δομή στο Siverminsky που περιλαμβάνει θολεϊτικούς και υποφειτικούς βασάλτες και τέλος την δομή στο Gudchikhinsky που αποτελείται από βασάλτες όχι μόνο βασικής σύστασης αλλά και υπερβασικής (πικρίτες). Όλες αυτές οι δομές καλύπτονται από τις λάβες των δομών του Tuklonsky, Nadezdinsky, Morongovsky, Mokulaevsky, Kharaelakhsky, Kumginsky και Samoedsky έχουν παρόμοια σύσταση και αποτελούνται από θολεϊτικούς βασάλτες (Σχ. 17) (Krivolutskaya 2016).



Σχήμα 18. Τομή που δείχνει την ακολουθία των δομών στην ευρύτερη περιοχή του Norilsk.



Σχήμα 19. Γεωλογικός χάρτης που φανερώνει ακριβώς τις προαναφερθέντες δομές. (Institute if Geology and Geochemistry UB RAS)

Σχετικά με τα σουλφιδικά αποθέματα σε PGE-Cu-Ni σχετίζονται γενετικά με διεισδύσεις σωμάτων. Τα διεισδυτικά σώματα που μεταφέρουν τις κύριες ποσότητες μεταλλοφορίας είναι τρεις το Norilsk, Talnakh και Kharaelakh όπου αναγνωρίζονται τέσσερις κύριοι τύποι:

- 1. Ανεξάρτητα σουλφιδικά σώματα διεισδυτικών πετρωμάτων.
- 2. Ανεξάρτητα σουλφιδικά σώματα σε ιζηματογενή πετρώματα.
- 3. Συμπαγή σώματα που βρίσκονται μέσα στα διεισδυτικά πετρώματα.
- Τέλος μια μικρή σουλφιδική περιοχή μέσα στην υπερκείμενη ζώνη των διεισδυτικών σωμάτων (παχιά μεταλλοφόρα σουλφιδικά σώματα <54m στην περιοχή του Norilsk με λεπτές πυριτικές διεισδύσεις.

Συνεπώς αναγνωρίζονται δύο σημαντικά χαρακτηριστικά της μεταλλοφορίας. Πρώτον τα ορυκτά χαλκοπυρίτης, μαγνητοπυρίτης και πεντλαδίτης αποτελούν κύρια ορυκτά της μεταλλοφορίας παρόμοια με αυτά των αποθεμάτων Cu-Ni και συνθέτουν μια σπάνια μεταλλοφορία της ομάδας του χαλκοπυρίτη, talnakhite, moikhutite που βρίσκεται συχνά μαζί με τον πεντλαδίτη. Δεύτερο σημαντικό χαρακτηριστικό αποτελεί η πλούσια σε στοιχεία ομάδα της πλατίνας (5-12ppm βρίσκεται διάσπαρτο μέσα στα ορυκτά) (Krivolutskaya et al. 2018).



Σχήμα 20. Σχήμα που δείχνει τις μεταβολές των περιεκτικοτήτων και την χημική b σύνθεση της ορυκτολογικής εξέλιξης των πετρωμάτων σεCu, Ni, Cr2O3 σε % και PGE σε ppm της περιοχής του Νόρλισκ 1.Γαββροδολερίτες: Γ – olivine-free, Γoc – olivine-bearing, Γο – olivine, F – leucogabbro, Γκ – co

## **4. ΤΟ ΚΟΙΤΑΣΜΑ ΣΤΟ BUSHVELD**

#### 4.0 Bushveld Complex

4.1 Γεωλογικό υπόβαθρο Bushveld complex.

Το παλαιοπρωτεροζωϊκό συγκρότημα του Bushveld καλύπτει μία έκταση 65,000 km<sup>2</sup> και αποτελεί την μεγαλύτερη στρωματοειδή έκταση πυριγενών πετρωμάτων με μεγάλα βασικά πλουτωνικά σώματα που σχηματίζουν στρωματόμορφα συμπλέγματα τα οποία διεισδύον στον ηπειρωτικό φλοιό. Ένα από τα χαρακτηριστικότερα παραδείγματα παγκοσμίως αποτελεί το Bushveld Complex. Το μητρικό μάγμα όλων αυτών των εμφανίσεων φαίνεται ότι είναι θολεϊτικής φύσεως. Λόγω της διαφοροποίησης του αρχικού μάγματος παρατηρείται σημαντική διακύμανση στο περιεχόμενο SiO<sub>2</sub> των τελικών πετρωμάτων. Έτσι όπως θα φανεί και από τις έρευνες παρακάτω στη βάση έχουμε υπερβασικά πετρώματα (περιδοτίτες, πυροξενίτες), στα μεσαία επίπεδα τα βασικά πετρώματα (γάββροι, νορίτες, τροκτόλιθοι ανορθοσίτες, πυροξενίτες) και στα ανώτερα τμήματα τα οξινότερα μάγματα. Συγκεκριμένα το complex περιλαμβάνει τέσσερεις ενότητες: το ανατολικό μέρος, το δυτικό, το δυτικότερο και το βόρειο μέρος με πέντε τμήματα ΝΔ του Bethal που είναι συγκαλυμμένο από νεότερα ιζήματα (Σχ.21).



Σχήμα 21. Γεωλογικός χάρτης συγκροτήματος Bushveld (Judith. A et al. 2005)

Μέσα στο συγκρότημα του Bushveld, στο στρωματώδεις τμήμα του Rustenburg βρίσκεται ένα πακέτο πετρωμάτων το οποίο φθάνει σε πάχος τα 7,8km πάχος με το εύρος της σύνθεσης του να κυμαίνεται από δουνιτικό έως ρυολιθικό. Αυτό το πακέτο στρωμάτων είναι υποδιαιρεμένο στο Marginal σε, Lower (LZ), Critical (CZ), Main (MZ), και Upper (UZ) zones (Σχ.23) χωρίς να υπάρχει ακριβής προσδιορισμός σχετικά με τα όρια τους (e.g Kruger 1990).

Η Critical zone διαιρείται σε δύο ζώνες, μία υποκείμενη (C<sub>L</sub>Z) και μία υπερκείμενη (C<sub>U</sub>Z) η οποία παρουσιάζει σημαντικό οικονομικό χαρακτήρα διότι φιλοξενεί τα παγκοσμίου φήμης αποθέματα Cr και PGE. Η υποκείμενη ζώνη χαρακτηρίζεται από μία παχιά ακολουθία ορθοπυροξενικών πετρωμάτων ενώ στην υπερκείμενη ζώνη απατούνται πλήρης ενότητες όπου στη βάση υπάρχουν εντοπίζονται υπερβασικές ακολουθίες χρωμίτη, χαρτσβουργίτες, πυροξενίτες καθώς και άλλα πετρώματα όπως νορίτες έως ανορθοσίτες. Η διαφοροποίηση μεταξύ C<sub>L</sub>Z και C<sub>U</sub>Z προκύπτει από το γεγονός ότι στη βάση υπάρχει ένα πρώτο στρώμα ανορθοσίτη μεταξύ δύο ζωνών χρωμίτη (MG2 και MG3).

Στη συνέχεια ακολουθεί η κύρια ζώνη ή Main Zone όπου αποτελεί την παχύτερη ζώνη σε σχέση με τις υπόλοιπες η οποί αποτελείται από μία ακολουθία γαββρονοριτικών πετρωμάτων μέσα από τους οποίους απουσιάζουν ο χρωμίτης και ο ολιβίνης ενώ η παρουσία του ανορθοσίτη είναι σπάνια. Τέλος αξίζει να σημειωθεί ότι τα πακέτα στρωμάτων της Main Zone δεν φαίνονται τόσο στρωματοποιημένα όπως της Critical Zone (Mitcell 1990, Nex et al. 1998).

Η ακολουθία στο βόρειο τμήμα διαφέρει από το ανατολικό και δυτικό μέρος του Bushveld Complex ποικίλει κατά μήκος της παράταξης (Σχ.24). Η ακολουθία της Main zone όπως προκύπτει από στοιχεία δεν έχει αναπτυχθεί πλήρως με το μόνο κοινό σημείο που υπάρχει μεταξύ αυτής και της Lower zone είναι το νότιο κομμάτι του συμπλέγματος. Στο Platreef κυριαρχεί μια βασική ενότητα που εμφανίζει μια ετερογενής δομή όπως πυροξενίτες με περιδοτήτες ή γάββρους με νορίτες. Όλα αυτά τα πετρώματα επικαλύπτονται από μεταϊζήματα των υποκείμενων τμημάτων του Transvaal και ειδικότερα από τον αρχαϊκό γρανίτη της περιοχής που βρίσκεται εκεί.

Τέλος αξίζει να σημειωθεί από παλαιομαγνητικές μετρήσεις που έγιναν σε διάφορες ζώνες του συμπλέγματος, έδειξαν διαφορετικές ηλικίες μεταξύ των ζωνών που αποκλείει την τοποθέτηση και την κρυστάλλωση όλου του συμπλέγματος από μία τεράστια σε ένταση έκχυση λάβας. Τα διαφορετικά σημεία δημιουργίας μεταξύ των ζωνών αποδεικνύουν μια συνεχή σειρά μαγματικής δραστηριότητας. Επιπλέον από στοιχεία που προήλθαν μέσω ισοτόπων έρχονται να συσχετίσουν τα προηγούμενα δεδομένα της συνεχής μαγματικής δράσης, όπου συνδέουν τη δημιουργία κάθε στρώματος χρωμίτη (Σχ. 25) μέσα στην Critical zone (Kinnaird et. al 2002).







Σχήμα 23. Σχηματική γεωλογική τομή του Bushveld Complex που φαίνονται καθαρά όλα τα στρώματα. της περιοχής (Cawthorn et al. 2000).



Σχήμα 24. Χάρτης που δείχνει τμήμα από το βόρειο τμήμα του Bushveld, όπου φαίνεται το Platreef καθώς και οι λιθολογίες από το υποκείμενο τμήμα του ρήγματος (Bouchanan et al. 1984).



Σχήμα 25. Στρωματόμορφος χρωμίτης.

4.2 Κατανομή των στοιχείων PGE και της μεταλλογένεσης σουλφιδίων στο Platreef.

Το κοίτασμα PGE που βρίσκονται στο Platreef του Overysel ελέγχεται από την παρουσία μια μεταλλικής βάσης σουλφιδίων- base metal sulphides (BMS). Στην περιοχή του Overysel το υπόβαθρο αποτελείται από ένα αρχαϊκό γνεύσιο (Σχ. 26) (Wagner 1929), σε αντίθεση με άλλες περιοχές τοποθεσίες που βρίσκονται κατά μήκος της παράταξης του Platreef όπου το έδαφος αποτελείται από ιζήματα της ενότητας Transvaal Supergroup όπου εντοπίζεται και η επαφή μεταξύ των PGE-BMS (Σχ. 24). Στην περιοχή αυτή υπάρχουν επίσης εμφανίσεις υδροθερμικών ρευστών που συνεπάγεται την δημιουργία ύπαρξης μεταλλεύματος στο Overysel, όπου τοποθετείται ως πρωταρχικός τύπος μεταλλογένεσης. Επιπλέον πετρώματα όπως οι χονδρίτες που αποτελούν χαρακτηριστικά πετρώματα προέλευσης PGE, φανερώνουν μια σταδιακή κρυστάλλωσης των PGE σε βάθος μέσα στο Platreef, με τα στοιχεία Ir, Rn, Rh να μειώνονται αρκετά με την αύξηση του βάθους σε σχέση με αυτά των Pt,Pd,Au και έτσι να δημιουργούνται αυτές οι μεγάλες συγκεντρώσεις. Παρ' όλο αυτά το συγκεκριμένο χαρακτηριστικό δεν παρατηρείται στις περιοχές του Zwartfantein και Sandsloot στο νότιο τμήμα του Overysel όπου τα υποκείμενα πετρώματα είναι ανθρακικά (Σχ. 26) (Holwell et al. 2006). Συνεπώς αυτό αποτελεί σημάδι ύπαρξης συγκέντρωσης στοιχείων μέσα στο τμήμα της συγκεκριμένης περιοχής, λόγω της επαφής όξινων μαγμάτων που προκλήθηκαν από κατά τόπους τήξεις του γνευσίου. Από μελέτες που έγιναν φανέρωσαν σουλφιδικές διεισδύσεις μέσω ενός διαπερατού δικτύου που δημιουργήθηκε μέσα στο γνέυσιο από τις μαγματικές διεισδύσεις (Cawthorn et al. 1985).

Η μεταφορά των PGE μέσω στον γνεύσιο έγινε μέσω της κίνησης τους προς τα κάτω από υπολειμματικά σουλφιδικά υγρά, με αποτέλεσμα να κλασματωθούν το IPGE και Rh στα ανώτερα τμήματα του γνευσίου. Τα εναπομείναντα σουλφιδικά υγρά εξελίχθηκαν σταδιακά στα στοιχεία Pt, Pd, Au όπου σχημάτισαν πλούσιες σουλφιδικές ζώνες μεγάλης οικονομικής σημασίας (Hutchinson et al. 2005).

Η μελέτη αυτή δείχνει ότι η ύπαρξη ενός βραχώδους υποβάθρου (κυρίως διαπερατού) μπορεί να ελέγξει τον μηχανισμό κατανομής των PGE από το Platreef στα υποκείμενα τμήματα του ρήγματος. Το βραχώδες έδαφος που αποτελείται κυρίως από ιζήματα σε συνδυασμό με την δραστηριότητα των υγρών σχετίζονται με μεταμορφισμό όπου αργότερα οδηγεί στην σερπεντινίωση. Αντίθετα όπου το γνευσιακό πέτρωμα δεν έχει έρθει

41

σε επαφή με διάφορους τύπους υγρών όπως του Overysel, δημιουργείται ένα όριο στην δραστηριότητα των υγρών ενώ η συμπεριφορά των PGE ελέγχεται από τα σουλφιδικά υγρά που παράγουν μια σχέση μεταξύ PGE-BMS (Kinnaird et al.2005). Τέλος η ύπαρξη ξενολίθων χρωμίτη δείχνει μία πιθανή διατάραξη που οφείλεται σε μια μεταγενέστερη μαγματική δραστηριότητα στο Platreef που μεταφέρθηκαν εκεί από μια προγενέστερη πηγή που βρισκόταν σ' ένα βαθύτερο θάλαμο.



Σχήμα 26. Γεωλογικός χάρτης της περιοχής που δείχνει τις περιοχές που αναφέρθηκαν μέσα στο κείμενο. Στο επάνω αριστερά τμήμα απεικονίζεται το μέγεθος των γεωλογικών ενοτήτων που καλύπτουν την περιοχή.

#### 4.3 Μεταλλοφορία PGE-BMS.

Στο Overysel η σχέση μεταξύ BMS-PGE είναι περιορισμένη τόσο στο Platreef όσο και στο footwall. Ο πίνακας 5 δείχνει τις περιεκτικότητες σε S, μαζί με δείγματα με περιεκτικότητες σε PGE καθώς και δείγματα από Ni, Cu.

Πίνακας 5. Περιεκτικότητες σε PGE μέσα από πυρινοληπτηκές γεωτρήσεις στο Overysel καθώς και δείγματα χρωμίτη με στοιχεία Ni/Cu, Ni/S, Cu/S (Springer Nature, 2002)

Δείγματα	Πετρώματα	PGE grade	Sloping profile	S (ppm)	Ni/Cu	Ni/S	Cu/S
OY335-166	HW gabbronorite	n.d.	n.d.	n.d.	5.71	n.d.	n.d.
OY335-169	HW gabbronorite	n.d.	n.d.	n.d.	6.23	n.d.	n.d.
OY335-175	HW gabbronorite	n.d.	n.d.	n.d.	8.05	n.d.	n.d.
OY335-176	Feldspathic pyroxenite	Intermediate	21	1021.8	3.34	0.42	0.12
OY335-182	Feldspathic pyroxenite	Intermediate	24	980.9	4.29	0.36	0.08
OY335-193	Altered feldspathic pyroxenite	Low	18	242.2	9.79	0.41	0.04
OY335-201	Feldspathic pyroxenite	Very low	10	71.0	14.68	0.63	0.04
OY335-213	Serpentinised xenolith	Low	79	42.9	7.53	0.46	0.06
OY335-218	Serpentinised xenolith	Low	12	53.8	9.81	0.86	0.08
OY335-230	Altered feldspathic pyroxenite	High	57	500.2	2.55	0.30	0.12
OY335-241	Feldspathic pyroxenite	Low	51	207.3	5.96	0.50	0.08
OY335-253	Intrusive norite	Low	31	356.4	4.47	0.30	0.06
OY335-262	Feldspathic pyroxenite	Low	32	60.9	2.70	0.76	0.28
OY335-269	Calc-silicate	Very low	84	17.8	1.73	0.43	0.24
OY335-275	Feldspathic pyroxenite	Low	15	623.0	2.41	0.22	0.09
OY335-285	Serpentinite	Very low	48	5256.0	6.68	0.01	0.00
OY335-292	Quartzo-feldspathic pyroxenite	Low	37	114.0	3.73	0.61	0.16
OY335-303	Quartzo-feldspathic pyroxenite	Low	11	51.4	4.63	1.08	0.23
OY335-310	Gneiss	Low	291	106.8	1.18	0.35	0.29
OY335-316	Gneiss	High	2838	966.0	4.41	0.33	0.07
OY335-323	Gneiss	Very low	78	48.4	2.29	0.43	0.18
OY335-245	Granite	Very low	12	5.5	10.47	0.19	0.01
OY387-233	HW intrusive gabbronorite	n.d.	n.d.	n.d.	2.86	n.d.	n.d.
OY387-236	HW gabbronorite	n.d.	n.d.	n.d.	3.63	n.d.	n.d.
OY387-239	Feldspathic pyroxenite	Very low	8	58.9	11.42	0.90	0.07

Στο Σχ. 27 παρουσιάζονται τα όρια Pt,Pd,Rh και S σε αντιστοιχήσει με το βάθος. Γενικά υπάρχει ένας καλός συσχετισμός ανάμεσα σε PGE και S με ελάχιστες εξαιρέσεις. Όπως φαίνεται παρακάτω στο σχήμα (Σχ.27) ο πρώτος πυρήνας OY 335-230 παρουσιάζει ένα αλλοιωμένο πυροξενίτη με υψηλά ποσοστά PGE και ελάχιστο S. Αυτό μπορεί να οφείλεται σε ύπαρξη υδροθερμικής δράσης που αυξάνει την περιεκτικότητα σε PGE και/ ή απομακρύνει τα σουλφίδια. Στο δείγμα OY 335-285 υπάρχει σερπεντινίτης με αφθονία μαγνητοπυρίτη και μικρή περιεκτικότητα σε PGE, όπου παρόμοιες παραυσιάζαν μια αποσύνδεση μεταξύ τους (Holwell et al. 2006). Στη συνέχεια το δείγμα OY 335-303 εμφανίζει χαμηλά ποσοστά PGE και S, με τον συγκεκριμένο τύπο χαλαζοατριούχο πυροξενίτη να λειτουργεί ως στοιχείο ύπαρξης PGE που ελέγχεται από τον χρωμίτη, ενώ στο δείγμα OY 387 τα στοιχεία PGE ελέγχονται πλήρως από τα σουλφίδια.



Σχήμα 27. Περιεκτικότητα σε PGE σε σχέση με το βάθος των γεωτρήσεων (Springer Nature, 2002).



Σχήμα 28. Συσχέτιση μεταξύ των στοιχείων Cu,Ni,S στους δύο πυρήνες. Παρουσιάζεται άμεση συσχέτιση μεταξύ των στοιχειών με S>Ni>Cu με εξαίρεση ορισμένα δείγματα με χαμηλό ποσοστό σουλφιδίων (Springer Nature, 2002).

4.4 Merensky Reef και το κοίτασμα Cr.

Το Merensky Reef βρίσκεται στο Bushveld Complex και αποτελεί ένα τεράστιο στρώμα πυριγενών πετρωμάτων στη Ν. Αφρική που μαζί με την υποκείμενη ζώνη του Upper Group 2 Reef (UG2) περιλαμβάνουν τα παγκοσμίως γνωστά κοιτάσματα PGE. Το reef έχει πάχος 46m και οριοθετείται από λεπτές φλέβες χρωμίτη. Η σύσταση των πετρωμάτων της περιοχής αποτελείται κυρίως λευκονορίτες, ανορθοσίτες, χρωμίτη και γάββρους (Barnes et al. 2002).

Σχετικά με τη σύνθεση της περιοχής στο Merensky Reef παρατηρείται ένα κατώτερο στρώμα από ανορθοσίτη ή νορίτη με ένα λεπτό στρώμα χρωμίτη να βρίσκεται πάνω από αυτά ενώ επιπλέον συνήθως υπάρχει και ένα στρώμα που επικαλύπτει τα προηγούμενα από όξινο πυροξενίτη (Σχ.29). Επίσης τα στρώματα χρωμίτη συνήθως δημιουργούνται με διεισδύσεις βασικού μάγματος όπου σχηματίζουν στρώσεις μέσα στα πετρώματα (Cawthorn et al. 2006). Η κύρια θεωρεία σχηματισμού του χρωμίτη έχει να κάνει με την διείσδυση του μάγματος και την χημική ανάμειξη του πρωτογενούς μάγματος με άλλα διαφορετικής σύστασης μάγματα, το οποίο έχει σαν αποτέλεσμα τον υπερκορεσμό του χρωμίτη στο μείγμα και τον σχηματισμό ενός μεταλλικού στρώματος στο μαγματικό θάλαμο, όντας πιο βαριά τα στοιχεία του χρωμίτη καθιζάνουν στο μαγματικό θάλαμο (Mathez 1995).

Το Merensky Reef αποτελείται γενικά από πέντε κύρια στρώματα (Hutchinson et al. 2005). Το πρώτο στρώμα αποτελείται από ένα ποικιλόχρωμο ανορθοσίτη ο οποίος περιλαμβάνει χαλαζία, τιτανίτη, απατίτη και πυρόξενους οι οποίοι σχηματίζουν μαύρες ταινίες (Hutchinson et al. 2015). Στο δεύτερο υπάρχει μια ακανόνιστη μορφή κόκκων που σχηματίζουν το στρώμα του χρωμίτη. Το τρίτο στρώμα μοιάζει αρκετά με το δεύτερο με την μόνη διαφορά να έγκειται στο μέγεθος το οποίο είναι μικρότερο στο τρίτο στρώμα. Στο τέταρτο στρώμα βρίσκεται πηγματίτης που αποτελείται από χονδρόκοκκους κόκκους και έχουμε την ύπαρξη σουλφιδίων ενώ η παρουσία του χρωμίτη είναι πιο αραιή. Τέλος το πέμπτο στρώμα της ακολουθίας αποτελείται από έναν γάββρο ο οποίος είναι πλούσιος σε χαλκοπυρίτη, χαλαζία και πλαγιόκλαστα (Σχ.30) (Foster et al. 2015).



Σχήμα 29. Μακροσκοπική εικόνα πετρώματος που εμφανίζεται η συνύπαρξη PGE, Cr και ανορθοσίτη.



Σχήμα 30. Τομή Merensky reef που εμφανίζονται αναλυτικά οι λιθολογίες της περιοχής (Kinnaird 2009).

## 5. Βιβλιογραφία

- David A. Holwell and Iain McDonald (2006) Petrology, geochemistry and the mechanisms determining the distribution of platinum-group element and base metal sulphide mineralisation in the Platreef at Overysel, northern Bushveld Complex, South Africa
- David Reid, Ian Basson (2002) Iron-rich ultramafic pegmatite replacement bodies within the Upper Critical Zone, Rustenburg Layered Suite, Northam Platinum Mine, South Africa. Mineralogical Magazine 66(6):895-914
- Joseph LWooden<sup>1</sup>Gerald KCzamanske<sup>1</sup>Valeri AFedorenko<sup>2</sup>Nicholas TArndt<sup>3</sup>CatherineChauvel<sup>3</sup>, Robin MBouse<sup>1</sup>Bi-Shia WKing<sup>1</sup>Roy JKnight<sup>4</sup>David FSiems<sup>4</sup> (1993) Isotopic and trace-element constraints on mantle and crustal contributions to Siberian continental flood basalts, Noril'sk area, Siberia. Volume 57, Issue 15, August 1993, Pages 3677-3704
- Judith A. Kinnaird, D. Hutchinson, L. Schurmann, P. A. M. Nex and Renee de Lange (2005) Petrology and mineralisation of the southern Platreef: northern limb of the Bushveld Complex, South Africa. Pages: 576–597
- Nadezhda A. Krivolutskaya, Anton V. Latyshev<sup>,</sup> Alexander S. Dolgal, Bronislav I. Gongalsky, Elena M. Makarieva, Alexander A. Makariev, Natalia M. Svirskaya Yana V. Bychkova, Anton I. Yakushev and Alexey M. Asavin (2019) Unique PGE–Cu–Ni Noril'sk Deposits, Siberian Trap Province: Magmatic and Tectonic Factors in Their Origin
- Nadezhda Krivolutskaya, Bronislav Gongalsky, Alexander Dolgal, Natalia Svirskaya and Tamara Vekshina (2016) Siberian Traps in the Norilsk Area: A Corrected Scheme of Magmatism Evolution. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, Volume 44, Issue 4
- Presentation on theme: "Introduction Mineral Deposits EPSC 452.". https://slideplayer.com/slide/17764265/
- Sarah C. Penniston-Dorland, Boswell A. Wing, Paul A.M. Nex, Judith A. Kinnaird, James Farquhar, Michael Brown, Elizabeth R. Sharman (2008) Multiple sulfur isotopes reveal a magmatic origin for the Platreef platinum group element deposit, Bushveld Complex, South Africa. Geology (2008) 36 (12): 979–982
- V.I.Starostin, O.G.Sorokhtin (2011) A new interpretation for the origin of the Norilsk type PGE–Cu–Ni sulfide deposits. Geoscience Frontiers Volume 2, Issue 4, October 2011, Pages 583-591