



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



ΓΕΩΡΓΙΟΣ ΠΑΝΑΓΙΩΤΙΔΗΣ

ΥΓΡΟΜΑΓΜΑΤΙΚΑ ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΑ ΧΡΩΜΙΤΗ ΣΤΡΩΜΑΤΟΜΟΡΦΟΥ
ΤΥΠΟΥ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ



ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ
2021





ΓΕΩΡΓΙΟΣ ΠΑΝΑΓΙΩΤΙΔΗΣ

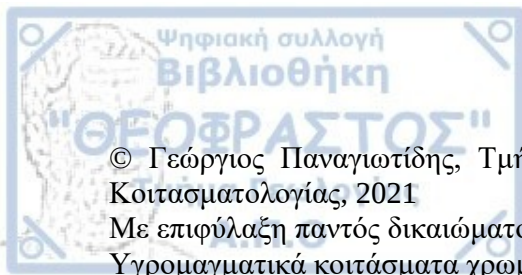
ΥΓΡΟΜΑΓΜΑΤΙΚΑ ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΑ ΧΡΩΜΙΤΗ ΣΤΡΩΜΑΤΟΜΟΡΦΟΥ ΤΥΠΟΥ

Υποβλήθηκε στο Τμήμα Γεωλογίας
Τομέας Ορυκτολογίας - Πετρολογίας - Κοιτασματολογίας

Επιβλέπων Καθηγητής

Βασίλειος Μέλφος, Αναπληρωτής Καθηγητής

© Γεώργιος Παναγιωτίδης, 2021
Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All right reserved.



© Γεώργιος Παναγιωτίδης, Τμήμα Γεωλογίας Α.Π.Θ., Τομέας Ορυκτολογίας, Πετρολογίας, Κοιτασματολογίας, 2021

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος.

Υγρομαγματικά κοιτάσματα χρωμίτη στρωματόμορφου τύπου - *Διπλωματική Εργασία*

© Georgios Panagiotidis, School of Geology, Department of Mineralogy, Petrology, Economic Geology, 2021

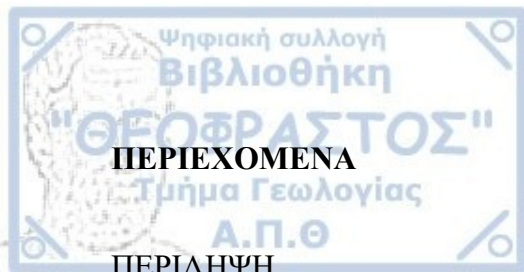
All rights reserved.

Stratiform chromite 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.

Εικόνα Εξωφύλλου: Στρώματα χρωμίτη στο Bushveld Complex (Jackie Gauntlett 2020, Geology for Investors).



ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	1
ABSTRACT.....	2
ΠΡΟΛΟΓΟΣ	3
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	4
2. ΓΕΩΛΟΓΙΚΑ ΚΑΙ ΠΕΤΡΟΓΡΑΦΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΤΩΝ ΣΤΡΩΜΑΤΟΜΟΡΦΩΝ ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΩΝ	7
2.1. Γεωλογικά στοιχεία.....	7
2.2. Πετρογραφικά στοιχεία.....	8
3. ΟΡΥΚΤΟΛΟΓΙΑ ΚΑΙ ΓΕΩΧΗΜΕΙΑ ΤΩΝ ΣΤΡΩΜΑΤΟΜΟΡΦΩΝ ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΩΝ	10
3.1. Ορυκτολογία	10
3.2. Γεωχημεία	11
4. ΤΑ ΣΗΜΑΝΤΙΚΟΤΕΡΑ ΥΓΡΟΜΑΓΜΑΤΙΚΑ ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΑ ΧΡΩΜΙΤΗ ΣΤΡΩΜΑΤΟΜΟΡΦΟΥ ΤΥΠΟΥ	13
4.1. Bushveld Complex.....	13
4.2. Stillwater Complex	15
4.3. Great Dyke	16
5. ΣΥΖΗΤΗΣΗ ΚΑΙ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	19
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	20



ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Υδρομαγματικά κοιτάσματα χρωμίτη στρωματομόρφου τύπου

Γεώργιος Παναγιωτίδης

Η παρούσα διπλωματική πτυχιακή εργασία αφορά την μελέτη των υδρομαγματικών κοιτασμάτων χρωμίτη στρωματομόρφου τύπου που υπάρχουν σε όλο τον κόσμο. Πρόκειται για κοιτάσματα, τα οποία συναντώνται μόνο σε ενδοπλακικές κρατονικές περιοχές και οφείλουν την ύπαρξη τους σε διεισδύσεις βασικών και υπερβασικών μαγμάτων. Τα κύρια χαρακτηριστικά των κοιτασμάτων αυτών είναι η στρωματοειδής ανάπτυξη σε αλλεπάλληλα στρώματα και οι εξαιρετικά υψηλή περιεκτικότητα σε χρωμίτη, με σημαντικές ποσότητες σε ορυκτά της ομάδας της πλατίνας. Τα σημαντικότερα κοιτάσματα στρωματομόρφου τύπου είναι το Bushveld Complex, το Stillwater Complex και το Great Dyke. Τα πετρώματα στα οποία συνήθως φιλοξενείται ο χρωμίτης, είναι ο χαρτσβουργίτης και ο αστριούχος πυροξενίτης. Ο χρωμίτης, σε τέτοιου είδους κοιτάσματα, μπορεί να έχει 3 μορφές: α) Διάσπαρτος, β) Ταινιωτός και γ) Συμπαγής. Σημαντικό ρόλο, στον καθορισμό της ποιότητας ενός στρωματομόρφου κοιτάσματος, παίζει η περιεκτικότητα σε Fe, δηλαδή ο λόγος Cr/Fe.



ABSTRACT

Stratiform chromite deposits

Georgios Panagiotidis

This diploma thesis focuses on the study of the stratiform chromite deposits globally. These deposits that can only be found in intraplate craton areas and owe their existence in intrusions of mafic - ultramafic magma. The main features of these deposits are the stratiform growth of successive layers and that they are incredibly rich in chromite, with significant quantities of Platinum Group Elements. The most important stratiform deposits in the world are the Bushveld Complex, the Stillwater Complex and the Great Dyke. The chromite is primarily hosted by harzburgite and feldspathic pyroxenite. There are 3 types of chromite that can be found in stratiform deposits: a) Disseminated, b) Schlieren and c) Massive. The ratio of Cr/Fe is of great importance for the quality of the deposit.



Στη συγκεκριμένη πτυχιακή εργασία παρουσιάζονται και αναλύονται όλα τα χαρακτηριστικά των υδρομαγματικών κοιτασμάτων χρωμίτη στρωματομόρφου τύπου.

Η ολοκλήρωση της εργασίας αυτής, δεν θα ήταν εφικτή, χωρίς τις πολύτιμες υποδείξεις του Αναπληρωτή Καθηγητή του Τομέα Ορυκτολογίας - Πετρολογίας - Κοιτασματολογίας του Τμήματος Γεωλογίας του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης, κ. Βασίλειο Μέλφο. Του εκφράζω ένα πολύ μεγάλο ευχαριστώ για όλη την βοήθεια που μου προσέφερε.

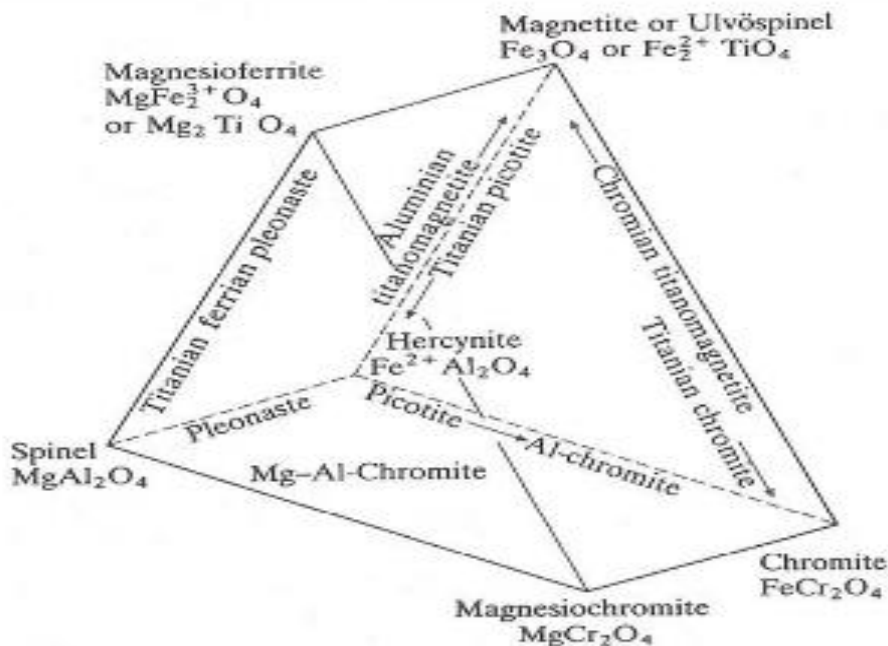
Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά την οικογένεια μου, για την αμέριστη συμπαράσταση και συνεχή υποστήριξη που είχα όλα αυτά τα χρόνια της ζωής μου, αλλά και των σπουδών μου.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το χρώμιο (Cr) είναι ένα σκληρό γυαλιστερό μέταλλο, το οποίο έχει πολύ υψηλό σημείο τήξης, είναι εύπλαστο, άγευστο και άοσμο. Το όνομα του στοιχείου προέρχεται από την ελληνική λέξη "χρώμα" (Chroma), καθώς πολλές από τις ενώσεις του είναι έντονα χρωματισμένες. Σημαντικό είναι, ότι το καθαρό χρώμιο εμφανίζεται πολύ σπάνια στη φύση. Ωστόσο, βρίσκεται σε μια μεγάλη ποικιλία οξειδίων και πυριτικών ορυκτών στο φλοιό της Γης. Το πιο σημαντικό από τα ορυκτά που περιέχουν χρώμιο είναι ο χρωμίτης (Σχ. 1.1), ο οποίος ανήκει στην οικογένεια των σπινελλίων με γενικό χημικό τύπο XY_2O_4 (Σχ. 1.2) (Schulte et al. 2012).



Σχ. 1.1. Χρωμίτης από την Νότια Αφρική (Hobart 2005).



Σχ. 1.2. Τα ακραία μέλη των σπινελλίων σε πρισματική απεικόνιση (Deer et al. 1992).

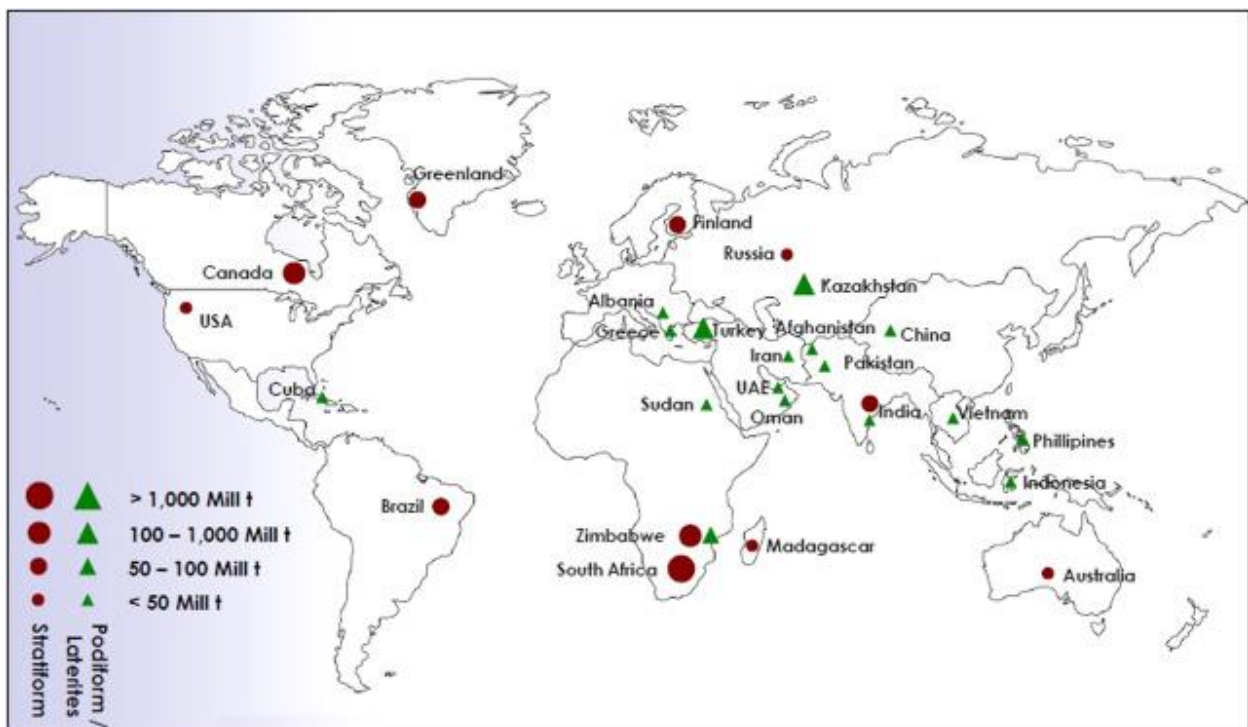
Η ανακάλυψη και η χρήση των ιδιοτήτων του χρωμίου, σε σχέση με το πόσο διαδεδομένο είναι στο φλοιό της Γης, θεωρούνται ως ένα πολύ πρόσφατο γεγονός. Η πρώτη αναγνώριση αυτού του μετάλλου σε ορυκτό συνέβη το 1797 από τον Nicolas Vauquelin, σε ένα ορυκτό που ονομάζεται κροκοΐτης (Schulte et al. 2012). Οι σημαντικότερες χώρες σε παραγωγή χρωμίου το 2019 ήταν οι εξής: Νότια Αφρική (39%), Τουρκία (23%), Καζακστάν (15%), Ινδία (9%), Φινλανδία (5%) (U.S. Geological Survey, Mineral Commodity Summaries, January 2020).

Κατά τις αρχές του 19^{ου} αιώνα μ.Χ., η μεγαλύτερη παραγωγή χρωμίου γινόταν στα Ουράλια όρη της Ρωσίας και χρησιμοποιούταν κυρίως στην κατασκευή χημικών προϊόντων (μπογιές) (Jacobs and Testa, 2005). Οι κυριότερες χρήσεις στη σημερινή εποχή είναι στην κατασκευή ανοξείδωτου χάλυβα, στην παραγωγή μη σιδηρούχων κραμάτων και πυρίμαχων υλικών, στην επιχρωμίωση και στις χρωστικές και χημικές ουσίες (Schulte et al. 2012). Πολύ σημαντικό είναι το γεγονός, ότι το χρώμιο είναι ένα από τα 4 στρατηγικά μέταλλα (Cr, Ni, Mn, Fe) (Μέλφος και Φιλιππίδης, 2017), το οποίο σημαίνει πως ακόμα δεν έχει βρεθεί κάποιο υποκατάστατό του.

Τα κοιτάσματα χρωμίτη συνδέονται γενετικά με πλουτωνίτες βασικών και υπερβασικών πετρωμάτων. Τα μητρικά πετρώματα του χρωμίτη είναι οι δουνίτες, αλλά κοιτάσματα του ορυκτού αυτού, μπορούν να φιλοξενηθούν και σε πετρώματα όπως είναι οι ολιβινίτες, περιδοτίτες, χαρτσβουργίτες και πυροξενίτες. Πολύ πιθανόν είναι τα παραπάνω

πετρώματα να έχουν σερπεντινωθεί, πράγμα που σημαίνει πως αυτά τα κοιτάσματα μπορούν να βρεθούν και σε σερπεντινίτες (Φιλιππίδης κ.ά. 1990).

Τα κοιτάσματα αυτά, ανάλογα με τη γεωμετρία, το μέγεθος και τα χαρακτηριστικά του πετρώματος μέσα στο οποίο φιλοξενούνται, χωρίζονται σε στρωματομόρφα και σε λοβόμορφα (Σχ. 1.3) (Thayer 1969, Leblanc and Temagoult 1989). Τα πρώτα συνδέονται με μάγματα που δημιουργούνται σε ενδοπλακικές κρατονικές περιοχές (μανδυακή προέλευση), έχουν τεράστιες διαστάσεις και ονομάζονται Hot Spots. Αντίθετα, τα λοβόμορφα είναι πολύ μικρά σε μέγεθος και σχετίζονται με οφιολιθικά πετρώματα (Zhou et al. 2014).

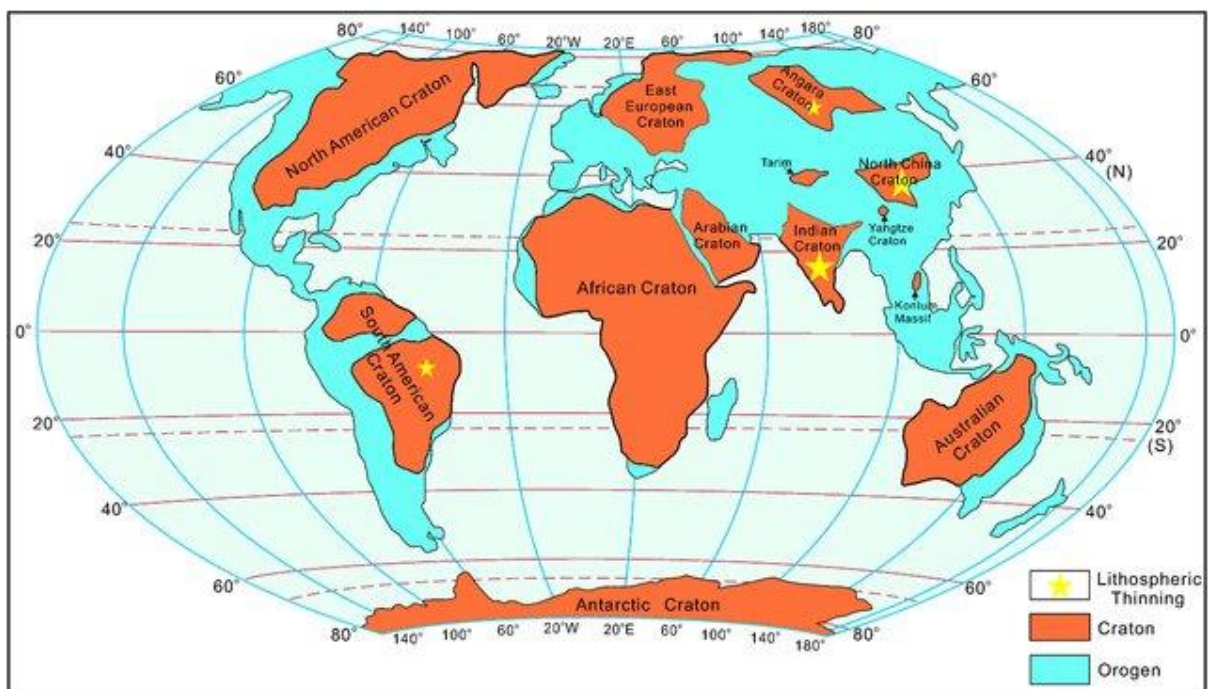


Σχ. 1.3. Παγκόσμιος χάρτης που δείχνει το μέγεθος και την κατανομή των στρωματομόρφων και λοβόμορφων κοιτασμάτων στον κόσμο (Papp 2007).

2. ΓΕΩΛΟΓΙΚΑ ΚΑΙ ΠΕΤΡΟΓΡΑΦΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΤΩΝ ΣΤΡΩΜΑΤΟΜΟΡΦΩΝ ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΩΝ

2.1. Γεωλογικά στοιχεία

Τα στρωματομόρφα κοιτάσματα σχηματίζονται σε κρατονικές περιοχές (Σχ. 2.1) από διεισδύσεις υπερβασικών και βασικών μαγμάτων. Αυτές οι περιοχές έχουν δημιουργηθεί κατά το Προκάμβριο, αποτελούν σταθεροποιημένα τμήματα της Γης και καταλαμβάνουν ένα πολύ μεγάλο μέρος του ηπειρωτικού φλοιού. Τα κοιτάσματα αυτά χαρακτηρίζονται από κλασματική κρυστάλλωση κάτω από ήρεμες συνθήκες (σωρευτική υφή). Σύμφωνα με τους Φιλιππίδης κ.ά. (1990) τα προαναφερθέντα κοιτάσματα έχουν στρωματοειδή ανάπτυξη σε αλληπάλλληλα στρώματα, που συνήθως σχηματίζονται στα κατώτερα τμήματα των πυριγενών συμπλεγμάτων. Αυτά τα στρώματα έχουν μεγάλη εγκάρσια επέκταση, αποτελούν μια συνεπή ακολουθία μέσα στο σύμπλεγμα και εμφανίζουν ομοιομορφία. Ακόμα, σε αρκετές περιπτώσεις τα στρωματομόρφα κοιτάσματα έχουν φλεβικό σχήμα (Σχ. 2.2).



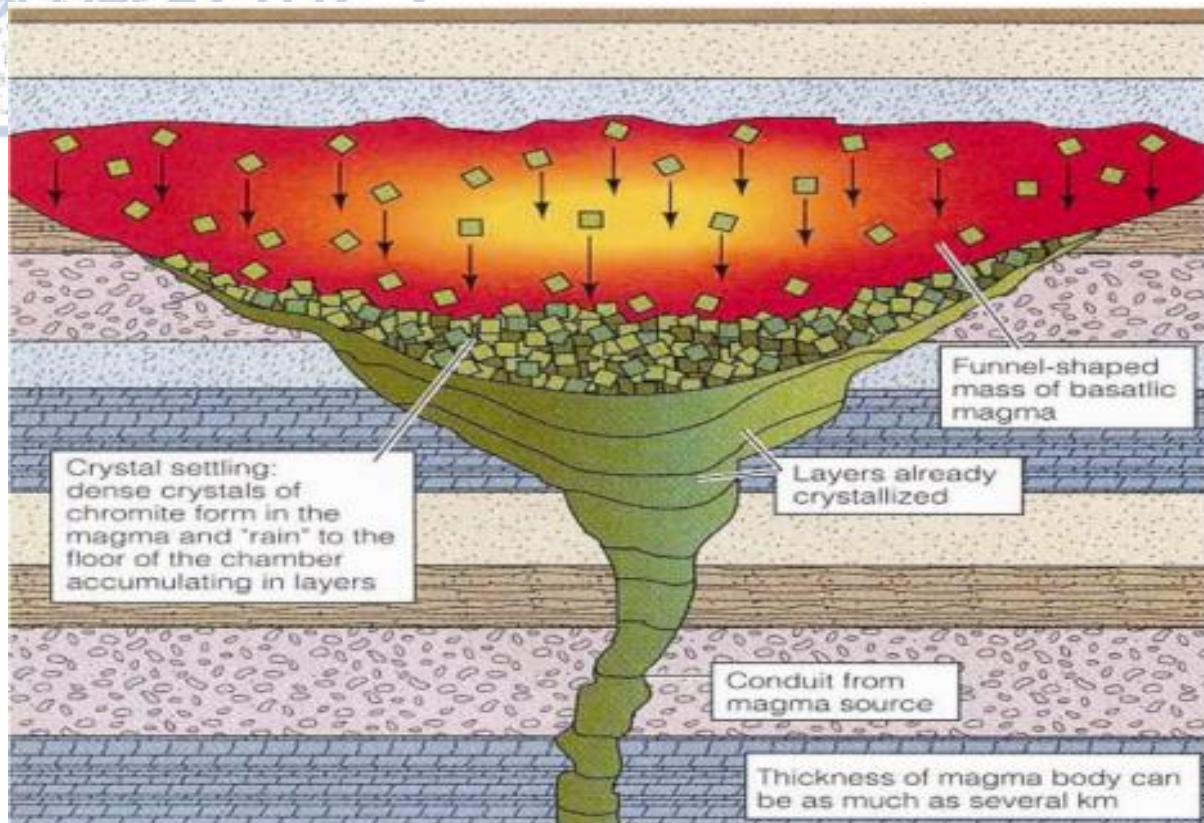
Σχ. 2.1. Παγκόσμιος χάρτης που δείχνει την κατανομή κρατονικών περιοχών στον κόσμο (Sengor 1999, Wu et al. 2014).



Σχ. 2.2. Φλέβα χρωμίτη (το σκούρο στρώμα) στο Bushveld Complex στην Νότια Αφρική (Klaus J. Schulz, U.S. Geological Survey).

2.2. Πετρογραφικά στοιχεία

Λιωμένο υλικό, από τον άνω μανδύα, ανεβαίνει προς τα πάνω και περίπου σε βάθος 10 km από την επιφάνεια της Γης, σχηματίζει ένα μαγματικό θάλαμο, μέσα στον οποίο το υλικό αρχίζει να ψύχεται. Αυτή η ψύξη, προκαλεί την καθίζηση του χρωμίτη και των ορυκτών που είναι πλούσια σε Mg. Έτσι, οι κρύσταλλοι που σχηματίζονται καθιζάνουν στο κάτω μέρος του θαλάμου, δημιουργώντας μια στρώση (Σχ. 2.3). Αυτή η διαδικασία επαναλαμβάνεται πολλές φορές, πράγμα που έχει ως αποτέλεσμα, την δημιουργία πολλών στρώσεων (Franklin 2010).



Σχ. 2.3. Ο μαγματικός θάλαμος, στον οποίο κρυσταλλώνεται ο χρωμίτης, καθιζάνει στο κάτω μέρος και σχηματίζει στρώσεις (Wiley and sons 1999).

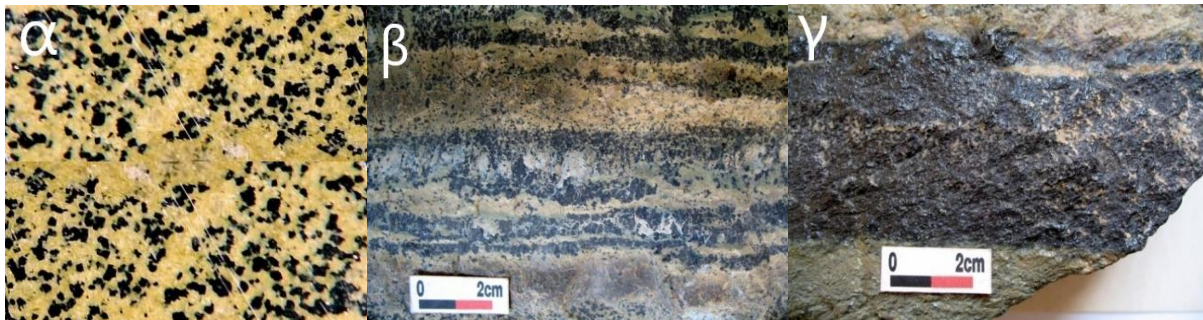
Από πετρολογικής άποψης, σύμφωνα με τους Schulte et al. (2012), τα πετρώματα-ξενιστές των στρωματομόρφων κοιτασμάτων χρωμίτη, περιλαμβάνουν εναλλασσόμενα στρώματα των εξής πετρωμάτων: Νορίτη, γαββρονορίτη, δουνίτη, χαρτσβουργίτη, λερζόλιθο, πυροξενίτη, τροκτόλιθο, ανορθοσίτη, ορθοπυροξενίτη και γάββρου. Βέβαια σε κάθε διαφορετικό κοίτασμα υπάρχει μεγάλη λιθολογική διαφοροποίηση, πράγμα που σημαίνει πως δεν μπορούν να υπάρχουν όλα αυτά τα πετρώματα ταυτόχρονα μαζί. Τα κύρια πετρώματα όμως στα οποία φιλοξενείται ο χρωμίτης είναι οι αστριούχοι πυροξενίτες και οι χαρτσβουργίτες.

3. ΟΡΥΚΤΟΛΟΓΙΑ ΚΑΙ ΓΕΩΧΗΜΕΙΑ ΤΩΝ ΣΤΡΩΜΑΤΟΜΟΡΦΩΝ ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΩΝ

3.1. Ορυκτολογία

Η ορυκτολογία των στρωματόμορφων κοιτασμάτων χρωμίτη, συνίσταται κυρίως από χρωμίτη, ολιβίνη, πυρόξενο, πλαγιόκλαστο και ορυκτά της ομάδας της πλατίνας (PGE) (Schulte et al. 2012).

Χρωμίτης: Οι μορφές χρωμίτη που μπορεί να συναντήσει κανείς σε ένα στρωματόμορφο κοίτασμα είναι: α) Διάσπαρτος $\text{Cr}_2\text{O}_3 < 10\%$ (Σχ. 3.1α), β) Ταινιωτός $\text{Cr}_2\text{O}_3 = 17 - 22\%$ (Σχ. 3.1β) και γ) Συμπαγής $\text{Cr}_2\text{O}_3 = 30 - 55\%$ (Σχ. 3.1γ).



Σχ. 3.1. α. Διάσπαρτος χρωμίτης. β. Ταινιωτός χρωμίτης. γ. Συμπαγής χρωμίτης (Μέλφος 2019).

Ολιβίνης: Ο σωρευτικός ολιβίνης συναντάται σε πετρώματα όπως, ο πυροξενίτης και ο περιδοτίτης, τα οποία είναι και τα κύρια πετρώματα στα οποία βρίσκεται ο χρωμίτης. Τα μεγέθη των κόκκων είναι μικρά και φτάνουν έως και μερικά χιλιοστά. Ένα μέρος του ολιβίνης, στις περιπτώσεις αυτές, έχει αλλοιωθεί και έχει υποστεί σερπεντινίωση και χλωριτίωση.

Πυρόξενος: Το ορυκτό πυρόξενος βρίσκεται κυρίως σε στρωματόμορφες υπερβασικές - βασικές διεισδύσεις, οι οποίες σχετίζονται με κοιτάσματα χρωμίτη. Ο κλινοπυρόξενος, ο βρονζίτης και ο αυγίτης είναι οι ποικιλίες του πυροξένου που κυριαρχούν και έχουν σωρευτική υφή. Ακόμα, πολλές φορές ο κλινοπυρόξενος συνυπάρχει με αμφιβολίτη.

Πλαγιόκλαστο: Το πλαγιόκλαστο εμφανίζεται σε πετρώματα, τα οποία μπορούν να φιλοξενούν κοιτάσματα χρωμίτη, δηλαδή, σε βασικά πετρώματα όπως είναι ο γάββρος, μέχρι και υπερβασικά, όπως είναι ο περιδοίτης. Το μέγεθος των κόκκων, έχει εύρος τιμών από μερικά χιλιοστά μέχρι και 1 εκατοστό. Επίσης, όπως ο πυρόξενος, έτσι και το πλαγιόκλαστο συνυπάρχει κάποιες φορές με αμφιβολίτη και έχει και αυτό σωρευτική υφή.

Ορυκτά της ομάδας της πλατίνας: Τα ορυκτά αυτά (Pt, Pd, Rh, Os, Ir, Ru) σχετίζονται με τον χρωμίτη και για το λόγο αυτό, τα στρωματόμορφα κοιτάσματα, είναι συνήθως πλούσια σε ορυκτά αυτής της ομάδας. Όμως, κάποια από αυτά τα κοιτάσματα, όπως είναι αυτό του Bushveld, παρά τις υψηλές τους περιεκτικότητες σε PGE, δεν είναι οικονομικά εκμεταλλεύσιμα (Schoon and Mitchell 1994, Naldrett et al. 2009).

3.2. Γεωχημεία

Η γεωχημεία των στρωματόμορφων κοιτασμάτων, χαρακτηρίζεται από πολύ υψηλές περιεκτικότητες σε χρώμιο και συνδέεται με τα ορυκτά της ομάδας της πλατίνας (PGE). Στα κοιτάσματα αυτά παρατηρείται μια ασυνήθιστα υψηλή περιεκτικότητα σε μαγνήσιο και μία χαμηλή σε κάλιο, νάτριο και φώσφορο. Η ποικιλομορφία αυτή οφείλεται στον ανταγωνισμό του χρωμίτη και του ορθοπυρόξενου για μαγνήσιο, σίδηρο και αλουμίνιο. Πιο συγκεκριμένα, στα ανώτερα στρώματα, παρατηρείται σημαντική μείωση στην περιεκτικότητα σε Cr, Mg, Mn, Ni, Co, Zn και αύξηση σε Fe, Ti και V (Schulte et al. 2012).

Πολύ σημαντικό για τον καθορισμό της ποιότητας ενός κοιτάσματος χρωμίτη, είναι το ποσοστό Cr/Fe, γιατί ανάλογα με αυτό, αλλάζουν και οι ιδιότητες του χρωμίτη. Για παράδειγμα, εάν η ποσότητα του Fe^{3+} είναι ελάχιστη, τότε το ο χρωμίτης θα είναι ημιδιαφανής και δεν θα έχει καθόλου μαγνητικές ιδιότητες. Αντίθετα, εάν το ποσοστό ξεπερνά την μονάδα, τότε ο χρωμίτης θα είναι αδιαφανής και θα αποκτήσει ασθενείς μαγνητικές ιδιότητες (Schulte et al. 2012). Πιο συγκεκριμένα, στο Σχήμα 3,2 παρουσιάζονται τα ποσοστά Cr/Fe στα 3 σημαντικότερα στρωματόμορφα κοιτάσματα χρωμίτη, το καθένα από τα οποία, θα αναλυθεί ξεχωριστά στο επόμενο κεφάλαιο. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.2, τα συμπλέγματα του Bushveld και του Stillwater είναι πλούσια σε σίδηρο, ενώ το κοιτάσμα του Great Dyke πλούσιο σε χρώμιο μέταλλευμα (Φιλιππίδης κ.ά. 1990).

Deposits	Chromium/ iron ratio
Bushveld Complex (South Africa)	0.95–3.0
Stillwater Complex (Montana, USA)	1.0–2.1
Great Dyke (Zimbabwe)	2.1–3.9

Σχ. 3.2. Ποσοστό Cr/Fe στα σπουδαιότερα στρωματόμορφα κοιτάσματα χρωμίτη στον κόσμο (Stowe 1994, Cawthorn et al. 2005, Lee 1996, Eales and Cawthorn 1996, Wilson 1996, McCallum 1996, Naldrett 2004).

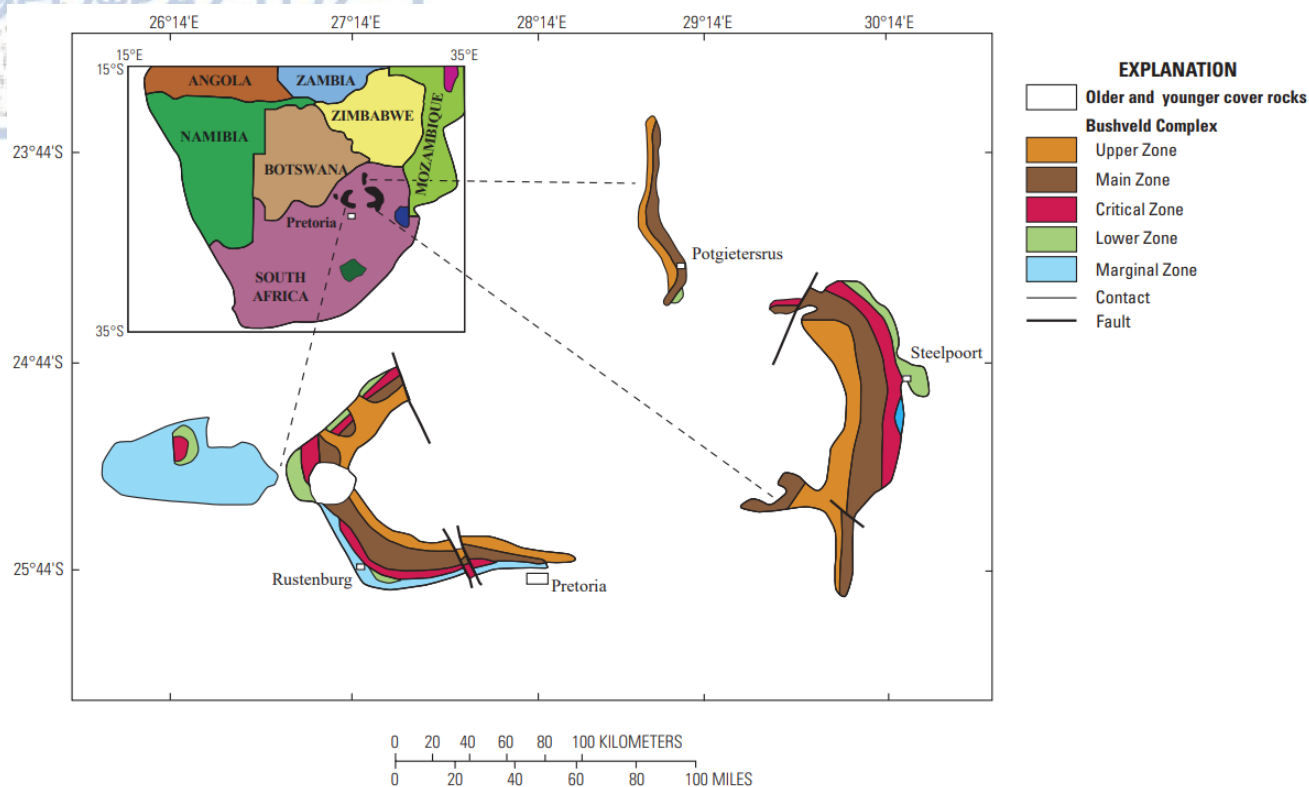
Έρευνες έχουν δείξει ότι το ποσοστό $[Cr^{3+} / (Cr^{3+} + Al^{3+} + Fe^{3+})]$ μπορεί να λειτουργήσει ως πετρογενετικός δείκτης, δηλαδή, εάν το ποσοστό αυτό είναι $> 0,7$, δείχνει συνθήκες δημιουργίας του κοιτάσματος σε τόξο, ενώ $0,3 < [Cr^{3+} / (Cr^{3+} + Al^{3+} + Fe^{3+})] < 0,7$ σε μεσοωκεάνια ράχη (Irvine 1967, Dick and Bullen 1984). Επιπρόσθετα, γνωρίζοντας το ποσοστό του πετρώματος σε $[Mg^{2+} / (Mg^{2+} + Fe^{2+})]$, είναι εφικτό να προσδιοριστεί ο βαθμός κλασματικής κρυστάλλωσης (Schulte et al. 2012).

4. ΤΑ ΣΗΜΑΝΤΙΚΟΤΕΡΑ ΥΓΡΟΜΑΓΜΑΤΙΚΑ ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΑ ΧΡΩΜΙΤΗ ΣΤΡΩΜΑΤΟΜΟΡΦΟΥ ΤΥΠΟΥ

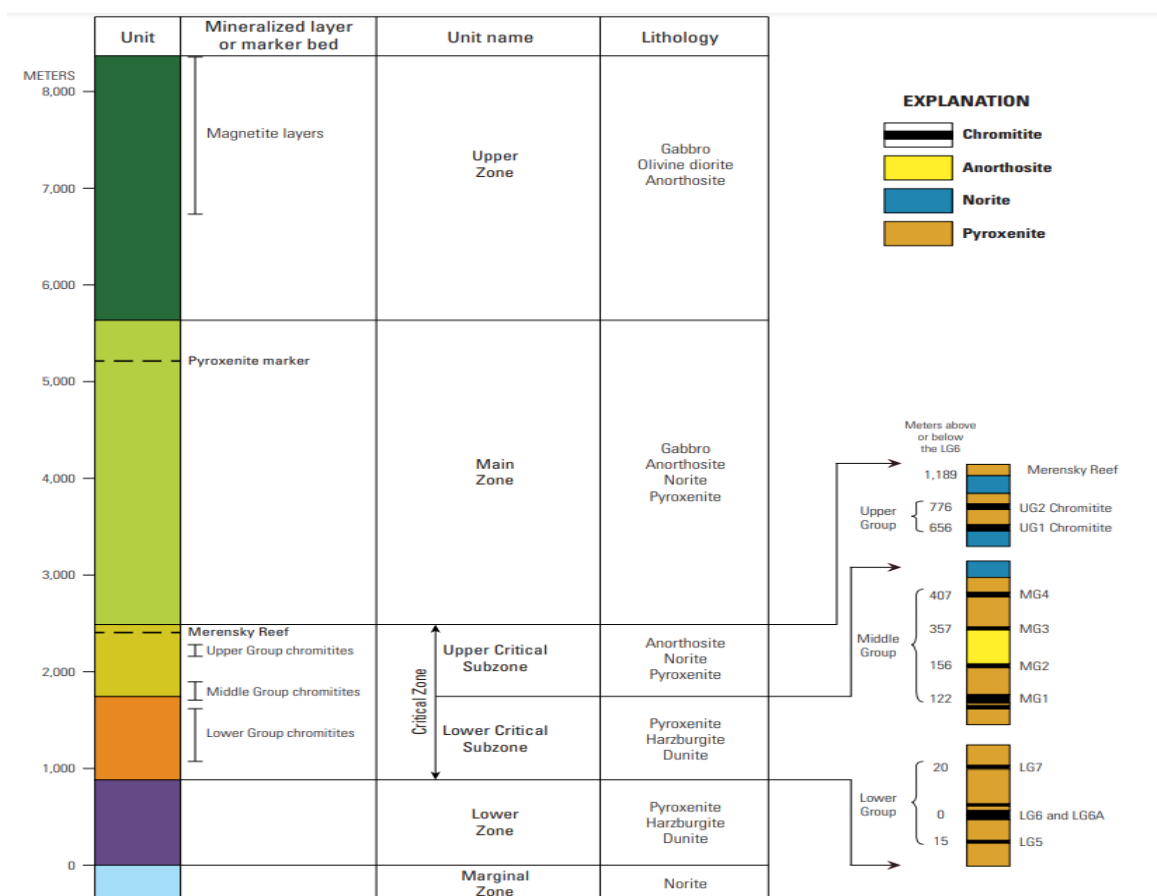
4.1. *Bushveld Complex*

Το σύμπλεγμα αυτό βρίσκεται στην Νότια Αφρική και θεωρείται ότι είναι το μεγαλύτερο στρωματόμορφο κοίτασμα στον κόσμο, με μέγεθος που ξεπερνά τα 66.000 km² (Willmore et al. 2000). Επιπρόσθετα, το κοίτασμα δημιουργήθηκε πριν από περίπου 2 δισεκατομμύρια χρόνια και έχει σχήμα χωνιού. Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι το σύμπλεγμα καλύπτεται από τα υπερκείμενα πετρώματα, τα οποία όμως έχουν διαβρωθεί και έτσι επιτρέπουν την αποκάλυψη του κοιτάσματος σε 3 θέσεις, το Βόρειο, Δυτικό και Ανατολικό άκρο (Schouwstra et al. 2000).

Σύμφωνα με τους Schulte et al. (2012), το υπερβασικό αυτό κοίτασμα, αποτελείται από 5 ζώνες, την Περιθωριακή, την Κατώτερη, την κρίσιμη, την κύρια και την ανώτερη (Σχ. 4.1). Ο κύριος όγκος στρωμάτων χρωμίτη (πάχος 20cm - 2m) , εντοπίζεται στο ανώτερο και κατώτερο μέρος της κρίσιμης ζώνης (Σχ. 4.2). Η κατώτερη κρίσιμη υποζώνη αποτελείται από 7 στρώματα χρωμίτη (LG1 - LG7), τα οποία βρίσκονται μέσα σε αστριούχο πυροξενίτη. Το LG6 έχει το μεγαλύτερο πάχος σε ολόκληρο το κοίτασμα και είναι το στρώμα με τη μεγαλύτερη οικονομική εκμετάλλευση. Αξίζει να σημειωθεί ότι συνολικά εντοπίζονται 25 στρώματα χρωμίτη στην κρίσιμη ζώνη, αλλά επειδή κάποια εμφανίζονται αποκλειστικά σε τοπική κλίμακα, μόνο τα 14 θεωρούνται ως κύρια στρώματα. Επιπρόσθετα, όσον αφορά τη λιθολογία, η κατώτερη κρίσιμη υποζώνη συνίσταται κυρίως από ορθοπυροξενίτη (μπρονζίτη) και δευτερευόντως από χαρτσβουργίτη, δουνίτη και χρωμίτη, ενώ η ανώτερη από ανορθοσίτη, ορθοπυροξενίτη και δουνίτη. Τέλος, αξίζει να αναφερθεί η ύπαρξη του Merensky reef, το οποίο βρίσκεται στην ανώτερη κρίσιμη υποζώνη, και περιέχει εξαιρετικά υψηλές ποσότητες ορυκτών της ομάδας της πλατίνας.



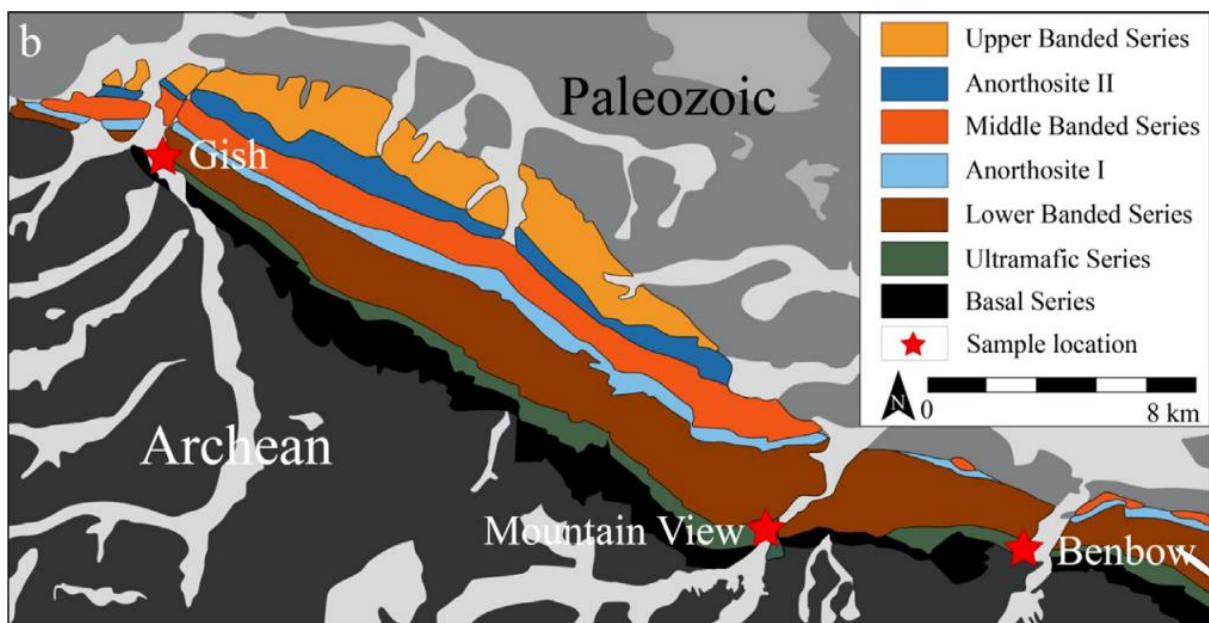
Σχ. 4.1. Γεωλογικός χάρτης του συμπλέγματος Bushveld στη Νότια Αφρική και οι κύριες ζώνες του (Cawthorn 2007).



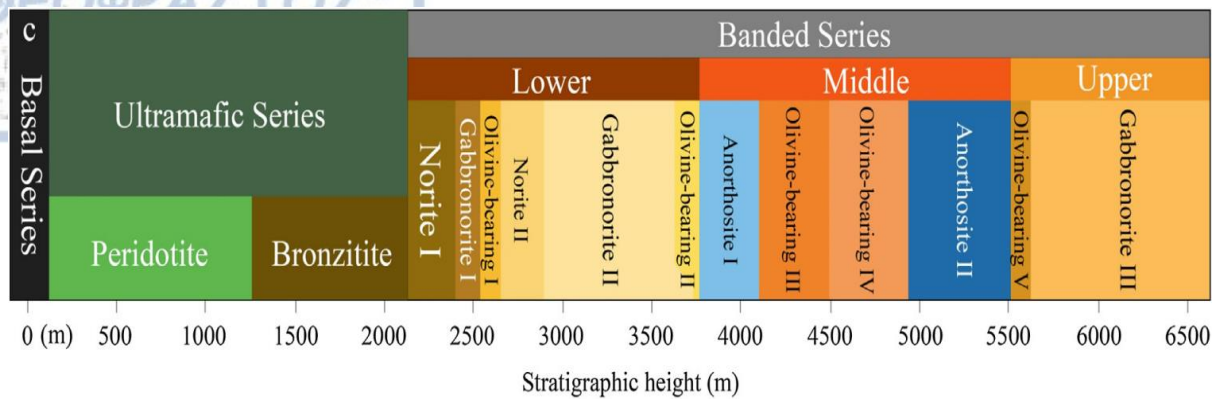
Σχ. 4.2. Η στρωματογραφική στήλη του συμπλέγματος Bushveld και η αναλυτική εμφάνιση χρωμίτη στην κρίσιμη ζώνη (Viljoen and Schürmann 1998).

4.2. Stillwater Complex

Το κοίτασμα δημιουργήθηκε πριν από περίπου 2,7 δισεκατομμύρια χρόνια (De Paolo and Wasserburg 1979, Premo et al. 1990) και βρίσκεται στην Μοντάνα των ΗΠΑ, στα Beartooth Mountains. Το σύμπλεγμα αυτό, έχει πάχος μεγαλύτερο από 6 km και συνολική έκταση ίση με 180 km² (Σχ. 4.3). Αποτελείται από 3 μέρη (Σχ. 4.4) (α) Basal Series, (β) The Ultramafic Series, (γ) The Banded Series. (α) Το κατώτερο στρώμα αποτελείται από νορίτη, στον οποίο, από κάτω προς τα πάνω, παρατηρείται μείωση του πλαγιόκλαστου και αύξηση του ορθοπυροξένου (Boudreau 2016). Το πάχος του στρώματος, κυμαίνεται από 60 m μέχρι 240 m (Page 1979, Zientek 1983). (β) Το μεσαίο στρώμα απαρτίζεται από μία κατώτερη ζώνη Περιδοτίτη και μία ανώτερη, τη ζώνη Βρονζίτη. Η πρώτη ζώνη, περιέχει ένα πακέτο περιδοτίτη / ποικιλτικού χαρτσβουργίτη, κρυσταλλώδη χαρτσβουργίτη και ορθοπυροξενίτη, το οποίο έχει παρατηρηθεί ότι επαναλαμβάνεται 21 φορές (Raedeke and McCallum 1984). Η κύρια ποσότητα χρωμίτη συναντάται κυρίως στη βάση αυτού του πακέτου, δηλαδή στον περιδοτίτη/ποικιλτικό χαρτσβουργίτη. Η άλλη ζώνη, αποτελείται από ορθοπυροξενίτη, ο οποίος περιέχει κατά βάση πλαγιόκλαστο, ανίτη και μικρές ποσότητες χρωμίτη και χαλαζία. (γ) Το ανώτερο στρώμα συμπεριλαμβάνει όλα εκείνα τα πετρώματα, τα οποία βρίσκονται πάνω από τις Υπερβασικές Σειρές και χωρίζεται σε Lower Series, Middle Series και Upper Series. Αξιοσημείωτο είναι ότι, όπως και στο Bushveld, έτσι και εδώ, υπάρχει το J-M Reef, το οποίο περιέχει σημαντικές ποσότητες ορυκτών της ομάδας της πλατίνας.



Σχ. 4.3. Γεωλογικός χάρτης του Stillwater Complex (McCallum 1996).



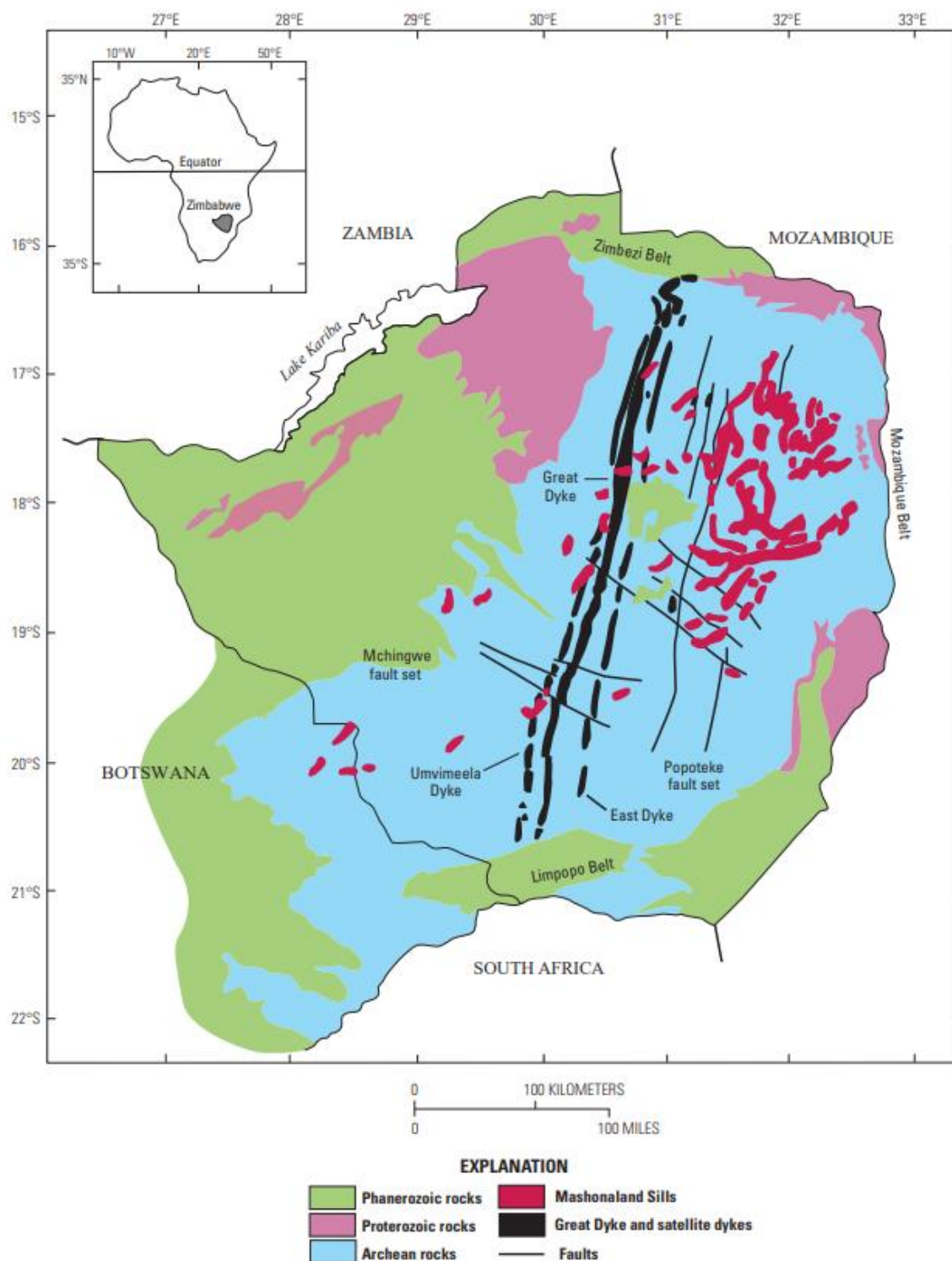
Σχ. 4.4. Η στρωματογραφική στήλη του Stillwater Complex (McCallum 1996).

4.3. Great Dyke

Το Great Dyke βρίσκεται στη Ζιμπάμπουε της Αφρικής και χαρακτηρίζεται ως ένα επιμήκη υπερβασικό σύμπλεγμα (Σχ. 4.5) με περίπου 550 km μήκος και 3-11 km πλάτος (Wilson and Prendergast 1989). Η δημιουργία αυτού του κοιτάσματος, υπολογίζεται ότι είναι περίπου στα 2,5 δισεκατομμύρια χρόνια και οφείλεται στην υπερβασική διείδυση, μέσα σε αρχαϊκούς γρανίτες και πρσινοσχιστόλιθους στην κρατονική περιοχή της Ζιμπάμπουε (Σχ. 4.6).



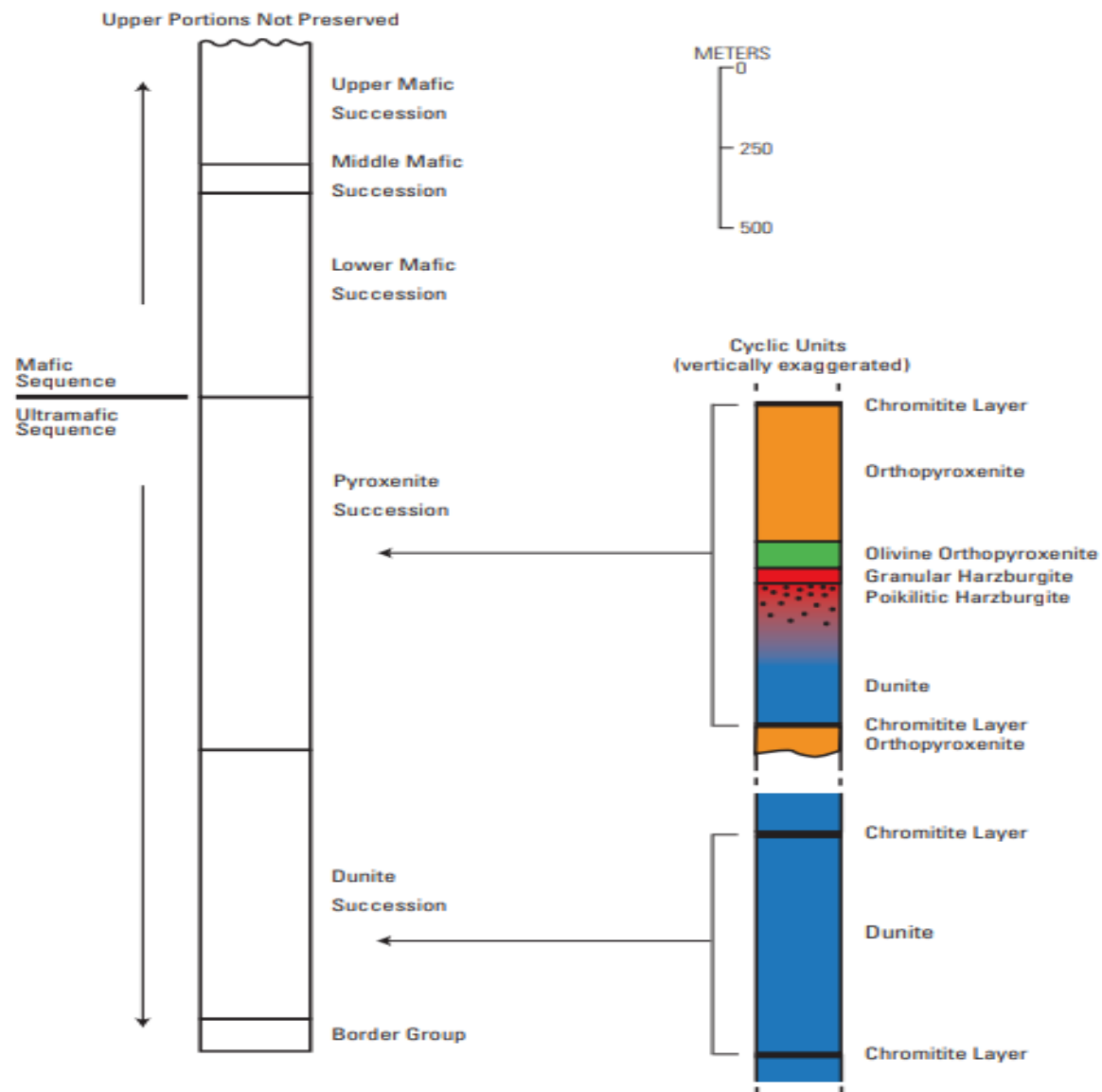
Σχ. 4.5. Το Great Dyke όπως φαίνεται από το διάστημα (Η επιμήκης μάζα) (NASA 2010)



Σχ. 4.6. Ο γεωλογικός χάρτης του Great Dyke (Stubbs et al. 1999).

Αποτελείται από δύο κύριους θαλάμους, τον Βόρειο και τον Νότιο, οι οποίοι χωρίζονται σε πέντε υποθαλάμους. Στο βόρειο τμήμα υπάρχουν οι υποθάλαμοι Musengezi, Darwendale και Sebakwe, ενώ στο νότιο τμήμα οι Selukwe και Wedza (Wilson et al. 2000). Η στρωματογραφία του Great Dyke, είναι παρόμοια σε όλους του μαγματικούς θαλάμους και

χωρίζεται σε 2 μέρη, την Ultramafic Sequence και την Mafic Sequence (Σχ. 4.7). Η πρώτη είναι η κατώτερη και αποτελείται από την Dunite Succession και την Pyroxenite Succession. Η Dunite succession περιέχει πακέτα δουνίτη και χαρτσβουργίτη τα οποία επαναλαμβάνονται και χωρίζονται από στρώματα χρωμίτη. Το πάχος ενός στρώματος χρωμίτη, κυμαίνεται από 10-15cm (Wilson 1996). Η Pyroxenite Succession αποτελείται από πακέτα δουνίτη, χαρτσβουργίτη, πυροξενίτη πλούσιο σε ολιβίνη, καθαρό πυροξενίτη και στρώματα χρωμίτη, τα οποία εμφανίζονται συχνά στην ακολουθία (Ncube 2014). Η Mafic Sequence χαρακτηρίζεται από πετρώματα πλούσια σε πλαγιόκλαστο, όπως είναι ο νορίτης και ο γάββρος (Wilson 1982, Wilson and Prendergast 1989). Τέλος, αξίζει να αναφερθεί, ότι το κοίτασμα έχει εξαιρετικά υψηλή περιεκτικότητα σε ορυκτά της ομάδας της πλατίνας (Chaumba 2017).



Σχ. 4.7. Η στρωματογραφική στήλη του Great Dyke (Wilson 1996).

5. ΣΥΖΗΤΗΣΗ ΚΑΙ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η παρούσα διπλωματική πτυχιακή εργασία, αφορά την μελέτη υδρομαγματικών κοιτασμάτων χρωμίτη στρωματομόρφου τύπου, που υπάρχουν σε όλο τον κόσμο. Τα κοιτάσματα αυτά συναντώνται μόνο σε ενδοπλακικές κρατονικές περιοχές και οφείλουν την ύπαρξη τους, σε διεισδύσεις βασικών και υπερβασικών μαγμάτων. Χαρακτηριστικό των κοιτασμάτων αυτών, είναι η στρωματοειδής ανάπτυξη σε αλληπάλληλα στρώματα και οι εξαιρετικά υψηλές περιεκτικότητες σε χρωμίτη. Επιπρόσθετα, σε αυτά βρίσκονται πολύ σημαντικές ποσότητες από ορυκτά της ομάδας της πλατίνας, που όμως, πολλές φορές, δεν είναι οικονομικά εκμεταλλεύσιμα. Αυτός ο τύπος κοιτασμάτων και πιο συγκεκριμένα το Bushveld, αποτελεί την κυριότερη πηγή χρωμίου σε ολόκληρο τον κόσμο.

Όσον αφορά την πετρολογία, η κυρίαρχη σύσταση των πετρωμάτων είναι βασική και υπερβασική. Ειδικότερα, τα πετρώματα στα οποία φιλοξενείται ο χρωμίτης, είναι κυρίως χαρτσβουργίτες και αστριούχοι πυροξενίτες (Schulte et al. 2012). Ορυκτολογικά, τα στρωματομόρφα κοιτάσματα, εκτός από χρωμίτη και ορυκτά της ομάδας της πλατίνας, περιέχουν ολιβίνη, πυρόξενο και πλαγιόκλαστο. Ακόμα, αξίζει να επισημανθεί, ότι ο χρωμίτης έχει 3 μορφές: α) Διάσπαρτος, β) Ταινιωτός και γ) Συμπαγής.

Όσον αφορά τη γεωχημεία αυτών των κοιτασμάτων, σημαντικό είναι ότι στα ανώτερα στρώματα, παρατηρείται μια σημαντική μείωση στην περιεκτικότητα σε Cr, Mg, Mn, Ni, Co, Zn και αύξηση σε Fe, Ti και V. Τέλος, άξιο αναφοράς για την ποιότητα του χρωμίτη, είναι η περιεκτικότητα σε σίδηρο, δηλαδή το ποσοστό Cr/Fe.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Μέλφος Β., Φιλίππιδης Α. 2017. Οδηγός άσκησης υπαίθρου στην μεταλλοφορία Cr αλπικού τύπου, Τριάδι Θεσσαλονίκης.
- Μέλφος Βασίλης 2019. Υγρομαγματικά ή ορθομαγματικά κοιτάσματα.
- Φιλίππιδης Α.Α., Μιχαηλίδης Κ.Μ. & Βαβελίδης Μ.Κ. 1990. Σημειώσεις Κοιτασματολογίας II, Τμήμα Εκδόσεων Α.Π.Θ., Θεσσαλονίκη.
- Cawthorn, R.G., Barnes, S.J., Ballhaus, C., and Malitch, K.N., 2005, Platinum Group Element, Chromium, and Vanadium deposits in mafic and ultramafic rocks, in Raeside, R., ed., Exploration for Platinum-Group Elements: Mineralogical Society of Canada, Short Course Series, v. 35, p. 215-249.
- Cawthorn, R.G., 2007, Cr and Sr: Keys to parental magmas and processes in the Bushveld Complex, South Africa: *Lithos*, v. 95, p. 381-398.
- Chaumba, J. B. (2017). Hydrothermal alteration in the Main Sulfide Zone at Unki Mine, Shurugwi Subchamber of the Great Dyke, Zimbabwe: Evidence from petrography and silicates mineral chemistry. *Minerals*, 7(7), 127.
- Deer, W.A., Howie, R.A., Zussman, J., 1992: An introduction to the Rock-forming minerals. 2nd edition. Pearson Prentice Hall, Harlow. 696 pp.
- DePaolo, D.J. and Wasserburg, G.J. (1979) Sm-Nd age of the Stillwater Complex and the mantle evolution curve for neodymium. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 43, 999-1008.
- Dick, H.J.B., and Bullen, T., 1984, Chromian spinel as a petrogenetic indicator in abyssal and alpine-type peridotites and spatially associated lavas: *Contributions to Mineralogy and Petrology*, v. 86, p. 54-76.
- Eales, H.V., and Cawthorn, R.G., 1996, The Bushveld Complex, in Cawthorn, R.G., ed., Layered intrusions: Amsterdam, Elsevier, p. 181-229.
- Franklin, J., 2010, Chrome, <http://www.spiderresources.com>
- Hobart, M.K., 2005, Chromite. <https://geology.com/minerals/chromite.shtml>
- Irvine, T.N., 1967, Chromian spinel as a petrogenetic indicator—Part 2. Petrologic applications: *Canadian Journal of Earth Sciences*, v. 4, no. 1, p. 71-103.
- Jackie Gauntlett, 2020, Geology of the PGE Deposits in the Bushveld Complex, South Africa. <https://www.geologyforinvestors.com>
- Jacobs, J. A., & Testa, S. M. (2005). Overview of chromium (VI) in the environment: background and history. *Chromium (VI) handbook*, 1-21.

Klaus J. Schulz, U.S. Geological Survey. <https://www.usgs.gov/>

Leblanc, M., & Temagout, A. (1989). Chromite pods in a lherzolite massif (Collo, Algeria): Evidence of oceanic-type mantle rocks along the West Mediterranean Alpine Belt. *Lithos*, 23(3), 153-162.

Lee, C.A., 1996, A review of mineralization in the Bushveld Complex and some other layered intrusions, in Cawthorn, R.G., ed., *Layered intrusions*: Amsterdam, Elsevier, p. 103-145.

McCallum, I.S., 1996, The Stillwater Complex, in Cawthorn, R.G., ed., *Layered intrusions*: Amsterdam, Elsevier, p. 441-483.

Naldrett, A.J., Kinnaird, J., Wilson, A., Yudovskaya, M., McQuade, S., Chunnett, G., and Stanley, C., 2009, Chromite composition and PGE content of Bushveld chromitites, Part 1—The Lower and Middle Groups: *Transactions of the Institution of Minerals and Metallurgy, Section B—Applied Earth Science*, v. 118, no. 3-4, p. 131-161.

Naldrett, A.J., 2004, *Magmatic sulfide deposits; geology, geochemistry and exploration*: Berlin, Springer-Verlag, p. 137-277.

Ncube, S. (2014). *The origin and petrogenesis of the ultramafic enclaves at Unki Mine, Selukwe Subchamber, Great Dyke, Zimbabwe* (Doctoral dissertation).

NASA, (2010, 30 September), The Great Dyke of Zimbabwe, <https://earthobservatory.nasa.gov/images/46341/great-dyke-of-zimbabwe>

Page, N.J. (1979) Stillwater Complex, Montana - Structure, mineralogy and petrology of the basal zone with emphasis on the occurrence of sulfides. U.S. Geological Survey Professional Paper, 1038. Reston, Virginia, USA.

Papp, J.F., 2007. Chromium. A National Mineral Commodity Perspective, Report: USGS Numbered Series, Open-File Report, 48 p

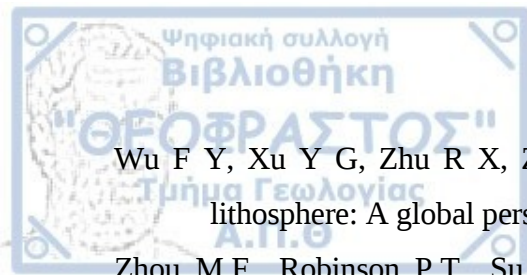
Premo, W.R., Helz, R.T., Zientek, M.L. and Langston, R. B. (1990) U-Pb and Sm-Nd ages for the Stillwater Complex and its associated sills and dikes, Beartooth Mountains, Montana: Identification of a parent magma? *Geology*, 18, 1065-1068.

Raedeke, L.D. and McCallum, I.S. (1984) Investigations in the Stillwater Complex: Part II. Petrology and petrogenesis of the ultramafic series. *Journal of Petrology*, 25, 395-420.

Schouwstra, R. P., Kinloch, E. D., & Lee, C. A. (2000). A short geological review of the Bushveld Complex. *Platinum Metals Review*, 44(1), 33-39.

Schulte, R. F., Taylor, R. D., Piatak, N. M., & Seal II, R. R. (2012). *Stratiform chromite deposit model: Chapter E in Mineral deposit models for resource assessment* (No. 2010-5070-E). US Geological Survey.

- Scoon, R.N., and Mitchell, A.A., 1994, Discordant iron-rich ultramafic pegmatites in the Bushveld Complex and their relationship to iron-rich intercumulus and residual liquids: *Journal of Petrology*, v. 35, p. 881-917.
- Sengor A M C. 1999. Continental interiors and cratons: Any relation? *Tectonophysics*, 305: 1-42.
- Stowe, C.W., 1994, Compositions and tectonic settings of chromite deposits through time: *Economic Geology*, v. 89, p. 528-546.
- Stubbs, H.M., Hall, R.P., Hughes, D.J., and Nesbitt, R.W., 1999, Evidence for a high Mg andesitic parental magma to the east and west satellite dykes of the Great Dyke, Zimbabwe—A comparison with the continental tholeiitic Mashonaland sills: *Journal of African Earth Sciences*, v. 28, p. 325-336.
- Thayer, T. P. (1969). Gravity differentiation and magmatic re-emplacement of podiform chromite deposits.
- U.S. Geological Survey, Mineral Commodity Summaries, January 2020. <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2020/mcs2020.pdf>
- Viljoen, M.J. and Schürmann, L. W. (1998). Platinum-group metals. In: Wilson, M.G.C. and Anhaeusser, C.R (Editors) *The Mineral Resources of South Africa*, Council for Geoscience, South Africa, 532-568.
- Willmore, C. C., Boudreau, A. E., & Kruger, F. J. (2000). The halogen geochemistry of the Bushveld Complex, Republic of South Africa: implications for chalcophile element distribution in the lower and critical zones. *Journal of petrology*, 41(10), 1517-1539.
- Wilson, A.H., 1982, The geology of the Great Dyke, Zimbabwe: The ultramafic rocks: *Journal of Petrology*, v. 23, p. 240–292.
- Wilson, A. H., and Prendergast, M. D. 1989. The Great Dyke of Zimbabwe. I. Tectonic setting, stratigraphy, petrology, structure, emplacement and crystallisation. In Prendergast, M. D., and Jones, M. J., eds. *Magmatic sulphides: the Zimbabwe volume*. London, Inst. Mining Metallurgy, p. 1-20.
- Wilson, A.H., 1996, The Great Dyke of Zimbabwe, in Cawthorn, R.G., ed., *Layered intrusions*: Amsterdam, Elsevier, p. 365-402.
- Wilson, A. H., Murahwi, C. Z. & Coghill, B. M. (2000). The geochemistry of the PGE Subzone in the Selukwe Subchamber, Great Dyke: an intraformational layer model for Platinum Group Element enrichment in layered intrusions. *Mineralogy and Petrology* 68, 115 - 140.



Wu F Y, Xu Y G, Zhu R X, Zhang G W. 2014. Thinning and destruction of the cratonic lithosphere: A global perspective. *Sci China Earth Sci*, 57: 2878-2890.

Zhou M.F., Robinson P.T., Su B.X., Gao J.F., Li J.W., Yang J.S. and Malpas J. (2014). Compositions of chromite, associated minerals, and parental magmas of podiform chromite deposits: The role of slab contamination of asthenospheric melts in suprasubduction zone environments. *Gondwana Research*, 26(1), 262-283.

Zientek, M.L. (1983) Petrogenesis of the Basal zone of the Stillwater Complex, Montana. Unpublished PhD dissertation, Stanford University, Stanford, USA.