



ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ
ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ

ΤΟΜΕΑΣ ΟΡΥΚΤΟΛΟΓΙΑΣ-ΠΕΤΡΟΛΟΓΙΑΣ-ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΟΛΟΓΙΑΣ

ΜΑΡΚΟΠΟΥΛΟΥ ANNA
ΑΕΜ 5592

ΟΡΥΚΤΑ ΤΗΣ ΠΛΑΤΙΝΑΣ, ΠΛΑΤΙΝΟΕΙΔΗ ΣΕ ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΑ ΧΡΩΜΙΤΗ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ

2022





ΜΑΡΚΟΠΟΥΛΟΥ ANNA

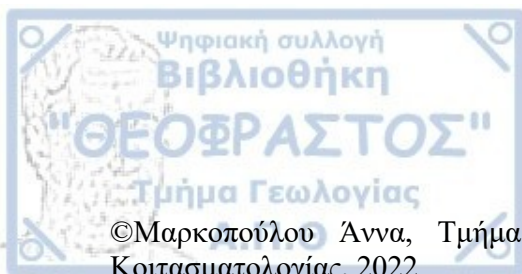
ΟΡΥΚΤΑ ΤΗΣ ΠΛΑΤΙΝΑΣ ,ΠΛΑΤΙΝΟΕΙΔΗ ΣΕ ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΑ ΧΡΩΜΙΤΗ

Υποβλήθηκε στο Τμήμα Γεωλογίας
Τομέας Ορυκτολογίας - Πετρολογίας - Κοιτασματολογίας

Επιβλέπων Καθηγητής

Βασίλης Μέλφος, Αναπληρωτής Καθηγητής

© Μαρκοπούλου Άννα, 2022
Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All right reserved.



©Μαρκοπούλου Άννα, Τμήμα Γεωλογίας Α.Π.Θ., Τομέας Ορυκτολογίας, Πετρολογίας, Κοιτασματολογίας, 2022

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος.

Τα ορυκτά της πλατίνας, πλατινοειδή σε κοιτάσματα χρωμίτη – *Διπλωματική Εργασία*

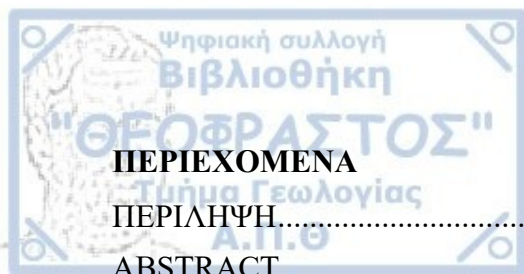
© Markopoulou Anna, School of Geology, Department of Mineralogy, Petrology, Economic Geology, 2022

All rights reserved.

The platinum-group minerals and platinoids in 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.



ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	6
ABSTRACT.....	7
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ.....	8
ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΕΣ.....	8
1. Εισαγωγή.....	1
2. Στοιχεία της ομάδας της πλατίνας (PGE).....	4
2.1. Γενικά.....	4
2.2. Ιδιότητες των στοιχείων της ομάδας της πλατίνας.....	6
2.1. Εφαρμογές των πλατινοειδών.....	6
2.2. Ταξινόμηση των μεταλλευμάτων των στοιχείων της ομάδας της πλατίνας.....	7
2.2.1. Κυρίαρχα μεταλλεύματα PGEs.....	8
2.2.2. Μεταλλεύματα με κυρίαρχο το Ni-Cu.....	8
2.2.3. Διάφορα μεταλλεύματα.....	9
3. Κοιτάσματα και γεωχημική συμπεριφορά των στοιχείων της ομάδας της πλατίνας.....	10
3.1. Τύποι κοιτασμάτων των στοιχείων της ομάδας της πλατίνας.....	10
3.2. Γεωχημική συμπεριφορά των στοιχείων της ομάδας της πλατίνας.....	12
4. Τα ορυκτά της ομάδας της πλατίνας (PGM).....	13
5. Χρωμίτης και κοιτάσματα χρωμίτη.....	26
5.1. Γενικά.....	26
5.2. Ιδιότητες και χρήσεις του χρωμίτη.....	27
5.3. Μεταλλογένεση χρωμιτών.....	29
5.4. Σχηματισμός χρωμίτη.....	30
5.5. Ταξινόμηση χρωμιτών.....	31
5.6. Οι αλπικοί χρωμίτες.....	33
5.7. Μεταλλουργία του χρωμίτη.....	34
6. Πλατινοειδή σε κοιτάσματα χρωμίτη.....	36
6.1. Ορυκτολογία.....	36
6.2. Πρωτογενή και δευτερογενή ορυκτά της ομάδας της πλατίνας.....	36
6.3. Προέλευση των πρωτογενών εγκλεισμάτων ορυκτών της ομάδας της πλατίνας στον χρωμίτη: Το μοντέλο του «μεταλλικού συμπλέγματος».....	38
6.4. Πετρολογικά χαρακτηριστικά των ορυκτών της ομάδας της πλατίνας που φιλοξενούνται σε χρωμίτες.....	39
6.5. Ορυκτά της ομάδας της πλατίνας στους Ελληνικούς χρωμίτες.....	40
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	42



ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Ορυκτά της πλατίνας πλατινοειδή σε κοιτάσματα χρωμίτη

Μαρκοπούλου Άννα

Η παρούσα εργασία στοχεύει στη μελέτη και τον προσδιορισμό των ορυκτών της πλατίνας καθώς και στη μελέτη των πλατινοειδών (PGE) σε κοιτάσματα χρωμίτη. Αρχικά παρουσιάζονται τα στοιχεία της ομάδας του λευκόχρυσου, οι ιδιότητες αυτών, καθώς και οι κυριότερες εφαρμογές τους. Στη συνέχεια, γίνεται ταξινόμηση των μεταλλευμάτων των PGE, και κατόπιν γίνεται αναφορά στους τύπους κοιτασμάτων και στη γεωχημική συμπεριφορά αυτών των στοιχείων. Επίσης παρουσιάζονται τα ορυκτά της ομάδας της πλατίνας, και αναφέρονται κάποια βασικά τους χαρακτηριστικά στοιχεία. Παράλληλα, καθίσταται ήδη σαφής η σύνδεση των στοιχείων της ομάδας της πλατίνας με τα κοιτάσματα χρωμιτών. Γίνεται παρουσίαση της γένεσης χρωμιτών και κοιτασμάτων αυτών, ταξινόμηση των χρωμιτών και ειδική αναφορά στους αλπικούς χρωμίτες. Επιπρόσθετα, γίνεται αναφορά στις ιδιότητες και τις χρήσεις του χρωμίτη, καθώς και στη μεταλλουργία αυτού. Τέλος, αναλύεται η παρουσία πλατινοειδών σε κοιτάσματα χρωμίτη και καθίσταται σαφές ότι οι συγκεντρώσεις των στοιχείων της ομάδας του λευκόχρυσου (PGE) στα συμπυκνωμένα μεταλλεύματα χρωμίτη είναι γενικά χαμηλές, λιγότερο από 100 ppb έως μερικές εκατοντάδες ppb, και γίνεται αναφορά στα κοιτάσματα χρωμίτη στον Ελληνικό χώρο.

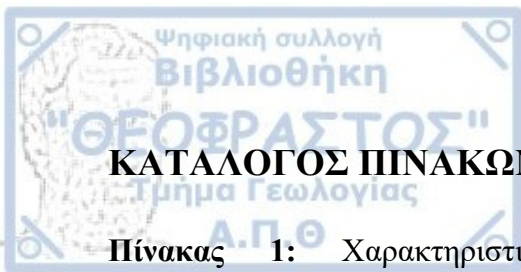


ABSTRACT

The platinum-group minerals and platinoids in chromite deposits

Markopoulou Anna

The present dissertation focus on the study and the identification of the platinum-group minerals and the platinum group elements (PGE) in chromite deposits. The platinum-group elements, their properties and their main applications are first presented. Next, a classification of PGE ores is made, followed by a discussion of the types of deposits and the geochemical behavior of these elements. The platinum-group minerals are also reported, and some of their basic characteristics are mentioned. At the same time, the association between the platinum group elements and chromite deposits is evidenced. The genesis of chromites and their deposits, the classification of chromites and special reference to alpine chromites are also presented. In addition, special reference is made to the properties and uses of chromite and its metallurgy. Finally, the presence of platinoids in chromite deposits is analyzed and it is made clear that the concentrations of platinum-group elements (PGE) in concentrated chromite ores are generally low, less than 100 ppb to a few hundred ppb. Finally a special reference is made to the chromite deposits in Greece.



ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1: Χαρακτηριστικά των Στοιχείων της Ομάδας της Πλατίνας (pubchem.ncbi.nlm.nih.gov).....	6
Πίνακας 2: Ορυκτά της ομάδας της πλατίνας (ιδανικοί τύποι) (Olivotos, 2015).	14
Πίνακας 3: Ταξινόμηση χρωμιτών (Palache et al., 1944).	27
Πίνακας 4: Ιδιότητες του χρωμίτη (webminerals.com).....	28

ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΕΣ

PGE Στοιχεία της ομάδας της πλατίνας (platinum-group elements)

PGM Ορυκτά της ομάδας της πλατίνας (platinum-group minerals)

IPGE Ir-group στοιχεία της ομάδας της πλατίνας

PPGE Pd-group στοιχεία της ομάδα της πλατίνας



1. Εισαγωγή

Τα στοιχεία της ομάδας του λευκόχρυσου (PGE) περιλαμβάνουν την πλατίνα, το παλλάδιο, το ρόδιο, το ρουθίνιο, το ιρίδιο και το όσμιο. Τα μέταλλα αυτά έχουν παρόμοιες φυσικές και χημικές ιδιότητες και απαντώνται μαζί στη φύση. Οι ιδιότητες των PGE, όπως τα υψηλά σημεία τήξης, η αντοχή στη διάβρωση και οι καταλυτικές ιδιότητες, τα καθιστούν απαραίτητα σε πολλές βιομηχανικές εφαρμογές.

Οι προκολομβιανοί λαοί βρήκαν στη φύση κράματα λευκόχρυσου και κοιτάσματα πλούσια σε λευκόχρυσο σε ρέματα στην Κολομβία και τον Ισημερινό και τα χρησιμοποιούσαν για την κατασκευή κοσμημάτων. Τη δεκαετία του 1500, οι Ευρωπαίοι περιέγραψαν την πλατίνα από τον ως "μια ουσία που δεν ήταν μέχρι σήμερα δυνατό να λιώσει με τη φωτιά ή με οποιαδήποτε από τις ισπανικές τέχνες". Οι Ισπανοί βρήκαν κόκκους πλατίνας αναμεμειγμένους με ψήγματα χρυσού που ανέκτησαν από κοιτάσματα ρεμάτων και ονόμασαν το μέταλλο "platina". Το μέταλλο δεν είχε καμία γνωστή χρήση και θεωρούνταν άχρηστο. Μικρά δείγματα από ψήγματα εμπλουτισμένα με πλατίνα από τη Νότια Αμερική έφθασαν στην Ευρώπη κατά τη δεκαετία του 1740. Η πλατίνα περιγράφηκε ως νέο μέταλλο το 1750, ακολουθούμενη από το ιρίδιο και το όσμιο το 1803, το παλλάδιο και το ρόδιο το 1804 και το ρουθίνιο το 1807 (USGS, 2014).

Η πλατίνα είναι γνωστή για τη χρήση της στην κατασκευή κοσμημάτων και ως επενδυτικό αγαθό, παρόλα αυτά γίνεται χρήση της και σε πληθώρα βιομηχανικών εφαρμογών. Η κύρια χρήση της είναι στους καταλυτικούς μετατροπείς, οι οποίοι μειώνουν τις εκπομπές υδρογονανθράκων, μονοξειδίου του άνθρακα και οξειδίου του αζώτου στις εξατμίσεις των αυτοκινήτων. Η χημική βιομηχανία χρησιμοποιεί λευκόχρυσο ή κράματα λευκόχρυσου-ροδίου για την κατασκευή ειδικών σιλικόνων και για την παραγωγή μονοξειδίου του αζώτου, της πρώτης ύλης για λιπάσματα, εκρηκτικά και νιτρικό οξύ. Στην πετροχημική βιομηχανία, καταλύτες υποστηριζόμενοι από λευκόχρυσο απαιτούνται για τη διύλιση του αργού πετρελαίου και την παραγωγή βενζίνης υψηλών οκτανίων. Στην ηλεκτρονική βιομηχανία, τα εξαρτήματα στοιχείων της ομάδας της πλατίνας αυξάνουν τις αποθηκευτικές ικανότητες στους σκληρούς δίσκους των υπολογιστών και είναι πανταχού παρόντα σε ηλεκτρονικές συσκευές, κεραμικούς πυκνωτές πολλαπλών στρώσεων και υβριδικά ολοκληρωμένα κυκλώματα. Η βιομηχανία κατασκευής γυαλιού χρησιμοποιεί PGE για την παραγωγή υαλονημάτων και οθονών υγρών κρυστάλλων και επίπεδων πλαισίων. Τα κράματα PGE είναι εξαιρετικά σκληρά και ανθεκτικά, γεγονός που τα καθιστά την καλύτερη επιστροφή για τα βιομηχανικά χωνευτήρια που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή

χημικών και συνθετικών υλικών, συμπεριλαμβανομένων των κρυστάλλων ζαφειριού υψηλής καθαρότητας που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή διόδων εκπομπής φωτός. Επειδή η πλατίνα δεν διαβρώνεται μέσα στο ανθρώπινο σώμα και οι αλλεργικές αντιδράσεις στην πλατίνα είναι σπάνιες, χρησιμοποιείται σε ιατρικά εμφυτεύματα όπως οι βηματοδότες. Τα στοιχεία της ομάδας της πλατίνας χρησιμοποιούνται επίσης σε φάρμακα για την καταπολέμηση του καρκίνου. Ο λευκός τους χρωματισμός και η αντοχή τους στο αμαύρωμα καθιστούν τα κράματα πλατίνας ιδανική επιλογή για κοσμήματα. Η πλατίνα, το παλλάδιο και το ρόδιο χρησιμοποιούνται για επενδύσεις με τη μορφή κερμάτων και ράβδων, καθώς και ως μετοχές ή αμοιβαία κεφάλαια (USGS, 2014).

Τα PGE είναι από τα σπανιότερα μέταλλα στη γη- ο ανώτερος φλοιός της γης περιέχει περίπου 0,0005 μέρη ανά εκατομμύριο (ppm). Ο μέσος βαθμός περιεκτικότητας σε PGE σε μεταλλεύματα που εξορύσσονται κυρίως για τις συγκεντρώσεις τους σε PGE κυμαίνεται από 5 έως 15 ppm. Πάνω από 100 ορυκτά περιέχουν PGE ως βασικό συστατικό. Στα περισσότερα πετρώματα, τα ορυκτά της ομάδας του λευκόχρυσου είναι πολύ μικρά, με διάμετρο που κυμαίνεται από λιγότερο από ένα μικρόμετρο έως μερικές εκατοντάδες μικρόμετρα. Οι γεωλόγοι μπορεί να περάσουν μια ολόκληρη ζωή δουλεύοντας πάνω σε πετρώματα εμπλουτισμένα σε PGE και να μην δουν ποτέ ένα ορυκτό της ομάδας της πλατίνας σε δείγμα χειρός, οπότε η παρουσία της PGE πρέπει να επιβεβαιωθεί με εργαστηριακή ανάλυση. Τα περισσότερα από τα PGE στον κόσμο συγκεντρώνονται σε μαγματικά κοιτάσματα μεταλλευμάτων, τα οποία σχηματίζονται κατά την ψύξη και την κρυστάλλωση του μάγματος. Εάν τα βασικά μάγματα κορεστούν σε θείο, ένα μη αναμίξιμο θειούχο ρευστό θα διαχωριστεί από το πυριτικό μάγμα και θα σχηματίσει σφαιρίδια που συγκεντρώνουν φυσικά μέταλλα όπως ο χαλκός, το νικέλιο και οι PGE. Καθώς το μάγμα ψύχεται, τα σφαιρίδια σουλφιδίων εμπλουτισμένα με PGE συσσωρεύονται και κρυσταλλώνονται για να σχηματίσουν κοιτάσματα ορυκτών PGE. Τα περισσότερα μαγματικά κοιτάσματα χαλκού-νικελίου-PGE εντοπίζονται σε ηφαιστειακά και πλουτωνικά πετρώματα που σχηματίζονται όπου μεγάλοι όγκοι βασικού μάγματος μετακινούνται από τον μανδύα της Γης στον φλοιό. Η διάβρωση των εμπλουτισμένων με PGE πετρωμάτων και οι φυσικές συγκεντρώσεις σωματιδίων βαρέων ορυκτών, από τη δράση κινούμενων υδάτων, μπορούν να δημιουργήσουν κοιτάσματα ιζημάτων εμπλουτισμένα με PGE (USGS, 2014).

Από την εποχή των πρωτοπόρων γεωχημικών ερευνών σε υπερβασικά πετρώματα, ο χρωμίτης έχει αναγνωριστεί ως δυνητικός συγκεντρωτής στοιχείων της ομάδας του λευκόχρυσου (PGE = Os, Ir, Ru, Rh, Pt, Pd). Αυτά τα μέταλλα μεταφέρονται κυρίως σε μικροσκοπικούς κόκκους (<20 m) συγκεκριμένων ορυκτών της ομάδας του λευκόχρυσου

(PGM) που εμφανίζονται κλεισμένοι σε κρυστάλλους χρωμίτη, στο χείλος των κρυστάλλων ή στο ενδιάμεσο πυριτικό στρώμα του χρωμίτη (Zaccarini et al., 2018). Λόγω της υφολογικής τους θέσης, τα PGM που δεν περιλαμβάνονται στον χρωμίτη εκτίθενται σε αλλοίωση και μπορούν να επανατοποθετηθούν σε μικρή κλίμακα, υπό τη δράση υδαρών ρευστών χαμηλών θερμοκρασιών (Garuti & Zaccarini, 1997; Stockman & Hlava, 1984). Τα PGM που περιέχονται στον φρέσκο χρωμίτη διατηρούνται από την αλλοίωση και γενικά θεωρείται ότι έχουν κρυσταλλωθεί σε υψηλή θερμοκρασία. Από την αρχή διαπιστώθηκε ότι ορισμένοι χρωμίτες προτιμούν τη συγκέντρωση IPGE (Os, Ir, Ru) και άλλοι κυριαρχούνται από PPGE (Rh, Pt, Pd), ανάλογα με την κλασμάτωση των PGE κατά την κρυστάλλωση του μητρικού τήγματος και τη μερική τήξη της πηγής του μανδύα (Zaccarini et al., 2018).

Παράλληλα, έχει υπάρξει σημαντική συζήτηση σχετικά με το μηχανισμό με τον οποίο οι διακριτοί κρύσταλλοι των πλατινοειδών περικλείονται στον χρωμίτη. Ορισμένοι συγγραφείς υποστηρίζουν ότι τα PGM διαλύονται από το οξειδίο-ξενιστή σε κάποιο υποστερεό στάδιο και ορισμένα πειράματα έχουν αποδείξει ότι ορισμένα PGE έχουν κρυσταλλοχημική συμβατότητα με τη δομή του σπινέλιου, οπότε ενσωματώνονται ως πραγματικό στερεό διάλυμα στο οξειδίο (Carobianco & Drake, 1990). Ωστόσο, αυτός ο μηχανισμός, δεν μπορεί να εξηγήσει την ορυκτολογική ποικιλομορφία των πλατινοειδών που περιλαμβάνονται σε έναν μόνο κρύσταλλο χρωμίτη, ούτε μπορεί να εξηγήσει την ομοιότητα της σύνθεσης των PGM που βρίσκονται στον χρωμίτη και στα συγκρυσταλλωμένα μαφικά πυριτικά άλατα (Legendre & Augé, 1986; Page et al., 1982; Talkington & Watkinson, 1984; Garuti et al., 1995). Είναι πλέον ευρέως αποδεκτό ότι τα πρωτογενή πλατινοειδή είναι παρθένες υγρές φάσεις, μηχανικά παγιδευμένες στον χρωμίτη και στα μαφικά πυριτικά άλατα που καταβυθίζονται από το μάγμα σε υψηλές θερμοκρασίες. Αυτό το μοντέλο μπορεί εύκολα να εξηγήσει την ορυκτολογική μεταβλητότητα των σύνθετων εγκλεισμάτων που περιέχουν PGM και αναφέρονται σε διάφορους χρωμίτες (Talkington & Watkinson, 1984; Constantinides et al., 1980; Stockman & Hlava, 1984; Augé & Johan, 1988).

Η κρυστάλλωση του PGM σε υψηλές θερμοκρασίες υποστηρίζεται κατά κάποιο τρόπο από τη λεγόμενη "θεωρία συμπλόκων" (Tredoux et al., 1995), που ορίζει ότι στα φυσικά μάγματα τα PGE δεν εμφανίζονται ως ελεύθερα κατιόντα, αλλά σχηματίζουν ατακτοποιητές συστάδες που αποτελούνται από μερικές εκατοντάδες άτομα, αιωρούμενα στο τήγμα. Λόγω των φυσικών και χημικών ιδιοτήτων τους, οι συστάδες τείνουν να συνενώνονται με τη μείωση της θερμοκρασίας και να σχηματίζουν συγκεκριμένα κράματα PGM, σουλφίδια ή ενώσεις με άλλα ligands (π.χ. As, Te, Bi, Sb) (Zaccarini et al., 2018).

2. Στοιχεία της ομάδας της πλατίνας (PGE)

2.1. Γενικά

Το χημικό στοιχείο λευκόχρυσος (κοινό όνομα: πλατίνα, λατινικά: platinum) είναι σπάνιο, βαρύ, πολύ δύστηκτο, αργυρόλευκο, ελατό και όλκιμο μέταλλο με ισχυρή μεταλλική λάμψη και με ατομικό αριθμό 78 και σχετική ατομική μάζα 195,084 (pubchem.ncbi.nlm.nih.gov). Το χημικό του σύμβολο είναι "Pt" και ανήκει στην ομάδα 10 του περιοδικού πίνακα, στην περίοδο 6 και στην ομάδα της 3ης κύριας σειράς των στοιχείων μετάπτωσης (Παρασκευάς, 2013). Έχει θερμοκρασία τήξης 1768,3 °C και θερμοκρασία βρασμού 3825 °C. Έχει ηλεκτρονική διαμόρφωση [Xe] 4f¹⁴5d⁹6s¹. Από άποψη χημικής συμπεριφοράς, ανήκει στην ομάδα που φέρει το όνομά του: "Ομάδα του λευκόχρυσου", PGM, Platinum Group Metals ή PGE, Platinum Group Elements (Chaston, 1965). Ο λευκόχρυσος βρίσκεται ως ελεύθερο μέταλλο, μαζί με τα άλλα PGM, σε μαγματικά κοιτάσματα στη Νότια Αφρική, στη Σιβηρία, στην Βόρεια Αμερική αλλά και σε προσχωματικές αποθέσεις στη Νότια Αμερική και σε ποταμούς στα Ουράλια όρη και στον Καναδά (Παρασκευάς, 2013). Επίσης, είναι αργυρόλευκο μέταλλο με ισχυρή μεταλλική λάμψη, πολύ δύστηκτο ενώ μπορεί να μορφοποιηθεί εύκολα σε σύρματα και να σφυρηλατηθεί. Είναι επίσης καλός αγωγός του ηλεκτρισμού και της θερμότητας.

Η Πλατίνα (Pt) αποτελεί ένα μέταλλο, το οποίο είναι κοινώς κατηγοριοποιημένο με άλλα πέντε στοιχεία: Το Ρουθίνιο (Ru), το Ρόδιο (Rh), το Παλλάδιο (Pd), το Όσμιο (Os) και το Ιρίδιο (Ir). Αυτά τα μέταλλα, τα οποία εμφανίζουν παρόμοιες ιδιότητες, αναφέρονται ως Μέταλλα ή Στοιχεία της Ομάδας της Πλατίνας ή PGEs (Platinum Group Elements) (Παρασκευάς, 2013). Τα ορυκτά αποθέματα που περιέχουν πλατίνα, θα περιέχουν και ποσότητες από τα υπόλοιπα PGE σε ποικίλες αναλογίες. Τα πλατινοειδή καταλαμβάνουν τη δεύτερη και τρίτη σειρά της όγδοης υποομάδας (ομάδα VIII) των μεταβατικών στοιχείων ή στοιχείων μετάπτωσης (transition elements) του Περιοδικού Πίνακα, μαζί με τα στοιχεία σίδηρο (Fe), κοβάλτιο (Co) και νικέλιο (Ni) (Wikipedia, 2015). Τα στοιχεία ρουθίνιο, ρόδιο και παλλάδιο ταξινομούνται στα ελαφριά πλατινοειδή λόγω του μικρού ατομικού τους αριθμού (Ru-44, Rh-45, Pd-46), ενώ τα υπόλοιπα τρία στοιχεία ανήκουν στην ομάδα βαρέων πλατινοειδών (Os-76, Ir-77, Pt-78) (Καψιώτης, 2008).

Τα πλατινοειδή είναι δυσεύρετα και η περιεκτικότητά τους στο γήινο φλοιό μετράται σε ppb (parts per billion) (Κοκκαλιάρη, 2015). Τα μέταλλα αυτά, επίσης, παρουσιάζουν και υψηλό σημείο τήξης, μηχανική αντοχή στις υψηλές θερμοκρασίες, σταθερές ηλεκτρικές ιδιότητες και υψηλή πυκνότητα. Η πλατίνα συγκεκριμένα είναι ιδιαίτερα ανθεκτική στον

αποχρωματισμό και τη φθορά (Sönte, 1997; minerals.usgs.gov; Απόφαση 97/26/EK). Τα PGEs μαζί με τον χρυσό (Au) και τον άργυρο (Ag) αποτελούν τα πολύτιμα ή ευγενή μέταλλα (Holleman & Wiberg, 1985) και οι θέσεις των Au και Ag στον περιοδικό πίνακα είναι γειτονικές με την θέση των PGE, υποδηλώνοντας την παρόμοια γεωχημική τους συμπεριφορά που βασίζεται στις χημικές τους ιδιότητες (Κοκκαλιάρη, 2015). Επίσης, τα PGMs εμφανίζουν μεγάλη αντίσταση στην οξειδωση και τη διάβρωση, ικανότητα να ανθίστανται σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες (έχουν σημεία τήξης υψηλότερα των 1500 °C), δεν διαλύονται σε οξέα και είναι εξαιρετικοί αγωγοί του ηλεκτρισμού. Τέλος, εμφανίζουν εξαιρετικές καταλυτικές ιδιότητες (Παρασκευάς, 2013).

Τα μέταλλα της ομάδας των πλατινοειδών συμπεριφέρονται ως σιδηρόφιλα στοιχεία και διαθέτουν ικανότητα σχηματισμού κραμάτων με μέταλλα όπως ο Fe (Ahmed & Arai, 2002). Επίσης σημαντικό στοιχείο αποτελεί η υψηλή συγκέντρωση των PGEs, της τάξεως των ppm, σε σιδηρούχους μετεωρίτες που είναι ανάλογη με την υψηλή συμμετοχή σουλφιδίων. Συνεπώς, λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω, μεγαλύτερη συγκέντρωση των PGEs αναμένεται στον πυρήνα της γης, σε σχέση με τον εξωτερικό φλοιό, όπου πιστεύεται ότι συγκεντρώθηκαν εκεί μαζί με Fe και Ni κατά τα πιο πρώιμα στάδια εξέλιξης του πλανήτη μας (Jagoutz et al., 1979; Arculus & Delano, 1981).

Σύμφωνα με τους Barnes et al. (1985) και Brenan & Andrews (2001), τα στοιχεία της ομάδας των πλατινοειδών ταξινομούνται σε δύο κατηγορίες: α) τα IPGE και β) τα PPGE. Τα στοιχεία Os, Ir, και Ru, αποτελούν την ομάδα των IPGE, που χαρακτηρίζονται ως τα ανταγωνιστικά ή συμβατά στοιχεία (compatible) της ομάδας των πλατινοειδών. Η ομάδα των IPGE χαρακτηρίζεται από την τάση να συγκεντρώνεται στις πρώτες φάσεις κρυστάλλωσης του μάγματος, όπως είναι ο ολιβίνης και ο χρωμίτης, συνεπώς τα κοιτάσματα των PGEs είναι γενετικά συνδεδεμένα με τα αντίστοιχα των χρωμιτών. Τα IPGE συμμετέχουν στην κρυσταλλική δομή του χρωμίτη είτε με τη μορφή εγκλεισμάτων, είτε σχηματίζοντας κράματα ή δύστηκτα σουλφίδια (Talkingston & Lipin, 1986; Garutti et al., 1999a; Maier et al., 1999). Αντίθετα, τα στοιχεία Rh, Pt, και Pd, που χαρακτηρίζονται ως μη ανταγωνιστικά ή ασύμβατα (incompatible) σχηματίζουν την ομάδα PPGE και προτιμούν να παραμένουν στο βασαλτικό τήγμα (Carobianco et al., 1994). Τα PPGE έχουν ασθενέστερο σιδηρόφιλο χαρακτήρα και έτσι σχετίζονται με την παρουσία κυρίως σουλφιδίων βασικών μετάλλων (πεντλανδίτη, χαλκοπυρίτη κλπ) και είναι άμεσα εξαρτώμενα από τις τιμές της διαφυγότητας του θείου (fS_2 : sulfur fugacity) του εκάστοτε μάγματος (Barnes & Naldrett, 1986; Keays, 1995).

2.2. Ιδιότητες των στοιχείων της ομάδας της πλατίνας

Στον πίνακα 1 παρουσιάζονται κάποια βασικά στοιχεία της ταυτότητας των στοιχείων, καθώς και φυσικές και ατομικές ιδιότητες των έξι στοιχείων της ομάδας της πλατίνας.

Πίνακας 1: Χαρακτηριστικά των Στοιχείων της Ομάδας της Πλατίνας (pubchem.ncbi.nlm.nih.gov).

	Os	Ir	Ru	Rh	Pt	Pd
Ατομικός αριθμός	76	77	44	45	78	46
Κατηγορία	Στοιχείο μετάπτωσης	Στοιχείο μετάπτωσης	Στοιχείο μετάπτωσης	Στοιχείο μετάπτωσης	Στοιχείο μετάπτωσης	Στοιχείο μετάπτωσης
Ομάδα, περίοδος	8, 6	9, 6	8, 5	9, 5	10, 6	10, 5
Σχετικά ατομική μάζα	190,23	192,217	101,07	102,905	195,084	106,42
Ηλεκτρονική διαμόρφωση	[Xe] 4f ¹⁴ 5d ⁶ 6s ²	[Xe] 6f ¹⁴ 5d ⁷ 6s ²	[Kr] 4d ⁷ 5s ¹	[Kr] 4d ⁸ 5s ¹	[Xe] 4f ¹⁴ 5d ⁹ 6s ¹	[Kr] 4d ¹⁰
Ατομική ακτίνα	135pm	136pm	134 pm	134 pm	139 pm	139 pm
Κρυσταλλικό σύστημα	Εξαγωνικό	Κυβικό	Εξαγωνικό	Κυβικό	Κυβικό	Κυβικό
Σημείο τήξης	3033°C	2466 °C	2334°C	1964°C	1768,4°C	1554,9°C
Σημείο βρασμού	5012 °C	4428 °C	4150 °C	3695 °C	3825 °C	2963 °C
Πυκνότητα (20 °C)	22,59 g/cm ³	22,56 g/cm ³	12,45 g/cm ³	12,41 g/cm ³	21,45 g/cm ³	12,02 g/cm ³
Ειδική θερμοχωρητικότητα	24,7 J/mol*K	25,1 J/mol*K	24,06 J/mol*K	24,98 J/mol*K	25,86 J/mol*K	25,98 J/mol*K
Ειδική ηλεκτρική αντίσταση	96,6 nΩ*m	47,1 nΩ*m	74,27 nΩ*m	49 nΩ*m	103 nΩ*m	99,6 nΩ*m
Ειδική ηλεκτρική αγωγιμότητα	10 MS/m	21,23 MS/m	13,46 MS/m	20,41 MS/m	9,7 MS/m	10,04 MS/m
Σκληρότητα Mohs	7,0	6,5	6,5	6,0	4-4,5	4,75

2.1.Εφαρμογές των πλατινοειδών

Λόγω των πολλών και ιδιαίτερων φυσικών και χημικών ιδιοτήτων, τα PGE συναντώνται σε ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών όπως:

- σε κοσμήματα,

- σε καταλυτικούς μετατροπείς για αυτοκίνητα και άλλες συναφείς χρήσεις στα αυτοκίνητα, όπως μπουζί και αισθητήρες οξυγόνου,
- σε γενικές εφαρμογές κατάλυσης σε βιομηχανικές παραγωγικές διαδικασίες (καταλύτες υδρογόνου), όπως στη διύλιση πετρελαίου και στην παραγωγή υάλου για οθόνες υγρών κρυστάλλων (LCD),
- σε ηλεκτρονικό εξοπλισμό, όπως οι σκληροί δίσκοι προσωπικών υπολογιστών, και
- σε ηλεκτρονικά στοιχεία των κεραμικών πυκνωτών πολλαπλών στρώσεων (MLCC Multi Layer Ceramic Conductors), οι οποίοι χρησιμοποιούνται ευρέως σε εξοπλισμό ηλεκτρονικών υπολογιστών και τηλεπικοινωνιών.

Οι ιδιότητες των PGMs τα καθιστούν σημαντικά στην αυτοκινητοβιομηχανία, στη βιομηχανία ηλεκτρονικών και τη χημική βιομηχανία, και, όσον αφορά την πλατίνα, επίσης για κοσμήματα (Παρασκευάς, 2013).

2.2. Ταξινόμηση των μεταλλευμάτων των στοιχείων της ομάδας της πλατίνας

Διάφορες μέθοδοι (όπως τα ορυκτολογικά δεδομένα, περιεκτικότητα σε χρωμίτη, περιεκτικότητα σε PGE και περιεκτικότητα σε θείο, κ.λπ.) χρησιμοποιούνται για την ταξινόμηση των μεταλλευμάτων PGEs. Ένας συνδυασμός περιεκτικότητας σε PGEs και του τρόπου γεωλογικής εμφάνισης έχει υιοθετηθεί για την ταξινόμηση των τύπων μεταλλευμάτων (Cole and Ferran, 2002). Γενικά, τα μεταλλεύματα των PGEs ομαδοποιούνται σε τρεις κύριες κατηγορίες σύμφωνα με τη μέθοδο αυτή (Xiao, 2004).

1. Κυρίαρχα μεταλλεύματα των PGEs - τα μεταλλεύματα αυτά εκμεταλλεύονται κυρίως για την περιεκτικότητά τους σε PGEs ή άλλα συναφή μέταλλα, όπως Cu, Ni και Co, που παράγονται ως υποπροϊόντα. Οι οικονομικές αξίες των PGEs είναι, σε γενικές γραμμές, μεγάλες σε σύγκριση με τις αξίες των υποπροϊόντων (Xiao & Laplante, 2004).

2. Μεταλλεύματα με κυρίαρχο το Ni-Cu -τα μεταλλεύματα που εξορύσσονται κυρίως για την αξία του Ni και του Cu. Τα PGE παράγονται ως παραπροϊόντα. Συνήθως, η οικονομική σημασία των PGEs σε αυτά τα μεταλλεύματα είναι δευτερεύουσα. Ωστόσο, μπορούν, σε ορισμένες περιπτώσεις, να γίνουν οι πολύ σημαντικοί "αποφασιστικοί παράγοντες" αναφορικά με τα οικονομικά (Xiao & Laplante, 2004).

3. Διάφορα μεταλλεύματα - τα μεταλλεύματα αυτά περιέχουν πολύ χαμηλές συγκέντρωση PGEs σε σύγκριση με τους δύο προηγούμενους τύπους μεταλλευμάτων. Η οικονομική αξία των PGEs είναι μικρή σε σύγκριση με το πρωτογενές προϊόν (Xiao & Laplante, 2004).

2.2.1. Κυρίαρχα μεταλλεύματα PGEs

1. Τύπος Merensky

Ο Dr Hans Merensky ανακάλυψε το λευκοχρυσοφόρο ορίζοντα στη Νότια Αφρική που έμελλε να φέρει το όνομά του. Γενικά τα κοιτάσματα τύπου Merensky είναι στρωματοποιημένα με διάσπαρτα θειούχα. Η συνολική περιεκτικότητα σε θειούχα είναι αρκετά χαμηλή. Σε ορισμένες περιπτώσεις, τα PGE συνδέονται με χρωμίτες καθώς και με σουλφίδια. Μερικά παραδείγματα αυτού του τύπου κοιτασμάτων είναι ο "ύφαλος" Merensky και το Great Dyke στη Ζιμπάμπουε (Cole and Ferron, 2002). Το Stillwater θεωρείται ότι είναι παρόμοιο στη φύση με το σύμπλεγμα Merensky (Zientek et al., 2002).

2. Τύπος χρωμίτη

Υπάρχει συσχέτιση μεταξύ του χρωμίτη και της μεταλλοφορίας σε PGEs. Δύο τύποι κοιτασμάτων χρωμίτη είναι οικονομικά ή δυνητικά οικονομικά σημαντικά. Τα στρωματοειδή κοιτάσματα χρωμίτη εμφανίζονται στο Bushveld (UG2), στο Great Dyke, στο Stillwater complex (Lower Chromitites), και στο Muskox intrusion (Βορειοδυτικά Εδάφη). Όλα είναι γνωστό ότι περιέχουν συγκεντρώσεις PGE (Xiao & Laplante, 2004).

3. Τύπος προσχωματικού κοιτάσματος

Οι αποθέσεις αυτές περιλαμβάνουν αλλουβιακές, εκλούβιες και αλασκικές αποθέσεις. Οι αλλουβιακές και εκλούβιες αποθέσεις προέρχονται συνήθως από αποσαθρωμένους υπερφαινούς βράχους. Συνήθως, τα PGE εμφανίζονται ως κράματα πλούσια σε Pt με τη μορφή χαλαρών κόκκων ή ψηφίδων (Xiao & Laplante, 2004).

4. Σωλήνες Δουνίτη

Σωλήνες δουνίτη εμφανίζονται στο ανατολικό και δυτικό τμήμα του συμπλέγματος Bushveld. Σε αυτούς τους σωλήνες έχουν αναφερθεί περιεκτικότητες έως και 2000 g/t σε ορισμένα τμήματα. Η ορυκτολογία των σωλήνων διαφέρει σημαντικά από τα κοιτάσματα Merensky και UG2 στο ότι τα θειούχα των PGE είναι σπάνια. Το 50 % των PGE παρουσιάζεται ως κράματα Pt-Fe, ένα επιπλέον 30% των PGE παρουσιάζονται ως σπερρυλίτης και γκρεβερσίτης. Οι PGE εξορύχθηκαν και ανακτήθηκαν με μεθόδους ανάκτησης βαρύτητας.

2.2.2. Μεταλλεύματα με κυρίαρχο το Ni-Cu

Συνήθως, τα PGE ανακτώνται ως παραπροϊόντα και παίζουν "μικρότερο" ρόλο σε αυτόν τον τύπο μεταλλεύματος. Οι Naldrett και Macdonald (1980) ταξινομήσαν τα μεταλλεύματα με

κυρίαρχα θειούχα ιόντα Ni-Cu ανάλογα με τις συνθήκες του πετροτεκτονικού τους περιβάλλοντος. Οι ακόλουθες τέσσερις κατηγορίες αντιπροσωπεύουν περισσότερο από το 95% των γνωστών μεταλλευμάτων με κυρίαρχο το Ni-Cu:

1. Τάξη I: Νοριτικά (Nortitic) πετρώματα που συνδέονται με κάποια astrobleme (ουλή που προκύπτει από πρόσκρουση μετεωρίτη). Το μόνο γνωστό παράδειγμα αυτού του τύπου είναι το ορυχείο Sudbury στον Καναδά (Xiao & Laplante, 2004).
2. Τάξη II: διεισδυτικά ισοδύναμα των βασαλτών πλημμύρας που συνδέονται με ενδοηπειρωτικά ρήγματα. Τα πιο σημαντικά παραδείγματα αυτού του τύπου μεταλλεύματος είναι το κοιτάσμα Norilsk στη Ρωσία. Το σύμπλεγμα Duluth στη Μινεσότα είναι ένα άλλο παράδειγμα αυτής της κατηγορίας μεταλλεύματος (Xiao & Laplante, 2004).
3. Τάξη III: Μαγματική δραστηριότητα που συνοδεύει τα πρώιμα στάδια του σχηματισμού των ζωνών πρασινόλιθου του Προκαμβρίου. Η κατηγορία III μπορεί να υποδιαιρεθεί σε δύο περαιτέρω κατηγορίες. Παραδείγματα των κοιτασμάτων αυτής της κλάσης περιλαμβάνουν τη χερσόνησο Kola, Lyn Lake, και Thompson και το βόρειο άκρο της χερσονήσου Ungava στον Καναδά (Xiao & Laplante, 2004).
4. Τάξη IV: Θολεϊτικές διεισδύσεις, γενικά ταυτόχρονες με την ορογένεση στις ορογενετικές ζώνες του Φανεροζωικού (Xiao & Laplante, 2004).

2.2.3. Διάφορα μεταλλεύματα

Πρόκειται για μεταλλεύματα στα οποία η ανάκτηση των PGE είναι δύσκολη λόγω χαμηλής συγκέντρωσης και παρουσίας PGEs κυρίως σε στερεό διάλυμα με άλλα ορυκτά. Τα PGEs θεωρούνται "βοηθητικά" μέταλλα και τα κοιτάσματα δεν εξορύσσονται για χάρη των PGEs και σε ορισμένες περιπτώσεις τα PGEs δεν ανακτώνται ως υποπροϊόν (Xiao & Laplante, 2004).

3. Κοιτάσματα και γεωχημική συμπεριφορά των στοιχείων της ομάδας της πλατίνας

3.1. Τύποι κοιτασμάτων των στοιχείων της ομάδας της πλατίνας

Ανάλογα με τις μεταλλογεννητικές διεργασίες που επικράτησαν, τα κοιτάσματα PGEs διακρίνονται σε μαγματικά κοιτάσματα, σε υδροθερμικά κοιτάσματα, καθώς επίσης και σε αλλουβιακά κοιτάσματα (Κοκκαλιάρη, 2015).

Τα μαγματικά ή ορθομαγματικά κοιτάσματα είναι αυτά που δημιουργούνται στο μαγματικό στάδιο και περιλαμβάνουν όλους εκείνους τους τύπους συγκεντρώσεων PGE που δημιουργούνται στο μαγματικό στάδιο/περιβάλλον (Κασιώτης, 2008). Τα μαγματικά κοιτάσματα χαρακτηρίζονται από την απόθεση Platinum Group Elements πλουσίων σε μέταλλα και την δημιουργία ορυκτών Platinum Group Metals, μαζί με άλλα ορυκτά όπως είναι ο χρωμίτης, μέσα σε ενστρωμένα υπερβασικά πετρώματα ή οφιολιθικά συμπλέγματα (Κοκκαλιάρη, 2015). Τα PGM που σχηματίζονται, τείνουν να απομείνουν από το πυριτικό μάγμα μαζί με άλλα βαρέα ορυκτά, όπως τα σουλφίδια Cu-Ni και ο χρωμίτης, καθώς και να συσσωρεύονται σε λεπτά στρώματα, τα οποία μπορούν να είναι ανιχνεύσιμα ακόμα και στις στρωματικές διεισδύσεις (Κασιώτης, 2008). Η δημιουργία τέτοιου είδους κοιτασμάτων συνδέεται με την δημιουργία χρωμιτών ή/και μαγματικών κοιτασμάτων Ni – Cu – Fe και σχετίζεται με:

- α) Μείξη μαγμάτων (magma mixing)
- β) Μόλυνση του μάγματος από εξωτερική πηγή
- γ) Υστερομαγματικές διεργασίες

Με την μείξη, διαφορετικής σύστασης μαγμάτων, ενός πρωτόγονου και ενός εξελιγμένου, το αποτέλεσμα είναι η αύξηση της συγκέντρωσης του θείου (S) στο προκύπτον μάγμα και την απόμειξη του από αυτό με τη μορφή σουλφιδικών σταγονιδίων (Irvine, 1977; Proenza et al., 2001). Η γένεση κοιτασμάτων πλουσίων σε PGEs μέσω της μόλυνσης του μάγματος από εξωτερική πηγή, εξαρτάται αφενός από την περιεκτικότητα των PGEs στο αρχικό μάγμα, αφετέρου από την ποσότητα του θείου που είναι ικανή για την συλλογή των PGEs (scavenging) (Κοκκαλιάρη, 2015). Τα PGEs παρουσιάζουν μια έντονη τάση γεωχημικής προτίμησης στα σουλφίδια παρά στις πυριτικές φάσεις, γεγονός που ευνοεί και τη δέσμευσή τους από αυτές (Naldrett & Duke, 1980; Bacuta et al., 1990). Ένα τέτοιο χαρακτηριστικό μοντέλο ακολουθείται για τη γένεση των πλούσιων σε PGEs χρωμιτιτών στο σύμπλεγμα του Bushveld στην Αφρική, όπου η μείξη ενός μπονινιτικής σύστασης μάγματος πλούσιο σε PGE

με κάποιο θολειτικής σύστασης βασαλτικό μάγμα, ευθύνεται για τη δημιουργία του γνωστού για την περιεκτικότητά του σε PGEs, υφάλου Merensky (Naldrett, 1997).

Η μόλυνση του μάγματος μέσω της αφομοίωσης υλικών από εξωτερική πηγή, οδηγεί στη δημιουργία PGE-κοιτασμάτων, κατόπιν κορεσμού σε θείο. Το προστιθέμενο υλικό μπορεί να είναι είτε πυριτίο (Si) προερχόμενο από την αφομοίωση ιζημάτων, ή κάποιο γρανιτικό τήγμα, είτε υλικό πλούσιο σε θείο (S) (Κασιώτης, 2008). Μέσω της αφομοίωσης φλοιϊκών ιζημάτων, για παράδειγμα πλουσίων σε Si, είναι δυνατό να επιτευχθεί κορεσμός του S. Το συγκεκριμένο μοντέλο έχει προταθεί ώστε να εξηγηθεί ο σχηματισμός των αποθέσεων των Fe – Ni σουλφιδίων σε οφιολιθικό σύμπλεγμα της περιοχής Ontario του Καναδά (Naldrett & McDonald, 1980). Η ποσότητα των PGEs σε αυτά τα κοιτάσματα δεν εξαρτάται μόνο από την ποσότητα των PGEs του μάγματος αλλά και από το περιεχόμενο των σουλφιδικών σταγονιδίων που είναι υπεύθυνα για την συλλογή (scavenging) των PGEs.

Οι υστερομαγματικές διεργασίες θεωρούνται ικανές για τη δημιουργία σημαντικών κοιτασμάτων PGEs. Τέτοιου είδους διεργασίες προκαλούνται από υπολειμματικά ρευστά του μάγματος, που προκαλούν σημαντικές χημικές και ορυκτολογικές αλλαγές των μαγματικών σχηματισμών. Τέτοιες διεργασίες είναι υπεύθυνες για υψηλές συγκεντρώσεις PGEs σε σχηματισμούς που ονομάζονται χορτονόλιθοι και είναι κατακόρυφα σώματα δουνιτών (με σύσταση ολιβίνη 50 – 70 % Fa) με την μορφή αγωγών διαμέτρου μερικών μέτρων και βάθους λίγων εκατοντάδων μέτρων (Κοκκαλιάρη, 2015). Σύμφωνα με τον Schiffries (1982) ο σχηματισμός τους οφείλεται σε αντίδραση ενός διαλύματος χλωριδίων με τον ξενιστή νορίτη, η οποία οδηγεί στη δημιουργία δουνίτη μέσω διεργασιών αποπυριτίωσης του πυρόξενου και παραγωγής σιδηρούχου ολιβίνη.

Τα υδροθερμικά κοιτάσματα PGEs, σχηματίζονται από επιγενετικά ρευστά, σε μια ευρεία ποικιλία γεωλογικών περιβαλλόντων, όπως: α) ζώνες διάτμησης που τέμνουν βασικές/υπερβασικές εμφανίσεις, β) σχετιζόμενες με κοιτάσματα πορφυρικού Cu αποθέσεις πολύτιμων μετάλλων και γ) ανθρακικά ιζήματα εντός των οποίων πραγματοποιείται διαγενετική ροή εμπλουτισμένων σε μέταλλα ρευστών (Κασιώτης, 2008) Τα κοιτάσματα αυτά κατά κύριο λόγο είναι πλούσια σε Pt και Pd, καθώς αυτά είναι τα πλέον ευκίνητα πλατινοειδή και μπορούν να μετακινηθούν μέσω υδροθερμικών διαλυμάτων (Naldrett, 1981).

Τα προσχωματικά κοιτάσματα PGE ή κοιτάσματα PGEs αλλουβιακής προέλευσης αποτελούν ιζηματογενείς αποθέσεις κερματισμένων-θρυμματισμένων υλικών, που προήλθαν από τις φυσικοχημικές διεργασίες αποσάθρωσης και διάβρωσης υπαρχόντων πετρωμάτων, πλουσίων σε PGEs, συσχετιζόμενα με βασικά/υπερβασικά συμπλέγματα αλασκικού ή αλπικού τύπου (Κοκκαλιάρη, 2015; Κασιώτης, 2008). Η περιοχή Choco της Κολομβίας

αποτελεί σημαντική πηγή αλλουβιακής προέλευσης PGE (Robson, 1985), και παρομοίως πλούσιες σε PGE αλλουβιακές αποθέσεις περιλαμβάνονται στον κόλπο Goodnews της Αλάσκα, οι οποίες προέρχονται από αλασκικού τύπου υπερβασικά συμπλέγματα (Naldrett, 1981).

3.2. Γεωχημική συμπεριφορά των στοιχείων της ομάδας της πλατίνας

Τα PGE, από γεωχημική άποψη συμπεριφέρονται ως σιδηρόφιλα στοιχεία (Ahmed & Arai, 2002), κάτι που γίνεται εμφανές και από τις υψηλές συγκεντρώσεις τους στους σιδηρομετεωρίτες καθώς και από τη συχνή εμφάνισή τους στις πλούσιες σε Fe-Ni μεταλλικές φάσεις των χονδριτών (Κασιώτης, 2008). Αυτό το χαρακτηριστικό τους επίσης τους δίνει τη δυνατότητα να σχηματίζουν κράματα με άλλα μέταλλα. Υψηλότερες περιεκτικότητες αυτών, αναμένονται κυρίως στον πυρήνα και το μανδύα της Γης, όπου εικάζεται ότι συγκεντρώθηκαν κατά τα πρώιμα στάδια εξέλιξης του πλανήτη (Jagoutz et al., 1979; Arculus & Delano, 1981).

Η εξαγωγή των PGE από μια μανδυακή πηγή επιτυγχάνεται αρχικά με τη διαδικασία της μερικής τήξης (Barnes & Maier, 1999). Η αρχική συγκέντρωση στην τηκόμενη μανδυακή πηγή, ο βαθμός τήξης, καθώς και οι επικρατούσες, στο συγκεκριμένο τμήμα του μανδύα, φυσικοχημικές συνθήκες fO_2 και fS_2 , αποτελούν καθοριστικούς παράγοντες της σχετικής αφθονίας με την οποία θα συμμετάσχουν τα στοιχεία στο παραγόμενο μάγμα (Κασιώτης, 2008). Αμέσως μετά τον γήινο πυρήνα, ακολουθεί ο μανδύας, ως η αμέσως πλουσιότερη πηγή PGE (Κασιώτης, 2008). Η πετρολογική σύσταση του μανδύα, μοιάζει με αυτή του λερζόλιθου, με 65% κ.ο. ολιβίνη, 25% κ.ο. ορθοπυρόξενο, 7% κ.ο. κλινοπυρόξενο, 2% κ.ο. σπινέλιους, 0,07% κ.ο. σουλφίδια και ίσως μεταλλικά κράματα με 0,03% κ.ο. (Κασιώτης, 2008).

4. Τα ορυκτά της ομάδας της πλατίνας (PGM)

Σε αντίθεση με τον χρυσό και τα κύρια βασικά μέταλλα, τα οποία σχηματίζουν ένα αρκετά μικρό αριθμό ορυκτών, υπάρχουν 109 ορυκτά της πλατίνας PGM (Platinum Group Minerals) που αναγνωρίζονται από τη Διεθνή Ορυκτολογική Ένωση (IMA), που κυμαίνονται από τα σουλφίδια (π.χ. βραγγίτης, $(Pt,Pd)S$) έως τα τελλουρίδια (π.χ. μασλοβίτης, $PtBiTe$), τα αντιμονίδια (π.χ. σαντμπουρίτης, $PdSb$) έως τα αρσενίδια (π.χ. σπερρυλίτη, $PtAs_2$), και σε κράματα (π.χ. κράμα σιδηροπλατίνας) σε αυτοφυή είδη (π.χ. αυτοφυή ψήγματα Pt). Εκτός από το πλήθος των PGMs, οι ενώσεις τους είναι επίσης ποικίλες. Τα τρία κύρια ορυκτά που συνδέονται με τα PGM είναι ο μαγνητοπυρίτης, ο χαλκοπυρίτης και ο πεντλανδίτης, όπως το κοιτάσμα στον ύφαλο Merensky της Νότιας Αφρικής. Ο ύφαλος UG-2 περιέχει χαμηλές συγκεντρώσεις σουλφιδίων που περιέχουν χαλκό και νικέλιο και μια μεγάλη ποσότητα χρωμίτη ($FeCr_2O_4$). Στον ύφαλο Stillwater J-M (ΗΠΑ), τα κύρια θειούχα ορυκτά είναι χαλκοπυρίτης, $CuFeS_2$, και πεντλανδίτης, $(Ni,Fe)_9S_8$. Τα περισσότερα ορυκτά λευκόχρυσου συνδέονται με τα σουλφίδια χαλκού και το παλλάδιο με τα σουλφίδια του νικελίου. Το μετάλλευμα επίσης περιέχει λιγότερο από 1% χαλαζία αλλά σημαντικές ποσότητες ταλκ και σερπεντίνη (MgO). Ο λευκόχρυσος ήταν από καιρό γνωστό ότι υπήρχε σε μορφή αρσενιδίου (σπερρυλίτης, $PtAs_2$) σε σουλφίδια νικελίου - χαλκού στην περιοχή Sudbury.

Ο πεντλανδίτης και ο χαλκοπυρίτης ανακτώνται σχετικά καλά (ανάλογα με το μέγεθος των σωματιδίων τους και το βαθμό απελευθέρωσης), όπως και κάθε PGE στο πλέγμα τους (δηλ. σε στερεά διαλύματα) ή είναι παρόντα σε σωματίδια PGM που μπορεί να περιέχουν PGEs που υπάρχουν σε μορφή κυψελίδων ή σε στερεό διάλυμα στον μαγνητοπυρίτη μπορεί να ανακτηθούν ή να μην ανακτηθούν. Για παράδειγμα, στη λεκάνη του Sudbury, ο μαγνητοπυρίτης απορρίπτεται πλέον σε μεγάλο βαθμό ώστε να ελαχιστοποιηθεί το κόστος τήξης και η ρύπανση του περιβάλλοντος. Ο μαγνητοπυρίτης περιέχει σημαντικές ποσότητες νικελίου (από 0,4% έως 0,8%) και αντιπροσωπεύει το μεγαλύτερο μέρος απωλειών νικελίου στην περιοχή Sudbury.

Η εξαιρετικά χαμηλή συγκέντρωση των PGMs, η λεπτή κατανομή μεγέθους τους, η δυσκολία ανίχνευσης και ταυτοποίησης τους και η αντιπροσωπευτικότητα των δειγμάτων είναι χαρακτηριστικά προβλήματα κατά τη διεξαγωγή της ορυκτολογικής μελέτης για τα PGMs. Συνοπτικά, το εύρος των ορυκτών που υπάρχουν, οι σχετικές πυκνότητες, το σχήμα, το μέγεθος των σωματιδίων και οι ενώσεις τους αποτελούν πρόκληση για τον μεταλλουργό κατά τον σχεδιασμό και τη βελτιστοποίηση της διαδικασίας εξόρυξης. Οι διάφοροι τύποι

μεταλλευμάτων των τυπικών μεταλλευτικών σωμάτων, ο καθένας με τη δική του μεταλλουργική απόκριση, θα αυξήσει την πρόκληση. Στον πίνακα 2 παρουσιάζονται τα ορυκτά της ομάδας της πλατίνας και οι ιδανικοί τύποι τους (Olivotos, 2015).

Πίνακας 2: Ορυκτά της ομάδας της πλατίνας (ιδανικοί τύποι) (Olivotos, 2015).

Ruthenium	Ru	Kotulskite	PdTe
Laurite	RuS ₂	Laflammeite	Pd ₃ Pb ₂ S ₂
Anduoite	RuAs ₂	Majakite	PdNiAs
Ruarsite	RuAsS	Menshikovite	Pd ₃ Ni ₂ As ₃
Ruthenarsenite	RuAs	Merenskyite	PdTe ₂
Rhodium	Rh	Mertieite I	Pd ₁₁ (Sb, As) ₄
Bowieite	Rh ₂ S ₃	Mertieite II	Pd ₈ (Sb, As) ₃
Cherepanovite	RhAs	Michenerite	PdBiTe
Cuprorhodsitite	CuRh ₂ S ₄	Oostreboschite	(Cu, Pd) ₇ Se ₅
Ferrorhodsitite	FeRh ₂ S ₄	Palarstanide	Pd ₅ (Sn, As) ₂
Hollingworthite	RhAsS	Palladoarsenide	Pd ₂ As
Konderite	Cu ₃ PbRh ₈ S ₁₆	Palladobismutharsenide	Pd ₂ As _{0.8} Bi _{0.2}
Polkanovite	Rh ₁₂ As ₇	Palladodymite	(Pd, Rh) ₂ As
Prassoite	Rh ₁₇ S ₁₅	Palladseite	Pd ₁₇ Se ₁₅
Rhodarsenite	(Rh, Pd) ₂ As	Paolovite	Pd ₂ SnCu
Rhodplumsite	Rh ₃ Pb ₂ S ₂	Plumbopalladinite	Pd ₃ Pb ₂ S ₂
Palladium	Pd	Polarite, Sobolevskite	PdBi
Arsenopalladinite	Pd ₈ As _{2.5} Sb _{0.5}	Potarite	PdHg
Atheneite	(Pd, Hg) ₃ As	Sopcheite	Ag ₄ Pd ₃ Te ₄
Atokite	Pd ₃ Sn	Stannopalladinite	Pd ₅ Sn ₂ Cu
Borovskite	Pd ₃ SbTe ₄	Stibiopalladinite	Pd _{5+x} Sb _{2-x}
Cabriite	Pd ₂ SnCu	Stillwaterite	Pd ₈ As ₃
Froodite	PdBi ₂	Sudburyite	PdSb
Isomertieite	Pd ₁₁ Sb ₂ As ₂	Taimyrite	(Pd, Cu) ₃ Sn
Keithconnite	Pd _{3-x} Te	Tolovkite	IrSbS
Telargpalite	(Pd, Ag) _{3+x} Te	Platinum	Pt
Telluropalladinite	Pd ₉ Te ₄	Cooperite	PtS

Temagamite	Pd_3HgTe_3	Crerarite	$(\text{Pt, Pd})\text{Bi}_3\text{S}_{4-x}$
Testibiopalladite	PdSbTe	Dmiaioite	PtIn_2
Tischendorfite	$\text{Pd}_8\text{Hg}_3\text{Se}_9$	Daomanite	PtCuAsS_2
Urvantsevite	$\text{Pd}(\text{Bi, Pb})_2$	Ferronickelplatinum	$\text{PtFe}_{0.5}\text{Ni}_{0.5}$
Vasilite	Pd_{16}S_7	Genkinite	$(\text{Pt, Pd})_4\text{Sb}_3$
Verbeekite	$\text{Pd}_{16}\text{Se}_2$	Geversite	PtSb_2
Vincentite	$(\text{Pd,Pt})_3(\text{As,Sb,Te})$	Hongshiite	PtCu
Vysotskite	PdS	Isoferroplatinum	Pt_3Fe
Zvyagintsevite	Pd_3Pb	Kharaelakhite	$(\text{Cu,Fe})_4(\text{Pt,Pb})_4\text{NiS}_8$
Osmium	Os	Luberoite	Pt_5Se_4
Erlichmanite	OsS_2	Malanite	CuPt_2S_4
Omeiite	OsAs_2	Maslovite	PtBiTe
Osarsite	OsAsS	Moncheite	PtTe_2
Iridium	Ir	Niggliite	PtSn
Changchengite	IrBiS	Platarsite	PtAsS
Chengdeite	Ir_3Fe	Rustenbugite	Pt_3Sn
Gaotaiite	Ir_3Te_8	Sperrylite	PtAs_2
Inaglyite	$\text{Cu}_3\text{PbIr}_8\text{S}_{16}$	Stumpflite	PtSb
Iridarsenite	IrAs_2	Sudovikovite	PtSe_2
Kashinite	Ir_2S_3	Tatyanaite	$\text{Pt}_9\text{Cu}_3\text{Sn}_4$
Mayingite	IrBiTe	Tetraferroplatinum	PtFe
Shuangfengite	IrTe_2	Tulameenite	$\text{PtFe}_{0.5}\text{Cu}_{0.5}$
		Yixunite	Pt_3In

Ruthenium

Το ρουθίνιο είναι χημικό στοιχείο με σύμβολο Ru και ατομικό αριθμό 44. Το ρουθίνιο κατατάσσεται στα μέταλλα μετάπτωσης και είναι στερεό σε θερμοκρασία δωματίου. Ανήκει στην ομάδα 8 του περιοδικού πίνακα, στην περίοδο 5 και έχει σχετική ατομική μάζα 101,07 (<https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/>).

Laurite

Ο λαουρίτης είναι ένα αδιαφανές μαύρο μεταλλικό θειούχο ορυκτό ρουθηνίου με χημικό τύπο (RuS_2). Το ορυκτό ανακαλύφθηκε το 1866 στο Βόρνεο και πήρε το όνομά του από την Laurie, σύζυγο ενός Αμερικανού χημικού. Το χρώμα του κυμαίνεται μεταξύ σιδηρόμαυρου,

λευκού-γκρι και γαλαζωπού χρώματος. Η ράβδωση και η λάμψη είναι σκούρα γκρι και μεταλλική, αντίστοιχα. Είναι σκληρό (7,5 στην κλίμακα Mohs) με μέτριο ειδικό βάρος (6,4). Εμφανίζεται σε υπερφαινή μαγματικά αθροιστικά κοιτάσματα και σε τύπους πλακών που προέρχονται από τα πρώτα. Ο λαουρίτης σε καθαρή μορφή περιέχει 61,18% Ru και 38,82% S (Haldar, 2017).

Anduoite

Ένα ορθορομβικό-διπυραμιδικό μολύβδινο γκριζό ορυκτό που περιέχει αρσενικό, όσμιο και ρουθίνιο. Διαθέτει μεταλλική λάμψη και έχει σκληρότητα 6,5-7 στην κλίμακα Mohs (mindat.org).

Ruarsite

Ένα μονοκλινές-πρισματικό γκριζόλευκο ορυκτό που περιέχει αρσενικό, ρουθίνιο και θείο. Αποτελείται από 36% αρσενικό, 48,6% ρουθίνιο και 15,4% θείο. Είναι αδιαφανές γκρι-σκύρο γκρι, με μεταλλική λάμψη (webmineral.com).

Ruthenarsenite

Ορθορομβικό διπυραμιδικό ορυκτό που περιέχει αρσενικό, νικέλιο και ρουθίνιο. Περιλαμβάνει 8,9% νικέλιο, 45,3% αρσενικό και 45,8% ρουθίνιο. Είναι αδιαφανές με χρώμα καφέ, καφετί γκρι, κοκκινωπό γκρι και μεταλλική λάμψη (webmineral.com).

Rhodium

Το χημικό στοιχείο ρόδιο είναι μέταλλο με ατομικό αριθμό 45 και σχετική ατομική μάζα 102,9055. Το χημικό του σύμβολο είναι «Rh» και ανήκει στην ομάδα 9 του περιοδικού πίνακα, στην περίοδο 5 και στο d-block, της 2ης κύριας σειράς των στοιχείων μετάπτωσης (wolframalpha.com).

Bowieite

Ένα θειούχο ορυκτό από ρόδιο-ιρίδιο-πλατίνα. Πήρε το όνομά του από τον Βρετανό επιστήμονα Stanley Bowie, σε αναγνώριση του έργου του σχετικά με την αναγνώριση των αδιαφανών ορυκτών. Έχει χρώμα ανοιχτό γκρι έως ανοιχτό γκρι-καφέ και μεταλλική λάμψη (mindat.org).

Cherepanovite

Ορθορομβικό διπυραμιδικό ορυκτό που περιέχει αρσενικό και ρόδιο σε ποσοστά 42,1% και 57,9% αντίστοιχα. Είναι αδιαφανές με χρώμα γκριζομαύρο, μαύρο με μεταλλική λάμψη (webmineral.com).

Cuprorhodsite

Ένα ισομετρικό-εξοκταεδρικό γκρίζο ορυκτό που περιέχει χαλκό, ρόδιο και θείο σε ποσοστά 15,9%, 51,7% και 32,4% αντίστοιχα. Είναι αδιαφανές με χρώμα σιδερένιο μαύρο, μαύρο και μεταλλική λάμψη (webmineral.com).

Ferrohodsite

Ένα ισομετρικό-εξοκταεδρικό μαύρο ορυκτό που περιέχει σίδηρο, ρόδιο και θείο. Είναι αδιαφανές, μαύρου χρώματος με μεταλλική λάμψη (webmineral.com).

Hollingworthite

Έλαβε το όνομά του το 1965 από τους Eugen Friedrich Stumpfl και Andrew M. Clark προς τιμήν του Sidney Ewart Hollingworth, καθηγητή γεωλογίας στο University College του Λονδίνου. Περιέχει ρόδιο, αρσενικό και θείο. Είναι αδιαφανές με χρώμα γκρι και μεταλλική λάμψη (webmineral.com).

Konderite

Εξαγωνικό-διπυραμιδοειδές ορυκτό που περιέχει χαλκό, μόλυβδο, ρόδιο και θείο. Έχει χρώμα γκρι του ατσαλιού, είναι αδιαφανές και έχει μεταλλική λάμψη (webmineral.com).

Polkanovite

Εξαγωνικό-διπυραμιδικό ορυκτό που περιέχει αρσενικό και ρόδιο σε ποσοστά 29,8% και 70,2% αντίστοιχα. Είναι αδιαφανές με χρώμα γκρι και μεταλλική λάμψη (webmineral.com).

Prassoite

Ορυκτό με περιεκτικότητα 78,4% ρόδιο και 21,6% θείο. Είναι αδιαφανές με χρώμα λευκό και μεταλλική λάμψη (webmineral.com).

Rhodarsenite

Ορθορομβικό ορυκτό που περιέχει αρσενικό, παλλάδιο και ρόδιο σε ποσοστά 26,5%, 18,8% και 54,7% αντίστοιχα. Είναι αδιαφανές με χρώμα καφέ και μεταλλική λάμψη (webmineral.com).

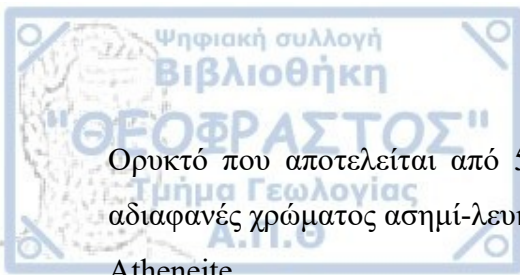
Rhodplumsite

Το Rhodplumsite είναι ένα σπάνιο ανόργανο θειούχο μόλυβδου ροδίου. Αποτελείται κατά 39,2% από ρόδιο, 52,6% από μόλυβδο και 8,2% από θείο. Είναι αδιαφανές, χρώματος γκρι και έχει μεταλλική λάμψη (webmineral.com).

Palladium

Το χημικό στοιχείο παλλάδιο είναι μέταλλο με ατομικό αριθμό 46 και σχετική ατομική μάζα 106,42. Ανήκει στην ομάδα 10, στην περίοδο 5 και στο d-block του περιοδικού πίνακα, της 2ης κύριας σειράς των στοιχείων μετάπτωσης. Είναι αδιαφανές με χρώμα λευκό-γκρι και μεταλλική λάμψη (webmineral.com).

Arsenopalladinite



Ορυκτό που αποτελείται από 5,5% αντιμόνιο, 17% αρσενικό και 77,5% παλλάδιο. Είναι αδιαφανές χρώματος ασημί-λευκό με μεταλλική λάμψη (webmineral.com).

Atheneite

Είναι ένα σπάνιο ορυκτό παλλαδίου, αρσενικού και υδραργύρου, σε ποσοστά 51,5%, 16,1% και 32,4% αντίστοιχα. Είναι αδιαφανές, με χρώμα γκρι-λευκό και μεταλλική λάμψη (webmineral.com).

Atokine

Ορυκτό που αποτελείται από παλλάδιο και κασσίτερο. Έχει χρώμα ανοιχτό κρεμ και μεταλλική λάμψη (mindat.org).

Borovskite

Ορυκτό που αποτελείται κατά 12,8% από αντιμόνιο, κατά 53,6% από τελλούριο και κατά 33,6% από παλλάδιο. Είναι αδιαφανές, χρώματος σκούρο γκρι και διαθέτει μεταλλική λάμψη (webmineral.com).

Cabriite

Είναι ένα ορυκτό που βρέθηκε για πρώτη φορά στην ανατολική περιοχή της Σιβηρίας της Ρωσίας και πήρε το όνομά του από τον Καναδό ορυκτολόγο Louis J. Cabri. Αποτελείται από 16% χαλκό, 30% κασσίτερο και 54% παλλάδιο. Είναι αδιαφανές, με χρώμα γκρι-λευκό και έχει μεταλλική λάμψη (webmineral.com).

Froodite

Αδιαφανές μεταλλικό γκρι ορυκτό που περιέχει βισμούθιο και παλλάδιο σε ποσοστά 79,7% και 20,3% αντίστοιχα. Διαθέτει μεταλλική λάμψη (webmineral.com).

Isomertieite

Ορυκτό που αποτελείται από 15,6% αντιμόνιο, 9,6% αρσενικό και 74,8% παλλάδιο. Είναι αδιαφανές χρώματος ασημί-λευκό και έχει μεταλλική λάμψη (webmineral.com).

Keithconnite

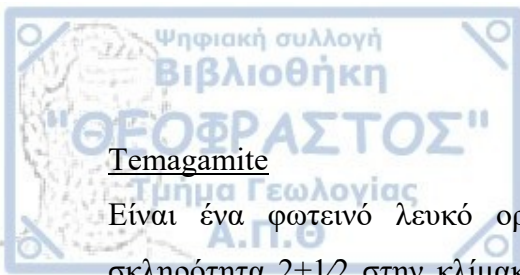
Ένα γκρίζο λευκό ορυκτό που περιέχει παλλάδιο και τελλούριο σε ποσοστά 70% και 30% αντίστοιχα. Είναι αδιαφανές, γκρι-λευκό, με μεταλλική λάμψη (webmineral.com).

Telargpalite

Αδιαφανές γκρι ορυκτό με μεταλλική λάμψη, που αποτελείται από παλλάδιο και τελλούριο (webmineral.com).

Telluropalladinite

Μονοκλινές-πρισματικό αργυρόλευκο ορυκτό που περιέχει παλλάδιο και τελλούριο σε ποσοστά 65,2% και 34,8% αντίστοιχα. Είναι αδιαφανές με μεταλλική λάμψη (webmineral.com).



Temagamite

Είναι ένα φωτεινό λευκό ορυκτό τελλουριδίου του υδραργύρου του παλλάδιου με σκληρότητα 2+1/2 στην κλίμακα Mohs. Περιέχει 22,2% υδράργυρο, 42,4% τελλούριο και 35,4% παλλάδιο. Είναι αδιαφανές, γκρι με μεταλλική λάμψη (webmineral.com).

Testibiopalladite

Ορυκτό με 25,5% αντιμόνιο, 44,6% τελλούριο και 29,9% παλλάδιο. Είναι αδιαφανές, με μεταλλική λάμψη και χρώμα χαλύβδινο γκρι, κίτρινο-καφέ (webmineral.com).

Tischendorfite

Ένα ορθορομβικό μπεζ ορυκτό που περιέχει μόλυβδο, υδράργυρο, παλλάδιο, σελήνιο. Είναι αδιαφανές και διαθέτει μεταλλική λάμψη (webmineral.com).

Urvantsevite

ορυκτό που αποτελείται από 59,8% βισμούθιο, 20,3% παλλάδιο και 19,9% μόλυβδο. Είναι αδιαφανές, με μεταλλική λάμψη και χρώμα γκρι (webmineral.com).

Vasilite

Ατσάλινο γκριζο ορυκτό που περιέχει παλλάδιο και θείο. Είναι αδιαφανές με μεταλλική λάμψη (webmineral.com).

Verbeekite

Ορυκτό που περιλαμβάνει 40,2% παλλάδιο και 59,8% σελήνιο. Είναι αδιαφανές, έχει χρώμα μαύρο και μεταλλική λάμψη (webmineral.com).

Vincenite

Ένα γκρι ορυκτό που αποτελείται από 7,8% αντιμόνιο, 8,2% τελλούριο, 8% αρσενικό, 59,2% παλλάδιο και 16,8% πλατίνα. Είναι αδιαφανές και έχει μεταλλική λάμψη (webmineral.com).

Vysotskite

Ένα τετραγωνικό-διπυραμιδικό ασημί-γκρι ορυκτό που περιέχει παλλάδιο και θείο. Είναι αδιαφανές με χρώμα ασημί-γκρι και μεταλλική λάμψη (webmineral.com).

Zvyagintsevite

Ένα λευκό αδιαφανές μεταλλικό ορυκτό που αποτελείται από παλλάδιο και μόλυβδο (webmineral.com).

Osmium

Το χημικό στοιχείο όσμιο είναι μέταλλο με ατομικό αριθμό 76 και σχετική ατομική μάζα 190,23. Ανήκει στην ομάδα 8, στην περίοδο 6 και στον d-τομέα του περιοδικού πίνακα, στην ομάδα της 3ης κύριας σειράς των στοιχείων μετάπτωσης (pubchem.ncbi.nlm.nih.gov).

Erlichmanite

Έλαβε το όνομά του από τον Joseph Erlichman, αναλυτή ηλεκτρονικών ανιχνευτών, ο οποίος ανέλυσε έναν αριθμό νέων ορυκτών. Είναι αδιαφανές, γκρι-λευκό ορυκτό με μεταλλική λάμψη, το οποίο περιλαμβάνει 74,8% όσμιο και 25,2% θείο (webmineral.com).

Omeiite

Ένα ορθορομβικό-διπυραμιδικό γκρίζο ορυκτό που αποτελείται από αρσενικό και όσμιο. Είναι αδιαφανές και έχει μεταλλική λάμψη (webmineral.com).

Osarsite

Αδιαφανές, γκρι ορυκτό που αποτελείται από όσμιο, αρσενικό και θείο και διαθέτει μεταλλική λάμψη (webmineral.com).

Iridium

Το χημικό στοιχείο ιρίδιο είναι μέταλλο με ατομικό αριθμό 77 και σχετική ατομική μάζα 192,217. Ανήκει στην ομάδα 9 του περιοδικού πίνακα, στην περίοδο 6, στον τομέα d, και στην 3η κύρια σειρά των στοιχείων μετάπτωσης (wolframalpha.com).

Changchengite

Ορυκτό που περιέχει βισμούθιο, ιρίδιο και θείο σε ποσοστά 48,2%, 44,4% και 7,4% αντίστοιχα. Είναι αδιαφανές, με χρώμα γκριζομαύρο και μεταλλική λάμψη (webmineral.com).

Chengdeite

Ορυκτό που περιέχει 8,8% σίδηρο και 91,2% ιρίδιο. Είναι αδιαφανές, χρώματος μαύρου και διαθέτει μεταλλική λάμψη (webmineral.com).

Gaotaiite

Αδιαφανές, μαύρο ορυκτό που αποτελείται από 63,9% τελλούριο και 36,1% ιρίδιο. Έχει μεταλλική λάμψη (webmineral.com).

Inaglyite

Αδιαφανές γκρι ορυκτό, με μεταλλική λάμψη, που αποτελείται από χαλκό, μόλυβδο, ιρίδιο και θείο (webmineral.com).

Iridarsenite

Μονοκλινές-πρισματικό γκρίζο ορυκτό που περιέχει αρσενικό και ιρίδιο. Είναι αδιαφανές και διαθέτει μεταλλική λάμψη (webmineral.com).

Kashinite

Γκρι-μαύρο αδιαφανές ορυκτό, με μεταλλική λάμψη, που αποτελείται από ιρίδιο και θείο (webmineral.com).

Mayingite

Ένα ισομετρικό-διπλοειδές χαλύβδινο μαύρο ορυκτό που περιέχει βισμούθιο, ιρίδιο και τελλούριο, σε ποσοστά 39,5%, 36,3% και 24,2% αντίστοιχα. Είναι αδιαφανές και διαθέτει μεταλλική λάμψη (webmineral.com).

Shuangfengite

Είναι τελλουριούχο ορυκτό του ιριδίου. Οφείλει το όνομά του στο ομώνυμο χωριό της Κίνας στην περιοχή του οποίου εντοπίστηκε. Περιέχει 57% τελλούριο και 43% ιρίδιο. Είναι αδιαφανές, με χρώμα μαύρο και έχει μεταλλική λάμψη (webmineral.com).

Kotulskite

Αδιαφανές, γκρι ορυκτό, με μεταλλική λάμψη, που αποτελείται από παλλάδιο και τελλούριο (webmineral.com).

Laflammeite

Μονοκλινές-πρισματικό καστανόχρωμο κρεμ ορυκτό που περιέχει μόλυβδο, παλλάδιο και θείο, σε ποσοστά 51,9%, 40% και 8,1% αντίστοιχα. Είναι αδιαφανές με μεταλλική λάμψη (webmineral.com).

Majakite

Εξαγωνικό γκρι-λευκό ορυκτό που περιέχει αρσενικό, νικέλιο και παλλάδιο, σε ποσοστά 31,2%, 24,5% και 44,3% αντίστοιχα. Είναι αδιαφανές και έχει μεταλλική λάμψη (webmineral.com).

Menshikovite

Ορυκτό που περιλαμβάνει 17,7% νικέλιο, 33,9% αρσενικό και 48,4% παλλάδιο. Είναι αδιαφανές, λευκό και διαθέτει μεταλλική λάμψη (webmineral.com).

Merenskyite

Είναι ένα σπάνιο ορυκτό τελλουριδίου/βισμούθινιδίου. Είναι ένα αδιαφανές λευκό έως ανοιχτό γκρι μεταλλικό ορυκτό που εμφανίζεται ως εγκλείσματα μέσα σε άλλα ορυκτά όπως ο χαλκοπυρίτης. Κρυσταλλώνεται στο τριγωνικό κρυσταλλικό σύστημα και αποτελείται από παλλάδιο και τελλούριο (webmineral.com).

Mertieite I

Είναι σημαντικό αρσενιούχο ορυκτό του παλλαδίου που περιέχει και αντιμόνιο. Οφείλει το όνομά του στον Τζον Μερτιέ, γεωλόγο της Αμερικανικής Γεωλογικής Υπηρεσίας. Περιλαμβάνει 14% αντιμόνιο, 6,6% αρσενικό και 79,4% παλλάδιο. Είναι αδιαφανές και έχει χρώμα ορειχάλκινο κίτρινο (webmineral.com).

Mertieite II

Αδιαφανές ορυκτό, με χρώμα ορειχάλκινο κίτρινο, που αποτελείται από 29,1% αντιμόνιο, 0,6% αρσενικό και 70,3% παλλάδιο (webmineral.com).

Michenerite

Ένα αργυρόλευκο ορυκτό που περιέχει βισμούθιο, παλλάδιο και τελλούριο. Είναι αδιαφανές και έχει μεταλλική λάμψη (webmineral.com).

Palarstanide

Ένα εξαγωνικό-τραπεζοεδρικό χαλύβδινο γκρίζο ορυκτό που περιέχει αρσενικό, παλλάδιο και κασσίτερο, σε ποσοστά 9,8%, 74,6% και 15,6% αντίστοιχα. Είναι αδιαφανές με μεταλλική λάμψη (webmineral.com).

Palladoarsenide

Μονοκλινές-πρισματικό χαλύβδινο γκρίζο ορυκτό που περιέχει 26% αρσενικό και 74% παλλάδιο (webmineral.com).

Palladobismutharsenide

Ένα αδιαφανές μεταλλικό αργυρόλευκο ορυκτό που περιέχει 67,6% παλλάδιο, 13,3% βισμούθιο και 19,1% αρσενικό (webmineral.com).

Palladodymite

Ορθορομβικό διπυραμιδικό ορυκτό που περιέχει 26,3% αρσενικό, 42,9% παλλάδιο και 30,8% ρόδιο (webmineral.com).

Palladseite

Ένα αδιαφανές λευκό ορυκτό που περιέχει 60,4% παλλάδιο και 39,6% σελήνιο (webmineral.com).

Paolovite

Ορθορομβικό-διπυραμιδικό λευκό ορυκτό που περιέχει 64,2% παλλάδιο και 35,8% κασσίτερο (webmineral.com).

Plumbopalladinite

Εξαγωνικό-διεξαγωνικό διπυραμιδικό λευκό ορυκτό που περιέχει 56,4% μόλυβδο και 43,6% παλλάδιο (webmineral.com).

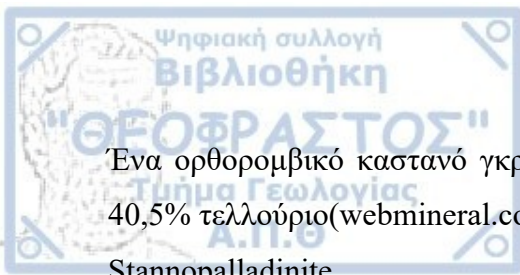
Polarite, Sobolevskite

Πήρε το όνομά του από τον Petr Grigorevich Sobolevski, μηχανικό και μεταλλουργό. Ορυκτό που έχει χρώμα ανοιχτό ροζ-πορτοκαλί και μεταλλική λάμψη (mindat.org).

Potarite

Πήρε το όνομά του από την περιοχή του ποταμού Potaro στη Γουιάνα. Είναι τετραγωνικό-διτετραγωνικό διπυραμιδικό αργυρόλευκο ορυκτό που περιέχει 65,3% υδράργυρο και 34,7% παλλάδιο (webmineral.com).

Sopcheite



Ένα ορθορομβικό καστανό γκρι ορυκτό που περιέχει 25,3% παλλάδιο, 34,2% άργυρο και 40,5% τελλούριο (webmineral.com).

Stannopalladinite

Εξαγωνικό-διεξαγωνικό διπυραμιδικό ορυκτό που περιέχει 9,1% χαλκό, 45,5% παλλάδιο και 45,4% κασσίτερο (webmineral.com).

Stibiopalladinite

Είναι ένα ορυκτό που περιέχει 68,6% παλλάδιο και 31,4% αντιμόνιο. Είναι ένα ασημί λευκό έως ασπάλι γκρι αδιαφανές ορυκτό κρυστάλλωση στο εξαγωνικό κρυσταλλικό σύστημα (webmineral.com).

Stillwaterite

Ένα τριγωνικό-ρομβοεδρικό γκρίζο ορυκτό που περιέχει 20,9% αρσενικό και 79,1% παλλάδιο. Είναι αδιαφανές και έχει μεταλλική λάμψη (webmineral.com).

Sudburyite

Εξαγωνικό-διεξαγωνικό διπυραμιδικό ασημί-γκρι ορυκτό που περιέχει 56,3% αντιμόνιο, 6,8% νικέλιο και 36,9% παλλάδιο.

Taimyrite

Ένα ορθορομβικό χάλκινο γκρι ορυκτό που περιέχει χαλκό, παλλάδιο και κασσίτερο. Είναι αδιαφανές και έχει μεταλλική λάμψη (webmineral.com).

Tolovkite

Ένα ισομετρικό-τεταρτοειδές χαλύβδινο γκρίζο ορυκτό που περιέχει 35,2% αντιμόνιο, 55,5% ιρίδιο και 9,3% θείο (webmineral.com).

Cooperite

Είναι ένα γκρίζο ορυκτό που αποτελείται από σουλφίδιο πλατίνας (PtS) και πρόκειται για διμορφή του βραγγίτη (webmineral.com).

Crerarite

Ένα αδιαφανές, μαύρο ορυκτό που αποτελείται από πλατίνα, παλλάδιο, βισμούθιο και θείο (webmineral.com).

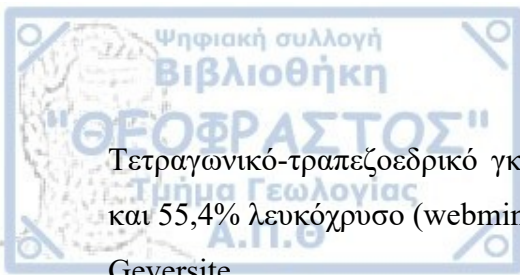
Daomanite

Ένα ορθορομβικό-πυραμιδοειδές ανοιχτό πρασινοκίτρινο ορυκτό που περιέχει 18,8% αρσενικό, 15,9% χαλκό, 49% λευκόχρυσο και 16,3% θείο (webmineral.com).

Ferronickelplatinum

Τετραγωνικό-διτετραγωνικό διπυραμιδικό αργυρόλευκο ορυκτό που περιέχει 11% σίδηρο, 11,6% νικέλιο και 77,4% λευκόχρυσο (webmineral.com).

Genkinite



Τετραγωνικό-τραπεζοεδρικό γκρίζο ορυκτό που περιέχει 34,6% αντιμόνιο, 10% παλλάδιο και 55,4% λευκόχρυσο (webmineral.com).

Geversite

Ένα ισομετρικό-διπλοειδές χαλύβδινο γκρίζο ορυκτό που περιέχει 37,9% αντιμόνιο, 21,7% βισμούθιο και 40,4% λευκόχρυσο (webmineral.com).

Hongshiite

Ένα τριγωνικό-εξαγωνικό σκαληνοεδρικό ορυκτό που περιέχει 24,6% χαλκό και 45,4% λευκόχρυσο (webmineral.com).

Isoferroplatinum

Ένα ισομετρικό-εξοκταεδρικό φωτεινό λευκό ορυκτό που περιέχει σίδηρο και λευκόχρυσο (webmineral.com).

Kharaelakhite

Ορθορομβικό-διπυραμιδικό χάλκινο καφέ ορυκτό που περιέχει 18% χαλκό, 4,8% σίδηρο, 35,3% μόλυβδο, 1,7% νικέλιο, 11% λευκόχρυσο και 29,2% θείο (webmineral.com).

Luberoite

Μονοκλινές-πρισματικό χάλκινο καστανό ορυκτό που περιέχει 75,5% λευκόχρυσο και 24,5% σελήνιο (webmineral.com).

Malanite

Ένα ισομετρικό-εξοκταεδρικό ορυκτό που περιέχει χαλκό, λευκόχρυσο και θείο. Είναι αδιαφανές, λευκού χρώματος (webmineral.com).

Maslovite

Ένα ισομετρικό-τεταρτοειδές χαλύβδινο γκρίζο ορυκτό που περιέχει 39,3% βισμούθιο, 36,7% λευκόχρυσο και 24% τελλούριο (webmineral.com).

Moncheite

Ένα τριγωνικό-εξαγωνικό σκαληνοεδρικό χαλύβδινο γκρίζο ορυκτό που περιέχει λευκόχρυσο και τελλούριο (webmineral.com).

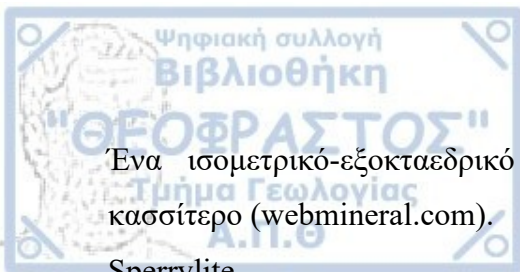
Niggliite

Εξαγωνικό-διεξαγωνικό διπυραμιδικό αργυρόλευκο ορυκτό που περιέχει 62,1% πλατίνα και 37,9% κασσίτερο (webmineral.com).

Platarsite

Ένα αδιαφανές, γκρι ορυκτό, που περιλαμβάνει λευκόχρυσο, αρσενικό και θείο (webmineral.com).

Rustenburgite



Ένα ισομετρικό-εξοκταεδρικό λευκό κασσίτερο ορυκτό που περιέχει παλλάδιο και κασσίτερο (webmineral.com).

Sperrylite

Είναι ένα ορυκτό αρσενιούχο λευκόχρυσου και είναι αδιαφανές μεταλλικό λευκό που κρυσταλλώνεται στο ισομετρικό σύστημα με τη δομή της ομάδας του πυρίτη. Σχηματίζει κυβικούς, οκταεδρικούς κρυστάλλους (minerals.net).

Stumpflite

Εξαγωνικό-διεξαγωνικό διπυραμιδικό αργυρόλευκο ορυκτό που περιέχει βισμούθιο και λευκόχρυσο (webmineral.com).

Sudovikovite

Τριγωνικό-εξαγωνικό σκαληνοεδρικό λευκό ορυκτό που περιέχει 55,2% λευκόχρυσο και 44,8% σελήνιο (webmineral.com).

Tatyanait

Ορθορομβικό ροζ ορυκτό που περιέχει χαλκό, πλατίνα και κασσίτερο (webmineral.com).

Tetraferroplatinum

Τετραγωνικό-διτετραγωνικό διπυραμιδικό λευκό ορυκτό που περιέχει 22,2% σίδηρο και 77,8% λευκόχρυσο (webmineral.com).

Tulameenite

Τετραγωνικό-διτετραγωνικό διπυραμιδικό λευκό ορυκτό που περιέχει 12,5% χαλκό, 10,9% σίδηρο και 76,6% λευκόχρυσο (webmineral.com).

Yixunite

Ένα ισομετρικό-εξοκταεδρικό φωτεινό λευκό ορυκτό που περιέχει 16,4% ίνδιο και 83,6% λευκόχρυσο (webmineral.com).

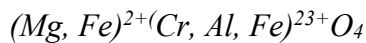
5. Χρωμίτης και κοιτάσματα χρωμίτη

5.1. Γενικά

Ο χρωμίτης (FeCr_2O_4) είναι ορυκτό οξείδιο του Σιδήρου και του Χρωμίου (Cr), του οποίου αποτελεί το κυριότερο Μετάλλευμα. Ο γενικός τύπος Χρωμίτη είναι: $(\text{Fe}^{2+}, \text{Mg})\text{O} \cdot (\text{Cr}, \text{Al}, \text{Fe}^{3+})_2\text{O}_3$, ενώ η περιεκτικότητα των φυσικών Χρωμιτών ανέρχεται σε 40-60% Cr_2O_3 (Μποζίκης, 2022).

Είναι μεταλλικό ορυκτό της ομάδας των σπινελίων, με γενικό χημικό τύπο $\text{A}_8\text{B}_{16}\text{O}_{32}$ (Καψιώτης, 2008), οι οποίοι κρυσταλλώνονται στο κυβικό σύστημα. Τα δισθενή ιόντα A^{2+} και τα τρισθενή ιόντα B^{3+} καταλαμβάνουν μερικώς ή συνολικά τις οκταεδρικές και τετραεδρικές θέσεις του κρυσταλλικού πλέγματος. Τις θέσεις (A) της τετραεδρικής συνδιάταξης καταλαμβάνουν δισθενή μεταλλικά ιόντα όπως τα Fe, Mg και Mn, ενώ τις οκταεδρικές θέσεις (B) καταλαμβάνουν τρισθενή μεταλλικά ιόντα που εισέρχονται στην κρυσταλλική δομή των σπινελίων όπως τα Al, Fe, Cr (Ζασπάλης, 2020).

Ο γενικά αποδεκτός τύπος που χαρακτηρίζει τον χρωμίτη είναι:



Το όνομά του προέρχεται από το συστατικό του, χρώμιο, το οποίο ονομάστηκε έτσι επειδή προσδίδει χρώμα σε πολλά άχρωα συστατικά, όταν βρίσκεται ως πρόσμιξη. Ο χρωμίτης βρίσκεται σε συμπλέγματα υπερβασικών μαγματικών πετρωμάτων μαζί με ολιβίνη, σερπεντίνη και πυροξένους. Αποτελεί το μοναδικό μετάλλευμα χρωμίου (orykta.gr). Συναντάται κυρίως εντός Δουνιτών (fresh) και εξαλοιωμένων Δουνιτών μαζί με Ολιβίνη, Σερπεντίνη και Πυροξένους, ενώ αποτελεί τη μοναδική πηγή προέλευσης συστατικού του Χρωμίου. Φιλοξενείται σε Κοιτάσματα Ασκοειδή ή Αλπικού τύπου και σε Στρωματοειδή (Σκαρπέλης, 2002). Τα Ελληνικά Κοιτάσματα, είναι παρόμοια με αυτά της Αλβανίας και Τουρκίας, όπως και των Φιλιππίνων (Μποζίκης, 2022).

Οι σπινέλιοι που σχηματίζονται, κρυσταλλώνονται στο κυβικό σύστημα, δημιουργώντας στερεά διαλύματα μεταξύ τους σε οποιεσδήποτε αναλογίες. Ανάλογα με τις αντικαταστάσεις των ιόντων σχηματίζονται τα εξής ορυκτά:

Σιδηροχρωμίτης (FeCr_2O_4)

Μαγνησιοχρωμίτης (MgCr_2O_4)

Σπινέλιος (MgAl_2O_4)

Σιδηροσπινέλιος (FeAl_2O_4)

Μαγνησιοφερρίτης (MgFe_2O_4)

Μαγνητίτης (Fe_3O_4)

Ο όρος “σιδηροχρωμίτης” χρησιμοποιήθηκε για πρώτη φορά ώστε να περιγραφούν τα υψηλότερης ανακλαστικότητας περιθώρια χρωμικών κρυστάλλων μέσα σε σερπεντινίτες και αναφέρεται σε προϊόν εξαλλοίωσης του χρωμίτη πλούσιο σε Fe, αλλά φτωχό σε Al και Mg (Spangerberg, 1943).

Σύμφωνα με τον Thayer (1970), ο όρος “χρωμίτης” θα πρέπει να χρησιμοποιείται μόνο για τους χρωμιούχους σπινελίους που περιέχουν Cr₂O₄ πάνω από 15% και έχουν κρυσταλλωθεί ως πρωτογενή ορυκτά. Σύμφωνα με το τρισθενές κατιόν που υπάρχει στην κρυσταλλική δομή του χρωμίτη, οι Palache et al. (1944) ταξινομούν τον χρωμίτη σε επιμέρους κατηγορίες, οι οποίες παρατίθενται στον πίνακα 3.

Πίνακας 3: Ταξινόμηση χρωμιτών (Palache et al., 1944).

	Σειρά σπινελίου (Al)	Σειρά μαγνήτη (Fe ³⁺)	Σειρά χρωμίτη (Cr)
Mg	Σπινέλιος	Μαγνησιοφερρίτης	Μαγνησιοχρωμίτης
Fe ²⁺	Ερκυνίτης	Μαγνητίτης	Χρωμίτης
Zn	Γκανίτης	Φρανκλινίτης	
Mn	Γαλαξίτης	Γιακοβσίτης	
Ni		Τρεβορίτης	

Μορφολογικά, οι τύποι Μεταλλεύματος Χρωμίτη διακρίνονται σε τέσσερις κύριες κατηγορίες (Μποζίκης, 2022):

- Διάσπαρτο (disseminatedorscattered) Cr₂O₃<10%
- Ταινιωτός (schlieren) Cr₂O₃= 17 – 22%
- Συμπαγές (massif) Cr₂O₃= 30 – 55 %
- Μορφής Λεοπαρδάλεως (nodular) Cr₂O₃< 40%

Ενώ στις πιο πάνω κατηγορίες συγκαταλέγονται και οι εμφανίσεις (Μποζίκης, 2022)

- Χονδρόκοκκος Χρωμίτης (Lumpy ore)
- Πλακών ή πλακοειδής (τύπου Bushveld)

Ο Χρωμίτης ανάλογα την περιεκτικότητα σε Cr₂O₃ την αναλογία Cr/Fe και την περιεκτικότητα σε SiO₂ διακρίνεται στους εξής εμπορικούς τύπους (Μποζίκης, 2022):

- Μεταλλουργικός: Cr₂O₃> 48%, Cr/Fe> 3/1, SiO₂ < 10%
- Πυρίμαχος: Cr₂O₃ 30-40%, Cr/Fe 2-2.5/1, SiO₂ 6%
- Χημικός: Cr₂O₃> 44%, Cr/Fe > 1,5/1, SiO₂ < 3,5%

5.2. Ιδιότητες και χρήσεις του χρωμίτη

Στον πίνακα 4 παρατίθενται κάποιες ιδιότητες του χρωμίτη.

Πίνακας 4: Ιδιότητες του χρωμίτη (webminerals.com).

Κατηγορία	Κοίτασμα οξειδίων – Ομάδα σπινελίων
Χημικός τύπος	(Fe, Mg)Cr ₂ O ₃
Χρώμα	Μαύρο προς σκούρο καφέ
Ειδικό βάρος	4.5 – 4.8
Κρυσταλλικό σύστημα	Κυβικό
Κρυσταλλική συμμετρία	Εξαεδρικοί κρύσταλλοι
Κυψελίδα	a=8.344 Å, Z=8
Σκληρότητα στην κλίμακα Mohs	5.5
Λάμψη	Ημιμεταλλική
Γραμμή κόνεως	Καφέ
Διαφάνεια	Διαφανής έως αδιαφανής
Σχισμός	Ανύπαρκτος, σπάνια υπάρχει αποχωρισμός στο επίπεδο (1 1 1)
Θραυσμός	Ανώμαλος
Οπτικές ιδιότητες	Ισότροπο
Άλλα χαρακτηριστικά	Ασθενώς μαγνητικό ορυκτό

Το Cr αποτελεί το πιο άφθονο στοιχείο της ομάδας VIA, από τα στοιχεία μετάπτωσης, μαζί με το Mo, φτάνοντας σε συγκεντρώσεις της τάξης των 400 ppm στο φλοιό της γης, και αποτελεί το 13^ο πιο κοινό στοιχείο (Υφαντή, 2011). Ο χρωμίτης αποτελεί το μοναδικό μέταλλευμα του χρωμίου, και ορισμένες από τις χρήσεις του είναι οι εξής (Υφαντή, 2011):

- Αύξηση της σκληρότητας του ατσαλιού, παραγωγή ανοξειδωτού ατσαλιού και παραγωγή κραμάτων
- Ως επίστρωση επιφάνειας που δεν οξειδώνεται, για να εμποδίσει τη διάβρωση
- Στην κατασκευή γυαλιών, διότι προσδίδει σμαραγδοπράσινο χρώμα
- Ευρέως γνωστός καταλύτης
- Σε κάποια οξειδωτικά αντιδραστήρια, σε ποσοτικές αναλύσεις και στην επεξεργασία δερμάτων
- Ως χρωστική, με τη μορφή του χρωμικού μόλυβδου ως κίτρινο του χρωμίου
- Ως στυπτηρίες (στερεωτικά βαφών) στη βιομηχανία υφασμάτων
- Στην αεροπορία για την ανοδίωση του αργιλίου

- Στην κατασκευή πυρίμαχων, για τούβλα και καλούπια, εξαιτίας του υψηλού σημείου τήξης, της μέτριας θερμικής διαστολής και της σταθερής κρυσταλλικής δομής

5.3. Μεταλλογένεση χρωμιτών

Οι χρωμίτες αποτελούν ορυκτά της ομάδας των σπινελίων που αποχωρίζονται από το βασάλτικο μάγμα ως στερεές φάσεις με την μορφή κρυσταλλικών προϊόντων και είναι από τα πρώτα προϊόντα κρυστάλλωσης μαζί με τον ολιβίνη (Κοκκαλιάρη, 2015). Η κρυστάλλωσή τους στο ορθομαγματικό στάδιο, σχετίζεται συχνότερα με δουνιτικά πετρώματα, που περιέχουν ολιβίνη $\geq 90\%$ vol. Αν το ποσοστό του Cr_2O_3 υπερβεί το 5%, τότε αρχίζει η κρυστάλλωση του πρώτου σπινελίου που έχει σύσταση μαγνησιούχου χρωμίτη. Κατά την εξέλιξη της διαφοροποίησης του μάγματος, δηλαδή της σταδιακής αποβολής βασικών συστατικών από το μάγμα ώστε αυτό να αποκτά σταδιακά πιο όξινο χαρακτήρα, αυξάνεται παροδικά η περιεκτικότητα σε Fe των Mg-χρωμιτών, οι οποίοι κατά συνέπεια απεμπλουτίζονται σε Mg (Κοκκαλιάρη, 2015).

Βάσει του νόμου του Stokes η ταχύτητα καθίζησης των χρωμιτικών κρυστάλλων είναι άμεσα εξαρτώμενη από το ιξώδες του μάγματος και συγκεκριμένα είναι αντιστρόφως ανάλογη με αυτό.

Σε ένα βασάλτικο μάγμα, οι χρωμιτικοί κρύσταλλοι καθιζάνουν με αυξημένη ταχύτητα, σχηματίζοντας μεγάλες συγκεντρώσεις, εξαιτίας του χαμηλού του ιξώδους. Η ταχύτητα κρυστάλλωσης των χρωμιτικών κρυστάλλων επηρεάζεται από το διαφορετικό ιξώδες του μάγματος, λόγω της σταδιακής πτώσης της θερμοκρασίας. Η αύξηση του ιξώδους του μάγματος οδηγεί σε μειωμένη ταχύτητα καθίζησης των κρυστάλλων χρωμίτη οι οποίοι διασπείρονται στην μάζα των πετρωμάτων ξενιστών τους και έτσι η μεταλλοφορία χρωμίτη αποκτά διάσπαρτη υφή (Κοκκαλιάρη, 2015).

Η κίνηση των φλοιϊκών τεμαχίων στα ενεργά περιθώρια των λιθοσφαιρικών πλακών, καθώς και άλλα γεγονότα που συντελούνται στη φύση, καθιστούν τις συνθήκες κρυστάλλωσης των χρωμιτών μη ιδανικές. Φαινόμενα όπως είναι η ανάπτυξη αλλά και η παρουσία ρευστών φάσεων επίσης επηρεάζουν την μεταλλογένεση του χρωμίτη (Κοκκαλιάρη, 2015).

Ο χρωμιτικές εμφανίσεις είναι γενικά περιορισμένων διαστάσεων. Η περιεκτικότητά του χρωμίτη σπάνια υπερβαίνει το 2 % vol και για να σχηματιστεί οικονομικά απολήψιμο κοίτασμα χρωμίτη θα πρέπει ο όγκος του χρωμίτη να καταλαμβάνει $\geq 5\%$ vol (Κοκκαλιάρη, 2015).

5.4. Σχηματισμός χρωμίτη

Ο χρωμίτης ανήκει στα μαγματικά κοιτάσματα οξειδίων, του ορθομαγματικού σταδίου. Για την κρυστάλλωση των χρωμιτών και τη δημιουργία χρωμιτικών κοιτασμάτων, ο χρωμίτης κρυσταλλώνεται σε μάγματα βασικής και υπερβασικής σύστασης και συγκεντρώνεται λόγω του μαγματικού διαχωρισμού στη βάση του μαγματικού θαλάμου. Έτσι, η γένεση των χρωμιτικών συγκεντρώσεων αποδίδεται στη θεωρία της διαφορικής καθίζησης των ορυκτών, διαφορετικής πυκνότητας και μεγέθους (Irvine, 1975).

Αυξημένες συγκεντρώσεις χρωμίτη είναι αποτέλεσμα επιτόπιας κρυστάλλωσης που πραγματοποιείται είτε στη βάση, είτε στην οροφή, είτε στα τοιχώματα του μαγματικού θαλάμου, όταν οι συνθήκες που απαιτούνται για την μαζική κρυστάλλωση και καθίζηση του χρωμίτη είναι κατάλληλες (Greenbaum, 1977).

Ο Irvine (1970), υποστήριξε ότι οι κρύσταλλοι των χρωμιτών σπάνια είναι οι πρώτοι που κρυσταλλώνονται στο μάγμα, διότι η κρυστάλλωση των χρωμιτών απαιτεί συγκεκριμένες συνθήκες, και η πρώτη φάση που κρυσταλλώνεται κατά κύριο λόγο είναι ο ολιβίνης.

Για να σχηματιστεί ο χρωμίτης σε ικανές ποσότητες ώστε να δημιουργηθεί κοιτάσμα, θα πρέπει η χημική σύσταση του μάγματος να μεταβεί εξ' ολοκλήρου στο πεδίο του χρωμίτη. Αυτό είναι δυνατό να επιτευχθεί διαμέσω δύο περιπτώσεων (Κοκκαλιάρη, 2015):

- Μόλυνση του μάγματος
- Μείξη του μάγματος

Η μόλυνση του μάγματος μπορεί να επέλθει όταν το μάγμα αφομοιώνει τα πετρώματα της οροφής του μαγματικού θαλάμου που ανήκουν στον κατώτερο φλοιό από άποψη σύστασης. Συνεπώς το μάγμα γίνεται πιο πλούσιο σε SiO_2 εξαιτίας των φλοιϊκών πετρωμάτων που αφομοιώνονται. Ως συνέπεια, η σύσταση του μάγματος οδηγείται στο πεδίο του χρωμίτη (Κοκκαλιάρη, 2015).

Ο Dickey (1975) υποστηρίζει ότι τα δουνητικά και χρωμιτικά σώματα που βρίσκονται εντός των υπολειμματικών χαρτσβουργιτών, αντιπροσωπεύουν θύλακες ακραία εξελιγμένου βαθμού μανδουακής τήξης. Σύμφωνα με αρκετές έρευνες, προκύπτει ότι οι χρωμίτες και οι σχετιζόμενοι με αυτούς δουνίτες αναπαριστούν μικρούς μαγματικούς θαλάμους εσωτερικά των μανδουακών σχηματισμών (Κασιώτης, 2008). Σε αυτούς τους θαλάμους υπάρχει συγκέντρωση χρωμίτη και ολιβίνης, ως πρώιμα προϊόντα της κλασματικής κρυστάλλωσης ανερχόμενων βασαλικών τηγμάτων (Neary & Brown, 1979). Αντίστοιχα, σύμφωνα με τους Lago et al. (1982), η καθίζηση και συσσώρευση κρυστάλλων χρωμίτη πραγματοποιείται σε

μικρές, απότομα κεκλιμένες κοιλότητες των αγωγών ανόδου του μάγματος από τον μανδύα στο φλοιό.

Οι Cassard (1980), Cassard et al. (1981) και Lago et al. (1982) διατυπώνουν τα ακόλουθα εξελικτικά στάδια της πορείας γένεσης των χρωμιτικών κοιτασμάτων που εντοπίζονται στους υπερμαφικούς τεκτονίτες των αλπικών ορογενετικών ζωνών:

- Δημιουργία μικρών κατακόρυφων ρωγμών πλησίον του άξονα διάνοιξης, λόγω των υδραυλικών πιέσεων που ασκούνται
- Επέκταση αυτών των ρωγμών και ανάπτυξη κοιλοτήτων, μικρών διαστάσεων
- Διέλευση του ανερχόμενου μάγματος από τις ρωγμές και είσοδός του στο χώρο των κοιλοτήτων, όπου εξαιτίας της θερμοκρασιακής διαφοράς με το περιβάλλον, δημιουργούνται συνθήκες εσωτερικής κυκλικής ροής
- Αποχωρισμός των πρώτων κρυσταλλικών φάσεων εκ του μάγματος, μεταξύ των οποίων και ο χρωμίτης. Ανάλογα με τις επικρατούσες συνθήκες, αρχίζουν να αποβάλλονται από το μάγμα χρωμίτης και ολιβίνης σε ποικίλες αναλογίες. Ανάλογα με τις διαστάσεις τους, οι κόκκοι του χρωμίτη κατακρημνίζονται σε διαφορετικούς ρυθμούς και αποτίθενται κυρίως στη συμβολή μεταξύ του νεοεισερχόμενου και του ήδη ευρισκόμενου εντός της κοιλότητας μάγματος. Οι αποχωριζόμενοι κρύσταλλοι του χρωμίτη συγκρούονται μεταξύ τους, σχηματίζοντας συσσωματώματα, τα οποία αντιστοιχούν στους διάφορους ιστολογικούς τύπους χρωμιτικών μεταλλευμάτων. Όλη η διαδικασία συνεχίζεται μέχρι να επέλθει παύση της κυκλικής ροής, οπότε και αρχίζει η κρυστάλλωση από το μάγμα πιο διαφοροποιημένων φάσεων.

5.5. Ταξινόμηση χρωμιτών

Η δομική ταξινόμηση των χρωμιτών βασίζεται στους διαφορετικούς τύπους μεταλλοφορίας που παρουσιάζουν (Κασιώτης, 2008). Οι τύποι με τη μεγαλύτερη συχνότητα εμφάνισης είναι οι εξής (Κασιώτης, 2008):

- Συμπαγής (massive): εμφανίζεται σε κοιτάσματα με πυκνή μεταλλοφορία
- Διάσπαρτος (disemminated): αφορά τις εμφανίσεις των αραιά κατανεμημένων κρυστάλλων χρωμίτη, εντός της μάζας των φιλοξενούντων πετρωμάτων
- Κατά πλάκες (schlieren): χαρακτηρίζει τις εναλλασσόμενες συγκεντρώσεις χρωμίτη-ολιβίνη κατά παράλληλα επίπεδα



- Λεοπαρδάλεως ή οζώδης (nodular): περιγράφει πολυάριθμες σφαιρικές συγκεντρώσεις χρωμιτικών κρυστάλλων, που συνήθως διευθετούνται κατά σχεδόν παράλληλες σειρές εντός του χρωμιτικού σώματος.

Μια άλλη κατηγοριοποίηση των χρωμιτών βασίζεται στη μορφολογία τους και στη σχέση τους με τα πετρώματα πλαισίου. Διακρίνονται δυο κατηγορίες (Καψιώτης, 2008):

- Οι στρωματοειδείς (stratiform)
- Οι θυλακοειδείς (podiform)

Στρωματοειδή κοιτάσματα (stratiform)

Τα κοιτάσματα αυτής της κατηγορίας βρίσκονται μέσα σε βασικές-υπερβασικές διεισδύσεις (Υφαντή, 2011) και ο χρωμίτης σχηματίζει στρώματα με πλευρική διάσταση έως μερικά χιλιόμετρα, ενώ διαθέτουν πλάτος από λίγα mm έως λίγες δεκάδες μέτρα (Καψιώτης, 2008). Βρίσκονται σε περιοχές σταθερού γεωτεκτονικού χαρακτήρα και αναπτύσσονται σε στρωματωμένες διεισδύσεις (Bushveld complex, Stillwater complex, Great Dyke) (Thayer, 1964), και σχηματίζουν ορίζοντες χρωμίτη-ολιβίνη ή και μονοορυκτολογικές ζώνες χρωμίτη. Με βάση τη μορφολογία τους οι διεισδύσεις ταξινομούνται ως εξής (Υφαντή, 2011):

- Πινακοειδείς (πλακοειδείς): διεισδύσεις σε στρωματοειδείς φλέβες των οποίων η μαγματική στρώση είναι σύμφωνη του δαπέδου
- Χοανοειδείς (σχήμα χωνιού): η μαγματική στρώση κλίνει σε χαμηλότερες γωνίες προς το κέντρο και σχηματίζει σύγκλινο.

Αυτά τα κοιτάσματα αποτελούνται από 50-95% σφαιρετικό, λεπτόκοκκο (0.2mm) χρωμίτη (Υφαντή, 2011). Το υπόλοιπο ποσοστό περιλαμβάνει πυριτικά ορυκτά (ενδιάμεσος ολιβίνης, ορθοπυρόξενος, πλαγιόκλαστο, κλινοπυρόξενος) ή/και τα προϊόντα της εξαλλοίωσής τους (Υφαντή, 2011).

Θυλακοειδή (podiform) κοιτάσματα

Αυτά τα χρωμιτικά κοιτάσματα βρίσκονται εντός αλπικού τύπου περιδοτίτες και σχεδόν αποκλειστικά εντός των υπερβασικών πετρωμάτων της οφιολιθικής ενότητας (Υφαντή, 2011). Βρίσκονται κυρίως μέσα στους τεκτονίτες και στα χαμηλότερα σφαιρετικά στρώματα και σύμφωνα με τον Dickey (1975) υπάρχει τάση αύξησης των χρωμιτών στο ανώτερο μέρος των τεκτονιτών. Τα κοιτάσματα αυτής της κατηγορίας συναντώνται ως θύλακες (rods) περιορισμένων διαστάσεων, εντός υπερβασικών πετρωμάτων των αλπικών ορεινών αλυσίδων. Κατά τον Thayer (1964) κατά πλειοψηφία εμφανίζονται ως πινακοειδείς-

πλακοειδείς φακοί, ακανόνιστες στήλες (επιμήκη σώματα) ή συνδυασμοί αυτών των δυο βασικών μορφών (Υφαντή, 2011). Είναι έντονα τεκτονισμένοι και συχνά ισχυρά παραμορφωμένοι μεταλλοφόροι σχηματισμοί, που διαθέτουν ρωγμές, πτυχώσεις και συχνά λατυποπαγοποίηση (Καψιώτης, 2008), όπως στα χρωμιτικά κοιτάσματα των οφιολιθικών συμπλεγμάτων του Βουρινού (Κωνσταντοπούλου, 1990), της Luobusa στο Θιβέτ (Zhou et al., 1996) και της Moa-Baracoa στη Κούβα (Proenza et al., 2001).

Υφή των θυλακοειδών κοιτασμάτων:

- Διάσπαρτη: αποτελείται από μεγάλους επιμήκεις κρυστάλλους, οι οποίοι είναι αλλοτριόμορφοι στους τεκτονίτες (Υφαντή, 2011). Οι χρωμίτες των υπερβασικών σωρειτών έχουν παρόμοιο κοκκομετρικό μέγεθος και σχήμα με αυτούς που βρίσκονται σε στρωματοποιημένες διεισδύσεις, ενώ αυτοί στους τεκτονίτες είναι μεγάλοι, επιμήκεις, αλλοτριόμορφοι κρύσταλλοι (Greenbaum, 1977).
- Έντονα διάσπαρτη: αυτός ο τύπος χρωμίτη, και στα υπερβασικά σωρειτικά και στους τεκτονίτες, παρουσιάζει τυπικούς σωρειτικούς ιστούς (Thayer, 1969), ρυθμική στρωμάτωση (Greenbaum, 1977) και διαβαθμισμένα στρώματα (Υφαντή, 2011). Επίσης, χαρακτηριστική είναι η κονδυλώδης υφή, που χαρακτηρίζεται από χαλαρά ελλειψοειδή σχήματα μέσα σε μια δουνιτική μάζα (Υφαντή, 2011).

5.6. Οι αλπικοί χρωμίτες

Οι χρωμίτες είναι σχηματισμοί με υψηλά περιεχόμενα χρωμιτικών συγκεντρώσεων (>10% κ.ο.) (Καψιώτης, 2008). Τα χρωμιτικά κοιτάσματα είναι άρρηκτα συνδεδεμένα με τα οφιολιθικά συμπλέγματα, καθότι τέτοιου τύπου κοιτάσματα εντοπίζονται κυρίως σε υπερβασικούς και εν μέρει σε βασικούς σχηματισμούς (Καψιώτης, 2008). Συχνότερα, οι δουνίτες και σπανιότερα οι χαρτσβουργίτες είναι τα πετρώματα ξενιστές της χρωμιτοφόρας μεταλλοφορίας (Κοκκαλιάρη, 2015). Πολύ σπανιότερα, όπως στην περίπτωση του οφιολιθικού συμπλέγματος του Ομάν (Arai et al. 2004), χρωμιτικά σώματα είναι δυνατό να εντοπιστούν σε ανώτερα μέλη οφιολιθικών ακολουθιών, μεταξύ του ανώτερου ορίου της ομάδας των γαββρικών πετρωμάτων και του κατώτερου ορίου της ομάδας των φλεβικών διεισδύσεων (Arai et al., 2004).

Στις περισσότερες περιπτώσεις, τα πετρώματα-ξενιστές των χρωμιτικών κοιτασμάτων δεν διατηρούν τα αρχικά ιστολογικά τους χαρακτηριστικά, και εμφανίζονται έντονα σερπεντινωμένα, ή/και παραμορφωμένα. Ο χημισμός και η ορυκτολογική σύσταση των μανδουακών πετρωμάτων που συγκροτούν τα οφιολιθικά τεμάχια, σχετίζεται σημαντικά με

την χημική σύσταση των χρωμιτιτών (Κοκκαλιάρη, 2015). Σύμφωνα με αυτό ως το βασικότερο κριτήριο, οι οφιολιθικοί σχηματισμοί κατατάσσονται σε δύο κατηγορίες: Σε λερζολιθικού (Lherzolite Ophiolite Type - LOT) και χαρτσβουργιτικού (Harzburgite Ophiolite Type - HOT) τύπου οφιολιθικά συμπλέγματα (Κοκκαλιάρη, 2015). Οι χαρτσβουργιτικού τύπου προέρχονται από μερική τήξη ενός αρχικού λερζολιθικού υλικού, η οποία οδηγεί σε εκτεταμένη αποδέσμευση χρωμίου από τον μανδύα και τελικά στη δημιουργία σημαντικών κοιτασμάτων χρωμίτη (Κασιώτης, 2008). Οι χαρτσβουργίτες αποτελούν υλικό περισσότερο εκχυμωμένο από τους λερζόλιθους, εξαιτίας του υψηλότερου βαθμού μερική τήξης, συνεπώς εμφανίζουν πάντα μεγαλύτερη πιθανότητα σημαντική χρωμιτικής μεταλλοφορίας (Dick & Fischer, 1984). Ως λερζολιθικού τύπου, αντίθετα, αναφέρονται εκείνα τα οφιολιθικά συμπλέγματα στη μανδυακή ενότητα των οποίων επικρατούν σχετικά γόνιμοι λερζόλιθοι, δηλαδή υπερβασικοί λιθότυποι που έχουν επηρεαστεί σε περιορισμένο μόνο βαθμό από διαδικασίες τήξης και έχουν περιορισμένες πιθανότητες φιλοξενίας σημαντικών χρωμιτικών κοιτασμάτων (Κασιώτης, 2008).

Χαρακτηριστικό των κοιτασμάτων χρωμίτη που δημιουργούνται είναι η υψηλή περιεκτικότητα σε Cr_2O_3 των χρωμιτικών εμφανίσεων και σπανιότερα σε Al_2O_3 . Σύμφωνα με τους Rocci et al. (1975) και Nicolas (1990), στις οφιολιθικές εμφανίσεις τύπου LOT μπορούν να καταταχθούν τα οφιολιθικά συμπλέγματα στην Ελλάδα που ανήκουν στην Δυτική Μεσόγειο (Δυτική Ζώνη), ενώ, όπως γίνεται κατανοητό, τα οφιολιθικά συμπλέγματα που ανήκουν στην Ανατολική Μεσόγειο κατατάσσονται στις οφιολιθικές εμφανίσεις τύπου HOT (Ανατολική Ζώνη).

5.7. Μεταλλουργία του χρωμίτη

Ο χρωμίτης χρησιμοποιείται κατόπιν επεξεργασίας σε διάφορες διεργασίες και μεταλλουργικές διαδικασίες. Ο μεταλλουργικός χρωμίτης υπόκειται σε επεξεργασία για γίνει κράμα στην παραγωγή χαλύβων και μετάλλων, ο πυρίμαχος για την κατασκευή κατάλληλων πυρίμαχων υλικών, μέσω αναγωγής, και ο χημικός υπόκειται οξειδωτική φρύξη (Μποζίκης, 2022). Μετά την εξόρυξη του ο χρωμίτης διαχωρίζεται και εμπλουτίζεται, το εμπλουτισμένο μέταλλευμα – συμπύκνωμα ονομάζεται «Concentrate», και αποτελεί την πρώτη ύλη, μαζί με χονδρόκοκκο χρωμίτη (Lumpysore), για την παραγωγή Σιδηροκραμάτων (Μποζίκης, 2022). Το λεπτόκοκκο συμπύκνωμα, υφίσταται μια αρχική επεξεργασία ώστε να αλλάξει μέγεθος. Αρχικά παράγεται σφαιρίδιο σιδηροκράματος από την πελετοποίηση, στη συνέχεια παράγεται σφαιρίδιο συσσωματωμένο FeCr (sintered) μέσω προθέρμανσης και αρχικής αναγωγής (εντός ορθοκαμίνου). Το τελικό σιδηρόκρμα περνά από την τελική διαδικασία

αναγωγής και τήξης το sintered σε ηλεκτρικό φούρνο αναγωγής εμβαπτιζόμενου τόξου (Μποζίκης, 2022). Ανάλογα την περιεκτικότητα του Concentrate σε σίδηρο, την περιεκτικότητα σε Si, και το πόσο τελικά θα αναχθεί το οξείδιο του χρωμίου Cr_2O_3 , από τον Άνθρακα ώστε να μπορεί να συμπληρωθεί στο κρυσταλλικό πλέγμα του χάλυβα ή των κραμάτων δημιουργούνται οι βασικοί εμπορικοί εμπορεύσιμοι τύποι FeCr (Ζευγώλης, 2000):

- HC FeCr (high Carbon): 60-70% Cr, 4-6 C, Si 3%
- CHARGE CHROME: 52-55% Cr, 6-8 C, Si 5-6%
- MC FeCr (medium Carbon): 62-75% Cr, 0.5-2% C, Si 1.5%
- LC FeCr (low Carbon): 62-75% Cr, 0.01-0.5 %C

6. Πλατινοειδή σε κοιτάσματα χρωμίτη

6.1. Ορυκτολογία

Οι Gijbels et al. (1974) και οι Naldrett και Cabri (1976) πρότειναν ότι κατά το σχηματισμό των οφιολιθικών χρωμιτιτών τα PGE θα μπορούσαν να κλασματοποιηθούν σε χρωμίτη σε υψηλές θερμοκρασίες και κατά την ψύξη θα διαλυόταν από το οξείδιο ως διακριτά ορυκτά της ομάδας του λευκόχρυσου.

Είναι ευρέως αποδεκτό ότι τα στοιχεία της ομάδας της πλατίνας (PGE) βρίσκονται στους χρωμίτες κυρίως σε διακριτές ειδικές φάσεις που αναφέρονται ως ορυκτά της ομάδας της πλατίνας (PGM), έχουν μέγεθος μικρότερο από 20 μικρόμετρα, και εμφανίζονται ανομοιόμορφα διασκορπισμένα στον χρωμίτη και στα ορυκτά του περιβλήματος. Λιγότερο συχνά, δευτερεύουσες ποσότητες PGE μπορούν να υποκαταστήσουν τον σίδηρο, το νικέλιο, τον χαλκό και το κοβάλτιο σε κοινά ορυκτά βασικών μετάλλων (σουλφίδια, αρσενίδια και κράματα). Σύμφωνα με ορισμένες θεωρητικές εκτιμήσεις τα PGE μπορούν επίσης να μεταφερθούν σε στερεό διάλυμα στο κρυσταλλικό πλέγμα του χρωμίτη, αν και δεν φαίνεται να υπάρχει τεκμηριωμένο παράδειγμα αυτού του τρόπου εμφάνισης των PGE στη φύση (Garuti, 2009).

Τα κυριότερα PGE που εμφανίζονται στους διάφορους τύπους κοιτασμάτων χρωμίτη PGE περιλαμβάνουν κράματα, σουλφίδια, σουλφαρσενίδια, αρσενίδια, ενώσεις με μόλυβδο, τελλούριο, βισμούθιο, αντιμόνιο και υδράργυρο και οξείδια (Garuti, 2009).

6.2. Πρωτογενή και δευτερογενή ορυκτά της ομάδας της πλατίνας

Ο πληθυσμός των PGM που φιλοξενούνται στους χρωμίτες περιλαμβάνει δύο γενετικά διαφορετικές κατηγορίες: τα πρωτογενή PGM, που κρυσταλλώνονται σε υψηλές μαγματικές θερμοκρασίες, και τα δευτερογενή PGM, που σχηματίζονται σε σχετικά χαμηλές θερμοκρασίες ως αποτέλεσμα της κινητικότητας των PGE υπό υδροθερμικές συνθήκες και συνθήκες αποσάθρωσης. Τα δευτερογενή PGM απαντώνται συχνά σε εκείνους τους χρωμίτες που έχουν υποστεί ωκεάνια μεταμόρφωση (οφιολιθικοί χρωμίτες), μετασωματισμό με υδροθερμικό ρευστό (χρωμίτες σε αρχαίους μεταμορφωμένους κρατώνες) ή μακροχρόνια έκθεση σε υπεργενετική αλλοίωση σε τροπικό κλίμα (χρωμίτες σε λατερίτες). Δεδομένου ότι ο χρωμίτης είναι συνήθως πιο ανθεκτικός στην αλλοίωση από ό,τι τα συναφή πυριτικά και σουλφίδια, τα πρωτογενή PGM βρίσκονται ως εγκλείσματα σε νωπό χρωμίτη, ενώ τα δευτερογενή βρίσκονται συνήθως σε αλλοιωμένα ορυκτά συμφύσεων (σερπεντίνη, χλωρίτη,

τάλκ, Fe-υδροξείδια) ή κατά μήκος ρωγμών και θραυσμάτων που τέμνουν τους κόκκους χρωμίτη. Εάν ο χρωμίτης υποστεί αλλοίωση, τα περιεχόμενα PGM μπορούν να αλλοιωθούν με τη σειρά τους ή να επιβιώσουν, λόγω της σχετικά υψηλής σταθερότητάς τους, επομένως, τα πρωτογενή PGM μπορεί να βρεθούν περιστασιακά στις δευτερογενείς παραγενετικές ενώσεις. Τόσο η μορφολογία όσο και η σύνθεση των κόκκων PGM παρέχουν πληροφορίες για τον προσδιορισμό της προέλευσής τους (Garuti, 2009).

Γενικά, τα κράματα οσμίου-ιριδίου-ρουθηνίου (Os-Ir-Ru) και τα κράματα πλατίνας-σιδήρου (Pt-Fe) απαντώνται ως πρωτογενή ιδιόμορφα εγκλείσματα στον χρωμίτη-σπανιότερα περιλαμβάνονται στα στείρα πετρώματα. Τα κράματα PGE σπάνια αναφέρεται ότι έχουν σχηματιστεί σε χαμηλή θερμοκρασία. Ωστόσο, έχουν περιγραφεί δευτερογενή κράματα πλούσια σε ρουθίνιο που περιέχουν σημαντικό ποσό σιδήρου και νικελίου από αλλοιωμένους χρωμίτες και πιστεύεται ότι προέρχονται από την αποθείωση του πρωτογενούς λαουρίτη υπό υδροθερμικές συνθήκες. Ο τουλαμινίτης καθώς και άλλα άγνωστα κράματα πλατίνας-σιδήρου και πλατίνας-παλλάδιου-σιδήρου-χαλκού έχουν παρατηρηθεί ως δευτερογενή προϊόντα σε διάφορους χρωμίτες (Garuti, 2009).

Τα περισσότερα θειώδη PGM είναι πρωτογενή ορυκτά. Μέλη της σειράς λαουρίτη-ερλιχμανίτη και άλλα σουλφίδια ιριδίου-ρουθηνίου περιλαμβάνονται συνήθως στον χρωμίτη ως μοναχικοί κρύσταλλοι ή σύνθετα συσσωματώματα ενός ή περισσότερων PGM, ενίοτε σε συνδυασμό με πρωτογενή πυριτικά άλατα (ολιβίνη, πυρόξενους, αμφιβολικοί, φλογοπίτες) και σουλφίδια βασικών μετάλλων (πεντλανδίτη, χαλκοπυρίτη, μαγνητοπυρίτη). Ο λαουρίτης με σχεδόν καθαρή σύνθεση RuS_2 έχει περιστασιακά αναφερθεί ως δευτερογενές PGM. Τα θειούχα που κυριαρχούνται από πλατίνα και παλλάδιο συνδέονται συχνά με σουλφίδια νικελίου-χαλκού-σιδήρου που βρίσκονται στο διάμεσο του χρωμίτη και πιστεύεται ότι σχηματίστηκαν αρχικά από μαγματικά ρευστά σουλφιδίων (Garuti, 2009).

Τα σουλφαρσενίδια και τα αρσενίδια θεωρούνται γενικά ότι έχουν κατακρημνιστεί από υδροθερμικά ρευστά πλούσια σε αρσενικό σε χαμηλή θερμοκρασία, αν και σε ορισμένες περιπτώσεις μπορεί να έχουν κρυσταλλωθεί σε υψηλή θερμοκρασία λόγω της αύξησης της δραστηριότητας του αρσενικού στο τήγμα (Garuti, 2009).

Τα τελλουρίδια, τα αντιμονίδια και τα βισμούθια σχηματίζονται με εξισορρόπηση ενός πλούσιου σε PGE μη αναμίξιμου θειούχου τήγματος, που περιέχει τελλούριο, αντιμόνιο και βισμούθιο ως δευτερεύοντα συστατικά. Σε ορισμένες περιπτώσεις απαντώνται ως δευτερογενή PGM που κρυσταλλώνονται από υδροθερμικά διαλύματα μαζί με τις ενώσεις παλλάδιο-μόλυβδος και παλλάδιο-υδράργυρος (Garuti, 2009).

6.3. Προέλευση των πρωτογενών εγκλεισμάτων ορυκτών της ομάδας της πλατίνας στον χρωμίτη: Το μοντέλο του «μεταλλικού συμπλέγματος»

Τα πρωτογενή εγκλείσματα PGM αντιπροσωπεύουν πρώιμους μαγματικούς κρυστάλλους που συλλέγονται μηχανικά από τους κόκκους χρωμίτη που δημιουργούν πυρήνες γύρω τους και δεν έχουν διαλυθεί από τον χρωμίτη κατά το στάδιο της υποστερεοποίησης. Το μοντέλο της "μηχανικής παγίδευσης" εξηγεί καλύτερα την ορυκτολογική πολυπλοκότητα ορισμένων εγκλεισμάτων PGM και δεν απαιτεί καμία κρυσταλλική συμβατότητα των μεμονωμένων PGE για τη δομή του σπινέλιου ξενιστή. Η απαραίτητη προϋπόθεση είναι ότι τα PGM ήταν ήδη παρόντα στο σύστημα σε υψηλή θερμοκρασία πριν από την καταβύθιση του χρωμίτη. Η μορφολογική μελέτη των εγκλεισμάτων δείχνει ότι ορισμένα από αυτά συλλέχθηκαν ως αυτομορφικοί στερεοί κρύσταλλοι, ενώ άλλα θα έπρεπε να αντιστοιχούν στον εγκλεισμό στερεών PGM + θειούχο ρεύστο + πυριτικό τήγμα, ή πλούσιο σε PGE θειούχο ρεύστο με ή χωρίς πυριτικό τήγμα. Η εξισορρόπηση κατά την ψύξη τέτοιου υλικού μπορεί να εξηγήσει την ποικιλία πολυμεταλλικών εγκλεισμάτων με PGE που παρατηρούνται σε χρωμίτες από διάφορες εμφανίσεις (Garuti, 2009).

Η κρυστάλλωση των PGM σε υψηλές θερμοκρασίες παρουσιάζει ορισμένες ζητήματα σχετικά με τη φυσική κατάσταση των PGE σε φυσικά πυριτικά τήγματα. Αφενός, τα PGE και τα περισσότερα από τα ορυκτά τους έχουν απαγορευτικά υψηλά σημεία τήξης (1500-3500°C) σε σύγκριση με τις θερμοκρασίες που είναι τυπικές για τα φυσικά μάγματα, γεγονός που εγείρει το ερώτημα πώς μπορούν να εισέλθουν στο τήγμα κατά τη μερική τήξη του μανδύα. Από την άλλη πλευρά, υπάρχουν αδιάσειστες αποδείξεις ότι τα PGE απομακρύνθηκαν με κάποιο τρόπο από την πηγή τους στο μανδύα και στη συνέχεια κατακρημνίστηκαν ως συγκεκριμένες φάσεις. Ο τρόπος με τον οποίο αυτές οι πετρολογικές διεργασίες μπορεί να λαμβάνουν χώρα στη φύση έχει επανεξεταστεί υπό το πρίσμα της θεωρητικής χημείας των συμπλεγμάτων των μεταβατικών μετάλλων, η οποία οδήγησε στην ανάπτυξη του μοντέλου των "μεταλλικών συμπλεγμάτων" για την ερμηνεία της γεωχημικής συμπεριφοράς των PGE (Garuti, 2009).

Έχει προταθεί ότι στα φυσικά μάγματα τα PGE μπορεί να εμφανίζονται αρχικά ως αιώρημα "μεταλλικών συσσωματωμάτων" περίπου 50-100 ατόμων χωρίς διατεταγμένη δομή και όχι ως κατιόντα ή οποιοδήποτε τύπου μοριακά είδη. Τα συσσωματώματα αυτά παρουσιάζουν υψηλή χημική αντιδραστικότητα και παρουσιάζουν σημαντική ταπείνωση του σημείου τήξης, πολύ κάτω από εκείνο των αντίστοιχων στερεών μετάλλων (1300-1400°C). Η τάση για σχηματισμό σταθερών συστάδων μειώνεται από το όσμιο στο παλλάδιο, με τη μείωση

του ατομικού αριθμού, η οποία για τα PGE (εκτός από την πλατίνα) είναι επίσης αντίστροφη του σημείου τήξης: επομένως τα IPGE (Os, Ir, Ru) θα σχηματίσουν συστάδες ευκολότερα από τα χαμηλής τήξης (Rh, Pd). Οι συστάδες μπορούν να σταθεροποιηθούν με την επιφανειακή προσρόφηση συγκεκριμένων ligands ($S \pm As, Te, Bi, Sb$), τα οποία σχηματίζουν ένα περίβλημα γύρω από τα μεταλλικά άτομα, χωρίς να υπάρχει κανένας τυπικός χημικός δεσμός. Λόγω των φυσικών και χημικών ιδιοτήτων τους, οι συστάδες θα τείνουν να συνενώνονται με τη μείωση της θερμοκρασίας για να σχηματίσουν συγκεκριμένα κράματα PGM ή σουλφίδια (Garuti, 2009).

Το μοντέλο που βασίζεται σε σύμπλοκα παρέχει έναν λογικό τρόπο ερμηνείας της διαδοχής των συνόλων και της κατανομής της υφής των πρωτογενών PGM στους χρωμίτες. Οι συστάδες των πυρίμαχων IPGE (Os, Ir, Ru) μετατρέπονται ταχέως σε PGM και η καταβύθιση των σουλφιδίων έναντι των κραμάτων θα εξαρτηθεί από τη σχετική σταθερότητα των συγκεκριμένων φάσεων ως συναρτήσεις της διαφυγότητας του θείου και της θερμοκρασίας. Μόλις σχηματιστούν, αυτά τα πυρίμαχα PGM θα αποτελέσουν τα κέντρα για την πυρηνοποίηση του χρωμίτη και των πρώιμων πυριτικών αλάτων. Τα σύμπλοκα των λιγότερο πυρίμαχων PPGE (Rh, Pt, Pd) θα παραμείνουν διασκορπισμένα στο υπολειμματικό τήγμα μέχρι να κατακρημνιστούν από τον χρωμίτη. Εάν επιτευχθεί κορεσμός θείου κατά την καταβύθιση του χρωμίτη, οι πλούσιες σε PPGE συστάδες που ενεργοποιούνται από το περίβλημα θείου θα συγκεντρωθούν σε σταγονίδια σουλφιδίων μεταξύ των σωμάτων για να κρυσταλλωθούν ως σουλφίδια PGM στην κατάλληλη θερμοκρασία ή θα διαλυθούν στα σουλφίδια των βασικών μετάλλων (Garuti, 2009).

6.4. Πετρολογικά χαρακτηριστικά των ορυκτών της ομάδας της πλατίνας που φιλοξενούνται σε χρωμίτες

Σε μια ανασκόπηση των ορυκτών της ομάδας του λευκόχρυσου σε χρωμίτες οφιολίθων, οι González-Jiménez et al. (2009), έδειξαν ότι αυτού του τύπου τα πετρώματα είναι σπάνια ορυκτά, συνήθως με διάμετρο μικρότερη από 30 μm . Σχηματίζουν μεμονωμένους ή σύνθετους (διφασικούς ή πολυφασικούς) κόκκους που αποτελούνται αποκλειστικά από PGMs, ή PGMs μαζί με/ή χωρίς ορυκτά βασικών μετάλλων και/χωρίς πυριτικά άλατα, τυχαία διασκορπισμένους σε μεγαλύτερους κόκκους χρωμίτη ή όχι τόσο συχνά στη διάμεση πυριτική μήτρα (αμετάβλητα ή αλλοιωμένα) μεταξύ των κόκκων χρωμίτη. Οι συγγραφείς αυτοί παρατήρησαν ότι

μέσα σε έναν κόκκο χρωμίτη, τα PGM μπορούν να βρεθούν σε τρεις κύριες μικροδομικές θέσεις (González-Jiménez et al):

- Αμετάβλητες ζώνες, κυρίως στους πυρήνες
- Ανοιχτά ρήγματα, σπάνια με ακανόνιστα περιγράμματα ή/και αλλοίωση και/ή πληρωμένα με δευτερογενή πυριτικά άλατα
- Αλλοιωμένες εσωτερικές ζώνες ή ακμές (αποτελούμενες από σιδηρούχο χρωμίτη με ομοιογενή ή πορώδη υφή).

6.5. Ορυκτά της ομάδας της πλατίνας στους Ελληνικούς χρωμίτες

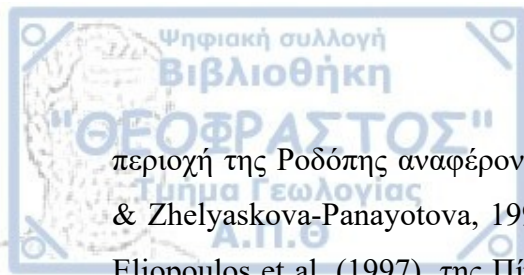
Αναφορικά με τα επίπεδα συγκέντρωσης των PGE (+Au) στους χρωμίτες του Ελλαδικού χώρου, γενικά κυμαίνονται σε χαμηλά επίπεδα, από μερικές δεκάδες έως λίγες εκατοντάδες ppb (Tarkian et al., 1996). Τοπικά, χωρίς αυτό να σχετίζεται με τη χημική σύσταση των χρωμιτικών κοιτασμάτων, σε ορισμένους χρωμίτες έχει εντοπιστεί εμπλουτισμός της τάξης λίγων ppm (Economou-Eliopoulos, 1993). Ο εμπλουτισμός αφορά (Tarkian et al., 1996):

- Μόνο στα IPGE
- Μόνο στο Pt ή/και στο Pd
- Σε όλα τα PGE

Παράλληλα, υψηλότερα επίπεδα συγκεντρώσεων PGE είναι πιο συνηθισμένα στον μεταλλουργικό τύπο χρωμίτη και όχι στον πυρίμαχο (Agiorgitis & Wolf, 1978; Economou, 1983).

Σε ορισμένους από τους χρωμίτες του Βόρειου Βούρινου (Βοϊδόλακκος) διαπιστώθηκαν τοπικοί εμπλουτισμοί, με μέγιστο τα 3 ppm (Konstantopoulou & Economou-Eliopoulos, 1991). Αντίστοιχος εμπλουτισμός των 3 ppm έχει αναφερθεί και σε κάποιους από τους ΑΙ-ούχους χρωμίτες της Σκύρου (Αχλαδώνες) (Agiorgitis & Wolf, 1978; Economou, 1983). Υψηλά ποσοστά IPGE παρουσιάζουν και οι χρωμιτίτες της Μηλιάς και του Κορυδαλλού στην Πίνδο, 1260 ppb και 5215 ppb αντίστοιχα (Tarkian et al., 1996). Οι υψηλότερες συγκεντρώσεις PGE μετρήθηκαν στους ΑΙ-ούχους χρωμίτες του Γαλάκτου στη Βέροια, έως 25 ppm (Tsoupas & Economou-Eliopoulos, 2005, 2008).

Πρώτοι οι Agiorgitis and Wolf (1978) μελέτησαν τα PGE+Au στους χρωμίτες του Βούρινου, ενώ για την ίδια περιοχή σημαντικές είναι οι εργασίες των (Economou 1983, 1986, Talkington & Watkinson 1986, Κωνσταντοπούλου, 1990, Konstantopoulou & Economou-Eliopoulos, 1991) και Economou-Eliopoulos (1993, 1996) που αναφέρεται και στις περιοχές της Πίνδου, Όθρυος, Χαλκιδικής, Βερμίου, Σερβομακεδονικής Ροδόπης και Σκύρου. Στην



περιοχή της Ροδόπης αναφέρονται οι (Magganas & Economou 1988, Economou-Eliopoulos & Zhelyaskova-Panayotova, 1998), στους χρωμίτες της Όθρυος αναφέρονται οι Economou-Eliopoulos et al. (1997), της Πίνδου οι Economou-Eliopoulos & Vakondios (1995), Tarkian et al. (1996) και τέλος ο Βακόνδιος (1997) για τους χρωμίτες της περιοχής της Τήνου και Γερανίων (Ν. Κορινθίας).

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

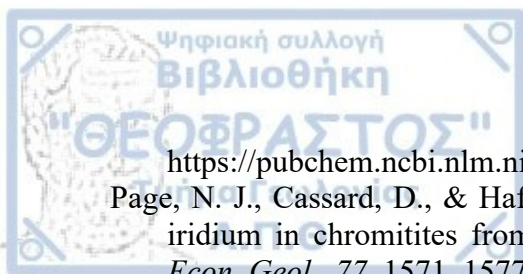
- Agiorgitis, G., & Wolf, R. (1978). Aspects of osmium, ruthenium and iridium contents in some Greek chromites. *Chemical Geology*, *23*, 267–272.
- Ahmed, A., & Arai, S. (2002). Unexpectedly high-PGE chromite from the deeper mantle section of the northern Oman ophiolite and its tectonic implications. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, *143*, 263–278.
- Anduoite. Retrieved May 23, 2022, from <https://www.mindat.org/min-227.html>
- Arai, S., Uesugi, J., & Ahmed, A. (2004). Upper crustal podiform chromitite from the northern Oman ophiolite as the stratigraphically shallowest chromitite in ophiolite and its implication for Cr concentration. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, *147*, 145–154.
- Arculus, R., & Delano, J. (1981). Intrinsic oxygen fugacity measurements: Techniques and results from upper mantle peridotites and megacryst assemblages. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, *45*, 899–913.
- Arsenopalladinite Mineral Data. Retrieved May 23, 2022, from <http://www.webmineral.com/data/Arsenopalladinite.shtml#.YrRnrXZBy5c>
- Atheneite Mineral Data. Retrieved May 23, 2022, from <http://webmineral.com/data/Atheneite.shtml#.YrRoRHZBy5c>
- Atokite. Retrieved May 23, 2022, from <https://www.mindat.org/min-413.html>
- Augé, T., & Johan, Z. (1988). Iridium, rhodium, and platinum sulfides in c chromitites from the ultramafic massifs of Finero, Italy, and Ojen, Spain. (Special Publication No. 6; Mineral Deposits within the European Community, pp. 267–288). Springer: Berlin/Heidelberg.
- Bacuta, G. C., Kay, R. W., Gibbs, A. K., & Lipin, B. R. (1990). Platinum-group element abundance and distribution in chromite deposits of the Acoje block, Zambales ophiolite complex, Philippines. *Journal of Geochemical Exploration*, *37*, 113–145.
- Barnes, S., & Maier, W. (1999). The fractionation of Ni, Cu and the noble metals in silicate and sulphide liquids. In R. Keays (Ed.), *Dynamic process in magmatic ore deposits and their application in mineral exploration*. (pp. 69–106). Geological association of Canada, Short course notes XIII.
- Barnes, S., & Naldrett, A. (1986). Variations in platinum-group element concentrations in the Alexo mine komatiite, Abiti greenstone belt, Northern Ontario. *Geological Magazine*, *123*, 515–524.
- Barnes, S., Naldrett, A., & Gorton, M. (1985). The origin of the fractionation of platinum-group elements in terrestrial magmas. *Chemical Geology*, *53*, 303–323.
- Borovskite Mineral Data. Retrieved May 23, 2022, from <https://webmineral.com/data/Borovskite.shtml>
- Bowieite. Retrieved May 23, 2022, from <https://www.mindat.org/min-745.html>
- Brenan, J., & Andrews, D. (2001). High-temperature stability of laurite and Ru-Os-Ir alloys and their role in PGE fractionation in mafic magmas. *The Canadian Mineralogist*, *39*, 341–360.
- Cabriite Mineral Data. Retrieved May 23, 2022, from <https://webmineral.com/data/Cabriite.shtml>
- Capobianco, C. J., & Drake, M. J. (1990). Partitioning of ruthenium, rhodium, and palladium between spinel and silicate melt and implications for platinum group element fractionation trends. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, *54*(3), 869–874. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(90\)90379-Y](https://doi.org/10.1016/0016-7037(90)90379-Y)
- Capobianco, C., Hervig, R., & Drake, M. (1994). Experiments on crystal/liquid partitioning of Ru, Rh and Pd for magnetite and hematite solid solutions crystallized from silicate melt.

- Chemical Geology*, 113, 23–43.
- Cassard, D. (1980). *Structure et origine des gisements de chromite du Massif du Sud (ophiolite de Nouvelle Calédonie). Guides de prospection*. These Doc 3 & Cycle, Univ. Nantes.
- Cassard, D., Nicholas, A., Rabinovitch, M., Moutte, J., Leblanc, M., & Prinzhofer, A. (1981). Structural classification of chromite pods in southern New Caledonia. *Economic Geology*, 76, 805–831.
- Changchengite Mineral Data. Retrieved May 23, 2022, from <http://webmineral.com/data/Changchengite.shtml#.YrR40XZBy5c>
- Chaston, J. C. (1965). Thermal conductivity of Pure Platinum. *Platinum Metals Review*, 9(60).
- Chengdeite Mineral Data. Retrieved May 23, 2022, from <http://webmineral.com/data/Chengdeite.shtml#.YrR5F3ZBy5c>
- Cherepanovite Mineral Data. Retrieved May 23, 2022, from <https://webmineral.com/data/Cherepanovite.shtml>
- Chromite Mineral Data. Retrieved May 27, 2022, from <http://webmineral.com/data/Chromite.shtml#.Yrl2bnZBy5c>
- Cole, S., & Ferron, C. J. (2002). A review of the beneficiation and extractive metallurgy of the platinum-group elements, highlighting recent process innovations. In L. J. Cabri (Ed.), *The Geology, Geochemistry, Mineralogy and Mineral Beneficiation of platinum-group elements.: Vol. Special Volume 54* (pp. 811–818). Canadian Institute of mining and metallurgy.
- Constantinides, C. C., Kingston, G. A., & Fischer, P. C. (1980). The occurrence of platinum group minerals in the chromitites of the Kokkinorotsos chrome mine, Cyprus. In A. Panayiotou (Ed.), *Ophiolites, Proceedings of the International Ophiolite Symposium* (pp. 93–101). Geological Survey Department.
- Cooperite Mineral Data. Retrieved May 23, 2022, from <http://www.webmineral.com/data/Cooperite.shtml#.YrSjG3ZBy5c>
- Crerarite Mineral Data. Retrieved May 23, 2022, from <https://webmineral.com/data/Crerarite.shtml>
- Cuprorhodsite Mineral Data. Retrieved May 23, 2022, from <https://webmineral.com/data/Cuprorhodsite.shtml>
- Daomanite Mineral Data. Retrieved May 23, 2022, from <http://webmineral.com/data/Daomanite.shtml>
- Dick, H. J. B., & Fischer, R. L. (1984). Mineralogical studies of the residues of mantle melting: Abyssal and alpine-type peridotites. In J. Kornprobst (Ed.), *Kimberlite II, The mantle and crust-mantle relationships*. (pp. 295–308). Elsevier.
- Dickey, J. S. (1975). A hypothesis of origin for podiform chromite deposits. In T. N. Irvine (Ed.), *Chromium* (pp. 1061–1074). Pergamon press.
- Economou, G., (1985). A short note of the evolution of the Vermion ophiolite complex (Macedonia-Greece). (1983). *Ofioliti*, 8, 333–338.
- Economou, M. (1986). Platinum group elements (PGE) in chromite and sulfide ores. In M. J. Gallagher, R. A. Ixer, C. R. Neary, & H. Prichard (Eds.), *Metallogeny of Basic and Ultrabasic Rocks*. (pp. 441–453). Inst. Mining Metallurgy.
- Economou-Eliopoulos, M. (1993). Platinum-group elements (PGE) distribution in chromite ores from ophiolite complexes of Greece: Implications for chromite exploration. *Ofioliti*, 18, 83–97.
- Economou-Eliopoulos, M., & Vacondios, I. (1995). Geochemistry of chromitites and host rocks from the Pindos ophiolite complex, northwestern Greece. *Chemical Geology*, 122, 99–108.

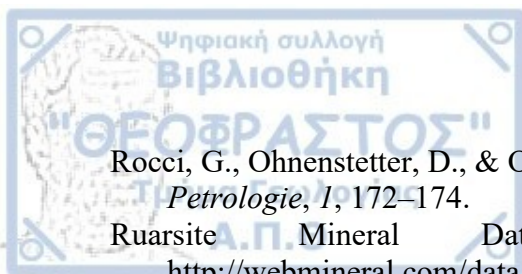
- Economou-Eliopoulos, M., & Zhelyaskova-Panayiotova, M. (1998). Comparative study of the geochemistry of chromite ores from the Kempirsai (Urals) and Rhodope (Balkan Peninsula) ophiolite massifs. *Bulletin, Geological Society of Greece*, 32, 203–211.
- Economou-Eliopoulos, M., Parry, S., & Christidis, G. (1997). Platinum-group element (PGE) content of chromite ores from the Othrys ophiolite complex, Greece. *Mineral Deposits, Papunen*, 414–417.
- Erlichmanite Mineral Data. Retrieved May 23, 2022, from <http://webmineral.com/data/Erlichmanite.shtml#.YrR2lnZBy5c>
- Ferronickelplatinum Mineral Data. Retrieved May 23, 2022, from <http://webmineral.com/data/Ferronickelplatinum.shtml#.YrSmmHZBy5c>
- Ferrorhodsitite Mineral Data. Retrieved May 23, 2022, from <https://webmineral.com/data/Ferrorhodsitite.shtml>
- Froodite Mineral Data. Retrieved May 23, 2022, from <http://webmineral.com/data/Froodite.shtml#.YrRqG3ZBy5c>
- Gaotaiite Mineral Data. Retrieved May 23, 2022, from <https://webmineral.com/data/Gaotaiite.shtml>
- Garuti, G. (2009). Chromite platinum-group element magmatic deposits. In B. De Vivo, B. Grasemann, & K. Stuwe (Eds.), *Geology: Vol. IV* (pp. 70–84). EOLSS Publications.
- Garuti, G., & Zaccarini, F. (1997). In situ alteration of platinum-group minerals at low temperature: Evidence from serpentinized and weathered chromitite of the Vourinos Complex, Greece. *Can. Mineral.*, 35, 611–626.
- Garuti, G., Gazzotti, M., & Torres-Ruiz, J. (1995). Iridium, rhodium, and platinum sulfides in chromitites from the ultramafic massifs of Finero, Italy, and Ojen, Spain. *Can. Mineral.*, 33, 509–520.
- Garuti, G., Zaccarini, F., & Economou-Eliopoulos, M. (1999). Paragenesis and composition of laurite from the chromitites of Othrys (Greece): Implications for Os-Ru fractionation in ophiolitic upper mantle of the Balkan Peninsula. *Mineralium Deposita*, 34, 312–319.
- Genkinite Mineral Data. Retrieved May 23, 2022, from <http://webmineral.com/data/Genkinite.shtml#.YrSm23ZBy5c>
- Geversite Mineral Data. Retrieved May 23, 2022, from <https://webmineral.com/data/Geversite.shtml>
- Gijbels, R. h, Millard, H. T., Desborough, G. A., & Bartel, A. J. (1974). Osmium, ruthenium, iridium and uranium in silicates and chromite from the eastern Bushveld Complex, South Africa. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 38(2), 319–337. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(74\)90113-6](https://doi.org/10.1016/0016-7037(74)90113-6)
- González-Jiménez, J. M., Gervilla, F., Proenza, J. A., Augé, T., & Kerestedjian, T. (2009). Distribution of platinum-group minerals in ophiolitic chromitites. *Applied Earth Science*, 118(3–4), 101–110. <https://doi.org/10.1179/174327509X12550990457924>
- González-Jiménez, J. M., Griffin, W. L., Gervilla, F., Proenza, J. A., O'Reilly, S. Y., & Pearson, N. J. (2014). Chromitites in ophiolites: How, where, when, why? Part I. A review and new ideas on the origin and significance of platinum-group minerals. *The Lithosphere and beyond: A Multidisciplinary Spotlight*, 189, 127–139. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2013.06.016>
- Greenbaum, D. (1977). The chromitiferous rocks of the Troodos ophiolite complex, Cyprus. *Econ. Geol.*, 72, 1175–1194.
- Haldar, S. K. (2017). Chapter 1—Introduction. In S. K. Haldar (Ed.), *Platinum-Nickel-Chromium Deposits* (pp. 1–35). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-802041-8.00001-8>
- Holleman, A., & Wiberg, B. (1985). *Lehrbuch der Anorganischen Chemie* (33rd ed.).

- Gruyter.
Hollingworthite Mineral Data. Retrieved May 23, 2022, from <http://webmineral.com/data/Hollingworthite.shtml#.YrRlOnZBy5c>
- Hongshiite Mineral Data. Retrieved May 23, 2022, from <http://www.webmineral.com/data/Hongshiite.shtml#.YrSsTXZBy5c>
- Inaglyite Mineral Data. Retrieved May 23, 2022, from <http://www.webmineral.com/data/Inaglyite.shtml#.YrR8FnZBy5c>
- Iridarsenite Mineral Data. Retrieved May 23, 2022, from <http://webmineral.com/data/Iridarsenite.shtml#.YrR8tnZBy5c>
- iridium—Wolfram|Alpha. Retrieved May 23, 2022, from <https://www.wolframalpha.com>
- Irvine, T. N. (1970). Crystallization sequences in the Muskox intrusion and other layered intrusions II. Olivine—Pyroxene—Plagioclase relations. *Geological Society of South Africa, Special Publication, 1*, 442–476.
- Irvine, T. N. (1975). Crystallization sequences in the Muskox intrusion and other layered intrusions II. Origin of the chromitic layers and similar deposits of other magmatic ores. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 39, 991–1020.
- Irvine, T. N. (1977). Origin of chromitite layers in the Muskox intrusion and other stratiform intrusions: A new interpretation. *Geology*, 5, 273–277.
- Isoferroplatinum Mineral Data. Retrieved May 23, 2022, from <http://www.webmineral.com/data/Isoferroplatinum.shtml#.YrSsm3ZBy5c>
- Isomertieite Mineral Data. Retrieved May 23, 2022, from <http://webmineral.com/data/Isomertieite.shtml#.YrRqY3ZBy5c>
- Jagoutz, E., Palme, H., Baddenhausen, H., Blum, K., Cendales, M., Dreibus, G., Spettei, B., Lorenz, V., & Wande, H. (1979). The abundance of major, minor and trace elements in the Earth's mantle as derived from primitive ultramafic nodules. *Geochemica et Cosmochimica Acta*, 2, 2031–2050.
- Kashinite Mineral Data. Retrieved May 23, 2022, from <http://webmineral.com/data/Kashinite.shtml#.YrR8y3ZBy5c>
- Keays, R. (1995). The role of komatiitic magmatism and S-saturation in the formation of ore deposits. *Lithos*, 34, 1–18.
- Keithconnite Mineral Data. Retrieved May 23, 2022, from <http://webmineral.com/data/Keithconnite.shtml#.YrRq4HZBy5c>
- Kharaelakhite Mineral Data. Retrieved May 23, 2022, from <http://www.webmineral.com/data/Kharaelakhite.shtml#.YrSs73ZBy5c>
- Konderite Mineral Data. Retrieved May 23, 2022, from <http://webmineral.com/data/Konderite.shtml#.YrRlTnZBy5c>
- Konstantopoulou, G., & Economou-Eliopoulos, M. (1991). Distribution of platinum group elements and gold within the Vourinos chromitite ores, Greece. *Economic Geology*, 86, 1672–1682.
- Kotulskite Mineral Data. Retrieved May 23, 2022, from <http://webmineral.com/data/Kotulskite.shtml#.YrSQrnZBy5c>
- Laflammeite Mineral Data. Retrieved May 23, 2022, from <http://webmineral.com/data/Laflammeite.shtml#.YrSRL3ZBy5c>
- Lago, B. L., Rabinowicz, M., & Nicholas, A. (1982). Podiform chromite orebodies: A genetic model. *Journal of Petrology*, 23, 103–125.
- Legendre, O., & Augé, T. (1986). Mineralogy of platinum-group mineral inclusions in chromitites from different ophiolite complexes. In M. J. Gallagher, R. A. Ixer, C. R. Neary, & H. Prichard (Eds.), *Metallogeny of Basic and Ultrabasic Rocks* (pp. 361–372). Springer.
- Luberoite Mineral Data. Retrieved May 23, 2022, from

- <http://webmineral.com/data/Luberoite.shtml#.YrStWnZBy5c>
- Magganas, A., & Economou, M. (1988). On the chemical composition of chromite ores from the ophiolitic complex of Soufli, NE Greece. *Ofioliti*, 13, 15–27.
- Maier, W., Prichard, H., Fischer, P., & Barnes, S. (1999). Compositional variation of laurite at Union section in the western Bushveld complex. *S. Afr. J. Geol.*, 102, 286–292.
- Majakite Mineral Data. Retrieved May 23, 2022, from <http://www.webmineral.com/data/Majakite.shtml#.YrSRiHZBy5c>
- Malanite Mineral Data. Retrieved May 23, 2022, from <http://www.webmineral.com/data/Malanite.shtml#.YrStq3ZBy5c>
- Maslovite Mineral Data. Retrieved May 23, 2022, from <http://webmineral.com/data/Maslovite.shtml#.YrSt9nZBy5c>
- Mayingite Mineral Data. Retrieved May 23, 2022, from <http://webmineral.com/data/Mayingite.shtml#.YrR9M3ZBy5c>
- Menshikovite Mineral Data. Retrieved May 23, 2022, from <http://www.webmineral.com/data/Menshikovite.shtml#.YrSR4nZBy5c>
- Merenskyite Mineral Data. Retrieved May 23, 2022, from <http://webmineral.com/data/Merenskyite.shtml#.YrSSjHZBy5c>
- Mertieite-I Mineral Data. Retrieved May 23, 2022, from <http://webmineral.com/data/Mertieite-I.shtml#.YrSS2nZBy5c>
- Mertieite-II Mineral Data. Retrieved May 23, 2022, from <http://webmineral.com/data/Mertieite-II.shtml#.YrSTOHZBy5c>
- Michenerite Mineral Data. Retrieved May 23, 2022, from <http://webmineral.com/data/Michenerite.shtml#.YrST6XZBy5c>
- Moncheite Mineral Data. Retrieved May 23, 2022, from <http://webmineral.com/data/Moncheite.shtml#.YrSuUnZBy5c>
- Naldrett, A. (1981). Platinum-group element deposits. *Can. Inst. Min. Metall.*, 23, 197–232.
- Naldrett, A. (1997). Models for the formation of stratabound concentrations of platinum group elements in layered intrusions. *Geol. Assoc. Canada Special Paper*, 40, 373–388.
- Naldrett, A., & Cabri, L. J. (1976). Ultramafic and related mafic rocks: Their classification and genesis with special reference to the concentration of nickel sulfides and platinum-group elements. *Economic Geology*, 71, 1131–1158.
- Naldrett, A., & Duke, J. M. (1980). Pt metals in magmatic sulfide ores. *Science*, 208, 1417–1424.
- Naldrett, A., & MacDonald, A. J. (1980). Tectonic setting of some Ni-Cu sulfide ores: Their importance in genesis and exploration. *Geol. Assoc. Canada Special Paper No. 20*, 633–657.
- Neary, C. R., & Brown, M. A. (1979). Chromites from Al Ays complex Saudi Arabia and Semail complex, Oman. In A. M. S. Al Shanti (Ed.), *Evolution and Mineralization of the Arabian shield* (2nd ed., pp. 193–205). I.A.G. Bull.
- Nicolas, A. (1990). *Les montagnes sous la mer*. BRGM.
- Niggliite Mineral Data. Retrieved May 23, 2022, from <http://webmineral.com/data/Niggliite.shtml#.YrSue3ZBy5c>
- Olivotos, S. (2015). THERMODYNAMIC CONTROLS ON THE FORMATION AND STABILITY OF PLATINUM-GROUP MINERALS [Master Thesis]. National and Kapodistrian University of Athens.
- Omeiite Mineral Data. Retrieved May 23, 2022, from <http://webmineral.com/data/Omeiite.shtml#.YrR3bXZBy5c>
- Osarsite Mineral Data. Retrieved May 23, 2022, from <http://webmineral.com/data/Osarsite.shtml#.YrR3unZBy5c>
- Osmium | Os (Element)—PubChem. Retrieved May 24, 2022, from



- <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/element/Osmium>
- Page, N. J., Cassard, D., & Haffty, J. (1982). Palladium, platinum, rhodium, ruthenium and iridium in chromitites from the Massif du Sud and Tiebaghi massif, New Caledonia. *Econ. Geol.*, 77, 1571–1577.
- Palache, C., Bernani, I., & Fnorvorr, C. (1994). *The system of Mineralogie 1*. (7th ed.). John Wiley & Sons.
- Palladium Mineral Data. Retrieved May 23, 2022, from <http://webmineral.com/data/Palladium.shtml#.YrRm5XZBy5c>
- Palladoarsenide Mineral Data. Retrieved May 23, 2022, from <http://webmineral.com/data/Palladoarsenide.shtml#.YrSVZnZBy5c>
- Palladobismutharsenide Mineral Data. Retrieved May 23, 2022, from <http://www.webmineral.com/data/Palladobismutharsenide.shtml#.YrSVOnZBy5c>
- Palladodymite Mineral Data. Retrieved May 23, 2022, from <http://www.webmineral.com/data/Palladodymite.shtml#.YrSVdnZBy5c>
- Palladseite Mineral Data. Retrieved May 23, 2022, from <http://www.webmineral.com/data/Palladseite.shtml#.YrSWAnZBy5c>
- Paolovite Mineral Data. Retrieved May 23, 2022, from <http://www.webmineral.com/data/Paolovite.shtml#.YrSWOnZBy5c>
- Platarsite Mineral Data. Retrieved May 23, 2022, from <http://www.webmineral.com/data/Platarsite.shtml#.YrSuuHZBy5c>
- Platinum Group Metals: Statistics and Information (USGS). <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/platinum/index.html>
- Plumbopalladinite Mineral Data. Retrieved May 23, 2022, from <http://webmineral.com/data/Plumbopalladinite.shtml#.YrSWgHZBy5c>
- Polkanovite Mineral Data. Retrieved May 23, 2022, from <http://www.webmineral.com/data/Polkanovite.shtml#.YrRlXHZBy5c>
- Potarite Mineral Data. Retrieved May 23, 2022, from <http://webmineral.com/data/Potarite.shtml#.YrSYKHZBy5c>
- Prassoite Mineral Data. Retrieved May 23, 2022, from <http://webmineral.com/data/Prassoite.shtml#.YrRlanZBy5c>
- Proenza, J. A., Gervilla, F., Melgarejo, J. C., Vera, O., Alfonso, P., & Fallick, A. (2001). Genesis of sulfide-rich chromite ores by the interaction between chromitite and pegmatitic olivinenorite dikes in the Potosh Mine (Moa-Baracoa ophiolitic massif, Eastern Cuba). *Mineralium Deposita*, 36, 658–669.
- PubChem. Iridium. Retrieved May 24, 2022, from <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/23924>
- PubChem. Palladium. Retrieved May 24, 2022, from <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/23938>
- PubChem. Platinum. Retrieved May 24, 2022, from <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/23939>
- PubChem. Rhodium. Retrieved May 24, 2022, from <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/23948>
- PubChem. Ruthenium. Retrieved May 24, 2022, from <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/23950>
- Rhodarsenide Mineral Data. Retrieved May 23, 2022, from <http://www.webmineral.com/data/Rhodarsenide.shtml#.YrRlsXZBy5c>
- rhodium—Wolfram|Alpha. Retrieved May 23, 2022, from <https://www.wolframalpha.com>
- Rhodplumsite Mineral Data. Retrieved May 23, 2022, from <http://webmineral.com/data/Rhodplumsite.shtml#.YrRmI3ZBy5c>
- Robson, G. G. (1985). *Platinum 1985*. Johnson Matthey public limited company.



- Rocci, G., Ohnenstetter, D., & Ohnenstetter, R. (1975). La dualite des ophiolites tethysiennes. *Petrologie*, 1, 172–174.
- Ruarsite Mineral Data. Retrieved May 23, 2022, from <http://webmineral.com/data/Ruarsite.shtml#.YrQmcHYza5c>
- Rustenburgite Mineral Data. Retrieved May 23, 2022, from <http://www.webmineral.com/data/Rustenburgite.shtml#.YrSwAHZBy5c>
- Ruthenarsenite Mineral Data. Retrieved May 23, 2022, from <http://webmineral.com/data/Ruthenarsenite.shtml#.YrQnIXZBy5c>
- Ruthenium | Ru (Element)—PubChem. Retrieved May 23, 2022, from <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/element/Ruthenium>
- Schiffries, C. M. (1982). The petrogenesis of a platinumiferous dunite pipe in the Bushveld complex: Infiltration of a chloride rich solution. *Economic Geology*, 77, 1439–1453.
- Shuangfengite Mineral Data. Retrieved May 23, 2022, from <http://webmineral.com/data/Shuangfengite.shtml#.YrR9i3ZBy5c>
- Sobolevskite. Retrieved May 23, 2022, from <https://www.mindat.org/min-3700.html>
- Sönke, L. (1997). Car catalyst emitted platinum: Transformation Behaviour in Soil and Platinum Accumulation in plants (*Speciation Investigations*). Herbert Utz Verlag Wissenschaft, Munchen.
- Sopcheite Mineral Data. Retrieved May 23, 2022, from <http://webmineral.com/data/Sopcheite.shtml#.YrSck3ZBy5c>
- Spangenberg, K. (1943). Die chromitlagerstätte von Tampadel in Zobten. *Z. Prakt. Geol.*, 51, 13–35.
- Sperrylite: The platinum mineral sperrylite information and pictures. Retrieved May 23, 2022, from <https://www.minerals.net/mineral/sperrylite.aspx>
- Stannopalladinite Mineral Data. Retrieved May 23, 2022, from <http://webmineral.com/data/Stannopalladinite.shtml#.YrSc8nZBy5c>
- Stibiopalladinite Mineral Data. Retrieved May 23, 2022, from <http://www.webmineral.com/data/Stibiopalladinite.shtml#.YrSdUXZBy5c>
- Stillwaterite Mineral Data. Retrieved May 23, 2022, from <http://www.webmineral.com/data/Stillwaterite.shtml#.YrSeJXZBy5d>
- Stockman, H. W., & Hlava, P. F. (1984). Platinum-group minerals in Alpine chromitites from southwestern Oregon. *Econ. Geol.*, 79, 491–508.
- Stumpflite Mineral Data. Retrieved May 23, 2022, from <http://www.webmineral.com/data/Stumpflite.shtml#.YrSwwXZBy5c>
- Sudburyite Mineral Data. Retrieved May 23, 2022, from <http://www.webmineral.com/data/Sudburyite.shtml>
- Sudovikovite Mineral Data. Retrieved May 23, 2022, from <http://webmineral.com/data/Sudovikovite.shtml#.YrSxA3ZBy5c>
- Taimyrite Mineral Data. Retrieved May 23, 2022, from <http://webmineral.com/data/Taimyrite.shtml#.YrSh4HZBy5c>
- Talkington, R. W., Watkinson, D. H., Whittaker, P. J., & Jones, P. C. (1984). Platinum-group minerals and other solid inclusions in chromite of ophiolitic complexes: Occurrence and petrological significance. *Tschermaks Mineralogische Und Petrographische Mitteilungen*, 32(4), 285–301. <https://doi.org/10.1007/BF01081619>
- Talkington, R., & Lipin, B. (1986). Platinum-group minerals in a chromite seams of the Stillwater complex, Montana. *Economic Geology*, 81, 1179–1186.
- Talkington, R., & Watkinson, D. H. (1986). Whole-rock platinum-group element trends in chromite rich rocks in ophiolitic and stratiform igneous complexes. In M. J. Gallagher, R. A. Ixer, C. R. Neary, & H. Prichard (Eds.), *Metallogeny of basic and ultrabasic rocks*. (pp. 247–440). London Inst. Mining Metal.

- Tarkian, M., Economou-Eliopoulos, M., & Sambanis, G. (1996). Platinum-group minerals in chromitites from the Pindos ophiolite complex, Greece. *N. Jb. Miner. Mh.*, 4, 145–160.
- Tatyanaitite Mineral Data. Retrieved May 23, 2022, from <http://www.webmineral.com/data/Tatyanaitite.shtml#.YrSxRnZBy5c>
- Telargpalite Mineral Data. Retrieved May 23, 2022, from <http://www.webmineral.com/data/Telargpalite.shtml#.YrRrPHZBy5c>
- Telluropalladinite Mineral Data. Retrieved May 23, 2022, from <http://www.webmineral.com/data/Telluropalladinite.shtml#.YrRrsHZBy5c>
- Temagamite Mineral Data. Retrieved May 23, 2022, from <http://webmineral.com/data/Temagamite.shtml#.YrRsFHZBy5c>
- Testibiopalladite Mineral Data. Retrieved May 23, 2022, from <http://webmineral.com/data/Testibiopalladite.shtml>
- Tetraferroplatinum Mineral Data. Retrieved May 23, 2022, from <http://webmineral.com/data/Tetraferroplatinum.shtml#.YrSx3HZBy5c>
- Thayer, T. (1970). Chromite segregation as a petrogenetic indicators. *Geol. Soc. S. Africa Sp. Publ.*, 1, 380–390.
- Thayer, T. P. (1964). Principal features and origin of podiform chromite deposits, and some observations on the Guleman-Soridag district, Turkey. *Econ. Geol.*, 59, 1497–1524.
- Thayer, T. P. (1969). Alpine-type sensu strictu (ophiolitic) peridotites: Refractory residues from partial melting or igneous sediments? A contribution to the discussion of the paper: “The origin of ultramafic and ultrabasic rocks” by P.J. Wyllie. *Tectonophysics*, 7(5–6), 511–516.
- Tischendorfite Mineral Data. Retrieved May 23, 2022, from <http://www.webmineral.com/data/Tischendorfite.shtml#.YrRtNnZBy5c>
- Tolovkite Mineral Data. Retrieved May 23, 2022, from <http://webmineral.com/data/Tolovkite.shtml#.YrSiL3ZBy5c>
- Tredoux, M., Lyndsay, N. M., Devis, G., & MacDonald, I. (1995). The fractionation of platinum-group elements in magmatic systems, with the suggestion of a novel causal mechanism. *S. Afr. J. Geol.*, 98, 157–167.
- Tsoupas, G., & Economou-Eliopoulos, M. (2005). Extremely abundant platinum-group minerals in chromitites hosted in the Veria ophiolite complex, northern Greece. In T. O. Tormanen & T. T. Alapieti (Eds.), *Proceedings of the 10th international platinum symposium*. (pp. 592–595).
- Tsoupas, G., & Economou-Eliopoulos, M. (2008). High PGE contents and extremely abundant PGE-minerals hosted in chromitites from the Veria ophiolite complex, Northern Greece. *Ore Geology Reviews*, 33, 3–19.
- Urvantsevite Mineral Data. Retrieved May 23, 2022, from <http://webmineral.com/data/Urvantsevite.shtml#.YrRtanZBy5c>
- Vasilite Mineral Data. Retrieved May 23, 2022, from <https://webmineral.com/data/Vasilite.shtml>
- Verbeekite Mineral Data. Retrieved May 23, 2022, from <http://www.webmineral.com/data/Verbeekite.shtml#.YrRu-3ZBy5c>
- Vincentite Mineral Data. Retrieved May 23, 2022, from <http://www.webmineral.com/data/Vincentite.shtml#.YrRvS3ZBy5c>
- Vysotskite Mineral Data. Retrieved May 23, 2022, from <http://webmineral.com/data/Vysotskite.shtml#.YrRx1HZBy5c>
- Xiao, Z., & Laplante, A. R. (2004). Characterizing and recovering the platinum group minerals—a review. *Minerals Engineering*, 17, 961–979.
- Yixunite Mineral Data. Retrieved May 23, 2022, from <https://www.webmineral.com/data/Yixunite.shtml>

- Zaccarini, F., Garuti, G., Pushkarev, E., & Thalhhammer, O. (2018). Origin of Platinum Group Minerals (PGM) Inclusions in Chromite Deposits of the Urals. *Minerals*, 8.
- Zhou, M.-F., Robinson, P. T., Malpas, J., & Li, Z. (1996). Podiform chromites in the Luobusa ophiolite (Southern Tibet): Implications for melt-rock interaction and chromite segregation in the upper mantle. *Journal of Petrology*, 37, 3–21.
- Zientek, M. L., Cooper, R. W., Corson, S. R., & Geraghty, E. P. (2002). Platinum-group element mineralization in the Stillwater Complex, Montana. In L. J. Cabri (Ed.), *The Geology, Geochemistry, Mineralogy and Mineral Beneficiation of Platinum-Group Elements.: Vol. CIM special vol.54* (pp. 459–482). Canadian Institute of mining and metallurgy.
- Zvyagintsevite Mineral Data. Retrieved May 23, 2022, from <http://webmineral.com/data/Zvyagintsevite.shtml#.YrRyYHZBy5c>
- Βακόνδιος, Ι. (1997). Μελέτη της μεταλλοφορίας χρωμίτη της συνδεδεμένης με οφίλιθους τύπου Ανατολικής και Δυτικής Μεσογείου. Οι χρωμίτες της Τήνου και των Γερασιών. [Διδακτορική Διατριβή]. Πανεπιστήμιο Πατρών.
- Ζασπάλης, Β. (2021). Επιστήμη και Τεχνολογία Υλικών. (2η). Εκδόσεις Τζιόλα.
- Ζευγώλης, Ε. (2014). Μεταλλουργία Σιδήρου. Εκδόσεις Ιων.
- Κασιώτης, Α. (2008). Μεταλλογένεση πλατινοειδών ορυκτών και χρωμιτών συνδεδεμένων με την πετρογενετική εξέλιξη των οφιολιθικών συμπλεγμάτων Βουρινού και Πίνδου [Διδακτορική Διατριβή]. Πανεπιστήμιο Πατρών.
- Κοκκαλιάρη, Μ. (2015). ΟΡΥΚΤΟΧΗΜΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΧΡΩΜΙΤΩΝ, ΕΓΚΛΕΙΣΜΑΤΩΝ ΠΛΑΤΙΝΟΕΙΔΩΝ ΚΑΙ ΑΛΛΩΝ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΦΑΣΕΩΝ ΚΑΘΩΣ ΚΑΙ ΤΩΝ ΠΡΩΤΟΛΙΘΩΝ-ΞΕΝΙΣΤΩΝ ΤΟΥΣ, ΕΙΣ ΤΟ ΟΦΙΟΛΙΘΙΚΟ ΚΑΛΥΜΜΑ ΤΗΣ ΝΗΣΟΥ ΤΗΝΟΥ. [Διπλωματική εργασία]. Πανεπιστήμιο Πατρών.
- Κωνσταντοπούλου, Γ. Π. (1990). Κατανομή των στοιχείων της ομάδας του λευκόχρυσου (PGE) και του χρυσού σε χρωμικά μεταλλεύματα και πετρώματα του οφιολιθικού συμπλέγματος του Βουρινού. [Διδακτορική Διατριβή]. Πανεπιστήμιο Αθηνών.
- Μποζίκης, Ν. (2022). ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΥΠΟΓΕΙΑΣ ΕΚΜΕΤΑΛΛΕΥΣΗΣ ΧΡΩΜΙΤΗ ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΓΡΕΒΕΝΩΝ [Διπλωματική εργασία]. Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.
- Παρασκευάς, Μ. (2013). Προσδιορισμός των στοιχείων της ομάδας της πλατίνας σε σωματίδια από τις εκπομπές των καταλυτών βενζινοκίνητων οχημάτων και αξιολόγηση της κατάστασης του καταλύτη. [Διδακτορική Διατριβή]. Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.
- Σκαρπέλης. (2002). Εισαγωγή στην κοιτασματολογία. ΕΚΠΑ.
- Υφαντή, Ε. (2011). Διερεύνηση της Γένεσης και της Γεωτεκτονικής Εξέλιξης των Οφιολιθικών Σχηματισμών στην περιοχή της Βάβδου (Δ. Χαλκιδική): Έμφαση στην Δημιουργία Χρωμιτών και στη Γεωχημεία των PGE. [Πτυχιακή εργασία]. Πανεπιστήμιο Πατρών.
- Χρωμίτης. Retrieved June 22, 2022, from <https://www.orykta.gr/oryktes-protos-ytes-tis-ellados/metalleytika-orykta/51-xromitis>
- 97/26/ΕΚ: Απόφαση της Επιτροπής της 24ης Απριλίου 1996 με την οποία κηρύσσεται μια συγκέντρωση ασυμβίβαστη με την κοινή αγορά και τη λειτουργία της συμφωνίας για τον Ευρωπαϊκό Οικονομικό Χώρο (Υπόθεση IV/M.619—Gencor/Lonrho). <http://eur-lex.eu>.