



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



ΣΑΜΑΡΑ ANNA

ΠΗΓΜΑΤΙΤΙΚΑ ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΑ ΠΟΛΥΤΙΜΩΝ ΛΙΘΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ



ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ  
2020





ΣΑΜΑΡΑ ANNA  
ΑΕΜ: 5471

## ΠΗΓΜΑΤΙΤΙΚΑ ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΑ ΠΟΛΥΤΙΜΩΝ ΛΙΘΩΝ

Υποβλήθηκε στο Τμήμα Γεωλογίας  
Τομέας Ορυκτολογίας - Πετρολογίας - Κοιτασματολογίας

### Επιβλέπων Καθηγητής

Αναπληρωτής Καθηγητής Μέλος Βασίλειος

© Σαμαρά Άννα, 2020  
Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All right reserved.



© Άννα Σαμαρά, Τμήμα Γεωλογίας Α.Π.Θ., Τομέας Ορυκτολογίας-Πετρολογίας-Κοιτασματολογίας, 2020  
Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος.  
ΠΗΓΜΑΤΙΤΙΚΑ ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΑ ΠΟΛΥΤΙΜΩΝ ΛΙΘΩΝ– Διπλωματική Εργασία

©Anna Samara, School of Geology, Dept. of Mineralogy-Petrology-Economic Geology, 2020  
All rights reserved.  
PEGMATITIC GEMSTONE DEPOSITS– *Bachelor Thesis*

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

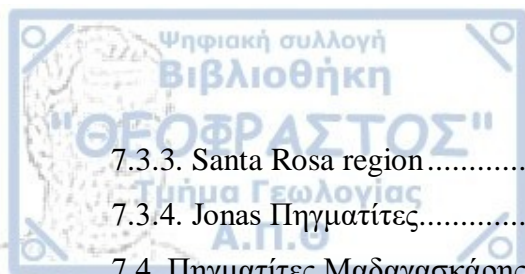
Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν το συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευτεί ότι εκφράζουν τις επίσημες θέσεις του Α.Π.Θ.

Εικόνα Εξωφύλλου: [www.palagems.com](http://www.palagems.com)



## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Περίληψη.....	1
Abstract .....	2
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	3
2. ΠΟΛΥΤΙΜΟΙ ΛΙΘΟΙ.....	4
2.1.1 Το διαμάντι .....	6
2.1.2 Το ρουμπίνι και το ζαφείρι .....	7
2.1.3. Το σμαράγδι.....	8
2.2. Ιδιότητες πολύτιμων λίθων.....	10
3. ΣΥΝΘΕΤΙΚΟΙ ΠΟΛΥΤΙΜΟΙ ΛΙΘΟΙ .....	12
3.1 Αναγνώριση των συνθετικών πολύτιμων λίθων έναντι των φυσικών .....	13
4. ΚΟΣΤΟΣ ΠΟΛΥΤΙΜΩΝ ΛΙΘΩΝ ΚΑΙ ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΚΑΘΟΡΙΣΜΟΥ ΤΟΥ .....	14
5. ΠΗΓΜΑΤΙΤΙΚΑ ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΑ .....	16
5.1. Εσωτερική δομή και γεωμετρία των πηγματιτικών σωμάτων.....	16
5.2. Μηχανισμός σχηματισμού των πηγματιτικών κοιτασμάτων.....	18
5.3. Φλεβικού τύπου Πηγματιτικά σώματα.....	19
5.4. Φαινόμενο Ζώνωσης στους πηγματίτες .....	20
5.4.1. Πηγματίτες χωρίς ζώνωση.....	20
5.4.2. Ζωνώδεις Πηγματίτες.....	20
5.5. Προϋποθέσεις για τον εμπλουτισμό των εν δυνάμει πηγματιτικών κοιτασμάτων σε σπάνια μέταλλα.....	24
5.6. Χρήσεις των ορυκτών από τους προς εκμετάλλευση Πηγματίτες.....	25
6. ΠΗΓΜΑΤΙΤΙΚΑ ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΑ ΠΟΛΥΤΙΜΩΝ ΛΙΘΩΝ .....	26
6.1. Πολύτιμοι λίθοι που σχετίζονται με γρανιτικούς πηγματίτες.....	28
6.2. Προέλευση των τηγμάτων .....	29
6.3. Υδροθερμική εξαλλοίωση .....	33
6.4. Η σπανιότητα των κοιτασμάτων πολύτιμων λίθων.....	34
7. ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΩΝ ΠΟΛΥΤΙΜΩΝ ΛΙΘΩΝ .....	35
7.1. Dunton Πηγματίτες .....	35
7.2. Mount Mica Πηγματίτες (Maine) .....	36
7.3. Πηγματίτες της Βραζιλίας (Minas Gerais) .....	37
7.3.1. Τα πηγματιτικά κοιτάσματα της περιοχής Cruzeiro .....	37
7.3.2. Golconda region .....	39



7.3.3. Santa Rosa region.....	40
7.3.4. Jonas Πηγματίτες.....	41
7.4. Πηγματίτες Μαδαγασκάρης (Anjanabonoina) .....	43
7.5. Αφγανιστάν (The Hindu Kush gem-producing areas) .....	44
7.5.1. The Panjshir Emeralds.....	45
7.5.2. Paprok mine (Nuristan, Afghanistan).....	46
7.5.3. Σποδουμένης (Nuristan region).....	47
8. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....	49



### Περίληψη

Τίτλος: Πηγματιτικά κοιτάσματα πολύτιμων λίθων

Όνομα: Σαμαρά Άννα

Η παρούσα εργασία είναι αποτέλεσμα βιβλιογραφικής έρευνας με θέμα τα πηγματιτικά κοιτάσματα πολύτιμων λίθων. Σκοπός της εργασίας είναι να δια φωτίσει ποια ορυκτά αποκαλούνται πολύτιμοι λίθοι με αναφορά των βασικών ιδιοτήτων τους καθώς επίσης να δώσει πληροφορίες για την γένεση των πηγματιτικής σύστασης κοιτασμάτων που τους φιλοξενούν. Πιο συγκεκριμένα, στο δεύτερο κεφάλαιο σημειώνονται τα διάφορα είδη πολύτιμων λίθων και τα χαρακτηριστικά που τους διακρίνουν. Στο τρίτο και τέταρτο κεφάλαιο αντιστοίχως θίγεται η συσχέτιση των πολύτιμων λίθων που απαντώνται στην φύση με τους συνθετικούς πολύτιμους λίθους αλλά και η διαχείριση τους στην παγκόσμια αγορά. Έπεται το πέμπτο κεφάλαιο το οποίο κυρίως εστιάζεται στις επικρατούσες συνθήκες προς διαμόρφωση των πηγματιτικών κοιτασμάτων ενώ στο έκτο κεφάλαιο αναλύονται οι παράγοντες και προϋποθέσεις για την εμφάνιση πολύτιμων λίθων σε αυτού του είδους τα κοιτάσματα. Στο έβδομο και τελευταίο κεφάλαιο αναφέρονται χαρακτηριστικά παραδείγματα παγκοσμίου φήμης πηγματιτικών κοιτασμάτων πολύτιμων λίθων.



## **Abstract**

Title: Pegmatitic Gemstone Deposits  
By Samara Anna

This diploma thesis is the result of a bibliographical research based on the topic of gem-bearing pegmatitic deposits. Its aim is to enlighten the readers about which minerals are considered as gemstones with a reference to their basic features as well as to give information about the genesis of pegmatitic deposits that host them. More specifically, the second chapter notes the different types of gemstones and the characteristics that distinguish them. In the third and fourth chapters, respectively, the correlation between natural and synthetic gemstones and their management in the global market are demonstrated. After that, the fifth chapter focuses mainly on the prevailing conditions for the formation of pegmatitic deposits, while the sixth chapter analyzes the factors and conditions for the appearance of precious stones in this type of deposits. The seventh and final chapter lists typical examples of world-famous gemstone deposits.

Στο σημείο αυτό θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα Καθηγητή του Τομέα Ορυκτολογίας – Πετρολογίας – Κοιτασματολογίας, κ. Βασίλη Μέλφο, για την ανάθεση του θέματος, την καθοδήγηση και τις χρήσιμες συμβουλές του που συνέβαλαν στη περάτωση της παρούσας εργασίας.



Υπάρχουν συγκεκριμένα ορυκτά του φλοιού της Γης που ξεχωρίζουν από άποψη ομορφιάς και χρησιμοποιούνται ως κοσμήματα αλλά και για διάφορους διακοσμητικούς σκοπούς ενώ είναι δυσεύρετα και σπάνια κατά κύριο λόγο στην εμφάνιση τους στην φύση, γεγονός που τα καθιστά εξαιρετικά ενδιαφέρον ως αντικείμενο έρευνας και παρατήρησης. Αυτού του είδους τα ορυκτά καλούνται πολύτιμοι λίθοι καθώς ανέκαθεν η θεώρηση του "πολύτιμου" της υπόστασης τους ήταν συνυφασμένη με το κάλλος της όψης τους. Ο χαρακτηρισμός ενός ορυκτού ως πολύτιμου λίθου δεν προϋποθέτει μόνο το ορυκτό αυτό καθαυτό αλλά και τις κατάλληλες διαμορφωμένες συνθήκες που θα προσδώσουν συγκεκριμένα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά στον κρύσταλλο. Συνήθως οι πολύτιμοι λίθοι βρίσκονται μέσα σε ανοιχτές κοιλότητες, τις λεγόμενες "rockets" εξαιτίας της διαθεσιμότητας χώρου αυτών προς σχηματισμό των κρυστάλλων. Τέτοιου είδους κοιλότητες μπορούν να εντοπιστούν μέσα σε πηγματιτικά σώματα, σε υδροθερμικές φλέβες και ηφαιστειακά πετρώματα. Η συγκεκριμένη εργασία έχει ως σκοπό την μελέτη συγκεκριμένα των πολύτιμων λίθων ευρισκόμενων μέσα στις κοιλότητες πηγματιτικών κοιτασμάτων. Καθώς παγκοσμίως παρατηρούνται εξαιρετικά υψηλής ποιότητας και αξίας κρύσταλλοι πολύτιμων λίθων που εδράζουν μέσα σε πηγματίτες και έχουν διαμορφώσει τα πρότυπα αξιολόγησης και εκτίμησης των κρυστάλλων ως προς το κόστος και την εμπορία τους. Παρακάτω διαφαίνεται δείγμα πηγματιτικού πετρώματος στην φωτογραφία του σχήματος 1.



Σχήμα 1: Δείγμα Himalaya πηγματίτη της περιοχής San Diego County, California με καπνία χαλαζία, πολύχρωμο κρύσταλλο τουρμαλίνη, αστρίους και cleavelandite (είδος αλβίτη) [www.iRocks.com](http://www.iRocks.com)

## 2. ΠΟΛΥΤΙΜΟΙ ΛΙΘΟΙ

### 2.1 Ορισμός πολύτιμων λίθων

Στην ουσία, οι πολύτιμοι λίθοι είναι ορυκτά, συσσωματώματα ορυκτών ή πετρώματα (Iapis lazuli), ενώ κάποιες φορές θεωρούνται και κάποιοι σχηματισμοί οργανικής προέλευσης (amber) ή και συνθετικής προέλευσης υλικά. Η ευδιάκριτη ομορφιά τους βασίζεται στην διαύγεια, λάμψη και στο χρώμα ή ακόμα και στην εναλλαγή του χρώματος εξαιτίας των διαθλώμενων ακτίνων φωτός (Schumann 2009).

Για την αξιοποίηση τους στην βιομηχανία των κοσμημάτων δεν αρκεί μόνο η ομορφιά αλλά και η κατάλληλου βαθμού σκληρότητα. Είναι επιθυμητό όσα ορυκτά χρησιμοποιούνται στα κοσμήματα να έχουν τουλάχιστον την σκληρότητα του χαλαζία. Συνεπώς μόνο όσα ορυκτά συνδυάζουν εξωτερική καλαισθησία με αξιόλογη σκληρότητα, ενώ επίσης διακρίνονται από δυνατότητα αντοχής στην επίδραση εξωγενών συνθηκών, όπως αντοχή στο χρόνο και στη διάβρωση κατά την ανθρώπινη επαφή και τα καλλυντικά, μπορούν να χρησιμοποιηθούν σαν διακοσμητικά ορυκτά και να χαρακτηριστούν ως πολύτιμοι λίθοι. Μάλιστα ορθότερα θεωρούνται αυτοί οι οποίοι βρίσκονται σε κομμένη και στιλβωμένη (γυαλισμένη) μορφή.

Σύμφωνα με τον Schumann (2009), από τα ορυκτά που ανταποκρίνονται σε αυτές τις προϋποθέσεις ως προς τον βαθμό ομορφιάς, σκληρότητας, σπανιότητας και ανθεκτικότητας ξεχωρίζουν το διαμάντι, το ρουμπίνι, το ζαφείρι και το σμαράγδι τα οποία και συνιστούν την κυριότερη βαθμίδα των πολύτιμων λίθων και όλα τα υπόλοιπα αναγνωρίζονται ως ημιπολύτιμοι λίθοι. Στην γενικευμένη όμως ομάδα των έγχρωμων πολύτιμων λίθων ανήκουν η βήρυλλος, η χρυσοβήρυλλος, ο νεφρίτης, το τοπάζιο, το κορούνδιο, ο γρανάτης, ο σπινέλλιος, ο χαλαζίας, ο σπάλιος, ο τουρμαλίνης και ο ζοϊσίτης κ.ά. Το ζαφείρι, το ρουμπίνι και το σμαράγδι δεν είναι κάτι άλλο παρά συγκεκριμένες ποικιλίες πολύτιμων λίθων. Παρατίθενται στον πίνακα 1 ενδεικτική ταξινόμηση των πολύτιμων λίθων.



**Πίνακας 1: Κατηγοριοποίηση των πολύτιμων λίθων με τις επιμέρους ποικιλίες τους (Cartier 2019).**

Gemstone group	Gemstone varieties
Beryl	Emerald Other beryls
Chrysoberyl	
Corundum	Ruby Sapphire
Garnet	Tsavorite
Jade	
Lapis-lazuli	
Malachite	
Opal	
Peridot	
Quartz	
Spinel	
Spodumene	
Topaz	
Tourmaline	Paraiba Tourmaline
Turquoise	
Zircon	
Zoisite	Tanzanite

Κατά τον Schumann (2009) οι πολύτιμοι λίθοι δεν αποκλίνουν χημικά από τα υπόλοιπα ορυκτά αλλά σύμφωνα με μελέτες τα πιο συχνά συστατικά των πιο σπάνιων πολύτιμων λίθων είναι στην πραγματικότητα ο άνθρακας και το αλουμίνιο. Σπάνια πολύτιμα μέταλλα όπως ο χρυσός, η πλατίνα και άλλα δεν μπαίνουν ποτέ στην σύσταση των πολύτιμων λίθων όπως επίσης και σπάνια στοιχεία. Ωστόσο, τέτοια εμφάνιση μπορεί να αναφερθεί στην περίπτωση του στοιχείου ζirkόνιο μέσα στο ορυκτό του ζirkονίου ή του στοιχείου βηρύλλιο μέσα σε σμαράγδι ή και σε άλλα σπανιότερα ορυκτά.

Τα ορυκτά που συγκαταλέγονται στην κατηγορία των πολύτιμων λίθων όπως και τα υπόλοιπα ορυκτά δημιουργούνται με ποικίλους τρόπους. Άλλοτε από την κρυστάλλωση του μάγματος και των αερίων του εσωτερικού της Γης και άλλοτε από την λάβα που εξέρχεται στην επιφάνεια της Γης (μαγματικά ορυκτά). Είτε ακόμα από την δράση υδροθερμικών διαλυμάτων ή αναπτύσσονται με την βοήθεια οργανισμών πάνω ή κοντά στην επιφάνεια της γης (ιζηματογενή ορυκτά). Ενώ τέλος μπορούν να σχηματιστούν από την ανακρυστάλλωση ήδη προϋπάρχοντων ορυκτών υπό ορισμένες συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας σε βαθύτερα σημεία του φλοιού της Γης (ορυκτά από μεταμόρφωση) (Schumann 2009).

### 2.1.1 Το διαμάντι

Το διαμάντι (C) ανήκει στην κατηγορία των αυτοφυών στοιχείων αποτελούμενο από καθαρό άνθρακα. Αυτό είναι τόσο δημοφιλές ως πολύτιμος λίθος εξαιτίας των ιδιαίτερων οπτικών ιδιοτήτων του όπως ο υψηλός δείκτης διάθλασης, ο υψηλός διασκεδασμός και η αξιοσημείωτη λάμψη του. Τα διαμάντια διακρίνονται μάλιστα από την υψηλότερη μη-μεταλλική λάμψη γνωστή ως "adamantine", η οποία τους δίνει την ικανότητα αντανάκλασης πολύ μεγάλου ποσοστού του φωτός που προσπίπτει στις κρυσταλλικές επιφάνειες τους. Λόγω του υψηλού διασκεδασμού παρατηρείται ένα είδος "σπινθηρισμού" το οποίο αναφέρεται στις διάφορες λάμπεις του φωτός που είναι προς παρατήρηση καθώς κρατάμε ένα διαμάντι στο χέρι μας ("fire", πυρκαγιά διαμαντιών). Σπουδαίο ενδιαφέρον προκαλεί το γεγονός ότι η ποιότητα ενός διαμαντιού ως πολύτιμος λίθος εξαρτάται από τέσσερεις παράγοντες οι οποίοι και είναι το χρώμα, η κοπή, η καθαρότητα και το βάρος καρατίου. Τα πιο πολύτιμα διαμάντια και αντιστοίχως και πιο ακριβά είναι τα τελείως άχρωμα ενώ όλο και πιο δημοφιλή γίνονται και τα έγχρωμα διαμάντια με έμφαση στην ένταση, στην καθαρότητα και την ποιότητα του χρώματος. Ένα εξίσου σημαντικό χαρακτηριστικό του διαμαντιού είναι φυσικά η σκληρότητά του καθώς θεωρείται το σκληρότερο φυσικό ορυκτό στο κόσμο με σκληρότητα που φτάνει σε βαθμό 10 σύμφωνα με την κλίμακα κατά Mohs. (<https://geology.com/minerals/diamond.shtml>).

Στη φωτογραφία του σχήματος 2 φαίνεται ένας κρύσταλλος διαμαντιού σε πράσινη απόχρωση.



Σχήμα 2: Πράσινο Διαμάντι (Βραζιλίας) [www.mindat.org](http://www.mindat.org)

### 2.1.2 Το ρουμπίνι και το ζαφείρι

Το ρουμπίνι είναι η ερυθρωπή ποικιλία του κορουνδίου ( $Al_2O_3$ ). Κάθε άλλο χρώμα του ίδιου είδους ορυκτού θεωρείται ως ζαφείρι. Αυτοί αποτελούν δύο είδη πολύτιμων λίθων με την ίδια χημική σύσταση και την ίδια ορυκτολογική δομή. Ουσιαστικά μικροποσότητες προσμείξεων καθορίζουν εάν ο πολύτιμος λίθος θα είναι ένα μπλέ ζαφείρι ή ένα ερυθρό ρουμπίνι. Επιπλέον, ίχνη άλλων στοιχείων μπορούν να αποδώσουν και άλλα χρώματα στην ποικιλία του κορουνδίου όπως πράσινο, πορτοκαλί ή και κίτρινο συνιστώντας την κατηγορία των "fancy sapphires". Όταν δε, ο κρύσταλλος του κορουνδίου στερείται προσμείξεων που αποφέρουν κάποια χρωματική επίδραση τότε ο πολύτιμος λίθος εμφανίζεται άχρωμος και είναι γνωστός ως λευκό ζαφείρι. Το κόκκινο χρώμα του ρουμπινιού επιτυγχάνεται χάρη στην παρουσία χρωμίου στον πολύτιμο λίθο και μάλιστα σε ικανοποιητική ποσότητα για να δώσει ένα ευδιάκριτο κόκκινο χρώμα. Κομμάτια κορουνδίων που είναι αδιαφανή και διαθέτουν μια μικρή χροιά κόκκινου χρώματος δεν θεωρούνται στην πραγματικότητα ρουμπίνια αλλά κοινοί



κρύσταλλοι κορουνδίου. Αντίθετα, ποσότητες σιδήρου και τιτανίου σε ίχνη προσδίδουν στο κορουνδίο μπλέ απόχρωση συνιστώντας έτσι την ποικιλία που είναι γνωστή ως ζαφείρι. Το χρώμα κυμαίνεται από μπλέ με πρασινωπή χροιά μέχρι μπλέ με βιολετί χροιά. Οι κρύσταλλοι με καθαρό βαθύ μπλε και βιολετί-μπλέ χρώμα είναι και οι πιο επιθυμητοί. Στο σχήμα 3 παρατηρούνται τα δύο είδη κορουνδίου με τις αντιστοίχες διαφορές στο χρώμα (<https://geology.com/gemstones/ruby-and-sapphire/>).



Σχήμα 3: Ζαφείρι διαστάσεων 7.38 x 7.38 x 5.35 mm στα αριστερά και ρουμίνι διαστάσεων 5.62 x 5.01 x 3.93 mm στα δεξιά. [www.palagems.com](http://www.palagems.com)

### 2.1.3. Το σμαράγδι

Το σμαράγδι είναι μια διαφανής, βαθυπράσινη παραλλαγή της βηρύλλου ( $\text{Be}_3\text{Al}_2(\text{SiO}_3)_6$ ) όπου το χρώμα οφείλεται στο περιεχόμενο βανάδιο και χρώμιο. Ενώ απεναντίας διακρίνονται και άλλες ποικιλίες της βηρύλλου που βασίζονται στο χρώμα και είναι η Άκουαμαρίνα (γαλαζοπράσινο χρώμα), το Ηλιόδωρο (κίτρινο) και ο Μοργκανίτης (ροζ). Κρύσταλλοι με ελαφριά απόχρωση ή χαμηλό κορεσμό ενδείκνυται να χαρακτηρίζονται ως πράσινοι βήρυλλοι και όχι ως σμαράγδια. Επομένως, το ευκρινώς πράσινο χρώμα είναι το καθοριστικό στοιχείο για τον χαρακτηρισμό του πολυτίμου λίθου ως σμαράγδι. Το χρώμα ενός σμαραγδιού κυμαίνεται από πράσινο με μπλέ χροιά έως πράσινο με ελαφρά κιτρινωπή χροιά, ενώ υποχρεωτικό για να συγκαταλέγεται ο πολύτιμος λίθος στην κατηγορία του σμαραγδιού είναι το πλούσιο χρώμα. Η βήρυλλος είναι σπάνιο σαν ορυκτό στην εμφάνιση του καθώς το στοιχείο βηρύλλιο υπάρχει σε μικρές ποσότητες στον φλοιό της γής. Ειδικότερα είναι σπάνια η συγκέντρωση ικανοποιητικών ποσοτήτων βηρυλλίου προς

σχηματισμό των αντίστοιχων ορυκτών σε μία μόνο τοποθεσία. Ταυτόχρονα, είναι μικρές οι πιθανότητες να συνυπάρχουν οι συνθήκες συσσώρευσης αυτής της επαρκούς ποσότητας και των συνθηκών όπου αναμένονται ποσότητες χρωμίου και βαναδίου σε ίχνη εξηγώντας έτσι την σπανιότητα των κρυστάλλων σμαραγδιού. Στο σχήμα 4 διακρίνεται κρύσταλλος σμαραγδιού (<https://geology.com/gemstones/emerald/>).



Σχήμα 4: Σμαράγδι (Hiddenite Mine, North Carolina, USA) [www.mindat.org](http://www.mindat.org)

## 2.2. Ιδιότητες πολύτιμων λίθων

Ταξινομούνται οι διάφορες ιδιότητες των πολύτιμων λίθων σύμφωνα με τον Schumann (2009).

### 1. Σκληρότητα

Η σκληρότητα αναφέρεται αρχικά στην σκληρότητα του ορυκτού ως προς την αντίσταση/ αντοχή του έπειτα από χάραξη με οξύληκτο αντικείμενο και έπειτα ως προς την αντίσταση του στην διαδικασία κοπής του. Το τελευταίο είναι μεγάλης σημασίας γιατί η σκληρότητα μπορεί να διαφέρει στους πολύτιμους λίθους στις διάφορες κρυσταλλικές επιφάνειες τους και διάφορες διευθύνσεις.

### 2. Σχισμός και Θραυσμός

Σχισμός είναι ο διαχωρισμός του ορυκτού σε συγκεκριμένες επιφάνειες και είναι συσχετιζόμενος με το κρυσταλλικό πλέγμα αυτού, τις ιδιότητες δηλαδή συνοχής των ατόμων. Σχισμός λαμβάνεται υπόψιν στις δοκιμές εκτίμησης της σκληρότητας κατά Mohs καθώς κατά την άσκηση σημειακής φόρτισης υπερβολική πίεση οδηγεί στο διαμελισμό του κρυστάλλου. Γενικότερα, ο σχισμός ωφελεί για τον διαχωρισμό ενός πολύτιμου λίθου μεγάλων διαστάσεων σε μικρότερους κρυστάλλους ή και για την αφαίρεση επισφαλών ως προς την αντοχή κομματιών.

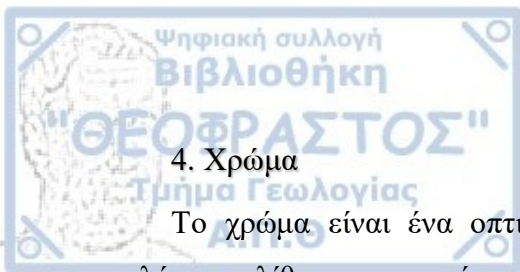
Ο θραυσμός δε, είναι ο διαχωρισμός του ορυκτού σε τυχαίες ακανόνιστες επιφάνειες και πολλές φορές το είδος του θραυσμού βοηθάει στην αναγνώριση του ίδιου του ορυκτού.

### 3. Πυκνότητα και Ειδική Βαρύτητα

Η ειδική βαρύτητα και κατά δύναμη πυκνότητα υποδεικνύει την διακύμανση του βάρους ενός συγκεκριμένου ορυκτού σε σύγκριση με ισοδύναμη ποσότητα νερού. Ο υπολογισμός της χρησιμοποιείται για την αναγνώριση του πολύτιμου λίθου αλλά ανταυτού προτιμώνται οι οπτικές διαδικασίες.

Από όλα τα χαρακτηριστικά των πολύτιμων λίθων τα μεγαλύτερης σημασίας είναι οι οπτικοί χαρακτήρες τους. Ειδικότερα, αυτοί είναι το χρώμα, η στιλπνότητα, η φωταύγεια, ο ιριδισμός κ.ά.





#### 4. Χρώμα

Το χρώμα είναι ένα οπτικό φαινόμενο που οφείλεται στο τρόπο με τον οποίο ο πολύτιμος λίθος απορροφά το φως. Αν όλα τα διαφορετικά μήκη κύματος του φωτός διαπερνούν τον πολύτιμο λίθο τότε ο ίδιος θα εμφανίζεται άχρωμος, εάν όμως ο κρύσταλλος τα απορροφά τότε θα εμφανίζει μαύρο χρώμα. Διακρίνουμε τους πολύτιμους λίθους ως αυτούς που μπορούν να χαρακτηριστούν ως ιδιοχρωματικοί και τους λεγόμενους αλλοχρωματικούς. Οι πρώτοι που είναι πιο σπάνιοι απορροφούν συγκεκριμένα μήκη κύματος εξαιτίας της χημικής δομής τους, με χαρακτηριστικό παράδειγμα το περιίδιο. Ενώ, οι αλλοχρωματικοί αποκτούν το χρώμα τους από τις προσμίξεις ή και τα ιχνοστοιχεία μέσα στην κρυσταλλική τους δομή. Στην περίπτωση του καπνία χαλαζία και του ζirkονίου δεν οφείλεται το οπτικό τους χρώμα σε κάποιο ιχνοστοιχείο ή πρόσμειξη αλλά σε μία παραμόρφωση της εσωτερικής κρυσταλλικής δομής τους. Ταυτόχρονα, το χρώμα επηρεάζεται διαφορετικά από το τεχνητό φως αφού αυτό έχει διαφορετική σύνθεση από αυτή του φυσικού. Δυσμενής επιρροή του τεχνητού φωτός παρατηρείται στο ζαφείρι ενώ το σμαράγδι και το ρουμπίνι έχουν χαρακτηριστική εκπομπή τύπου ακτινοβολίας. Γίνεται αντιληπτό ότι εναλλακτικός τρόπος για την απόκτηση του χρώματος στους πολύτιμους λίθους είναι βέβαια και οι ανθρώπινες επεμβατικές διεργασίες όπως είναι η θερμική κατεργασία (Schumann 2009).

### 3. ΣΥΝΘΕΤΙΚΟΙ ΠΟΛΥΤΙΜΟΙ ΛΙΘΟΙ

Οι συνθετικοί πολύτιμοι λίθοι είναι τεχνητά κρυσταλλούμενα παράγωγα των οποίων οι χημικές και φυσικές ιδιότητες κατά το μεγαλύτερο μέρος ταυτίζονται με αυτές των αντίστοιχων φυσικών πολύτιμων λίθων (Schumann 2009). Με άλλα λόγια μπορούν να χαρακτηριστούν ως απομιμήσεις των φυσικών πολύτιμων λίθων. Κατά τον White (1961) πρώτη προϋπόθεση για την δημιουργία συνθετικών πολύτιμων λίθων είναι η δημιουργία μεγάλου μεγέθους μονοκρυστάλλων με την μέγιστη δυνατή ποιότητα. Θα αναφερθούν παρακάτω κάποιοι παράγοντες που συμβάλλουν στην ανάπτυξη τέτοιου είδους κρυστάλλων. Είναι σημαντικό η παραγωγή τους να λαμβάνει χώρα κάτω από αργές υδροθερμικές συνθήκες για την αποφυγή φαινομένων όπως κατάκλαση και δημιουργία εγκλεισμάτων. Στην συνέχεια, είναι συνετό να διατηρείται συνεχής η θερμοκρασία ή το εύρος θερμοκρασιών για την αποφυγή της άσκησης πίεσης στο πλέγμα των κρυστάλλων. Ταυτόχρονα συνιστάται και η διατήρηση των προσμίξεων σε χαμηλό επίπεδο, χαμηλότερα των ppm. Ωστόσο, οι συνθετικοί πολύτιμοι λίθοι δεν μπορούν να συναγωνιστούν τους αντίστοιχους φυσικούς στο απόλυτο μέγεθός τους και στην κλίμακα των συνθηκών σχηματισμού τους.

### 3.1 Αναγνώριση των συνθετικών πολύτιμων λίθων έναντι των φυσικών

Σύμφωνα με τις παρατηρήσεις του White (1961) ο διαχωρισμός των φυσικών από τους συνθετικούς κρυστάλλους όσο αναφορά το κορούνδιο και τους σπινελλίους που φέρουν κάποιο χρώμα είναι σχετικά απλός σε σύγκριση με όμοιους τους με διαφορετική εξολοκλήρου σύνθεση, αφού υφίστανται διακριτές διαφορές στις φυσικές ιδιότητες τους. Το πρόβλημα έγκειται όταν είναι ίδιας σύστασης και ειδικότερα εάν το χρώμα είναι αποτέλεσμα του ίδιου ιχνοστοιχείου. Λόγω αυτού εφαρμόζονται λεπτομερείς οπτικές παρατηρήσεις και λαμβάνονται μετρήσεις των φυσικών ιδιοτήτων τους.

Οι φυσικοί πολύτιμοι λίθοι ως επί το πλείστον διαθέτουν ατέλειες σχετιζόμενες με ανομοιογένεια όπως εγκλείσματα, χαρακτηριστικό που λαμβάνεται υπόψιν για την διάκριση τους από τους συνθετικούς. Οι πρώτοι συνήθως διαθέτουν ως εγκλείσματα κρυστάλλους ορυκτών που προέρχονται από το περιβάλλον σχηματισμού των πολύτιμων λίθων, ενώ οι τελευταίοι έχουν προϊόντα σύντηξης όπως επιμηκυμένες ή σφαιρικές φυσαλίδες αέρα και εμφανίζουν καμπύλες χρωματικές παραμορφώσεις κάθετα στην διεύθυνση ανάπτυξης τους. Επιπλέον, οι συνθετικοί κρύσταλλοι είναι πιο καθαροί σε προσμίξεις συγκριτικά με τους φυσικούς εξού και διαφορές σε παραμέτρους του κρυσταλλικού πλέγματος τους ή στους δείκτες διάθλασης. Αποτελεσματική για την μεταξύ τους αναγνώριση είναι η μέθοδος της φασματοσκοπίας. Τα χρώματα των φυσικών κρυστάλλων είναι κατά βάση αποτέλεσμα σύνθετης ανάμειξης των διαφόρων προσμίξεων γι' αυτό και το φάσμα απορρόφησης διαφέρει από αυτό των συνθετικών. Άλλοι μέθοδοι διάκρισης τους είναι βάση ακτινών-X, του υπεριώδους φθορίζοντος φάσματος και διαφορές στην εκπομπή του υπέρυθρου ή υπεριώδους φωτός από απλά φωτογραφικά μέσα (White 1961).

#### 4. ΚΟΣΤΟΣ ΠΟΛΥΤΙΜΩΝ ΛΙΘΩΝ ΚΑΙ ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΚΑΘΟΡΙΣΜΟΥ ΤΟΥ

Ετησίως πωλούνται πολύτιμοι λίθοι αξίας 150 δισεκατομμυρίων δολαρίων ενώ οι αυτούσιοι ημιπολύτιμοι λίθοι είναι αξίας 20 με 25 δισεκατομμύρια δολάρια. Αυτοί εξορύσσονται διεθνώς αλλά την καλύτερη φήμη στην παραγωγή πολλών αλλά και χαρακτηριστικά όμορφων πολύτιμων λίθων διακατέχουν οι χώρες όπως Βραζιλία, Σρί Λάνκα, η Βιρμανία, η Μαδαγασκάρη καθώς και η Αυστραλία.

Το πρώτο πράγμα που εκτιμάται για την κοστολόγηση ενός πολύτιμου λίθου είναι τα τέσσερα C : carat, color, clarity and cut δηλαδή αντίστοιχα καράτι, χρώμα, καθαρότητα και κοπή. Η συνιστώσα Ln (καράτι) είναι ενδεικτικό του φυσικού λογάριθμου του βάρους καρατιού. Έχουμε διακριτές κατηγορίες στα διαμάντια ανάλογα με το χρώμα σε μια κλίμακα που κυμαίνεται από τα άσπρα διαμάντια μέχρι τα έγχρωμα. Ενώ αντίστοιχα υπάρχει διαχωρισμός και για τα ζαφείρια, σμαράγδια και ρουμπίνια. Μετά λαμβάνεται υπόψη για τα διαμάντια και η διαύγεια με κλίμακα που περιλαμβάνει απεγάδιαστους κρυστάλλους (μόνο ένα έγχρωμο διαμάντι έχει χαρακτηριστεί ως απεγάδιαστο-χωρίς προσμίξεις) μέχρι κρυστάλλους με εγκλείσματα ή αδιευκρίνιστη καθαρότητα. Σαν επιμέρους παράγοντας η κοπή βέβαια είναι αποτέλεσμα ανθρώπινης παρέμβασης. Οι τιμές συνεπώς πώλησης διαφέρουν ανάλογα με τις επιμέρους κατηγορίες (Renneboog, and Spaenjers 2012).

Το κόστος αγοράς ενός πολύτιμου λίθου κυμαίνεται βάση σπανιότητας του. Ειδικότερα, πολύτιμοι λίθοι μεγάλης σπανιότητας τείνουν να είναι λιγότερο ευρέως γνωστοί και είναι φθηνότεροι καθώς η μικρή πληθώρα τους δεν ικανοποιεί τις απαιτήσεις της αγοράς. Ένα πλήθος πολύτιμων λίθων ανήκουν συνεπώς στην κατηγορία των σπάνιων λίθων (rare stones) και κυρίως αποτελούν αντικείμενα συλλογής από έμπειρους συλλέκτες. Επιπλέον, άξιου ενδιαφέροντος αποτελούν οι πολύτιμοι λίθοι οι οποίοι δεν έχουν την σχετική σκληρότητα για την διαμόρφωση τους σε κόσμημα και ακριβώς για αυτό το λόγο στρέφονται προς αναζήτηση τους οι "συλλέκτες σε χαρτί" καθώς τέτοιου είδους δείγματα δύνανται να διατηρηθούν μόνο μέσα σε κομμάτια χαρτιού πολλαπλά διπλωμένα.

Η ορυκτολογική φύση ενός πολύτιμου λίθου δεν αντιπροσωπεύει απευθείας και την αξία του, ενώ πιο συγκεκριμένα το είδος της ποικιλίας και ο τοπικός χαρακτήρας της προέλευσης συνιστούν καθοριστικότερους παράγοντες αυτού. Η αξία του λίθου θεωρείται μεγαλύτερη βάση της γεωγραφική του προέλευσης και πόσο μάλλον αν είναι δυνατόν να αναγνωριστεί ότι προέρχεται από συγκεκριμένο τύπο κοιτασμάτων. Τα εγκλείσματα μέσα

στους πολύτιμους λίθους αποτελούν επίσης μία πολλή ισχυρή ένδειξη του γεωλογικού περιβάλλοντος ανάπτυξης του πολύτιμου λίθου. Πολλές φορές για εμπορικούς σκοπούς ώστε ένας πολύτιμος λίθος να είναι ονομαστικά πιο ελκυστικός στην αγορά δανείζεται το όνομα ενός όμοιου του αλλά υψηλότερης αξίας με την προσθήκη κάποιας τοπικής αναφοράς.

Είναι σημαντικό και η κατανόηση της προέλευσης του χρώματος ενός πολύτιμου λίθου καθώς αυτό αποτελεί έναν παράγοντα ένδειξης της αξίας του και κυρίως μάλιστα η σταθερότητα του χρώματος καθώς επίσης αν αυτό είναι φυσικό ή προϊόν κάποιας επεμβατικής διεργασίας του ανθρώπου. Αυτή μπορεί να είναι μια τροποποίηση του χρώματος ή βελτιστοποίηση της καθαρότητας του πολύτιμου λίθου (Fritsch, & Rondeau 2009).

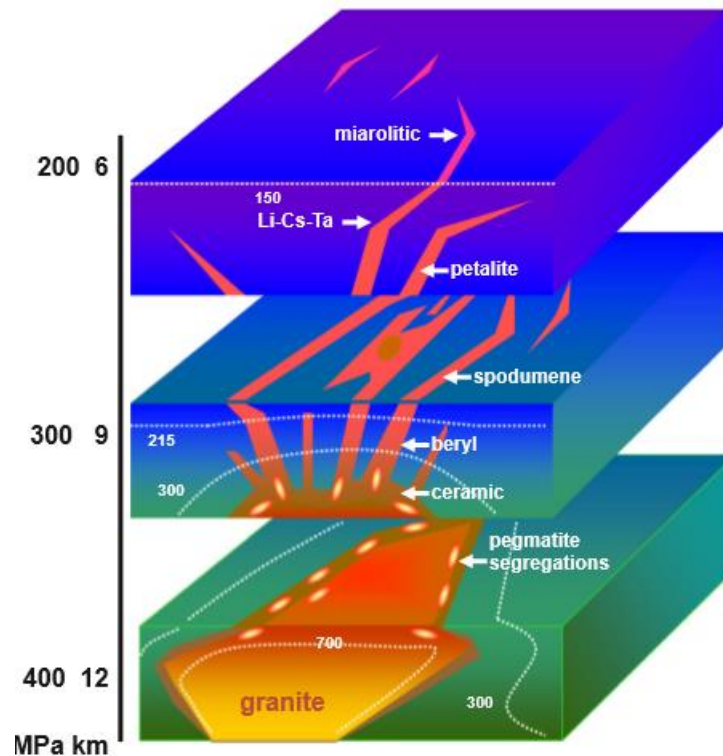
Σύμφωνα με τον Cartier (2019) μια ιδιαιτερότητα των πολύτιμων λίθων είναι ότι λόγω της μεγάλης ανθεκτικότητάς τους και της αξίας τους μπορούν να επαναχρησιμοποιηθούν ωφελώντας έτσι και το εμπόριο. Ένα παράδειγμα πρωτοκαθεδρίας στο εμπόριο αποτελεί το Kashmir της Ινδίας το οποίο αποτελεί την πιο σημαντική πηγή των πιο πολύτιμων ζαφειριών παγκοσμίως τα οποία είναι προϊόντα παλαιότερων εξορυκτικών εργασιών (19<sup>ος</sup> αιώνας).

### 5.1. Εσωτερική δομή και γεωμετρία των πηγματιτικών σωμάτων

Οι πηγματίτες είναι σύνθετα ως προς την υφή τους πυριγενή πετρώματα με τραχείς ποικίλου μεγέθους κρυστάλλους, με εμφάνιση ζώνωσης, ανισοτροπία στο κρυσταλλικό προσανατολισμό από τα περατατικά όρια προς το εσωτερικό τους αλλά και τάση σχηματισμού γραφικού, σκελετικού και ακτινικού ιστού μεταξύ των συμφυόμενων κρυστάλλων. Οι ίδιοι κατατάσσονται στην κατηγορία των όξινων φλεβικών ολολευκοκρατικών πετρωμάτων και αποτελούνται κυρίως από χαλαζία, καλιούχους αστρίους και μαρμαρυγίες, οι κρύσταλλοί των οποίων είναι έντονα ανισομεγεθείς. Είναι μικρού μεγέθους και ανομοιόμορφοι ορυκτολογικά παρόλο που τα γρανιτικά μάγματα τείνουν προς σχηματισμό πετρωμάτων με τα αντίθετα χαρακτηριστικά. Η πλειοψηφία των πηγματιτών είναι γρανιτικοί και εμφανίζονται διαχωρισμένοι αλλά κοντά σε επαφή με την πλουτώνια πηγή τους. Εμφανίζονται μέσα στα υπερκείμενα 10 μέτρα της περιοχής που καταλαμβάνει η οροφή της πλουτώνιας πηγής και διακρίνονται είτε ως πλέγματα φλεβών με απαρχή την πηγή τους, που έπειτα εκτείνονται μέσα στα περιβάλλοντα πετρώματα, ή και ως φακοειδή ή επίπεδα διεισδυτικά σώματα. Οι γρανιτικοί πηγματίτες εντοπίζονται σε όλες τις ηπείρους μέσα σε παλιούς ή και νεότερους κρατόνες, στα περιθώρια ορογενετικών ζωνών, ενώ δεν εμφανίζονται σε περιοχές ωκεάνιων λεκανών και μεσοκεάνιων ραχών. Καθώς οι πηγματίτες επί το πλείστον προσομοιάζονται με τους κοινούς γρανίτες, η παρουσία της βηρύλλου, του τουρμαλίνη, των μαρμαρυγιών ή του φθορίτη ή και του απατίτη είναι σε αναλογία μικρότερη του 5% ή και λιγότερο του 1%. Πηγματίτες με περιεχόμενα λιθιούχα αργιλοπυριτικά, φωσφορικά, βήρυλλο και οξειδία του Sn, Nb, Ta και REE κατά μεγάλη αναλογία αποτελούν μόνο ένα τμήμα πηγματιτών συνιστώντας μια ομάδα (κοινής προέλευσης πηγματίτες) ή ευρισκόμενα σε συγκεκριμένη περιοχή. Σε μία ομάδα ο χημικός διαχωρισμός και η πολυπλοκότητα της ορυκτολογικής ζώνωσης αυξάνεται με την απόσταση από την πηγή. Συνεπώς κοντά στην πηγή ένα πυκνό δίκτυο φλεβών μπορεί να είναι σύνθετο ως προς την υφή άλλα ορυκτολογικά η σύσταση συγκλίνει με αυτή των γρανιτών με δευτερεύοντα ή επουσιώδη ρόλο αυτό των μαρμαρυγιών, τουρμαλίνη, γρανάτη κ.ά. Ωστόσο, μακρύτερα της πηγής και εξωτερικότερα η πηγματιτική ομάδα παρουσιάζει αύξηση του χημικού διαχωρισμού (Černý et al., 1985) που οδηγεί στην εμφανή παρουσία διάφορων σπάνιων



ορυκτών (London 2018). Χαρακτηριστικό παράδειγμα περιοχικής ζώνωσης διατίθεται και στο σχήμα 5.



Σχήμα 5: Απεικόνιση περιοχικής ζώνωσης σε πηγματιτική ομάδα της LCT οικογένειας (London 2018).

Ο πηγματίτης ξεκινάει στην επαφή με την οροφή του γρανιτικού μάγματος. Το πρωτοεμφανιζόμενο σπάνιο ορυκτό είναι αυτό της βηρύλλου. Προς τα άνω του μαγματικού σώματος και εξωτερικότερα εμφανίζεται είτε μόνο σποδομένης (υψηλής πίεσης) είτε συσσωματώματα σποδομένη-πεταλίτη (χαμηλής πίεσης). Μακρύτερα της μαγματικής πηγής είναι οι μιαρολιτικοί πηγματίτες - οι πιο χημικά εξελιγμένοι (London 2018).

## 5.2. Μηχανισμός σχηματισμού των πηγματιτικών κοιτασμάτων

Οι πηγματίτες προκύπτουν από υπολειμματικά μάγματα πλούσια στα τελευταία πετρογενετικά ορυκτά καθώς επίσης και πτητικά συστατικά. Οι διαδικασίες κοιτασματογένεσης στους πηγματίτες είναι εξολοκλήρου πυριγενείς εξαιτίας της εκτεταμένης κλασματικής κρυστάλλωσης των γρανιτικών πλουτωνιτών και της διεξαγωγής αυτής σε υψηλού βαθμού υπερκορεσμένη κατάσταση τήγματος. Συνεπώς, χαρακτηριζόμενοι ως πυριγενείς η προέλευση τους προέρχεται από την μερική τήξη μανδουακού υλικού ή φλοιϊκού. Η κρυστάλλωση του μάγματος γίνεται σε μια περιοχή θερμοκρασιών και όχι σε μια ορισμένη θερμοκρασία. Σε δεδομένο διάγραμμα κρυστάλλωσης πάνω από την καμπύλη liquidus όλο το υλικό είναι σε υγρή κατάσταση, ενώ κάτω από τη solidus σε στερεή κατάσταση. Η περιοχή μεταξύ των δύο καμπυλών αποτελείται από τήγμα και κρυστάλλους, που βρίσκονται σε ισορροπία. Κατά την κλασματική κρυστάλλωση με τον αποχωρισμό των πρώτων κρυστάλλων από το αρχικό μάγμα η σύσταση του μάγματος αλλάζει και απομένουν υπολειμματικά τήγματα φτωχά πλέον στα στοιχεία που οδήγησαν στην απομάκρυνση των κρυστάλλων. Αυτή η διαδικασία συνεχίζεται έως ότου στα τελευταία στάδια κρυστάλλωσης του γρανιτικού τήγματος το υπολειμματικό υγρό εμπλουτίζεται σε πτητικά συστατικά, SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> και σπάνια αλκάλια (Li, Rb, and Cs), γίνεται πιο λεπτόρευστο και εισχωρεί σε ρωγμές των περιβαλλόντων πετρωμάτων ή/και του ίδιου του μαγματικού σώματος, που ήδη έχει κρυσταλλωθεί, δημιουργώντας πηγματιτικές φλέβες. Η πηγματιτική υφή απορρέει από ψύξη κάτω από την θερμοκρασία liquidus (~200 °C ± 50 °C) ιξώδων γρανιτικών τηγμάτων προγενέστερα της έναρξης της διαδικασίας κρυστάλλωσης (London 2018).

Βάση της έρευνας του London (2018) η εύρεση των πηγματιτών με οικονομικό ενδιαφέρον ως προς τα προϊόντα τους σχετίζεται με επιφανειακές κυρίως εμφανίσεις. Ενδείξεις για την πιθανότητα ύπαρξης κοιτασμάτων κεραμικών υλικών, κοιτασμάτων σπάνιων μετάλλων ή ακόμα και πολύτιμων λίθων αποτελούν η διαπίστωση περιοχικής ζώνωσης των πηγματιτικών σωμάτων και της φύσης του χημισμού της μετασωματικής αλλοίωσης στο πέτρωμα ξενιστή. Είναι ευρέως γνωστό ότι οι γρανιτικής σύστασης πηγματίτες έχουν πιο συχνές εμφανίσεις από αυτές πηγματιτών διαφορετικής πυριγενούς σύστασης. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η ιοντική διάχυση που δίνει το έναυσμα προς κρυστάλλωση εμποδίζεται από το υψηλό ιξώδες των γρανιτικών τηγμάτων. Τα γρανιτικά τήγματα τείνουν να αντιστέκονται σε θερμοκρασίες πολύ πιο κάτω από την liquidous (καμπύλη που αντιστοιχεί σε εύρος θερμοκρασιών και πάνω από την οποία το υλικό είναι



εξολοκλήρου σε υγρή κατάσταση) πριν αρχίσει η διαδικασία της κρυστάλλωσης. Όταν δε, αρχίζει τότε το τήγμα είναι υποκείμενο σε συνθήκες υψηλού υπερκορεσμού γεγονός που οδηγεί στο σχηματισμό της πηγματιτικής υφής.

### 5.3. Φλεβικού τύπου Πηγματιτικά σώματα

Γίνεται αντιληπτή μια αισθητή διαφορά της αναλογίας πλάτους/ ύψους των σωμάτων που συνιστούν οι πηγματικές φλέβες βασιζόμενη στις διαφορές της πλαστικότητας των πετρωμάτων-ξενιστών κατά το επικείμενο βάθος διείσδυσης. Οι πηγματικές φλέβες λοιπόν, που διεισδύουν σε περιβάλλοντα πυριγενή πετρώματα όπως γνευσίους ή αμφιβολίτες σχηματίζουν κυρίως επίπεδα σώματα πλευρικά επεκτεινόμενα μέχρι και ενός χιλιομέτρου της εμφάνισής τους. Ενώ, σε περίπτωση διείσδυσης σε περιβάλλοντα πετρώματα όπως είναι οι μαρμαρυγικοί σχιστόλιθοι τότε σχηματίζουν ελλειψοειδούς μορφής σώματα ή απομονωμένα σώματα. Το πάχος μίας πηγματιτικής φλέβας ποικίλλει και σε σημεία όπου παρατηρείται μεγάλη διόγκωση εμφανίζονται κάποιες φορές ανοιχτές κοιλότητες. Σε τέτοιου είδους κοιλότητες μάλιστα βρίσκονται οι μεγαλύτεροι μεγέθους και πιο καλοσχηματισμένοι κρύσταλλοι που μπορεί να αποτελούν υψηλής ποιότητας.

Σημαντικό χαρακτηριστικό των πηγματιτών είναι ότι δεν περιέχουν φαινοκρυστάλλους από την πλουτώνιας πηγή τους. Αντίθετα, αποτίθενται με την μορφή ενός τήγματος πυριτικού στο σύνολο του καθώς έχει προηγηθεί διαχωρισμός του τήγματος από τους κρυστάλλους κατά την εξαγωγή από την πηγή.

Τις σημαντικότερες συνιστώσες για την διαφυγή των γρανιτικών τηγμάτων προς σχηματισμό πηγματιτικών κοιτασμάτων μορφής φλεβών συνιστούν οι θερμοκρασίες των εν λόγω τηγμάτων καθώς επίσης και των πετρωμάτων-ξενιστών που περιβάλλουν την πηγή, το ιξώδες του γρανιτικού τήγματος, οι διαφορές της πυκνότητας μεταξύ ξενιστή και τήγματος και τέλος η διακύμανση της πίεσης του τήγματος. Σύμφωνα με το μοντέλο Rubin (1995) για την διευκόλυνση της διαφυγής και διείσδυσης των πηγματικών φλεβών στα περιβάλλοντα πετρώματα μέρος του ποσού θερμότητας του μαγματικού σώματος διαχέεται στα περιβάλλοντα πετρώματα και μάλιστα προκαλεί την αύξηση των θερμοκρασιών πάνω από την γεωθερμική βαθμίδα (London 2018).

## 5.4. Φαινόμενο Ζώνωσης στους πηγματίτες

### 5.4.1. Πηγματίτες χωρίς ζώνωση

Υπάρχουν δύο ειδών κατηγορίες πηγματιτών: οι ζωνώδεις και χωρίς ζώνωση πηγματίτες. Οι πηγματίτες που στερούνται ζώνωσης είναι λιγότερο σύνθετοι και χαμηλότερης οικονομικής σημασίας από τους ζωνώδεις, καθώς περιέχουν μόνο αστρίους, χαλαζία και μαρμαρυγίες. Ο Κ-άστριος τείνει να εμφανίζεται με μορφή μεγάλων κρυστάλλων. Συνήθως δημιουργούνται εντός κοιλοτήτων όπου λαμβάνει χώρα μερική τήξη κατά την διάρκεια μεταμορφικών διεργασιών. Η δημιουργία τους οφείλεται σε αντικατάσταση ή ανακρυστάλλωση του περιβάλλοντος πετρώματος (wall rock) παρά σε στερεοποίηση και κρυστάλλωση ενός διαλύματος-τήγματος, εξ' ου και η έλλειψη σε διαφοροποίηση των ορυκτών ή και δομικής συνθετότητας. Η εμφάνιση τους παρατηρείται σε μεγάλο βάθος καθώς απαιτούνται συνθήκες μεταμορφισμού με συμβολή κατάλληλης πίεσης και θερμοκρασίας. Επιπλέον, δέχονται μικρότερη επιρροή από υδροθερμικές διαδικασίες αιτιολογώντας την μικρότερη κινητικότητα ιόντων οδηγώντας σε αποτυχία κρυστάλλωσης σε συγκεκριμένες ζώνες-περιοχές (London 2018).

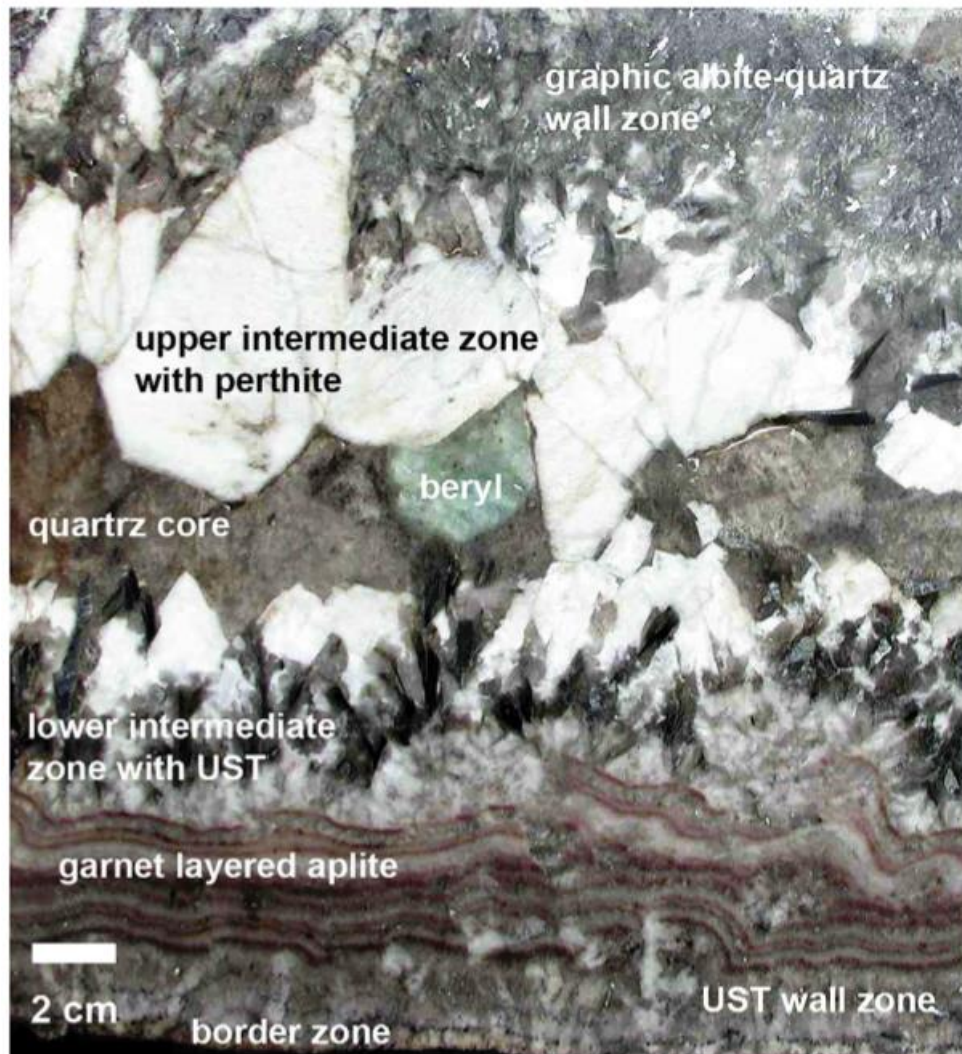
Ειδικότερα, οι πηγματίτες χωρίς ζώνωση ορυκτολογικά περιέχουν μικροκλινή, χαλαζία, ολιγόκλαστο-αλβίτη, μοσχοβίτη, βιοτίτη, σπεςσαρτίνη, ζirkόνιο, απατίτη και τέλος μαγνητίτη (Heinrich 1953).

### 5.4.2. Ζωνώδεις Πηγματίτες

Αντιθέτως, οι ζωνώδεις πηγματίτες αποτελούνται από διακριτές ζώνες γύρω από ένα κεντρικό κορμό, με συνεχές πρότυπο σύστασης και αντίστοιχο μέγεθος κρυστάλλων σε κάθε μεμονωμένη ζώνη. Για παράδειγμα σε μορφή φλέβας μπορεί να παρατηρηθεί η εξής διάταξη ορυκτών. Η εξωτερικότερη ζώνη (border zone) αποτελείται από λεπτόκοκκο χαλαζία και άλλα ορυκτά όπως πλαγιόκλαστο και μοσχοβίτη. Εσωτερικά αυτής υφίστανται μία άλλη ζώνη (wall zone) με αδρόκοκκους κρυστάλλους αστρίων και χαλαζία. Εμφανίζεται η λεγόμενη UST (unidirectional solidification texture) κατά την οποία οι κρύσταλλοι επιμηκύνονται κάθετα στις επαφές με το περιβάλλον πέτρωμα και επεκτεινόμενοι προς τα εσωτερικά. Αυτές οι δύο ζώνες αποκαλούνται ως το πηγματιτικό "κέλυφος" και παρατηρείται σε αυτές η παρεμβολή γραφικού γρανίτη κατά τόπους. Υπάρχουν ενδιάμεσες

ζώνες με άλλου είδους ορυκτά λιγότερο κοινά όπως η βήρυλλος ενώ αυξάνεται το ποσοστό του συμμετέχοντος χαλαζία. Όλα αυτά τα ορυκτά κρυσταλλώνονται μέσα στους πηγματίτες διότι η κρυσταλλική τους ακτίνα είναι τόσο μεγάλη ώστε να μην μπορούν να παραμείνουν στην πλουτώνια πηγή τους. Η κεντρική ζώνη συνίσταται από το μεγαλύτερο μέγεθος κρυστάλλων και συνήθως η κύρια ορυκτολογική φάση είναι ο χαλαζίας (London 2018).

Έπεται μια απεικόνιση τμήματος πηγματιτικής φλέβας στο σχήμα 6.



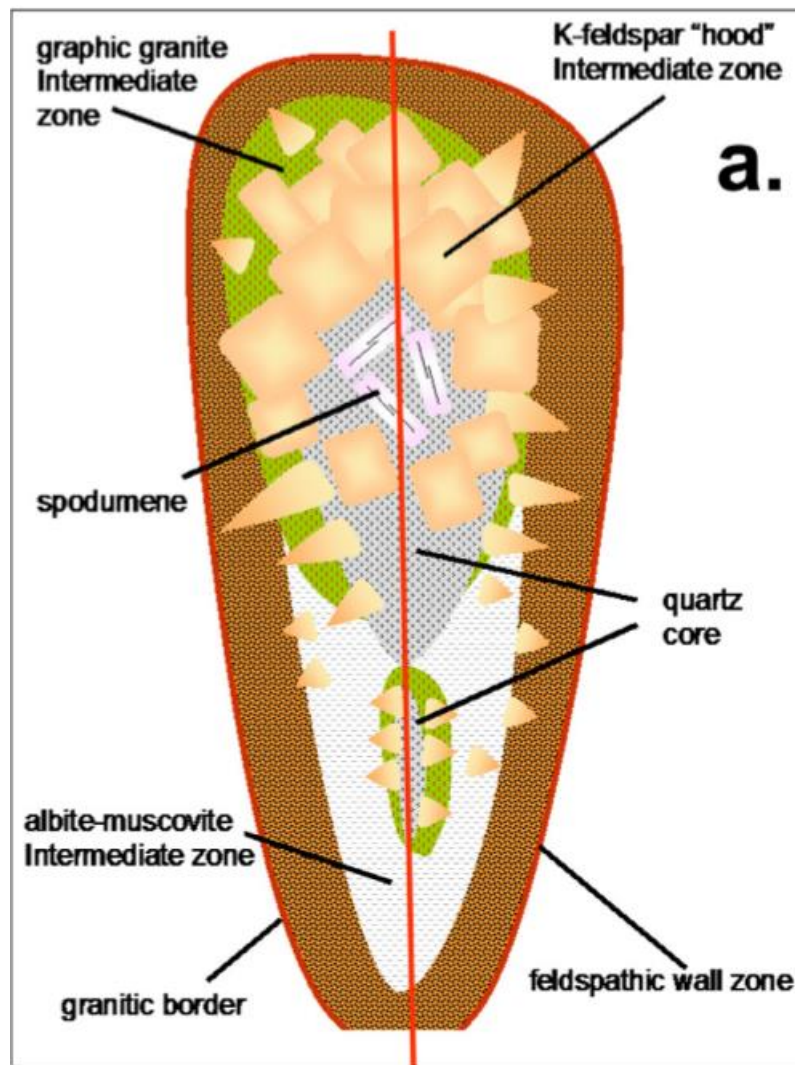
Σχήμα 6: Τμήμα πηγματιτικής φλέβας 29cm πάχους (near Palomar Mountain, San Diego County, California (USA) ) London (2018).

Πιο συγκεκριμένα, πηγματίτες που κατανέμονται σε ζώνες αλλά χωρίς την παρουσία δευτερευόντων ενοτήτων (αντικαταστάσεις ή πληρώσεις κενών και ρηγματώσεων) διαθέτουν εκτός των ορυκτολογικών φάσεων που έχουν προαναφερθεί στους πηγματίτες χωρίς ζώνωση και επιπρόσθετα σποδουμένης, columbite, amblygonite και Fe-Mn φωσφορικά άλατα. Σε

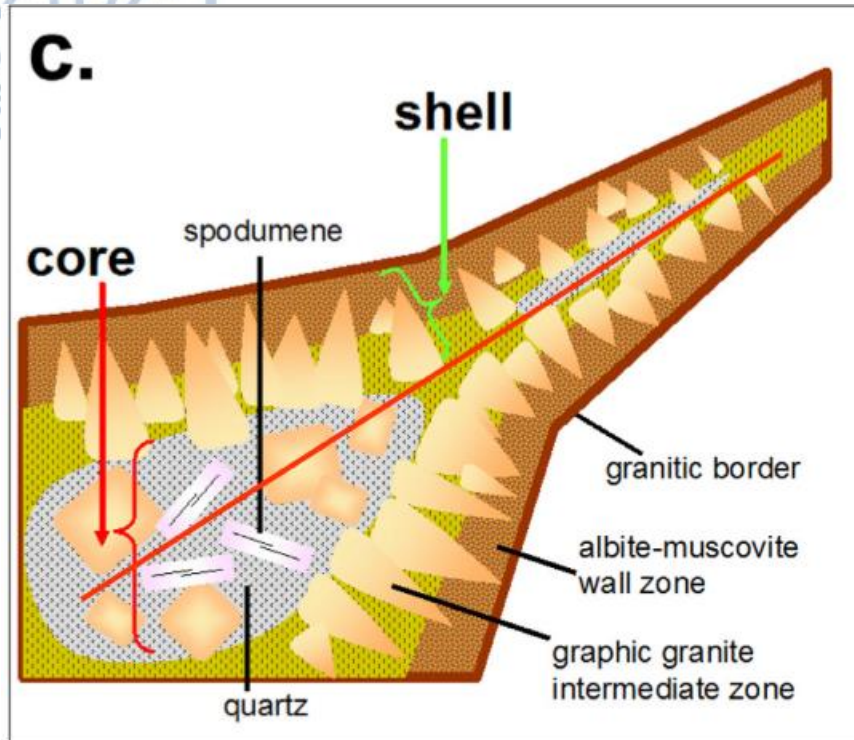


πηγματίτες όπου γίνεται παρατήρηση και ζωνών άλλα και δευτερευόντων πετρογραφικών ενοτήτων περιέχουν cleavelandite, Na-albite (νατριούχος αλβίτης), lepidollite (λεπιδολίτης), zinnwaldite (ορυκτό πυριτικό άλας της ομάδας των μαρμαρυγιών), cookeite, αλκαλικός τουρμαλίνης, αλκαλική βήρυλλος, πεταλίτης, pollucite (πολουσίτης-ζεολιθικό ορυκτό), τοπάζιο, τανταλίτης, μικρολίτης και σουλφίδια ως αντικαταστάσεις ή πληρώσεις ρηγματώσεων αποτελώντας και τους πιο σύνθετους ορυκτολογικά (Heinrich 1953).

Παρακάτω παρατίθενται παράδειγματα ζώνωσης στο σχήμα 7 και σχήμα 8.



Σχήμα 7: Υπό-κατακόρυφη πηγματιτική φλέβα συμμετρική ως προς την κέντρο της με διακριτές ζώνες (London 2018).



Σχήμα 8: Πηγματιτική φλέβα που σταδιακά στενεύει κατά την ανοδική πορεία.  
Μείωση του χημικού διαχωρισμού προς την κατεύθυνση στενέματος (London 2018).

Είναι συνετό να αναφερθεί πως ο London (2018) παραθέτει ότι υπάρχουν δύο στάδια ζώνωσης, η πρωταρχική και η δευτερεύουσα. Η πρώτη οφείλεται σε διαφοροποίηση που προέρχεται στις διάφορες σειρές αντιδραστικότητας ενώ η δευτερεύουσα προκαλείται από αντικατάσταση λόγω υδροθερμικής δραστηριότητας.

### 5.5. Προϋποθέσεις για τον εμπλουτισμό των εν δυνάμει πηγματιτικών κοιτασμάτων σε σπάνια μέταλλα

Σε συμφωνία με τον London (2018) διαπιστώνονται οι εξής προϋποθέσεις :

✓ Αρχικά, τα στοιχεία θα πρέπει να είναι ασυμβίβαστα στις σχηματιζόμενες πετρογραφικές συγκεντρώσεις που προκύπτουν από κάποια γρανιτικής σύστασης πηγή. Η σταθερά κατανομής των ορυκτών που πιο συγκεκριμένα είναι οι άστριοι, ο χαλαζίας, οι μαρμαρυγίες, ο κορδιερίτης ή ο γρανάτης καθώς και ο απατίτης, τουρμαλίνης και μοναζίτης αλλά και διάφορα οξειδία θα πρέπει να εκτιμάται μικρότερη της μονάδας.

✓ Επιπλέον, απαιτούνται πολλαπλά στάδια κατά την εξαγωγή του πυριτικού τήγματος από την μερικώς κρυσταλλική μάζα ώστε τα πηγματιτικά τήγματα να σχηματίσουν εν τέλει κοιτάσματα εμπλουτισμένα σε σπάνια στοιχεία.

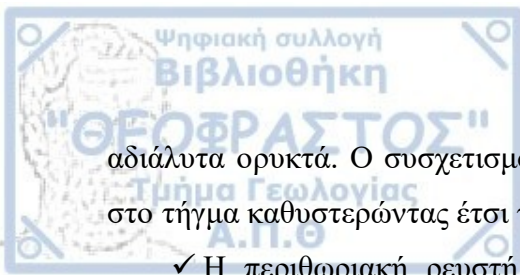
✓ Στους οικονομικά βιώσιμους πηγματίτες και στα τηγματά τους η πληθώρα των σπάνιων μετάλλων συνιστάται να είναι κατά κύριο λόγο χαμηλότερη από τις τιμές κορεσμού στη solidus του ένυδρου γρανιτικού συστήματος. Τα σχηματιζόμενα πηγματιτικά τήγματα επιτυγχάνουν κορεσμό σε σπάνια μέταλλα υπό συνθήκες ψύχρανσης αλλά προτού αρχίσει η κρυστάλλωση δηλαδή χαμηλότερα της θερμοκρασίας solidus.

✓ Εσωτερικά των περιθωρίων των τηγμάτων οι ρυθμοί δημιουργίας των κρυστάλλων είναι στο μέγιστο και το ιξώδες των τηγμάτων σε όλο τον όγκο τους είναι εξαιρετικά υψηλό. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την δημιουργία μιας ρευστής περιθωριακής στρώσης εμπλουτισμένων υγρών.

✓ Αυτή η ρευστή περιθωριακή στρώση ευνοεί την μαζική μεταφορά ιόντων μέσα στο διάλυμα τηγμάτων προς ανάπτυξη κρυσταλλικών επιφανειών. Η αυξημένη ικανότητα διάχυσης και μαζικής μεταφοράς αυτής οδηγεί στην δημιουργία μεγάλων μονοφασικών κρυστάλλων στις εσωτερικές ζώνες.

✓ Η συσσώρευση αποκλειόμενων λοιπών στοιχείων κατά μήκος της διεπιφάνειας του τήγματος κρυστάλλων μπορεί να οδηγήσει στην καθίζηση ορυκτών τα οποία αποτελούν σημαντικά δομικά συστατικά είτε ο όγκος του τήγματος θα είναι κορεσμένος σε αυτά τα ορυκτά είτε όχι. Καθώς η κρυστάλλωση προχωράει εσωτερικά με μετωπική μορφή τέτοιος επεισοδιακός ή και κυκλικός τοπικός κορεσμός συντελεί σε ορυκτολογική στρωμάτωση παράλληλα στις επαφές του τήγματος.

✓ Η αυξανόμενη χημική συνθετότητα της ρευστής περιθωριακής στρώσης και κυρίως η συγκέντρωση των στοιχείων που λειτουργεί σαν ροή μειώνει την δραστηριότητα άλλων σχηματιζόμενων ορυκτολογικών συστατικών στο τήγμα αποτρέποντας τον κορεσμό σε



αδιάλυτα ορυκτά. Ο συσχετισμός του H,B,P και του F αυξάνει την διαλυτότητα του νερού στο τήγμα καθυστερώντας έτσι τον αποχωρισμό ενός υδατικού διαλύματος από το τήγμα.

✓ Η περιθωριακή ρευστή στρώση εξελίσσεται σταδιακά ως το τελευταίο πυριτικό τήγμα στο περιβάλλον σχηματισμού πηγματιτών. Όλη η διαδικασία κλασματοποίησης υποδεικνύει τα φτωχά σε χαλαζία, αλβιτόλεπιδολιθικά σώματα ως τα προϊόντα κρυστάλλωσης τέτοιων τελευταίων τηγμάτων στους Li- πηγματίτες.

✓ Κοιτάσματα σπάνιων μετάλλων σε πηγματίτες είναι πυριγενούς προέλευσης, υποκείμενα σε επακόλουθη υδροθερμική αναδιανομή που κατά κύριο λόγο οδηγεί σε διασπορά παρά σε συγκέντρωση σπάνιων στοιχείων.

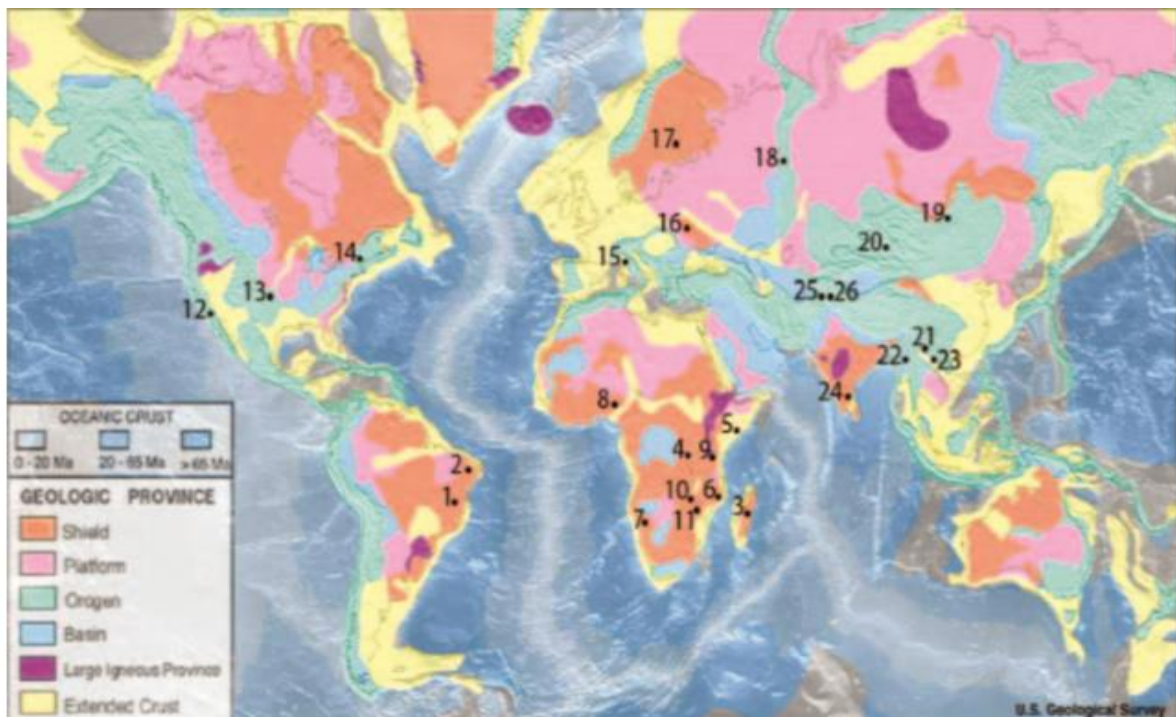
### **5.6. Χρήσεις των ορυκτών από τους προς εκμετάλλευση Πηγματίτες**

Οι πηγματίτες εγείρουν οικονομικό ενδιαφέρον ανάλογα με το μέγεθος των υλικών που περιέχουν, την αξία τους και την εγγύτητα στις εφαρμογές επεξεργασίας των κοιτασμάτων. Τα ορυκτά των πηγματιτών χρησιμοποιούνται ευρέως σε μπαταρίες λιθίου, κινητήρες αερίωθης, σε διόδους φωτοεκπομπής, στην πυρηνική μηχανική, φαρμακευτικές εφαρμογές, προσθετικές συσκευές. Τα σπάνια στοιχεία, οι μαρμαρυγίες, ο χαλαζίας και οι άστριοι αξιοποιούνται σε κεραμικά σκεύη και σε μονωτικές χρήσεις. Οι πηγματίτες θεωρούνται η πιο εύκολα προσβάσιμη πηγή για τα πιο σπάνια στοιχεία για τις υψηλής τεχνολογίας βιομηχανίες. Επίσης επειδή αποτελούν και πηγή πολύτιμων λίθων πολλές φορές τα πηγματιτικά κοιτάσματα εξορύσσονται αποκλειστικά μόνο για την αξιοποίηση αυτών (London 2018).



## 6. ΠΗΓΜΑΤΙΤΙΚΑ ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΑ ΠΟΛΥΤΙΜΩΝ ΛΙΘΩΝ

Οι πηγματίτες όπως προαναφέρθηκε είναι πηγή πολύτιμων λίθων περιλαμβάνοντας ποικιλίες βηρύλλου, σποδουμένη, τοπαζίου, τουρμαλίνη και σπεςσαρτίνη. Χαρακτηριστικά πηγματιτικά κοιτάσματα γνωστά για την παροχή τους σε πολύτιμους λίθους είναι αυτά της Βραζιλίας, της Μαδαγασκάρης, της Ρωσίας και των ΗΠΑ με νέο-εισαγόμενες χώρες την Αφρική (Κονγκό, Μοζαμβίκη, Ναμίμπια, Νιγηρία, Τανζανία και Ζάμπια) και την Ασία (Αφγανιστάν και Πακιστάν). Οι περισσότεροι υψηλής ποιότητας πολύτιμοι λίθοι βρίσκονται σε μαρολιθικές κοιλότητες εγγύς περιοχών πηγματιτικών σωμάτων ή σε ζώνες αντιδράσεων μεταξύ πηγματιτών και υπερβασικών πετρώματων που λειτουργούν ως ξενιστές. Οι πιο σημαντικοί γρανιτικοί πηγματίτες που φέρουν πολύτιμους λίθους είναι αυτοί που σχηματίστηκαν σε μικρό βάθος ηπειρωτικού φλοιού κατά τα τελευταία στάδια ηπειρωτικής σύγκρουσης. Πολύ σπάνια πηγματίτες βασικής ή αλκαλικής σύστασης (γάββροι, νεφελιτικοί συνηήτες) να περιέχουν ορυκτά πολύτιμων λίθων γεγονός που συμφωνεί στην επικράτηση κατά κύριο λόγο των γρανιτικής σύστασης πηγματιτών (Beurlen et al. 2012). Η γεωγραφική κατανομή των πηγματιτικών κοιτασμάτων που φέρουν πολύτιμους λίθους φαίνεται στο σχήμα 9.





- 1.\* **Brazil:** Minas Gerais  
Beryl (aquamarine, morganite, hellodior), topaz, tourmaline, spodumene (kunzite, hiddenite), brazilianite, euclase, quartz (rose, smoky, citrine), amblygonite–montebrasite

---

2. **Brazil:** Paraíba, Rio Grande do Norte  
Tourmaline (Paraíba variety), beryl (aquamarine, morganite, hellodior), euclase, quartz (rose, smoky, citrine), spessartine

---

3. **Madagascar:** Antananarivo, Fianarantsoa, Toamasina  
Tourmaline, beryl (aquamarine), spodumene (kunzite), londonite, pezzottaite, hambergite, orthoclase/sanidine, quartz (rose), spessartine, danburite, phenakite

---

4. **D. R. Congo:** Katanga, Nord Kivu  
Tourmaline

---

5. **Kenya:** Coast  
Tourmaline

---

6. **Mozambique:** Nampula, Tete, Zambezia  
Tourmaline, spessartine, beryl (aquamarine), topaz, spodumene (kunzite), quartz (rose)

---

7. **Namibia:** Erongo  
Tourmaline, beryl (aquamarine), topaz, jeremejevite

---

8. **Nigeria:** Edo, Kaduna, Kwara, Nassarawa, Oyo, Plateau  
Tourmaline, chrysoberyl, topaz, beryl, phenakite, spodumene, spessartine

---

9. **Tanzania:** Arusha, Morogoro, Tanga  
Tourmaline, spessartine

---

10. **Zambia:** Central, Eastern  
Tourmaline, beryl (emerald), spessartine

---

11. **Zimbabwe:** Mashonaland West  
Beryl (aquamarine), topaz, tourmaline

---

12. **United States:** California, Mesa Grande, Pala, Ramona  
Tourmaline, beryl (aquamarine, morganite), spessartine, spodumene (kunzite)

---

13. **United States:** Colorado Collegiate Range  
Beryl (aquamarine), phenakite

---

14. **United States:** New England, Maine, New Hampshire, Connecticut  
Tourmaline, beryl (aquamarine), pollucite

---

15. **Italy:** Elba  
Tourmaline, pollucite

---

16. **Ukraine:** Zhytomyr  
Beryl (hellodior, aquamarine), topaz

---

17. **Finland:** Luumäki (South Karelia)  
Beryl (aquamarine), tourmaline

---

18. **Russia:** Ural Mountains  
Beryl (aquamarine, emerald), topaz, chrysoberyl (alexandrite)

---

19. **Russia:** Zabaykalsky (Transbaikalia)  
Tourmaline, danburite, pollucite, spessartine, beryl (aquamarine), topaz

---

20. **China:** Xinjiang Uygur  
Beryl (aquamarine), tourmaline

---

21. **China:** Yunan  
Tourmaline, beryl (aquamarine), spessartine

---

22. **Myanmar:** Mogok, Momeik  
Tourmaline, phenakite, petalite, pollucite

---

23. **Vietnam:** Yen Bai  
Tourmaline, microcline (amazonite)

---

24. **India,** Tamil Nadu  
Beryl (aquamarine)

---

25. **Afghanistan,** Kunar, Nuristan  
Tourmaline, spessartine, topaz, beryl (emerald, aquamarine), spodumene (kunzite)

---

26. **Pakistan,** Gilgit-Baltistan  
Tourmaline, spessartine, beryl (aquamarine), topaz

---

\* Numbers correspond to map locations in Figure 6.

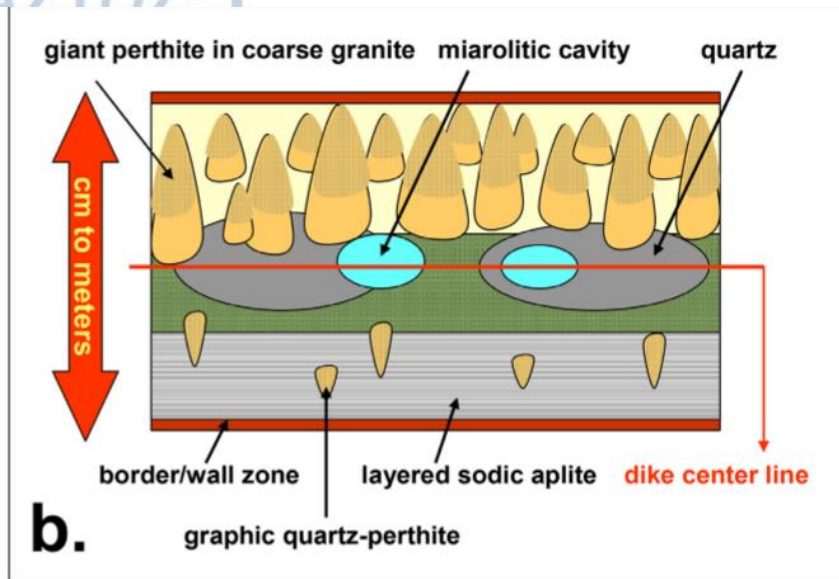
Sources: Clifford et al. 2011; Cornejo and Bartorelli 2010; Groat et al. 2007; Falster et al. 2002, 2005; Pezzotta 2001; Shigley et al. 2010; Simmons 2007

Σχήμα 9: Οι κύριες πηγματικές περιοχές-πηγές πολύτιμων λίθων κατανεμημένες ανά τον κόσμο (Beurlen et al. 2012).

### 6.1. Πολύτιμοι λίθοι που σχετίζονται με γρανιτικούς πηγματίτες

Οι πολύτιμοι λίθοι εντός πηγματιτών διαπιστώνονται ως εξής :

- ◆ Κρύσταλλοι εσωτερικά μιας συμπαγούς μάζας χαλαζία ή αστρίου στον πυρήνα-κέντρο ή στο περιθώριο του πυρήνα ενός πηγματιτικού σώματος. Χαρακτηριστικό παράδειγμα η ποικιλία της βηρύλλου aquamarine και ο τουρμαλίνης.
- ◆ Κρύσταλλοι σε ζώνες αλληλεπίδρασης των διεισδυτικών πηγματιτών σε βασικά πετρώματα. Ενδεικτικά, το σμαράγδι (η πράσινη Cr-V πλούσια ποικιλία της βηρύλλου) και ο αλεξανδρίτης (Cr ή Cr-V πλούσια ποικιλία της χρυσοβηρύλλου) σε "Ουραλικού τύπου" κοιτάσματα όπως αυτά στα Ουράλια όρη της Ρωσίας, στην Kafubu περιοχή της Ζάμπιας δημιουργούνται από την αλληλεπίδραση πηγματιτικών ρευστών πλούσιων σε βηρύλλιο (Be) με χρωμιούχα βασικά πετρώματα (Schwarz et al. 2002, Zwaan et al. 2005, Groat et al. 2007).
- ◆ Κρύσταλλοι μέσα σε μιαρολιθικές κοιλότητες (pockets). (Οι μιαρολιθικές κοιλότητες βρίσκονται κατά μήκος της κεντρικής γραμμής σε υποοριζόντιους layered πηγματίτες. Η συχνότητα εμφάνισης των ανοιχτών ή αργιλοστοιβαγμένων (clay-packed) μιαρολίθων σε υπο-οριζόντιους πηγματίτες ενδείκνυται σε ρηχά επίπεδα τοποθέτησης τους καθώς λαμβάνει χώρα αύξηση του μοριακού όγκου υδατικού διαλύματος με μείωση πίεσης σε υψηλή θερμοκρασία. Οι πιο σημαντικοί μιαρολιθικοί πηγματίτες ως πηγές πολύτιμων λίθων περιέχουν συσσωμάτωμα σποδουμένη με χαλαζία (London 2018). Η σχηματική απεικόνιση υπό-οριζόντιας φλέβας φαίνεται στο σχήμα 10.



Σχήμα 10: Υπό-οριζόντια πηγματιτική φλέβα με διατεταγμένες ζώνες. Παρουσία των μιαρολιθικών κοιλοτήτων εντός του κεντρικού χαλαζιακού πυρήνα της φλέβας (London 2018).

Οι ποικιλίες της βηρύλλου, του σπεςσαρτίνη, σποδομένη, τοπαζίου και τουρμαλίνη εμφανίζονται σχεδόν κατά κύριο λόγο στις μιαρολιθικές κοιλότητες στον πυρήνα των πηγματιτών. Μπορούν βέβαια και να εντοπιστούν και στις εσωτερικές αδρόκοκκες ζώνες (περιφερειακή ζώνη του πυρήνα) που περιβάλλουν τις πλούσιες σε χαλαζία ζώνες. Αυτές οι μιαρολιθικές κοιλότητες είναι αντιπροσωπευτικές των απόλυτων συγκεντρώσεων σπάνιων στοιχείων, ρευστών και πτητικών ενώσεων που μπορούν να επιτευχθούν σε πηγματίτες. Διαπιστώνεται η πιο εξελιγμένη συγκέντρωση ορυκτών πολύτιμων λίθων ως προς την ποιότητα και η παρουσία σπάνιων οξειδίων Nb-Ta-Sn, φωσφορικών αλάτων, φθοριούχων ενώσεων, βορικών και βορικοπυριτικών εξαιτίας των οποίων οι πηγματίτες αυτοί είναι εξαιρετικά αναζητήσιμοι. Αυτές όμως οι κοιλότητες είναι πολύ σπάνιες ενώ είναι πολλές φορές οικονομικά ασύμφορη η λειτουργία λατομείων πηγματιτών καθώς υψηλής ποιότητας πολύτιμοι λίθοι ανακτώνται σποραδικά (Beurlen et al. 2012).

## 6.2. Προέλευση των τηγμάτων

Τα σχηματιζόμενα πηγματιτικά τήγματα πιθανοί φορείς κρυστάλλων πολύτιμων λίθων προέρχονται από ένα αρχικό μητρικό γρανιτικό τήγμα κατά την διάρκεια της διαδικασίας κρυστάλλωσης. Ως γνωστόν, τα πρώτα σχηματιζόμενα πετρογενετικά ορυκτά είναι ο χαλαζίας και ο άστριος αφήνοντας υπολειμματικό τήγμα το οποίο εξελίσσεται σταδιακά και εμπλουτίζεται σε στοιχεία που αποκλείονται των πρώτων ορυκτών φάσεων. Στο τελευταίο

στάδιο κρυστάλλωσης αυξάνεται η συμμετοχή του νερού και των πτητικών στοιχείων όπως B, P, Li, F ενώ ταυτόχρονα άλλα εμπλεκόμενα πτητικά συστατικά προκαλούν μείωση του ιξώδους και της θερμοκρασίας κρυστάλλωσης και σχηματισμό των ορυκτών φάσεων καθώς και επιπρόσθετα αύξηση της χημικής διάχυσης μέσα στο τήγμα. Έπειτα εάν σε αυτό το τελευταίο υπολειμματικό τήγμα γίνει υπέρβαση της συγκέντρωσης των πτητικών συστατικών και κυρίως του νερού βάση του ορίου διαλυτότητας, τότε το υδατικό διάλυμα που εντέλει εξάγεται από το τήγμα είναι δυνατό να σχηματίσει ένα πρωταρχικό μιαρολιθικό έγκοιλο (Beurlen et al. 2012).

Στο σχήμα 11 φαίνεται η πορεία κρυστάλλωσης των τηγμάτων στον πηγματίτη Luumäki στην Φινλανδία σύμφωνα με τους Fusswinkel et al. (2017). Σύμφωνα με το μοντέλο γένεσης ο πηγματίτη σχηματίζεται σε τρία στάδια:

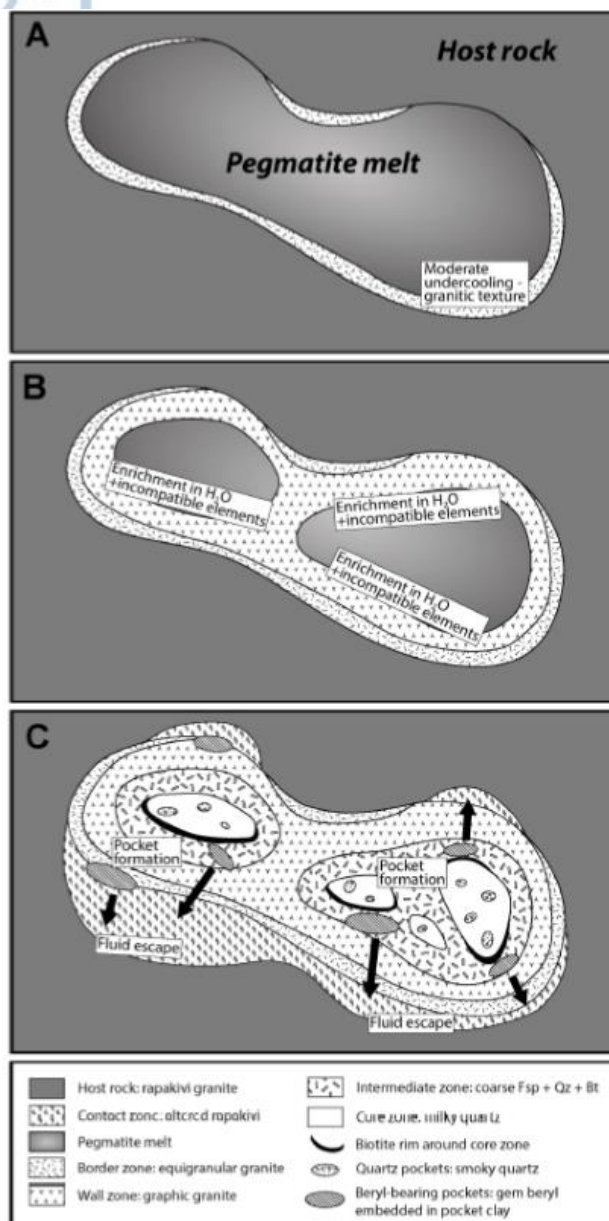
(α) Το πηγματιτικό τήγμα προερχόμενο από το υπολειματικό τήγμα των γρανιτών, είναι μέτρια εμπλουτισμένο σε ασυμβίβαστα στοιχεία και ρευστά, κρυσταλλώνεται και σχηματίζεται η περιφερειακή ζώνη.

(β) Κρυστάλλωση των εσωτερικών πηγματιτικών ζωνών με έντονο εμπλουτισμό σε ασυμβίβαστα στοιχεία.

(γ) Στο τελευταίο στάδιο της κρυστάλλωσης το υπολειματικό πηγματιτικό τήγμα μετατρέπεται σε υπερκρίσιμο υδατικό διάλυμα προς σχηματισμό μιαρολιθικών κοιλοτήτων εντός των χαλαζιακών πυρήνων (Fusswinkel et al. 2017).

Μέσω λοιπόν της κλασματικής κρυστάλλωσης οι κοιλότητες δημιουργούνται εφόσον το υπολειμματικό τήγμα είναι υπερκορεσμένο σε πτητικά συστατικά. Το υπερκρίσιμο υδατικό διάλυμα διαχωρίζεται από το πηγματιτικό τήγμα σύμφωνα με τρεις μηχανισμούς (Cerný 2000) :

1) Αποσυμπίεση του ανερχόμενου μάγματος (πτώση πίεσης). Λόγω μείωσης της πίεσης στο υπερκορεσμένο σε πτητικά πηγματιτικό τήγμα, οι πτητικές ενώσεις μπορούν να διαφύγουν με μορφή φυσαλίδων. Εάν οι τελευταίες παγιδευτούν στο παχύρρευστο στερεοποιούμενο γρανιτικό τήγμα τότε διαμορφώνονται τα μιαρολιθικά έγκοιλα. Τα έγκοιλα αυτά μπορεί να περιέχουν βήρυλλο και τοπάζιο κατατάσσοντας τα κοιτάσματα σε τύπου βηρύλλου-τοπαζίου.



Σχήμα 11: Απεικόνιση της κρυστάλλωσης του πηγματίτη Luumäki που περιέχει πολύτιμους βηρύλλους (Fusswinkel et al. 2017).

2) Κλασματική κρυστάλλωση κατά την διάρκεια ισοβαρούς στερεοποίησης. Με αυτό τον τρόπο μπορεί να προκληθεί υπερκορεσμός σε πτητικές ενώσεις και έπειτα διαφυγή αυτών μέσω ενός υπερκρίσιμου τήγματος πλούσιου σε νερό (Jahns and Burnham 1969). Αυτή η διεργασία διαφυγής λαμβάνει χώρα σε μεταγενέστερα (τελευταία) στάδια της κρυστάλλωσης και αν τα ρευστά δεν προσβάλλουν τα περιβάλλοντα πετρώματα εναποτίθεται σε μιαρολιθικές κοιλότητες κατά μήκος του περιθωρίου των πηγματιτικών πυρήνων. Χαρακτηριστικό είναι ο σχηματισμός μεγάλων ιδιόμορφων κρυστάλλων.



3) Μείωση των ρευστών πτητικών (B, F, P, Li) μέσω κρυστάλλωσης ορυκτών που τα περιέχουν. Αυτό συντελεί στην εξαγωγή του υπερκρίσιμου υδατικού διαλύματος και τον σχηματισμό μιαρολιθικών κοιλοτήτων (Beurlen et al. 2012).

Συμπερασματικά, για τον σχηματισμό μιαρολιθικών κοιλοτήτων είναι αναγκαίο το πρωταρχικό τήγμα να έχει επαρκή ποσότητα πτητικών συστατικών για την πραγμάτωση εξαγωγής του υπερκρίσιμου διαλύματος κατά τα τελευταία στάδια κρυστάλλωσης. Καθώς επίσης και το εύρος των πιέσεων δεν συνίστανται να είναι πολύ μεγάλο (<3kb) αφού η διαδικασία εξαγωγής συνδέεται αντιστρόφως ανάλογα με την πίεση. Γι' αυτό άλλωστε οι κοιλότητες εμφανίζονται σε αφθονία σε μικρού βάθους πηγματίτες και αντίστοιχα υπό μεγάλο βάθος άρα και υψηλή πίεση εκλείπουν (Simmons et al. 2003).

Οι ίδιες αποτελούν απόδειξη ότι τα σχηματιζόμενα πηγματιτικά τήγματα έχουν υποστεί κορεσμό σε νερό που προηγείται της κρυστάλλωσης, αποτελώντας σπάνιες εμφανίσεις που καταλαμβάνουν μικρό ποσοστιαίο όγκο μέσα στους πηγματίτες. Η παραγωγή πολύτιμων λίθων από πηγματίτες είναι ένα εγχείρημα επιτυχίας ή αποτυχίας. Η σπανιότητα των προαναφερθέντων κοιλοτήτων είναι αναπάντεχη δεδομένου του όγκου του υδατικού διαλύματος που διαχωρίζεται κατά την κρυστάλλωση του αρχικά κορεσμένου σε νερό γρανιτικού τήματος στα βάθη σχηματισμού πηγματιτικών τηγμάτων. Επιπρόσθετα, οι κοιλότητες δεν είναι κενά που ήταν παλιότερα πληρωμένα με νερό αλλά αντίθετα με εξαιρετικά πυκνό τήγμα που αντιπροσωπεύει μάλιστα το τελευταίο πυριτικής σύστασης συστατικό κατά την διάρκεια σχηματισμού των κρυστάλλων. Οι κοιλότητες υπερβαίνουν κατά μεγάλο βαθμό τον όγκο που καταλάμβανε το νερό που περιείχαν (London 2018).

Αμέσως με την εκκίνηση εξαγωγής του υπερκρίσιμου διαλύματος λαμβάνει χώρα ιοντική διάχυση από το συνυπάρχον πυριτικό τήγμα προς το διάλυμα παρέχοντας συστατικά προς σχηματισμό κρυστάλλων μέσα στις μιαρολιθικές κοιλότητες. Υφίστανται συνεχή ιοντική διάχυση στις κρυσταλλικές επιφάνειες γεγονός που δίνει εξήγηση για την αφθονία των κρυστάλλων μέσα στις κοιλότητες. Εντός των κοιλοτήτων και κατά μήκος του περιθωρίου τους οι σχηματιζόμενοι κρύσταλλοι εμφανίζουν περατωτικά όρια ενώ αυτοί που σχηματίζονται εξολοκλήρου εσωτερικά της κοιλότητας έχουν την μορφή τέλειων κρυστάλλων (Beurlen et al. 2012).

Έχουν συσχετιστεί η συγκέντρωση των υπολειμματικών τηγμάτων και το μέγεθος των κοιλοτήτων καθώς και οι αλληλουχίες αυτών με διάφορα δομικά χαρακτηριστικά. Ειδικότερα, η τομή συγγενετικών φλεβών, οι αλλαγές στην παράταξη ή γωνία κλίσης των φλεβών, η απότομη αύξηση του πλάτους αυτών καθώς και οι θύλακες μεγάλου μεγέθους πετρωμάτων ξενιστών εσωτερικά των πηγματιτικών σωμάτων φαίνεται ότι αποτελούν



δομικά χαρακτηριστικά επιρροής έναντι των γεωμετρικών χαρακτηριστικών των κοιλοτήτων (Simmons et al. 2003).

### 6.3. Υδροθερμική εξαλλοίωση

Κατά τα τελευταία στάδια κρυστάλλωσης των πηγματιτών η πίεση των ρευστών εσωτερικά στις μιαιολιθικές κοιλότητες μπορεί να προκαλέσει διάρρηξη αυτών. Η λιθοστατική πίεση και η εφελκυστική αντοχή του περιβάλλοντος πετρώματος συνδράμουν στην διάρρηξη. Επίσης, λόγω των διασταυρούμενων ρωγματώσεων εντός των κοιλοτήτων, που δημιουργούνται είτε εξαιτίας συστολής του περιβάλλοντος πετρώματος λόγω ψύξης από την στερεοποίηση πηγματιτών ή εξαιτίας τεκτονικών καταπονήσεων, συντελείται άσκηση πίεσης. Το σημαντικό της επιρροής αυτών των παραγόντων είναι ότι επέρχονται καταστροφικές συνέπειες στους κρυστάλλους των πολύτιμων λίθων που μειώνουν την ποιότητα και αντιστοίχως την αξία αυτών. Οι εκάστοτε κρύσταλλοι μπορεί να διαρρηχθούν από την απότομη αποσυμπίεση ή από την απότομη εισαγωγή τους σε πεδία χημικής αστάθειας που περαιτέρω συντελούν στην εμφάνιση διάβρωσης ή αλλοίωσής τους.

Βέβαια, η διάβρωση και αλλοίωση είναι φαινόμενα που μπορούν να εντοπιστούν και απουσία γεγονότων διάρρηξης σε μεγάλες κοιλότητες καθώς τα υδροθερμικά ρευστά αντιδρούν με προγενέστερα σχηματισθέντα ορυκτά καθώς φθίνουν η θερμοκρασία και η πίεση. Σε κάποιες ασυνήθιστες περιπτώσεις η μεταγενέστερου σταδίου διάβρωση μπορεί να προκαλέσει την διάλυση των χαμηλής ποιότητας ορυκτών φάσεων με αποτέλεσμα να απομείνουν μόνο τα υψηλής ποιότητας που είναι γνωστά ως “gem nodules”, δηλαδή κόνδυλοι πολύτιμων λίθων. Έλλειψη αλλοίωσης δε, μπορεί να επιτευχθεί μέσω διαφυγής των πεπιεσμένων ρευστών διαχεόμενα στα περιβάλλοντα πετρώματα ή με διαρροή μέσω μικρών ρωγμών που εκτονώνουν σιγά σιγά την πίεση.

Σαφώς οι μιαιολιθικές κοιλότητες είναι σπάνιες, πόσο μάλλον αυτές που περιέχουν και κρυστάλλους πολύτιμων λίθων και συνεπώς ειδικά αυτές όπου οι κρύσταλλοι παραμένουν άθικτοι από μηχανική καταπόνηση ή διαβρώσεις και αλλοιώσεις (Beurlen et al. 2012).

#### 6.4. Η σπανιότητα των κοιτασμάτων πολύτιμων λίθων

Τα κοιτάσματα πολύτιμων λίθων είναι σπάνια διότι οι συνθήκες για τον σχηματισμό των πολύτιμων λίθων είναι δύσκολο να επιτευχθούν. Αυτές οι συνθήκες περιλαμβάνουν :

- α) την διαθεσιμότητα των κύριων συστατικών συμμετεχόντων που πιθανόν να είναι σπάνια στην φύση,
- β) τη παρουσία πληθώρας χρωμοφόρων στοιχείων δηλαδή στοιχείων καθοριστικών του χρώματος των ορυκτών,
- γ) περιορισμένες συγκεντρώσεις ανεπιθύμητων στοιχείων που υφίστανται είτε στην φύση ή και σε συγκεκριμένο γεωλογικό περιβάλλον,
- δ) ανοιχτό διαθέσιμο χώρο για την ανάπτυξη των κρυστάλλων (συνθήκη που θεωρείται σπάνια στα γεωλογικά περιβάλλοντα),
- ε) ικανό περιβάλλον για την δημιουργία επαρκούς μεγέθους και διαφάνειας κρυστάλλων και τέλος
- ζ) περιβάλλον που να διατίθεται εύκολα προς εξόρυξη.

Εκτός του διαμαντιού για το σχηματισμό του οποίου απαιτείται τοπικός εμπλουτισμός σε άνθρακα που αποτελεί ιχνοστοιχείο περιεχόμενο στον μανδύα, για τους υπόλοιπους πολύτιμους λίθους χρειάζεται να έρθουν σε επαφή τα κύρια στοιχεία με τα απαιτούμενα χρωμοφόρα τα οποία συνήθως αποτελούν μεταβατικά μέταλλα. Χαρακτηριστικό παράδειγμα που απαιτείται η ύπαρξη τόσο ενός κύριου στοιχείου όσο και ενός χρωμοφόρου είναι το σμαράγδι. Το χρώμιο αποτελεί χρωμοφόρο στοιχείο τόσο στα ρουμπίνια όσο και στα περισσότερα σμαράγδια. Στο ρουμπίνι οι ηλεκτροστατικές δυνάμεις γύρω από το ιόν του χρωμίου είναι ισχυρές και συνεπώς υπάρχει μεγάλη συνεκτικότητα δομής δημιουργώντας ένα μικρό πλέγμα γύρω από το ιόν. Αυτό οδηγεί σε απορρόφηση υψηλής ενέργειας, ενώ η αντίθετη περίπτωση με τις ηλεκτροστατικές δυνάμεις και ενέργεια απορρόφησης ισχύει στο σμαράγδι γεγονός που συμβάλλει στην απόκτηση του πράσινου χρώματος του (Burns 1993).

Αξίζει να αναφερθεί ότι ορισμένα χρωμοφόρα μπορούν να καθυστερήσουν την ανάπτυξη πολύτιμων λίθων δίνοντας κάποιο ανεπιθύμητο χρώμα όπως μαύρο χρώμα στον τουρμαλίνη.

Επιπρόσθετα, οι πολύτιμοι λίθοι πρέπει ούτως ώστε να αξιοποιηθούν να καταφέρουν να διατηρηθούν από την μηχανική καταπόνηση-ρηγμάτωση, από διεργασίες μεταμορφισμού και οποιεσδήποτε μεταγενέστερες της δημιουργίας τους καταπονήσεις (Groat and Lours 2009).



## 7. ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΩΝ ΠΟΛΥΤΙΜΩΝ ΛΙΘΩΝ

### 7.1. Dunton Πηγματίτες

Χαρακτηριστικό παράδειγμα μιαιολιτικής κοιλότητας διαστάσεων  $2 \times 3 \times 7$  m προς σχηματισμό κοιτασμάτων πολύτιμων λίθων είναι η περίπτωση των Dunton πηγματιτών στο Newry Mountain, Maine, USA που φιλοξενεί δύο τόνους δίχρωμων πράσινων και ερυθρών κρυστάλλων elbaite ( ποικιλία τουρμαλίνη) με σημερινή αξία στην παγκόσμια αγορά περίπου 40 εκατομμυρίων δολαρίων (Simmons et al. 2012).

Αυτή η συγκεκριμένη εμφάνιση είναι γνωστή εξαιτίας των μεγάλων σε μέγεθος κρυστάλλων τουρμαλίνη με το επίκεντρο τους σε ροζ απόχρωση και τα πράσινα ή πρασινωπά και ροζ σε εναλλαγές διατεταγμένα περιθώρια. Ορυκτολογικά εκτός από τους μεγάλου μεγέθους κρυστάλλους σποδουμένη και των μαζών αμβλυγωνίτη και pollucite μεγαλύτερο ενδιαφέρον εντοπίζεται στα ασυνήθιστα συσσωματώματα. Το κοίτασμα εντοπίζεται στο βορειότερο μέρος της πόλης Newry, in Oxford, Maine. Το περιβάλλον πέτρωμα (wall rock) της εμφάνισης είναι ένας ελαφρά πράσινος μαρμαρυγιακός σχιστόλιθος αποτελούμενος από μοσχοβίτη, ακτινόλιθο και χαλαζία. Ο ίδιος είναι αρκετά διαταραγμένος ώστε τουλάχιστον εγγύς των εμφανίσεων των κοιτασμάτων να είναι μεταβλητή η κατεύθυνση της σχιστότητας ενώ ταυτόχρονα διαπερνάται από ποικίλου μεγέθους πηγματιτικές παρεμβολές εκτεινόμενες από την απαρχή του λόφου μέχρι και τα πρηνή. Γύρω από τις επαφές μεταξύ σχιστολίθων και πηγματιτικών σωμάτων έχει λάβει χώρα αλλοίωση με σχηματισμό μαρμαρυγιών καθώς και συγχώνευση της όλης μάζας με τουρμαλίνη, γεγονός πιο έκδηλο στο hanging-wall του πηγματίτη.

Η παράταξη και η γωνία βύθισης της επαφής σχιστολίθου-πηγματίτη ποικίλλουν αλλά γενικότερα η γωνία κυμαίνεται από  $45^\circ$  έως και  $70^\circ$ . Η κατανομή των κρυστάλλων τουρμαλίνη στον σχιστόλιθο παρουσιάζει ενδιαφέρον καθώς αυτοί μπορεί να περιορίζονται σε ορισμένα επίπεδα-ζώνες. Ειδικά ο μαύρος τουρμαλίνης προσανατολίζεται ποικιλοτρόπως σε όλες τις διευθύνσεις ενός εκάστοτε επιπέδου. Μάλιστα εάν το πέτρωμα διαρρηχθεί παράλληλα κατά μήκος ενός τέτοιου επιπέδου μπορεί να αποκαλυφθεί μια σχεδόν συμπαγής έδρα μαύρου τουρμαλίνης. Διακρίνονται δύο κύριες εμφανίσεις κατά κύριο λόγο. Στο βορειότερο μέρος αφθονούν πηγματίτες πιο αδρομερείς ως προς την υφή ενώ σε αφθονία βρίσκονται κρύσταλλοι σποδουμένη, αμβλυγωνίτη ενώ δεν υπάρχει έγχρωμος τουρμαλίνης. Αντιθέτως, στο νοτιότερο μέρος εμφανίζονται πράσινοι, μπλε, κόκκινοι και ζωνώδεις

κρύσταλλοι τουρμαλίνη καθώς επίσης αφθονεί το ορυκτό κολουμβίτης-κολουμίτης ενώ εμφανίζονται και ορυκτά του ουρανίου (Fraser 1930).

## 7.2. Mount Mica Πηγματίτες (Maine)

Το Mount Mica εντοπίζεται στην πόλη Paris (Oxford County) όπου και ανακαλύφθηκε τουρμαλίνης ποικιλίας ελμπαίτη το 1820. Αρχικά βρέθηκε κοιλότητα πληρωμένη με κόκκινους και πράσινους κρυστάλλους τουρμαλίνη φτάνοντας τα 8cm σε μήκος. Στην συνέχεια ανακαλύφθηκαν και άλλες κοιλότητες περιλαμβάνοντας και πολύχρωμους κρυστάλλους με σκούρη μπλέ βάση, μια ροζ ζώνη που μεταπίπτει σταδιακά σε άχρωμη και τέλος πράσινο περιθώριο. Μέχρι τον Μάιο του 1895 φημολογείται ότι είχαν αποκαλυφθεί 59 κοιλότητες. Το 1904 άλλη μία μεγάλου μεγέθους κοιλότητα εντοπίστηκε προς παραγωγή άνω των 34kg κρυστάλλων τουρμαλίνη και κονδύλους αβορίτη καθώς επίσης και έναν μεμονωμένο πολυχρωματικό κρύσταλλο τουρμαλίνη που ζύγιζε 13 kg, ύψους 35cm και πλάτους 15cm (Perham 1987). Το Mount Mica γεωχημικά ταξινομείται στην LCT-type των πηγματιτών οι οποίοι είναι σχετικά εμπλουτισμένοι σε λίθιο-καίσιο-ταντάλιο και το ίδιο είναι μια μεγάλη μεγέθους, με ελαφρά ζώνωση γρανιτική πηγματιτική φλέβα φιλοξενούμενη μέσα σε μεταϊζηματογενή πετρώματα-ξενιστές. Υπάρχει μία ασθενώς διαμορφωμένη και ασύμμετρη εσωτερική ζώνωση όπου διακρίνονται μία λεπτή περιφερειακή ζώνη (wall zone), μία ενδιάμεση ζώνη (intermediate zone) και μια εσωτερικότερη ζώνη-πυρήνας (core zone). Χαρακτηριστικό είναι η παρουσία μίας ή δύο λωρίδων γρανάτη-μαύρης ποικιλίας τουρμαλίνη (schorl) στο απλιτικό μέρος της φλέβας. Ο πυρήνας κατά κύριο λόγο συνίσταται από χαλαζία, μικροκλίνη και μαύρο τουρμαλίνη (schorl) και λιγότερο συχνά από περιοχές με λεπιδόλιθο και σποδομένη, κασσιτερίτη, columbite και σπάνια βήρυλλο. Γενικότερα, η περιοχή προσφέρεται για την εμφάνιση κοιλοτήτων, οι οποίες και συναντώνται κατά μήκος της ζώνης του πυρήνα αλλά και κάποιες μεγάλου μεγέθους διατίθενται με μορφή προεξοχών στα πηγματιτικά σώματα. Ωστόσο, οφείλεται να τονιστεί ότι δεν υπάρχει κάποιου είδους συσχέτιση των διαστάσεων των κοιλοτήτων και του μεγέθους καθώς επίσης και της ποιότητας των κρυστάλλων τουρμαλίνη αφού έχουν διαπιστωθεί και πελώριες κοιλότητες κενές από τουρμαλίνη. Όταν το 2004 τις εξορυκτικές διεργασίες ανέλαβαν η εταιρία Coromoto Minerals, ανακαλύφθηκαν κάποια από τα καλύτερης ποιότητας δείγματα που ανασύρθηκαν από το κοίτασμα. Μάλιστα τα δύο πρώτα χρόνια εξόρυξης ανακαλύφθηκαν γύρω στις 43 κοιλότητες που περιείχαν μεγάλους υψηλής ποιότητας πράσινους και ροζ κρυστάλλους τουρμαλίνη καθιστώντας το καλύτερο ανακαλυφθέν υλικό στο Mount Mica

στην ιστορία των 185 χρόνων του. Ενώ το ίδιο διαθέτει ρεκόρ για τους μεγαλύτερους κρυστάλλους ελμπαΐτη στην Βόρεια Αμερική. Επιπλέον από ηλεκτρονικές μικροσκοπικές αναλύσεις διαπιστώθηκε ότι μία κοιλότητα διέθετε τέσσερα είδη τουρμαλίνη: schorl, elbaite, rossmanite, and foitite αποτελώντας την πρώτη καταγεγραμμένη εμφάνιση στην Βόρεια Αμερική και των τεσσάρων εντός μίας μόνο κοιλότητας (Falster et al. 2005).

### **7.3. Πηγματίτες της Βραζιλίας (Minas Gerais)**

Τα κυριότερα ορυχεία τουρμαλίνη της Βραζιλίας εντοπίζονται στη νοτιοανατολική περιοχή Minas Gerais, στην ευρεία περιοχή που περιβάλλει την πρωτεύουσα των πολύτιμων λίθων, Governador Valadares και η οποία περιλαμβάνει τα ορυχεία Cruzeiro, Golconda, Santa Rosa, and Jonas. Αυτά αποτελούν πηγή για εκατομμύρια καράτια μπλε, πράσινων, κόκκινων και πολυχρωματισμένων κρυστάλλων τουρμαλίνη (Proctor 1985).

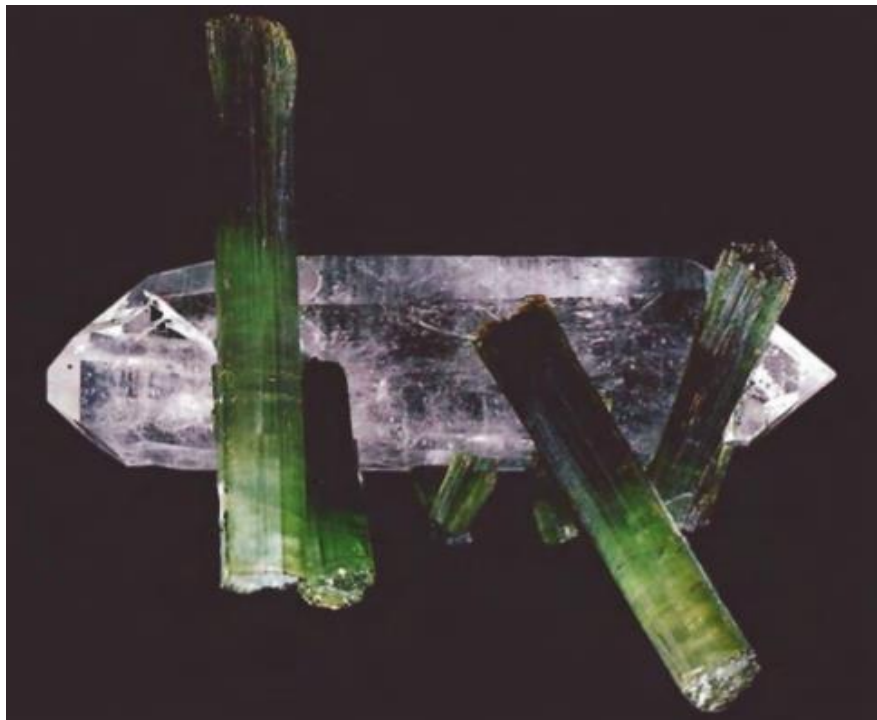
#### **7.3.1. Τα πηγματιτικά κοιτάσματα της περιοχής Cruzeiro**

Αυτά τα κοιτάσματα είναι από τους μεγαλύτερους και πιο συνεχείς παραγωγούς τουρμαλίνη στον κόσμο και ιδίως πράσινης ποικιλίας τουρμαλίνη. Εξαιτίας της αφθονίας αυτών σε μαρμαρυγίες, οι εξορυκτικές διαδικασίες στην περιοχή άρχισαν κατά την εποχή του Α' Παγκοσμίου Πολέμου. Μέγιστη παραγωγή μαρμαρυγιών υπήρξε κατά την διάρκεια του Β' Παγκοσμίου Πολέμου όταν το 12% της παραγωγής μαρμαρυγιών στην Βραζιλία είχε προέλευση από την περιοχή Cruzeiro. Ακόμα και σήμερα μάλιστα όπου η περιοχή είναι ευρέως γνωστή προς εκμετάλλευση πολύτιμων λίθων οι εξορυκτικές δαπάνες καλύπτονται χάρη στην παραγωγή των μαρμαρυγιών. Η επανεκκίνηση των εξορύξεων και επαναλειτουργία των ορυχείων μετά το τέλος του πολέμου οφείλεται στην ανακάλυψη των μεγάλου μεγέθους καλοσηματισμένων κρυστάλλων τουρμαλίνη την δεκαετία του 1950. Υπάρχουν τρία επιμέρους παραγωγικά πηγματιτικά σώματα με πρώτηστη παραγωγική σημασία το πρώτο εκ των οποίων. Τα τρία αυτά φλεβικού τύπου σώματα διασχίζουν χαλαζίτη και μαρμαρυγιάκό σχιστόλιθο.

Οι πηγματίτες έχουν την κλασική ζωνώδη διάταξη με τους πολύτιμους λίθους να συσσωρεύονται στην ενδιάμεση ζώνη κατά κύριο λόγο. Οι κοιλότητες περιέχουν εξαιρετικούς κρυστάλλους τουρμαλίνη και σποραδικά 1-m-μήκος εξαλλοιωμένους κρυστάλλους σποδομένη. Εντοπίζονται αδιαφανείς έως διαυγείς πράσινοι, πρασινο-μπλέ, ροζ κρύσταλλοι τουρμαλίνη είτε με μορφή συσσωματωμάτων είτε ως μεμονωμένοι κρύσταλλοι. Οι μεταλλωρύχοι χρησιμοποιούν ως ένδειξη ότι προσεγγίζουν το κοιτάσμα

εντός κάποιας κοιλότητας την εύρεση ελασματοειδούς αλβίτη, λεπιδόλιθου συσχετιζόμενου με μαύρο τουρμαλίνη καθώς και σκουρόχρωμων επιστρώσεων σιδηρο-μαγγανιούχων οξειδίων ή φωσφορικών στους χαλαζίες ή άλλα ορυκτά. Δεν υπάρχει αντίστοιχη συσχέτιση εύρεσης τουρμαλίνη με μικροκλινή. Κατά μήκος της πηγματιτικής περιοχής κυρίως χρησιμοποιείται η μέθοδος εξόρυξης μέσω διάνοιξης σηράγγων-στοών αλλά επιπλέον εφαρμόζεται και η μέθοδος της ανοικτής οπής στα πιο πλατιά τμήματα των φλεβών.

Η περιοχή είναι δημοφιλής καθώς παρέχει υψηλής ποιότητας κρυστάλλους τουρμαλίνη, καλοσχηματισμένους μπλε-πράσινους, ροζ, σμαραγδοπράσινους που καλούνται χρωμολίτες και μπλε που ονομάζονται indigolite ή indigolite από την λέξη indigo που σημαίνει μπλε στα πορτογαλικά. Επίσης εμφανίζονται και εξαιρετικοί ερυθροί τουρμαλίτες όπως προαναφέρθηκε που ονομάζονται rubellites. Αξιοπρόσεκτοι είναι οι πράσινοι-ροζ δίχρωμοι πολύτιμοι λίθοι γνωστοί ως τύπου “καρπούζι” (“watermelon”). Θεωρείται η επικείμενη περιοχή ως η πιο συνεχής σε παραγωγή περιοχή της Βραζιλίας βάση της διαθεσιμότητας σε πολύτιμους λίθους. Στο σχήμα 12 παρατηρούνται χαρακτηριστικοί κρύσταλλοι πράσινου τουρμαλίνη της περιοχής (Proctor 1985).



Σχήμα 12: Επιμηκυσμένοι πράσινοι κρύσταλλοι τουρμαλίνη και χαλαζία (16 cm πλάτος x 12 cm ύψος), Proctor (1985).

### 7.3.2. Golconda region

Υπάρχουν τρία ορυχεία οικονομικής σπουδαιότητας, με τα δύο νεότερα γνωστά για την παραγωγή κάποιων από τα καλύτερης ποιότητας πράσινων και μπλε τουρμαλινών καθώς και αξιοσημείωτων δίχρωμων κρυστάλλων. Τα Golconda II και I αποτελούν πολύ μεγάλο μεγέθους πηγματιτικά σώματα. Εξαιτίας του πολύ υψηλής ποιότητας διαγούς μπλε χρώματος των κρυστάλλων στο Golconda II αυτό καθίσταται ως η σημαντικότερη πηγή σε indigolite (μπλε ποικιλία τουρμαλίνη). Το πιο φημισμένο ως προς την εκμεταλλευσιμότητα σε κρυστάλλους τουρμαλίνη είναι το κοίτασμα Golconda III που εδράζει σε πρανές. Είναι ενδιαφέρον να αναφερθεί ότι εν έτη 1961 μία τεραστίων διαστάσεων κοιλότητα ευρισκόμενη σε αυτό το πηγματιτικό σώμα διέθετε 900 kg των πιο εκλεκτών σμαραγδοπράσινων κρυστάλλων τουρμαλίνη ανακαλυφθέντων στην Βραζιλία. Μάλιστα συνέβαλλαν στην δημιουργία προτύπων όσο αναφορά την διαύγεια και το χρώμα που λαμβάνονται υπόψιν για πράσινους κρυστάλλους τουρμαλίνη από τους εμπόρους της Βραζιλίας.

Χαρακτηριστική εικόνα κρυστάλλων στο Golconda III είναι οι ροζ κρύσταλλοι τουρμαλίνη που μετασχηματίζονται σε πράσινοι σποραδικά μέσα σε μήτρα αποτελούμενη από cookeite όπως φαίνεται και στο σχήμα 13 (Proctor 1985).



Σχήμα 13: Δίχρωμοι κρύσταλλοι τουρμαλίνη του Golconda III (Proctor 1985).



Ως προς την παραγωγή πολύτιμων λίθων το Golconda II σε σύγκριση με το προγενέστερο υστερεί ωστόσο έχει παρέχει επανειλημμένα μικρές ποσότητες καλής ποιότητας πράσινων, πρασινο-μπλε και ερυθρών κρυστάλλων. Αυτό δε, είναι ευρέως γνωστό από τις περιστασιακές κοιλότητες που έχουν φιλοξενήσει κάποιους από τα καλύτερης ποιότητας τουρμαλίνες σε μπλε του ζαφειριού απόχρωση στην ευρύτερη περιοχή της Βραζιλίας (Proctor 1985).

### 7.3.3. Santa Rosa region

Όπως και τα προηγούμενα ορυχεία αρχικά λειτούργησε προς εκμετάλλευση μαρμαρυγιών. Βρίσκεται σε δύσβατη περιοχή και ιδίως σε εποχές βροχών καθίσταται δυσχερής η λειτουργία του ορυχείου. Η αποσάθρωση είναι πολύ έντονη στη συγκεκριμένη περιοχή με έντονη αποσύνθεση των πετρωμάτων κοντά στην επιφάνεια και οι στοές πρόσβασης δεν είναι πολύ ασφαλείς. Η περιοχή είναι πηγή ερυθρών-ροζ κρυστάλλων εξίσου καλής ποιότητας με αυτούς του Golconda αλλά κυρίως διακρίνεται για τους εξαιρετικούς κρυστάλλους τουρμαλίνη τύπου "watermelon" μήκους 10-25cm που συνίστανται από ροζ πυρήνα περιβαλλόμενο από εξαιρετικής ποιότητας πράσινο κρυσταλλικό περίβλημα τουρμαλίνη όπως διαφαίνεται προσεχώς στο σχήμα 14 (Proctor 1985).



Σχήμα 15: Κρύσταλλος τουρμαλίνη τύπου «watermelon» διαστάσεων 10 cm x 1.25 cm μέσα σε χαλαζία (Proctor 1985).



Οι Jonas πηγματίτες στην Conselheiro Pena περιοχή της Βραζιλίας διαθέτουν κοιλότητα διαστάσεων 2 m μήκους × 2.5 m πλάτους × 3 m ύψους που συνίσταται από 3.6 τόνους υψηλής ποιότητας ερυθρών κρυστάλλων elbaite (rubellite). Αυτοί οι πηγματίτες οδήγησαν σε παραγωγή πάνω από 200 κιλά πολυτίμων λίθων που προάγονται για επεξεργασία και κοπή καθώς επίσης και δύο από τους καλύτερους παγκοσμίως ειδών κρυστάλλων ρουβλίτη, γνωστοί ως "Rocket" και "Jonina" (Cornejo and Bartorelli 2010). Αυτοί οι κρύσταλλοι πουλήθηκαν για περίπου ένα εκατομμύριο δολάρια ο καθένας το 1978 (Beurlen et al. 2012).

Αποτελεί το πιο πρόσφατα ανακαλυφθέν πηγματιτικό κοίτασμα πολύτιμων λίθων. Το 1978 βρέθηκε ένας τεράστιος σχεδόν απεγάδιαστος κρύσταλλος rubellite και αποκαλύφθηκε η τεράστια προαναφερθείσα κοιλότητα με αφθονία κρυστάλλων rubellite. Η κοιλότητα καταλαμβάνεται από κρυστάλλους rubellite διεσπαρμένο μαζί με λευκούς αλβίτες, διαφανείς χαλαζίες και ροζ λεπιδόλιθο που φέρει λίθιο.

Κάποιοι rubellites ήταν μάλιστα διπλά περατωμένοι, στοιχείο σπάνιο σε εμφάνιση. Επιπλέον, η εν λόγω κοιλότητα ήταν καθαρή και δεν υφίστανται κάποια χημική εξαλλοίωση και μάλιστα οι κρύσταλλοι ήταν τόσο καθαροί που πρακτικά δεν χρειάζονταν κάποιο είδος καθαρισμού. Αυτή η κοιλότητα έχει μείνει γνωστή με το όνομα bamburrío (jackpot) rocket και το πρωτοφανές είδος κρυστάλλων ως Joninha ("small Jonas," after Jonas's young son) που συνίστανται από δύο γιγαντιαίους κρυστάλλους rubellite 50 x 25 cm and 25 x 30 cm αναπτυγμένοι με δύο κρυστάλλους χαλαζία 20 cm and 45 cm μήκους. Αυτοί επίσης επικαλύπτονται με αλβίτη.

Επίσης βρέθηκε ο μεγαλύτερος ως τώρα γνωστός κρύσταλλος rubellite διαρρηγμένος σε τρία κομμάτια που έπειτα από συγκόλληση έφτανε τα 107 cm και με βάρος περί των 135 kg, επονομαζόμενος ως Rocket και παρατίθενται στο σχήμα 15 (Proctor 1985).

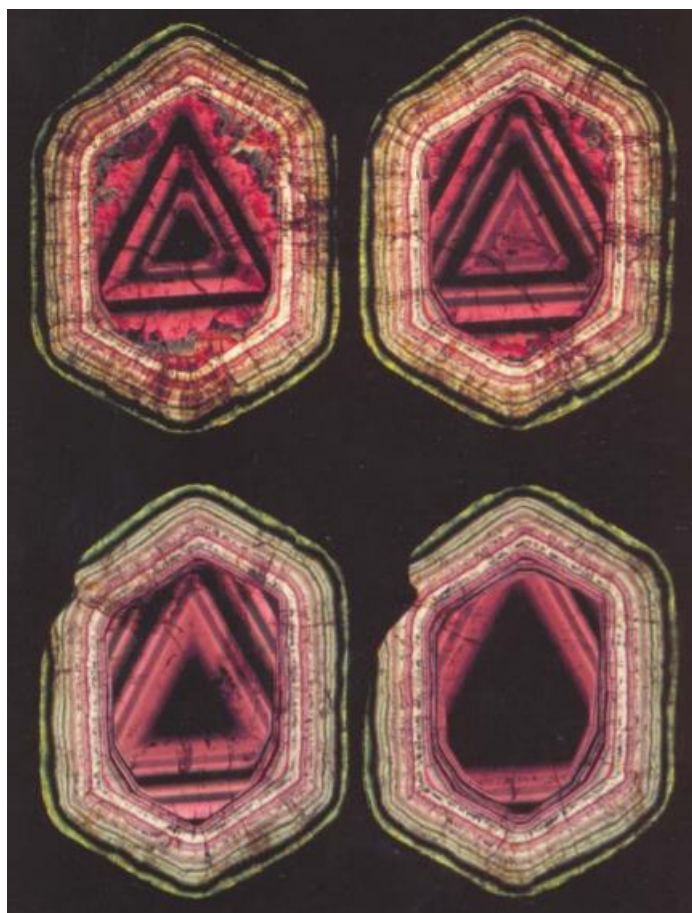


Σχήμα 15: Κρύσταλλος rubellite (Rocket) 107cm Proctor (1985).

Όλοι οι κρύσταλλοι εξήχθησαν από την κοιλότητα μόλις σε διάρκεια οκτώ ημερών. Μετά από το πέρας ενός χρόνου από την ανακάλυψη αυτής της αξιοσημείωτης κοιλότητας βρέθηκε και μία ακόμα άξιου ενδιαφέροντος από άλλη δίοδο πρόσβασης του πηγματιτικού σώματος βρίσκοντας το λεγόμενο beautiful Rose of Itatiaia. Αυτός ο 35 cm μήκους, 12 cm πλάτους κρύσταλλος rubellite περιβάλλεται από αλβιτικούς κρυστάλλους. Αξίζει να σημειωθεί ότι στο πηγματιτικό σώμα επίσης εντοπίζονταν γωνιώδεις κρύσταλλοι κασσιτερίτη, ροζ απατίτη καθώς συχνά και μικροκρύσταλλοι μοναζίτη (Proctor 1985).

#### 7.4. Πηγματίτες Μαδαγασκάρης (Anjanabonoina)

Τεράστιοι, πρισματικοί πολυχρωματικοί κρύσταλλοι liddicoatite άνω του ενός μέτρου μήκους βρέθηκαν στην Fianarantsoa region and at Anjanabonoina (Betafo, Antananarivo region) στην Μαδαγασκάρη. Ο liddicoatite είναι ένα πλούσιο σε ασβέστιο λιθιούχο είδος τουρμαλίνη με ιδιαίτερα χαρακτηριστικά την πολύπλοκη χρωματική ζώνωση και τα διάφορα γεωμετρικά μοτίβα, τις διακλάσεις, τις υφές μορφής φτερών ή βελόνων καθώς επίσης και την ύπαρξη αλβιτικών εγκλεισμάτων. Τα γεωμετρικά πρότυπα-μοτίβα που εμφανίζονται στις πολύχρωμες επιφάνειες αποτέλεσμα κοπής κάθετα στον c-άξονα και οι τριγωνικές ζώνες του liddicoatite της Μαδαγασκάρης τον καθιστούν μοναδικό σε εμφάνιση από κάθε άλλο κρύσταλλο που έχει βρεθεί σε άλλες τοποθεσίες. Η ιδιαιτερότητα των κρυστάλλων διακρίνεται και στο σχήμα 16 (Dirlam et al. 2002).



Σχήμα 16: Κομμένες επιφάνειες από μονοκρύσταλλο τουρμαλίνη (Anjanabonoina) με ευκρινή την δραματική πρόοδο στην χρωματική ζώνωση κάθετα στον c-άξονα (Dirlam et al.2002).

Οι εντατικές εξορυκτικές διαδικασίες άρχισαν την εποχή του 1900 ωστόσο εξοφλώντας μόνο το ελλουβιακό μέρος του κοιτάσματος. Τα πηγματιτικά κοιτάσματα πολύτιμων λίθων της περιοχής φιλοξενούνται από πετρώματα του Itremo Group, σε μια τεκτονική ενότητα γνωστή ως Itremo thrust sheet. Αυτή η ομάδα διακρίνεται σε μία κατώτερη ενότητα γνευσίων και μία ανώτερη ενότητα χαλαζιτών, σχιστολίθων και μαρμάρων όπου και οι δύο διακόπτονται από πηγματιτικά σώματα που διαμορφώθηκαν μέσω κλασματικής κρυστάλλωσης γρανιτικών πλουτωνιτών σε μικρά βάθη.

Οι πηγματιτικές φλέβες της εκάστοτε περιοχής φαίνεται να κατανέμονται στην επαφή μεταξύ των δύο προαναφερθέντων ενοτήτων του Itremo Group και κυρίως περιβάλλονται από πετρώματα της δεύτερης. Παρατηρούνται έντονα φαινόμενα καολινίωσης ενώ τα πετρώματα είναι και ισχυρά αποσαθρωμένα σε βάθη μεγαλύτερα των 20 m κυρίως στο νοτιότερο μέρος της εξορυσσόμενης περιοχής όπου εντοπίζονται τα ελουβιακά κοιτάσματα.

Οι κοιλότητες είναι αρκετά σπάνιες αλλά όπου εμφανίζονται είναι μεγάλες σε μέγεθος και περιέχουν συσσωματώματα χαλαζία, μικροκλινή αστρίου, αλβίτη, dravite-elbaite-liddicoatite τουρμαλίνη, σποδομένη, αυτοφύες βισμούθιο, σπεσσαρτίνη, βήρυλλο (μοργκανίτη) κ.ά. Οι κρύσταλλοι τουρμαλίνη είναι κατά κύριο λόγο μεγάλου μεγέθους και διακρίνεται μια εξωτερική μαύρη επίστρωση. Αξίζει να αναφερθεί ότι ο liddicoatite έχει παρόμοιες οπτικές ιδιότητες με αυτές ενός elbaite και για τη διάκριση αυτών απαιτείται ποσοτική χημική ανάλυση (Dirlam et al. 2002).

## **7.5. Αφγανιστάν (The Hindu Kush gem-producing areas)**

Το Αφγανιστάν διαθέτει σημαντικές ποσότητες υψηλής ποιότητας σμαραγδιών, τουρμαλίνη, κουνζίτη (ροζ ποικιλία σποδομένη) καθώς και ρουμπινιών. Ειδικότερα, τα σμαράγδια κυρίως προέρχονται από την Panjshir Valley, βόρεια της Kabul. Πληθώρα πράσινων, ροζ και μπλε κρυστάλλων τουρμαλίνη καθώς επίσης και ποσότητες κουνζίτη, ακουαμαρίνας έχουν ανακαλυφθεί σε πηγματίτες της περιοχής Nuristan, ανατολικά του Panjshir. Τα ορυχεία που πρόσφατα έκαναν εξορύξεις εντοπίζονται στο βορειοανατολικό τμήμα της χώρας, βόρεια και ανατολικά της Kabul, την πρωτεύουσα. Η τοπογραφία της περιοχής αντιπροσωπεύεται από το ορεογραφικό σύστημα Hindu Kush. Το οδικό δίκτυο είναι περιορισμένο και πολλές περιοχές είναι δυσπρόσιτες. Ωστόσο, τόσο το Hindu Kush range και το Karakoram range στο Pakistan αποτελούν πηγές θεαματικών ευρημάτων πολύτιμων λίθων τα τελευταία 15 χρόνια.



Σημαντικά ευρήματα τουρμαλίνη, βηρύλλου, κορουνδίου και άλλων πολύτιμων λίθων έχουν γίνει στο Πακιστάν στην Gilgit area (Kazni et al. 1985), στην Swat and Hunza valleys βορειοανατολικά της Peshawar (Gübelin 1982), και στο Kashmir (Atkinson and Kothavala 1983). Αυτές οι περιοχές του Πακιστάν και Αφγανιστάν εδράζουν σε μία από τις πιο γεωλογικά δυναμικές περιοχές του κόσμου στην ραφή κατά μήκος της οποίας η Ινδο-Πακιστανική και Ασιατική ηπειρωτικές πλάκες συγκρούονται προς σχηματισμό των Ιμαλαΐων. Έχει προταθεί ότι οι περιοχές του Πακιστάν και του Αφγανιστάν καθώς και άλλες αποτελούν πρακτικά μέρος μιας μεγαλύτερης “Νότιο-Ασιατικής” πηγματιτικής ζώνης που φέρει πολύτιμους λίθους.

Παρόλο που φαινομενικά οι εξορύξεις θεωρούνται υπό την δικαιοδοσία της κυβέρνησης, η μεταλλευτική δραστηριότητα και η πώληση διευθετείται από ανεξάρτητους μεταλλωρύχους. Αμέσως μετά την εξόρυξη οι κρύσταλλοι αφγανικής προέλευσης που δεν έχουν υποστεί ακόμα την διεργασία της κοπής εισάγονται λαθραία πέρα από τα σύνορα και προς το Πακιστάν (Bowersox 1985).

### 7.5.1. The Panjshir Emeralds

Η λειτουργία των μεταλλευτικών εργασιών εντοπίζεται στην περιοχή της Panjshir Valley και βρίσκεται κατά μήκος των νότιων πρανών του Hindu Kush, περιλαμβάνοντας έξι ενεργά-παραγωγικά ορυχεία. Τα σμαράγδια εμφανίζονται σε υψόμετρα 3000-4000 m με αποτέλεσμα οι μεταλλωρύχοι να διασχίζουν τα απότομα πρανή (30° με 40° γωνία κλίσης) με τα πόδια για να αποκτήσουν πρόσβαση σε αυτά. Η περιοχή προς εκμετάλλευση έχει δεχθεί αποδοτικές εξορυκτικές εργασίες κυρίως τα τελευταία δέκα χρόνια. Οι κρύσταλλοι των σμαραγδιών εμφανίζονται τοποθετημένοι κατά μήκος θέσεων μικρών αντικαταστάσεων ή σε διεισδυτικές φλέβες. Αυτές οι φλέβες περιέχουν ορυκτολογικά κυρίως χαλαζία και αλβίτη και συσχετίζονται με ένα πυριγενές διεισδυτικό σώμα που χαρακτηρίζεται ως χαλαζιό-αστριούχος πορφύρης.

Τα πετρώματα ξενιστές ποικίλλουν από μεταμορφωμένους ασβεστολίθους, ασβεστιτικούς σχιστολίθους, φυλλίτες και μέχρι μαρμαρυγιακούς σχιστολίθους. Ως ένδειξη προς εμφάνιση σμαραγδιών λαμβάνεται υπόψιν η ύπαρξη σιδηροπυρίτη. Επιπλέον, τα σμαράγδια θεωρούνται υδροθερμικής προέλευσης λόγω χημικής αντίδρασης που έλαβε χώρα μεταξύ των διαλυμάτων εντός των φλεβών με τα περιβάλλοντα πετρώματα. Μετά από την χρήση δυναμίτη για την εύρεση της θέσης των πολύτιμων κρυστάλλων εντός των

πετρωμάτων ξενιστών, διανοίχθηκαν επιφανειακές οπές για την διαλογή των δειγμάτων μεμονωμένα με προσοχή. Έπεται φωτογραφία ενδεικτικών κρυστάλλων σμαραγδιών στο σχήμα 17 (Bowersox 1985).



Σχήμα 17: Δείγματα σμαραγδιών που βρέθηκαν στην περιοχή της Panjshir Valley.

<https://www.irocks.com>

### 7.5.2. Paprok mine (Nuristan, Afghanistan)

Εντοπίζεται παρόμοια ορυκτολογική παραγένεση στο Hindu Kush και περιοχή Nuristan με αυτή στους πηγματίτες της Βραζιλίας δηλαδή “watermelon” tourmaline (τύπου “καρπούζι” τουρμαλίνης) και ακουαμαρίνα (Schumann 1997). Ακολουθεί αντίστοιχη φωτογραφία στο σχήμα 18. Οι πηγματίτες είναι εμπλουτισμένοι σε Li, Be και REE συνιστώντας έτσι την πηγή για τους πολύτιμους λίθους. Τα μεγάλα πηγματιτικά σώματα που είναι εμπλουτισμένα σε REL-Li βρίσκονται στην Nuristan Central Massif με πολύ γνωστό το ορυχείο Paprok. Σε αυτό είναι δυνατή η εύρεση υψηλής ποιότητας τουρμαλίνη σε πολλές αποχρώσεις σε παραγένεση με cleavelandite (λευκή ελασματοειδής ποικιλία αλβίτη), σκουρόχρωμο τοπάζιο, μοσχοβίτη, βήρυλλο και λεπιδόλιθο. Έχουν ανακτηθεί διαφανείς



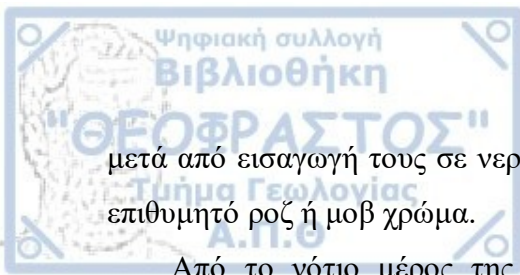
κρύσταλλοι τουρμαλίνη και μάλιστα κάποιοι που φτάνουν τα 40 cm σε μήκος και 5 cm σε διάμετρο. Ως επί το πλείστον αυτοί είναι πράσινοι ενώ ροζ και πολύχρωμοι “watermelon” καθώς επίσης κόκκινοι κρύσταλλοι με το ανώτερο τμήμα τους σε πράσινη ή μαύρη απόχρωση υπάρχουν δευτερευόντως (Dumańska-Słowik et al. 2009).



Σχήμα 19: Κρύσταλλος aquamarine (Nuristan region) Bowersox (1985).

### 7.5.3. Σποδουμένης (Nuristan region)

Οι κρύσταλλοι σποδουμένη είναι αντιπροσωπευτικοί από τους καλύτερης ποιότητας που έχουν ποτέ βρεθεί. Διαπιστώθηκε ότι οι κρύσταλλοι αυτοί εμφάνιζαν ένα είδος ροζ φθορισμού έπειτα από έκθεση σε μικρού μήκους υπεριώδη ακτινοβολία. Επιπλέον, τα περισσότερα θραύσματα σποδουμένη εμφανίζουν αναστρέψιμο φωτοχρωμισμό (αλλαγή χρώματος υπό το φως του ηλίου που μπορεί να συνεχιστεί επ 'αόριστον και καταστρέφεται με θέρμανση). Τα χρώματα οφείλονται στην παρουσία ιχνοστοιχείων όπως μαγγανίου και σιδήρου. Οι εξορυσσόμενοι κρύσταλλοι κατά την εξαγωγή τους από το έδαφος έχουν μία μπλε-βιολετί ή πράσινη απόχρωση ένδειξη που προϋποθέτει ότι οι κρύσταλλοι έχουν εκτεθεί σε κάποια πηγή ακτινοβολίας. Με έκθεση των κρυστάλλων στον ήλιο για αρκετές μέρες και



μετά από εισαγωγή τους σε νερό που υπόκεινται βρασμό, αυτοί μπορούν να αποκτήσουν το επιθυμητό ροζ ή μοβ χρώμα.

Από το νότιο μέρος της περιοχής Sorobi έχουν εξορυχθεί πολύ καλής ποιότητας ρουμπίνια και το κοίτασμα είναι γνωστό με την ονομασία Jegdalek mine. Οι κρύσταλλοι των ρουμπινιών βρίσκονται συνήθως επιτόπου σε μάρμαρα που διακόπτονται από γρανιτικές διεισδύσεις. Το χρώμα τους κυμαίνεται από μωβ-κόκκινο σε βαθύ "pigeon's blood" red (κόκκινο-αιματέρυθρο του περιστεριού). Το πιο ενδιαφέρον χαρακτηριστικό σε κάποιους από τους κρυστάλλους είναι μία έντονη μπλε ζώνωση που παρατηρήθηκε εντός αυτών.

Τέλος αξίζει να ειπωθεί ότι σημειώνεται και ένα κοίτασμα γρανατών στην Pachighram, in Nangarhar Province όπου καλοσηματισμένοι βαθύ-κόκκινοι κρύσταλλοι αλμανδίνη βρίσκονται μέσα σε σχιστολίθους. Ακόμα, μικρές ποσότητες ακουαμαρίνας παρατηρούνται στην περιοχή Gur Salak, in Konar Province καθώς επίσης ανακαλύφθηκαν και λίγοι κρύσταλλοι μοργκανίτη σε ροζ χρώμα, ροζ με καστανή χροιά αλλά και ροδακινή απόχρωση (Bowersox 1985).



## 8. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Atkinson, D., & Kothavala, R. Z. (1983). Kashmir sapphire.
- Bowersox, G. W. (1985). A status report on gemstones from Afghanistan. *Gems & Gemology*, 21(4), 192-204.
- Cartier, L. E. (2019). Gemstones and sustainable development: Perspectives and trends in mining, processing and trade of precious stones. *The Extractive Industries and Society*, 6(4), 1013-1016.
- Cerny, P. (2000). Constitution, petrology, affiliations and categories of miarolitic pegmatites. *Memorie Della Societa Italiana Scienze Naturalie Del Museo Civico di Storia Naturale Milano*, 5-12.
- Černý, P., Meintzer, R.E., Anderson, A.J. (1985) Extreme fractionation in rare-element granitic pegmatites: selected examples of data and mechanisms. *Canadian Mineralogist*, 23, 381-421.
- Cornejo, C., & Bartorelli, A. (2010). Minerals & precious stones of Brazil (p. 704). Solaris Cultural Productions.
- Dirlam, D. M., Laurs, B. M., Pezzotta, F., & Simmons, W. B. (2002). Liddicoatite tourmaline from Anjanabonoina, Madagascar. *Gems & Gemology*, 38(1), 28-53.
- Fraser, H. J. (1930). Paragenesis of the Newry pegmatite, Maine. *American Mineralogist: Journal of Earth and Planetary Materials*, 15(8), 349-364.
- Fritsch, E., & Rondeau, B. (2009). Gemology: The developing science of gems. *Elements*, 5(3), 147-152.
- Groat, L. A., & Laurs, B. M. (2009). Gem formation, production, and exploration: Why gem deposits are rare and what is being done to find them. *Elements*, 5(3), 153-158.
- Groat, L. A., Giuliani, G., Marshall, D. D., & Turner, D. (2008). Emerald deposits and occurrences: A review. *Ore Geology Reviews*, 34(1-2), 87-112.
- Gübelin, E. J. (1982). Gemstones of Pakistan: emerald, ruby, and spinel. *Gems & Gemology*, 18(3), 123.
- Heinrich, E. W. (1953). Zoning in pegmatite districts. *American Mineralogist: Journal of Earth and Planetary Materials*, 38(1-2), 68-87.
- Jahns, R. H., & Burnham, C. W. (1969). Experimental studies of pegmatite genesis; I, A model for the derivation and crystallization of granitic pegmatites. *Economic Geology*, 64(8), 843-864.

- Kazmi, A. H., Peters, J. J., & Obodda, H. P. (1985). Gem pegmatites of the Shingus-Dusso area, Gilgit, Pakistan. *Mineralogical Record*, 16(5), 393-411.
- London, D. (2018). Ore-forming processes within granitic pegmatites. *Ore Geology Reviews*, 101, 349-383.
- Michallik, R. M., Wagner, T., Fusswinkel, T., Heinonen, J. S., & Heikkilä, P. (2017). Chemical evolution and origin of the Luumäki gem beryl pegmatite: Constraints from mineral trace element chemistry and fractionation modeling. *Lithos*, 274, 147-168.
- Natkaniec-Nowak, L., Dumańska-Słowik, M., & Ertl, A. (2009). "Watermelon" tourmaline from the Paprok mine (Nuristan, Afghanistan). *Neues Jahrbuch für Mineralogie-Abhandlungen: Journal of Mineralogy and Geochemistry*, 186(2), 185-193.
- Proctor, K. (1985). Gem pegmatites of Minas Gerais, Brazil: The tourmalines of the Governador Valadares District. *Gems and Gemology*, Summer 1985.
- Renneboog, L., & Spaenjers, C. (2012). Hard assets: The returns on rare diamonds and gems. *Finance Research Letters*, 9(4), 220-230.
- Research, 100B, 5911-5929.
- Rubin, A.M. (1995) Getting granite dikes out of the source region. *Journal of Geophysical*
- Schumann, W. (2009). *Gemstones of the World*. Sterling Publishing Company, Inc.
- Schwarz, D., Giuliani, G., Grundmann, G., & Glas, M. (2002). The origin of emerald: a controversial topic.
- Simmons, W. (2003). *Pegmatology: Pegmatite mineralogy, petrology and petrogenesis*. Rubellite Press.
- Simmons, W. B., Freeman, G., Falster, A., Laurs, B., & Webber, K. (2005). New tourmaline production: From Mount Mica, Maine America's First gem pegmatite. *Rocks & Minerals*, 80(6), 396-408.
- Simmons, W. B., Pezzotta, F., Shigley, J. E., & Beurlen, H. (2012). Granitic pegmatites as sources of colored gemstones. *Elements*, 8(4), 281-287.
- White, E. A. D. (1961). Synthetic gemstones. *Quarterly Reviews, Chemical Society*, 15(1), 1-29.
- Zwaan, J. H., Seifert, A. V., Vrána, S., Laurs, B. M., Anckar, B., Simmons, W. B. S.,... & Garcia-Guillerminet, H. (2005). KAFUBU AREA, ZAMBIA. *Gems & Gemology*, 41(2), 116-148.



Hobart M. King, Ph.D., GIA Graduate Gemologist, “Ruby and Sapphire. Red corundums are rubies. Blue corundums are sapphires. Trace elements produce their colors.”

<https://geology.com/gemstones/ruby-and-sapphire/>

Hobart M. King, Ph.D., GIA Graduate Gemologist, “Diamond. The most popular gemstone. The hardest known substance. An amazing number of uses.”

<https://geology.com/minerals/diamond.shtml>

Hobart M. King, Ph.D., GIA Graduate Gemologist. “Emerald, The bright green gem of the beryl mineral family and May birthstone.”

<https://geology.com/gemstones/emerald/>

<https://www.irocks.com/>