



ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ
ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ
ΤΟΜΕΑΣ ΟΡΥΚΤΟΛΟΓΙΑΣ - ΠΕΤΡΟΛΟΓΙΑΣ -
ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΟΛΟΓΙΑΣ



ΓΚΙΛΟΥ ΘΕΟΦΑΝΗΣ

ΓΡΑΝΟΥΛΙΤΕΣ: ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΓΕΝΕΣΗΣ - ΠΑΡΑΓΕΝΕΣΕΙΣ -
ΓΕΩΤΕΚΤΟΝΙΚΑ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΑ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ



ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ
2022



ΓΚΙΛΟΥ ΘΕΟΦΑΝΗΣ

Φοιτητής Τμήματος Γεωλογίας, ΑΕΜ: 5294

ΓΡΑΝΟΥΛΙΤΕΣ: ΣΥΝΘΗΚΕΣ - ΠΑΡΑΓΕΝΕΣΕΙΣ- ΓΕΩΤΕΚΤΟΝΙΚΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ

Υποβλήθηκε στο Τμήμα Γεωλογίας, Τομέα Ορυκτολογίας - Πετρολογίας -
Κοιτασματολογίας

Επιβλέπουσα καθηγήτρια

Παπαδοπούλου Λαμπρινή

Αναπληρώτρια Καθηγήτρια, Τομέας Ορυκτολογίας - Πετρολογίας -
Κοιτασματολογίας



© Θεοφάνης Γκίλου, Τμήμα Γεωλογίας Α.Π.Θ., Τομέας Ορυκτολογίας-Πετρολογίας-Κοιτασματολογίας, 2023
Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος.

Γρανουλίτες: Συνθήκες-Παραγενέσεις-Γεωτεκτονικό Περιβάλλον – *Διπλωματική Εργασία*

© Theofanis Gkilou, School of Geology, Dept. of Mineralogy-Petrology-Economic Geology, 2023
All rights reserved.

Granulites: Metamorphic conditions- Mineral Paragenesis- Geotectonic Environment-
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

Πίνακας Περιεχομένων

Περίληψη	1
1. Εισαγωγή	2
1.1 Γρανουλιτες	2
2. Βασικοί Γρανουλιτες	4
2.1 Γενεση Βασικών Γρανουλιτών	4
2.2 Γρανουλιτική Φάση και Βασικοί Γρανουλίτες	6
3. Όξινοι Γρανουλίτες	11
3.1.1. Μιγματιτικά Γρανιτοειδή Πετρώματα και Σαρνοκίτες	11
3.1.2. Ζαφειρινικός Γρανουλίτης	14
3.2 Μεταπηλιτικοί Γρανουλίτες	18
4. Συνθήκες Γένεσης - Μεταμόρφωση Υπέρ-υψηλής Θερμοκρασίας (UHT) - Γεωτεκτονικά Περιβάλλοντα Γένεσης Γρανουλιτών	22
4.1 Συνθήκες Γένεσης	22
4.2 Μεταμόρφωση Υπέρ-υψηλής Θερμοκρασίας (UHT)	23
4.3 Γεωτεκτονικά Περιβάλλοντα Γένεσης Γρανουλιτών	25
5. Συμπεράσματα-Επίλογος	27
6. Βιβλιογραφία	28



Περίληψη

Οι γρανουλίτες είναι μια κατηγορία μεταμορφωμένων πετρωμάτων. Σε αυτά ανήκουν όλα τα πετρώματα που έχουν υποστεί μεταμόρφωση κάτω από υψηλές θερμοκρασίες και μέτρια πίεση, δηλαδή κατά τη γρανουλιτική φάση μεταμόρφωσης. Οι γρανουλίτες σχηματίζονται σε μεγάλα βάθη, συνήθως σε ορογενετικές ζώνες, σε σημεία όπου η θερμοβαθμίδα είναι συνήθως ανώτερη των 30°C/km. Η θερμοκρασία σχηματισμού τους είναι περίπου οι 700°C και η πίεση κυμαίνεται από 2 έως 15 kbar. Χωρίζονται σε 2 μεγάλες κατηγορίες, τους όξινους και τους βασικούς γρανουλίτες. Οι όξινοι γρανουλίτες προέρχονται από περιοχική πολύ υψηλού βαθμού μεταμόρφωση όξινων πυριγενών, αρκοζικών ή μαργαϊκών ιζηματογενών πετρωμάτων. Αποτελούνται κυρίως από καλιούχο άστροιο, πλαγιόκλαστο και χαλαζία. Οι βασικοί γρανουλίτες προέρχονται από πολύ υψηλού βαθμού μεταμόρφωση βασικών και ενδιάμεσων πυριγενών πετρωμάτων. Αποτελούνται κυρίως από αστρίους και άνυδρα σιδηρομαγνησιούχα ορυκτά, όπως οι πυρόξενοι. Οι γρανουλίτες έχουν γρανοβλαστικό ιστό και σε κάποιες περιπτώσεις εμφανίζουν γνευσιακή υφή. Έχουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον, καθώς πολλοί γρανουλίτες αντιπροσωπεύουν τμήματα του κατώτερου ηπειρωτικού φλοιού.



Abstract

Granulites are metamorphic rocks that have undergone metamorphism under high temperature and medium pressure conditions, in the granulite metamorphic phase. Granulites are formed in great depths, usually at orogenic zones, where the thermogradient is above 30°C/km. These rocks are formed at temperatures about 700°C and pressures that range from 2 to 15 kbar. They are distinguished into two categories, acid granulites and mafic granulites. Acid granulites derive from the regional high grade metamorphism of acid igneous rocks, arkoses or marls. They mainly contain K-feldspar, plagioclase and quartz. Mafic granulites derive from high grade metamorphism of basic and intermediate igneous rocks. Their mineralogy consists of feldspars and iron-magnesium minerals, like pyroxenes. Granulites have a granoblastic texture and in some cases, they exhibit a gneissic fabric. They are of great interest as they represent parts of the lower continental crust.

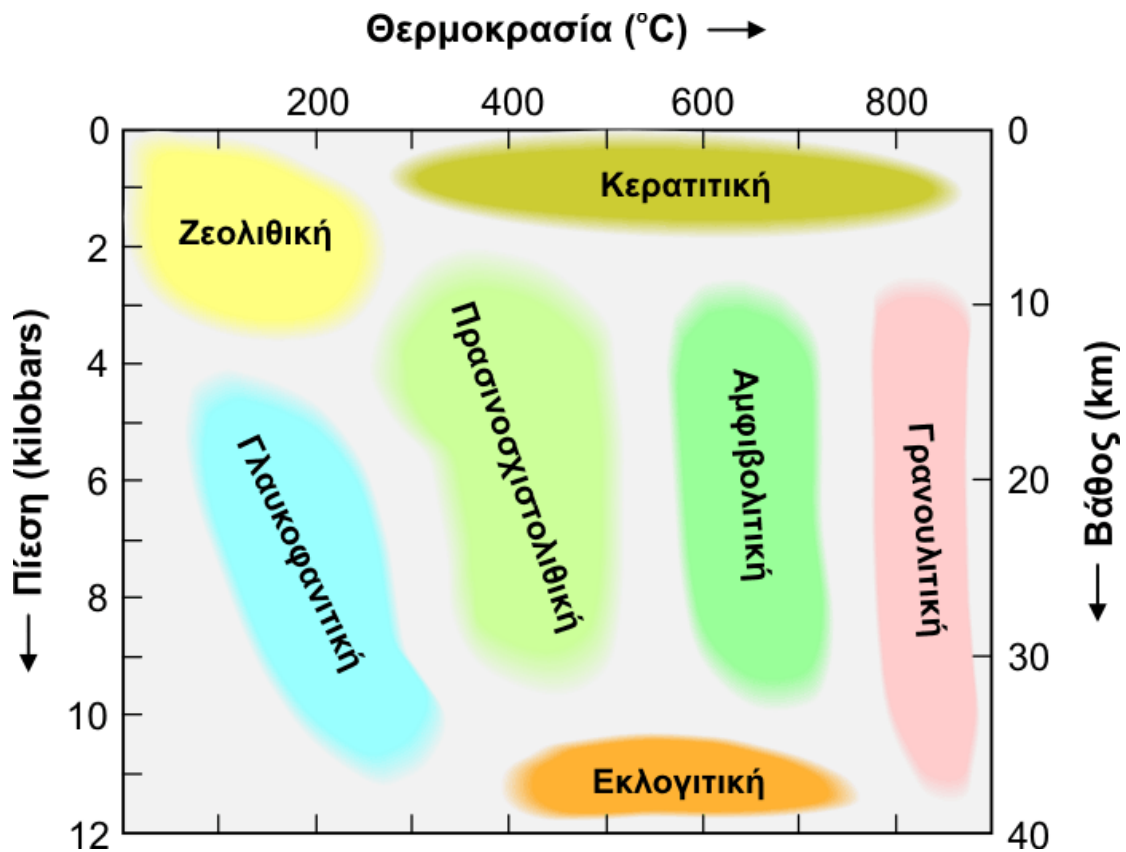
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Σύμφωνα με το (IUGS Subcommission on the Systematics of Metamorphic Rocks, 2007), "οι γρανουλίτες είναι υψηλής ποιότητας μεταμορφωμένα πετρώματα στα οποία τα σιδηρομαγνησιούχα πυριτικά ορυκτά είναι κατά κύριο λόγο απαλλαγμένα από υδροξύλια (αφυδατωμένα). Η παρουσία αστρίου και η απουσία πρωτογενούς μοσχοβίτη είναι κρίσιμες, και είναι πιθανό να υπάρχει και κορδιερίτης. Ως γρανουλίτες ορίζουμε όλα τα πετρώματα που σχηματίζονται κατά τη γρανουλιτική φάση μεταμόρφωσης. Πρόκειται για μεταμορφική φάση υψηλής θερμοκρασίας, με τη πίεση να κυμαίνεται από σχετικά μικρή έως αρκετά υψηλή. Η γρανουλιτική φάση μεταμόρφωσης εισήχθη από τον Eskola το 1939 με σκοπό να ορίσει τα υψηλού βαθμού μεταμόρφωσης πετρώματα που περιείχαν πυρόξενο αντί για ένυδρα σιδηρομαγνησιούχα ορυκτά. Οι παραγενέσεις των γρανουλιτών καθώς και η θερμοβαρομετρία δείχνουν ένα μεγάλο εύρος θερμοκρασιών, από περίπου 650 ως 900°C, μέχρι και 1050 °C . Η πίεση κυμαίνεται από 5 έως 12 kbar, κάτι που δείχνει βάθη 20-45 km (Harley, 1989, 1998). Διαχωρίζονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες, τους όξινους και τους βασικούς γρανουλίτες. Τα πετρώματα με >30% φεμικά ορυκτά (κυρίως πυροξένους) ονομάζονται μαφικοί (βασικοί) γρανουλίτες ενώ αυτά με <30% φεμικά ορυκτά ονομάζονται φελσικοί (όξινοι) γρανουλίτες. Η γρανουλιτική φάση μεταμόρφωσης μπορεί να διαιρεθεί σε 3 κατηγορίες:

- Γρανουλίτες χαμηλής πίεσης. Η τυπική παραγένεση είναι ορθοπυρόξενος + κλινοπυρόξενος + πλαγιόκλαστο. Στους μεταπηλίτες είναι κορδιερίτης ± γρανάτης ± ορθοπυρόξενος.
- Γρανουλίτες μέσης πίεσης. Η τυπική παραγένεση είναι γρανάτης + κλινοπυρόξενος + ορθοπυρόξενος + πλαγιόκλαστο ± κεροστίλβη. Οι μεταπηλίτες είναι μιγματίτες με κορδιερίτη + γρανάτη.
- Γρανουλίτες υψηλής πίεσης. Η τυπική παραγένεση είναι πλαγιόκλαστο + γρανάτης + κλινοπυρόξενος (απουσιάζει ο ορθοπυρόξενος). Οι μεταπηλίτες έχουν καλιούχο άστρο + κυανίτη.

Τα ορυκτά της γρανουλιτικής φάσης είναι κυρίως άνυδρα, λόγω των διαδικασιών αφυδάτωσης που συμβαίνουν σε υψηλές θερμοκρασίες. Τα ένυδρα ορυκτά, όπως η κεροστίλβη και ο βιοτίτης, αλλά όχι ο μοσχοβίτης, μπορούν να εμφανιστούν στην κατώτερη γρανουλιτική φάση. Η ανώτερη γρανουλιτική φάση χαρακτηρίζεται από τη παρουσία μόνο άνυδρων ορυκτών. Οι γρανουλίτες μπορεί να παρουσιάζουν μια πρωταρχική γνευσιακή υφή εξαιτίας των παράλληλων φακών χαλαζία ή/και αστρίων.

Ο ιστός τους είναι κυρίως γρανοβλαστικός, ενώ η υφή τους είναι γνευσιακή. Η ονομασία "γρανουλίτης" χρησιμοποιήθηκε για να περιγράψει διαφορετικές έννοιες, σε διαφορετικές γλώσσες και χρονικές περιόδους. Στη Γαλλία, χρησιμοποιήθηκε για να χαρακτηρίσει λεπτόκοκκα γρανιτικά πετρώματα (Michel-Lévy, 1874; Cogné, 1961) αν και αυτή η χρήση ποτέ δεν έγινε κοινώς αποδεκτή. Στη Σκωτία και στην Αγγλία, ο όρος "γρανουλίτης" χρησιμοποιήθηκε για να χαρακτηρίσει υψηλού βαθμού μεταμορφωμένα πετρώματα που προήλθαν από ψαμμίτες. Οι γρανουλίτες αποτελούν κομμάτια του κατώτερου φλοιού που έχουν εκταθεί. Ως αποτέλεσμα, η μελέτη τους είναι σημαντική στην κατανόηση του κατώτερου φλοιού καθώς και της αλληλεπίδρασης φλοιού-μανδύα. Παρότι οι γρανουλίτες σποραδικά εμφανίζονται επιφανειακά λόγω ανυψωτικής τεκτονικής σε ζώνες ρηγμάτων, η αφθονία τους σε ηπειρωτικές ασπίδες του Προκάμβριου φανερώνει ότι ο κατώτερος ηπειρωτικός φλοιός αποτελείται από γρανουλιτικά πετρώματα.



Σχήμα μεταμορφικών φάσεων. Πηγή: <http://www.geo.auth.gr/106/>

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2. ΒΑΣΙΚΟΙ ΓΡΑΝΟΥΛΙΤΕΣ

2.1 ΓΕΝΕΣΗ ΒΑΣΙΚΩΝ ΓΡΑΝΟΥΛΙΤΩΝ

Κατά τη μετάβαση από την πρασινοσχιστολιθική στην αμφιβολιτική φάση, η πλειοψηφία του χαλαζία καταναλώνεται λόγω των συνεχών αντιδράσεων, με αποτέλεσμα πολλοί αμφιβολίτες να μην περιέχουν καθόλου χαλαζία. Το περισσότερο νερό που βρίσκεται στα ένυδρα ορυκτά έχει απελευθερωθεί λόγω των αντιδράσεων αφυδάτωσης που συμβαίνουν καθώς η θερμοκρασία αυξάνει, με αποτέλεσμα τα μεταβασικά πετρώματα που έχουν σχηματιστεί στους 700°C να φέρουν ως μοναδικό ένυδρο ορυκτό τις αμφιβόλους. Η μετάβαση από μια σχετικά ένυδρη, αμφιβολιτικής φάσης παραγένεση, σε μια εντελώς άνυδρη, γρανουλιτικής φάσης παραγένεση, είναι σταδιακή και συμβαίνει σε ένα εύρος τουλάχιστον 200°C (από 650°C έως 850°C).

Η πρώτη ξεκάθαρη ένδειξη ότι έχουμε εισέλθει στη γρανουλιτική φάση μεταμόρφωσης είναι η εμφάνιση ορθοπυρόξενου σε πετρώματα που υπάρχει κλινοπυρόξενος και απουσιάζει χαλαζίας. Οι συνθήκες γρανουλιτικής φάσης είναι ξεκάθαρες αν σε αμφιβολίτες έχουμε ύπαρξη ορθοπυρόξενου παρουσία χαλαζία. Η παρουσία ορθοπυρόξενου είναι πιο συχνή σε χαμηλής πίεσης, βασικούς γρανουλίτες, ενώ σε υψηλότερες πιέσεις, η τυπική ορυκτολογική σύσταση άνυδρου γρανουλίτη είναι: Πλαγιόκλαστο + Κλινοπυρόξενος + Γρανάτης ± Χαλαζίας. Οι αντιδράσεις που τελικά δίνουν αυτή την ορυκτολογική σύσταση είναι συνεχείς. Η κεροστίλβη σταδιακά μειώνεται, αφήνοντας πίσω έναν άνυδρο γρανουλίτη. Πρέπει να σημειωθεί όμως, πως η ορυκτολογική παραγένεση Πλαγιόκλαστο + Κλινοπυρόξενος + Γρανάτης μπορεί να βρεθεί και σε αμφιβολιτική φάση μεταμόρφωσης και δεν αποτελεί δείκτη γρανουλιτικής φάσης.

Εάν η πίεση είναι αρκετά υψηλή ώστε να μην σχηματιστεί ορθοπυρόξενος, τότε το πέτρωμα περνά στη γρανουλιτική φάση όταν οι αμφίβολοι έχουν εξαφανιστεί από την παραγένεση. Οι αντιδράσεις 9.59 και 9.62 του πίνακα 2.1 καταναλώνουν το τρεμολιτικό και τσερμακίτικό μόριο των αμφιβόλων και παράγουν πυρόξενο, γρανάτη και ανορθίτη και έτσι αντιπροσωπεύουν τη μετάβαση από την αμφιβολιτική στη γρανουλιτική φάση μεταμόρφωσης. Συγκεκριμένα, η αντίδραση 9.60, του πίνακα 1, είναι σημαντική καθώς δείχνει την διάσπαση της τσερμακίτικής αμφιβόλου με αποτέλεσμα τον σχηματισμό δύο πυροξένων (ορθοπυρόξενος και κλινοπυρόξενος) που αποτελεί δείκτη γρανουλιτικής μεταμόρφωσης σε βασικά πετρώματα όταν δεν υπάρχει χαλαζίας. Επιπλέον, η αντίδραση παράγει ανορθιτικό μόριο κι επομένως στους βασικούς γρανουλίτες μπορεί να υπάρξει πλαγιόκλαστο πλούσιο σε ασβέστιο (λαβραδορίτης).

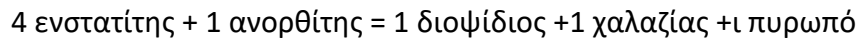
Ο βιοτίτης αποτελεί δευτερεύουσα ένυδρη φάση στους υψηλού βαθμού αμφιβολίτες. Η μικρή ποσότητα οξειδίου του καλίου που συναντάται σε αμφιβολιτικούς μεταβασίτες βρίσκεται κυρίως στο βιοτίτη και είτε εισέρχεται στους πυρόξενους και στους τριαδικούς αστρίους, είτε ενσωματώνεται σε τήγμα καλιούχου άστριου - αλβίτη – χαλαζία κατά τη μιγματιττώση. Καθώς όμως η συνολική ποσότητα νερού που μπορεί να αποθηκευτεί σε υψηλού βαθμού αμφιβολίτες είναι πολύ μικρή (της τάξης του 0.4% κατά βάρος, ή και λιγότερο), τα βασικά πετρώματα είναι λιγότερο επιδεκτικά στη μερική τήξη, σε σχέση με τους αντίστοιχους μεταπηλίτες, μεταψαμμίτες και μεταγρανιτοειδή.

Πίνακας 2.1. Οι αντιδράσεις 9.59 έως 9.62 δείχνουν τη μετάβαση από την αμφιβολιτική στη γρανουλιτική φάση μεταμόρφωσης (Butcher&Grapes, 2011).

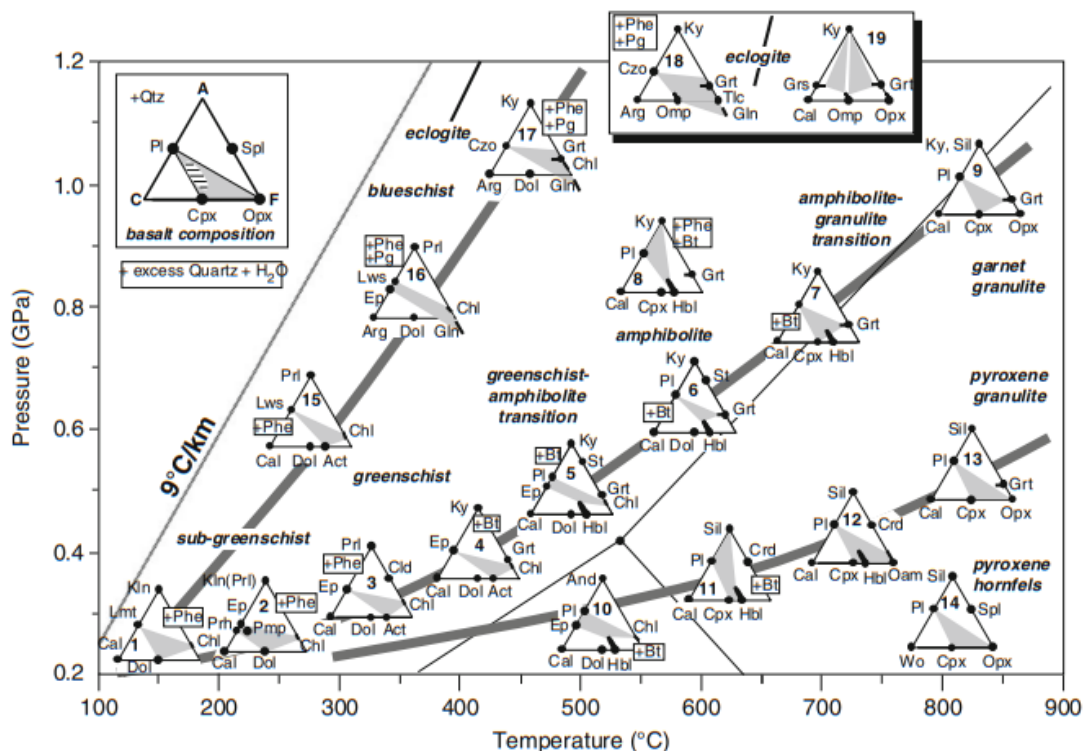
Amphibolite-granulite facies transition	
$Tr = 2Cpx + 3Opx + Qtz + H_2O$	(9.59)
$Ts = Cpx + 3Opx + An + H_2O$	(9.60)
$Tr + 7Grs = 27Cpx + Prp + 6An + H_2O$	(9.61)
$Tr + Grs = 4Cpx + Opx + An + H_2O$	(9.62)

2.2 ΓΡΑΝΟΥΛΙΤΙΚΗ ΦΑΣΗ ΚΑΙ ΒΑΣΙΚΟΙ ΓΡΑΝΟΥΛΙΤΕΣ

Η γρανουλιτική φάση μεταμόρφωσης των βασικών πετρωμάτων φαίνεται στις χημειογραφίες #9 και #13 του διαγράμματος 2.1. Σε υψηλές πιέσεις, η χαρακτηριστική ορυκτολογική παραγένεση είναι: πλαγιόκλαστο + κλινοπυρόξενος (αυγίτης) + γρανάτης. Σε χαμηλές πιέσεις, η σύσταση αυτή είναι: πλαγιόκλαστο + κλινοπυρόξενος (αυγίτης) + ορθοπυρόξενος (υπερσθενής). Αυτές οι δύο παραγενέσεις συνδέονται μεταξύ τους με τη σημαντική αντίδραση:

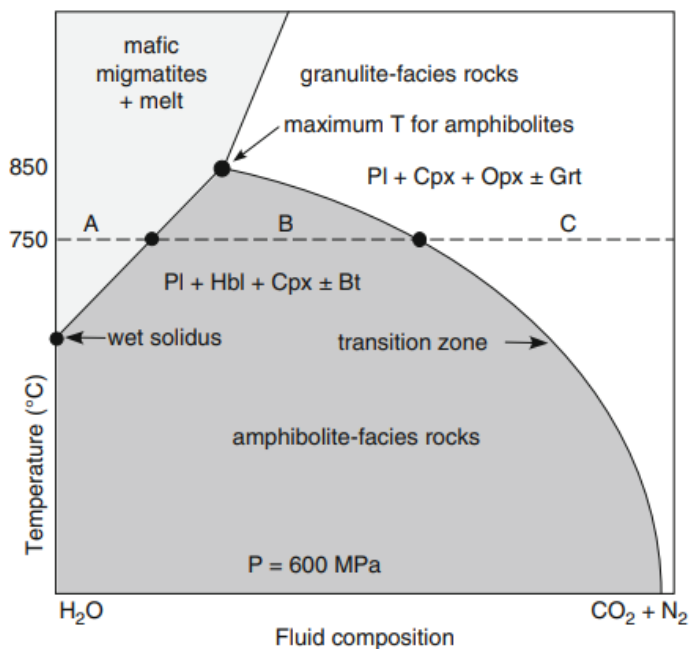


που χωρίζει ένα μέρος των πυροξενικών γρανουλιτών σε πίεση περίπου 500-700 MPa από τους γρανατούχους γρανουλίτες που βρίσκονται κάτω από την εκλογιτική φάση σε υψηλές πιέσεις. Η συνεχής φύση της αντίδρασης δημιουργεί μια μεγάλη ζώνη επικάλυψης όπου ορθοπυρόξενος και γρανάτης συνυπάρχουν σε πετρώματα που φέρουν πλαγιόκλαστο και κλινοπυρόξeno. Αν όμως τα πετρώματα είναι μεταβασάλτες μεσσωκεάνιας ράχης (meta-MORB), η επικάλυψη είναι μικρότερη και το όριο μεταξύ των 2 ζωνών βρίσκεται κοντά στα 600-700 MPa στους 800°C.



Διάγραμμα 2.1 : Μεταμόρφωση βασικών πετρωμάτων (μεταβασάλτες) που παρουσιάζεται με διαγράμματα ACF.

Η καστανή κεροστίλβη που συναντάται σε πετρώματα υψηλού βαθμού μεταμόρφωσης είναι εξαιρετικά σταθερό ορυκτό. Έτσι, απαιτούνται πολύ υψηλές θερμοκρασίες ώστε να καταστραφεί αυτή η τελευταία ένυδρη φάση στα βασικά πετρώματα. Οι εντελώς άνυδροι βασικοί γρανουλίτες σχηματίζονται κανονικά σε θερμοκρασίες άνω των 850°C. Η αφυδάτωση των αμφιβόλων συχνά υποβοηθείται από την αλληλεπίδραση των πετρωμάτων με κάποια φτωχή σε νερό εξωτερική ρευστή φάση. Διαφορετικά, η αφυδάτωση αυτή μπορεί να συμβεί λόγω μερικής τήξης και αφαίρεσης του νερού το οποίο εισέρχεται σε μια ρευστή φάση. Οι σχέσεις που είναι σημαντικές για την υψηλού βαθμού και τη γρανουλιτική φάση μεταμόρφωσης απεικονίζονται στο σχήμα 2.1, το οποίο είναι ένα διάγραμμα θερμοκρασίας - σύστασης ρευστών σε πίεση 600MPa.



Σχήμα 2.1: Ισοβαρικό διάγραμμα θερμοκρασίας- σύστασης ρευστών που απεικονίζει τη σχέση αμφιβολιτικής-γρανουλιτικής φάσης στα μεταβασικά πετρώματα.

Στην ισόθερμη των 750°C, τέμνονται τρεις διαφορετικές παραγενέσεις. Εάν υπάρχει παρουσία ρευστών πλούσιων σε νερό (Τομέας Α), τα βασικά πετρώματα τήκονται μερικώς και δημιουργούνται βασικοί μιγματίτες. Τα ρευστά ενδιάμεσης σύστασης ταυτίζονται με την αμφιβολιτική φάση και την τυπική παραγένεση: πλαγιόκλαστο + κεροστίλβη + κλινοπυρόξενος και δεν υπάρχουν μιγματιτικές δομές. Τα ρευστά που είναι φτωχά σε νερό συνυπάρχουν με πετρώματα της γρανουλιτικής φάσης (Τομέας

Κ) με τη χαρακτηριστική παραγένεση: πλαγιόκλαστο + κλinoπυρόξενος + ορθοπυρόξενος ± γρανάτης. Αξίζει να σημειωθεί ότι η ζώνη μετάβασης μεταξύ αμφιβολιτικής και γρανουλιτικής φάσης εκτείνεται σε ένα μεγάλο εύρος της σύστασης των ρευστών. Ωστόσο, μια σημαντική παρατήρηση (σχ. 2.1) είναι ότι σε ίδιες θερμοκρασίες, βασικοί μιγματίτες, αμφιβολίτες και γρανουλίτες μπορεί να σχετίζονται άμεσα μεταξύ τους σε ένα μεταμορφικό σύμπλεγμα, ανάλογα με τη σύσταση της ρευστής φάσης. Η κατάσταση μπορεί να είναι περίπλοκη εάν έχουμε διαφοροποίηση της σύστασης των ρευστών με το χρόνο, σε ένα συγκεκριμένο μέρος. Αξίζει επίσης να σημειωθεί ότι το πρώτο τήγμα στα βασικά πετρώματα σχηματίζεται μόνο εάν το ρευστό είναι καθαρό νερό (wet solidus). Καθώς αυξάνεται η θερμοκρασία, οι μιγματίτες σχηματίζονται με ρευστά που περιέχουν μειωμένες ποσότητες νερού. Η παραγένεση της αμφιβολιτικής φάσης έχει μια μέγιστη θερμοκρασία περίπου 900 °C, στα 600 MPa παρουσία ρευστού που περιέχει μόνο νερό. Η θερμοκρασία αυτή είναι χαμηλότερη, πιο κοντά στους 850 °C, στην ίδια πίεση, εάν έχουμε παρουσία ανάμικτων πτητικών ρευστών.

Παρότι οι εντελώς άνυδροι βασικοί γρανουλίτες είναι ένα συχνό φαινόμενο, π.χ. το κάλυμμα Jotun και η ζώνη Bergen στις σκανδιναβικές Καληδονίδες, πολλοί βασικοί γρανουλίτες προϋφίσταται μεταμόρφωσης περιέχουν κεροστίλβη (και όχι κεροστίλβη ανάδρομης μεταμόρφωσης, όπως οι μεταγρανουλίτες). Ένα παράδειγμα είναι η αμφιβολιτική-γρανουλιτική ζώνη μετάβασης στα υπερβασικά πετρώματα στο Broken Hill της Αυστραλίας. Το χρώμα της κεροστίλβης αλλάζει βαθμιαία με αύξηση του βαθμού μεταμόρφωσης από κυανοπράσινο σε καστανοπράσινο στην αμφιβολιτική φάση, σε σκοτεινό καστανέρυθρο στη γρανουλιτική φάση, το οποίο δείχνει αύξηση της περιεκτικότητάς της σε τιτάνιο (δείκτης αυξανόμενης θερμοκρασίας). Το τιτάνιο συνοδεύεται από αύξηση των κενών στη δομή της αμφιβόλου και συνδέεται με αυξανόμενη αντικατάσταση εδενίτη ($\text{Na}^+\text{Al} \square_{-1}\text{AlSi}_{-1}$). Η παρουσία καστανής κεροστίλβης σε βασικά πετρώματα που περιέχουν ορθοπυρόξeno ορίζει μια χαμηλότερου βαθμού γρανουλιτική φάση, τους κεροστίλβικούς διπυροξενικούς γρανουλίτες. Αυτή η περίπτωση είναι πιο δύσκολη σε συνθήκες υψηλής πίεσης, όπου ο ορθοπυρόξenos δεν σχηματίζεται στα βασικά πετρώματα και η τυπική παραγένεση πλαγιόκλαστο + κλinoπυρόξenos + γρανάτης μπορεί να είναι παρούσα και στην αμφιβολιτική φάση ή όπου η κεροστίλβη αντέχει σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες (της τάξης των 1000 °C σε πίεση 1GPa.). Προφανώς, σε αυτή τη περίπτωση, είναι αδύνατο να ορίσουμε το όριο μεταξύ αμφιβολιτικής και γρανουλιτικής φάσης, βασιζόμενοι μόνο στα βασικά πετρώματα.

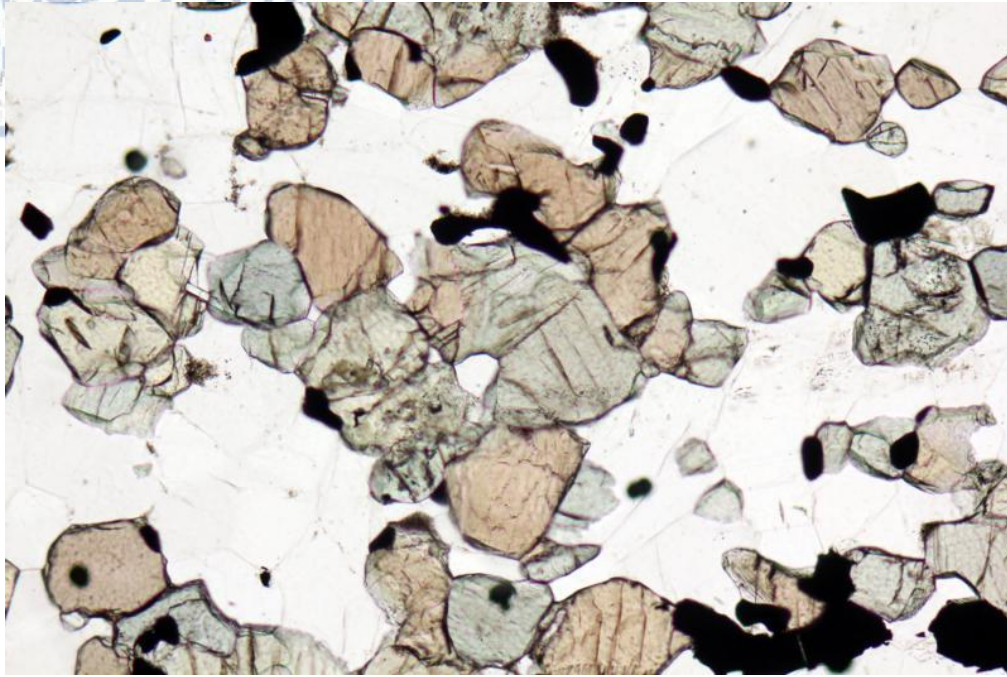
Πέρα από τα ορυκτά που έχουν αναφερθεί μέχρι τώρα, οι βασικοί γρανουλίτες μπορεί να περιέχουν πιο σπάνια ορυκτά όπως ο ζαπφειρίνης ή ο σκαπόλιθος, σε διάφορες παραγενέσεις. Επίσης, ο ερκυνιτικός σπινέλλιος (ερκυνίτης) εμφανίζεται συχνά σε βασικούς γρανουλίτες και η παρουσία του είναι δείκτης χαμηλής πίεσης ($P < 400\text{MPa}$).

Σε πολύ χαμηλές πιέσεις, όπως φαίνεται στη χημειογραφεία #14 στο διάγραμμα 2.1,

οι πυροξενικοί κερατίτες σχηματίζονται από βασικά πετρώματα που υπέστησαν μεταμόρφωση επαφής σε υψηλή θερμοκρασία. Εντέλει, εάν υπάρξει μεταμόρφωση επαφής με υπέρ-υψηλή θερμοκρασία (UHT), θα σχηματιστεί η παραγένεση πλαγιόκλαστο + κλινοπυρόξενος + ορθοπυρόξενος $\pm$ σπινέλλιος η οποία ταυτίζεται με την ορυκτολογική σύσταση του βασάλτη που φαίνεται στη πάνω αριστερή γωνία του διαγράμματος 2.1. Το ανώτατο όριο της γρανουλιτικής φάσης μεταμόρφωσης είναι περίπου οι 1200 °C.

Η αιτία της γρανουλιτικής φάσης μεταμόρφωσης σε χαμηλή πίεση συνήθως αποδίδεται σε διείδυση μεγάλων όγκων άνυδρου ή πλούσιου σε διοξείδιο του άνθρακα βασικού (γαββρικού/βασαλτικού) ή χαρνοκιτικού μάγματος σε ρηχά βάθη του φλοιού, προερχόμενα από τον μανδύα ή τον κατώτερο φλοιό. Η ξηρή ή πλούσια σε διοξείδιο του άνθρακα φύση τέτοιου μάγματος διευκολύνει την αφυδάτωση των πετρωμάτων του φλοιού και συνυπάρχει με ελάχιστη τεκτονική δραστηριότητα που σχετίζεται με τον συγκεκριμένο τύπου γρανουλιτικής μεταμόρφωσης. Αφού θερμανθούν σε υψηλές θερμοκρασίες, τα πετρώματα γρανουλιτικής φάσης ουσιαστικά ψύχονται επί τόπου, όπως αποδεικνύεται από πολλούς γρανουλιτικούς σχηματισμούς, που χαρακτηρίζονται από ισοβαρική ψύξη. Γενικώς, η εκταφή γρανουλιτών απαιτεί ένα μετέπειτα συμπιεστικό ορογενετικό συμβάν, το οποίο περιλαμβάνει τη στοίβαξη και την κλίση τεμάχων του φλοιού με τη δημιουργία πτυχών και καλυμμάτων, τα οποία εν τέλει επιτρέπουν στην επιφάνεια διάβρωσης να τμήσει γρανουλιτικούς σχηματισμούς ενδιάμεσου ή κατώτερου φλοιού. Εάν υπάρξει παρουσία νερού κατά τη διάρκεια της αργής ψύξης, τότε οι παραγενέσεις υψηλού βαθμού μεταμόρφωσης ίσως εξαφανιστούν πλήρως και σε περίπτωση που ο ορθοπυρόξενος εξαφανιστεί πλήρως κατά τη διάρκεια της αμφιβολιτίωσης, είναι πολύ δύσκολο να καθοριστεί εάν τα πετρώματα αυτά ανακρυσταλλώθηκαν ποτέ κάτω από συνθήκες γρανουλιτικής φάσης μεταμόρφωσης.

Η ορυκτολογική σύσταση των βασικών γρανουλιτών διαφέρει ανάλογα με τη πίεση κάτω από την οποία συνέβη η μεταμόρφωση. Έτσι, μια τυπική ορυκτολογική σύσταση γρανουλίτη που μεταμορφώθηκε σε συνθήκες χαμηλότερης πίεσης θα είναι: πλαγιόκλαστο + κλινοπυρόξενος (αυγίτης) + αρθοπυρόξενος (υπερσθενής) (εικ. 2.1), ενώ, σε συνθήκες υψηλής πίεσης, αυτή θα είναι: πλαγιόκλαστο + κλινοπυρόξενος (αυγίτης) + γρανάτης.



Εικόνα 2.1. Πλαγιόκλαστο (λευκό), ορθοπυρόξενος(μπεζ/ροζ) και κλινοπυρόξενος (πράσινο). Γρανουλίτης από το Hartmannsdorf, Γερμανία. Φωτογραφία από Alessandro Da Mommio

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3. ΟΞΙΝΟΙ ΓΡΑΝΟΥΛΙΤΕΣ

3.1. ΜΙΓΜΑΤΙΤΙΚΑ ΓΡΑΝΙΤΟΕΙΔΗ ΠΕΤΡΩΜΑΤΑ ΚΑΙ ΧΑΡΝΟΚΙΤΕΣ

Υπάρχουν πολλά παραδείγματα ορθογνευσίων που σχηματίζουν μιγματίτες κάτω από γρανουλιτικές συνθήκες μεταμόρφωσης. Η κύρια παραγένεση σε αυτά τα πετρώματα αποτελείται από χαλαζία και πλαγιόκλαστο, η οποία είναι ιδανική για τη δημιουργία τήγματος γρανιτικής σύστασης χαμηλής θερμοκρασίας υπό ένυδρες συνθήκες.

Επιπλέον, είναι πιθανή η ύπαρξη βιοτίτη, μοσχοβίτη, κεροσίλβης, γρανάτη και αργιλοπυριτικών ορυκτών, τα οποία, ανάλογα με τη πίεση, μέσω μερικής τήξης δίνουν γρανουλιτικές παραγενέσεις της μορφής: Γρανάτης/Κορδιερίτης, Ορθοπυρόξενος/Κλिनοπυρόξενος, Καλιούχος/Νατριούχος Άστριος, Χαλαζίας, Κυανίτης/Σιλλιμανίτης, Ασβεστούχο πλαγιόκλαστο.

Οι χαρνοκίτες είναι γρανιτικά πετρώματα (ορθογνεύσιοι) που φέρουν ορθοπυρόξeno (ή σπανιότερα, φαυαλίτη, και συχνά κλινοπυρόξeno) και συναντώνται σε γρανουλιτικούς όγκους όπως αυτοί στην Ανταρκτική, στη Σρι Λάνκα στη Νορβηγία (εικ. 3.1), στην Αφρική (εικ. 3.2) στην Ινδία (εικ. 3.3) και στην Ιταλία (εικ. 3.4). Έχουν χαρακτηριστικό σκούρο πράσινο, πράσινο ή καστανό χρώμα σε "φρέσκες" επιφάνειες και μια "λιπαρή" λάμψη, η οποία υποδεικνύει την ύπαρξη ορθοπυρόξενου. Η τυπική τους παραγένεση περιέχει ορθοπυρόξeno, χαλαζία και αστρίους. Σε μερικές περιπτώσεις ο χαλαζίας περιέχει εγκλείσματα ινών ρουτιλίου, το οποίο και δίνει μια ελαφρώς κυανή χροιά στους κρυστάλλους.

Παρότι οι περισσότεροι χαρνοκίτες έχουν μαγματική προέλευση, υπάρχουν ενδείξεις για σχηματισμό ορθοπυρόξενου μέσω αφυδάτωσης σε στερεή κατάσταση του βιοτίτη σε γρανιτικά πετρώματα μέσω της παρακάτω αντίδρασης,



η οποία συνδέεται με ροή CO₂ (που προκαλεί και τη την αφυδάτωση), η οποία δείχνει γρανουλιτική φάση μεταμόρφωσης. Οι αλλοιώσεις, οι επαφές διάχυσης, η ύπαρξη φλεβών, οι αλλοιώσεις κατά μήκος των ζωνών διάτμησης και η αδρόκοκκη ανακρυστάλλωση είναι αποδείξεις ότι υπήρξε μεταμόρφωση επαφής που οδήγησε στη μεταμόρφωση γρανιτικών πετρωμάτων σε χαρνοκιτική παραγένεση υπό τη δράση υψηλής θερμοκρασίας ρευστών, και πιο συγκεκριμένα, CO₂.



Εικόνα 3.1. Χαρνοκίτης απο την τοποθεσία Flakstadøya, Lofoten Islands (Νορβηγία).



Εικόνα 3.2. Χαρνοκίτης από τη Νότιο Αφρική (γνωστός και ως Verde Fontaine)



Εικόνα 3.3. Αρχική χαρνοκτιώση "Λεκέδες" χαρνοκίτη σε γρανουλιτικό γνεύσιο (Ινδία). Φωτογραφία από Eleanore Blereau.



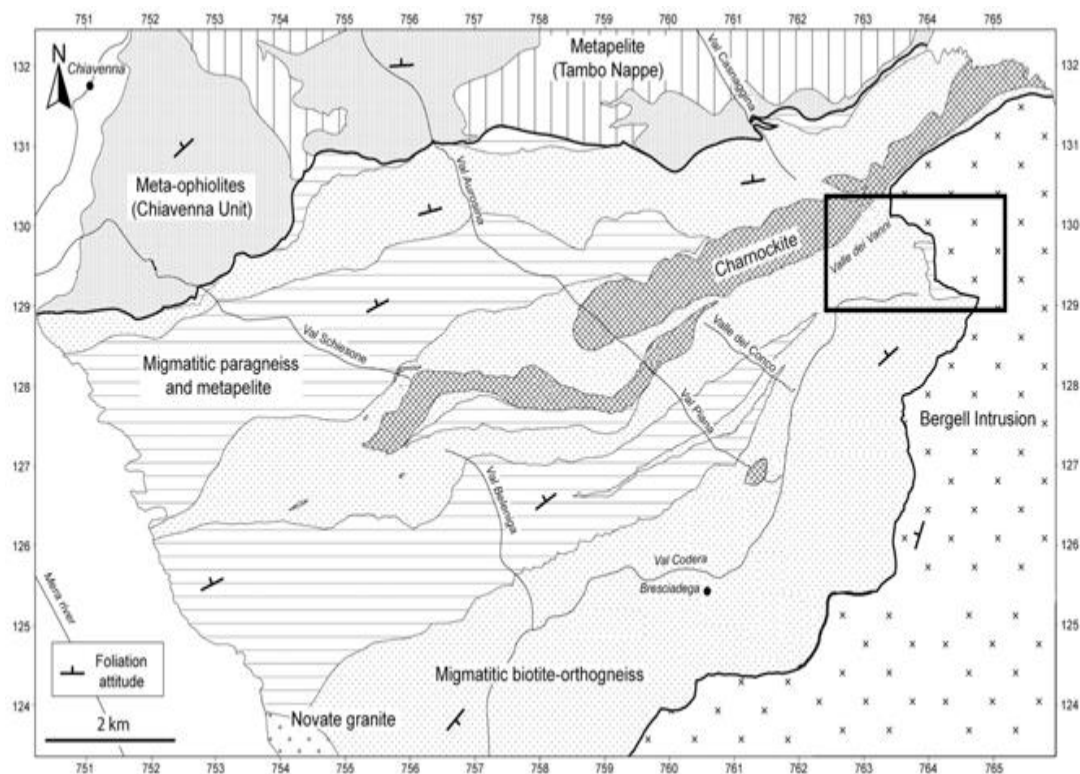
Εικόνα 3.4. Μικροσκοπική εικόνα χαρνοκίτη. Πλαγιόκλαστο (λευκό), Ορθοπυρόξενος (μπεζ/γκρίζο). Λευκοκρατικός γρανουλίτης, Ivrea Verbano, Ιταλία. Φωτογραφία από Alessandro Da Mommio.

3.2. ΣΑΠΦΕΙΡΙΝΙΚΟΣ ΓΡΑΝΟΥΛΙΤΗΣ

Η εμφάνιση υψηλού βαθμού μεταμόρφωσης πετρωμάτων όπως οι σαπφειρινικοί γρανουλίτες και οι χαρνοκίτες καθώς και η ευρεία μιγματιττώση κάνουν το σύμπλεγμα Gruf κάτι το μοναδικό στις κεντρικές Άλπεις (εικ. 3.5).

Το σύμπλεγμα Gruf αποτελείται κυρίως από μιγματιτικούς ορθογνεύσιους, παραγνεύσιους και μεταπηλιτικά πετρώματα που αποτελούνται από βιοτίτη, σιλλιμανίτη, γρανάτη και κορδιερίτη. Οι μεταπηλίτες δείχνουν μεταμόρφωση κάτω από συνθήκες που βρίσκουμε στην ανώτερη αμφιβολιτική φάση του Τριτογενούς.

Οι σαπφειρινικοί γρανουλίτες που εντοπίστηκαν από τον Cornelius (1916) και τον Wenk et al. (1974), αντιπροσωπεύουν τα μόνα πετρώματα φλοιού που σχηματίστηκαν σε θερμοκρασία μεγαλύτερη των 800°C σε ολόκληρες τις κεντρικές Άλπεις. Σύμφωνα με τον Galli et al. (2011), οι γρανουλίτες αυτοί σχηματίστηκαν κάτω από συνθήκες υπέρ-υψηλής θερμοκρασίας μεταμόρφωσης και πιο συγκεκριμένα σε θερμοκρασίες 920-940°C και πιέσεις 8.5-9.5 kbar.



Εικόνα 3. 5. Απλοποιημένος γεωλογικός χάρτης του συμπλέγματος Gruf. Το μαύρο περίγραμμα δείχνει τη θέση των σαπφειρινικών γρανουλιτών. Επεξεργασμένος χάρτης από Galli et al. (2011).

Το σύμπλεγμα Gruf ουσιαστικά περιέχει δύο τύπους πετρωμάτων: Τους μιγματιτικούς μεταγρανίτες και τους μερικώς μιγματιτικούς μεταπηλίτες-μεταψαμμίτες. Όσον αφορά τους γρανουλίτες, η λεπτομερής χαρτογράφηση της περιοχής έχει δείξει έξι διαφορετικούς τύπους γρανουλίτη στο συγκεκριμένο σύμπλεγμα (εικ. 3.6-3.9). Αυτοί είναι:

Τύπος Α: Σαπφειρινικός-ορθοπυροξενικός-κορδιεριτικός-γранаτούχος γρανουλίτης

Τύπος Β: Σαπφειρινικός-ορθοπυροξενικός-σιλλιμανιτικός-κορδιεριτικός-γранаτούχος γρανουλίτης

Τύπος Γ: Ορθοπυροξενικός-κορδιεριτικός-γранаτούχος γρανουλίτης

Τύπος Δ: Σχιστοποιημένος σαπφειρινικός-ορθοπυροξενικός-γранаτούχος γρανουλίτης

Τύπος Ε: Σαλικός, σχιστοποιημένος σαπφειρινικός-ορθοπυροξενικός-γранаτούχος γρανουλίτης

Τύπος ΣΤ: Σαλικός, σχιστοποιημένος σαπφειρινικός-ορθοπυροξενικός γρανουλίτης.

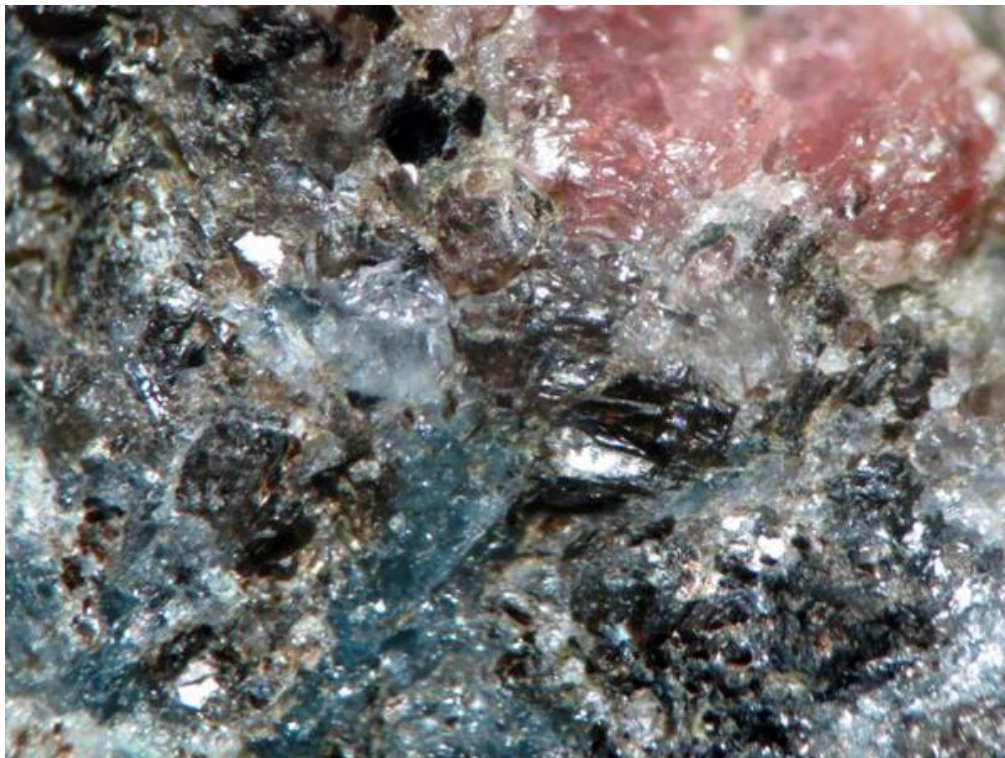
Οι τύποι Α και Β αντιστοιχούν στα δείγματα με σαπφειρίνη που περιγράφονται από τον Cornelius (1916) και ερευνήθηκαν από τους Droop και Bucher-Nurminen (1984).

Οι τύποι Γ έως ΣΤ, όπως και οι χαρνοκίτες, δεν είχαν αναγνωριστεί παλαιότερα.

Οι διαφορετικοί τύποι γρανουλιτών εκτείνονται σε όλη την έκταση του συμπλέγματος Gruf. Οι τύποι Α και Β έχουν εντοπιστεί σαν θύλακες με μεγέθη που ποικίλλουν από μερικά εκατοστά έως και ένα μέτρο, μέσα σε μιγματιτικούς ορθογνεύσιους και σε χαρνοκίτες. Ο τύπος Γ έχει βρεθεί αποκλειστικά σε μορφή όγκου διαστάσεων 1 m, στα κύρια ποτάμια των Val Codera και Val Schiesone. Οι τύποι Δ, Ε, ΣΤ, σχηματίζουν schlieren μήκους μέχρι 1 m και πάχους μέχρι και 40 cm μέσα στους χαρνοκίτες στις Val Piana, Valle del Conco και Val Aurosina, καθώς επίσης συναντώνται και σαν όγκοι στον κύριο ποταμό της Val Codera.



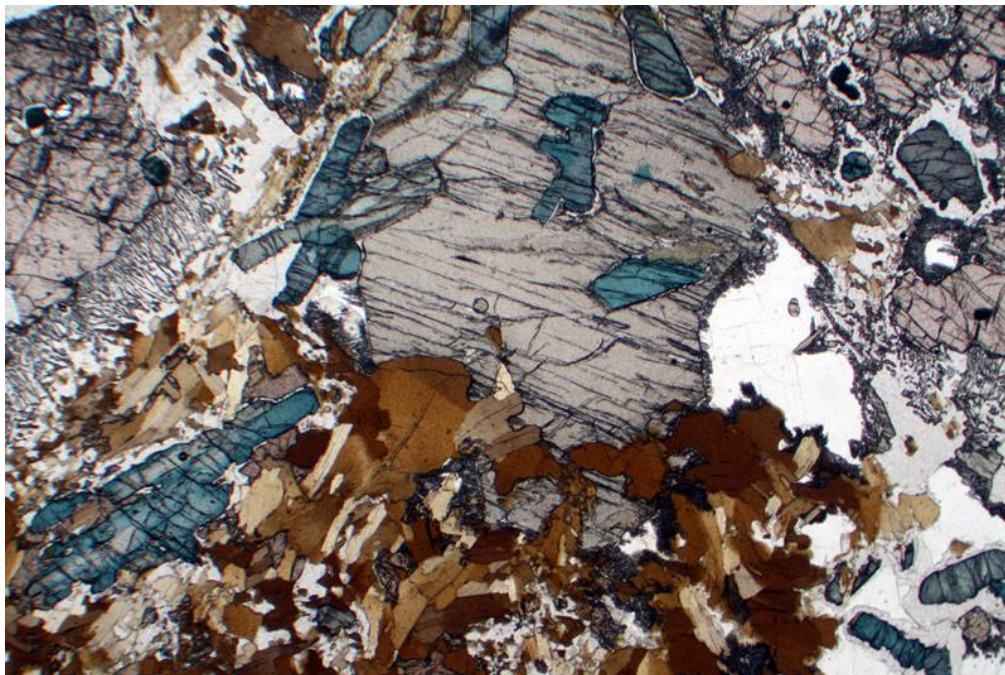
Εικ. 3.6. Σαπφειρινικός Γρανουλίτης. Κόκκινο = γρανάτης, μαύρο = βιοτίτης, σκούρο πράσινο = πυρόξενος, κυανοπράσινο = σαπφειρίνης. Φωτογραφία από τον Angelo Digger.



Εικ. 3.7. Σαπφειρινικός Γρανουλίτης. Κόκκινο = γρανάτης, μαύρο = βιοτίτης, σκούρο πράσινο = πυρόξενος, κυανοπράσινο = σαπφειρίνης. Φωτογραφία από τον Angelo Digger.



Εικ. 3.8. Σαπφειρινικός Γρανουλίτης. Κόκκινο = γρανάτης, μαύρο = βιοτίτης, σκούρο πράσινο = πυρόξενος, κυανοπράσινο = σαπφειρίνης. Φωτογραφία από τον Angelo Digger.



Εικ. 3.9. Εικόνα μικροσκοπίου με πολωτή και αναλυτή. Ορθοπυρόξενος (ανοικτό καστανό), σαπφειρίνης (κυανό-πράσινο), βιοτίτης (σκούρο καστανό), γρανάτης (με ορθοπυροξενικούς-κορδιερίτικούς συμπλεκτίτες) και χαλαζίας (άχρωμος). Σαπφειρινικός γρανουλίτης από την Valle Codera, Gruf Massif. Φωτογραφία από Alessandro Da Mommio.

3.2 ΜΕΤΑΠΗΛΙΤΙΚΟΙ ΓΡΑΝΟΥΛΙΤΕΣ

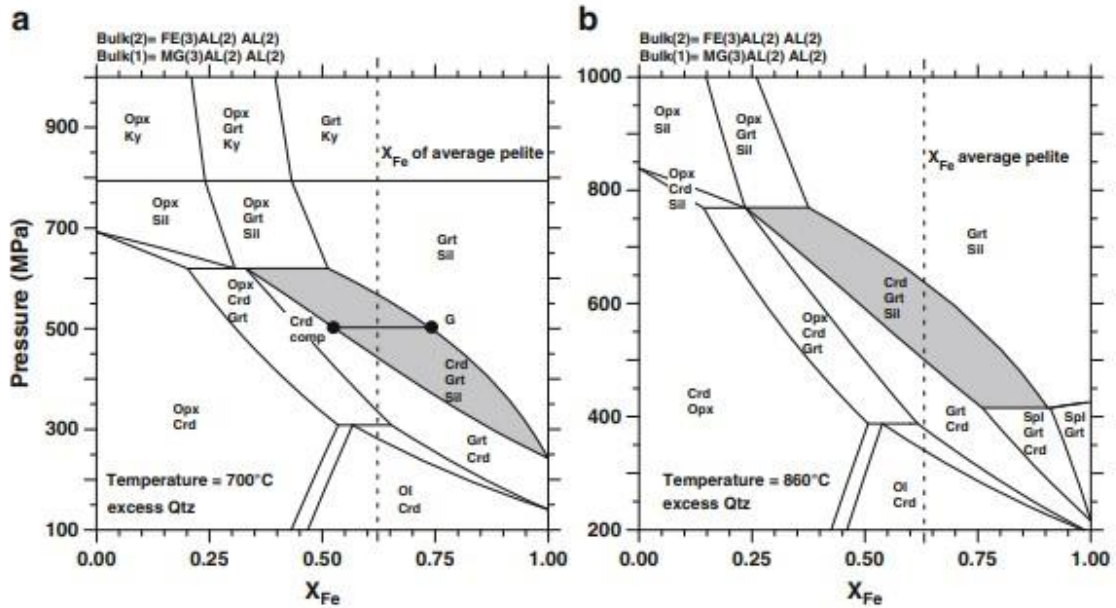
Σύμφωνα με το σύστημα **KFMASH**, η γρανουλιτική παραγένεση ορθοπυρόξενος+ κορδιερίτης+ (χαλαζίας+ καλιούχος άστριος) σχηματίζεται σε ασυνήθιστα υψηλές θερμοκρασίες (περίπου 780 °C), σε ζώνες επαφής. Οι ζώνες επαφής που δημιουργούνται σε χαμηλής πίεσης και υψηλής θερμοκρασίας κερατόλιθους σχετίζονται με μικρού βάθους θόλους βασαλτικού μάγματος, κάτι που είναι σπάνιο. Ορισμένα από αυτά τα βασικά συμπλέγματα έχουν διεισδύσει σε παλαιούς μεταμορφωμένους γνευσίους και οι πολυμεταμορφωμένες παραγενέσεις τους είναι δύσκολο να διαχωριστούν σε ξεχωριστά μεταμορφικά επεισόδια. Οι θερμοβαθμίδες σε περιβάλλοντα υψηλής θερμοκρασίας/χαμηλής πίεσης μπορούν να ξεπεράσουν τους 100 °C/km. Ωστόσο, σε βάθος περίπου 20 km, δηλαδή σε πίεση περίπου 600 MPa, η θερμοκρασία μπορεί να φτάσει και να ξεπεράσει τους 800 °C σε μεγάλες εκτάσεις του φλοιού που δέχονται θερμότητα από μάγματα σε μεγαλύτερα βάθη. Οι συνθήκες αυτές ταυτίζονται με τη θερμοβαθμίδα των 40 °C/km που χαρακτηρίζει τη γρανουλιτική φάση μεταμόρφωσης.

Ο κορδιερίτης αποτελεί το χαρακτηριστικό ορυκτό στους μεταπηλίτες υψηλού βαθμού μεταμόρφωσης σε χαμηλές και μέτριες πιέσεις. Βρίσκεται σε πολλές διαφορετικές παραγενέσεις μαζί με ορυκτά όπως γρανάτης, ορθοπυρόξενος, σπινέλλιος, ολιβίνης, απαφειρίνης, αργιλοπυριτικά και άλλα, σε γνεύσιους. Οι παραγενέσεις που φέρουν κορδιερίτη μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον υπολογισμό των συνθηκών πίεσης και θερμοκρασίας σε υψηλού βαθμού μεταμόρφωσης μεταπηλίτες. Εξαιτίας της μεγάλης αντίθεσης στη σύσταση του πλούσιου σε μαγνήσιο κορδιερίτη και του πλούσιου σε σίδηρο γρανάτη, το ζευγάρι κορδιερίτης-γρανάτης μπορεί να χρησιμοποιηθεί σαν γεωθερμόμετρο. Η παραγένεση κορδιερίτης+γρανάτης+σιλλιμανίτης+χαλαζίας συνδέεται από την αντίδραση:



Η χημική ισορροπία της αντίδρασης αυτής χρησιμοποιείται σαν γεωβαρόμετρο.

Η ισορροπία μεταξύ μερικών από τα παραπάνω ορυκτά σε σχέση με την πίεση φαίνεται στα παρακάτω διαγράμματα πίεσης-περιεκτικότητας σιδήρου στους 700 και 860 °C, αντίστοιχα. (Διαγράμματα 3.1a,b)



Διαγράμματα 3.1. α. Διάγραμμα πίεσης ως προς την περιεκτικότητα σε Fe στους 700 °C, β. Διάγραμμα πίεσης ως προς την περιεκτικότητα σε Fe στους 860 °C.

Στα παραπάνω διαγράμματα φαίνεται η εξάρτηση της ισορροπίας μεταξύ κάποιων ορυκτών, από την πίεση. Η παραγένεση κορδιερίτης + γρανάτης + σιλλιμανίτης + χαλαζίας που φαίνεται σαν σκιασμένο πεδίο, είναι ένα εξαιρετικό βαρόμετρο. Στη μέγιστη δυνατή πίεση, ο κορδιερίτης είναι καθαρά μαγνησιούχος (εικ. 3.10). Το ζεύγος ορθοπυρόξενος+ αργιλοπυριτικά είναι δείκτης για γρανουλίτες υψηλής πίεσης (εικ. 3.11).

Οι ορθοαμφίβολοι που είναι πιθανόν να έχουν δημιουργηθεί κατά την ανώτερη αμφιβολιτική φάση μεταμόρφωσης διασπώνται σε ορθοπυρόξενο + χαλαζία σύμφωνα με την αντίδραση:



περίπου στους 750-800 °C, κάτι που αποτελεί τη μετάβαση στη γρανουλιτική φάση μεταμόρφωσης.

Ωστόσο, η παραγένεση ορθοπυρόξενος + χαλαζίας μπορεί να σχηματιστεί από διάφορες αντιδράσεις, με την πιο σημαντική να είναι η αντίδραση:



η οποία εν τέλει οδηγεί στην αφαίρεση του βιοτίτη από τους μεταπηλίτες.

Γενικότερα, ο βιοτίτης διασπάται σε ορθοπυρόξено + καλιούχο άστριο, παρουσία χαλαζία περίπου στους 800 °C. Η αντικατάσταση του βιοτίτη από ορθοπυρόξено συμβαίνει σε ένα μεγάλο εύρος θερμοκρασιών, το οποίο εξαρτάται από τη σύσταση του βιοτίτη και του ρευστού. Ο βιοτίτης απομένει ως το τελευταίο ένυδρο ορυκτό στα πετρώματα και αντέχει σε συνθήκες με σχετικά χαμηλή περιεκτικότητα νερού. Ωστόσο, εάν αυτά τα πετρώματα θερμανθούν περαιτέρω, η τήξη χωρίς ρευστά γίνεται σημαντική και αυτή η διαδικασία είναι υπεύθυνη για ένα μεγάλο μέρος των ορθοπυρόξενων που βρίσκονται στους γρανουλίτες.

Η μεταμόρφωση των μεταπηλιτών επηρεάζεται έντονα από τις αντιδράσεις μερικής τήξης σε υψηλές θερμοκρασίες και ο αυξημένος σχηματισμός τηγμάτων φέρει σοβαρές συνέπειες στη σύσταση των πετρωμάτων, καθώς εξαντλούνται οι άστριοι και ο χαλαζίας. Ο σίδηρος επίσης μειώνεται έντονα στη φάση τήξης και κατά συνέπεια το υπόλειμμα (ρεσίτης) εμπλουτίζεται σε μαγνήσιο και αργίλιο. Οι επαναλαμβανόμενες αντιδράσεις αφυδάτωσης αφήνουν τα πετρώματα χωρίς νερό στη ρευστή φάση. Αντίστοιχα, οι υψηλού βαθμού μεταπηλίτες είναι συχνά πλούσιοι σε αργίλιο και μαγνήσιο, υπολείμματα των διεργασιών μερικής τήξης, και αποτελούνται από ορυκτά όπως ορθοπυρόξενος, κορδιερίτης, σιλλιμανίτης, σπινέλλιος, γρανάτης, σαπφειρίνης, κ.λπ.



Εικόνα 3.10. Μεταπηλιτικός γρανουλίτης με έντονες μπλε ενστρώσεις κορδιερίτη. Φωτογραφία από Eleanore Blereau.



Εικόνα 3.11. Γρανουλίτης από τη περιοχή Ivrea Verbano, Ιταλία. Φωτογραφία από Alessandro Da Mommio.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4. ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΓΕΝΕΣΗΣ-ΜΕΤΑΜΟΡΦΩΣΗ ΥΠΕΡ ΥΨΗΛΗΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ (ΥΗΤ)- ΓΕΩΤΕΚΤΟΝΙΚΑ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΑ ΓΕΝΕΣΗΣ ΓΡΑΝΟΥΛΙΤΩΝ

4.1 ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΓΕΝΕΣΗΣ

Οι γρανουλίτες δεν συνδέονται πάντα με μερική τήξη. Στην πραγματικότητα, οι γρανουλίτες δεν παρουσιάζουν τυπικές δομές μιγματίτη. Έτσι, ελάχιστοι γρανουλίτες αντιπροσωπεύουν υπολείμματα μερικής τήξης. Οι μιγματιτικοί γρανουλίτες δημιουργούνται συνήθως σε μικρή κλίμακα και σε μεσαίο βάθος στο φλοιό (400-700 MPa) ενώ οι μεγαλύτερες εκτάσεις γρανουλιτών παγκοσμίως (Νορβηγία, Ινδία, Ανταρκτική) σχηματίστηκαν κάτω από πιέσεις ανώτερες των 800 MPa, κάτι που δείχνει σχηματισμό σε βαθύτερα σημεία του φλοιού. Αυτή, συγκεκριμένα, είναι η περίπτωση των βασικών/μαφικών γρανουλιτών, αλλά, ακόμα και πετρώματα πηλιτικής σύστασης μπορούν να ανακρυσταλλωθούν σε γρανουλίτες κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες. Η γρανουλιτική φάση μεταμόρφωσης μπορεί να διαιρεθεί σε 4 κατηγορίες:

Οι γρανουλίτες σχηματίζονται σε περιοχές του φλοιού όπου η καθαρά υγρή φάση του νερού είναι απύσχα από τα πετρώματα. Εάν υπάρχει μειωμένη ενεργότητα νερού, και όχι πλήρης απουσία του, η θερμοκρασία τήξης των πετρωμάτων ανεβαίνει, αναλογικά με την ενεργότητα του νερού. Για τη δημιουργία γρανουλιτικών παραγενέσεων, πρέπει να υπάρχει σχεδόν μηδενική ενεργότητα νερού, διαφορετικά οι παραγενέσεις που δημιουργούνται είναι συνήθως αμφιβολιτικές. Οι όξινοι γρανουλίτες μπορούν επίσης να δημιουργηθούν εάν υπάρξει απουσία μερικής τήξης και ταυτόχρονα χαμηλή ενεργότητα νερού.

Σε πολύ υψηλή θερμοκρασία, οι παραγενέσεις-δείκτες των γρανουλιτών είναι σπινέλλιος + χαλαζίας (>850 °C), σαπφειρίνης + χαλαζίας (>900 °C), οσουμιλίτης + χαλαζίας, (>950 °C). Ο πιζονίτης μπορεί επίσης να εμφανιστεί σε πετρώματα υψηλού βαθμού μεταμόρφωσης σε θερμοκρασίες άνω των 850–900 °C. Υψηλού βαθμού μεταμορφωμένα πετρώματα με παραγενέσεις-δείκτες για θερμοκρασίες πάνω από 850–900 °C είναι σπάνιες και έχουν καταγραφεί σε εδάφη του Προκάμβριου όπου συνέβη μαζική μεταφορά θερμότητας από τον μανδύα στο μέσο ηπειρωτικό φλοιό μέσω ξηρών πυριγενών διεισδύσεων, όπως π.χ. , ζώνες επαφής γύρω από συμπλέγματα ανορθοσιτών.

4.2 ΜΕΤΑΜΟΡΦΩΣΗ ΥΠΕΡ ΥΨΗΛΗΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ (UHT)

Η μεταμόρφωση υπέρ-υψηλής θερμοκρασίας, αποτελεί μια ακραίου βαθμού μεταμορφική διαδικασία, με θερμοκρασίες που ξεπερνούν τους 900 °C. Ήδη, από τις αρχές της δεκαετίας του 1980, αναγνωρίστηκαν γρανουλιτικά πετρώματα που είχαν μεταμορφωθεί σε τέτοιες θερμοκρασίες. Παρόλα αυτά η UHT μεταμόρφωση αναγνωρίστηκε ως συχνό φαινόμενο από τη γεωλογική κοινότητα περίπου μια δεκαετία αργότερα. Αποδείχθηκε, με τη βοήθεια πειραμάτων αλλά και θερμοδυναμικών σχέσεων στον φλοιό της γης, ότι ορισμένες γρανουλιτικές παραγενέσεις μπορούν να αντέξουν θερμοκρασίες της τάξης των 900 αλλά ακόμα και 1100 °C, με ή χωρίς να υποστούν μερική τήξη, σε πιέσεις 7-13 kbar.

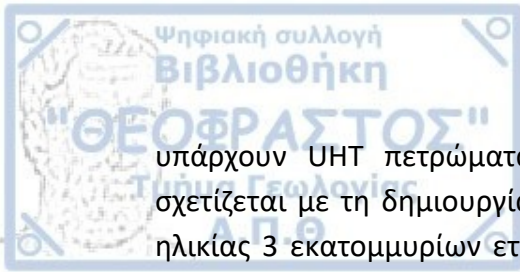
Οι παραγενέσεις που παρατηρήθηκαν σε αυτά τα πετρώματα περιείχαν αργιλικό ορθοπυρόξενο + σιλλιμανίτη + σαπφειρίνη + γρανάτη + κορδιερίτη + σπινέλλιο + χαλαζία, κυρίως σε μεταπηλίτες και χαλαζίτες.

Πετρολογικοί δείκτες UHT μεταμορφισμού μπορούν συνήθως να βρεθούν σε πετρώματα εξαιρετικά πλούσια σε μαγνήσιο και αργίλιο, τα οποία είναι συνήθως ξηρά και ρεσιτικά. Παραγενέσεις όπως σαπφειρίνης + χαλαζίας, ορθοπυρόξενο + σιλλιμανίτης + χαλαζίας, παρουσία οσουμιλίτη, καθώς και σπινέλλιος + χαλαζίας αποτελούν ισχυρές αποδείξεις για τέτοιες ακραίες συνθήκες.

Οι συνθήκες UHT σπάνια προσδιορίζονται από γρανουλίτες που ψύχονται αργά χρησιμοποιώντας συμβατική γεωθερμομετρία, κυρίως λόγω της τάσης της θερμομετρίας Fe-Mg να καταγράφει θερμοκρασίες 700–850°C. Ο καλύτερος δείκτης συνθηκών UHT παραμένει η διατήρηση υψηλού ποσοστού Al_2O_3 (8–12 wt%) σε ορθοπυρόξενο που συνυπάρχει με γρανάτη, σιλλιμανίτη ή σαπφειρίνη.

Οι συνθήκες πίεσης-θερμοκρασίας που έχουν καταγραφεί έως τώρα για τα UHT πετρώματα, διαφέρουν. Έχουν καταγραφεί και περιπτώσεις ισοβαρούς ψύξης αλλά και περιπτώσεις ισοθερμικής αποσυμπίεσης σε διαφορετικά UHT πετρώματα, με αρκετές ομοιότητες, κάτι που μπορεί να δείχνει το τελικό στάδιο της ορογενετικής τεκτονικής.

Πλέον, πετρώματα υπέρ-υψηλής θερμοκρασίας έχουν αναγνωριστεί σε όλο τον πλανήτη και το εύρος ηλικίας τους εκτείνεται από ηλικίες 3 δισεκατομμυρίων ετών μέχρι και 35 εκατομμυρίων ετών και σχετίζονται με σημαντικά γεωλογικά συμβάντα. Περισσότερες από 46 τοποθεσίες έχουν αναγνωριστεί, σχετιζόμενες με συγκλίνοντα αλλά και αποκλίνοντα τεκτονικά γεγονότα/περιβάλλοντα, δηλαδή με τα 2 βασικά συστήματα ορογένεσης στη Γη. Μερικά παραδείγματα είναι, τα Αρχαιοζωικά UHT πετρώματα στην ανατολική Ανταρκτική, στη Νότιο Αφρική, στη Ρωσία και στον Καναδά. UHT γρανουλίτες έχουν εντοπιστεί στη βόρεια κρατονική ασπίδα της Κίνας, οι οποίοι σχηματίστηκαν κατά την επαύξηση της υπερηπείρου Columbia, περίπου 1.8-1.5 δισεκατομμύρια χρόνια πριν. Στην περιοχή Eastern Ghats Province της Ινδίας



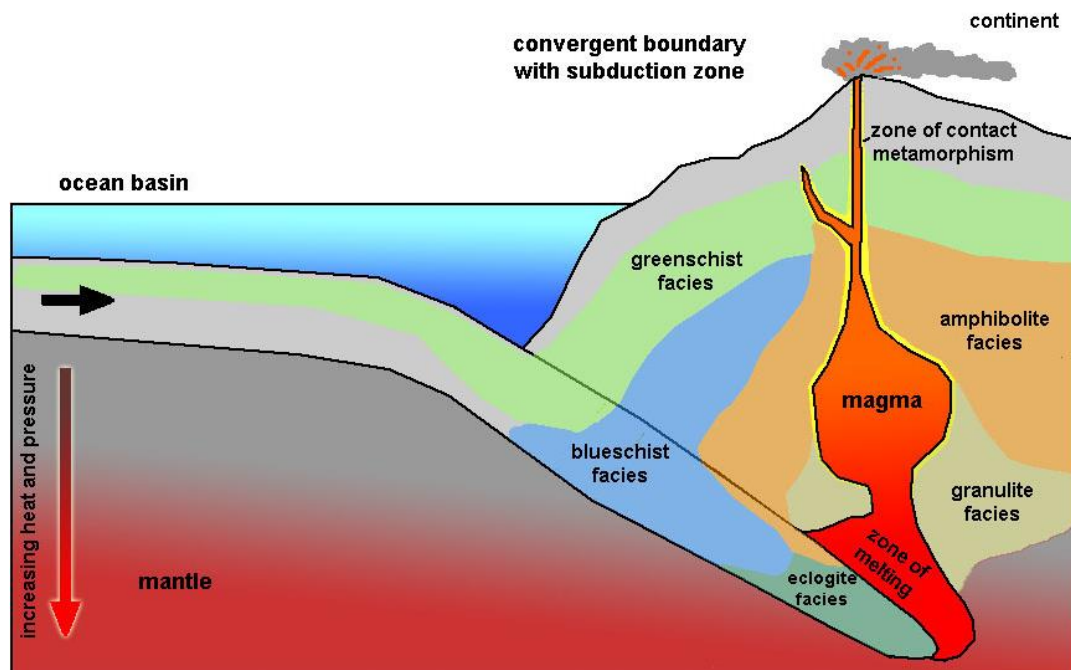
υπάρχουν UHT πετρώματα της Νεοπροτεροζωικής ορογένεσης Grenville, που σχετίζεται με τη δημιουργία της υπερηπείρου Ροδηνίας. Πιο πρόσφατα, ξενόλιθοι ηλικίας 3 εκατομμυρίων ετών στην Qiangtang δείχνουν ότι κάτω από το κεντρικό Θιβέτ υπάρχει ενεργή μεταμόρφωση UHT.

Παλαιότερα, είχε προταθεί η συσχέτιση μεταξύ του σχηματισμού υπερηπείρων στο Προκάμβριο και της UHT μεταμόρφωσης. Ωστόσο, η παρατήρηση των ακραίων μεταμορφικών επεισοδίων στα συγκλίνοντα περιθώρια δείχνει ότι η δημιουργία υπερηπείρων σχετίζεται με περιοχική μεταμόρφωση υπερ υψηλής πίεσης, στην εκλογιτική φάση μεταμόρφωσης με χαμηλές θερμοβαθμίδες της τάξης των 10 °C/km. Τα επεισόδια UHT μεταμόρφωσης έχουν συνδυαστεί χωρικά και χρονικά με τη διάσπαση και τη διάρρηξη υπερηπείρων.

4.3 ΓΕΩΤΕΚΤΟΝΙΚΑ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΑ ΓΕΝΕΣΗΣ ΓΡΑΝΟΥΛΙΤΩΝ

Οι γρανουλιτικές συνθήκες μεταμόρφωσης συναντώνται στις τεκτονικές ζώνες όπου η θερμοκρασία είναι η υψηλότερη δυνατή. Αυτό συμβαίνει στα συγκλίνοντα όρια των λιθοσφαιρικών πλακών, στο κατώτατο μέρος πεπαχυμένου ηπειρωτικού φλοιού και στο ανώτατο τμήμα του μανδύα.

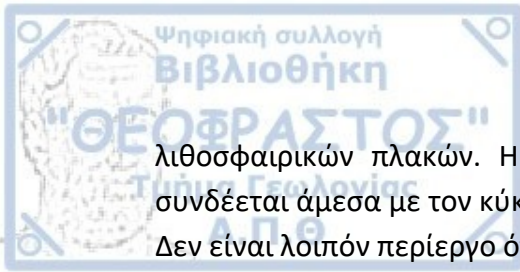
Οι γρανουλίτες σχηματίζονται με περιοχική μεταμόρφωση πετρωμάτων στα συγκλίνοντα όρια των λιθοσφαιρικών πλακών. Αυτά εντοπίζονται στα όρια γειτονικών πλακών που συγκλίνουν, με αποτέλεσμα την επώθηση της μιας επάνω στην άλλη, η οποία βυθίζεται. Οι γρανουλίτες σχηματίζονται σε μεγάλο βάθος στο επωθούμενο τμήμα, αποτελώντας το κατώτατο όριό του (εικ. 4.1).



Εικόνα 4.1. Απεικόνιση περιβάλλοντος σύγκλισης τεκτονικών πλακών και μεταμορφωμένων πετρωμάτων σε αυτό. <https://www.geologyin.com/2016/01/what-is-relationship-between.html>

Το ανερχόμενο μάγμα θερμαίνει με την άνοδό του τα περιβάλλοντα πετρώματα, οδηγώντας σε μια τυπική μορφή μεταμόρφωσης χαμηλής πίεσης-υψηλής θερμοκρασίας. Στον κατώτερο φλοιό, το μάγμα δημιουργείται από τη μερική τήξη, σαν συνέπεια υψηλού βαθμού μεταμόρφωσης των περιβάλλοντων πετρωμάτων.

Η ορογενετική μεταμόρφωση χαρακτηρίζεται από 2 διαφορετικούς τύπους περιοχικής μεταμόρφωσης, οι οποίοι είναι χρονικά συνεχείς. Αρχικά, υπάρχει μεταμόρφωση υψηλής πίεσης-χαμηλής θερμοκρασίας, καθώς η μια πλάκα υποβυθίζεται, και η πίεση αυξάνεται ραγδαία. Έπειτα, ακολουθεί μια μεταμορφική φάση με ενδιάμεση θερμοκρασία και πίεση, η οποία συνδέεται με τη σύγκρουση των



λιθοσφαιρικών πλακών. Η δυαδικότητα αυτή της ορογενετικής μεταμόρφωσης συνδέεται άμεσα με τον κύκλο Wilson.

Δεν είναι λοιπόν περίεργο ότι οι εμφανίσεις γρανουλιτών παγκοσμίως βρίσκονται σε μεγάλες ορογενετικές ζώνες, όπως, π.χ. οι Άλπεις.

Οι γρανουλίτες είναι μια ευρεία κατηγορία μεταμορφωμένων πετρωμάτων. Λόγω των πολλών ορυκτών δεικτών που έχουν, είναι σχετικά εύκολο να διαχωριστούν από τα υπόλοιπα μεταμορφωμένα πετρώματα. Παρότι μπορούν να προέλθουν από πυριγενή πετρώματα, αλλά και μεταπηλίτες, εμφανίζουν χαρακτηριστικό ιστό και παραγενέσεις. Πολλές από αυτές είναι σημαντικά γεωθερμόμετρα/γεωβαρόμετρα, και μπορούν να δώσουν σημαντικά στοιχεία στους ερευνητές. Όντας πετρώματα του βαθύ ηπειρωτικού φλοιού, οι εμφανίσεις τους είναι λιγότερες συγκριτικά με πετρώματα χαμηλότερου βαθμού μεταμόρφωσης. Η εύρεση γρανουλιτικών πετρωμάτων υπερ υψηλής θερμοκρασίας απέδειξε ότι ορισμένες παραγενέσεις μπορούν να αντέξουν σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες χωρίς να υποστούν τήξη, εφόσον υπάρχουν οι κατάλληλες συνθήκες.



Bucher, K., & Grapes, R. (2011). *Petrogenesis of metamorphic rocks*. Springer Science & Business Media.

Harley S.L., (1998). *On the occurrence and characterization of ultrahigh-temperature crustal metamorphism*". Geological Society, London, Special Publications.138 (1): 81–107.

Harlov, D. E. (2012). *The potential role of fluids during regional granulite-facies dehydration in the lower crust*. Geoscience Frontiers, 3(6), 813-827.

Pattison, D. R., Chacko, T., Farquhar, J., & McFarlane, C. R. (2003). *Temperatures of granulite-facies metamorphism: constraints from experimental phase equilibria and thermobarometry corrected for retrograde exchange*. Journal of Petrology, 44(5), 867-900.

Vernon, R. H. & Clarke, G. L. (2008): *Principles of Metamorphic Petrology*. Cambridge University Press.

<http://www.alexstrekeisen.it>

<http://www.geo.auth.gr/courses/gmo/gmo212y/>

<http://www.geo.auth.gr/courses/gmo/gmo425y/>

<http://www.geo.auth.gr/courses/gmo/gmo761e/>

<http://www.geo.auth.gr/106/>

<https://www.sandatlas.org>

<https://www.geologyin.com>

<https://www.chemeurope.com/en/encyclopedia/Granulite.html>