

ΠΕΤΡΟΛΟΓΙΑ ΤΩΝ ΜΕΤΑΜΟΡΦΩΜΕΝΩΝ ΥΠΕΡΜΑΦΙΚΩΝ ΠΕΤΡΩΜΑΤΩΝ ΤΗΣ ΑΝΩΤΕΡΗΣ ΤΕΚΤΟΝΙΚΗΣ ΕΝΟΤΗΤΑΣ ΣΤΗΝ ΑΝΑΤΟΛΙΚΗ ΡΟΔΟΠΗ. ΣΥΜΒΟΛΗ ΣΤΗ ΜΕΤΑΜΟΡΦΙΚΗ ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΗΣ ΡΟΔΟΠΙΚΗΣ ΖΩΝΗΣ

Ε. Μπόσκος*, Β. Περδικάτσης** και Α. Ηλιάδης**

ΣΥΝΟΨΗ

Στα υπερμαφικά πετρώματα της ανώτερης τεκτονικής ενότητας, στην Αν. Ροδόπη, διακρίνονται πέντε διαδοχικά στάδια μεταμόρφωσης. Το πρώτο στάδιο χαρακτηρίζει την προϊούσα πορεία της μεταμόρφωσης σε συνθήκες αμφιβολιτικής φάσης και αντιπροσωπεύεται από εγκλείσματα χλωρίτη, ολιβίνη και τρεμολίτη σε ορθοπυρόξενο. Το δεύτερο στάδιο αντιπροσωπεύεται από την παραγένεση υψηλών πιέσεων γρανάτης+ολιβίνης και έλαβε χώρα σε συνθήκες P-T μεταξύ 13.5-16 Kbar και 750^ο-775^οC. Τα επόμενα στάδια, στα οποία η προσφορά νερού έπαιξε κυρίαρχο ρόλο, δείχνουν σταδιακή ελάττωση της πίεσης και της θερμοκρασίας. Στο στάδιο 3 σχηματίστηκαν κερροστίλβη+ολιβίνης εις βάρος του κλινοπυρόξενου, ορθοπυρόξενου και σπινελίου ή γρανάτη και συμπλεκτίτες ενστατίτη-σπινελίου-διοψιδίου εις βάρος του γρανάτη και ολιβίνη. Στο στάδιο 4 οι συνθήκες μεταμόρφωσης ήταν αμφιβολιτικής έως ανώτερης πρασινοσχιστολιθικής φάσης, όπως τεκμηριώνεται από τις παραγενέσεις: τρεμολίτης+ολιβίνης+χλωρίτης, τρεμολίτης+ολιβίνης+ χλωρίτης+τάλκης, ολιβίνης+ τάλκης+ αντιγορίτης. Το τελευταίο μεταμορφικό επεισόδιο έλαβε χώρα σε θερμοκρασίες χαμηλότερες των 400^οC, στο πεδίο σταθερότητας του πρενίτη και διασπόρου.

ABSTRACT

In the ultramafic rocks of the polymetamorphic upper tectonic unit of East Rhodope five distinct metamorphic stages are recognized. The first stage is represented by inclusions of chlorite, tremolite and olivine in orthopyroxene and was developed during prograde metamorphism. Subsequent high-pressure metamorphism (stage 2) is characterized by the mineral paragenesis garnet+olivine and P-T conditions between 13.5-16 Kbar and 750^ο-775^οC. The following metamorphic stages, indicate progressive decrease in pressure and temperature, while influx of water played a major role. In stage 3 hornblende+olivine were formed at the expense of orthopyroxene+ clinopyroxene+spinel or garnet, and symplectites of enstatite+ spinel+ diopside developed at the expense of garnet+olivine. Stage 4 is characterized by amphibolite- to upper greenschist-facies conditions, as indicated by the mineral parageneses: tremolite+ olivine+chlorite, tremolite+olivine+chlorite+talc, olivine+talc+ antigorite. The last stage took place at temperatures below 400^οC, within the stability field of prehnite and diaspore.

* National Technical University of Athens, Section of Geological Sciences.
** IGME.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ - INTRODUCTION

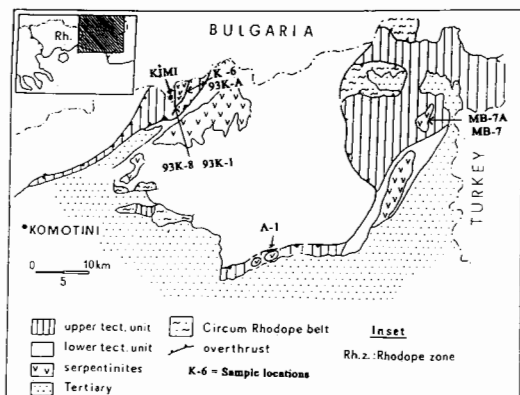
Πετρολογικές έρευνες στο Ελληνικό τμήμα της Ροδόπης απεκάλυψαν ότι η Ροδόπη επηρεάστηκε από τρία, διαδοχικά, κύρια μεταμορφικά επεισόδια: μεταμόρφωση υψηλών πιέσεων που οδήγησε στο σχηματισμό εκλογιτών, μεταμόρφωση μεσαίων πιέσεων και χαμηλών πιέσεων ανάδρομη μεταμόρφωση, κατώτερης πρασινοσχιστολιθικής φάσης (Mroskos 1989, Liati and Mroskos 1990, Mroskos and Liati 1993). Σημαντικές διαφορές στο βαθμό μεταμόρφωσης σε άμεσα γειτνιάζοντα πετρώματα, (της τάξεως των 150°C) για το επεισόδιο των μεσαίων πιέσεων, οδήγησαν στη διάκριση δύο κύριων τεκτονικών ενότητων, μιας κατώτερης με συνθήκες μεταμόρφωσης ανώτερης πρασινοσχιστολιθικής - κατώτερης αμφιβολιθικής φάσης και μιας ανώτερης, με συνθήκες μέσης έως ανώτερης αμφιβολιθικής φάσης (Mroskos and Liati 1993, Fig.1).

Οι συνθήκες P-T που επικράτησαν στα διάφορα στάδια της μεταμορφικής εξέλιξης στην κατώτερη τεκτονική ενότητα, προσδιορίστηκαν σε ικανοποιητικό βαθμό από τους Mroskos (1989), Liati and Mroskos (1990) και Mroskos and Liati (1993). Για την ανώτερη τεκτονική ενότητα παραμένει ακόμη αδιευκρίνιστη η προϋούσα πορεία της μεταμόρφωσης των υψηλών πιέσεων καθώς και εκείνης που χαρακτηρίζει τα πρώτα στάδια αποσυμπίεσης.

Η εργασία αυτή έχει ως στόχο να προσθέσει νεότερα στοιχεία σχετικά με την μεταμορφική εξέλιξη της ανώτερης τεκτονικής ενότητας, με βάση τις ορυκτολογικές παραγενέσεις που μελετήθηκαν σε υπερμαφικά πετρώματα από την Ανατολική Ροδόπη.

ΓΕΩΛΟΓΙΚΗ ΤΟΠΟΘΕΤΗΗ - GEOLOGICAL SETTING

Στην εικόνα 1 φαίνονται η έκταση και τα όρια των δύο τεκτονικών ενότητων της Ροδόπης, στο ανατολικό της τμήμα. Η κατώτερη τεκτονική ενότητα αποτελείται από γρανιτογενείς, ως κατώτερο λιθολογικό σχηματισμό και μια μεταρραβιστείο-ιζηματογενή σειρά, που αποτελείται κυρίως από μεταπηλίτες, με παρεμβολές αμφιβολιτιωμένων εκλογιτών και αμφιβολιτών. Μεγάλα υπερμαφικά σώματα, όπως εκείνα της Σμιγάδας-Εσωχής και του Σουφλίου, συνοδευόμενα από μεταβασίτες, παρεμβάλλονται στις λιθολογίες της ενότητας αυτής. Η ανώτερη τεκτονική ενότητα αποτελείται από μιγματιτιωμένους ορθογενείς, παραγενέσιους και μεταπηλίτες, επίσης μιγματιτιωμένους, με παρεμβολές αμφιβολιτιωμένων εκλογιτών, αμφιβολιτών και μαρμάρων. Υπερμαφικά σώματα μικρών σχετικά διαστάσεων, συνοδευόμενα από μεταβασίτες, παρεμβάλλονται στους μεταπηλίτες και παραγενέσιους. Στο ανατολικό τμήμα της περιοχής, εμφανίζονται επί πλέον στρωματομόρφα μεταγαββρικά πετρώματα, μεταδιορίτες και μετατροντυγιμίτες. Μοσχοβιτικοί κυρίως πηγματίτες διαπερνούν όλες τις λιθολογίες της ανώτερης τεκτονικής ενότητας. Στους μεταδιορίτες και μεταγαββρους, οι πηγματίτες έχουν συχνά τροντυγιμιτική σύσταση.



Εχ.1: Απλοποιημένος γεωλογικός χάρτης της Αν.Ροδόπης, με τις θέσεις δειγματοληψίας υπερμαφικών πετρωμάτων από την ανώτερη τεκτονική ενότητα.

Fig.1: Simplified geological map of E.Rhodope, showing the sample locations of ultramafic rocks from the upper tectonic unit.

ΠΕΤΡΟΓΡΑΦΙΑ - PETROGRAPHY

Στην εικόνα 1 δίδονται οι θέσεις στις οποίες εμφανίζονται τα υπερμαφικά πετρώματα της ανώτερης τεκτονικής ενότητας, τα οποία περιλαμβάνονται στην παρούσα μελέτη. Μεταξύ αυτών κυριαρχούν μεταπεριδοτίτες, κυρίως λερζολιθικού τύπου. Πρόκειται για φακοειδή σώματα μήκους ορισμένων εκατοντάδων μέτρων, που σπάνια υπερβαίνουν τα χίλια μέτρα. Οπου έχουν υποστεί έντονη παραμόρφωση, παρουσιάζουν σαφή σχιστότητα και πορφυροκλαστικό ιστό, με πορφυροκλάστες πρωτογενών (μανδουακών) μεγακρυστάλλων πυροξένων, οι οποίοι αργότερα ανακρυσταλλώθηκαν σε συσσωματώματα ορθο- και κλινοπυροξένων. Ακανόνιστα σώματα δουνιτικής σύστασης εμφανίζονται, κατά θέσεις, εντός των λερζολιθικών σωμάτων.

Στο νοτιοανατολικό άκρο του λερζολιθικής σύστασης υπερμαφικού σώματος της Κύμης (Σχ.1), στη θέση Καλύβια, εντοπίστηκαν υπερμαφικά πετρώματα με σαφή στρωμάτωση (layering), τα οποία πιθανώς αποτελούν τμήμα μιας υπερμαφικής-μαφικής "σωριτικής" σειράς. Αποτελούνται από εναλλασσόμενες λεπτές διαστρώσεις γρανατούχων μεταπεριδοτιτών, που πιθανώς αντιπροσωπεύουν πρώην πλαγιοκλαστούχους δουνίτες, πάχους ορισμένων mm μέχρι 2 cm, με γρανατούχους πυροξενίτες (σωριτικούς μεταγάββρους), πάχους ενός mm μέχρι 3cm, και μεταπυροξενίτες πάχους 1mm μέχρι 1cm. Μέλη της σειράς αυτής αποτελούν και στρωματόμορφοι σπινελιούχοι-γρανατούχοι κλινοπυροξενίτες (σωριτικοί μεταγάββροι), των οποίων το πάχος φθάνει μέχρι δύο μέτρα. Τόσο οι μεταπεριδοτίτες όσο και οι μεταγάββροι παρουσιάζουν ορυκτολογικά αθροίσματα και υφές, που προέκυψαν από πλήθος αντιδράσεων, οι οποίες αντανακλούν μια πολυφασική τεκτονομεταμορφική εξέλιξη. Από την πετρογραφική ανάλυση ενός μεγάλου αριθμού δειγμάτων διαπιστώθηκε ότι, τα πετρώματα αυτά παρουσιάζουν μια μεταμορφική εξέλιξη πέντε τουλάχιστον διαδοχικών σταδίων. Μεμονωμένα δείγματα περιέχουν συνήθως ορυκτολογικά αθροίσματα που χαρακτηρίζουν βλάστηση ορυκτών κατά τη διάρκεια δύο ή περισσότερων σταδίων. Ποτέ, όμως, δεν περιέχουν ορυκτά που χαρακτηρίζουν όλα τα στάδια της μεταμορφικής τους εξέλιξης. Στον Πίνακα 1 δίδονται τα ορυκτολογικά αθροίσματα αντιπροσωπευτικών δειγμάτων, καθώς και τα μεταμορφικά επεισόδια στα οποία σχηματίστηκαν τα αντίστοιχα ορυκτά σε κάθε δείγμα, σύμφωνα με την πετρογραφική ανάλυση.

Η παραμόρφωση των υψηλών πιέσεων (στάδιο 2), τεκμηριώνεται με την παραγένεση γρανάτης+ολιβίνης στους μεταπεριδοτίτες και μεταγάββρους της περιοχής Κύμης. Στους μεταγάββρους (δείγματα 93K-8A, 93K-1Γ, 93K-3E και 93K-7, Πίν. 1), το στάδιο αυτό αντιπροσωπεύεται από την παραγένεση γρανάτης+κλινοπυροξένου+τσερμακίτη κερροσίλβη±ολιβίνης±σπινέλιος. Οι κλινοπυροξένοι περιέχουν συχνά απομίξεις γρανάτη (Σχ. 2A) ή σπινέλιου, γεγονός που χαρακτηρίζει τη μετάβαση των λιθολογιών αυτών από ένα στάδιο υψηλών θερμοκρασιών (μαγματικό) στις συνθήκες του σταδίου των υψηλών πιέσεων. Στους μεταπεριδοτίτες (δείγμα 93K-8B, Πίν.1), εγκλείσματα γρανάτη, συχνά με διαβρωμένα άκρα (Σχ. 2B και C), διοψίδιου και ενστατίτη σε κερροσίλβη και ολιβίνη, τεκμηριώνουν στις λιθολογίες αυτές το στάδιο των υψηλών πιέσεων. Στους μη γρανατούχους μεταπεριδοτίτες λερζολιθικού τύπου, το στάδιο των υψηλών πιέσεων αντιπροσωπεύεται από την μη κρίσιμη για το στάδιο αυτό παραγένεση ενστατίτης+διοψίδιου+Cr-ούχος σπινέλιος (Sp1₂, δείγμα 93K-A, Πίν.1).

Πορφυροκλάστες ορθοπυροξένου και κλινοπυροξένου, με απομίξεις σπινελίου και διοψιδίου ή ενστατίτη, αντίστοιχα, καθώς και Cr-ούχος σπινέλιος με ζωνώδη σύσταση, με μεγαλύτερη περιεκτικότητα σε χρώμιο στο κέντρο του κρυστάλλου (Sp1₁ Πίν.1), σε σχέση με την εξωτερική ζώνη (βλέπε ορυκτοχημεία), αντιπροσωπεύουν υπολειμματικές φάσεις υψηλών θερμοκρασιών του μανδουακού σταδίου.

Τα στοιχεία που τεκμηριώνουν το στάδιο 1 είναι αρκετά περιορισμένα. Στον μεταπεριδοτίτη MB-7A, (Πίν.1), στο ανατολικό τμήμα της Ανατολικής Ροδόπης

Πίνακας 1: Ορυκτολογικά αθροίσματα αντιπροσωπευτικών δειγμάτων υπερμαφικών πετρωμάτων της ανώτερης τεκτονικής ενότητας στην Ανατολική Ροδόπη. Τα ορυκτά είναι ταξινομημένα στα διάφορα μεταμορφικά στάδια που σχηματίσθηκαν.

Table 1: Mineral assemblages of representative samples of ultramafic rocks from the upper tectonic unit in East Rhodope. The minerals are classified in the metamorphic stages they are formed. Mineral abbreviations are from Kretz (1983).

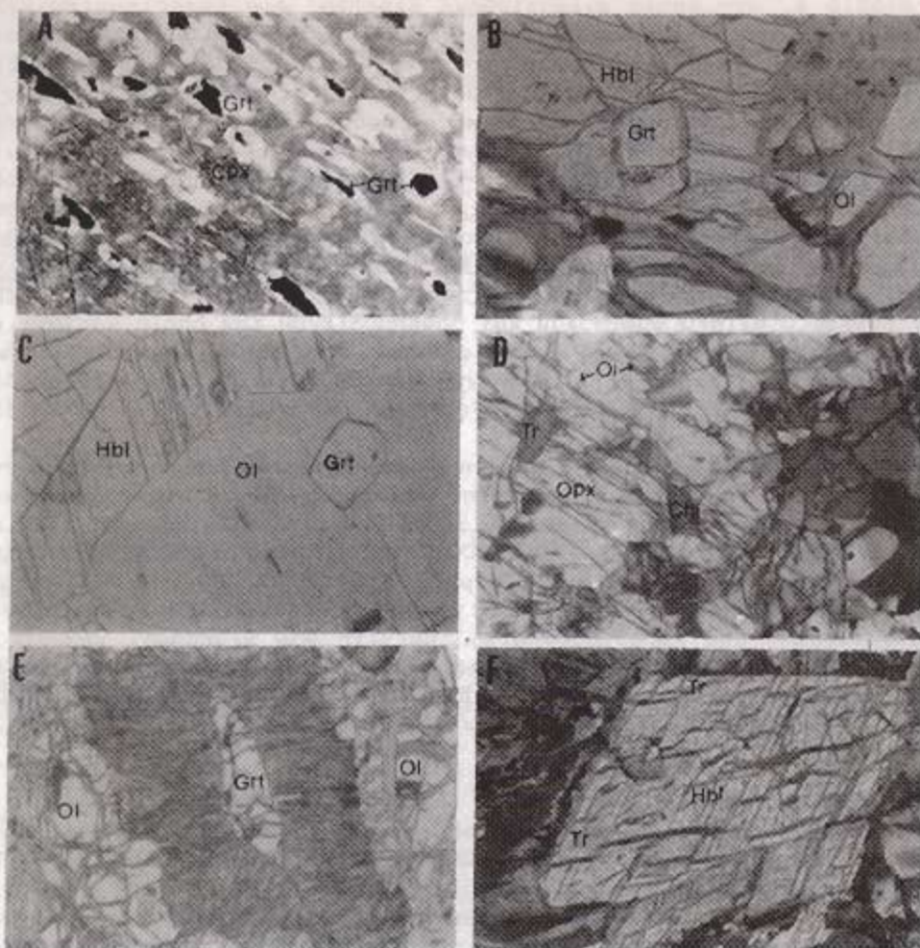
	Στάδιο 1	Στάδιο 2	Στάδιο 3	Στάδιο 4	Στάδιο 5
Τύπος πετρώματος	Μεταπεριδοίτης (πρώην λερζόλιθος Κ6, 93Κ-Α, ΜΒ-7Α, πρώην χαρτσβουργίτης ΜΒ-7, Α1)				
Κ-6	Ορυ ₁ , Ορυ ₁ , Ολι ₁ , Σπ ₁	Ορυ ₂ , Ορυ ₂ , Σιρ ₂ , (Γρτ)	Αμρ ₃ , Ολι ₃		Χλι ₃ , Ctl, Mag
93Κ-Α		Ορυ ₂ , Ορυ ₂	Αμρ ₃ , Ολι ₃	Αμρ ₄ , Χλι ₂ , Τlc, Σπ ₄	Χλι ₃ , Ctl, Mag
ΜΒ-7Α	(Αμρ ₁) (Ολι) (Χλι ₁)	Ορυ ₂ , Χλι ₁		Ολι ₄ , Αμρ ₄ , Χλι ₂ , Σπ ₄	Ctl, Mag
ΜΒ-7	(Αμρ ₁), (Ολι)	Ορυ ₂ , Χλι ₁		Ολι ₄ , Αμρ ₄ , Χλι ₂ , Τlc, Ατγ, Σπ ₄	Ctl, Mag
Λ-1				Ολι ₄ , Τlc, Ατγ, Σπ ₄	
Γρανατούχοι μεταπεριδοίτες (σωριτική σειρά)					
99Κ-8Β	Ολι ₁ , Σπ ₁	Ορυ ₂ , Ορυ ₂ , Σπ ₂ , Γρτ	Ορυ ₃ , Ορυ ₃ , Σιρ ₃ , Αμρ ₃ , Ολι ₂		Χλι ₃ , Ctl, Mag
Γρανατούχοι μεταγάββροι (σωριτική σειρά)					
93Κ-8Α	(Ιilm)	Ορυ ₂ , Γρτ, Ιilm	Ορυ ₃ , Ορυ ₃ , Σιρ ₃		
93Κ-1Γ	Ορυ ₁ , (Ιilm)	Ορυ ₂ , Γρτ, Αμρ ₂ , Ιilm			Χλι ₃
Σπινελιούχοι - γρανατούχοι μεταγάββροι (σωριτική σειρά)					
93Κ-3Ε		Ολι ₂ , Ορυ ₂ , Γρτ, Σπ ₂ , Αμρ ₂	Ορυ ₃ , Ορυ ₃ , Σιρ ₃		
93Κ-7	Ορυ ₁ , (Ιilm)	Ορυ ₂ , Γρτ, Σπ ₂ , Αμρ ₂ , Ιilm			Χλι ₃ , Dsp, Frh, Αμρ ₅ , Czo

Σύμβολα ορυκτών από Kretz (1983); Επιπλέον Αμρ=αμφίβολος, Dsp=διάσπορο.

Το στάδιο 1 αντιπροσωπεύεται από ορυκτά υψηλών θερμοκρασιών (μαγματικού ή μανδουακού σταδίου), εκτός από τα δείγματα ΜΒ-7 και ΜΒ-7Α, στα οποία αντιπροσωπεύεται από ορυκτά μεταμόρφωσης, προγενέστερης του σταδίου 2 (βλέπε κείμενο). Στο δείγμα 93Κ-8Α το στάδιο 3 αντιπροσωπεύεται από συμπλεκτίτες ορθοπυρόξενου-σπινελίου-κλινο-πυρόξενου που σχηματίσθηκαν από την αντίδραση του γρανάτη του δείγματος 93Κ-8Α και του ολιβίνη του δείγματος 93Κ-8Β στα όρια των δύο λιθολογιών.

(Σχ. 1), ορθοπυρόξενος (του σταδίου 2), περιέχει εγκλείσματα ολιβίνη, τρεμολίτη και Mg-ούχου χλωρίτη (Σχ. 2D). Τα εγκλείσματα αυτά δείχνουν ότι, η προϊούσα πορεία προς τη μεταμόρφωση υψηλών πιέσεων πέρασε από τις συνθήκες της αμβιβολιτικής φάσης, ενώ παράλληλα δεν ξεπέρασε το ανώτατο όριο σταθερότητας του χλωρίτη.

Σε αντίθεση με το στάδιο 2, στο οποίο η μεταμόρφωση των μεταπεριδοιτών της περιοχής Σμιγάδας-Κύμης έλαβε χώρα πιθανώς κάτω από "άνυδρες" συνθήκες, όπως δείχνουν οι αντίστοιχοι ορυκτολογικοί παραγενέσεις, τα στάδια 3 έως 5 χαρακτηρίζονται από τη βλάστηση ένυδρων ορυκτών, τεκμηριώνοντας συγχρόνως μια μεταμορφική εξέλιξη των πετρωμάτων αυτών και πιθανώς ολόκληρης της ανώτερης τεκτονικής ενότητας, κατά την οποία η προσφορά νερού έπαιξε κυρίαρχο ρόλο. Στους σπινελιούχους μεταπεριδοίτες της περιοχής Κύμης, το στάδιο 3 τεκμηριώνεται με την βλάστηση τσερμακιτικής κεροσίλβης+ολιβίνη εις βάρος του ορθοπυρόξενου, κλινοπυρόξενου και σπινελίου που ενδεχομένως σχηματίσθηκαν στο στάδιο 2. Στους γρανατούχους μεταπεριδοίτες της "σωριτικής" σειράς η παραγένεση κεροσίλβη+ολιβίνης σχηματίζεται εις βάρος του γρανάτη, κλινοπυρόξενου και ορθοπυρόξενου (Σχ. 2B και C). Κρίσιμη παραγένεση του σταδίου αυτού αποτελούν συμπλεκτίτες ορθοπυρόξενου-σπινελίου-κλινοπυρόξενου (Σχ. 2E), που σχηματίσθηκαν εις βάρος του γρανάτη και ολιβίνη στη διάσπρωση του σωριτικού μεταγάββρου 93Κ-3Ε και στα όρια των ταινιωτών διαστρώσεων, στις οποίες εναλλάσσονται σωριτικοί μεταγάββροι με μεταπεριδο-



Σχ. 2: Α: Κλινοπυρόξενος με απομίξεις γρανάτη σε σπινελιούχο-γρανατούχο μεταγάββρο (δείγμα 93Κ-7), //Nicols. Β και C: Παραγένεση κερροσίλβης-ολιβίνη (στάδιο 3) σε μετοπεριδοτίτη (δείγμα 93Κ-8Β). Εγκλεισμα γρανάτη του σταδίου 2 σε κερροσίλβη (Β) και σε ολιβίνη (C). Ο ολιβίνης έχει υποστεί πλήρη σερπεντινίωση, //Nicols. D: Εγκλείσματα χλωρίτη, τρεμολίτη και ολιβίνη (στάδιο 1) σε ορθοπυρόξενο. Χλωριτούχος μεταπεριδοτίτης (δείγμα ΜΒ-7Α), Nicols ημιδιασταυρωμένα. E: Συμπλεκτίτες ενστατίτη-σπινελίου-διοψιδίου (στάδιο 3) αναπτύσσονται εις βάρος του γρανάτη και ολιβίνης του σταδίου 2 (δείγμα 93Κ-8Β), //Nicols. F: Κερροσίλβη του σταδίου 3 (Hbl) αντικαταστάθηκε στο εξωτερικό τμήμα της κατά το στάδιο 4 από τρεμολίτη (Tr), //Nicols.

Fig.2: A: Clinopyroxene with garnet exsolutions in spinel-garnet metagabbro (sample 93K-7), //Nicols. B and C: Hornblende-olivine paragenesis (stage 3) in metaperidotite (sample 93K-8B), Garnet of stage 2 included in Hornblende (B) and olivine (C). Olivine is serpentinized, //Nicols. D: Inclusions of chlorite, tremolite and olivine (stage 1) in orthopyroxene, chlorite metaperidotite (sample MB-7A), Nicols half crossed. E: Enstatite-spinel-diopside symplectites (stage 3) formed at the expense of garnet-olivine (stage 2), (sample 93K-8B), //Nicols. F: Hornblende (Hbl) of stage 3 replaced by tremolite (Tr) in stage 4, //Nicols.

τίτες. Χαρακτηριστικό είναι ότι, εκεί όπου μεταξύ γρανάτη και ολιβίνη παρεμβάλλεται κλινοπυρόξενος ή αμφίβολος, δεν σχηματίστηκαν συμπλεκτίτες, παραμένοντας έτσι στο στάδιο 3 ολιβίνης και γρανάτης ως μετασταθείς φάσεις.

Το στάδιο 4, στο οποίο σχηματίστηκε χλωρίτης εις βάρος του σπινελίου, χαρακτηρίζεται από παραγενέσεις αμφιβολιτικής έως ανώτερης πρασινοσχιστολιθικής φάσης όπως: τρεμολίτης-χλωρίτης-ολιβίνης-Cr-ούχος μαγνητίτης (δείγμα MB-7A, Πίν.1), τρεμολίτης-χλωρίτης-τάλκης-Cr-ούχος μαγνητίτης (δείγμα 93K-A), τρεμολίτης-ολιβίνης-χλωρίτης-τάλκης-Cr-ούχος μαγνητίτης (δείγμα MB-7), τρεμολίτης-ολιβίνης-αντιγορίτης (δείγμα MB-7) και ολιβίνης-τάλκης-αντιγορίτης-Cr-ούχος-μαγνητίτης (δείγμα Λ-1). Τρεμολίτης, χλωρίτης και τάλκης αναπτύσσονται εις βάρος ορθοπυρόξενου, τσερμακίτικης κερροσίλβης και σπινελίου (δείγμα 93K-A), όπως δείχνουν υπολείμματα τσερμακίτικης κερροσίλβης σε αμφιβόλους με ζωνώδη σύσταση (Σχ. 2F), στους οποίους το εξωτερικό τμήμα έχει αντικατασταθεί από τρεμολίτη. Στην παραγένεση αυτή, ο τάλκης παρεμβάλλεται, συνήθως, μεταξύ αμφιβόλου και ορθοπυρόξενου τον οποίο και αντικαθιστά. Τρεμολίτης και ολιβίνης αναπτύσσονται εις βάρος κλινοπυρόξενου και ορθοπυρόξενου (δείγμα MB-7A), ολιβίνης και τάλκης εις βάρος ορθοπυρόξενου (δείγμα MB-7 και Λ-1), ενώ αντιγορίτης αντικαθιστά ολιβίνη και τάλκη (δείγμα Λ-1 και MB-7).

Το τελευταίο στάδιο της μεταμόρφωσης χαρακτηρίζεται από την έντονη σερπεντινίωση των μεταπεριδοτιτών, κατά την οποία ο ολιβίνης αντικαθίσταται από χρυσοσίλη, ο ορθοπυρόξενος μετατρέπεται σε βασίτη και η τσερμακίτικη κερροσίλη αντικαθίσταται από μικροκρυσταλλικό μαγνησιούχο πεννίνη. Στις μεταγαββρικές διαστρώσεις, στην περιοχή Κύμης, η μεταμόρφωση του σταδίου αυτού περιορίζεται σε μικρορωγατώσεις, κατά μήκος των οποίων γρανάτης και σπινέλιος αντικαταστάθηκαν από κορουνδοφυλλίτη, πρενίτη και διάσπορο, γρανάτης και κλινοπυρόξενος από χλωρίτη, κλινοζοΐσιτη και λεπτοΐνωδη τρεμολίτη και κερροσίλη από χλωρίτη και πρενίτη. Συμπλεκτίτες ορθοπυρόξενου-σπινελίου του σταδίου 3, αντικαταστάθηκαν στο τελευταίο μεταμορφικό επεισόδιο από χλωρίτη+μαγνητίτη.

ΟΡΥΚΤΟΧΗΜΕΙΑ - MINERAL CHEMISTRY

Η χημική σύσταση των ορυκτών που αναφέρονται στην παρούσα μελέτη, προσδιορίστηκε με ηλεκτρονικό μικροαναλυτή τύπου Jeol Superprob 737 στο IGME. Αντιπροσωπευτικές αναλύσεις δίδονται στον Πίνακα 2.

Γρανάτης: Στους σπινελιούχους-γρανατούχους "σωριτικούς" μεταγάββρους, η χημική σύσταση του γρανάτη, (αντιπροσωπευτικές αναλύσεις 1 και 2 στον πίνακα 2), κυμαίνεται μεταξύ $Grs_{22-29}Prp_{43-49}Alm_{25-30}Sp_{0.5-1.2}$. Στους μη σπινελιούχους "σωριτικούς" μεταγάββρους και στους γρανατούχους μεταπεριδοτίτες η χημική σύσταση του γρανάτη κυμαίνεται μεταξύ $Grs_{13-16}Prp_{58-66}Alm_{21-29}Sp_{0.4-1.6}$. Η διαφορά αυτή στη χημική σύσταση του γρανάτη οφείλεται στην διαφορετική χημική σύσταση των πρωτολίθων. Οι σπινελιούχοι-γρανατούχοι "σωριτικοί" μεταγάββροι παρουσιάζουν χαμηλότερο λόγο $MgO/(MgO+FeO)$ και υψηλότερο σε $CaO/(CaO+MgO+FeO)$ σε σχέση με τους μη σπινελιούχους.

Πυρόξενοι: Στους μεταπεριδοτίτες τόσο οι ορθο- όσο και οι κλινοπυρόξενοι φαίνεται να έχουν ισορροπήσει στις συνθήκες των χαμηλοτέρων θερμοκρασιών, σε σχέση με εκείνες των πρωτολίθων, όπως δείχνει η σχετικά μικρή περιεκτικότητα τους σε Al_2O_3 (0.0-0.3% στους ορθοπυρόξενους και 0.12-0.41% στους κλινοπυρόξενους). Χαμηλές είναι επίσης και οι περιεκτικότητες σε CaO στους ορθοπυρόξενους (0-0.4%), τιμές που χαρακτηρίζουν ορθοπυρόξενους της ανώτερης αμφιβολιτικής έως γρανουλιτικής φάσης. Τιμές <0.15% παρουσιάζουν ορθοπυρόξενοι που συνυπάρχουν παραγενετικά με χλωρίτη+τρεμολίτη+ολιβίνη (Evans 1982). Ο λόγος $Mg/(Mg+Fe)$ είναι υψηλότερος στον κλινοπυρόξενο (0.94-0.95)

Πίνακας 2: Αντιπροσωπευτικές μικροαναλύσεις ορυκτών από υπερμαφικά πετρώματα της ανώτερης τεκτονικής ενότητας στην Ανατολική Ροδόπη.

Table 2: Representative electron-microprobe analyses on minerals from ultramafic rocks of the upper tectonic unit in East Rhodope.

	Γρανάτης				Κλινοπυρόξενος				Αμφίβολος			
	1 ^{εκ}	2	3	4 ¹	5 ^ε	6 ¹	7	8	9	10	11 ^ε	12 ¹
SiO ₂	40.66	40.92	41.51	41.62	50.88	51.40	54.47	45.10	46.47	48.90	48.52	58.66
TiO ₂	0.18	-	-	-	0.53	0.57	-	0.57	0.60	-	0.21	-
Al ₂ O ₃	23.07	23.10	23.51	23.19	5.29	3.40	0.32	14.74	11.81	10.96	7.96	-
FeO ¹	13.87	13.05	11.53	10.62	3.59	3.61	2.55	4.95	4.02	3.22	5.47	2.52
MnO	0.39	0.29	0.42	0.50	-	-	-	-	0.22	-	-	-
MgO	12.41	12.58	16.99	17.98	16.19	16.10	17.84	17.17	19.18	19.60	20.47	23.80
CaO	9.48	10.26	5.54	5.30	23.60	24.71	24.43	13.23	13.02	13.20	12.28	12.28
Na ₂ O	-	-	-	-	-	-	-	-	1.45	1.32	-	-
K ₂ O	-	-	-	-	-	-	-	-	0.41	0.36	1.34	1.00
Cr ₂ O ₃	0.24	-	0.37	0.45	-	-	-	-	-	1.11	0.93	1.40
Total	100.32	100.19	99.87	99.68	100.08	99.79	99.63	97.64	98.11	98.15	97.36	97.76
αριθμός κατιόντων/οξυγόνα	(24)				(6)				(23)			
Si	5.980	6.001	5.991	5.997	1.858	1.890	1.993	6.374	6.531	6.808	6.887	8.000
Ti	0.020	-	-	-	0.014	0.015	-	0.061	0.063	-	0.022	-
Al	4.000	3.998	4.000	3.938	0.227	0.147	0.014	2.456	1.956	1.799	1.333	-
Fe	1.706	1.601	1.392	1.278	0.109	0.111	0.078	0.585	0.472	0.375	0.650	0.287
Mn	0.049	0.036	0.051	0.061	-	-	-	-	0.026	-	-	-
Mg	2.721	2.751	3.655	3.862	0.881	0.882	0.973	3.618	4.018	4.067	4.333	4.841
Ca	1.494	1.612	0.857	0.819	0.923	0.973	0.958	2.003	1.961	1.969	1.870	1.840
Na	-	-	-	-	-	-	-	-	0.398	0.359	-	-
K	-	-	-	-	-	-	-	-	0.075	0.064	0.238	0.182
Cr	0.029	-	0.042	0.051	-	-	-	-	0.123	0.102	0.157	-

	Χλωρίτης				Σπινελίος					21
	13	14	15 ^ε	16 ¹	17	18	19	20		
SiO ₂	30.66	32.25	-	-	-	-	-	-	-	-
TiO ₂	-	-	0.31	0.17	-	-	-	1.39	52.88	-
Al ₂ O ₃	16.77	14.51	40.83	51.38	58.59	65.25	63.03	2.28	-	-
FeO ¹	3.33	5.27	21.63	15.59	13.59	14.30	13.27	73.40	36.97	-
MnO	-	-	0.84	0.60	0.49	-	-	0.50	0.70	-
MgO	34.90	34.90	14.88	19.07	19.88	20.06	22.06	2.13	8.51	-
Cr ₂ O ₃	1.13	-	21.55	13.18	7.29	0.41	1.05	15.59	0.72	-
Total	86.79	87.29	100.0	99.99	99.84	100.0	99.41	95.29	99.78	-
αριθμός κατιόντων/οξυγόνα	(28)				(4)				(3)	
Si	5.821	6.142	-	-	-	-	-	-	-	-
Ti	-	-	0.006	0.003	-	-	-	0.039	0.941	-
Al	3.752	3.257	1.357	1.606	1.782	1.937	1.871	0.100	0.641	-
Fe ²⁺	0.528	0.839	0.360	0.235	0.224	0.247	0.172	0.905	0.011	-
Mn	-	-	0.020	0.013	0.010	-	-	0.016	0.289	-
Mg	9.876	9.908	0.480	0.754	0.765	0.753	0.828	0.117	0.111	-
Fe ³⁺	-	-	0.149	0.110	0.069	0.054	0.108	1.366	0.007	-
Cr	0.170	-	0.480	0.276	0.149	0.008	0.021	0.456	-	-

Αναλύσεις 1,2,5,6,8,14 και 18 από σπινελιούχο-γρανατούχο μεταγάβρο (δείγμα 93K-7, Πίν.1), εκ=απόμιξη σε κλινοπυρόξενο, c=κέντρο, r=άκρη. Αναλύσεις 3,7,19 και 21 από γρανατούχο μεταγάβρο (δείγμα 93K-8A, Πίν.1). Αναλύσεις 4 και 9 από γρανατούχο μεταπεριδοτίτη (δείγμα 93K-1B, Πίν.1), i=έγκλεισμα σε αμφίβολο. Αναλύσεις 10,15,16,17 από σπινελιούχο μεταπεριδοτίτη (δείγμα K-6, Πίν.1).

Αναλύσεις 11,12,13 και 20 από χλωριτούχο μεταπεριδοτίτη (δείγματα 93K-A και MB-7A, Πίν.1). T=ολικός σίδηρος ως FeO.

και χαμηλότερος στον συνυπάρχοντα ορθοπυρόξενο (0.90-0.91).

Οι κλινοπυρόξενοι των "σωριτικών" μεταγάβρων παρουσιάζουν, σε σχέση με εκείνους των μεταπεριδοτιτών, αυξημένη περιεκτικότητα σε Al₂O₃, η οποία κυμαίνεται από 0.3-5.3% (αναλύσεις 5-7, Πίν.2). Υψηλότερες τιμές προσδιορίστηκαν σε κλινοπυρόξενους των σπινελιούχων γρανατούχων "σωριτικών" μεταγάβρων που περιέχουν απομίξεις γρανάτη. Συχνά, οι κλινοπυρόξενοι αυτοί παρουσιάζουν ζωνώδη σύσταση, με ελάττωση της περιεκτικότητας σε Al₂O₃ από το κέντρο προς την άκρη. Εγκλείσματα κλινοπυρόξενου σε γρανάτη περιέχουν Al₂O₃ μεταξύ 2.5-3%, τιμές που ταυτίζονται με εκείνες της άκρης των κλινοπυρόξενων που περιέχουν απομίξεις γρανάτη. Η διαπίστωση αυτή δείχνει ότι οι πλούσιοι σε Al₂O₃ κλινοπυρόξενοι αποτελούν υπολειμματικές φάσεις υψηλών θερμοκρασιών (μαγματικό στάδιο), ενώ εκείνοι με τις χαμηλότερες τιμές σχηματίστηκαν κατά το στάδιο

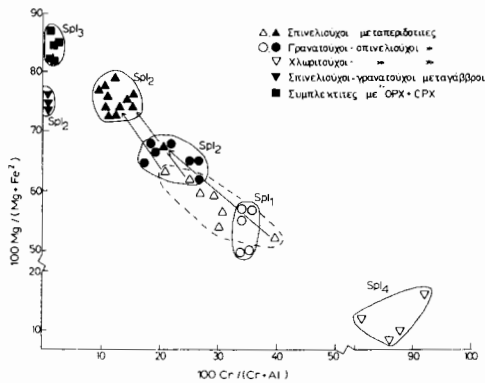
της μεταμόρφωσης των υψηλών πιέσεων. Άλλωστε και οι απομίξεις γρανάτη στον κλινοφυρόξενο συνηγορούν για αυτή την άποψη.

Ολιβίνη: Εγκλείσματα ολιβίνη σε ορθοφυρόξενο και κλινοφυρόξενο παρουσιάζουν σχετικά μικρότερο λόγο $Mg/(Mg+Fe)$ (0,86-0,90) σε σχέση με τον ολιβίνη που συνυπάρχει παραγενετικά με κερυστίλβη (0,88-0,91). Περισσότερο μαγνησιούχος ($Mg/(Mg+Fe)$ 0,92-0,95) είναι ο ολιβίνης που συνυπάρχει με τρεμολίτη και χλωρίτη.

Σπινέλιος: Οι τέσσερες γενεές σπινελίων που προσδιορίστηκαν από την πετρογραφική εξέταση των δειγμάτων (βλέπε πίνακα 1), παρουσιάζουν χημική σύσταση που επηρεάζεται από τη χημική σύσταση του πρωτόλιθου και από το βαθμό μεταμόρφωσης. Αντιπροσωπευτικές αναλύσεις δίδονται στον πίνακα 2. Ο σπινέλιος των πρωτόλιθων ($Sp1_1$, Σχ. 3), παρουσιάζει λόγο $Cr/(Cr+Al)$ που κυμαίνεται μεταξύ 0,25-0,40 στο σπινελιούχο λερζολιθικό μεταπεριδοτίτη και μεταξύ 0,33-0,35 στις διαστρώσεις των μεταπεριδοτιτών της σωριτικής σειράς του υπερβασικού σώματος της Κύμης. Ο σπινέλιος του σταδίου της μεταμόρφωσης υψηλών πιέσεων ($Sp1_2$, Σχ. 3) είναι περισσότερο αργιλιούχος και μαγνησιούχος σε σχέση με τον σπινέλιο των πρωτόλιθων. Στον σπινελιούχο λερζολιθικό μεταπεριδοτίτη παρουσιάζει λόγο $Cr/(Cr+Al)$ που κυμαίνεται μεταξύ 0,09-0,15 και λόγο $Mg/(Mg+Fe)$ μεταξύ 0,72-0,78. Στο στάδιο αυτό, ο σπινέλιος των πρωτόλιθων ($Sp1_1$) τείνει να ισορροπήσει στις αντίστοιχες συνθήκες P-T, όπως δείχνουν κρύσταλλοι με ζωνώδη σύσταση, στους οποίους ελαττώνεται ο λόγος $Cr/(Cr+Al)$ και αυξάνεται ο λόγος $Mg/(Mg+Fe)$ από το κέντρο προς την άκρη. Στους μεταπεριδοτίτες της σωριτικής σειράς οι λόγοι $Cr/(Cr+Al)$ και $Mg/(Mg+Fe)$ για το $Sp1_2$, κυμαίνονται από 0,18-0,27 και 0,62-0,68, αντίστοιχα. Στους σπινελιούχους-γρاناτούχους μεταγάβρους, ο σπινέλιος του σταδίου των υψηλών πιέσεων είναι κατεξοχή αργιλιούχος (Πίν.2, ανάλυση 18), με ποσοστό χρωμίτη που κυμαίνεται μεταξύ 0,4-1% και λόγο $Mg/(Mg+Fe)$ μεταξύ 0,73-0,76. Η μικρή συμμετοχή του χρωμίτη στο πλέγμα του σπινελίου οφείλεται στη χαμηλή περιεκτικότητα σε Cr_2O_3 (0,06-0,07%) στον πρωτόλιθο. Πλουσιότερος σε μαγνήσιο είναι ο σπινέλιος του σταδίου 3 ($Sp1_3$, Σχ. 3, ανάλυση 19, Πίν.2), ο οποίος σχηματίστηκε σε συμπλεκτική σύμφυση με ενστατίτη και διοψίδιο εις βάρος του γρανάτη και ολιβίνης. Στο σπινέλιο αυτό, ο λόγος $Mg/(Mg+Fe)$ κυμαίνεται μεταξύ 0,82-0,88% και το ποσοστό του χρωμίτη μεταξύ 1,5-2%. Στο στάδιο 4, το οποίο χαρακτηρίζεται από τις παραγενέσεις τρεμολίτης+χλωρίτης+τάλκης και τρεμολίτης+ολιβίνης+χλωρίτης, το αργίλιο του σπινελίου καταναλώνεται για το σχηματισμό του Mg-ούχου χλωρίτη. Το χρώμιο ενδομεύεται κατά προτίμηση στον Cr-ούχο μαγνητίτη ($Sp1_4$, Σχ. 3, Πίν.2, ανάλυση 20), στον οποίο ο λόγος $Cr/(Cr+Al)$ κυμαίνεται μεταξύ 0,82-0,93.

Αμφίβολος: Οι πέντε γενεές αμφιβόλων που προσδιορίστηκαν από την πετρογραφική εξέταση, διακρίνονται σε κερυστίλβη (τερμακτιτική κερυστίλβη, μαγνησιο-κερυστίλβη), η οποία σχηματίστηκε στα στάδια 2 (Πίν.2, ανάλυση 8) και 3 (αναλύσεις 9-11) και σε τρεμολίτη, που σχηματίστηκε στα στάδια 1, 4 και 5 (Πίν.2, ανάλυση 12). Στο σχήμα 4 δίδεται η σχέση Si: ($Al^{VI}+Cr+Fe^{3+}+2Ti$) των αμφιβόλων που αναλύθηκαν. Στις κερυστίλβες, εκτός από την τερμακτιτική αντικατάσταση ($Si Mg \rightleftharpoons Al^{IV}Al^{VI}$), έλαβε χώρα και εδενιτική αντικατάσταση ($Si \rightleftharpoons Al^{IV} Na, K$). Οι θέσεις M_4 καλύπτονται κυρίως από Ca. Στους μεταπεριδοτίτες, η κερυστίλβη είναι χρωμιούχος (αναλύσεις 9-11, Πίν.2), με περιεκτικότητα σε Cr_2O_3 που κυμαίνεται μεταξύ 0,20-1,70%. Ο λόγος $Cr/(Cr+Al)$ κυμαίνεται στην κερυστίλβη από 0,019-0,092 και στον σπινέλιο ($Sp1_2$) από 0,09-0,15. Η διαπίστωση αυτή δείχνει ότι, το χρώμιο ενδομεύεται κατά προτίμηση στο σπινέλιο, σε σχέση με την συνυπάρχουσα κερυστίλβη.

Χλωρίτης: Ο χλωρίτης, ο οποίος συνυπάρχει παραγενετικά με ορθοφυρόξενο (chl_1 , Πίν.1), είναι πλουσιότερος σε Al, σε σχέση με εκείνο που συνυπάρχει Ψηφιακή Βιβλιοθήκη "Θεόφραστος" - Τμήμα Γεωλογίας. Α.Π.Θ.



Εχ. 3: Διακύμανση των λόγων $100 \text{ Mg} / (\text{Mg} + \text{Fe}^{2+}) : 100 \text{ Cr} / (\text{Cr} + \text{Al})$ των σπινελίων στα υπερμαφικά πετρώματα της ανώτερης τεκτονικής ενότητας στην Αν.Ροδόπη.

Fig. 3: Variation of the ratios $100 \text{ Mg} / (\text{Mg} + \text{Fe}^{2+}) : 100 \text{ Cr} / (\text{Cr} + \text{Al})$ in spinels from ultramafic rocks of the upper tectonic unit in E.Rhodope.

λιο κορουνδοφυλλίτης ($\text{Si}=4.5-4.7$) και από Cr-ούχο σπινέλιο κεμμερερίτης με περιεκτικότητα σε Cr_2O_3 8.13-8.93%.

Ιλμενίτης: Στους περισσότερους μεταβασίτες της Ροδόπης η τιτανιούχος φάση της μεταμόρφωσης των υψηλών πιέσεων είναι το ρουτίλιο, το οποίο στα επόμενα στάδια αντικαθίσταται από ιλμενίτη ή τιτανίτη (Mroskos and Perdikatsis 1987, Liati and Mroskos 1990). Στους σωριτικούς μεταγάββρους της περιοχής Κύμης η τιτανιούχος φάση είναι ιλμενίτης. Ο ιλμενίτης αυτός διακρίνεται από την υψηλή περιεκτικότητα σε μαγνήσιο (Πίν.2, ανάλυση 21), με ποσοστό γκαϊκιελίτη που κυμαίνεται μεταξύ 25-29%. Στους αμφιβολιτιωμένους εκλογίτες, το ποσοστό του γκαϊκιελίτη στον ιλμενίτη που σχηματίστηκε από το ρουτίλιο, κυμαίνεται μεταξύ 1-5%. Όμως, δεν αποκλείεται ο ιλμενίτης των σωριτικών μεταγάββρων που συνυπάρχει με γρανάτη να αποτελεί υπολειμματική φάση του μαγματικού σταδίου.

ΧΗΜΙΚΗ ΣΥΣΤΑΣΗ ΠΕΤΡΩΜΑΤΩΝ - ROCK CHEMISTRY

Για τη γεωχημική μελέτη των υπερμαφικών πετρωμάτων, αναλύθηκαν με φασματομετρία φθορισμού ακτίνων-X μεταπεριδοτίτες από διάφορες περιοχές της ανώτερης τεκτονικής ενότητας, καθώς και μεταπεριδοτίτες, μεταπυροξενίτες και μεταγάββροι της "σωριτικής" σειράς από την περιοχή Κύμης. Αντιπροσωπτικές αναλύσεις δίδονται στον Πίνακα 3.

Οι σπινελιούχοι και χλωριτούχοι μεταπεριδοτίτες (Πίν.3, αναλύσεις 1 και 2), παρουσιάζουν συστάσεις περιδοιτικού υλικού υπολειμματικού ανώτερου μανδύα, αποπλυμένου σε σημαντικό ποσοστό σε συστατικά ικανά να δώσουν βασαλτικά τήγματα. Οι γρανατούχες και γρανατούχες-σπινελιούχες διαστρώσεις της σωριτικής σειράς (Πίν.3, αναλύσεις 6-8) δίνουν συστάσεις πλούσιων σε Mg γαββρικών σωριτών με κύρια δυνητικά ορυκτά ολιβίνη και ανορθίτη και σε μικρότερο ποσοστό διοψίδιο και Ca_2SiO_4 . Από τη σύγκριση των αναλύσεων του Πίνακα 3 διαπιστώνεται ότι, οι γρανατούχοι μεταπεριδοτίτες (αναλύσεις 4 και 5) είναι πλουσιότεροι σε Al_2O_3 και CaO σε σχέση με τους σπινελιούχους

με τρεμολίτη και ολιβίνη. Πρόκειται για πλούσιο σε μαγνήσιο κλινόχλωρο (Πίν.2, ανάλυση 13) με 5.8-6.0 άτομα Si στο δομικό τύπο (για 28 οξυγόνα) και λόγο $\text{Mg} / (\text{Mg} + \text{Fe})$ που κυμαίνεται μεταξύ 0.94-0.96. Ο χλωρίτης του σταδίου 4 (chl_2 , Πίν.1) είναι επίσης πλούσιος σε μαγνήσιο (Πίν.2, ανάλυση 14), παρουσιάζει όμως σχετικά υψηλότερες τιμές Si (6.11-6.33) σε σχέση με τον χλωρίτη. Η διαπίστωση αυτή δείχνει ότι, ο χλωρίτης που συνυπάρχει με ορθοπυρόξενο σχηματίστηκε σε υψηλότερες θερμοκρασίες, σε σχέση με τον χλωρίτη του σταδίου 4 (Jenkins, 1981). Στο τελευταίο μεταμορφικό επεισόδιο (στάδιο 5), σχηματίστηκαν διάφοροι χλωρίτες, των οποίων η χημική σύσταση επηρεάζεται από τη σύσταση των φάσεων που αντικατέστησαν. Συγκεκριμένα, από αντικατάσταση κεροστόλης σχηματίστηκε πλούσιος σε πυρίτιο πεννίνης ($\text{Si}=6.6-6.95$), από συμπλεκτίτες ορθοπυρόξενου-σπινελίου πεννίνης έως σεριδανίτης ($\text{Si}=5.3-6.4$), από γρανάτη+σπινέ-

Πίνακας 3: Χημική σύσταση αντιπροσωπευτικών δειγμάτων υπερμαφικών πετρωμάτων της ανώτερης τεκτονικής ενότητας στην Ανατολική Ροδόπη.

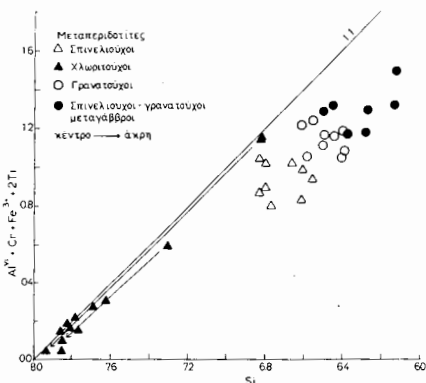
Table 3: Mean whole-rock compositions for ultramafic rocks from upper tectonic unit in East Rhodes.

Δείγμα	1 (5)	2 (2)	3 (1)	4 (3)	5 (3)	6 (2)	7 (5)	8 (1)
SiO ₂	44.50	45.69	47.61	43.21	44.03	40.50	39.01	42.02
TiO ₂	0.04	0.04	0.01	0.15	0.20	0.35	0.29	0.20
Al ₂ O ₃	2.93	2.55	0.46	4.28	3.98	12.20	13.12	8.50
FeO _T	8.08	7.81	8.21	8.76	7.52	8.76	8.19	9.34
MnO	0.13	0.13	0.12	0.11	0.16	0.30	0.15	0.14
MgO	40.23	41.90	41.92	38.0	33.06	25.26	24.76	26.38
CaO	2.23	1.36	0.14	3.61	10.75	11.45	13.31	12.31
Na ₂ O	0.04	0.02	0.02	0.18	0.08	0.05	0.07	0.20
K ₂ O	0.03	0.01	0.01	0.06	0.04	0.02	0.02	0.04
Cr ₂ O ₃	0.80	0.86	1.46	0.78	0.65	0.23	0.12	0.46
Σύνολο	99.01	100.4	99.96	99.14	100.5	99.12	99.04	99.59
*MgO/(MgO+FeO)	0.90	0.90	0.90	0.89	0.89	0.84	0.84	0.834
Cr ₂ O ₃ /(Cr ₂ O ₃ +Al ₂ O ₃)*	0.17	0.18	0.68	0.11	0.10	0.012	0.006	0.035
*CaO/(CaO+MgO)	0.038	0.023	0.002	0.065	0.189	0.246	0.279	0.251
Cr/(Cr+Al) σε Spl	0.08-			0.18-	0.34		0.0-	
	0.40			0.35		-	0.01	

1=σπινελιούχοι μεταπεριδοτίτες, 2=χλωοιτούχοι μεταπεριδοτίτες, 3=ταλκικός-αντιγοριτικός μεταπεριδοτίτης, 4-8="σωριτική" σειρά Κύμης, 4=γρανατούχοι σπινελιούχοι μεταπεριδοτίτες, 5=γρανατούχοι μεταπεριδοτίτες, 6=γρανατούχοι-μεταγάββροι, 7=σπινελιούχοι γρανατούχοι μεταγάββροι, 8=γρανατούχος-σπινελιούχος-ολιβινούχος μεταγάββρος. T=ολικός σίδηρος ως FeO. *(moles).

(5) = μέση τιμή από 5 αναλύσεις.

(αναλύσεις 1 και 2). Επί πλέον παρουσιάζουν χαμηλότερο λόγο μορίων Cr₂O₃/(Cr₂O₃+Al₂O₃). Οι διαφορές αυτές στη χημική σύσταση των δύο τύπων μεταπεριδοτιτών, πιθανώς, δικαιολογούν την απουσία του γρανάτη από το σπινελιούχο μεταπεριδοτίτη.



Σχ. 4: Σχέση Si:Al^{VI}+Cr+Fe³⁺+2Ti σε αμφιβόλους των υπερμαφικών πετρωμάτων της ανώτερης τεκτονικής ενότητας στην Ανατολική Ροδόπη. Η γραμμή 1:1 δίδεται για σύγκριση.

Fig. 4: Si:Al^{VI}+Cr+Fe³⁺+2Ti relation in amphibols from ultramafic rocks in the upper tectonic unit of East Rhodes.

ΠΕΤΡΟΛΟΓΙΚΗ ΕΡΜΗΝΕΙΑ ΤΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ - PETROLOGICAL INTERPRETATION

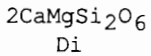
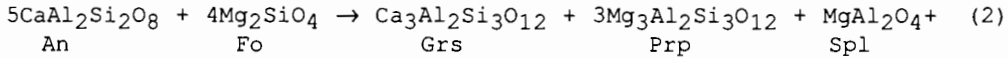
Η πολυφασική μεταμορφική εξέλιξη της ανώτερης τεκτονικής ενότητας, η οποία διαπιστώθηκε σε μεταπηλίτες (Mroskos and Liatí 1993), τεκμηριώνεται και στα υπερμαφικά της πετρώματα. Από την πετρογραφική ανάλυση και τη χημική σύσταση των ορυκτών και των πετρωμάτων που μελετήθηκαν, προκύπτει μια σειρά αντιδράσεων που έλαβαν χώρα στους διάφορους τύπους των υπερμαφικών πετρωμάτων, κατά την πορεία της μεταμορφικής τους εξέλιξης. Οι απομίξεις γρανάτη στον κλινοπυρόξενο των μεταγαββρικών διαστρώσεων της "σωριτικής" σειράς ματα αυτά, ανεξάρτητα από την πορεία που ακολούθησαν, πέρασαν από ένα στάδιο υψηλών θερμοκρασιών (μαγματικό), στο οποίο σχηματίσθηκε κλινοπυρόξενος πλούσιος σε αργίλιο, με συμμετοχή τσερμακίτικού μορίου >8%, σε συνθήκες υψηλών πιέσεων. Λαμβάνοντας υπόψη τη χημική σύσταση του γρα-

νάτη, θεωρούμε ως πιθανή αντίδραση* για το σχηματισμό του , την ακόλουθη:

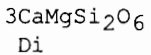
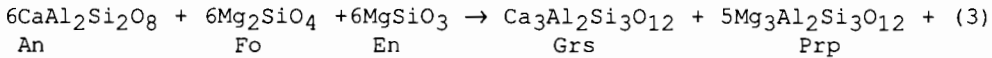
$$4\text{CaAl}_2\text{SiO}_6 + 10\text{MgSiO}_3 \rightarrow \text{Ca}_3\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{12} + 3\text{Mg}_3\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{12} + \text{CaMgSi}_2\text{O}_6 \quad (1)$$

Ca-Ts En Grs Prp Di

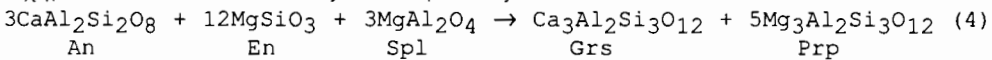
Η παραγένεση γρανάτης-κλινοπυρόξενος-σπινέλιος των γρανατούχων σπινελιούχων "σωριτικών" μεταγάββρων μπορεί να θεωρηθεί ότι προέκυψε από την αντίδραση:



Στους μη σπινελιούχους-γρανατούχους "σωριτικούς" μεταγάββρους, καθώς και τους γρανατούχους-σπινελιούχους μεταπεριδοτίτες, στους οποίους, πιθανώς, υπήρχε ανορθίτης ως πρωτογενής φάση, για το σχηματισμό του γρανάτη θεωρείται ως πιθανή αντίδραση η ακόλουθη:

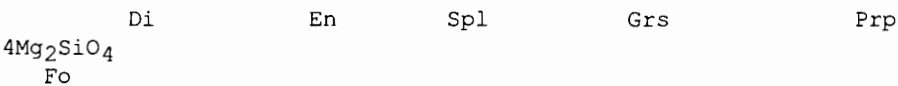


Γρανάτης ίδιας χημικής σύστασης με εκείνο της αντίδρασης 3, θα μπορούσε να σχηματισθεί και από τις αντιδράσεις:



και $3\text{CaMgSi}_2\text{O}_6 + 14 \text{MgSiO}_3 + 6\text{MgAl}_2\text{O}_4 \rightarrow \text{Ca}_3\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{12} + 5\text{Mg}_3\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{12} +$

(5)

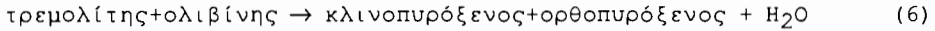


Η αντίδραση 5, καθορίζει στο σύστημα CaO-MgO-Al₂O₃-SiO₂ την μετάβαση από το πεδίο του σπινελιούχου περιδοτίτη, στο πεδίο του γρανατούχου (Jenkins and Newton 1979). Ομως, η αντίδραση αυτή δεν φαίνεται να έλαβε χώρα στους σπινελιούχους μεταπεριδοτίτες, ενδεχομένως επειδή ο σπινέλιος είναι χρωμιούχος (Πίν.2). Σύμφωνα με τα πειραματικά αποτελέσματα του O'Neill (1981), η παρουσία του χρωμίου στο πέτρωμα, το οποίο ενδομεύεται κατά προτίμηση στο σπινέλιο, σε σχέση με το γρανάτη, μετατοπίζει το πεδίο σταθερότητας του σπινελιούχου περιδοτίτη και πυροξενίτη προς υψηλότερες πιέσεις. Στους σπινελιούχους μεταπεριδοτίτες σχηματίσθηκε χρωμιούχος σπινέλιος με μικρότερο λόγο Cr/(Cr+Al) (0.09-0.15) σε σχέση με εκείνο του πρωτογενούς (0.25-0.40). Η παρουσία της παραγένεσης διοψίδιος-ενστατιίτης-Cr-ούχος σπινέλιος δείχνει ότι, για το σύστημα CaO-MgO-Al₂O₃-SiO₂-Cr₂O₃, στο οποίο ο λόγος Cr/(Cr+Al) στο χρωμίτη είναι ≥ 0.09 , οι πιέσεις ήταν χαμηλότερες από εκείνες που καθορίζουν το πεδίο σταθερότητας του γρανάτη, με αποτέλεσμα να μη λάβει χώρα η αντίδραση 5. Στους γρανατούχους-σπινελιούχους μεταπεριδοτίτες της "σωριτικής" σειράς ο σπινέλιος παρουσιάζει μεγαλύτερο λόγο Cr/(Cr+Al) (0.18-0.35), σε σχέση με το σπινέλιο των σπινελιούχων μεταπεριδοτιτών (0.09-0.40). Συνεπώς αποκλείεται η συμμετοχή του στο σχηματισμό του γρανάτη. Η παραγένεση γρανάτης+ολιβίνης, η οποία διαπιστώθηκε στο σπινελιούχο-ολιβινούχο-γρανατούχο μεταγάββρο (δείγμα 93K-3E, Πίν.1) και στους γρανατούχους σπινελιούχους μεταπεριδοτίτες (δείγματα 93K-1B, 93K-8B και 93K-1Γ, Πίν.1), υποδηλώνει, ότι, η μεταμόρφωση των υψηλών πιέσεων έλαβε χώρα στο πεδίο

* Οι αντιδράσεις που αναφέρονται στην παρούσα εργασία παρουσιάζονται, σε απλοποιημένη μορφή, χωρίς τα Fe-ούχα ακραία μέλη.

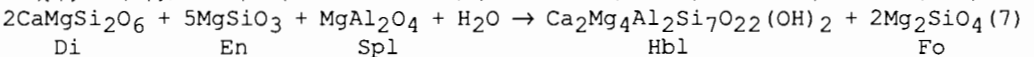
σταθερότητας του γρανατούχου περιδοτίτη, μόνο για το σύστημα CMAS.

Στοιχεία για την προϊούσα πορεία της μεταμόρφωσης παρέχουν τα εγκλείσματα ολιβίνη, τρεμολίτη και χλωρίτη σε ενστατίτη, στο χλωριτούχο μεταπεριδοτίτη (δείγμα MB-7A, Πίν.1) στο ανατολικό άκρο της ανώτερης τεκτονικής ενότητας. Τα εγκλείσματα αυτά, υποδηλώνουν την μετάβαση από συνθήκες χαμηλότερων θερμοκρασιών (κατώτερη έως μέση αμφιβολιτική φάση) σε θερμοκρασίες υψηλότερες από εκείνες που καθορίζονται από την αντίδραση:

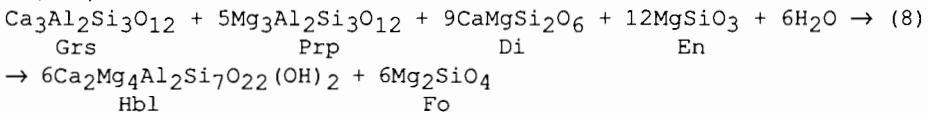


χαμηλότερες όμως από το ανώτατο όριο σταθερότητας του χλωρίτη.

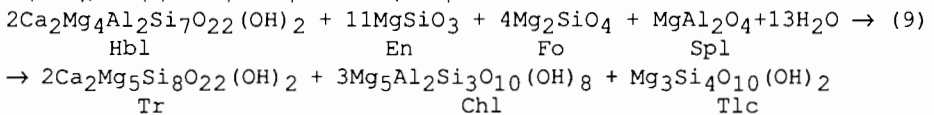
Ο σχηματισμός συμπλεκτιτών σπινελίου-ενστατίτη-διοψιδίου εις βάρος του γρανάτη και ολιβίνη (δείγματα 93K-3E, 93K-8B, 93K-8A, Πίν.1), συνδέεται με την αποσυμπίεση της ανώτερης τεκτονικής ενότητας, η οποία ακολούθησε τη μεταμόρφωση των υψηλών πιέσεων. Η βλάστηση κεροστίλβης και ολιβίνη εις βάρος των πυροξένων, η οποία χαρακτηρίζει το τρίτο μεταμορφικό επεισόδιο, συνδέεται με μια μεταμορφική εξέλιξη της ανώτερης τεκτονικής ενότητας, κατά την οποία η προσφορά νερού έπαιξε κυρίαρχο ρόλο. Στο στάδιο αυτό, όπως και στα επόμενα στάδια, λαμβάνουν χώρα αντιδράσεις ανάδρομης μεταμόρφωσης, στις οποίες σχηματίζονται ένυδρα ορυκτά. Η ίδια πορεία μεταμόρφωσης διαπιστώθηκε και στους μεταπηλίτες, με μια σειρά αντιδράσεων ενυδάτωσης (Mroskos and Liati 1993). Η παραγένεση ολιβίνης+κεροστίλβη, στους σπινελιούχους μεταπεριδοτίτες της περιοχής Κύμης, θα μπορούσε να θεωρηθεί ότι προέκυψε από την αντίδραση:



Στους γρανατούχους μεταπεριδοτίτες, της "σωριτικής" σειράς, για το σχηματισμό της παραγένεσης ολιβίνης+κεροστίλβη, θεωρείται ως περισσότερο πιθανή η αντίδραση:

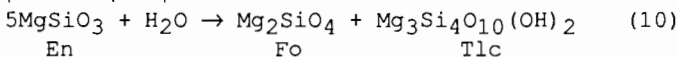


Το τέταρτο στάδιο της μεταμορφικής εξέλιξης καθορίζεται, στην περιοχή Κύμης, από την παραγένεση τρεμολίτης+χλωρίτης+τάλκης (δείγμα 93K-A), η οποία σχηματίστηκε εις βάρος της κεροστίλβης, του σπινελίου, του ορθοπυρόξενου και του ολιβίνη, σύμφωνα με την αντίδραση:



Στους χλωριτούχους μεταπεριδοτίτες του ανατολικού τμήματος της ανώτερης τεκτονικής ενότητας (βλέπε Εικ.1), ο χλωρίτης ο οποίος σχηματίστηκε σε προηγούμενα στάδια της μεταμόρφωσης, συνυπάρχει στο στάδιο αυτό με τρεμολίτη και ολιβίνη (δείγμα MB-7A, MB-7), ορυκτά που σχηματίστηκαν σύμφωνα με την αντίδραση 6, η οποία στο στάδιο αυτό έλαβε χώρα από τα δεξιά προς τα αριστερά.

Η παραγένεση ορθοπυρόξενος+ολιβίνης+τάλκης (δείγμα MB-7, Πίν.1) τεκμηριώνει την αντίδραση:



ενώ η παραγένεση ολιβίνης+τάλκης+αντιγορίτης (δείγμα Λ-1) την αντίδραση: ολιβίνης+τάλκης+H₂O → αντιγορίτης (11)

Σύμφωνα με τα πειραματικά δεδομένα του Jenkins (1981) και του Chernosky (1976) (βλέπε επίσης Trommsdorff, 1983), η αντίδραση 6 λαμβάνει χώρα σε υψηλότερες θερμοκρασίες σε σχέση με την αντίδραση 10, η δε αντίδραση 10 σε

υψηλότερες θερμοκρασίες σε σχέση με την 11. Η καμπύλη της αντίδρασης 11 βρίσκεται στα όρια της αμφιβολιτικής με την πρασινοσχιστολιθική φάση (Trommsdorff 1983).

Το τελευταίο μεταμορφικό επεισόδιο (στάδιο 5) έλαβε χώρα στα πεδία σταθερότητας του πρενίτη και του διασπόρου, σε θερμοκρασίες χαμηλότερες των 400°C, όπως τεκμηριώνεται με το σχηματισμό των φάσεων αυτών εις βάρος του σπινέλιου και του γρανάτη, στους σπινελιούχους-γρανατούχους "σωριτικούς" μεταγάββρους της περιοχής Κύμης.

ΕΥΝΩΗΚΕΣ P-T ΤΟΥ ΣΤΑΔΙΟΥ ΥΨΗΛΩΝ ΠΙΕΣΕΩΝ - P-T CONDITIONS OF THE HIGH PRESSURE STAGE

Γεωθερμομετρία γρανάτη-κλινοπυρόξενου σε 8 συνυπάρχοντα ζεύγη από τους σπινελιούχους γρανατούχους "σωριτικούς" μεταγάββρους, έδωσαν, για το μεταμορφικό επεισόδιο των υψηλών πιέσεων, μέση θερμοκρασία 774°C (εύρος 733-802°C), για πίεση 15 Kbar, σύμφωνα με το γεωθερμόμετρο του Powell (1985). Οι τιμές αυτές πρέπει να θεωρηθούν ως ανώτερες θερμοκρασίες, διότι όλος ο σίδηρος στον κλινοπυρόξενο, λόγω της χαμηλής του περιεκτικότητας, υπολογίσθηκε ως δισθενής. Γεωθερμομετρία γρανάτη-κεροσίλλης (Graham and Powell 1984) στα ίδια δείγματα έδωσε θερμοκρασίες 745-754°C, τιμές οι οποίες δεν διαφέρουν πολύ από εκείνες που προέκυψαν από το γεωθερμόμετρο γρανάτη-κλινοπυρόξενου.

Εκτίμηση της πίεσης δεν μπορεί να γίνει από τη σύσταση του πυροξένου, δεδομένου ότι στα πετρώματα αυτά ο κλινοπυρόξενος δεν περιέχει Na. Νατριούχοι κλινοπυρόξενοι με ποσοστό ιαδεΐτη μέχρι 25%, (σύσταση κέντρου σε ζωνώδεις κρυστάλλους, στους οποίους ελαττώνεται το Na από το κέντρο προς την άκρη), αναλύθηκαν σε αμφιβολιτιωμένους εκλογίτες από την ίδια περιοχή (Mroskos and Perdikatsis 1987, Liati and Mroskos, 1990).

Συνδυάζοντας τις θερμοκρασίες που προαναφέρθηκαν με τη μέγιστη τιμή σε ιαδεΐτη στον κλινοπυρόξενο των αμφιβολιτιωμένων εκλογιτών, προκύπτει, για μια μέση θερμοκρασία 760°C, ελάχιστη πίεση 13,5 Kbar. Ελάχιστη πίεση 14 Kbar προκύπτει και από τα πειραματικά δεδομένα των Jenkins and Newton (1979) για την αντίδραση 5, η οποία στην ανώτερη τεκτονική ενότητα της Ανατολικής Ροδόπης έλαβε χώρα κατά το στάδιο της αποσυμπίεσης. Για την ίδια αντίδραση ο O' Neill (1981), δίνει ελάχιστη πίεση 16 Kbar για 800°C, η οποία όμως στο σύστημα CaO-MgO-Al₂O₃-SiO₂-FeO ελαττώνεται στα 13,5 Kbar για $X_{Mg}^{O1} = 0.9$, σύσταση η οποία ταυτίζεται με εκείνη του ολιβίνης των γρανατούχων-σπινελιούχων μεταπεριδοτιτών. Όπως προαναφέρθηκε, η παρουσία χρωμίου μετατοπίζει την καμπύλη της αντίδρασης 5 σε υψηλότερες πιέσεις. Σύμφωνα με τον O' Neill (1981), η αντίδραση αυτή στους σπινελιούχους μεταπεριδοτίτες, στους οποίους η ελάχιστη τιμή του λόγου Cr/(Cr+Al) είναι 0.09, θα έπρεπε να λάβει χώρα στα 16 Kbar, τιμή που φαίνεται να μην έχει επιτευχθεί στην ανώτερη τεκτονική ενότητα. Οι συνθήκες αυτές (750-775°C, 13,5-16 Kbar) βρίσκονται στο πεδίο σταθερότητας του Mg-ούχου χλωρίτη, (Jenkins 1981), η δε παραγένεση (τρεμολίτης)+(ολιβίνης)+ ορθοπυρόξενος+κλινοπυρόξενος (δείγμα MB-7A) η οποία προκύπτει από την αντίδραση 6, δικαιολογείται για τις προαναφερθείσες θερμοκρασίες μόνο ως παραγένεση του σταδίου των υψηλών πιέσεων (> 12 Kbar, Jenkins 1981). Για χαμηλότερες πιέσεις απαιτούνται υψηλότερες θερμοκρασίες, λόγω της αρνητικής κλίσης που έχει η καμπύλη της αντίδρασης.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ - REFERENCES

- CHERNOSKY, Jv., Jr. (1976). The stability of anthophyllite. A reevaluation based on new experimental data. *Am. Mineral.* 61, 1145-1155.
- EVANS, B.W. (1982). Amphiboles in metamorphosed ultramafic rocks p.98-112. In *Amphiboles: Petrology and experimental phase relations. Reviews in*

- mineralogy V.9B. Mineralogical Society of America.
- GRAHAM, C.M. and POWELL, R. (1984). A garnet-hornblende geothermometer. Calibration, testing and application to the Pelone Schists, Southern California. *J. Metamorphic Geol.* 2, 13-33.
- JENKINS, D.M. (1981). Experimental phase relations of hydrous peridotites modelled in the system $H_2O-CaO-MgO-Al_2O_3-SiO_2$. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 77, 166-176.
- JENKINS, D.M. and NEWTON, R.C. (1979). Experimental determination of the spinel peridotite to garnet peridotite inversion at 900°C and 1.000°C in the system $CaO-MgO-Al_2O_3-SiO_2$, and at 900°C with natural garnet and olivine. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 68, 407-419.
- KRETZ, R. (1983). Symbols for rock-forming minerals. *Am. Mineral.* 68, 277-279.
- LIATI, A. and MPOSKOS, E. (1990). Evolution of the eclogites in the Rhodope zone of northern Greece. *Lithos*, 25, 89-99.
- MPOSKOS, E. (1989). High-pressure metamorphism in gneisses and pelitic schists in East Rhodope zone (N. Greece). *Mineral. Petrol.* 41, 337-351.
- MPOSKOS, E. and PERDIKATIS, V. (1987). Eclogite-amphibolites in East Rhodope Massif. Proceedings of the first Bulgarian-Greek symposium on the geology and physical geography of the Rhodope Massif. *Geologica Rhodopica*, V.1, 160-168, Sofia.
- MPOSKOS, E. and LIATI, A. (1993). Metamorphic evolution of metapelites in the high-pressure terrane of the Rhodope zone, northern Greece. *Can. Mineral.* 31, 401-424.
- O'NEILL, H. (1981). The transition between spinel lherzolite and garnet lherzolite, and its use as a geobarometer. *Contrib. Mineral. Petrol.* 77, 185-194.
- POWELL, R. (1985). Regression diagnostics and robust regression in geothermometer/ geobarometer calibration: the garnet-clinopyroxene geothermometer revisited. *J. Metamorphic Geol.* 3, 327-342.
- TROMMSDORFF, (1983). Metamorphose magnesiumreicher Gesteine: Kritischer Vergleich von Narut, Experiment und thermodynamischer Datenbasis. *Fortsch. Miner.*, 61, 2, 283-308.