

ΕΡΜΗΝΕΙΑ ΤΗΣ ΠΟΡΕΙΑΣ ΜΕΤΑΜΟΡΦΩΣΗΣ ΤΗΣ ΚΑΤΩΤΕΡΗΣ ΚΑΙ ΑΝΩΤΕΡΗΣ ΤΕΚΤΟΝΙΚΗΣ ΕΝΟΤΗΤΑΣ ΤΗΣ ΡΟΔΟΠΗΣ. ΟΜΟΙΟΤΗΤΕΣ ΚΑΙ ΔΙΑΦΟΡΕΣ

Ε. Μπόσκος

ΣΥΝΟΨΗ

Οι δύο τεκτονικές ενότητες της Ροδόπης παρουσιάζουν σαφείς διαφορές σε ότι αφορά την αλπική τεκτονομεταμορφική τους εξέλιξη. Η κατώτερη τεκτονική ενότητα ακολούθησε μια πορεία βύθισης, με μέση αύξηση της θερμοκρασίας κατά 11,5°C/Km. Η πορεία ανάδυσης, από το μέγιστο βάθος των ≈53 Km μέχρι τα ≈14 Km, ήταν περίπου ισόθερμη και συνοδεύονταν από αντιδράσεις κυρίως αφυδάτωσης. Η ανώτερη τεκτονική ενότητα, κατά το στάδιο της μεταμόρφωσης των υψηλών πιέσεων ακολούθησε μία πορεία βύθισης, με μέση αύξηση της θερμοκρασίας κατά 15,5°C/Km. Η πορεία ανάδυσης χαρακτηρίζεται από συνεχή ψύξη, με διαφορετικούς ρυθμούς, κατά περιόδους και συνοδεύονταν κυρίως από αντιδράσεις ενυδάτωσης. Στην ανατολική Ροδόπη, η μεταμόρφωση των υψηλών πιέσεων της Α.Τ.Ε., έλαβε χώρα στο Κατώτερο Κρητιδικό, ενώ εκείνη των μεσαίων πιέσεων στο Παλαιόκαινο. Πιθανώς, στο στάδιο αυτό κάτω από την Α.Τ.Ε. βυθίστηκε η Κ.Τ.Ε., η οποία εμφανίζεται τώρα υπό μορφή τεκτονικού παραθύρου.

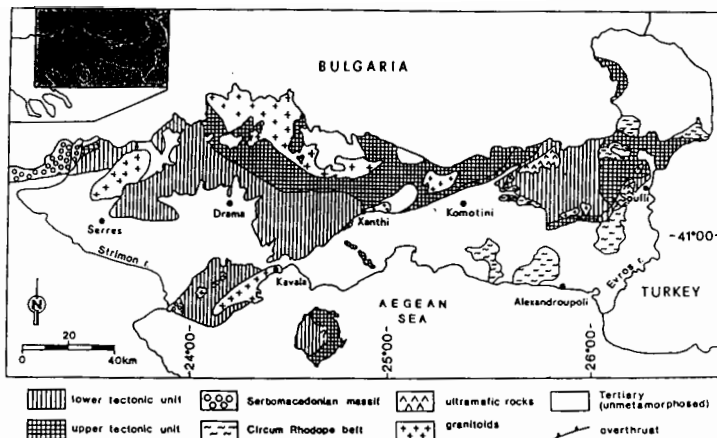
ABSTRACT

The two tectonic units recognized in Rhodope zone, show obvious differences in their Alpine tectonometamorphic evolution. The lower tectonic was subducted following a path with a mean temperature increase of 11.5°C/Km. The uplift path was isothermal from a maximum depth of ≈53 Km up to ≈14 Km, and was accompanied by dehydration reactions. The upper tectonic unit was subducted following a path with a mean temperature increase of 15.5°C/Km. The uplift path is characterized by continuous cooling, with various cooling rates for different periods, and was accompanied mainly by hydration reactions. In Eastern Rhodope the high pressure metamorphism of the U.T.U. took place in the Lower Cretaceous, while that of the medium pressure in Paleocene. It is possible that during Paleocene the L.T.U. was subducted under the U.T.U. The L.T.U. occurs now as a tectonic window.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ - INTRODUCTION

Νεότερες γεωλογικές και πετρολογικές έρευνες απέδειξαν ότι, η Ροδόπη, η οποία εθεωρείτο παλαιότερα ως ένας κρατονικός πυρήνας, συμμετείχε στην αλπική ορογένεση, όπως τεκμηριώνεται από μεταμορφικά επεισόδια και καλυμματική τεκτονική, αλπικής ηλικίας (Liati 1986, Del Moro et al., 1990, Arnaudov et al. 1990, Celet et Clement 1991, Wawrzenitz et al. 1992, Ivanov 1988, Burg et al. 1990, Koukouvelas and Doutsos 1990, Kiliias and Mountrakis 1990, Mposkos 1989c, Liati and Mposkos 1990, Mposkos and Liati 1993, Παπανικολάου, 1993).

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



Σχ.1: Απλοποιημένος γεωλογικός χάρτης του ελληνικού τμήματος της Ροδόπης, με τις δύο τεκτονικές ενότητες.

Fig.1: Simplified geological map of the Greek Rhodope showing the two tectonic units.

τρώματα, (της τάξεως των 150°C), για το επεισόδιο των μεσαίων πιέσεων, οδήγησαν στη διάκριση δύο, κύριων τεκτονικών ενοτήτων, μιας κατώτερης με συνθήκες μεταμόρφωσης ανώτερης πρασινοσχιστολιθικής - κατώτερης αμφιβολιτικής φάσης και μιας ανώτερης, με συνθήκες μέσης έως ανώτερης αμφιβολιτικής φάσης (Mposkos and Liati 1993, Fig.1).

Κατά τη μεταμόρφωση των υψηλών πιέσεων οι συνθήκες P-T που επικράτησαν στην κατώτερη τεκτονική ενότητα (Κ.Τ.Ε.) εκτιμήθηκαν σε 14-15Kbar και 550-600°C (Mposkos 1989c, Liati and Mposkos, 1990) και στην ανώτερη τεκτονική ενότητα (Α.Τ.Ε.) σε 13,5-16 Kbar και 750°-775°C (Μπόσκος κ.ά. 1994).

Από τα στοιχεία αυτά προκύπτει ότι, η Κ.Τ.Ε., ακολούθησε μια πορεία βύθισης, με μέση αύξηση της θερμοκρασίας κατά 11,5°C/Km, ενώ η πορεία βύθισης της Α.Τ.Ε. δίνει μια μέση αύξηση της θερμοκρασίας κατά 15,5°C/Km.

Τίθεται επομένως το ερώτημα, κατά πόσο οι δύο τεκτονικές ενότητες της Ροδόπης έχουν κοινή μεταμορφική ιστορία και κοινή γεωδυναμική εξέλιξη ή αποτελούν δυο ενότητες που ακολούθησαν διαφορετική τεκτονομεταμορφική εξέλιξη, σε διαφορετικές γεωλογικές περιόδους. Η απάντηση στο ερώτημα αυτό απαιτεί, το συνδιασμό δεδομένων από την τεκτονική γεωλογία, την ισοτοπική γεωχημεία και την πετρολογία.

Στην εργασία αυτή θα προσπαθήσουμε να δώσουμε μια απάντηση στο παραπάνω ερώτημα, συγκρίνοντας τη μεταμορφική εξέλιξη των δύο τεκτονικών ενοτήτων με βάση τα πετρολογικά κυρίως δεδομένα, σε συνδιασμό με νεότερα γεωχρονολογικά στοιχεία.

ΓΕΩΛΟΓΙΚΗ ΤΟΠΟΘΕΤΗΗ-ΛΙΘΟΛΟΓΙΕΣ - GEOLOGICAL SETTING-LITHOLOGIES

Στο σχήμα 1 δίδονται σε απλοποιημένο γεωλογικό χάρτη οι δύο τεκτονικές ενότητες της Ροδόπης. Η Κ.Τ.Ε. στην ανατολική Ροδόπη αποτελείται κυρίως από προαλπικά μιγματιτιωμένους γνεύσιους (Mposkos and Wawrzenitz, 1995), ορθογνεύσιους (γρανιτογνεύσιους), ηλιτικοί γνεύσιους και πλούσιους σε αργίλιο μεταπηλίτες, με παρεμβολές αμφιβολιτών και αμφιβολούχων εκλογιτών (amphiboleclogites). Μεγάλα υπερμαφικά σώματα, όπως εκείνα της Σμιγάδας - Εσωχής και του Σουφλίου, συνοδευόμενα από μεταβασίτες, παρεμβάλλονται στις λιθολογίες της. Στη δυτική Ροδόπη, ορθογνεύσιοι αποτελούν τους κατώτερους λιθολογικούς

Πετρολογικές έρευνες στο Ελληνικό τμήμα της Ροδόπης απέκαλύψαν ότι, η Ροδόπη επηρεάστηκε από τρία διαδοχικά κύρια μεταμορφικά επεισόδια: μεταμόρφωση υψηλών πιέσεων, μεσαίων πιέσεων και ανάδρομη μεταμόρφωση κατώτερης πρασινοσχιστολιθικής φάσης, χαμηλών πιέσεων (Mposkos 1989a, Liati and Mposkos 1990, Mposkos and Liati 1993). Σημαντικές διαφορές στο βαθμό μεταμόρφωσης σε άμεσα γειτνιάζοντα πε-

σηματισμούς, με υπερκείμενους χαλαζιο-αστριούχους γνεύσιους (παραγνεύσιους) και μεταπηλίτες, οι οποίοι, μέσω μιας σειράς εναλλαγών μαρμαρυγιακών σχιστολίθων-μαρμάρων, που φέρουν παρεμβολές αμφιβολιτών (σχετικά σπάνιοι), μεταβαίνουν στην ανώτερη λιθολογική ενότητα των μαρμάρων (μάρμαρα Φαλακρού).

Η Α.Τ.Ε. αποτελείται από ορθογνεύσιους, συχνά μιγματιτωμένους, παραγνεύσιους και μεταπηλίτες, μιγματιτωμένους επίσης κατά περιοχές, με παρεμβολές μερικά αμφιβολιτωμένων εκλογιτών, αμφιβολιτών και μαρμάρων. Υπερμαφικά σώματα, μικρών σχετικά διαστάσεων, παρεμβάλλονται στους μεταπηλίτες και παραγνεύσιους. Στην ανατολική Ροδόπη εμφανίζονται, επί πλέον, μεγάλης έκτασης στρωματόμορφα μεταγαββρικά και οξινότερα μεταμορφωμένα πλουτώνια πετρώματα. Πηγματίτες, κυρίως μοσχοβιτικοί, διαπερνούν όλες τις λιθολογίες της Α.Τ.Ε. Σε μεταδιορίτες και μεταγάββρους, οι πηγματίτες έχουν συχνά τροντγιεμιτική σύσταση.

ΠΕΤΡΟΛΟΓΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΤΗΣ ΚΑΤΩΤΕΡΗΣ ΤΕΚΤΟΝΙΚΗΣ ΕΝΟΤΗΤΑΣ - PETROLOGICAL DATA FROM THE LOWER TECTONIC UNIT

Τα τελευταία χρόνια, συστηματική μελέτη των μεταμορφωμένων πετρωμάτων της Ροδόπης έδειξε ότι, η Κ.Τ.Ε. συμπεριελήφθη σε ένα μεταμορφικό κύκλο αλπικής ηλικίας (Mposkos 1989a,b,c, Mposkos and Liati 1993, Mposkos et al. 1990, Liati and Mposkos 1990), όπως δείχνουν τα γεωχρονολογικά στοιχεία (Del Moro et al. 1989, Celet et Clement, 1991). Ο κύκλος αυτός περιλαμβάνει μεταμόρφωση υψηλών πιέσεων, η οποία ακολουθήθηκε από μεταμόρφωση μεσαίων πιέσεων και στη συνέχεια ανάδρομη μεταμόρφωση χαμηλών πιέσεων. Η μεταμόρφωση των υψηλών πιέσεων συνδέεται με ένα μηχανισμό υποβύθισης (subduction), ενώ τα επακόλουθα στάδια, με την αναπροσαρμογή των παραγνεύσεων των λιθολογιών της Κ.Τ.Ε. σε χαμηλότερες πιέσεις, κατά την πορεία ανάδυσης. Πληροφορίες για τη μεταμορφική εξέλιξη της Κ.Τ.Ε. παρέχουν οι μεταβασίτες, οι γνεύσιοι και οι μεταπηλίτες. Ορυκτολογικές παραγνεύσεις και χαρακτηριστικές αντιδράσεις, που τεκμηριώνουν τα διάφορα στάδια της μεταμορφικής της εξέλιξης, δίδονται στον Πίνακα 1.

A: Μεταμόρφωση υψηλών πιέσεων

Η μεταμόρφωση των υψηλών πιέσεων τεκμηριώνεται με την παρουσία αμφιβολούχων εκλογιτών στην ανατολική Ροδόπη (Mposkos and Perdikatsis 1987, Mposkos 1989b, Liati and Mposkos 1990), με ορυκτά εκλογιτικής φάσης γρανάτη, ομφακίτη (Jd_{35-55}) ±κυανίτη, Na-ούχο τρεμολίτη-κεροσίλβη, φεγγιτικό μοσχοβίτη, κλινοζοϊσίτη, ρουτίλιο, (Πίν.1). Το μέγιστο της μεταμόρφωσης των υψηλών πιέσεων ήταν έξω από το πεδίο σταθερότητας του γλαυκοφανή (Carman and Gilbert 1983), δεδομένου ότι οι αμφίβολοι που συνυπάρχουν με ομφακίτη, είναι κυρίως Ca-ούχοι αμφίβολοι, πλούσιοι σε Na, με Na_2O που κυμαίνεται μεταξύ 3.2 και 4.6%.

Στους γνεύσιους, η μεταμόρφωση των υψηλών πιέσεων τεκμηριώνεται τόσο στην ανατολική όσο και στη δυτική Ροδόπη με την παραγένεση: φεγγίτης ($\text{Si}=6.9-7$ για 22 οξυγόνα)-αλβίτης-μικροκλινής±βιοτίτης-χαλαζίας-κλινοζοϊσίτης±γρανάτης και στους μεταπηλίτες με την παραγένεση: φεγγίτης ($\text{Si}=6.65-6.85$)-γρανάτης-χλωριτοειδής-χλωρίτης±κυανίτης±παραγονίτης-χαλαζίας-ρουτίλιο (Πίν.1).

Οι συνθήκες P-T που επικράτησαν κατά την μεταμόρφωση των υψηλών πιέσεων εκτιμήθηκαν στην ανατολική Ροδόπη σε 14-15Kbar και 550-600°C (Mposkos 1989c, Liati and Mposkos 1990) και στη δυτική σε ≈12 Kbar και ≈520°C.

B: Μεταμόρφωση μεσαίων πιέσεων

Η πορεία ανάδυσης της Κ.Τ.Ε. στο στάδιο που χαρακτηρίζει τη μεταμόρφωση των μεσαίων πιέσεων, συνοδεύεται από πλήθος αντιδράσεων αφυδάτωσης. Οι αντιδράσεις $\text{Ctd}+\text{Phen} \rightarrow \text{St}+\text{Chl}+\text{Ms}+\text{Qtz}+\text{H}_2\text{O}$, $\text{Ctd}+\text{Ms}+\text{Qtz} \rightarrow \text{St}+\text{Bi}+\text{H}_2\text{O}$, $\text{Grt}+\text{Chl}+\text{Ms} \rightarrow \text{St}+\text{Bt}+\text{H}_2\text{O}$ (Πίν.1), που διαπιστώθηκαν στους μεταπηλίτες (Mposkos 1989, Mposkos

Πίν. 1: Ορυκτολογικές παραγενέσεις και κρίσιμες αντιδράσεις, που χαρακτηρίζουν τη μεταμόρφωση υψηλών πιέσεων και την πορεία ανάδυσσης της κατώτερης τεκτονικής ενότητας της Ροδόπης.

Table 1: Mineral parageneses and critical reactions, characterizing the high pressure metamorphism and uplift path of the lower tectonic unit in Rhodope.

Μεταμόρφωση υψηλών πιέσεων	Μεταμόρφωση μεσαίων πιέσεων	Ανάδρωση μεταμόρφωση χαμηλών πιέσεων
Μεταπηλίτες Ανατολικής Ροδόπης		
Grt-Cld-Chl±Ky-Phen (Si=6.85)±Pg-Qtz-Rt	St-Chl ₂ -Bi-Ms (Si=6.3-6.1) Cld+Phen → St+Chl+Ms+Qtz+H ₂ O, Cld+Ms+Qtz → St+Bi+H ₂ O, Grt+Chl+Ms → St+Bi+H ₂ O	And-Chl ₃ -Ms (σφρακίτης) Cld+Qtz → And+Chl+H ₂ O
Μεταπηλίτες Δυτικής Ροδόπης		
Grt-Cld-Chl-Qtz±Pg-Phen (Si=6.65)-Rt±Ilm	Bi, Ms (Si=6.3 - 6.15)	
Ορθογνεύσιοι Ανατολικής και Δυτικής Ροδόπης		
E.R. Qtz-Ab-Kfs-Phen ₁ (Si=7.0)±Bi ₁ -Czo±Grt W.R. Qtz-Ab-Kfs-Phen ₁ (Si=6.9)±Bi-Czo	Phen ₂ (Si=6.5 - 6.2)-Bi ₂ -Pl (An ₁₁₋₁₇)-Kfs Phen ₁ → Phen ₂ +Bi+Kfs+Qtz+H ₂ O	
Εκλογίτες Ανατολικής Ροδόπης		
Grt-Cpx (Jd ₃₀₋₅₅)-Tr-Hbl±Gln-Czo±Ky-Phen-Rt-Qtz	συμπλεκτίτες Cpx (Jd ₁₅)-Ab, Tr/Hbl-Ab/Pl _{An} (14-18) Cpx core (Jd ₃₁) → Cpx rim (Jd ₁₆), Bi ₁ -Pl (An ₁₅) Na-Tr → Hbl, πλούσια σε Na Hbl → φτωχότερη σε Na Hbl	Grt → Chl+Bi ₂ Hbl → Act
Αμφιβολίτες Ανατολικής Ροδόπης		
Tr-Hbl-Ab-Chl-Czo-Qtz±Phen±Pg±Grt±Mrg (Pg ₃₀)-Rt	Hbl-Pl (An ₂₂₋₃₃)±An±Spn Tr → Hbl, Ab → Pl (An ₂₂₋₃₃), Mrg (Pg ₃₀)+Czo+Qtz → Pl (An ₈₃₋₉₆)+H ₂ O	Grt → Chl+Czo Hbl → Act
Αμφιβολίτες Δυτικής Ροδόπης		
Tr-Ab-Chl-Czo±Grt±Phen-Qtz-Rt	Hbl-Pl (An ₁₇₋₃₂)-Spn Tr → Hbl, Ab (An ₂₋₈) → Pl (An ₁₇₋₃₂)	

Συμβολισμοί ορυκτών κατά Kretz (1983). Επιπλέον Phen = φεγγίτης.
Symbols for minerals after Kretz (1983). In addition Phen = phengite.

and Liati 1993), καθορίζουν την πορεία ανάδυσσης από τη μέγιστη τιμή των 14-15Kbar μέχρι τα 4 Kbar. Κατά την πορεία αυτή, η θερμοκρασία παρέμεινε σταθερή ή παρουσίασε μικρή αύξηση, (Σχήμα 2) (βλέπε επίσης Mroskos 1989c, Fig.7 και Mroskos and Liati 1993 Fig.11A), υποδηλώνοντας γρήγορο ρυθμό ανάδυσσης. Στους γνεύσιους η πορεία ανάδυσσης εκφράζεται κατεξοχή με τη σταδιακή ελάττωση του σελαδονιτικού μορίου στο φεγγίτη, η οποία τεκμηριώνει την αντίδραση αφυδάτωσης phen₁ → phen₂+Bi+Kfs+Qtz+H₂O (Πίν.1).

Στους μεταβασίτες (εκλογίτες, γρανατούχους αμφιβολίτες και κοινούς αμφιβολίτες), στο στάδιο των μεσαίων πιέσεων έλαβαν χώρα, επίσης, πλήθος αντιδράσεων, πολλές από τις οποίες αποτελούν αντιδράσεις αφυδάτωσης. Στους εκλογίτες, κλινοφυρόξενοι με ζωνώδη σύσταση παρουσιάζουν σταδιακή ελάττωση του ιαδειτικού μορίου από το κέντρο προς την άκρη (Jd₃₁ κέντρο, Jd₁₆ άκρη) (Mroskos and Perdikatsis 1987). Συμπλεκτίτες διοψιδίου (Jd₁₅)-αλβίτη, ακτινόλιθου-αλβίτη, τεκμηριώνουν το πρώτο στάδιο ανάδυσσης, ενώ συμπλεκτίτες βιοτίτη-ολιγοκλάστου (An₁₅) σε ψευδομόρφωση κατά φεγγίτη και ακτινόλιθου/κεροσίλβης-ολιγοκλάστου (An₁₄₋₁₈), σχηματίστηκαν σε πιέσεις χαμηλότερες των 9Kbar (Σχ.2). Σε όλους τους τύπους των μεταβασιτών, διαπιστώθηκαν αμφίβολοι με ζωνώδη σύσταση, με κέντρο Na-ούχου τρεμολίτη και εξωτερική ζώνη μαγνησιούχου κεροσίλβης/τσερμακίτικης κεροσίλβης (Mroskos 1989b, 1991). Πιθανά, η ζώνωση αυτή δείχνει μικρή αύξηση της θερμοκρασίας κατά το στάδιο ανάδυσσης. Σε γρανατούχους αμφιβολίτες της ανατολικής Ροδόπης, Ca-ούχα πλαγιόκλαστα (An₈₃₋₉₆), τα οποία αντικατέστησαν ψευδομορφικά πλούσιο σε Na μαργαρίτη και συνυπάρχουν με ολιγόκλαστο, σχηματίστηκαν σύμφωνα με την αντίδραση Czo+Mrg (Pg₃₀)+Qtz → Pl (An₈₃₋₉₆)+H₂O, σε πιέσεις χαμηλότερες των 7Kbar (Σχ.2). Η παρουσία του παραγονίτη σε μεταπηλίτες και αμφιβολίτες, δείχνει ότι η πορεία ανάδυσσης δεν ξεπέρασε τις συνθήκες της

Εχ. 2: Συνθήκες P-T της μεταμόρφωσης υψηλών πιέσεων και πορεία ανάδυσσης της κατώτερης τεκτονικής ενότητας της Ροδόπης. Ισοστασιαστικές καμπύλες Si=7, 6.9 και 6.2 από Massonne and Schreyer (1987), οι καμπύλες Ab → Jd+Qtz και Jd₅₀ από Gasparik and Lindsley (1981), Ab/Ol από Muruyama et al. (1983), Ky.Ctd → St.Chl, Grt.Chl → Ctd.Bi, Ctd → St.Grt.Chl και Ctd → Grt.Bi.St από Vuichard and Balleuvre (1988), Ctd+Qtz → And+Chl από Mposkos and Liati (1993), Zo+Mrg+Qtz → An+H₂O από Chatterjee et al. (1984), Pg+Qtz → Ab+Al₂SiO₅+H₂O από Chatterjee (1972). Ορια φάσεων Al₂SiO₅ από Brohlen et al. (1991). W.R. = Πορεία ανάδυσσης δυτικής, E.R. ανατολικής Ροδόπης.

Fig.2: P-T conditions of the high-pressure metamorphism and uplift path of the lower tectonic unit from Rhodope. Si=7, 6.9 and 6.2 isopleths are from Massonne and Schreyer (1987);

the curves Ab → Jd+Qtz and Jd₅₀ from Gasparik and Lindsley (1981); Ab/Ol boundary from Muruyama et al. (1983); the curves Ky.Ctd → St.Chl, Grt.Chl → Ctd.Bi, Ctd → St.Grt.Chl and Ctd → Grt.Bi.St are from Vuichard and Balleuvre (1988); Ctd+Qtz → And+Chl after Mposkos and Liati (1993); Zo+Mrg+Qtz → An+H₂O after Chatterjee et al. (1984); Pg+Qtz → Ab+Al₂SiO₅+H₂O after Chatterjee (1972). The triple point of the aluminosilicates is from Brohlen et al. (1991). W.R. = Uplift path of western, E.R. eastern Rhodope.

αντίδρασης Pg+Qtz → Ab+Al₂SiO₅+H₂O (Εχ.2).

Γ: Ανάδρομη μεταμόρφωση

Η ανάδρομη μεταμόρφωση επηρέασε, εν μέρει, όλους τους τύπους των λιθολογιών και τεκμηριώνεται στους μεταβασίτες, με την αντικατάσταση του γρανάτη από χλωρίτη+επίδοτο, χλωρίτη+πράσινο βιοσίτη και της κερροσίλης από ακτινόλιθο και χλωρίτη. Στους μεταπηλίτες, τεκμηριώνεται με την αντικατάσταση του χλωριτοειδή από ανδαλουσίτη+χλωρίτη (Mposkos and Liati 1993), (Εχ. 2).

ΠΕΤΡΟΛΟΓΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΤΗΣ ΑΝΩΤΕΡΗΣ ΤΕΚΤΟΝΙΚΗΣ ΕΝΟΤΗΤΑΣ PETROLOGICAL DATA FROM THE UPPER TECTONIC UNIT

Α: Μεταμόρφωση υψηλών πιέσεων

Στην Α.Τ.Ε. η μεταμόρφωση υψηλών πιέσεων τεκμηριώνεται με την παρουσία μερικώς αμφιβολιτιωμένων εκλογιτών, σπινελιούχων γρανατούχων μεταγάββρων και γρανατούχων μεταπεριδοτιτών. Μερικώς αμφιβολιτιωμένοι εκλογίτες, με εκλογιτική φάση παραγένεση: γρανάτης- κλινοπυρόξενος (Jd₂₅) -χαλαζίας - κλινοζοίσιτης -ρουτίλιο (Πιν.2), εντοπίσθηκαν στην ανατολική (Mposkos and Perdikatsis 1987), κεντρική (Liati 1986) και δυτική Ροδόπη (Mposkos et al.

Πίν. 2: Ορυκτολογικές παραγενέσεις και κρίσιμες αντιδράσεις που χαρακτηρίζουν τη μεταμόρφωση υψηλών πιέσεων και την πορεία ανάδυσης της ανώτερης τεκτονικής ενότητας της Ροδόπης

Table 2: Mineral parageneses and critical reactions, characterizing the high pressure metamorphism and uplift path of the upper tectonic unit in Rhodope.

Μεταμόρφωση υψηλών πιέσεων	Μεταμόρφωση μεσαίων πιέσεων	Μεταμόρφωση χαμηλών πιέσεων
Μεταπηλίτες Ανατολικής και Δυτικής Ροδόπης		
Grt-Ky ₁ -Bil ₁ -Ms ₁ -Qtz-Rt±Pl	St-Chl-Ms ₂ -Qtz, Ky ₂ -Bil ₂ -Pl ₁ An(20-31) Grt+Ky+H ₂ O → St+Qtz, Grt+H ₂ O → St+Chl Ky ₁ → Ms ₂ , Grt+Ms ₁ → Ky ₂ +Bil ₂ , Grt+Ms+Pl (<An) → Bi+Pl (>An) Grt+Ky+Qtz+Pl (<An) → Pl (>An)	Ms ₃ -Bil ₃ -And St → Ms, Ky → Ms Grt+Ms → Bi, Ky → And
Μεταπηλίτες Κεντρικής Ροδόπης		
Grt-Ky ₁ -Bil ₁ -Ms ₁ -Qtz-Rt	St-Bil ₂ -Ms ₂ -Sil, Ky ₂ -Bil ₂ -Pl ₁ An(20-30) Ky+Bi+H ₂ O → St+Ms+Qtz, Grt+Ms+H ₂ O → St+Bi+Qtz Grt+Ms → Ky+Bi, Grt+Ms → Bi+Sil+Qtz St+Ms+Qtz → Sil+Bi+H ₂ O, Grt+Ky+Qtz+Pl (<An) → Pl (>An)	Ms ₃ -Bil ₃ St → Ms Ky → Ms Grt+Ms → Bi
Ορθογνώσιοι		
	Qtz+Pl+Kfs+Phen (Si=6.6 - 6.2)±Bi+Czo±Grt (Gr ₅₀ -Alm ₅₀) Czo+Kfs+H ₂ O → Grt+Ms+Qtz	
Ανατηκτικά νεοσώματα γρανιτικής - τροντυριτικής σύστασης Ανατ. Ροδόπης		
	Grt-Pl (An ₂₉₋₃₄)-Qtz-Ms-Pg-Czo-Ab/Pl (An ₃₋₁₅)-(Kfs) Pl (An ₃₀)+Kfs+H ₂ O → Czo+Ms+Pg+Qtz+Pl (An ₁₅)	
Εκλογίτες		
Grt-Cpx ₁ (Jd ₂₀₋₂₅)-Czo-Qtz-Rt	Cpx ₂ -Hbl ₁ -Pl (An ₂₆₋₃₆)-Hbl ₂ -Czo Cpx → σταθιακή ελάττωση Na μέχρι Cpx(Jd ₉) Grt+Cpx ₁ +H ₂ O → Hbl ₁ +Pl	Hbl → Act
Μεταπεριδοίτες Ανατολικής Ροδόπης		
Οpx ₁ -Cpx ₁ -Spl ₁ -Ol ₁ ±Grt Οpx ₁ -Cpx ₁ -Ol ₁ -Chl An+Ol+Opx → Grt (Gr ₁₃ Pr ₆₂ Alm ₂₂ Sp ₁) Cpx	Hbl-Ol ₂ -Opx ₂ -Cpx ₂ -Spl ₂ , Tr-Ol ₂ -Chl-Spl ₃ , Tr-Chl-Tlc-Spl ₃ , Ol ₂ -Tr-Chl-Tlc-Aeg-Spl ₃ , Ol ₂ -Tlc-Aeg-Spl ₃ Grt+Ol → Opx+Cpx+Spl ₂ , Cpx+Cpx+Spl ₂ +H ₂ O → Hbl+Ol Opx+Cpx+H ₂ O → Tr+Ol, Opx+H ₂ O → Tlc+Ol, Tlc+Ol+H ₂ O → Aeg	Chl ₂ -Crl-Mag
Επινελοσώχοι-γρονατούχοι μεταγέβρωι Ανατολικής Ροδόπης		
Grt+Cpx+Spl±Hbl+Tl An+Ol → Grt+Cpx+Spl		Chl-Dap-Frh-Tr-Czo Grt+Spl+H ₂ O → Chl+Frh+Dap

1990). Οι Mposkos and Perdikatsis (1987), εκτίμησαν τις θερμοκρασίες του εκλογιτικού σταδίου σε 735-765°C και τις ελάχιστες πιέσεις μεταξύ 12-14,5 Kbar. Θερμοκρασίες 750-775°C και πιέσεις μεταξύ 13,5-16 Kbar εκτιμήθηκαν για το ίδιο στάδιο σε σπινελιούχους-γρονατούχους μεταγέβρωι με παραγένεση: γρονατίτης-κλινοπυρόξενος-σπινέλιος±κεροσίτη και σε γρονατούχους μεταπεριδοίτες με παραγένεση: γρονατίτης (Gr₁₃₋₁₅Pr₅₈₋₆₆Alm₂₁₋₂₉Sp_{0.4-1.6})-κλινοπυρόξενος-ορθοπυρόξενος-ολιβίνης (Fo_{0.9})-Cr-ούχος σπινέλιος (Πίν.2) (Μπόσκος κ.ά. 1994). Θερμοκρασίες 780°C και πιέσεις 20 Kbar αναφέρονται από τους Kolceva et al. (1986), για κυανιτούχους εκλογίτες της περιοχής Ardino, του Βουλγαρικού τμήματος της κεντρικής Ροδόπης (βλέπε και Liati and Mposkos 1990). Πιθανά, η περιοχή του Ardino αντιπροσωπεύει τμήμα της ανώτερης τεκτονικής ενότητας, που βυθίστηκε περισσότερο, σε σχέση με εκείνο του Ελληνικού τμήματος, της ανατολικής Ροδόπης. Είναι όμως εξίσου πιθανόν, κατά το στάδιο που σχηματίστηκε ο κυανίτης, ο οποίος συνυπάρχει με ομφακίτη (Jd₅₀), στους εκλογίτες του Ardino, το αH₂O να ήταν μικρότερο της μονάδας, με αποτέλεσμα, η αντίδραση Pg → Jd₅₀+Ky να έλαβε χώρα σε χαμηλότερες πιέσεις. Η άποψη αυτή ενισχύεται και από το γεγονός ότι, οι εκλογίτες του Ardino εμφανίζονται ως μικρά φακοειδή σώματα σε μιγματιζωμένους γνεύσιους, στους οποίους η μερική τήξη πρέπει να έλαβε χώρα πριν από το σχηματισμό του κυανίτη στον εκλογίτη, (σύγκρινε την καμπύλη έναρξης της τήξης γρανιτικής σύστασης πετρώματος με την καμπύλη της αντίδρασης Pg → Jd₅₀+Ky, Σχ.3), μειώνοντας πιθανά, την ενεργότητα του νερού στο άμεσα περιβάλλον πέτρωμα.

Στους μεταπηλίτες δεν αναγνωρίστηκαν κρίσιμα ορυκτά της μεταμόρφωσης των υψηλών πιέσεων. Είναι όμως ευρύτητα διαδεδομένη η παραγένεση γρονατίτης-κυανίτης-βιοτίτης, η οποία είναι σταθερή σε πιέσεις μεγαλύτερες των 8 Kbar και θερμοκρασίες μεγαλύτερες των 650°C (Vuichard and Ballèvre 1988), (Σχ.3,

καμπύλες αντιδράσεων 4, 6 και 7). Η παραγένεση αυτή μπορεί να θεωρηθεί, παρόλο που δεν είναι κρίσιμη, ως παραγένεση του εκλογιτικού σταδίου. Η απουσία παραγονίτη και η παρουσία κυανίτη+πλαγιόκλαστου, δείχνουν επίσης ότι οι συνθήκες της μεταμόρφωσης των υψηλών πιέσεων ήταν υψηλότερες από εκείνες που καθορίζονται από την αντίδραση $Pg+Qtz \rightarrow Ab+Ky$ (Σχ.3, καμπύλη 8).

Κατά τη μεταμόρφωση των υψηλών πιέσεων οι συνθήκες P-T ξεπέρασαν τις συνθήκες αρχικής τήξης, τόσο του γρανίτη όσο και εκείνες του τροντιγιεμίτη (Σχ.3, καμπύλες 9 και 10). Πράγματι αρκετές λιθολογίες της Α.Τ.Ε. (γνεύσιοι, μεταπηλίτες, μεταδιορίτες), έχουν υποστεί μερική τήξη, σχηματίζοντας μιγματίτες, με νεοσώματα γρανιτικής και τροντιγιεμιτικής σύστασης. Η μιγματιτώση δεν πρέπει να ήταν ιδιαίτερα έντονη, δεδομένου ότι οι συνθήκες P-T δεν υπερέβησαν εκείνες της αντίδρασης ξηράς τήξης, $Ms+Pl+Qtz \rightarrow Bi+Kfs+Al_2SiO_5 + L$ (Thompson, 1982) (Σχ.3), η οποία θα προμήθευε ικανές ποσότητες νερού, για τη συνέχιση της ανάτηξης. Φεγγιτικός μοσχοβίτης, αποτελεί κύρια ορυκτολογική φάση των γνευσίων και μεταπηλιτών (Πίν.2).

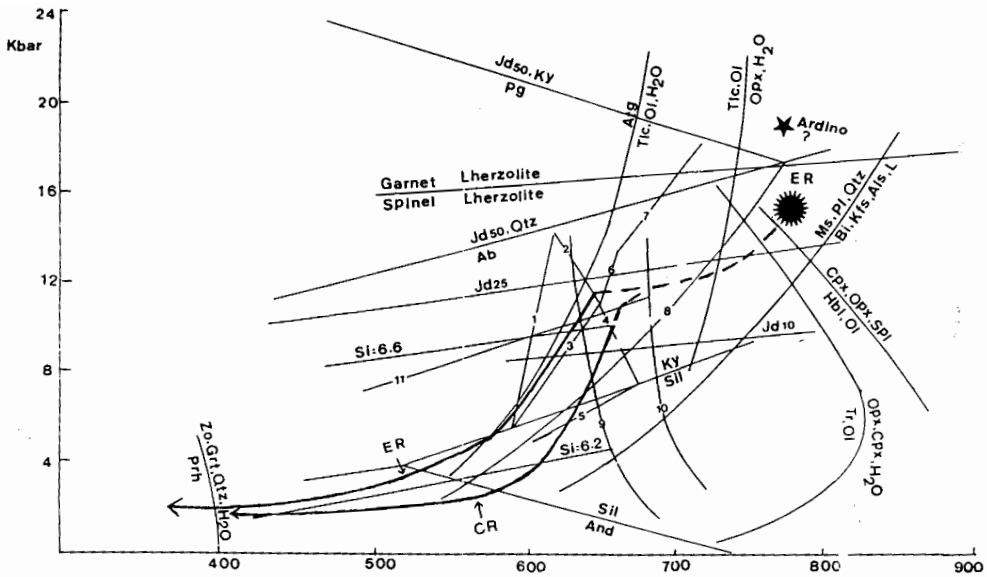
B: Μεταμόρφωση μεσαίων πιέσεων

Σε αντίθεση με την κατώτερη τεκτονική ενότητα, στην οποία η αποσυμπύεση συνοδεύεται κυρίως από αντιδράσεις αφυδάτωσης, στην ανώτερη τεκτονική ενότητα, η αποσυμπύεση συνοδεύεται από πλήθος αντιδράσεων ενυδάτωσης, οι οποίες φαίνεται ότι έλαβαν χώρα και με ταυτόχρονη σταδιακή ελάττωση της θερμοκρασίας. Στους μεταπεριδοτίτες, για παράδειγμα, έλαβαν χώρα αντιδράσεις ενυδάτωσης όπως: $Cpx+Opx+Spr+H_2O \rightarrow Hbl + Ol$, $Grt+Cpx+Opx+H_2O \rightarrow Hbl + Ol$, $Opx+Cpx+H_2O \rightarrow Tr+Ol$, $Opx+H_2O \rightarrow Tlc+Ol$, $Ol+Tlc+H_2O \rightarrow Atg$, (Σχ.3), (βλέπε επίσης Μπόσκος κ.ά., 1994). Στους εκλογίτες έλαβε χώρα σταδιακή αντικατάσταση του γρανάτη και κλινοπυρόξενου, στα πρώτα στάδια από κελυφτιτική κεροσίτλη και πλαγιόκλαστο (An₂₆₋₃₆), ή ποικιλτική κεροσίτλη. Η αμφιβολιτώση του σταδίου αυτού έλαβε χώρα με ελάττωση της πίεσης, όπως τεκμηριώνεται από τους κλινοπυρόξενους με ζωνώδη σύσταση, στους οποίους ελάττώνεται το ποσοστό του ιαδείτη από το κέντρο (Jd₂₃₋₂₅) προς την άκρη (Jd₂₁₋₁₆) και από το σχηματισμό συμπλεκτιτών κλινοπυρόξενου (Jd₉₋₁₀)-πλαγιόκλαστου (An₂₇₋₃₇) (Mposkos and Perdikatsis 1987, Liati and Mposkos 1991). Σε προχωρημένο βαθμό αμφιβολιτώσης, εξαφανίζεται πλήρως ο κλινοπυρόξενος, οπότε σχηματίζονται, ανάλογα με την αρχική σύσταση του πετρώματος, γρανατούχοι αμφιβολίτες ή κοινοί αμφιβολίτες, με μόνη υπολειμματική φάση του εκλογιτικού σταδίου, όσον αφορά τους τελευταίους, το ρουτίλιο.

Κρίσιμες παραγενέσεις, που καθορίζουν την πορεία ανάδυσσης από το βάθος των ≈35 Km μέχρι ≈14 Km, διαπιστώθηκαν σε μεταπηλίτες, μιγματίτες με νεοσώματα γρανιτικής και τροντιγιεμιτικής σύστασης και σε τροντιγιεμιτικής σύστασης πηγυρίτες.

Στους μεταπηλίτες η πορεία ανάδυσσης τεκμηριώνεται από πλήθος αντιδράσεων ενυδάτωσης (Πίν.2) (για λεπτομέρειες βλέπε Mposkos and Liati 1993). Στην ανατολική Ροδόπη, η πορεία ανάδυσσης πέρασε από το πεδίο σταθερότητας της παραγένεσης γρανάτη-σταυρόλιθου-χλωρίτη, ενώ στην κεντρική Ροδόπη από τα υψηλότερων θερμοκρασιών πεδία σταυρόλιθου-κυανίτη-βιοτίτη και γρανάτη-σιλλιμανίτη-βιοτίτη (Σχ.3). Σε όλες τις περιοχές της Α.Τ.Ε. οι γρανάτες των μεταπηλιτών παρουσιάζουν ανάστροφη ζώνωση, με ελάττωση του MgO και αύξηση του FeO και MnO από το κέντρο προς την άκρη (Mposkos 1989a, Mposkos and Liati 1993), γεγονός που τεκμηριώνει την ελάττωση της θερμοκρασίας (Tracy 1982) κατά την πορεία της ανάδυσσης.

Στην ανατολική Ροδόπη, λευκώματα μιγματιών τροντιγιεμιτικής σύστασης, αποτελούνται από πλαγιόκλαστο (An₂₉₋₃₄)-χαλαζία±γρανάτη-κλινοζοϊσίτη-παραγονίτη-μοσχοβίτη-ρουτίλιο. Τα πλαγιόκλαστα παρουσιάζουν συχνά κανονική ζώνω-



Σχ.3: Συνθήκες P-T της μεταμόρφωσης υψηλών πιέσεων και πορεία ανάδυσσης της ανώτερης τεκτονικής ενότητας της Ροδόπης. Οριο Spinel Lherzolite → Garnet Lherzolite από O'Neill (1981), καμπύλες Pg → Jd₅₀+Ky από Holland (1979), Ms+Pl +Qtz → Bi+Kfs+Als+L από Thompson (1982), Prh → Zo+Grt+Qtz+H₂O από Liou (1971), Cpx+Opx+Spl → Hbl+Ol, Opx+Cpx+H₂O → Tr+Ol, Opx+H₂O → Tlc+Ol και Tlc+Ol+H₂O → Atg από Jenkins (1981). Οι αριθμοί 1-11 αντιπροσωπεύουν τις καμπύλες: 1 = Ctd → St+Grt+Chl, 2 = St → Ky+Grt+Chl, 3 = Grt+Chl+Ms → St+Bi, 4 = St → Ky+Bi+Grt, 6 = Grt+Chl+Ms → Ky+Bi, 7 = Tlc+Grt+Ms → Ky+Bi από Vuichard and Balleve (1988), 5 = St+Ms → Grt+Sil+Bi από Powell and Holland (1990), 9 = Or+Ab+Qtz+H₂O → L, 10 = An₂₀+Qtz+H₂O → L, 11 = Pl (An₂₀)+Kfs+H₂O → Czo+Ms+Pg+Qtz από Johannes (1985). Οι υπόλοιπες καμπύλες όπως και στο Σχήμα 2.

Fig.3: P-T conditions of the high-pressure metamorphism and uplift path of the upper tectonic unit from Rhodope. Spinel Lherzolite → Garnet Lherzolite boundary is after O'Neill (1981). The curves are: Pg → Jd₅₀+Ky from Holland (1979); Ms+Pl+Qtz → Bi+Kfs+Als+L from Thompson (1982); Prh → Zo+Grt+Qtz+H₂O from Liou (1971); Cpx+Opx+Spl → Hbl+Ol, Opx+Cpx+H₂O → Tr+Ol, Opx+H₂O → Tlc+Ol and Tlc+Ol+H₂O → Atg from Jenkins (1981). The numbers 1-11 represent the following reaction curves: 1 = Ctd → St+Grt+Chl, 2 = St → Ky+Grt+Chl, 3 = Grt+Chl+Ms → St+Bi, 4 = St → Ky+Bi+Grt, 6 = Grt+Chl+Ms → Ky+Bi, 7 = Tlc+Grt+Ms → Ky+Bi (from Vuichard and Balleve, 1988); 5 = St+Ms → Grt+Sil+Bi from Powell and Holland (1990); 9 = Or+Ab+Qtz+H₂O → L, 10 = An₂₀+Qtz+H₂O → L, 11 = Pl (An₂₀)+Kfs+H₂O → Czo+Ms+Pg+Qtz from Johannes (1985). For the other curves see Fig.2.

ση (An₃₀ κέντρο, An₁₅ άκρη). Ο κλινοζοϊσίτης αναπτύσσεται σε συμπλεκτική σύμφυση με χαλαζία και πλαγιόκλαστο, του οποίου η περιεκτικότητα σε ανορθίτη είναι ίδια με εκείνη της εξωτερικής ζώνης, σε ζωνώδεις κρυστάλλους. Και ο μοσχοβίτης αναπτύσσεται, συχνά, σε συμπλεκτική σύμφυση με πλαγιόκλαστο (An₃₋₁₅)+χαλαζία, τόσο στα τρονγιεμιτικές όσο και στα γρανιτικές συστάσεις λευκοσώματα. Στα πρώτα, ο μοσχοβίτης συνοδεύεται συνήθως από παραγονίτη και πάντοτε από συμπλεκτίτες κλινοζοϊσίτη-πλαγιοκλάστου/χαλαζία. Ανεξάρτητα από τον τρόπο με τον οποίο σχηματίστηκαν οι συμπλεκτίτες, δηλ. είτε από αντίδραση των αστρίων με το υπόλοιπο τήγμα, κατά τη διάρκεια στερεοποίησης του ανατηκτικού μάγματος είτε από αντιδράσεις με διείδυση νερού, σε μεταγενέστερο στάδιο, οι παραγενέσεις πλαγιόκλαστο (An₁₅)+κλινοζοϊσίτης+μοσχοβίτης+παραγονίτης+χα-

λαζίας στο νεόσωμα τροντιγιεμιτικής σύστασης και K-ούχος άστριος+ πλαγιόκλαστο+μοσχοβίτης+κλινιοζοϊσίτης+ χαλαζίας, στο γρανιτικής σύστασης νεόσωμα, δείχνουν ότι, οι συμπλεκτίτες αυτοί σχηματίστηκαν (για θερμοκρασίες $\geq 600^{\circ}\text{C}$) σε πιέσεις μεγαλύτερες των 10Kbar, σύμφωνα με τα πειραματικά δεδομένα του Johannes (1984), (Σχ.3, καμπύλη αντίδρασης 11).

Πιέσεις μεταξύ 8-10 Kbar και θερμοκρασίες μεταξύ $600-650^{\circ}\text{C}$ προσδιορίστηκαν με βάση το γεωβαρόμετρο γρανάτη-πλαγιόκλαστου-κυανίτη-χαλαζία, και το γεωθερμόμετρο γρανάτη-βιοτίτη σε μεταπηλίτες της ανατολικής, κεντρικής και δυτικής Ροδόπης (Mposkos 1989a, Mposkos and Liati 1993, Liati 1986). Σε μεταπηλίτες της Κεντρικής Ροδόπης, με παραγένεση γρανάτη-πλαγιόκλαστο-σιλλιμανίτη-χαλαζία, οι πιέσεις που προσδιορίστηκαν κυμαίνονται μεταξύ 5.5-6.5 Kbar. Οι τιμές P-T που προαναφέρθηκαν, ερμηνεύονται ως συνθήκες αναπροσαρμογής των παραγενέσεων των μεταπηλιτών κατά τη διάρκεια της ανάδυσης, από τις συνθήκες της εκλογιτικής φάσης σε εκείνες της αμφιβολιτικής. Πιέσεις της τάξεως των 9 Kbar προκύπτουν και από το σελαδονιτικό μόριο φεγγιτικών μοσχοβιτών (μέγιστη τιμή $\text{Si}=6.6$), σε ορθογνεύσιους (Πίν.2).

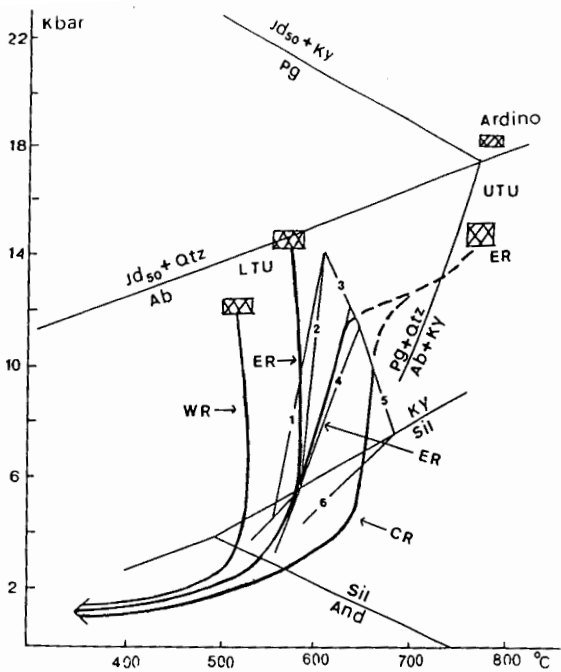
Γ: Μεταμόρφωση χαμηλών πιέσεων, κατώτερης πρασινοσχιστολιθικής φάσης

Η ανάδρομη μεταμόρφωση κατώτερης πρασινοσχιστολιθικής φάσης, επηρέασε επιλεκτικά όλες τις λιθολογίες της Α.Τ.Ε. Στους μεταπηλίτες, τεκμηριώνεται με τη βλάστηση πράσινου έως καφεπράσινου βιοτίτη, σε βάρος του γρανάτη και μοσχοβίτη. Σε σπινελιούχους-γρανατούχους μεταγάββρους της περιοχής Κύμης, τεκμηριώνεται με την αντικατάσταση του γρανάτη και σπινελίου από κορουνδοφυλλίτη, διάσπορο και πρενίτη, και του κλινιοπυρόξενου και της κεροσίτλης από τρεμολίτη, χλωρίτη και πρενίτη.

ΣΥΖΗΤΗΣΗ - ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ DISCUSSION AND CONCLUSIONS

Από την πετρολογική ανάλυση προκύπτουν σαφείς διαφορές σε ότι αφορά την μεταμορφική εξέλιξη μεταξύ της Κ.Τ.Ε. και της Α.Τ.Ε. της Ροδόπης. Στην Κ.Τ.Ε. οι μέγιστες συνθήκες P-T της εκλογιτικής φάσης ήταν 14-15 Kbar και $550-600^{\circ}\text{C}$ και στην Α.Τ.Ε. 13,5-16 Kbar και $750-775^{\circ}\text{C}$. Η Κ.Τ.Ε. ακολούθησε μια πορεία βύθισης, με μέση αύξηση της θερμοκρασίας κατά $11,5^{\circ}\text{C}/\text{Km}$ και η ανώτερη, κατά $15,5^{\circ}\text{C}/\text{Km}$. Από τα στοιχεία αυτά φαίνεται ότι, οι δύο τεκτονικές ενότητες, κατά τη βύθισή τους βρέθηκαν σε διαφορετικά γεωθερμικά πεδία. Το γεγονός αυτό πιθανά σημαίνει ότι, η μεταμόρφωση των υψηλών πιέσεων έλαβε χώρα στις δύο τεκτονικές ενότητες σε διαφορετικά τεκτονομεταμορφικά επεισόδια, αλπικό στην Κ.Τ.Ε., διαφορετικής ηλικίας αλπικό ή προαλπικό (;), στην Α.Τ.Ε. Η αλπικής ηλικίας μεταμόρφωση για την Κ.Τ.Ε. ενισχύεται και από το γεγονός ότι, οι πρωτόλιθοι των ορθογνεύσιων αντιπροσωπεύουν ερκύνιας ηλικίας μαγματίτες (285 Μα στη δυτική Ροδόπη, Wawrzenitz et al., 1994, 296 Μα στην ανατολική Ροδόπη, Peicheva et al., 1992b). Αντίστοιχης ηλικίας μαγματίτες από την Πελαγονική ζώνη (Yarwood and Aftalion 1976, Μουντράκης 1983, Schermer 1990), επηρεάστηκαν από αλπικής μόνο ηλικίας μεταμορφικά επεισόδια (100 Μα, 51-61 Μα, 36-40 Μα και 16-23 Μα Shermer 1990).

Ουσιώδεις διαφορές μεταξύ των δύο τεκτονικών ενότητων προκύπτουν και για την πορεία ανάδυσης (Σχημ.4). Η Κ.Τ.Ε. δείχνει μια περίπου ισόθερμη αποσυμπίεση από το μέγιστο βάθος των ≈ 53 Km μέχρι τα ≈ 14 Km, γεγονός που σημαίνει ταχεία ανάδυση. Το στάδιο αυτό της ανάδυσης, έλαβε χώρα στο Ηώκαινο, όπως δείχνουν ραδιοχρονολογήσεις K-Ar σε αμφιβόλους, από πετρώματα της δυτικής Ροδόπης (Celet et Clement 1990) και Rb-Sr σε μοσχοβίτες από ορθογνεύσιους της ανατολικής Ροδόπης (Wawrzenitz and Mposkos, in press). Οι αντιδράσεις που έλαβαν χώρα, κατά το στάδιο αυτό, ήταν κυρίως αντιδράσεις αφυδάτωσης. Σημαντική ψύξη λαμβάνει χώρα από τα 14 περίπου χιλιόμετρα μέχρι την επιφάνεια.



Σχ. 4:

Διάγραμμα P-T στο οποίο φαίνονται τα πεδία της μεταμόρφωσης υψηλών πιέσεων και οι πορείες ανάδυσσης των δυο τεκτονικών ενότητων της Ροδόπης. L.T.U.=κατώτερη, U.T.U. = ανώτερη τεκτονική ενότητα. W.R. = δυτική Ροδόπη, E.R. = ανατολική Ροδόπη, C.R. = κεντρική Ροδόπη. Καμπύλες αντιδράσεων 1=Ctd+Ky → St+Chl, 2=Ctd → St+Grt+Chl, 3=St → Grt+Ky+Chl, 4=Grt+Chl+Ms → St+Bi, 5=St+Ms → Ky+Bi+Grt (από Vuichard and Balleve 1988), 6=St+Ms → Grt+Sil+Bi (από Powell and Holland, 1991).

Fig. 4: P-T diagram showing the fields of high-pressure metamorphism and uplift paths of the two tectonic units in Rhodope. L.T.U. = Lower tectonic unit; U.T.U. = Upper tectonic unit; W.R. = western Rhodope; E.R. = eastern Rhodope; C.R. = central Rhodope. Reaction curves: 1=Ctd+Ky → St+Chl, 2=Ctd → St+Grt+Chl, 3=St → Grt+Ky+Chl, 4=Grt+Chl+Ms → St+Bi, 5=St+Ms → Ky+Bi+Grt (after Vuichard and Balleve 1988), 6=St+Ms → Grt+Sil+Bi (after Powell and Holland, 1991).

Ηλικίες μοσχοβιτών και βιοτιτών 12-22 Μα από τη δυτική Ροδόπη (ραδιοχρονολογικά δεδομένα Rb-Sr των Del Moro et al. 1989), δείχνουν ότι, το στάδιο αυτό της ανάδυσσης διήρκεσε στη δυτική Ροδόπη μέχρι το Μειόκαινο. Η πορεία ανάδυσσης της Α.Τ.Ε. από το μέγιστο βάθος των ≈48-57 Km μέχρι τα ≈35 Km δεν είναι απόλυτα τεκμηριωμένη. Η πορεία αυτή, φαίνεται ότι έλαβε χώρα μεταξύ Κατώτερου Κρητιδικού και Παλαιοκαίνου, όπως δείχνουν ραδιοχρονολογήσεις Rb-Sr σε μοσχοβίτη από πηγματίτη (Mposkos and Wawrzenitz, 1995) και Sm-Nd σε γρανάτη-κλινοπυρόξενο-ολικό πέτρωμα από σπινελιούχο-γρονατούχο πυροξενίτη (Wawrzenitz and Mposkos, in press) από την ανατολική Ροδόπη. Κατά το στάδιο αυτό η Α.Τ.Ε. ακολούθησε μια πορεία με συνεχή ψύξη και όχι θέρμανση, αφού δεν έλαβε χώρα η αντίδραση $Ms+Pl+Qtz \rightarrow Bi+Kfs+Als+L$, (Σχ.3). Από το βάθος των ≈35 Km μέχρι τα ≈14 Km, η ανάδυση της Α.Τ.Ε. ακολούθησε, στην ανατολική Ροδόπη, πορεία χαμηλοτέρων θερμοκρασιών σε σχέση με την κεντρική. Τοπικά (περιοχή θερμών), οι θερμοκρασίες ήταν ακόμη υψηλότερες και υπερέβησαν εκείνες της αντίδρασης $Ms-Qtz \rightarrow Sil+Kfs+H_2O$ (Mposkos 1989a, Mposkos and Liati 1993). Στην κεντρική και δυτική Ροδόπη, το στάδιο αυτό της ανάδυσσης διήρκεσε μέχρι το κατώτερο Ηώκαινο, όπως τεκμηριώνεται από ραδιοχρονολογήσεις K-Ar σε κερροσίλβες (Liati 1986). Στη συνέχεια, η ανάδυση ακολουθεί μια πορεία, με ταχεία ψύξη, αντίστοιχη με εκείνη της Κ.Τ.Ε.

Είναι προφανές ότι, οι παραγενέσεις που χαρακτηρίζουν τα διάφορα στάδια ανάδυσσης της Α.Τ.Ε. σχηματίστηκαν, κυρίως, από αντιδράσεις ενυδάτωσης. Τίθεται επομένως το ερώτημα της προέλευσης του νερού, που συμμετείχε σ'

αυτές τις αντιδράσεις. Μια πιθανή πηγή θα μπορούσαν να αποτελούν οι ένυδρες φάσεις, που συμμετείχαν ταυτόχρονα σε αντιδράσεις αφυδάτωσης. Αντιδράσεις αφυδάτωσης, που να έλαβαν χώρα κατά τη διάρκεια των διαφόρων σταδίων ανάδυσσης της Α.Τ.Ε., δεν διαπιστώθηκαν. Βέβαια, η σχετικά χαμηλή περιεκτικότητα σε σελαδονίτη στους λευκούς Κ-ούχους μαρμαρυγίες ($Si = 6.2-6.6$), στους οποίους, για τις πιέσεις των 13,5-16 Kbar του εκλογιτικού σταδίου, αναμένονται μέγιστες τιμές Si μεταξύ 6,8-7,0 (Massonne and Schreyer 1987), πιθανώς οφείλεται στην αναπροσαρμογή τους σε χαμηλότερες πιέσεις. Η μετατροπή του φεγγίτη σε λιγότερο φεγγιτικό μοσχοβίτη εκφράζεται με την αντίδραση αφυδάτωσης: φεγγίτης \rightarrow λιγότερο φεγγιτικός μοσχοβίτης+βιοτίτης+Κ-ούχος άστριος+χαλαζίας+H₂O. Η αντίδραση αυτή η οποία οδηγεί σε ελάττωση του ποσοστού του μοσχοβίτη και αύξηση εκείνου του βιοτίτη, θα μπορούσε να δικαιολογήσει την προσφορά νερού για την μερική αμφιβολιτίωση των εκλογιτών και τις αντιδράσεις ενυδάτωσης που διαπιστώθηκαν στα υπερμαφικά πετρώματα κατά τα πρώτα στάδια ανάδυσσης. Πρέπει όμως να τονισθεί ότι στους γνεύσιους και τους μεταπηλίτες, ιδιαίτερα στην ανατολική Ροδόπη, κυριαρχεί ο μοσχοβίτης, με επιπρόσθετες φάσεις Κ-ούχο άστριο, πλαγιόκλαστο, κλινοζοϊσίτη, βιοτίτη, γρανάτη (Gr₅₀.5Alm_{0.5}), χαλαζία, στους γνεύσιους και πλαγιόκλαστο±βιοτίτη, γρανάτη, κλινοζοϊσίτη, χαλαζία, στους μεταπηλίτες. Στα πετρώματα αυτά, ο μοσχοβίτης συνυπάρχει, παραγενετικά, με κλινοζοϊσίτη ή γρανάτη και σχηματίσθηκε σύμφωνα με τις αντιδράσεις: Pl+Kfs+H₂O \rightarrow Czo+Ms+Qtz και Clz+Kfs+H₂O \rightarrow Grt+Ms+Qtz, δηλαδή από αντιδράσεις ενυδάτωσης. Επί πλέον, η αντικατάσταση του κυανίτη από μοσχοβίτη, η οποία παρατηρείται συχνά στους μεταπηλίτες, συνδέεται με αντιδράσεις ενυδάτωσης.

Δεύτερη πιθανή πηγή θα μπορούσε να αποτελεί το νερό, που ελευθερώνεται μετά την κρυστάλλωση των ανατηκτικών μαγμάτων, που σχηματίσθηκαν κατά το στάδιο της προϊούσας μεταμόρφωσης ή και κατά την ανάδυση. Το νερό αυτό θα μπορούσε να δικαιολογήσει τις αντιδράσεις ενυδάτωσης που έλαβαν χώρα στα πετρώματα που περιβάλλουν τα ανατηκτικά σώματα.

Ως τρίτη και ενδεχομένως πιθανότερη πηγή μπορεί να θεωρηθεί η διείδυση νερού, στην Α.Τ.Ε., από ένα υπόστρωμα λιθολογικών σχηματισμών, στο οποίο λαμβάνουν χώρα αντιδράσεις αφυδάτωσης, όπως στην περίπτωση μιας ζώνης υποβύθισης. Στην περίπτωση αυτή, μπορεί να θεωρηθεί ότι η Κ.Τ.Ε., (στην οποία όπως προαναφέρθηκε κυριαρχούσαν αντιδράσεις αφυδάτωσης), βυθίστηκε κάτω από την Α.Τ.Ε. σε μια περίοδο μεταγενέστερη από εκείνη με την οποία συνδέεται η εκλογιτική φάση στην Α.Τ.Ε.

Οι Mroskos and Liati (1993) συνδέοντας τη μεταμορφική εξέλιξη των δύο τεκτονικών ενοτήτων της Ροδόπης με ένα μόνο μεταμορφικό κύκλο, αλπικής ηλικίας, δικαιολόγησαν το διαφορετικό ρυθμό ψύξης των δύο τεκτονικών ενοτήτων, με την επώθηση της θερμότερης Α.Τ.Ε. στην Κ.Τ.Ε. ενώ ευρίσκοντο ακόμη σε μεγάλα βάθη, γεγονός που είχε σαν αποτέλεσμα, η Α.Τ.Ε. να δράσει ως θερμή προστατευτική ασπίδα για την Κ.Τ.Ε. Στην άποψή τους αυτή οδηγήθηκαν από τις αλπικές ηλικίες που διαπιστώθηκαν σε κεροσιλβες και μαρμαρυγίες της Α.Τ.Ε. από την κεντρική και δυτική Ροδόπη. Η άποψη των Mroskos and Liati (1993) ερμηνεύει σε ικανοποιητικό βαθμό την πορεία ανάδυσσης της Κ.Τ.Ε. όπως και την πορεία ανάδυσσης της Α.Τ.Ε. από το βάθος των ≈ 35 Km, μέχρι και την επιφάνεια (Σχ.4). Πράγματι, από τα ≈ 35 Km η Α.Τ.Ε. ακολούθησε μια πορεία ταχείας ανάδυσσης, με συνεχή ψύξη, αφού κατά το διάστημα αυτό δεν δέχονταν θερμότητα από το υπόβαθρό της, το οποίο ήταν ψυχρότερο. Για το τμήμα της πορείας ανάδυσσης από τα $\approx 48-57$ Km μέχρι τα ≈ 35 Km, πρέπει να δεχθούμε βραδύ ρυθμό ανάδυσσης, δεδομένου ότι, κατά το διάστημα αυτό ψύχθηκε κατά 100-130°C, ενώ από το βάθος των ≈ 35 Km μέχρι τα 14 Km ψύχθηκε μόνο κατά 50°C. Πιθανώς, η πορεία ανάδυσσης της Α.Τ.Ε. από το μέγιστο βάθος των $\approx 48-57$ Km μέχρι τα ≈ 35 Km εκφράζει την ισοστατική Ψηφιακή Βιβλιοθήκη "Θεόφραστος" - Τμήμα Γεωλογίας Α.Π.Θ.

και θερμική αναπροσαρμογή της, μετά το μεταμορφικό επεισόδιο των υψηλών πιέσεων, το οποίο δεν φαίνεται να ταυτίζεται χρονικά με τη μεταμόρφωση της εκλογιτικής φάσης που έλαβε χώρα στην Κ.Τ.Ε., μια άποψη η οποία μπορεί να επιβεβαιωθεί μόνο με ραδιοχρονολόγηση της μεταμόρφωσης των υψηλών πιέσεων στις δύο τεκτονικές ενότητες.

Πρόσφατη ραδιοχρονολόγηση Sm-Nd γρανάτη-κλινοπυρόξενου-ολικού πετρώματος από σπινελιούχο-γρاناτούχο πυροξενίτη της Α.Τ.Ε., στην ανατολική Ροδόπη, έδειξε ότι, η μεταμόρφωση των υψηλών πιέσεων έλαβε χώρα στο Κατώτερο Κρητιδικό (Wawrzenitz and Mroskos, in press). Η μεταμόρφωση των μεσαίων πιέσεων, αμφιβολιτικής φάσης, έλαβε χώρα στο Παλαιόκαινο (65 Ma ηλικία Rb-Sr μοσχοβίτη σε πηγματίτη, που συνδέεται γενετικά με τη μεταμόρφωση της αμφιβολιτικής φάσης, Mroskos and Wawrzenitz, 1995). Στην Κ.Τ.Ε. της ανατολικής Ροδόπης, η μεταμόρφωση των μεσαίων πιέσεων είναι πολύ νεότερη (37-39 Ma Rb-Sr σε μοσχοβίτες ορθογνευσίων, Wawrzenitz and Mroskos, in press, Peicheva et al., 1992a) από εκείνη των 65 Ma που διαπιστώθηκε στην Α.Τ.Ε. Επομένως, δεν αποκλείεται, η μεταμόρφωση της αμφιβολιτικής και στη συνέχεια της πρασινοσχιστολιθικής φάσης στην Α.Τ.Ε. να συνδέεται χρονικά με το στάδιο της βύθισης της Κ.Τ.Ε. κάτω από την Α.Τ.Ε. Οι αντιδράσεις αφυδάτωσης που έλαβαν χώρα κατά τη βύθιση της Κ.Τ.Ε., συνδιαζόμενες και με εκκρίνες που χαρακτηρίζουν το μεγαλύτερο τμήμα ανάδυσής της, θα μπορούσαν να προσφέρουν ικανές ποσότητες νερού που απαιτούνται για να δικαιολογήσουν την ανάδρομη μεταμόρφωση που χαρακτηρίζει την Α.Τ.Ε.

Στην ανατολική Ροδόπη, η Κ.Τ.Ε. περιβάλλεται από την υπερκείμενη Α.Τ.Ε. και εμφανίζεται υπό μορφή τεκτονικού παραθύρου (Σχ. 1). Ανάλογες απόψεις έχουν εκφραστεί κατά περιόδους και για την "ενότητα Παγγαίου" (Papanikolaou, 1984), η οποία αποτελεί το δυτικό τμήμα της Κ.Τ.Ε. στη Ροδόπη.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ - REFERENCES

- ARNAUDOV, V., AMOV, B., CHERNEVA, A., ARNAUDOVA, R., PAVLOVA, M. and BARTITSKY, E., (1990): Petrological-geochemical and lead isotope evidence of Alpine metamorphism in the Rhodope crystalline complex. *Geol.Balc.* 20 (5), 29-44.
- BOHLEN, S.R., MONTANA, A. and KERRICK, D.M., (1991): Precise determinations of the equilibria kyanite-sillimanite and kyanite-andalusite and a revised triple point for Al_2SiO_5 polymorphs. *Amer.Mineral.* 76, 677-680.
- BURG, J.P., IVANOV, Z., RICOU, L.E., DIMOR, D. and KLAIN, L., (1990): Implications of shear-sense criteria for the tectonic evolution of the central Rhodope massif, southern Bulgaria. *Geology* 18, 451-454.
- CARMAN, S.H. and GILBERT, M.C., (1983): Experimental studies on glaucophane stability. *Am.J.Sci.* 283A, 414-437.
- CELET et CLEMENT (1991): Sur l' age de quelques amphibolites du Rhodope Grec. *Bull.Geol.Soc.Greece.* V.25/1, 163-170.
- CHATTERJEE, N.D., (1972): The upper stability of the assemblage paragonite+quartz and its natural occurrences. *Contrib.Mineral.Petrol.* 34, 288-303.
- CHATTERJEE, N.D., JOHANNES, W. and LEISTNER, N., (1984): The system $CaO-Al_2O_3-SiO_2-H_2O$: new phase equilibria data, some calculated phase relations, and their petrological applications. *Contrib.Mineral.Petrol.* 88, 1-13.
- DEL MORO, A., KYRIAKOPOULOS, K., PEZZINO, A., ATZORI, P. and LO GIUDICE, A., (1990): The metamorphic complex associated to the Kavala plutonites: An Rb-Sr geochronological, petrological and structural study. *Geologica Rhodopica* V.2, 143-156, Thessaloniki.
- ELLIS, D.J. and GREEN, D.H., (1979): An experimental study of the effect of Ca upon garnet-clinopyroxene Fe-Mg exchange equilibria. *Contrib.Mineral. Petrol.* 71, 13-22.

- GASPARIK, T. and LINDSLEY, D.H., (1981): Phase equilibria at high pressures of pyroxenes containing monovalent and trivalent ions. In MSA, Reviews in Mineralogy, 7. Pyroxenes p.p. 309-339.
- HOLLAND, T.J.B., (1979): Experimental determination of the reaction: Paragonite = jadeite+kyanite+H₂O, with applications to eclogites and blueschists. Contrib.Mineral.Petrol. 68, 293-301.
- IVANOV, Z., (1988): Apercu generale sur l' evolution geologique et structurale du massif des Rhodopes dans le cadre des Bakanides. Bull.Soc.Geol. France 8, IV(2), 227-240.
- JENKINS, D.M., (1981): Experimental phase relations of hydrous peridotites modelled in the system H₂O-CaO-MgO-Al₂O₃-SiO₂. Contrib.Mineral.Petrol. 77, 166-176.
- JENKINS, D.M., (1983): Stability and composition relations of calcic amphiboles in ultramafic rocks. Contrib.Mineral.Petrol. 83, 375-384.
- JOHANNES, W., (1985): The significance of experimental studies for the formation of migmatites. In Ashworth (ed.). Migmatites, 36-85, ~~Blackie~~, New York.
- KILLIAS, A. and MOUNTRAKIS, D., (1990): Kinematics of the crystalline sequences in the western Rhodope massif: Geologica Rhodopica, V.2, 100-116. Thessaloniki.
- KOLCEVA, V., ZELJAZKOVA-PANAJOTOVA, M., BUBRECOV, N.L. and STOJANOVA, V., (1986): Eclogites in Central Rhodope metamorphic group and their retrograde metamorphism. Geochem.Mineral. and Petrol. Sofia, 20/21, 130-144.
- KOUKOUVELAS, J. and DOUTSOS, T., (1990): Tectonic stages along a traverse cross cutting the Rhodopean zone (Greece). Geol.Rundsch. 79 (3) 753-776.
- LIATI, A. (1986): Regional metamorphism and overprinting contact metamorphism of the Rhodope zone, near Xanthi N.Greece: Petrology, Geochemistry, Geochronology. Ph.D.thesis, Techn.Univ.Braunschweig.
- LIATI, A. and MPOSKOS, E., (1990): Evolution of the eclogites in the Rhodope zone of northern Greece. Lithos, 25, 89-99.
- LIOU, J.G., (1971): Synthesis and stability relations of prehnite Ca₃Al₂Si₃O₁₀(OH)₂. Amer.Mineral. 56, 507-531.
- MARUYAMA, S., SUZUKI, K. and LIOU, J.G., (1983): Greenschist-amphibolite transition equilibria at low pressures. J.Petrol. 24, 583-604.
- MASSONNE, H.J. and SCHREYER, W., (1987): Phengite geobarometry based on the limiting assemblage with K-feldspar, phlogopite and quartz. Contrib.Mineral.Petrol. 96, 219-224.
- MPOSKOS, E., (1987): Polymetamorphism in Central and East Rhodope Massif. Geologica Rhodopica. V.1, 153-159. Sofia.
- MPOSKOS, E., (1989a): The metamorphic evolution of East and Central Rhodope. In: IGME-EEC, "New concept in mineral exploration philosophy and their use in the study of different types of polymetallic mineralization in the Rhodope region, Greece". V.2, 37-86, IGME, Athens.
- MPOSKOS, E., (1989b): Metamorphic evolution of the lower tectonic unit of E.Rhodope (N.Greece), based on metabasite petrology. 4th Congress of Carpatho-Balkan Geol. Assoc.Sofia 1.1 Mineralogy 317-320.
- MPOSKOS, E., (1989c): High-pressure metamorphism in gneisses and pelitic schists in the East Rhodope Zone (N.Greece). Mineral.Petrol, 41, 25-39.
- MPOSKOS, E. and PERDIKATIS, V., (1987): Eclogite-amphibolites in East Rhodope Massif. Geoloigca Rhodopica. V1, 160-168. Sofia.
- MPOSKOS, E., LIATI, A., KATAGAS, Ch. and ARVANITIDES, N. (1990): Petrology of the metamorphic rocks of western Rhodope, Drama area, N.Greece. Geological Rhodopica, V.2, 127-142. Thessaloniki.

- 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,
- ΜΠΟΣΚΟΣ, Ε. και ΛΙΑΤΗ, Α., (1993): Η συμβολή της πετρολογίας των μεταμορφωμένων σχηματισμών στην κατανόηση της γεωδυναμικής εξέλιξης της βορειοανατολικής Ελλάδας τα τελευταία 40 χρόνια - Μελλοντικές προοπτικές. *ΕΛΛ.Γεωλ.Εταιρεία*. Ειδικές δημοσιεύσεις. Ν. 2, 147-154.
- ΜΠΟΣΚΟΣ, Ε., ΠΕΡΔΙΚΑΤΗΣ, Β. και ΗΛΙΑΔΗΣ, Α. (1994): Πετρολογία των μεταμορφωμένων υπερμαφικών πετρωμάτων της ανώτερης τεκτονικής ενότητας στην ανατολική Ροδόπη. Συμβολή στη μεταμορφική εξέλιξη της Ροδοπικής ζώνης. 7ο Συνέδριο Ελλ.Γεωλ.Εταιρείας Θεσ/νίκη. Υπό δημοσίευση.
- MPOSKOS, E. and WAWRZENITZ, N. (1995): Metapegmatites and pegmatites bracketing the time of HP-metamorphism in polymetamorphic rocks of the E-Rhodope, N.Greece: Petrological and geochronological constraints. *Geol.Soc.Greece. Special Publications*. N.4/2, 602-608.
- ΜΟΥΝΤΡΑΚΗΣ, Δ., (1983): Η γεωλογική δομή της βόρειας Πελαγονικής ζώνης και η γεωτεκτονική εξέλιξη των εσωτερικών Ελληνίδων. *Πραγματεία Υψηγείας*. Παν/μιο Θεσσαλονίκης, 289 σ.
- O'NEILL, H. (1981): The transition between spinel lherzolite and garnet lherzolite and its use as a geobarometer. *Contrib.Mineral.Petrol.* 77, 185-194.
- PAPANIKOLAOU, D., (1984): The three metamorphic belts of the Hellenides: a review and a kinematic interpretation. In J.Dixon and A.H.F.Robertson (eds): *The geological evolution of eastern Mediterranean*. Blackwell Scient.Publications, 551-561.
- ΠΑΠΑΝΙΚΟΛΑΟΥ, Δ., (1993): Οι απόψεις για τη γεωτεκτονική και παλαιογεωγραφική εξέλιξη της κεντρικής Ελλάδας και του Αιγαίου τα τελευταία 40 χρόνια. *ΕΛΛ.Γεωλ.Εταιρεία*. Ειδικές δημοσιεύσεις. Ν.2, 69-86.
- PEITCHEVA, J.M., KOSTITSIN, JA. And SHUKOLYKOV, J.A. (1992): Rb-Sr isotope system of gneisses in the south-eastern Rhodopes (Bulgaria). *Comptes rendus de l' Academie Bulgare des Sciences*. T.45, No 10, 65-68 (In Russian).
- PEITCHEVA, J.M., BIBIKOVA, E.V. and MAKAROV, V. (1992): U-Pb isotope dating of zircons from two types of gneisses in southeastern Rhodope Mountains (Bulgaria). *Comptes rendus de l' Academie Bulgare des Sciences*. T.45, N8, 71-74 (In Russian).
- POWELL, R. and HOLLAND, T., (1990): Calculated Mineral equilibria in the pelite system, KFMASH (K_2O -FeO-MgO- Al_2O_3 -SiO₂-H₂O). *Amer.Mineral.* 75, 367-380.
- SHERMER, E.R., (1990): Temperature-time history of subducted continental crust, Mount Olympos region Greece. *Tectonics*, 9, N.5, 1165-1195.
- SPEAR, S.F. and CHENEY, T.J., (1989): A petrogenetic grid for pelitic schists in the system SiO₂-Al₂O₃-FeO-MgO-K₂O-H₂O. *Contrib.Mineral. Petrol.* 101, 149-164.
- THOMPSON, A.B., (1982): Dehydration melting of pelitic rocks and the generation of H₂O-undersaturated granitic liquids. *Am.J.Sci.* 282, 1567-1595.
- TRACY, R.J., (1982): Compositional zoning and inclusions in metamorphic minerals. In Ferry (ed.). *Characterisation of metamorphism through mineral equilibria*. M.S.A. *Reviws in Mineralogy*, 10, 355-397.
- VUICHARD, J.P. and BALLEVRE, M., (1988): Garnet-chloritoid equilibria in eclogitic pelitic rocks from the Sezia zone (Western Alps): their bearing on phase relations in high pressure metapelites. *J.Metamorph.Geol.* 6, 135-157.
- WAWRZENITZ, N., BAUMANN, A. and NOLLAU, G., (1992): Preliminary results of U-

και θερμική αναπροσαρμογή της, μετά το μεταμορφικό επεισόδιο των υψηλών πιέσεων, το οποίο δεν φαίνεται να ταυτίζεται χρονικά με τη μεταμόρφωση της εκλογιτικής φάσης που έλαβε χώρα στην Κ.Τ.Ε., μια άποψη η οποία μπορεί να επιβεβαιωθεί μόνο με ραδιοχρονολόγηση της μεταμόρφωσης των υψηλών πιέσεων στις δύο τεκτονικές ενότητες.

Πρόσφατη ραδιοχρονολόγηση Sm-Nd γρανάτη-κλινοπυρόξενου-ολικού πετρώματος από σπινελιούχο-γρινατούχο πυροξενίτη της Α.Τ.Ε., στην ανατολική Ροδόπη, έδειξε ότι, η μεταμόρφωση των υψηλών πιέσεων έλαβε χώρα στο Κατώτερο Κρητιδικό (Wawrzernitz and Mroskos, in press). Η μεταμόρφωση των μεσαίων πιέσεων, αμφιβολιτικής φάσης, έλαβε χώρα στο Παλαιόκαινο (65 Μα ηλικία Rb-Sr μοσχοβίτη σε πηγματίτη, που συνδέεται γενετικά με τη μεταμόρφωση της αμφιβολιτικής φάσης, Mroskos and Wawrzernitz, 1995). Στην Κ.Τ.Ε. της ανατολικής Ροδόπης, η μεταμόρφωση των μεσαίων πιέσεων είναι πολύ νεότερη (37-39 Μα Rb-Sr σε μοσχοβίτες ορθογνευσίων, Wawrzernitz and Mroskos, in press, Reicheva et al., 1992a) από εκείνη των 65 Μα που διαπιστώθηκε στην Α.Τ.Ε. Επομένως, δεν αποκλείεται, η μεταμόρφωση της αμφιβολιτικής και στη συνέχεια της πρασινοσχιστολιθικής φάσης στην Α.Τ.Ε. να συνδέεται χρονικά με το στάδιο της βύθισης της Κ.Τ.Ε. κάτω από την Α.Τ.Ε. Οι αντιδράσεις αφυδάτωσης που έλαβαν χώρα κατά τη βύθιση της Κ.Τ.Ε., συνδιαζόμενες και με εκείνες που χαρακτηρίζουν το μεγαλύτερο τμήμα ανάδυσής της, θα μπορούσαν να προσφέρουν ικανές ποσότητες νερού που απαιτούνται για να δικαιολογήσουν την ανάδρομη μεταμόρφωση που χαρακτηρίζει την Α.Τ.Ε.

Στην ανατολική Ροδόπη, η Κ.Τ.Ε. περιβάλλεται από την υπερκείμενη Α.Τ.Ε. και εμφανίζεται υπό μορφή τεκτονικού παραθύρου (Σχ. 1). Ανάλογες απόψεις έχουν εκφραστεί κατά περιόδους και για την "ενότητα Παγγαίου" (Papanikolaou, 1984), η οποία αποτελεί το δυτικό τμήμα της Κ.Τ.Ε. στη Ροδόπη.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ - REFERENCES

- ARNAUDOV, V., AMOV, B., CHERNEVA, A., ARNAUDOVA, R., PAVLOVA, M. and BARTITSKY, E., (1990): Petrological-geochemical and lead isotope evidence of Alpine metamorphism in the Rhodope crystalline complex. *Geol. Balc.* 20 (5), 29-44.
- BOHLEN, S.R., MONTANA, A. and KERRICK, D.M., (1991): Precise determinations of the equilibria kyanite-sillimanite and kyanite-andalusite and a revised triple point for Al_2SiO_5 polymorphs. *Amer. Mineral.* 76, 677-680.
- BURG, J.P., IVANOV, Z., RICOV, L.E., DIMOR, D. and KLAIN, L., (1990): Implications of shear-sense criteria for the tectonic evolution of the central Rhodope massif, southern Bulgaria. *Geology* 18, 451-454.
- CARMAN, S.H. and GILBERT, M.C., (1983): Experimental studies on glaucophane stability. *Am. J. Sci.* 283A, 414-437.
- CELET et CLEMENT (1991): Sur l' age de quelques amphibolites du Rhodope Grec. *Bull. Geol. Soc. Greece.* V.25/1, 163-170.
- CHATTERJEE, N.D., (1972): The upper stability of the assemblage paragonite+quartz and its natural occurrences. *Contrib. Mineral. Petrol.* 34, 288-303.
- CHATTERJEE, N.D., JOHANNES, W. and LEISTNER, N., (1984): The system $CaO-Al_2O_3-SiO_2-H_2O$: new phase equilibria data, some calculated phase relations, and their petrological applications. *Contrib. Mineral. Petrol.* 88, 1-13.
- DEL MORO, A., KYRIAKOPOULOS, K., PEZZINO, A., ATZORI, P. and LO GIUDICE, A., (1990): The metamorphic complex associated to the Kavala plutonites: An Rb-Sr geochronological, petrological and structural study. *Geologica Rhodopica* V.2, 143-156, Thessaloniki.
- ELLIS, D.J. and GREEN, D.H., (1979): An experimental study of the effect of Ca upon garnet-clinopyroxene Fe-Mg exchange equilibria. *Contrib. Mineral. Petrol.* 71, 13-22.

- GASPARIK, T. and LINDSLEY, D.H., (1981): Phase equilibria at high pressures of pyroxenes containing monovalent and trivalent ions. In MSA, Reviews in Mineralogy, 7. Pyroxenes p.p. 309-339.
- HOLLAND, T.J.B., (1979): Experimental determination of the reaction: Paragonite = jadeite+kyanite+H₂O, with applications to eclogites and blueschists. Contrib.Mineral.Petrol. 68, 293-301.
- IVANOV, Z., (1988): Apercu generale sur l' evolution geologique et structurale du massif des Rhodopes dans le cadre des Bakanides. Bull.Soc.Geol. France 8, IV(2), 227-240.
- JENKINS, D.M., (1981): Experimental phase relations of hydrous peridotites modelled in the system H₂O-CaO-MgO-Al₂O₃-SiO₂. Contrib.Mineral.Petrol. 77, 166-176.
- JENKINS, D.M., (1983): Stability and composition relations of calcic amphiboles in ultramafic rocks. Contrib.Mineral.Petrol. 83, 375-384.
- JOHANNES, W., (1985): The significance of experimental studies for the formation of migmatites. In Ashworth (ed.). Migmatites, 36-85, Blackie, New York.
- KILLIAS, A. and MOUNTRAKIS, D., (1990): Kinematics of the crystalline sequences in the western Rhodope massif: Geologica Rhodopica, V.2, 100-116. Thessaloniki.
- KOLCEVA, V., ZELJAZKOVA-PANAJOTOVA, M., BUBRECOV, N.L. and STOJANOVA, V., (1986): Eclogites in Central Rhodope metamorphic group and their retrograde metamorphism. Geochem.Mineral. and Petrol. Sofia, 20/21, 130-144.
- KOUKOUVELAS, J. and DOUTSOS, T., (1990): Tectonic stages along a traverse cross cutting the Rhodopean zone (Greece). Geol.Rundsch. 79 (3) 753-776.
- LIATI, A. (1986): Regional metamorphism and overprinting contact metamorphism of the Rhodope zone, near Xanthi N.Greece: Petrology, Geochemistry, Geochronology. Ph.D.thesis, Techn.Univ.Braunschweig.
- LIATI, A. and MPOSKOS, E., (1990): Evolution of the eclogites in the Rhodope zone of northern Greece. Lithos, 25, 89-99.
- LIOU, J.G., (1971): Synthesis and stability relations of prehnite Ca₃Al₂Si₃O₁₀(OH)₂. Amer.Mineral. 56, 507-531.
- MARUYAMA, S., SUZUKI, K. and LIOU, J.G., (1983): Greenschist-amphibolite transition equilibria at low pressures. J.Petrol. 24, 583-604.
- MASSONNE, H.J. and SCHREYER, W., (1987): Phengite geobarometry based on the limiting assemblage with K-feldspar, phlogopite and quartz. Contrib.Mineral.Petrol. 96, 219-224.
- MPOSKOS, E., (1987): Polymetamorphism in Central and East Rhodope Massif. Geologica Rhodopica. V.1, 153-159. Sofia.
- MPOSKOS, E., (1989a): The metamorphic evolution of East and Central Rhodope. In: IGME-EEC, "New concept in mineral exploration philosophy and their use in the study of different types of polymetallic mineralization in the Rhodope region, Greece". V.2, 37-86, IGME, Athens.
- MPOSKOS, E., (1989b): Metamorphic evolution of the lower tectonic unit of E.Rhodope (N.Greece), based on metabasite petrology. 4th Congress of Carpatho-Balkan Geol. Assoc.Sofia 1.1 Mineralogy 317-320.
- MPOSKOS, E., (1989c): High-pressure metamorphism in gneisses and pelitic schists in the East Rhodope Zone (N.Greece). Mineral.Petrol, 41, 25-39.
- MPOSKOS, E. and PERDIKATIS, V., (1987): Eclogite-amphibolites in East Rhodope Massif. Geologica Rhodopica. VI, 160-168. Sofia.
- MPOSKOS, E., LIATI, A., KATAGAS, Ch. and ARVANITIDES, N. (1990): Petrology of the metamorphic rocks of western Rhodope, Drama area, N.Greece. Geological Rhodopica, V.2, 127-142. Thessaloniki.

- 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.
- ΜΠΟΣΚΟΣ, Ε. και ΛΙΑΤΗ, Α., (1993): Η συμβολή της πετρολογίας των μεταμορφωμένων σχηματισμών στην κατανόηση της γεωδυναμικής εξέλιξης της βορειοανατολικής Ελλάδας τα τελευταία 40 χρόνια - Μελλοντικές προοπτικές. *ΕΛΛ.Γεωλ.Εταιρεία. Ειδικές δημοσιεύσεις. Ν. 2*, 147-154.
- ΜΠΟΣΚΟΣ, Ε., ΠΕΡΔΙΚΑΤΣΗΣ, Β. και ΗΛΙΑΔΗΣ, Α. (1994): Πετρολογία των μεταμορφωμένων υπερμαφικών πετρωμάτων της ανώτερης τεκτονικής ενότητας στην ανατολική Ροδόπη. Συμβολή στη μεταμορφική εξέλιξη της Ροδοπικής ζώνης. 7ο Συνέδριο ΕΛΛ.Γεωλ.Εταιρείας Θεσ/νίκη. Υπό δημοσίευση.
- MPOSKOS, E. and WAWRZENITZ, N. (1995): Metapegmatites and pegmatites bracketing the time of HP-metamorphism in polymetamorphic rocks of the E-Rhodope, N.Greece: Petrological and geochronological constraints. *Geol.Soc.Greece. Special Publications. N.4/2*, 602-608.
- ΜΟΥΝΤΡΑΚΗΣ, Δ., (1983): Η γεωλογική δομή της βόρειας Πελαγονικής ζώνης και η γεωτεκτονική εξέλιξη των εσωτερικών Ελληνίδων. *Πραγματεία Υψηγείας. Παν/μιο Θεσσαλονίκης*, 289 σ.
- O'NEILL, H. (1981): The transition between spinel lherzolite and garnet lherzolite and its use as a geobarometer. *Contrib.Mineral.Petrol.* 77, 185-194.
- PAPANIKOLAOU, D., (1984): The three metamorphic belts of the Hellenides: a review and a kinematic interpretation. In J.Dixon and A.H.F.Robertson (eds): *The geological evolution of eastern Mediterranean*. Blackwell Scient.Publications, 551-561.
- ΠΑΠΑΝΙΚΟΛΑΟΥ, Δ., (1993): Οι απόψεις για τη γεωτεκτονική και παλαιογεωγραφική εξέλιξη της κεντρικής Ελλάδας και του Αιγαίου τα τελευταία 40 χρόνια. *ΕΛΛ.Γεωλ.Εταιρεία. Ειδικές δημοσιεύσεις. Ν.2*, 69-86.
- PEITCHEVA, J.M., KOSTITSIN, JA. And SHUKOLYKOV, J.A. (1992): Rb-Sr isotope system of gneisses in the south-eastern Rhodopes (Bulgaria). *Comptes rendus de l' Academie Bulgare des Sciences. T.45, No 10*, 65-68 (In Russian).
- PEITCHEVA, J.M., BIBIKOVA, E.V. and MAKAROV, V. (1992): U-Pb isotope dating of zircons from two types of gneisses in southeastern Rhodope Mountains (Bulgaria). *Comptes rendus de l' Academie Bulgare des Sciences. T.45, N8*, 71-74 (In Russian).
- POWELL, R. and HOLLAND, T., (1990): Calculated Mineral equilibria in the pelite system, KFMASH ($K_2O-FeO-MgO-Al_2O_3-SiO_2-H_2O$). *Amer.Mineral.* 75, 367-380.
- SHERMER, E.R., (1990): Temperature-time history of subducted continental crust, Mount Olympos region Greece. *Tectonics*, 9, N.5, 1165-1195.
- SPEAR, S.F. and CHENEY, T.J., (1989): A petrogenetic grid for pelitic schists in the system $SiO_2-Al_2O_3-FeO-MgO-K_2O-H_2O$. *Contrib.Mineral. Petrol.* 101, 149-164.
- THOMPSON, A.B., (1982): Dehydration melting of pelitic rocks and the generation of H_2O -undersaturated granitic liquids. *Am.J.Sci.* 282, 1567-1595.
- TRACY, R.J., (1982): Compositional zoning and inclusions in metamorphic minerals. In Ferry (ed.). *Characterisation of metamorphism through mineral equilibria. M.S.A. Revius in Mineralogy*, 10, 355-397.
- VUICHARD, J.P. and BALLEVRE, M., (1988): Garnet-chloritoid equilibria in eclogitic pelitic rocks from the Sezia zone (Western Alps): their bearing on phase relations in high pressure metapelites. *J.Metamorph.Geol.* 6, 135-157.
- WAWRZENITZ, N., BAUMANN, A. and NOLLAU, G., (1992): Preliminary results of U-

- Pb- and Rb-Sr- investigations on metamorphic rocks of Thassos, Pangaeon complex, Northern Greece. 6th Cong.Geol.Soc.Greece. Abstracts. 128-129.
- WAWRZENITZ, N., BAUMANN, A. and NOLLAU, G., (1994): Miocene uplift of mid-crustal rocks in the Rhodope metamorphic core complex, caused by late alpine extension of previously thickened crust (Thassos island, Pangaeon complex, Northern Greece: 7th Cong.Geol.Soc. Greece. Abstracts 74-75.
- WAWRZENITZ, N. and MPOSKOS, E., (1996): First evidence for Lower Cretaceous HP-HT-metamorphism in the Eastern Rhodope, North Aegean Region, North-East-Greece. Eur.J.Mineral. In press.
- YARWOOD, G.A. and AFTALION, M., (1976): Field relations and U-Pb geochronology of a granite from the Pelagonia zone of the Hellenides (High Pieria, Greece). Soc.Geol.France Bull., 18, 259-264.