

Επιστημονική Επετηρίδα, Τμήμα Γεωλογίας, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης Τιμητική έκδοση στη μνήμη του ομότιμου καθηγητή Κ. Σολδάτου	Ειδικός τόμος 101	63-69	Θεσσαλονίκη 2012
------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----------------------	-------	---------------------

Η ΜΕΤΑΛΛΟΦΟΡΙΑ ΖΩΝΩΔΩΝ ΣΠΙΝΕΛΛΙΩΝ, ΜΑΓΝΗΤΙΤΗ ΚΑΙ ΙΛΜΕΝΙΤΗ ΣΤΟ ΥΠΕΡΒΑΣΙΚΟ ΣΩΜΑ ΠΡΩΤΗΣ ΣΕΡΡΩΝ, Α. ΜΑΚΕΔΟΝΙΑ

Μιχαηλίδης Κ.¹ και Καλίτση Α.²

¹ Τομέας Ορυκτολογίας-Πετρολογίας-Κοιτασματολογίας, Τμήμα Γεωλογίας, Α.Π.Θ. 541 24 Θεσσαλονίκη, kleopas@geo.auth.gr

² kkalitsi@gmail.com

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Μελετάται η μεταλλοφορία οξειδίων που εντοπίζεται σε ένα διαφορετικού βαθμού σερπεντινιωμένο οφειολιθικό σώμα στην περιοχή Πρώτης του νομού Σερρών (Ανατολική Μακεδονία). Στα περιθώρια του οφειολιθικού σώματος έχουν αναπτυχθεί ζώνες μετασμάτωσης με την εξής σειρά από μέσα προς τα έξω: ζώνη τάλκη, χλωρίτη και τρεμολίτη. Στο κυρίως οφειολιθικό σώμα φιλοξενείται περιορισμένης έκτασης διάσπαρτη έως ημισυμπαγής μεταλλοφορία που αποτελείται από ζωνώδεις κρυστάλλους σπινελλίων, ενώ στη ζώνη του χλωρίτη μεταλλοφορία από αυτοτελή συσσωματώματα μαγνητίτη και ιλμενίτη. Οι ζωνώδεις κρύσταλλοι σπινελλίων αποτελούνται από ένα σκουρόχρωμο, πλούσιο σε Cr και Al πυρήνα χρωμίτη, που εξελίσσεται σταδιακά σε σύσταση προς ένα φωτεινό δακτύλιο μαγνητίτη πλούσιο σε Cr, ενώ ενδιάμεσα μπορεί να παρατηρούνται ασυνεχείς ζώνες σιδηροχρωμίτη ενδιάμεσης φωτεινότητας και ανομοιογενούς σύστασης. Ο σιδηροχρωμίτης εμφανίζεται εμπλουτισμένος σε Fe, πολλές φορές Ni και Mn, και φτωχός σε Al, Cr και Mg σε σχέση με τον χρωμιτικό πυρήνα, από την αλλοίωση του οποίου προέκυψε. Η εξαλλοίωση του χρωμίτη και η δημιουργία ζωνωδών σπινελλίων αποτελεί μια μετασωματική διεργασία που έχει συντελεστεί κατά τη σερπεντινίωση και την επακόλουθη μεταμόρφωση του πετρώματος-ξενιστή.

ABSTRACT

ZONED SPINELS, MAGNETITE AND ILMENITE MINERALIZATION IN AN ULTRAMAFIC BODY FROM THE PROTI AREA, SERRES COUNTY, EASTERN MACEDONIA

Michailidis K.¹ and Kalitsi A.²

¹ Department of Mineralogy-Petrology-Economic Geology, School of Geology, Aristotle University of Thessaloniki, 541 24, Thessaloniki, kleopas@geo.auth.gr

² kkalitsi@gmail.com

The oxide mineralization found within a variably serpentinized ultramafic body from the Proti area, Serres county (Eastern Macedonia) is studied. At the margins of this body metasomatic alteration zones of talc, chlorite and tremolite are observed. Ore mineralization is of disseminated or of semimassive type and consists of zoned spinel crystals and individual magnetite and ilmenite aggregates. Zoned spinel crystals consist of a dark aluminous chromite core that changes gradually in composition towards an outer Cr-magnetite rind. An intermediate light-gray discontinuous and not always homogenous "ferritchromite" zone may be present. Ferritchromite is always enriched in Fe and in most cases in Ni and Mn and depleted in Al, Cr and Mg relative to the chromite core, from which has resulted by an alteration process. Chromite alteration and zoned spinel crystals formation is a metasomatic process accompanying serpentinization and subsequent metasomatism of the host rock.

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η δευτερογενής εξαλλοίωση του χρωμίτη και η δημιουργία ζωνωδών κρυστάλλων, που αποτελούνται συχνά από τρεις οπτικά διακριτές ζώνες: πυρήνας χρωμίτη – ενδιάμεση ζώνη σιδηροχρωμίτη – περιφέρεια μαγνητίτη, αποτέλεσε αντικείμενο μελέτης πολλών ερευνητών μέχρι σήμερα. Ιδιαίτερα εκτεταμένη αναφορά έγινε από τους Οικονόμου (1979), Μιχαηλίδης (1982), Michailidis (1990) και Μπαντή (2002), για περιοχές της Β. Ελλάδας.

Η παρούσα εργασία έχει σκοπό να μελετήσει ιστολογικά και χημικά τη μεταλλοφορία ζωνωδών σπινελλίων και άλλων οξειδίων που εμφανίζεται στο οφειολιθικό σώμα της Πρώτης Σερρών.

2 ΓΕΩΛΟΓΙΑ

Η περιοχή μελέτης ανήκει στην κατώτερη γεωτεκτονική ενότητα του Παγγαίου της μάζας της Ροδόπης. Λιθολογικά αποτελείται από διμαρμαρυγικούς σχιστόλιθους, γνεύσιους, μάρμαρα και αμφιβολίτες Παλαιοζωικής ηλικίας. Στους σχηματισμούς αυτούς και στην περιοχή Πρώτης Σερρών (Σχ. 1) εντοπίζεται φακοειδούς σχήματος οφειολιθικό σώμα, επιφανειακών διαστάσεων 50x200μ., στο οποίο εστιάζεται η παρούσα μελέτη.

Η ενότητα του Παγγαίου έχει υποστεί τρεις φάσεις πτυχώσεων (Μουντράκης 1985) και δύο κύρια μεταμορφικά επεισόδια (Kiliias & Mountrakis 1990), αρχικά μια μεταμόρφωση άνω πρασινοσχιστολιθικής – κάτω

αμφιβολιτικής φάσης και μετά μια ανάδρομη χαμηλής πρασινοσχιστολιθικής. Τα παραπάνω επηρέασαν σημαντικά το οφειολιθικό σώμα ως προς την ορυκτολογική του σύνθεση και προκάλεσαν σε αυτό σχιστότητα.



Σχήμα 1. Η γεωγραφική θέση του χωριού Πρώτη Σερρών.

3 ΠΕΤΡΟΓΡΑΦΙΑ

Το οφειολιθικό σώμα της περιοχής Πρώτης Σερρών είναι ένας διαφορετικού βαθμού σερπεντινιωμένος δουνίτης, που τοπικά και σε επαφή με τους σχιστόλιθους περιβάλλεται από ζώνες μετασώματωσης με μεταβατικά χαρακτηριστικά της μιας ως προς την άλλη.

Πιο συγκεκριμένα παρατηρούνται οι παρακάτω παραγενέσεις από το εσωτερικό προς την περιφέρεια:

- α) Κυρίως υπερβασικό σώμα: Ολιβίνης + σερπεντίνης + ζωνώδης σπινέλλιος ± τάλκης ± χλωρίτης ± ανθρακικά
- β) Εκτεταμένη ζώνη τάλκη, πάχους μέχρι δύο μέτρα: Τάλκης ± σερπεντίνης ± χλωρίτης ± ζωνώδης σπινέλλιος
- γ) Τοπικά περιορισμένη ζώνη χλωρίτη: Χλωρίτης + μαγνητίτης ± ιλμενίτης ± τάλκης ± σερπεντίνης ± ανθρακικά ± απατίτης
- δ) Τοπικά περιορισμένη ζώνη αμφιβόλου: Αμφίβολος + χλωρίτης ± τάλκης ± σερπεντίνης ± ζωνώδης σπινέλλιος

Μέσα στο υπερβασικό σώμα διαπιστώθηκε μικρής έκτασης μεταλλοφορία οξειδίων με τις παρακάτω μορφές:

- α) Μεταλλοφορία ζωνωδών σπινελλίων και μαγνητίτη. Βρίσκεται στο κυρίως υπερβασικό σώμα, είναι διάσπαρτη ή σχηματίζει λοβοειδείς συγκεντρώσεις κόκκων προς ημισυμπαγή μορφή, οι οποίες δίνουν την έννοια της ταινιοειδούς διάταξης. Αυτή η μεταλλοφορία παρατηρείται σε διάσπαρτη μορφή και στη ζώνη του τάλκη και τρεμολίτη.
- β) Μεταλλοφορία μαγνητίτη με ιλμενίτη, που συνδέεται με τη ζώνη του χλωρίτη. Η ποσότητα του ιλμενίτη στην περίπτωση αυτή μπορεί να φτάνει μέχρι και το 60% των μεταλλικών ή 20% του πετρώματος, ποσό ασυνήθιστα μεγάλο για τέτοιου είδους (υπερβασικά) περιβάλλοντα. Η μεταλλοφορία έχει τη μορφή κόκκων ή μικρών ακανόνιστων συσσωματωμάτων των

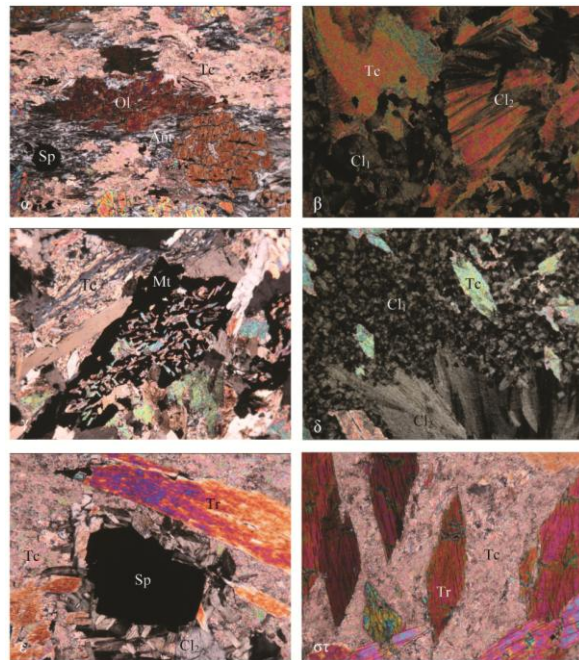
δύο ορυκτών, διάσπαρτων μέσα στο χλωρίτη.

3.1 Περιγραφή των ορυκτών

Ο **ολιβίνης** είναι το μόνο πρωτογενές πυριτικό ορυκτό και παρατηρείται σε διαφορετικού μεγέθους υπολειμματικούς κόκκους. Εμφανίζεται πάντα σπασμένος και αλλοιωμένος σε διαφορετικό βαθμό σε σερπεντίνη και τάλκη ± μαγνητίτη. Οι κόκκοι του είναι συνήθως επιμηκυσμένοι προς την κατεύθυνση σχιστότητας του πετρώματος (Σχ. 2α).

Ο **σερπεντίνης** είναι κυρίως αντιγορίτης και σχηματίζει μορφές πρισματικές μικρού μήκους, μέχρι μεγαλύτερου από 2 mm. Συχνά παρουσιάζει μορφές ατρακτοειδείς ή θυσανωτές, λόγω πίεσης. Συνοδεύεται από δευτερογενή μαγνητίτη είτε σε μικρούς κόκκους είτε σε συσσωματώματα (Σχ. 2α).

Ο **τάλκης** παρατηρείται σε περιορισμένη έκταση στο κυρίως υπερβασικό σώμα (Σχ. 2α), ενώ αποτελεί το κυρίως ορυκτό στη ζώνη του τάλκη (έως 100%). Αναπτύσσεται σε μαζώδη λεπτόκοκκη μορφή ή μέσα σε φλεβίδια, σχηματίζοντας αδρόκοκκα φύλλα (Σχ. 2β). Χαρακτηριστικές είναι οι ριπιδοειδείς μορφές οι οποίες συνοδεύονται τοπικά από χλωρίτη (Σχ. 2β), όπως και οι εικόνες σκελετοειδούς μαγνητίτη στη ζώνη του τάλκη, που εγκλείουν πολλά φυλλάκια από το ορυκτό αυτό. (Σχ. 2γ).



Σχήμα 2. Μικρογραφίες λεπτών τομών από το οφειολιθικό σώμα Πρώτης Σερρών, διερχόμενο φως, 35X, N+. α: Κυρίως οφειολιθικό σώμα με νησίδες ολιβίνης (Ol) σε περιβάλλον αντιγορίτη (Ant), τάλκη (Tc) και σπινελλίων (Sp). β: Ζώνη τάλκη-χλωρίτη με ριπιδοειδή συσσωματώματα τάλκη (Tc)-χλωρίτη (Cl₁, Cl₂). γ: Ζώνη του τάλκη με ριπιδοειδή συσσωματώματα τάλκη (Tc) και σκελετώδη μορφή μαγνητίτη (Mt), που προκύπτει από σερπεντινίωση και εγκλείει φυλλάκια τάλκη. δ: Ζώνη χλωρίτη με δύο μορφές χλωρίτη, μία λεπτόκοκκη (Cl₁) και μία που σχηματίζει ευμεγέθη φύλλα σε δεματοειδή συσσωματώματα (Cl₂). ε: Ζώνη τρεμολίτη με φυλλώδη χλωρίτη (Cl₂) γύρω από σπινελλίου (Sp) σε περιβάλλον τάλκη (Tc) και τρεμολίτη (Tr). στ: Ζώνη τρεμολίτη με ιδιόμορφους κρυστάλλους τρεμολίτη (Tr) μέσα σε τάλκη (Tc).

Ο **χλωρίτης** διακρίνεται σε δύο μορφές (Σχ. 2δ). Η πρώτη είναι λεπτόκοκκη, σχηματίζει γρानοβλαστικό ιστό και εμφανίζεται κυρίως στη ζώνη του χλωρίτη, όπου αποτελεί το βασικό ορυκτό με περιεκτικότητα έως 100%. Ο χλωρίτης της πρώτης μορφής σχετίζεται με τη μεταλλοφορία μαγνητίτη-ιλιμενίτη, την οποία και φιλοξενεί. Η δεύτερη είναι αδρόκοκκη, φυλλώδης, και εμφανίζεται σε όλο το υπερβασικό σώμα ως επουσίωδες ορυκτά. Χαρακτηριστικές είναι οι δεματοειδείς ή ριπιδοειδείς μορφές του (Σχ. 2δ), όπως και η ανάπτυξη του μαζί με τάλη γύρω από μεταλλικά ορυκτά (Σχ. 2ε) ή σε σκιές πίεσης των μεταλλικών ορυκτών.

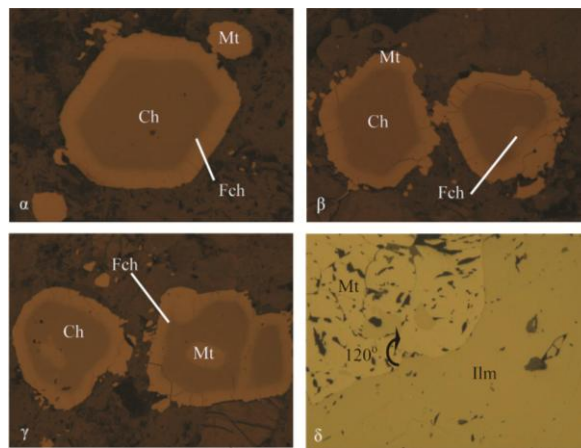
Συχνά στις ζώνες όπου υπάρχει ολιβίνης εμφανίζονται και αρκετά **ανθρακικά** ορυκτά ασβεσπιτικής ή δολομιτικής σύστασης. Μερικές φορές σχηματίζουν μεταξύ τους γρानοβλαστικό ιστό με άνισο μέγεθος των κόκκων και συχνά με κυματιστές επαφές.

Οι **αμφίβολοι** (Σχ. 2ε,στ) εμφανίζονται μόνο στο εξωτερικό τμήμα του υπερβασικού σώματος, κυρίως στη ζώνη των αμφιβόλων. Οι κρύσταλλοί τους είναι πρισματικοί, φτάνουν σε μέγεθος τα 2 mm, μπορεί να είναι μόνοι τους ή σε συσσωματώματα, παρουσιάζουν πάντα σπασίματα και συχνά έντονες κάμψεις. Συνήθως εμφανίζουν ζώνωση με ελαφρά πρασινωπό πυρήνα και ανοιχτόχρωμη περιφέρεια. Αναπτύσσονται συνήθως σε περιβάλλον λεπτόκοκκου τάλη ή χλωρίτη. Μπορεί να «εισβάλλουν» σε αυτούς κόκκοι μεταλλικών ή μπορεί να περιέχουν εγκλείσματα άλλων ορυκτών. Χαρακτηριστικές είναι οι εικόνες πορφυροβλαστών μαγνητίτη με σκελετώδη μορφή που τις συνοδεύουν (Σχ. 2β).

Η εικόνα του **χρωμίτη** στους ζωνώδεις σπιινελλίους σε ανακλώμενο φως (Σχ. 3α-γ) δείχνει ότι η αρχική χρωμιτοφόρα μεταλλοφορία έχει υποστεί σημαντικές μετατροπές. Οι πρωταρχικοί χρωμιτικοί κόκκοι εμφανίζονται αποχρωματισμένοι ως πυρήνες στο κέντρο, οι οποίοι μεταβαίνουν προς τα έξω σε σιδηροχρωμίτη και έπειτα σε μαγνητίτη, με βαθμιαία αύξηση της ανακλαστικότητας (Σχ. 3α-γ). Το περίγραμμα των ζωνωδών σπιινελλίων είναι άλλοτε ιδιόμορφο, άλλοτε αποστρωγυλεμένο ή ακανόνιστο. Στο ημισυμπαγές μετάλλευμα η αλλοίωση του χρωμίτη δεν είναι τόσο εκτεταμένη όσο στο διάσπαρτο. Όμως ακόμα και σε αυτές τις περιπτώσεις ο χρωμιτικός πυρήνας παρουσιάζει τμημα-

τικές αλλοιώσεις και θέσεις μεγαλύτερης φωτεινότητας, ενώ δείχνει τάση να αποχρωματίζεται γύρω από εγκλείσματα. Όταν η αλλοίωση του χρωμιτικού πυρήνα έχει προχωρήσει πολύ, μπορεί αυτός να δημιουργεί αμοιβαδοειδή σχήματα, που δείχνουν τάση αφομοίωσης μέσα στο σιδηροχρωμίτη + μαγνητίτη.

Ο **μαγνητίτης** μπορεί να εμφανίζεται με τις εξής μορφές: ως περιφέρεια κρυστάλλων ζωνωδών σπιινελλίων (Σχ. 2α), σε αυτοτελείς κρυστάλλους, απλούς ή πορφυροβλάστες, ή σε συσσωματώματα μαζί με ιλιμενίτη (Σχ. 3δ).



Σχήμα 3. Μικροφωτογραφίες σε ανακλώμενο φως, 35x, N. α-γ: Ζωνώδεις κρύσταλλοι σπιινελλίων από το οφειλιθικό σώμα Πρώτης Σερρών (Ch: χρωμίτης, Fch: σιδηροχρωμίτης, Mt: Μαγνητίτης). δ: Συγκρυστάλλωση μαγνητίτη (Mt) και ιλιμενίτη (Ilm) από τη ζώνη του χλωρίτη.

Στην πρώτη περίπτωση ο μαγνητίτης αποτελεί είτε πιο προχωρημένη φάση της μετατροπής του χρωμίτη – σιδηροχρωμίτη, είτε απλά μια πρόσθετη ζώνη που αναπτύσσεται επιταξικά στο χρωμίτη κατά τη σερπεντινίωση – μεταμόρφωση.

Όταν συναντάται μόνος του σχηματίζει ιδιόμορφους κρυστάλλους μικρού μεγέθους που ακολουθούν την αλλοίωση του ολιβίνης, ενώ μπορεί να σχηματίζει πορφυροβλάστες συμπαγείς ή σκελετώδους μορφής (Σχ. 2β).

Όταν βρίσκεται με ιλιμενίτη, σχηματίζει κόκκους μετρίου μεγέθους (έως μερικά mm), σχεδόν ιδιόμορ-

Πίνακας 1. Αντιπροσωπευτικές χημικές αναλύσεις με ηλεκτρονικό μικροαναλυτή πυριτικών ορυκτών.

Δείγμα	Ολιβίνης				Σερπεντινής		Τάλκης		Χλωρίτης		Αμφίβολος	
	Pr3.3	Pr3.1	Pr6.1	P12	Pr3.3	Pr3.1	Pr1	Pr3.1	Pr4	Pr7	P9	P9
SiO ₂	41,12	41,12	40,63	41,06	42,23	42,98	63,42	63,67	33,96	32,57	59,00	59,27
TiO ₂	<OA	0,06	0,11	0,04	0,10	0,07	<OA	0,01	0,06	0,03	0,11	0,07
Al ₂ O ₃	0,18	0,47	0,35	<OA	2,33	2,16	0,21	0,11	14,09	16,42	0,25	<OA
Cr ₂ O ₃	0,03	0,04	0,11	0,06	1,01	0,64	0,02	<OA	0,02	<OA	0,05	0,01
FeO* ¹	7,72	8,28	9,73	8,02	2,47	2,93	1,22	0,98	4,47	5,19	1,39	1,50
MnO	0,06	0,24	0,35	0,16	0,72	0,14	<OA	0,10	<OA	0,04	<OA	0,12
MgO	50,54	49,78	48,64	50,41	37,11	37,70	30,45	30,38	34,11	33,13	23,26	20,56
NiO	0,32	0,16	0,05	0,31	0,26	0,11	0,37	0,32	0,14	0,04	0,16	0,10
CaO	<OA	<OA	0,06	<OA	0,15	0,04	<OA	<OA	<OA	<OA	13,79	16,38
Na ₂ O	ΔΑ	ΔΑ	ΔΑ	ΔΑ	ΔΑ	ΔΑ	ΔΑ	ΔΑ	ΔΑ	ΔΑ	0,10	0,14
K ₂ O	0,06	<OA	0,02	<OA	<OA	<OA	0,03	<OA	<OA	<OA	0,01	0,03
Σύνολο	100,03	100,04	100,05	100,06	86,38	86,77	95,72	95,57	86,85	87,42	98,12	98,18

Δείγματα: Pr1-Pr3.1-Pr 3.3-P12 κυρίως υπερβασικό σώμα, Pr4-Pr7-Pr6.1 ζώνη χλωρίτη, P9 ζώνη αμφιβόλου. *1 Ολικός σίδηρος ως δισθενής.

φους, αυτόνομους ή σε πολυγωνικά συσσωματώματα. Χαρακτηριστικές είναι οι εικόνες συγκρυστάλλωσης μαγνητίτη – ιλμενίτη όπου τα όρια των κόκκων σχηματίζουν γωνίες περίπου 120°, καθώς και εικόνες αλλοτριόμορφης ανάπτυξης του ιλμενίτη μέσα σε κόκκους μαγνητίτη (Σχ. 3δ).

Ο **ιλμενίτης** συναντάται πάντα μαζί με τον μαγνητίτη και σχηματίζει κόκκους ανάλογου ή μεγαλύτερου μεγέθους (Εικ. 3δ). Μερικές φορές παρουσιάζει πολυδυμία.

Τα **σουλφίδια** σιδηροπυρίτης και πεντλανδίτης παρατηρήθηκαν σε ίχνη υπό μορφή σταγονιδίων μέσα σε μεταλλοφορία μεγάλων συγκεντρώσεων χρωμίτη – μαγνητίτη.

4 ΟΡΥΚΤΟΧΗΜΕΙΑ

Οι χημικές αναλύσεις των ορυκτών έγιναν στο Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης με τη χρήση ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης τύπου JEOL JSM – 840 εφοδιασμένου με ηλεκτρονικό μικροαναλυτή τύπου LINK AN 10000 EDS. Συνθήκες λειτουργίας ήταν: 15 KV τάση επιτάχυνσης, 3nA ρεύμα δείγματος σε πρότυπο Co, διάμετρος δέσμης ηλεκτρονίων 1 μm και χρόνο μέτρησης 100sec. Η επεξεργασία των αναλύσεων έγινε με τη χρήση λογισμικού ZAF – 4/FLS.

Για τη ρύθμιση του συστήματος ανάλυσης χρησιμοποιήθηκαν φυσικά ή τεχνητά ορυκτά και καθαρά μέταλλα ως πρότυπα.

Στον πίνακα 1 δίνονται αντιπροσωπευτικές αναλύσεις των πυριτικών ορυκτών του οφειολιθικού σώματος της Πρώτης Σερρών.

Η περιεκτικότητα φορστερίτη (Fo) των **ολιβινών** κυμαίνεται από 89,9 έως 92,1% και γενικά συμφωνεί με την πλειονότητα των δουνιτών στον ελλαδικό χώρο (Μιχαηλίδης 1982).

Οι **σερπεντίνες** είναι αρκετά πλούσιες σε SiO₂ σε σχέση με το MgO, γεγονός χαρακτηριστικό για τους αντιγορπικούς σερπεντίνες (Moody 1976). Οι πολύ χαμηλότερες περιεκτικότητες σε FeO σε σχέση με τον ολιβίνη δείχνουν ότι ο σίδηρος κατά τη σερπεντινίωση προτιμά να εισέρχεται στη σύνθεση του μαγνητίτη που τον συνοδεύει (Wittaker & Wicks 1970, Wicks & Wittaker 1977, Deer et al. 1992). Οι αυξημένες τιμές Al₂O₃ στους σερπεντίνες σε σχέση με του αρχικού ο-

λιβίνη προϋποθέτει είσοδο του Al στο πλέγμα από άλλη πηγή και αυτή είναι ο αλλοιούμενος χρωμίτης σε σιδηροχρωμίτη.

Ο **τάλκης** είναι επίσης πολύ πλούσιος σε SiO₂ και στις τετραεδρικές του θέσεις δεν συμμετέχει καθόλου Al.

Οι **χλωρίτες** είναι ιδιαίτερα πλούσιοι σε MgO και ταξινομούνται στην κατηγορία του κλινόχλωρου και του πεννίνη κατά Hey (1954). Το Al και εδώ αποδίδεται στην αλλοίωση του χρωμίτη σε σιδηροχρωμίτη. Κατά κανόνα ο χλωρίτης που συνοδεύει μεταλλοφορία ζωνώδους χρωμίτη περιέχει αρκετό Cr (χρωμιούχος χλωρίτης) (Michailidis 1990, 1993, 1995, κ.α.). Το ότι παρουσιάζει χαμηλά ποσά Cr₂O₃ ίσως οφείλεται στο γεγονός ότι τα δείγματα είναι παρμένα από τη ζώνη του χλωρίτη, που φιλοξενεί μεταλλοφορία μαγνητίτη – ιλμενίτη και δεν περιέχει χρωμιούχους σπινελλίους.

Οι **αμφίβολοι** είναι ιδιαίτερα πλούσιοι σε ασβέστιο και κατατάσσονται κατά Leake et al. (1997) στην ομάδα των ασβεσταμφιβόλων, και ειδικότερα πρόκειται για τρεμολίτες.

Στον πίνακα 2 δίνονται αντιπροσωπευτικές αναλύσεις των ορυκτών της μεταλλοφορίας.

Από σημειακές αναλύσεις σάρωσης που πραγματοποιήθηκαν σε **ζωνώδεις σπινελλίους** από το κέντρο προς την περιφέρεια (Σχ. 4) διαπιστώθηκε έντονη μείωση της περιεκτικότητας σε Al και Cr και αντίστοιχη αύξηση του Fe³⁺, ενώ ο Fe²⁺ παραμένει σχετικά σταθερός. Επίσης παρατηρήθηκε ομαλή μείωση του Mg, ενώ η περιφέρεια του ζωνώδους κρυστάλλου φαίνεται να εμπλουτίζεται σε Ni. Το Mn εμφανίζει μια ελαφρά αύξηση στην ενδιάμεση ζώνη.

Όσον αφορά τις αναλύσεις του **μαγνητίτη**, αυτός των ζωνωδών σπινελλίων (Πιν. 2, αναλύσεις 3 και 9), χαρακτηρίζεται από υψηλές τιμές Cr₂O₃, σε αντίθεση με τις άλλες περιπτώσεις (Πιν. 2, αναλύσεις 7-9).

Στο σχήμα 5α έχουν προβληθεί οι αναλύσεις των σπινελλίων στο τριγωνικό διάγραμμα Cr-Al-Fe³⁺ και στο σχήμα 5β δίνεται το πρισματικό διάγραμμα Cr/(Cr+Al) (ή Cr#) προς Mg/(Mg+Fe²⁺) (ή Mg#) του Stevens (1944).

Ο έντονος εμπλουτισμός σε σίδηρο ορισμένων χρωμιτικών πυρήνων, έχει ως αποτέλεσμα την προβολή τους στο πεδίο του σιδηρούχου χρωμίτη στο διάγραμμα F³⁺-Cr-Al παρόλο που οι περισσότεροι προβάλλονται στο πεδίο του αργιλιούχου χρωμίτη (Σχ.

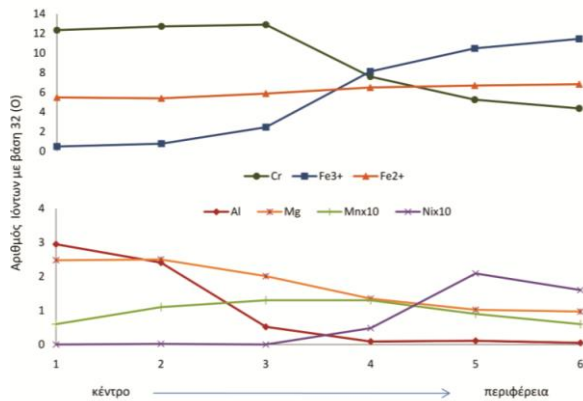
Πίνακας 2: Αντιπροσωπευτικές χημικές αναλύσεις με ηλεκτρονικό μικροαναλυτή μεταλλικών ορυκτών.

Δείγμα	Pr3.3			P12		Pr7	Π9	P12	Pr6.1	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
SiO ₂	0,30	0,22	0,15	0,43	0,38	0,43	0,11	0,14	0,22	0,15
TiO ₂	0,30	0,09	0,14	0,16	0,09	0,32	0,28	0,10	<OA	52,80
Al ₂ O ₃	9,18	1,53	0,15	8,13	3,00	<OA	0,07	0,03	<OA	0,06
Cr ₂ O ₃	57,21	57,08	18,43	56,47	60,68	9,88	0,25	3,47	7,18	<OA
Fe ₂ O ₃	2,39	11,42	50,25	5,10	6,29	58,97	68,75	65,58	61,73	5,70
FeO	24,07	24,62	27,22	24,14	25,29	27,96	29,66	28,94	28,07	31,87
MnO	0,27	0,52	0,23	0,37	0,34	0,17	<OA	0,34	<OA	1,57
MgO	6,10	4,71	2,16	6,04	4,66	1,65	0,73	0,81	1,37	7,88
NiO	<OA	<OA	0,68	0,05	0,08	0,83	0,53	0,72	0,95	0,11
CaO	ΔA	ΔA	ΔA	ΔA	ΔA	ΔA	ΔA	ΔA	ΔA	0,10
Σύνολο	99,82	100,18	99,92	100,89	100,81	100,22	100,38	100,14	99,52	100,24

1-3: ζωνώδης σπινέλλιος (χρωμίτης, σιδηροχρωμίτης, Cr-μαγνητίτης) 4-6: ζωνώδης σπινέλλιος (χρωμίτης, σιδηροχρωμίτης, μαγνητίτης), 7-9: μαγνητίτης, 10: ιλμενίτης. Δείγματα: (βλ. Πιν. 1).

5α), ενώ οι περισσότεροι σιδηροχρωμίτες προβάλλονται στο πεδίο του χρωμιούχου μαγνητίτη. Επίσης, η χημική μεταβολή τους έχει ως αποτέλεσμα οι χρωμιτικοί πυρήνες να μην προβάλλονται σε κανένα από τα πεδία κατά Dick & Bullen (1984) του διαγράμματος Cr#-Mg# (Σχ. 5β).

Οι αυξημένες τιμές σε Mg του **ιλμενίτη** (Πίν. 2, α-νάλυση 10) θεωρούνται χαρακτηριστικές για ιλμενίτη που βρίσκεται σε περιβάλλον χλωρίτη (Michailidis 1991).



Σχήμα 4. Σημειακές αναλύσεις σάρωσης με ηλεκτρονικό μικροαναλυτή από τον πυρήνα προς την περιφέρεια ζωνωδών σπινελλίων.

5 ΣΥΖΗΤΗΣΗ

5.1 Συνθήκες μεταμόρφωσης – ζώνες μετασώματωσης

Από την παραγένεση ολιβίνη, τρεμολίτη, χλωρίτη, τάλκη και αντιγορίτη που κυριαρχεί, συμπεραίνεται ότι το οφειολιθικό σώμα μελέτης έχει υποστεί, σύμφωνα με τους Evans & Frost (1975), μεταμόρφωση άνω πρσινοσχιστολιθικής-κάτω αμφιβολιτικής φάσης, που συμφωνεί με τα συνολικά δεδομένα για το πρόδρομο επεισόδιο μεταμόρφωσης της ενότητας Παγγαίου.

Περιπτώσεις ανάπτυξης ορυκτών όπως ο τάλκης, ο χλωρίτης και ο τρεμολίτης σε επαφές με το πέτρωμα ξενιστή ή σε καταμήσεις μέσα σε οφειολιθικά σώματα έχουν παρατηρηθεί και από άλλους ερευνητές (π.χ. Springer 1974, Michailidis 1991). Μερικές φορές μάλιστα τα ορυκτά αυτά παρατηρούνται σε ζώνες αρκετά εκτεταμένες (Michailidis 1991). Η ομοιότητα των περιπτώσεων αυτών με την παρούσα, μας οδηγεί να υποθέσουμε τον ίδιο τρόπο σχηματισμού των ζωνών τάλκη, χλωρίτη και ακτινολίθου, δηλαδή λόγω μετασώματωσης.

Ο εμπλουτισμός αυτών των ζωνών σε Si, Al και Ca αντίστοιχα, που δεν δικαιολογούνται από τη σύσταση του πρωτολίθου, αποδίδεται στην παρουσία κάποιας ρευστής φάσης που μετέφερε μέρος από τα στοιχεία αυτά από τα περιβάλλοντα πετρώματα κατά τη μετασώματωση (π.χ. Peacock 1987, Michailidis 1991). Η παρουσία των ανθρακικών ορυκτών στη ζώνη του τάλκη και του χλωρίτη δικαιολογείται με τον ίδιο τρόπο.

5.2 Γένεση της μεταλλοφορίας

Η μεταλλοφορία οξειδίων στο οφειολιθικό σώμα μελέτης διαμορφώθηκε σε δύο τουλάχιστον στάδια.

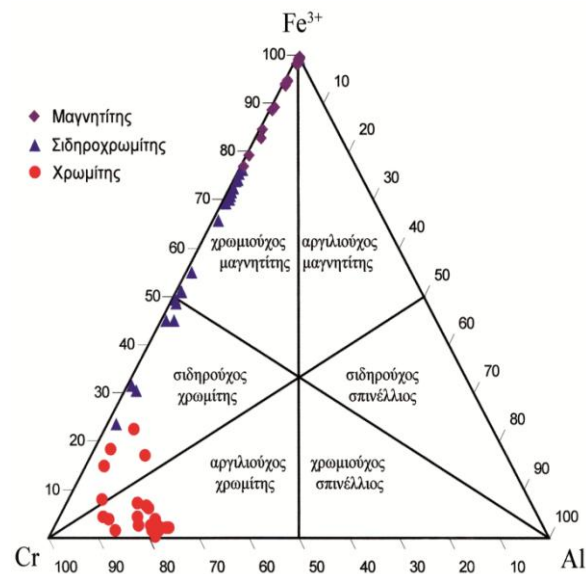
Κατά το πρώτο δημιουργήθηκε μία πρωταρχική μεταλλοφορία χρωμίτη ως γνήσια μαγματική αποβολή μέσα στον υπερβασικό πρωτόλιθο. Αργότερα, ο χρωμίτης της πρωταρχικής μεταλλοφορίας υπέστη μεταβολές και απέκτησε τη σημερινή του ζωνώδη μορφή κατά τη φάση της σερπεντινίωσης και των μεταμορφικών επεισοδίων. Παράλληλα, κατά τις δευτερογενείς αυτές διεργασίες σχηματίστηκε και ο ιλμενίτης.

Οι μεταβολές στη χημική σύσταση του χρωμίτη μετά τον πρώτο σχηματισμό του δυσκολεύουν σημαντικά τον χαρακτηρισμό του πρωτολίθου, αλλά και του ίδιου του ορυκτού σύμφωνα με όσα διατύπωσαν οι Dick & Bullen (1984). Παρόλα αυτά οι πολύ χαμηλές τιμές TiO₂ (<0,3%), το υψηλό χρώμιο, με τιμές Cr# > 0.6, οι χαμηλές τιμές Fe³⁺# [Fe³⁺/(Cr+Al+Fe³⁺)] (<0,1) και η αρνητική συσχέτιση των λόγων Cr# και Mg# (Σχ. 5β), επιτρέπουν την κατάταξη των πρωτογενών χρωμιτών στους υψηλού-Cr, που φιλοξενούνται σε Αλπικού-Τύπου III περιδοτίτες (Dick and Bullen 1984).

Η εμφάνιση ζωνωδών χρωμίτη σε αλπικού τύπου σερπεντινιωμένους περιδοτίτες είναι φαινόμενο πολύ συνηθισμένο και έχει μελετηθεί εκτενώς από πολλούς επιστήμονες. Η πιο συνηθισμένη μετατροπή που παρατηρήθηκε στη ζώνη του σιδηροχρωμίτη είναι ο εμπλουτισμός σε Fe ή και Mn, Ni και σχετική ελάττωση σε Al, Mg ή και Cr (π.χ. Beeson & Jackson 1969, Springer 1974, Michailidis 1990, 1993, 1995), όπως ακριβώς και στην περίπτωση της περιοχής μελέτης.

Η πρόελευση των ζωνωδών σπινελλίων με σιδηροχρωμίτη αποδόθηκε κυρίως:

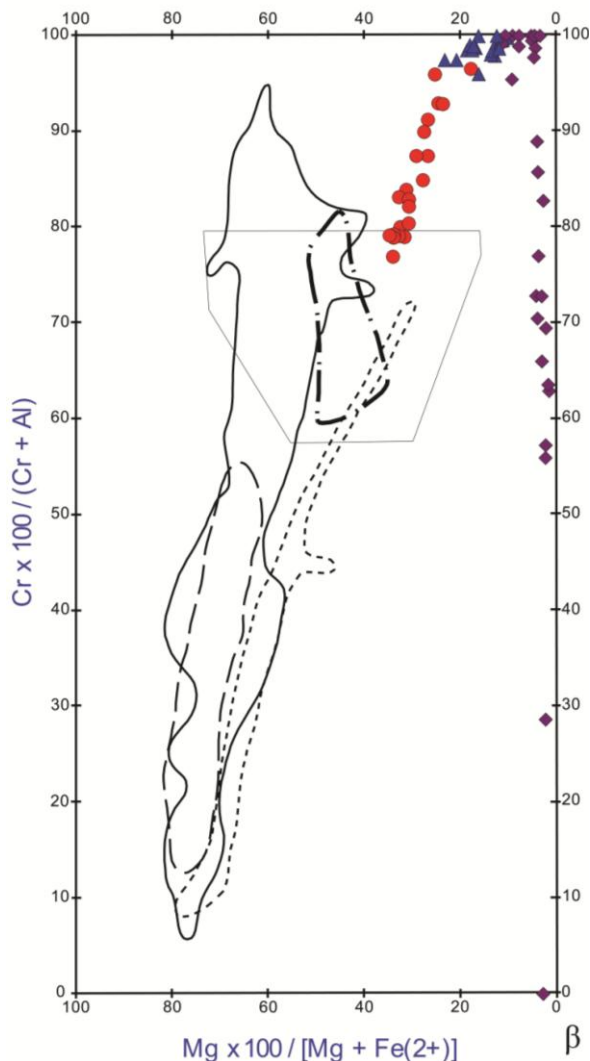
- στη σερπεντινίωση που οφείλεται είτε σε μεταμορφική δράση πρσινοσχιστολιθικής-αμφιβολιτικής φάσης είτε σε πνευματολυτική-υδροθερμική δράση (π.χ. Beeson & Jackson, 1969, Stanton 1972, Michailidis 1990, 1993, Mohanty et al. 1996).
- σε μεταγενέστερο της σερπεντινίωσης μεταμορφικό επεισόδιο (π.χ. Michailidis 1991, Thalhammer et al. 1990, Angeli et al. 2001).



Σχήμα 5α. Προβολή των σπινελλίων στο τριγωνικό διάγραμμα ονοματολογίας του Stevens (1944).

Είναι σημαντικό ότι αν ο βαθμός μεταμόρφωσης είναι υψηλότερος της αμφιβολιτικής φάσης, τότε δημιουργούνται άλλες μορφές ζωνώσης, αποτέλεσμα δι-

εργασιών απόμειξης (π.χ. Eales et al. 1988, Burkhard 1993, Candia & Gaspar 1997). Συνεπώς, η παρατηρούμενη μορφή σπινελλίων επιβεβαιώνει το βαθμό μεταμόρφωσης του πετρώματος ξενιστή.



Σχήμα 5β. Προβολή των σπινελλίων στο πρισματικό διάγραμμα $Cr \times 100 / (Cr + Al)$ προς $Mg \times 100 / (Mg + Fe^{2+})$ του Stevens (1944) με πεδία κατά Dick & Bullen (1984): Αλπικού Τύπου Περιδοτίτες (—), Στρωματόμορφου Τύπου Περιδοτίτες (---), Αλπικού Αλπικού Τύπου Περιδοτίτες (- - -), Αβυσσικοί Περιδοτίτες (· · ·) και Στρωματόμορφες Διεισδύσεις Αλάσκας (— ·).

Οι περισσότεροι ερευνητές θεωρούν ότι οι μετατροπές που συμβαίνουν κατά τη δημιουργία ζωνών σπινελλίων αποτελούν ένα πολλών σταδίων μετασωματικό φαινόμενο, που συμβαίνει με τον μηχανισμό της διάχυσης των ιόντων. Κατ' αυτόν, τα στοιχεία Mg, Al, Cr απομακρύνονται επιλεκτικά από το πλέγμα του χρωμίτη προς το περιβάλλον, ενώ τα Fe, Ni, Mn εισέρχονται από το περιβάλλον στο χρωμίτη.

Σύμφωνα με τους Harker (1974) και Yardley (1989) η διάχυση των ιόντων διευκολύνεται από την παρουσία και τη δυνατότητα κυκλοφορίας ρευστής φάσης και εντείνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας και της πίεσης. Συνεπώς, η μεταμόρφωση μπορεί να προάγει το φαινόμενο της διάχυσης και να εντείνει την εξαλλοίωση του χρωμίτη.

Σύμφωνα με ορισμένους μελετητές, η ανταλλαγή των ιόντων κατά τη δημιουργία του ζωνώδους χρωμίτη γίνεται με ανακατανόμη ιόντων μεταξύ χρωμιτικού πυρήνα και μαγνητιτικής περιφέρειας που αποτέθηκε γύρω από τον χρωμιτικό κόκκο κατά την σερπεντινίωση (Springer 1974, Bliss & MacLean 1975, Takla 1982, Prinsent & Hirst 1977, και Ashley 1975, Moody 1976, MacFarlane & Mossmann 1981) ενώ σύμφωνα με άλλους (Michailidis 1990, 1991, 1993, 1995, Michailidis et al. 1995) γίνεται με την ανταλλαγή ιόντων με το ευρύτερο πετρολογικό περιβάλλον.

Το Al που αποβλήθηκε από τον χρωμίτη φαίνεται να ενσωματώθηκε στο πλέγμα του σερπεντίνης και του χλωρίτη, όπως δείχνουν και οι χημικές τους αναλύσεις. Μάλιστα ο σερπεντίνης προσλαμβάνει σταδιακά αρκετό Al, ώστε να μετατρέπεται σε χλωρίτη (Fawcett & Yoder 1966, Michailidis 1993), γεγονός που ερμηνεύει την ανάπτυξη του φυλλώδους χλωρίτη που παρατηρείται κυρίως στη γειτονία αλλοιωμένων χρωμιτικών κόκκων.

Το Cr_2O_3 απουσιάζει από τα δευτερογενή πυριτικά ορυκτά, γιατί εισέρχεται στο περιβλήμα μαγνητίτη.

Το Ni που ελευθερώνεται κατά τη σερπεντινίωση εμπλουτίζει τις ζώνες σιδηροχρωμίτη και μαγνητίτη, ή τοπικά δημιουργεί σουλφίδια (πεντανδρίτης).

Η παρουσία του ιλμενίτη μαζί με μαγνητίτη μπορεί να αποδοθεί στην πιθανή αρχική παρουσία ρουτιλίου (Cook 1973, Frost 1975, Michailidis 1991). Η προέλευση όμως του Ti από τους μαρμαρυγίες των γειτονικών πετρωμάτων δεν πρέπει να αποκλειστεί.

6 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στο σερπεντινωμένο οφειολιθικό σώμα της Πρώτης Σερρών παρατηρούνται περιφερειακά μετασωματικές ζώνες τάλκη, χλωρίτη και τρεμολίτη.

Στο σώμα αυτό εντοπίζεται μεταλλοφορία οξειδίων διάσπαρτου έως ταινιωτού τύπου, που αποτελείται από ζωνώδεις κρυστάλλους σπινελλίων (χρωμίτης+σιδηροχρωμίτης+μαγνητίτης), αυτοτελή μαγνητίτη και ιλμενίτη.

Η γένεση των ζωνωδών σπινελλίων αποτελεί μετασωματικό φαινόμενο, που συντελείται κατά τη σερπεντινίωση και την επακόλουθη μεταμόρφωση του αρχικού υπερβασικού πρωτολίθου, κατά την οποία, με τη διεργασία της διάχυσης μετακινούνται τα στοιχεία Al, Cr και Mg από τμήμα του πρωτογενούς χρωμιτικού πυρήνα προς τα περιβάλλοντα πυριτικά ορυκτά, ενώ ο Fe, το Mn και το Ni από το περιβάλλον προς τις ζώνες σιδηροχρωμίτη ή/και μαγνητίτη. Η ζωνώδης δομή των σπινελλίων φαίνεται να λαμβάνει χώρα στα εξής στάδια:

- Γένεση του αρχικού χρωμίτη ως γνήσια μαγματική αποβολή στον υπερβασικό πρωτόλιθο.
- Ανάπτυξη εξαλλοίωσης σε σιδηροχρωμίτη καθώς και μαγνητιτικού δακτυλίου στον κρύσταλλο χρωμίτη + σιδηροχρωμίτη κατά τη διαδικασία της σερπεντινίωσης.
- Προαγωγή του φαινομένου της εξαλλοίωσης του χρωμίτη και δημιουργία της σημερινής μορφής ζωνωδών κρυστάλλων κατά τη μεταμόρφωση πρασινοσχιστολιθικής – κάτω αμφιβολιτικής φάσης.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Μιχαηλίδης Κ.Μ. 1982. Κοιτασματολογική μελέτη των σιδηρο-νικελιούχων με χρώμιο λατεριτών της περιοχής Έδεσσας. Διδακτορική Διατριβή, Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, 363 σ.
- Μουντράκης Δ. 1985. Γεωλογία της Ελλάδας. University Studio Press, Θεσσαλονίκη, 207σ.
- Μπαντή Α.Χ. 2002. Κοιτασματολογική μελέτη των χρωμιτών της περιοχής Έδεσσας. Διδακτορική διατριβή, Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, 459 σ.
- Οικονόμου Μ. 1979. Οι εμφανίσεις μαγνητίτου εντός ελληνικών υπερβασικών πετρωμάτων και η γένεση αυτών. Διδακτορική Διατριβή, Αθήνα, 170 σ.
- Angeli N., Fleet M.E. Thiabault Y. & Candia M.A.F. 2001. Metamorphism and PGE-Au content of chromitite from the Iranema mafic/ultramafic complex, Minaw Gerais. *Mineral. Petrol.*, 71, 173-194.
- Ashley P.M. 1975. Opaque mineral assemblage formed during serpentinization in the Coolac ultramafic belt, New South Wales. *Geol. Soc. Austr. Jour.*, 22, 91-102
- Beeson M.H. & Jackson E.D. 1969. Chemical composition of altered chromites from the Stillwater complex, Montana. *Amer. Mineral.* 542, 1084-1100.
- Bliss N.W. & MacLean W.H. 1975. The paragenesis of zoned chromite from central Manitoba. *Geoch. Cosm. Acta*, 39, 973-990.
- Burkhard D.J.M. 1993. Accessory chromium spinels: their coexistence and alteration in serpentinites. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 57, 1297-1306.
- Candia M.A.F. & Gaspar J.C. 1997. Chromian spinels in metamorphosed ultramafic rocks from Magnabal I and II complexes, Goiás, Brazil. *Mineral. Petrol.*, 60, 27-40.
- Cook, L.P. 1973. Metamorphosed carbonates of the Nashoba Formation, eastern Massachusetts. *Geol. Soc. Am. Abstr. with Programs*, 5, 583-584.
- Deer W., Howie R. & Zussman J. 1992. An introduction to the rock-forming minerals. Longman, England, 697σ.
- Dick H.J.B. & Bullen T. 1984. Chromian spinel as a petrogenetic indicator in abyssal and alpine-type peridotites and specially associated lavas. *Mineral. Petrol.*, 86, 54-76.
- Eales H.V., Wilson, A.H. & Reynolds I.M. 1988. Complex unmixed spinels in layered intrusions within an obducted ophiolite in the Natal-Namaqua mobile belt. *Mineral. Deposita*, 23, 150-157.
- Evans B.W. & Frost B.R. 1975. Chrome-spinel in progressive metamorphism – a preliminary analysis. *Geoch. Cosm. Acta*, 39, 959-972.
- Fawcett L.L. & Yoder H.S. 1966. Phase relationship in the chlorites in the system $MgO - Al_2O_3 - SiO_2 - H_2O$. *Amer. Mineral.*, 51, 353-380.
- Frost R. 1975. Contact metamorphism of Serpentinite, Chloritic Blackwall and Rodingite at Paddy-Go-Easy Pass, Central Cascades, Washington. *J. Petrol.*, 16, 272-313.
- Harker A. 1974. Metamorphism: A study of the transformations of rock masses. Chapman and Hall. London.
- Hey M.H. 1954. A new review of the chlorites, *Mineral. Mag.*, 30, 277-292.
- Kiliás A. & Mountrakis D. 1990. Kinematics of the crystalline sequences in the western Rhodope massif. *Geol. Rhod.*, 2, 100-116.
- Leake B.E., Woolley A.R. & 20 others (1997). Nomenclature of Amphiboles: report of the Subcommittee on Amphiboles of the International Mineralogical Association Commission on New Minerals and Mineral Names. *Min. Mag.*, 61 (2), 295-312.
- MacFarlane N.D. & Mossman D.J. 1981. The opaque minerals and economic geology of the Nemeiben ultramafic complex, Saskatchewan, Canada. *Mineral. Deposita*, 16, 409-424.
- Michailidis K. 1990. Zoned chromites with high Mn-contents in the Fe-Ni-Cr-laterite ore deposits from the Edessa area in Northern Greece. *Mineral. Deposita*, 25, 190-197.
- Michailidis K. 1991. Fe-Cr spinel and ilmenite massive mineralization in metamorphic ultramafics from the Askos area, Northern Greece. *Bull. Geol. Soc. Greece*, XXV (2), 203-224.
- Michailidis K. 1993. Ferritechromite – Chromian chlorite (kaemmererite) association in the podiform chromite ores of the Chalkidiki ophiolites in Macedonia, Northern Greece. Vol B', In memorial A. G. Panagos. Publications of Geological Sciences, National Technical Univ. Athens, 603-629.
- Michailidis K. 1995. Compositional variations in chromian spinels in serpentinites from the Kilikis area, Northern Greece. *Chem. Erde*, 55, 81-96.
- Mohanty J.K., Sahoo R.K. & Paul A.K. 1996. Chromite alteration at Boula-Nausahi igneous complex, Orissa. *Geol. Soc. India*, 48(3), 265-276.
- Moody J.B. 1976. Serpentinization: a review. *Lithos*, 9, 125-138.
- Peacock S.M. 1987. Serpentinization and interfiltration metasomatism in the Trinity Peridotite, Klamath province, northern California: implications for subduction zones. *Contrib. Mineral. Petrol.* 95 (1), 55-70.
- Prinsent R.H. & Hirst D.M. 1977. The metamorphism of the Blue River ultramafic body, Cassiar, British Columbia, Canada. *J. Petrol.*, 18, 567-594.
- Springer R.K. 1974. Contact metamorphosed ultramafic rocks in the Western Sierra Nevada Foothills, California. *J. Petrol.*, 15, 160-195.
- Stanton R.L. 1972. Ore Petrology. McGraw Hill, New York, 713p.
- Stevens R.E. 1944. Composition of some chromites of the Western hemisphere. *Amer. Mineral.*, 29, 1-34.
- Takla M.A. 1982. Chromites from the Bergen Arcs Ultramafics. *N. Jb. Miner. Abh.*, 144, 56-72.
- Thalhammer O., Prochaska W. & Mühlhans H.D. 1990. Solid inclusions in chrome-spinels and platinum group element concentrations from the Hogrösen and Kraubath Ultramafic Massifs (Austria). *Contrib. Mineral. Petrol.*, 105, 66-80.
- Whittaker J.W. & Wicks F.J. 1970. Chemical differences among the serpentine «polymorphs»: a discussion. *Amer. Mineral.*, 55, 1025-1047.
- Wicks F.J. & Whittaker J.W. 1977. Serpentine textures and serpentinization. *Can. Mineral.*, 15, 459-488.
- Yardley B.W.D. 1989. An Introduction to Metamorphic Petrology. Longman, London.

