

ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΟΡΥΚΤΟΧΗΜΕΙΑΣ ΤΩΝ ΑΜΦΙΒΟΛΩΝ ΗΦΑΙΣΤΕΙΑΚΩΝ ΠΕΤΡΩΜΑΤΩΝ ΤΟΥ ΤΟΞΟΥ ΤΟΥ ΑΙΓΑΙΟΥ

Π. ΜΗΤΡΟΠΟΥΛΟΥ, Α. ΜΑΓΚΑΝΑ

Σ Υ Ν Ο Ψ Η

Από τη μελέτη της ορυκτοχημείας αμφιβόλων από πετρώματα των διάφορων ηφαιστειακών κέντρων του τόξου του Αιγαίου προκύπτει ότι παρουσιάζουν αξιόλογη μεταβολή στην ποσοτική συμμετοχή τους και στη χημική τους σύσταση. Η πολύ μικρή συμμετοχή των αμφιβόλων στα πετρώματα της Σαντορίνης θεωρείται αποτέλεσμα της μικρής περιεκτικότητας σε H_2O του μητρικού μάγματος των πετρωμάτων αυτών. Η ποικιλία στη χημική σύσταση φαίνεται από τις διάφορες υποκαταστάσεις κατιόντων. Οι κυριότερες υποκαταστάσεις που διαπιστώθηκαν είναι η εδενιτική, η ριεβεϊνιτική και η Τι-τσερμακίτικη και οι οποίες δημιουργήθηκαν από μεταβολές σε διάφορες φυσικοχημικές παραμέτρους και στη σύσταση του μάγματος. Επίσης δοκιμάστηκε η χρήση της μεταβολής της χημικής σύστασης των αμφιβόλων στον υπολογισμό των Ρ, Τ συνθηκών κρυστάλλωσης ηφαιστειακών πετρωμάτων του τόξου του Αιγαίου.

A B S T R A C T

The study of the mineral chemistry of amphiboles from the different volcanic centers of the Aegean island arc reveals a variation of their modal and chemical composition. The very low participation of the amphiboles in Santorini volcanic rocks is considered as consequence of the low content of H_2O of the parental magma. In addition, the amphiboles show edenite, riebeckite and Ti-tschermakite coupled substitutions resulting from local variations of the physicochemical parameters of the magma. Also, the use of the variation of the amphiboles chemical composition is tested for a first estimation of the Ρ, Τ conditions of crystallization of the volcanic rocks from the Aegean arc.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το νότιο τμήμα του Αιγαίου χαρακτηρίζεται από την παρουσία ενός ηφαιστειακού τόξου (McKenzie 1972). Το ηφαιστειακό τόξο του Αιγαίου σχετίζεται με την καταβύθιση του Μεσογειακού τμήματος της Αφρικανικής πλάκας κάτω από την πλάκα του Αιγαίου στην Ελληνική τάφο νότια της Κρήτης.

Η πολύπλοκη γεωλογική δομή του τόξου έχει αποτελέσει το αντικείμενο μελέτης πολλών ερευνητών (Biju-Duval et al. 1974, Makris 1977, Keller 1982, Παπαδόπουλος 1982, Macropoulos and Burton 1984, Κομπορούλου et al. 1985).

Οι λάβες του ηφαιστειακού κέντρου του τόξου έχουν ηλικίες από ανώτερο Πλειόκαινο μέχρι Τεταρτογενές (Fytikas et al. 1976, Innocenti et al. 1981, Ferrara et al. 1980). Η σύσταση των λαβών

ΜΗΤΡΟΠΟΥΛΟΣ Ρ. and ΜΑΓΚΑΝΑΣ Α.: Comparative study of amphiboles mineral chemistry from volcanic rocks of the Aegean island arc.

Πανεπιστήμιο Αθηνών, Τμήμα Γεωλογίας, Πανεπιστημίουπολη, Άνω Γλάσκια, 157 01, Αθήνα.
 Φηλιάκη Βιβλιοθήκη "Θεοφράστου" - Τμήμα Γεωλογίας, Α.Π.Θ.

είναι κυρίως ανδραειτική έως ρυαλιθική ενώ στη Σαντορίνη όπου η ποικιλία των λαβών είναι μεγαλύτερη υπάρχουν και λάβες βασάλτικης σύστασης (Nicholls 1971, Keller 1982).

Στα πλαίσια του προγράμματος της συγκεκριμένης μελέτης της γεωχημείας και ορυκτοχημείας πετρωμάτων από τα διάφορα ηφαιστειακά κέντρα του τόξου του Αιγαίου έχουν παρουσιαστεί μέχρι σήμερα η γεωχημεία των ιχνοστοιχείων και των REE (Μητροπούλου et al, 1987), η ορυκτοχημεία φαινοκρυστάλλων πυροξένων (Μητροπούλου 1986) και οι μεταβολές της fO_2 κατά μήκος του τόξου όπως προκύπτουν από την ορυκτοχημεία Fe-Ti-σύχων ορυκτών οξειδίων (Μητροπούλου και Μαγκανός 1988).

Στην παρούσα εργασία παρουσιάζεται η συγκεκριμένη μελέτη της ορυκτοχημείας των ορυκτών της ομάδας των αμφιβόλων που προσδιορίστηκαν σε πετρώματα από τα διάφορα ηφαιστειακά κέντρα του τόξου.

2. ΟΡΥΚΤΟΧΗΜΕΙΑ ΤΩΝ ΑΜΦΙΒΟΛΩΝ ΤΩΝ ΠΕΤΡΩΜΑΤΩΝ ΤΟΥ ΗΦΑΙΣΤΕΙΑΚΟΥ ΤΟΞΟΥ ΤΟΥ ΑΙΓΑΙΟΥ.

Οι αμφιβόλοι αποτελούν μία πολύ σημαντική ομάδα πετρογενετικών ορυκτών που παρουσιάζουν μεταβαλλόμενο χημισμό και δυνατότητα σε ένα πολύ μεγάλο αριθμό παραλλαγών. Αποτελούν συστατικά των πυριγενών πετρωμάτων από τα όξια μέχρι τα υπερβασικά, ενώ συναντώνται στα ιζηματογενή πετρώματα σαν κλαστικές ή αυθιγενείς φάσεις και στα μεταμορφωμένα πετρώματα σε μία ευρεία ποικιλία συστάσεων. Οι μεταβολές στην χημική σύσταση των αμφιβόλων καθώς και η συμμετοχή τους σε διάφορα χαρακτηριστικά ορυκτολογικά αβροίσματα έχουν χρησιμοποιηθεί σε μεγάλη κλίμακα σαν δείκτες του βαθμού μεταμόρφωσης (Engel and Engel 1962, Ernst 1972, Grapes et al. 1977, Laird and Albee 1981, κ.ά.). Οι μεταβολές στην σύσταση των αμφιβόλων και ειδικότερα της κεροσίλης έχουν επίσης χρησιμοποιηθεί και στην μελέτη των φυσικοχημικών συνθηκών κρυστάλλωσης ορυκτολογικών πετρωμάτων (Hammarstrom and Zen 1986).

Στα πετρώματα του ηφαιστειακού τόξου του Αιγαίου οι αμφιβόλοι παρουσιάζονται σαν ιδιόμορφοι έως υπιδιόμορφοι κρυστάλλοι ηρώδινου ή καστανού χρώματος έντονα πλεοχρωμικοί. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι ενώ στα πετρώματα των ηφαιστειακών κέντρων της Αίγινας, των Μεθάνων, του Πόρου, της Μήλου και της Κω οι αμφιβόλοι αποτελούν ένα από τα κύρια πετρογενετικά ορυκτά και συνοδεύονται στις περισσότερες περιπτώσεις από βιόστιτη, στα πετρώματα της Σαντορίνης η παρουσία τόσο των αμφιβόλων όσο και του βιόστιτη είναι περιορισμένη παρά τη μεγάλη ποικιλία πετρογενετικών τύπων. Ερευνητές που μελέτησαν την πετρολογία των ηφαιστειακών πετρωμάτων της Σαντορίνης επισημαίνουν τη σπάνια παρουσία κρυστάλλων αμφιβόλων μόνο σε δακίτες (Nichols 1971, Fichler and Kubacki 1972, Ruchelt et al. 1977). Στα δείγματα των ηφαιστειακών πετρωμάτων από την Σαντορίνη που αναλύθηκαν στην παρούσα εργασία διαπιστώθηκαν σε δακίτες μερικοί μικροί κρυστάλλοι αμφιβόλων οι οποίοι περιβάλλονται και μερικώς επικαλύπτονται από αδιαφανή Fe-Ti-σύχων ορυκτά οξείδια. Η παρουσία των αδιαφανών αυτών οξειδίων δημιούργησε προβλήματα κατά τη μικροανάλυση των αμφιβόλων.

Η ανάλυση των αμφιβόλων των ηφαιστειακών πετρωμάτων του τόξου του Αιγαίου έγινε στο Πανεπιστήμιο του Leicester της Αγγλίας, με την χρήση ηλεκτρονικού μικροαναλυτή τύπου Cambridge Scientific Instruments Microscan 5 που συνδέεται με σύστημα

ποσοτικής ανάλυσης τύπου Link Systems ZAF-4/FESI. Σαν σπάνιους χρησιμοποιήθηκαν καθαρά στοιχεία και φυσικές ή συνθετικές ενώσεις.

Αχτηνρωσπευτικές αναλύσεις αμφιβόλων από πετρώματα που καλύπτουν ολόκληρο το φάσμα συστάσεων που συναντώνται στα διάφορα ηφαιστειακά κέντρα του τόξου του Αιγαίου δίνονται στον Πίνακα 1. Η ταξινόμηση των αμφιβόλων αυτών με βάση τη χημική τους σύσταση (Leake 1978) έδειξε ότι αυτοί κατατάσσονται σε δύο ομάδες (εικ. 1α, 1β). Οι αμφιβόλοι της πρώτης ομάδας χαρακτηρίζονται σαν μαγνησιο- έως τετραβασικές κεροσίλλες ενώ της δεύτερης ομάδας σαν μαγνησιο-χαστινχοϊκίτες έως μαγνησιο-χαστινχοϊκίτες κεροσίλλες. Μερικοί αμφιβόλοι περιέχουν Ti₂₀₋₂₅ και ταξινομούνται ως τιτανιούχοι αμφιβόλοι. Όπως φαίνεται τόσο από τον Πίνακα 1, όσο και από τις Εικόνες 1α και 1β αμφιβόλοι και των δύο ομάδων ολαντούν στα πετρώματα όλων των ηφαιστειακών κέντρων και ακόμη ότι συνυπάρχουν στα ίδια δείγματα. Τέλος όπως προκύπτει από τον Πίνακα 1 στα πετρώματα Λ02 από την Αίγινα και Ρ03 από τον Πόρο βρέθηκαν κρυστάλλοι αμφιβόλων, σε αντίθεση με το πέτρωμα SA13 από την Σαντορίνη, παρόλο που τα τρία αυτά πετρώματα παρουσιάζουν παραηλιθία (ανδραειτική) χημική φύση (Πίνακας 2).

3. ΣΥΖΗΤΗΣΗ - ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η σύσταση των αμφιβόλων που προέρχονται από την κρυστάλλωση των βασάλτικών μάγματος ποικίλλει σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία, τη σύσταση του μάγματος και την ιζητικότητα του ορυκτού. Η μεταβολή αυτή της σύστασης των αμφιβόλων περιγράφεται με βάση τους διαφορετικούς τύπους υποκατάστασεων των κατιόντων στο πλέγμα των αμφιβόλων.

Όπως έχει ήδη αναφερθεί οι αμφιβόλοι των πετρωμάτων του ηφαιστειακού τόξου του Αιγαίου παρουσιάζουν σημαντική ποικιλία στη σύσταση (Πιν. 1, εικ. 1α, 1β). Οι κυριότερες υποκατάστασεις που διαπιστώθηκαν σε ολόκληρο το φάσμα των αμφιβόλων αυτών, εκτός από την απλή υποκατάσταση $Fe^{2+} \rightleftharpoons Mg$, είναι η εδενιτική υποκατάσταση και η ριεβεκιτική υποκατάσταση. Η εδενιτική υποκατάσταση περιγράφεται από την αντίδραση:



και δίνεται σχηματικά από το διάγραμμα της Εικ. 2 όπου παρατηρείται ότι η μείωση των κατιόντων στην Α θέση είναι παράλληλη με τη μείωση του Al σε τετραεδρικές θέσεις η οποία συνεπάγεται την αύξηση του Si. Η μεταβολή της περιεκτικότητας σε Al που συνεπάγεται η εδενιτική υποκατάσταση έχει σαν αποτέλεσμα το μεγάλο εύρος του Al_2O_3 (περίπου από 7 % μέχρι 15 %) που παρατηρείται στους αμφιβόλους των πετρωμάτων του ηφαιστειακού τόξου του Αιγαίου. Η εδενιτική υποκατάσταση έχει αποδειχθεί ότι εξαρτάται άμεσα τόσο από τη θερμοκρασία όσο και από τη σύσταση του μάγματος (Helz 1973).

Η ριεβεκιτική υποκατάσταση που περιγράφεται από την αντίδραση:



και δίνεται σχηματικά στο διάγραμμα της Εικ. 3, είναι αποτέλεσμα τόσο της σύστασης του μάγματος από το οποίο προέρχονται οι αμφιβόλοι όσο και από την φύση της ρευστής φάσης που συμμετέχει στη σύσταση αυτού του μάγματος (Offler 1984). Οι Stephenson et al. (1982) θεωρούν ότι η συνεχής αύξηση της εδενιτικής αλλά και

Πίνακας 1. Αντιπροσωπευτικές αναλύσεις αμφιβόλων από πετρώματα ηφαιστειακών κέντρων του τόξου του Αιγαίου. Ο υπολογισμός του τύπου των αμφιβόλων έγινε με μέθοδο που δίνει άθροισμα κατιόντων, εκτός από Ca, Na και K, ίσον προς 13, ενώ ο λόγος Fe^{3+}/Fe^{2+} προσαρμόστηκε ώστε να δίνει 23 (0) (Hawthorne 1983).

Table 1. Representative chemical analyses of amphiboles from rocks of the volcanic centers of the Aegean arc. The amphibole recalculation was made according to the method that gives total cations, excluding Ca, Na and K, normalized to 13, whereas the ratio Fe^{3+}/Fe^{2+} adjusted to give 23 (0) (Hawthorne 1983).

	ME2_1*	ME7_1	ME6_2	AG3_9	AG4_1	AG6_1	AG2_9	AG2_4	AG1_3
SiO ₂	42.65	45.77	47.74	43.94	40.96	45.44	44.01	43.51	43.87
TiO ₂	1.86	1.09	1.10	1.72	2.00	1.37	1.75	1.74	1.76
Al ₂ O ₃	13.05	8.15	7.52	11.90	14.97	8.39	11.56	12.36	11.51
Fe ₂ O ₃	8.84	7.78	7.54	6.70	4.94	6.33	6.01	7.52	3.51
FeO	1.81	6.79	6.26	2.36	3.61	9.14	3.32	2.61	4.14
MnO	-	0.43	0.61	-	-	0.53	-	-	-
MgO	16.02	13.84	14.61	16.61	15.69	13.08	16.53	16.01	16.78
CaO	11.65	11.24	11.26	11.95	12.50	11.60	11.85	11.99	12.44
Na ₂ O	2.71	1.69	1.65	2.12	2.31	1.63	2.47	1.83	2.08
K ₂ O	0.30	0.53	0.35	0.63	0.89	0.68	0.67	0.81	0.74
Σύνολο	98.89	97.23	98.65	97.93	97.93	98.18	98.18	98.38	96.93
Si	6.061	6.705	6.847	6.275	5.901	6.659	6.294	6.209	6.353
Al IV	1.939	1.295	1.153	1.725	2.099	1.341	1.706	1.791	1.647
Σύν. (T)	8.000	8.000	8.000	8.000	8.000	8.000	8.000	8.000	8.000
Al VI	0.247	0.115	0.118	0.278	0.443	0.108	0.243	2.289	0.313
Ti	0.199	0.120	0.119	0.185	0.217	0.151	0.188	0.187	0.191
Fe ³⁺	0.945	0.857	0.814	0.720	0.536	0.698	0.647	0.808	0.381
Mg	3.394	3.023	3.124	3.536	3.370	2.857	3.524	3.406	3.614
Fe ²⁺	0.215	0.832	0.751	0.282	0.435	1.120	0.398	0.311	0.501
Mn	-	0.053	0.074	-	-	0.066	-	-	-
Σύν. (C)	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000
Ca	1.774	1.764	1.730	1.828	1.939	1.821	1.816	1.833	1.926
Na B	0.226	0.236	0.270	0.172	0.061	0.179	0.184	0.167	0.074
Σύν. (B)	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000
Na A	0.521	0.219	0.189	0.415	0.584	0.285	0.501	0.340	0.509
K	0.054	0.099	0.064	0.115	0.164	0.127	0.122	0.147	0.136
Σύν. (A)	0.575	0.318	0.253	0.530	0.748	0.412	0.623	0.487	0.645

* Συμβολισμός δειγμάτων: SA = Σαντορίνη, MI = Μήλος, PO = Πόρος, AG = Αίγινα, ME = Μέθανα, KO = Κως.

Πίνακας 1 συνέχεια...
Table 1 continued...

	MI12_1	MI12_2	KO4_2	KO2_1	KO8_1	PO2_1	PO1_C	PO1_R	PO3_2
SiO ₂	42.78	44.43	41.74	41.64	44.56	43.03	42.98	42.95	47.34
TiO ₂	2.25	2.23	2.56	2.18	1.77	0.86	1.07	0.82	0.70
Al ₂ O ₃	12.43	10.57	11.83	14.77	9.30	10.08	11.00	10.95	17.31
Fe ₂ O ₃	6.18	7.64	2.15	5.01	7.61	8.23	8.91	8.63	5.59
FeO	8.04	6.19	11.18	2.85	6.15	8.87	8.86	8.99	7.53
MnO	-	-	-	-	0.25	0.64	0.76	0.63	0.40
MgO	13.33	14.34	13.14	16.32	14.48	11.35	11.32	11.30	14.72
CaO	11.98	11.34	11.66	12.47	11.44	11.45	11.52	11.23	12.00
Na ₂ O	2.25	2.18	2.64	2.38	2.00	1.26	1.59	1.90	1.29
K ₂ O	0.59	0.70	0.81	0.93	0.67	0.68	0.75	0.70	0.44
Σύνολο	99.84	99.52	97.71	98.55	98.23	96.45	98.75	98.10	97.32
Si	6.154	6.349	6.186	5.937	6.471	6.457	6.322	6.355	6.894
Al IV	1.846	1.651	1.814	2.063	1.529	1.543	1.578	1.645	1.106
Σύν. (T)	8.000	8.000	8.000	8.000	8.000	8.000	8.000	8.000	8.000
Al VI	0.261	0.133	0.253	0.420	0.063	0.240	0.229	2.264	0.149
Ti	0.243	0.240	0.285	0.234	0.193	0.097	0.118	0.091	0.077
Fe ³⁺	0.669	0.824	0.240	0.538	0.832	0.930	0.986	0.961	0.613
Mg	2.858	3.062	2.903	3.469	3.135	2.539	2.482	2.492	3.196
Fe ²⁺	0.968	0.741	1.319	0.340	0.746	1.113	1.089	1.113	0.917
Mn	-	-	-	-	0.031	0.081	0.095	0.079	0.049
Σύν. (C)	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000
Ca	1.847	1.740	1.852	1.905	1.780	1.841	1.816	1.780	1.872
Na B	0.199	0.260	0.081	0.095	0.220	0.159	0.184	0.220	0.128
Σύν. B	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000
Na A	0.474	0.346	0.678	0.563	0.343	0.208	0.269	0.325	0.237
K	0.108	0.128	0.153	0.169	0.124	0.130	0.141	0.132	0.082
Σύν. (A)	0.582	0.474	0.831	0.732	0.467	0.338	0.410	0.458	0.318

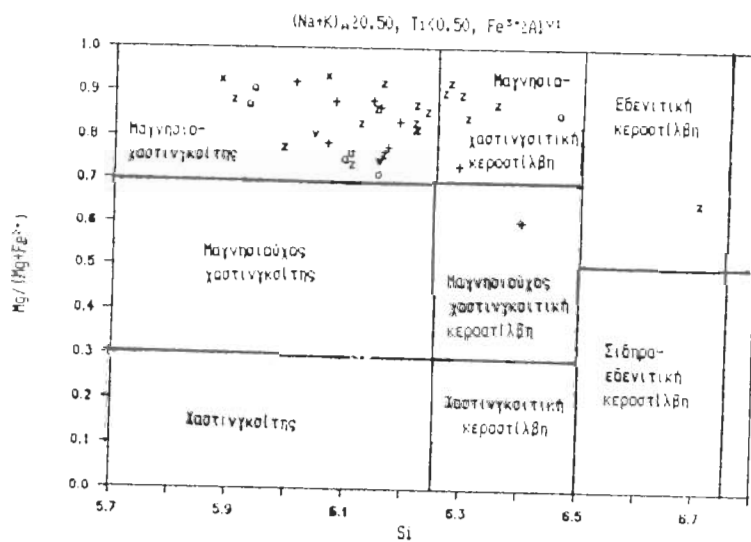
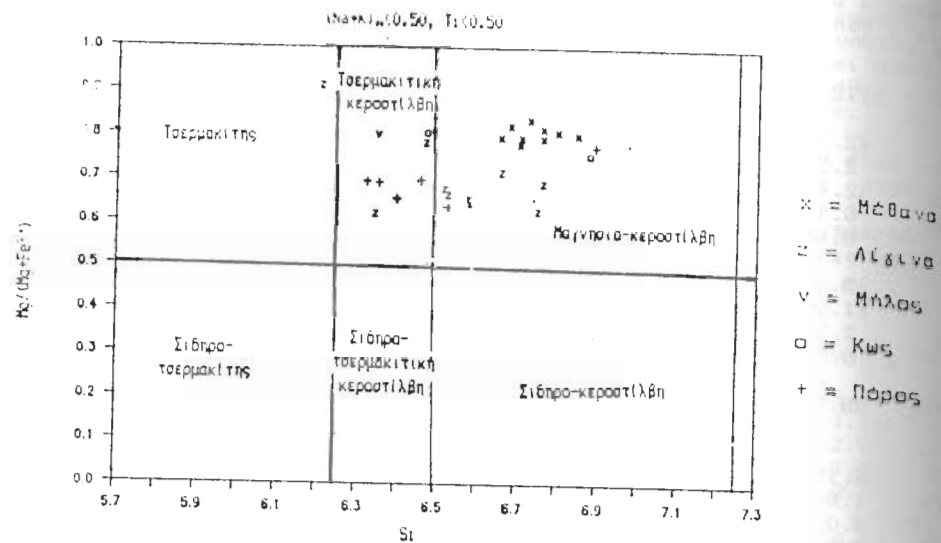
Πίνακας 2. Χαρακτηριστικές αναλύσεις ανδεσιτών από την Σαντορίνη, την Αίγινα και τον Πόρο που παρουσιάζουν παρόμοια χημική σύσταση.

Table 2. Characteristic analyses of andesites from Santorini, Aegina and Poros that present similar chemical composition.

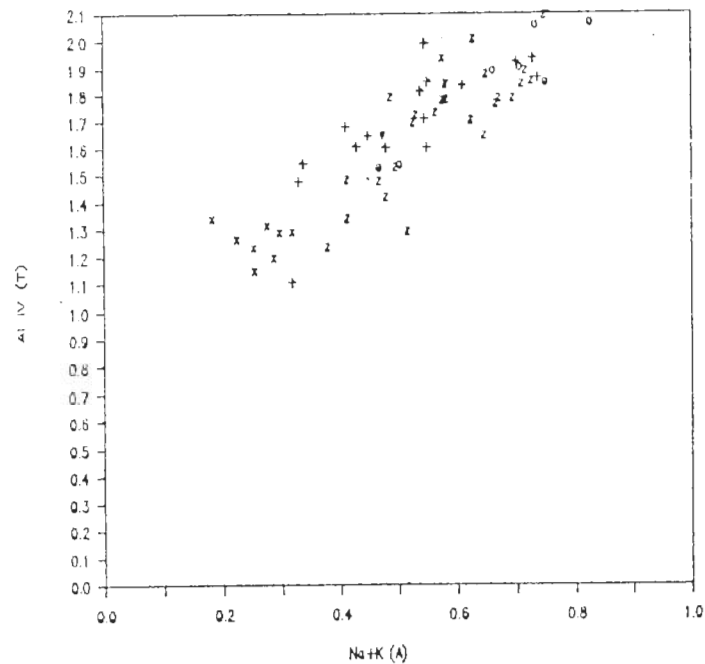
	SA13	AG2	PO3
SiO ₂	63.3	62.3	61.7
TiO ₂	0.68	0.55	0.45
Al ₂ O ₃	18.2	17.1	17.7
Fe ₂ O ₃	2.2	2.6	2.5
FeO	2.7	1.7	1.9
MnO	0.10	0.09	0.11
MgO	1.4	2.7	3.0
CaO	5.3	6.1	6.6
Na ₂ O	4.4	3.8	3.5
K ₂ O	2.87	2.22	2.09
P ₂ O ₅	0.17	0.16	0.13
LOI	0.22	0.74	0.78

Σύνολο 100.5 100.2 100.5

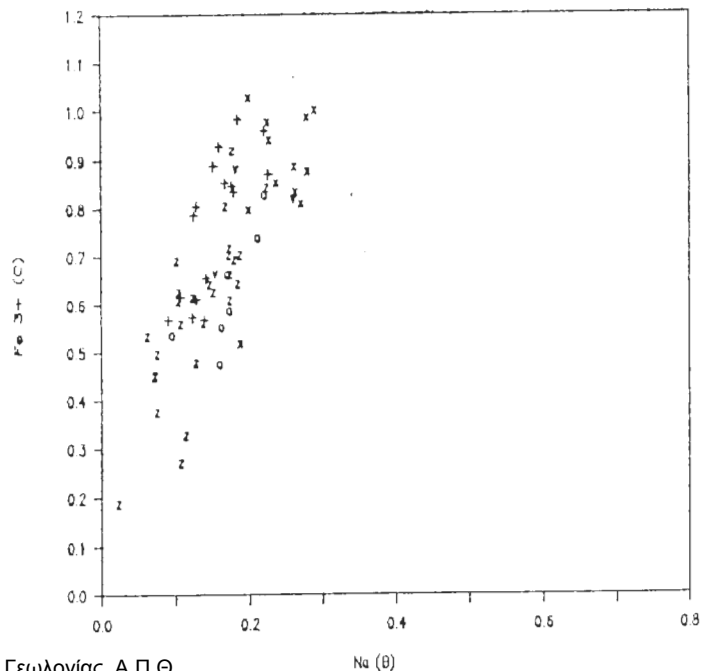
LOI = Απώλεια πυρώσεως



Εικόνα 1. Ταξινόμηση των αμφιβόλων πετρωμάτων του ηφαιστειακού τόξου του Αιγαίου κατά Leake (1978). Τα σύμβολα είναι τα ίδια σε όλες τις Εικόνες.
 Figure 1. Nomenclature of amphiboles from rocks of the Aegean volcanic arc after Leake (1978). The symbols are the same in all figures.



Εικόνα 2. Εδενίτικη υποκατάσταση των αμφιβόλων πετρωμάτων του ηφαιστειακού τόξου του Αιγαίου.
 Figure 2. Edenitic substitution of amphiboles in study.



Εικόνα 3. Ριεβεκίτικη υποκατάσταση αμφιβόλων από τα μελετηθέντα πετρώματα.
 Figure 3. Riebeckite substitution of amphiboles in study.

της ριεβεκτιτικής υποκατάστασης στους αμφιβόλους μίας σειράς πετρωμάτων, όπως παρατηρείται στους αμφιβόλους του τόξου (Εικ. 2, 3), προϋποθέτει ότι κατά τη διάρκεια της διαφοροποίησης του μάγματος τα κλάσματα ήταν υπέρκορα σε SiO_2 .

Για τον έλεγχο της ύπαρξης και άλλων σημαντικών υποκαταστάσεων προβάλλονται στην Εικ. 4 το άθροισμα $Al_{tot} + Al(VI) + Fe^{3+} + 2Ti$ προς το $Al(IV)$ και στην Εικ. 5 το άθροισμα $Al_{tot} + Al(VI) + Ti$ προς το $Al(IV)$ (Robinson et al. 1971, Brown et al. 1982). Όπως φαίνεται από τη σύσταση των αμφιβόλων των πετρωμάτων του τόξου (Πιν. 1) όταν το Si αυξάνεται το Al μειώνεται και ταυτόχρονα αυξάνονται τα Na , K και Ti . Αυτές οι μεταβολές μπορούν να αποδοθούν σε συνδυασμό των παρακάτω τεσσάρων υποκαταστάσεων (Brown et al. 1982):

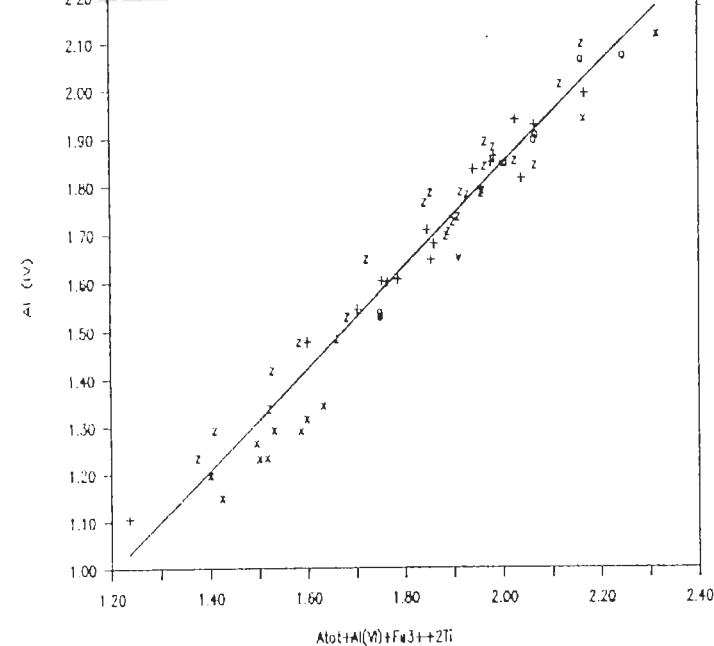
- (1). $Na, K(A) + Al(T) \rightleftharpoons Al(A) + Si(T)$ (εδενιτική),
- (2). $Al, Fe^{3+}(C) + Al(T) \rightleftharpoons Mg, Fe(C) + Si(T)$ (Al-τερμακτιτική),
- (3). $Ti(C) + 2Al(T) \rightleftharpoons Mg, Fe(C) + 2Si(T)$ (Ti-τερμακτιτική),
- (4). $Ti(C) + Al(T) \rightleftharpoons Al, Fe^{3+}(C) + Si(T)$ (συνδυασμός των υποκαταστάσεων 2 και 3).

Όπως προκύπτει από την Εικ. 4 τα σημεία των προβολών των αμφιβόλων που αναλύθηκαν παρουσιάζουν μεγάλο συντελεστή συσχέτισης (0.954). Η ευθεία παλινδρόμησης (regression line) δίνεται από την εξίσωση $\psi = 1.061x - 0.277$ άρα η κλίση της είναι πολύ κοντά στη μονάδα (1.061). Αυτό σημαίνει ότι στους αμφιβόλους αυτούς υπάρχει συνδυασμός των υποκαταστάσεων 1, 2 και 3 (Robinson et al. 1971).

Στην Εικ. 5 όπου συνδυάζονται οι υποκαταστάσεις 1, 2 και 4 τα σημεία προβολών των αμφιβόλων που αναλύθηκαν παρουσιάζουν επίσης μεγάλο συντελεστή συσχέτισης (0.819) και η κλίση της ευθείας είναι επίσης κοντά στη μονάδα (0.882) αλλά παράλληλα μετατοπισμένη δείχνοντας μία περίσσεια $Al(T)$. Αυτό σε συνδυασμό με την πολύ καλή συσχέτιση του Al_{tot} (ολικό Al) προς το $Al(T)$ (Εικ. 6) δείχνει ότι η συμβολή της υποκατάστασης 2 (Al-τερμακτιτική είναι πολύ μικρή (Brown et al. 1982). Σημαντικότερη είναι η συμβολή της Ti-τερμακτιτικής υποκατάστασης ή οποία όπως και η εδενιτική εξαρτάται άμεσα από τη θερμοκρασία και τη σύσταση του μάγματος και επί πλέον μειώνεται με την αύξηση της πιετικότητας του οξυγόνου (fO_2) (Helz 1973).

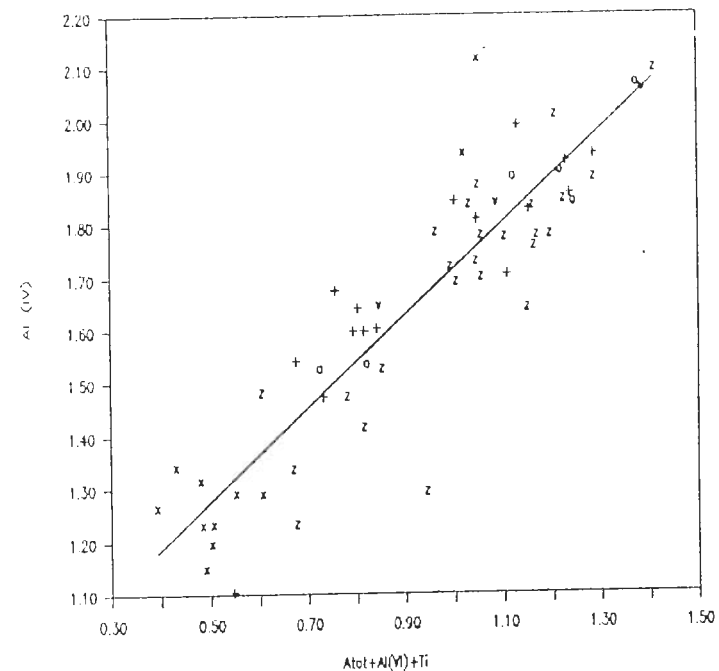
Συμπερασματικά η ποικιλία των συστάσεων των αμφιβόλων των ηφαιστειακών πετρωμάτων του τόξου του Αιγαίου είναι αποτέλεσμα διαφόρων τύπων υποκαταστάσεων οι σημαντικότερες των οποίων είναι η εδενιτική, η ριεβεκτιτική και η Ti-τερμακτιτική οι οποίες εξαρτώνται κυρίως από τη θερμοκρασία και την σύσταση του μάγματος αλλά και από τη σύσταση της ρευστής φάσης (ριεβεκτιτική) και της πιετικότητας του οξυγόνου (Ti-τερμακτιτική).

Όπως έχει ήδη αναφερθεί οι μεταβολές στη σύσταση των αμφιβόλων έχουν χρησιμοποιηθεί στη μελέτη των P, T συνθηκών κρυστάλλωσης ασβεσταλκαλικών πλουτωνίων πετρωμάτων. Από το διάγραμμα της Εικ. 6 προκύπτει ότι το Al_{tot} παρουσιάζει μία εκπληκτική θετική συσχέτιση με το $Al(IV)$ (συντελεστής συσχέτισης = 0.960) παρόλο που η ποικιλία συστάσεων των αμφιβόλων των πετρωμάτων του ηφαιστειακού τόξου του Αιγαίου είναι σημαντικά ευρύτερη από αυτή των αμφιβόλων των πλουτωνιτών των Hammarstrom and Zen (1986). Θεωρείται επομένως δυνατή η χρήση της σχέσεως του Al_{tot} προς το $Al(IV)$ των αμφιβόλων για τον υπολογισμό των P, T συνθηκών κρυστάλλωσης των ασβεσταλκαλικών ηφαιστειακών



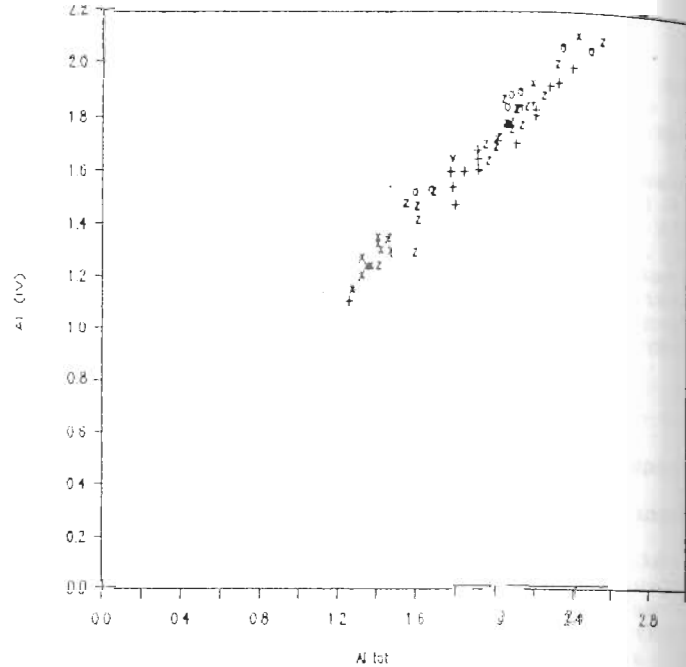
Εικόνα 4. Προβολή του $Al_{tot} + Al(VI) + Fe^{3+} + 2Ti$ προς $Al(IV)$ αμφιβόλων από τα μελετηθέντα πετρώματα.

Figure 4. Plot of amphiboles in study in the $Al_{tot} + Al(VI) + Fe^{3+} + 2Ti$ versus $Al(IV)$ diagram.

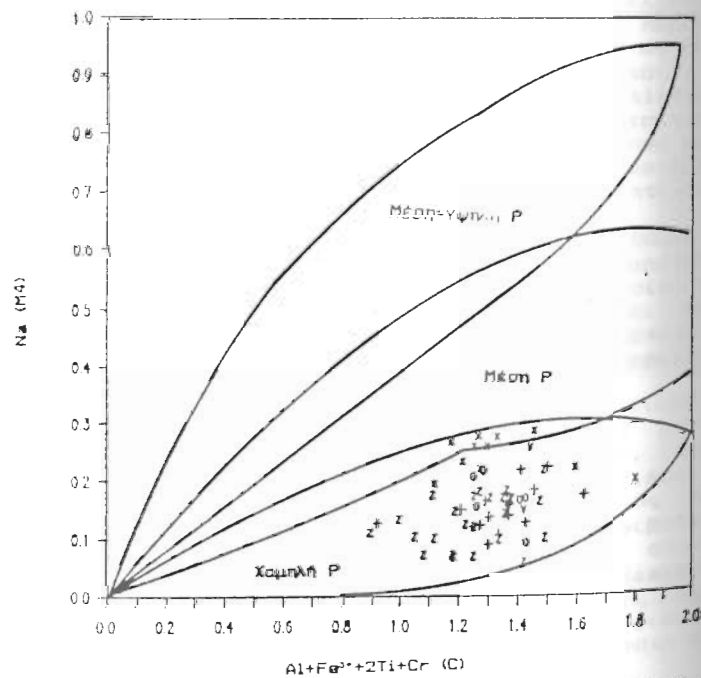


Εικόνα 5. Προβολή του $Al_{tot} + Al(VI) + Ti$ προς $Al(IV)$ αμφιβόλων από τα μελετηθέντα πετρώματα.

Figure 5. Plot of amphiboles in study in the $Al_{tot} + Al(VI) + Ti$ versus $Al(IV)$ diagram.



Εικόνα 6. Προβολή του Al(IV) προς Al (IV) αμφιβολών από τα μελετηθέντα πετρώματα.
 Figure 6. Plot of amphiboles in study in the Al(IV) vs. Al (IV) diagram.



Εικόνα 7. Προβολή των μελετηθέντων αμφιβολών στο διάγραμμα των Laird et al. (1984).
 Figure 7. Plot of amphiboles in study in Laird's et al. (1984) diagram.

πετρωμάτων του τόξου του Αιγαίου. Σε μια πρώτη προσέγγιση οι θερμοκρασίες που προκύπτουν από τη χρήση των διαγραμμάτων των Hammarstrom and Zen (1986) είναι ανάλογες αυτών που προσδιορίστηκαν από τους Μητρόπουλο και Μαγκανά (1988) ενώ οι πιέσεις είναι στα πλαίσια αυτών που προκύπτουν από την εφαρμογή του διαγράμματος των Laird et al (1984) που δίνεται στην Εικ. 7. Τέλος, η πολύ μικρή συμμετοχή των αμφιβολών στα πετρώματα της Σαντορίνης, σε αντίθεση με την άφθονη παρουσία τους στα πετρώματα των άλλων ηφαιστειακών κέντρων, μπορεί να οφείλεται στη μικρότερη περιεκτικότητα σε H₂O του ματρικού μαγματος των πετρωμάτων της Σαντορίνης σε σχέση με αυτά των πετρωμάτων που βρίσκονται στα ακραία τμήματα του τόξου (Μητρόπουλος και Μαγκανάς 1988), αν ληφθεί υπ' όψη ότι το πεδίο σταθερότητας των αμφιβολών είναι συνάρτηση της fH₂O στο μάγμα (Heiz 1979, Wyllie 1979).

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Οι συγγραφείς ευχαριστούν τον Prof. J. Tarney του Γεωλογικού τμήματος του Πανεπιστημίου του Leicester για την παραχώρηση της ευχέρειας χρήσης των αναλυτικών εργαστηρίων του τμήματος του, και τον R. N. Wilson για την βοήθεια του στις μικροαναλύσεις των ορυκτών.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Biju-Duval, B., Letouzey, J., Montagert, L., Courriat, P., Mugniat, J.F. and Sancho, J. 1974: Geology of the Mediterranean Sea basins. In: C.A. Burk and C.L. Drake (eds), The Geology of Continental Margins, Springer-Verlag, Berlin, 697-721.
 Brown, P.E., Tocher, F.E., and Chambers R.D. 1982: Amphiboles in the Lilloise intrusion East Greenland. Min. Mag., 45, 47-84.
 Engel, A.E.J. and Engel, C.G. 1962: Hornblendes formed during progressive metamorphism of amphibolites, NW Adirondack Mountains, NY. Geol. Soc. Amer. Bull., 73, 1499-1515.
 Ernst, W.O. 1972: Ca-amphibole paragenesis in the Shirataki District, central Shikoku, Japan. Geol. Soc. Amer. Mem., 135, 73-94.
 Ferrara, G., Fytikas, M., Giuliani, G. and Marinelli, G. 1980: Age of the formation of the Aegean active volcanic arc. In: C. Doumas (ed) Tera and the Aegean World, Athens, 2, 37-41.
 Fytikas, M., Giuliani, G., Innocenti, F., Marinelli, G. and Mazzuoli, R. 1976: Geochronological data on recent magmatism in the Aegean Sea. Tectonophysics, 31, 129-134.
 Grapes, R., Hashimoto, S. and Miyashita, S. 1977: Amphiboles of a metagabbro-amphibolite sequence, Hidaka metamorphic belt, Hokkaido. Journ. Petrol., 18, 285-318.
 Hammarstrom, J.M. and Zen E-an 1986: Aluminum in hornblende: An empirical geobarometer. Amer. Miner., 71, 1297-1313.
 Hawthorne, F.C. 1963: The crystal chemistry of the amphiboles. Can. Miner., 21, 173-489.
 Heiz, R.T. 1973: Phase relations of basalts in their melting range at P_{H₂O} = 5 kb as a function of Oxygen fugacity. Part I. Mafic phases. J. Petrol., 14, 249-302.

- Helz, R.T. 1974: Phase relations of basalts in their melting ranges at $P_{H_2O} = 5$ kb. Part II. Melt compositions. *J. Petrol.*, 17, 139-193.
- Innocenti, F., Manetti, P., Peccerillo, A. and Poli, G. 1981: Inner arc volcanism in NW Aegean Arc: geochemical and geochronological data. *N. Jb. Miner. Mon.*, H4, 145-158.
- Keller, J. 1982: Mediterranean island arcs. In: R.S. Thorpe (ed) *Orogenic Andesites*, Wiley, London, 307-325.
- Kontopoulou, D.P., Papadopoulos, G.A. and Pavlides, S.B. 1985: A study of the Hellenic Arc. *Bolletino di Geofisica Teorica ed Applicata*, 27, 197-207.
- Laird, J. and Albee, A.L. 1981: Pressure, temperature, and time indicators in mafic schists: their application to reconstructing the polymetamorphic history of Vermont. *Amer. Jour. Sci.*, 281, 127-175.
- Laird, J., Lanphere, M. and Albee, A. 1984: Distribution of Ordovician and Devonian metamorphism in mafic and pelitic schists from northern Vermont. *Amer. Jour. Sci.*, 284, 386-413.
- Leake, B.E. 1978: Compiler for subcommittee on Amphiboles, I.M.A., Nomenclature of amphiboles. *Amer. Miner.*, 63, 1023-1052.
- Makris, J. 1977: Geophysical investigations of the Hellenides. *Hamburger Geophysikalische Einzelschriften*, 34, 124 pp.
- Makropoulos, K.C. and Burton, P.W. 1984: Greek tectonics and seismicity. *Tectonophysics*, 106, 275-304.
- McKenzie, D. 1972: Active tectonics of the Mediterranean region. *Geophys. J. R. Astr. Soc.*, 30, 109-185.
- Μητρόπουλος, Π. 1986: Ανομοιογένεια του ηφαιστειακού μάγματος των πετρωμάτων των διαφόρων ηφαιστειακών κέντρων του τόξου του Αιγαίου: γεωχημικά και ορυκτοχημικά δεδομένα. Δελτ. Ελλ. Γεωλ. Ετ. (υπό εκτύπ.).
- Μητρόπουλος, Π. και Μαγκανάς Α. 1988: Μεταβολές της πυκνότητας του ρευστού (FO₂) κατά μήκος του ηφαιστειακού τόξου του Αιγαίου όπως προκύπτουν από την ορυκτοχημεία Fe-Ti-ούχων ορυκτών οξειδίων. *Ann. Geol. Pays Hell.*, (υπό εκτύπ.).
- Mitropoulos, P., Tarney, J., Saunders, A.D. and Marsh, N.G. 1987: Petrogenesis of Cenozoic volcanic rocks from the Aegean island arc. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 32, 177-193.
- Nicholls, A. I. 1971: Petrology of Santorini volcano, Cyclades, Greece. *J. Petrol.*, 12, 67-119.
- Offler, R. 1984: Subcalic, Fe-rich amphiboles in metadolerites, Glenrock Station, NSW, Australia. *Min. Mag.*, 48, 47-52.
- Παπαδόπουλος, Γ.Α. 1982: Συμβολή στη μελέτη της ενεργού τεκτονικής βάθους του ευρύτερου χώρου του Αιγαίου. Διδάκτ. διατρ., Παν. Θεσσ., σσ. 176.
- Pichler, H. and Kubmaul S. 1972: The calc-alkaline volcanic rocks of the Santorini group (Aegean Sea, Greece). *N. Jb. Miner. Abh.*, 116, 268-307.
- Puchelt, H., Murad, E. and Hubberten, H.W. 1977: Geochemical and petrological studies of lavas, pyroclastic and associated xenoliths from the Christiana Islands, Aegean Sea. *N. Jb. Miner. Abh.*, 131, 140-155.
- Robinson-Koss, M. and Jaffe H.W. 1971: Composition of anthophyllite-gedrite series, comparisons of gedrite-hornblende and the anthophyllite-gedrite solvus. *Am. Miner.*, 56, 1005-1041.
- Stephenson, D. and Upton B.G.J. 1982: Ferromagnesian silicates in a differentiated alkaline complex: Kugnat Fjied, South Greenland. *Min. Mag.*, 46, 283-300.
- Wyllie, P.J. 1979: Magmas and volatile components. *Amer. Miner.*, 64, 459-500.