

Επιστημονική Επετηρίδα, Τμήμα Γεωλογίας, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης Τιμητική έκδοση στη μνήμη του ομότιμου καθηγητή Κ. Σολδάτου	Ειδικός τόμος 101	111-118	Θεσσαλονίκη 2012
--	----------------------	---------	---------------------

## ΡΑΔΙΟΧΡΟΝΟΛΟΓΗΣΗ K/Ar ΚΑΙ ΘΕΡΜΟΧΡΟΝΟΜΕΤΡΙΑ ΤΟΥ ΝΟΤΙΟΥ ΤΜΗΜΑΤΟΣ ΤΟΥ ΠΛΟΥΤΩΝΙΚΟΥ ΣΥΜΠΛΕΓΜΑΤΟΣ ΤΗΣ ΣΙΘΩΝΙΑΣ (ΧΑΛΚΙΔΙΚΗ, Β. ΕΛΛΑΔΑ)

Ρωμανίδης Γ.<sup>1</sup>, Χριστοφίδης Γ.<sup>1</sup>, Κορωναίος Α.<sup>1</sup>, Pecskey Z.<sup>2</sup> και Σολδάτος Τ.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Τομέας Ορυκτολογίας-Πετρολογίας-Κοιτασματολογίας, Τμήμα Γεωλογίας, Α.Π.Θ. 541 24 Θεσσαλονίκη,

<sup>2</sup> Institute of Nuclear Research of Hungarian Academy of sciences (ATOMIKI), P.O. Box 51, Bemter 18/c, H-4026 Debrecen, Hungary, Pecskey@namafia.atomiki.hu

### ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Μελετάται το νότιο τμήμα του πλουτωνικού συμπλέγματος της Σιθωνίας (SPC) Χαλκιδικής (Β. Ελλάδα). Επεξεργάστηκαν 27 δείγματα και διαχωρίστηκαν τα ορυκτά βιοτίτης, κερροσίλβη και Κ-ούχος άστριος, τα οποία αναλύθηκαν με τη μέθοδο K/Ar. Τα δείγματα αυτά πάρθηκαν από τους εξής πετρογραφικούς τύπους: α) Βιοιτικό γρανοδιορίτη (BGD), β) Κερροσιλβικό-βιοιτικό γρανοδιορίτη (HBGD) και γ) Κερροσιλβικό-βιοιτικό τοναλίτη (HBTON). Τα αποτελέσματα των ραδιοχρονολογήσεων συγκρίθηκαν με προϋπάρχουσες μετρήσεις και εξήχθησαν τα εξής συμπεράσματα για τη θερμική του εξέλιξη: 1) ο μέσος ρυθμός ψύξης του SPC υπολογίζεται σε  $\Delta^{\circ}\text{C}/\Delta t=40,1^{\circ}\text{C}/\text{Ma}$  και 2) ο SPC κατά τη διάρκεια ψύξης του δεν αποτέλεσε ένα ενιαίο κλειστό σύστημα και υπέστη πιθανότατα τρία διαδοχικά θερμικά γεγονότα: α) το πρώτο μετά την τοποθέτηση του HBGD (~46 Ma) οφειλόμενο στην τοποθέτηση του λευκογρανίτη LG στα βόρεια, β) το δεύτερο οφείλεται στην τοποθέτηση του BGD και συνέβη στα 42 Ma και γ) το τρίτο θερμικό γεγονός που φαίνεται να είναι δευτερεύουσας σημασίας, και δεν μπορεί να είναι μικρότερο σε ηλικία από τη μικρότερη υπολογισμένη ηλικία των 36 Ma.

### ABSTRACT

## K/Ar DATING AND THERMOCHRONOLOGY OF THE SOUTH SITHONIA PLUTONIC COMPLEX (CHALKIDIKI, GREECE).

Romanidis G.<sup>1</sup>, Christofides G.<sup>1</sup>, Koroneos A.<sup>1</sup>, Pecskey Z.<sup>2</sup> and Soldatos T.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Department of Mineralogy-Petrology-Economic Geology, School of Geology, Aristotle University of Thessaloniki, 541 24, Thessaloniki, Greece.

<sup>2</sup> Institute of Nuclear Research of Hungarian Academy of sciences (ATOMIKI), P.O.Box 51, Bem ter 18/c, H-4026 Debrecen, Hungary, Pecskey@namafia.atomiki.hu

The southern part of the Sithonia plutonic complex (SPC) in Chalkidiki (N. Greece) is investigated in the light of new K/Ar data. 27 samples, taken from the hornblende-biotite granodiorite (HBGD), the hornblende-biotite tonalite (HBTON) and the biotite granodiorite (BGD) were used. Their mineral constituents (biotite, hornblende and K-feldspar) were dated with the K/Ar method. The radiometric results of the present study were compared with existing data and the following conclusions were inferred concerning the thermal history of this part of SPC: 1) the mean cooling rate of SPC is estimated to be  $\Delta^{\circ}\text{C}/\Delta t=40.1^{\circ}\text{C}/\text{Ma}$  and 2) SPC, during its cooling, was not a closed system and suffered probably three successive thermal events: a) the first after the emplacement of the HBGD (~46 Ma) caused by the intrusion of the leucogranite LG to the north, b) the second caused by the intrusion of the BGD at 42 Ma and c) the third, of secondary importance, which cannot be younger than the younger age obtained (36 Ma).

### 1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το πλουτωνικό σύμπλεγμα της Σιθωνίας (SPC) Χαλκιδικής (Β. Ελλάδα) υπήρξε αντικείμενο μελέτης, κυρίως πετρολογικής και γεωχημικής, πολλών ερευνητών (Christofides et al. 2007 και εκεί αναφορές). Παρόλο που οι διάφορες μελέτες περιείχαν και την ηλικία του SPC δεν αναφέρονται στη θερμοχρονομετρία του. Η τελευταία μελετήθηκε στα πλαίσια δύο διατριβών ειδικεύσεως (Πιπερά, 2008, Ρωμανίδης 2009). Αντικείμενός στόχος της συγκεκριμένης μελέτης, που αποτελεί τμήμα της διατριβής ειδικεύσεως του πρώτου συγγραφέα, είναι η ραδιοχρονολόγηση, με τη μέθοδο K/Ar των ορυκτών βιοτίτη, κερροσίλβης και Κ-ούχου αστρι-

ου, των πετρωμάτων του νοτίου τμήματος του πλουτωνικού συμπλέγματος της Σιθωνίας, η σύγκριση των αποτελεσμάτων με τα αποτελέσματα προηγούμενων μετρήσεων (Rb-Sr: Christofides et al. 1990, Ar/Ar: De Wet et al. 1989 και U/Pb: Alagna et al. 2008, Πιπερά 2008) και η εξαγωγή συμπερασμάτων για τη θερμική εξέλιξη του πλουτωνικού συμπλέγματος και ιδιαίτερα του νοτίου τμήματός του.

Η εργασία αφιερώνεται στον αείμνηστο καθηγητή Κωνσταντίνο Σολδάτο, Διευθυντή επί σειρά ετών του Εργαστηρίου Ορυκτολογίας-Πετρολογίας του Τμήματος Γεωλογίας του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσ-

σαλονίκης, ο οποίος, σε συνεργασία με τον αείμνηστο Ηλία Σαπουντζή, υπήρξε ένας από τους πρώτους ερευνητές που μελέτησαν τα πετρώματα του πλουτωνίου της Σιθωνίας.

## 2 ΓΕΩΛΟΓΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

Το SPC συνιστά τμήμα του Τριτογενούς μαγματισμού που χαρακτηρίζει τη Β. Ελλάδα (Christofides et al. 1990, Christofides et al. 1998, Pe-Piper & Piper 2002, Perugini et al. 2003, Christofides et al. 2007). Συνολικά το πλουτωνικό σύμπλεγμα της Σιθωνίας καταλαμβάνει έκταση περίπου 350 Km<sup>2</sup> και η μελετηθείσα περιοχή περίπου τη μισή έκταση, καλύπτοντας τη μεγαλύτερη επιφάνεια της ομώνυμης χερσονήσου (Σχ. 1). Διεισδύει σε πετρώματα της Περιροδοπικής ζώνης τα οποία εμφανίζονται στο μεγαλύτερο μέρος της χερσονήσου και σε μικρότερη έκταση της Σερβομακεδονικής μάζας, που απαντώνται στο ανατολικό της άκρο.

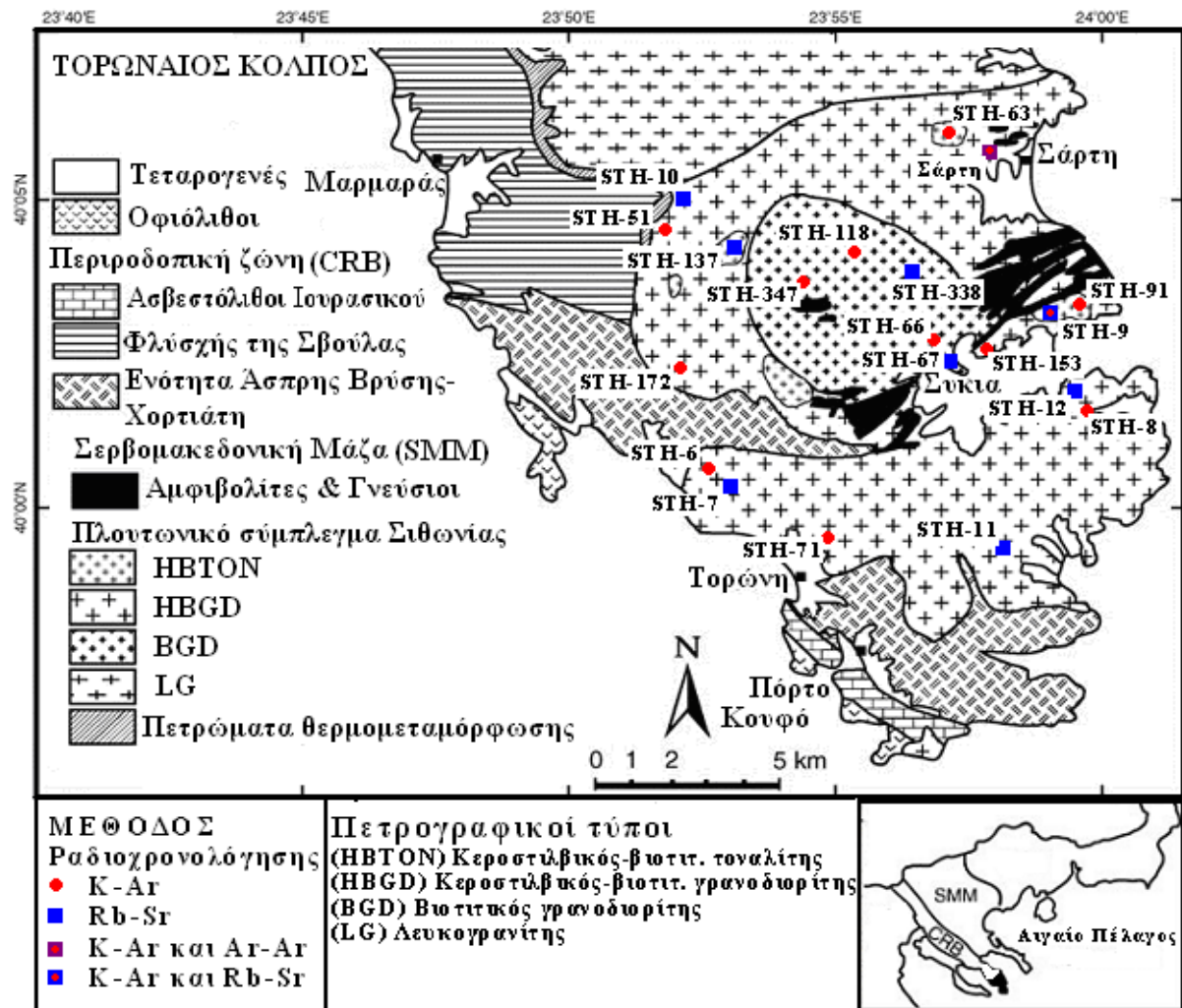
Το νότιο τμήμα του SPC αποτελείται κυρίως από βιοιπικό-κεροσιλιβικό γρανοδιωρίτη (HBGD) στον οποίο διεισδύει ένας πιο λεπτόκοκκος βιοιπικός γρανοδιωρίτης (BGD). Στον HBGD απαντώνται τοναλιτικής συστάσεως πετρώματα (HBTON) υπό μορφή μικρών εμφανίσεων. Στους παραπάνω τύπους βρίσκονται μι-

κρόκκα μαγματικά εγκλείσματα (MME). Το βόρειο τμήμα καλύπτεται από διμαρμαρυγιακό γρανίτη (TMG) και το κεντρικό από λευκογρανίτη (LG) ο οποίος κατά περιοχές εμφανίζεται πορφυροειδής (PLG). Ο LG διεισδύει στον HBGD. Απλιτικές και πηγματικές φλέβες διεισδύουν τόσο στο SPC όσο και στα περιβάλλοντα πετρώματα.

Η διεισδυση του SPC έχει επηρεαστεί από μια νεώτερη τεκτονική δραστηριότητα που έλαβε χώρα πιθανότατα κατά το Α. Ηώκαινο/Ολιγόκαινο (Sakellariou, 1989). Το σύμπλεγμα χαρακτηρίζεται κατά θέσεις από σχιστότητα η οποία είναι πιο έντονη στις επαφές του με τα περιβάλλοντα πετρώματα και η οποία αποδίδεται τόσο σε τεκτονικά όσο και σε μαγματικά αίτια (De Wet et al., 1989; D' Amico et al., 1990, Tranos et al., 1999). Στις επαφές του με πετρώματα της Περιροδοπικής ζώνης παρατηρούνται φαινόμενα θερμομεταμόρφωσης.

Ραδιοχρονολογήσεις με Rb/Sr (De Wet et al., 1989; Christofides et al., 1990) και με U/Pb σε ζιρκόνιο (Alagna et al. 2008) δίνουν ηλικία περίπου 50 Ma (Ηώκαινο) για το SPC.

Με βάση διακριτικά διαγράμματα οι Christofides et al. (2001) πρότειναν ένα πριν την κατάδυση γεωτεκτονικό περιβάλλον τοποθέτησης του πλουτωνίου.



Σχίμα 1. Τροποποιημένος πετρογραφικός χάρτης της Σιθωνίας κατά Christofides et al. (2007) στον οποίο αποτυπώνονται όλα τα σημεία δειγματοληψίας.

### 3 ΟΡΥΚΤΟΛΟΓΙΑ - ΠΕΤΡΟΓΡΑΦΙΑ

Το SPC μελετήθηκε λεπτομερώς από τους Soldatos & Sapountzis (1975), Σαπουντζής et al. (1976), Σολδάτος et al. (1976), Christofides et al. (1990), De Wet (1989), D'Amico et al. (1990), Christofides et al. (1998), Perugini et al. (2003) και Christofides et al. (2007).

Ο HBGD είναι μεσόκοκκο πέτρωμα με κύρια ορυκτά συστατικά βιοτίτη, κεροσίλβη, Κ-άστριο, ζωνώδες πλαγιόκλαστο και χαλαζία. Ο BGD καταλαμβάνει τον πυρήνα του HBGD διεισδύοντας σ' αυτόν. Είναι μεσόκοκκος συνήθως, πιο λεπτομερής και πιο ανοικτόχρωμος από τον HBGD. Έχει την ίδια ορυκτολογική σύσταση με τον HBGD χωρίς την παρουσία της κεροσίλβης. Ο HBTON απαντάται ως νησίδες στον HBGD στον οποίο σταδιακά μεταβαίνει. Είναι ελαφρώς πιο σκουρόχρωμος από τον HBGD με ορυκτολογία αντίστοιχη με αυτόν και συνήθως υπερτερεί ο βιοτίτης της κεροσίλβης. Οι απλίτες και πηγματίτες αποτελούνται κυρίως από χαλαζία, Κ-άστριους, πλαγιόκλαστα και μοσχοβίτη και, δευτερευόντως, από βιοτίτη και γρανάτη. Τα MME εμφανίζονται αποστρογγυλεμένα ή ελλειψοειδή, σκουρόχρωμα και μικροκοκκώδη και συνήθως έχουν την ίδια ορυκτολογική σύσταση με το πέτρωμα στο οποίο εγκλείονται.

Ο βιοτίτης είναι το πιο διαδεδομένο φεμικό συστατικό του νοτίου τμήματος του πλουτωνικού συμπλέγματος της Σιθωνίας. Συναντάται με κεροσίλβη στον HBTON, στον HBGD και στα MME. Είναι χρώματος καστανοπράσινου ως ελαιοπράσινου και χαρακτηρίζεται από υψηλότερο λόγο Mg/Fe σε σχέση με τον βιοτίτη των LG και TMG (Christofides et al. 1998). Η κεροσίλβη αποτελεί το δεύτερο σε συχνότητα φεμικό ορυκτό στους HBGD, HBTON και MME. Ο λόγος  $Mg/(Mg+Fe^{2+})$  κυμαίνεται από 0,52 μέχρι 0,63. Συναντάται σε υπιδιόμορφους έως αλλοτριόμορφους επιμήκεις κρυστάλλους μαζί με βιοτίτη. Τα πλαγιόκλαστα υπάρχουν σ' όλους τους πετρογραφικούς τύπους και παρουσιάζουν κανονική, ανάστροφη ή επανάστροφη ζώνωση. Το πλαγιόκλαστο έχει σύσταση  $An_{51}-An_{12}$  στα MME,  $An_{46}-An_{14}$  στον HBTON και  $An_{30}-An_{22}$  στον HBGD. Ο Κ-άστριος, μερικώς περθιτωμένος, εμφανίζεται σε υπιδιόμορφους έως αλλοτριόμορφους κρυστάλλους με σύσταση  $Or_{84}-Or_{96}$ . Περισσότερες πληροφορίες για τη χημική σύσταση των ορυκτών συστατικών του SPC αναφέρονται στους Christofides et al. (1998).

### 4 ΓΕΩΧΗΜΕΙΑ, ΓΕΝΕΣΗ ΚΑΙ ΕΞΕΛΙΞΗ

Τα πετρώματα του SPC ανήκουν στην ασβεσταλκαλική σειρά με λόγο  $Na_2/K_2O$  έως και 3,2 και παρουσιάζουν μεταργιλικό χαρακτήρα σύμφωνα με το δείκτη  $ASI=Al_2O_3/(CaO+Na_2O+K_2O)$  που κυμαίνεται από 0,90 έως 1,16 για τους HBGD, BGD και HBTON, σύμφωνα με τους Christofides et al. (2007). Σε γενικές γραμμές τα κύρια στοιχεία παρουσιάζουν τυπικές τάσεις μεταβολής για ασβεσταλκαλικά πετρώματα. Χαρακτηριστικό γνώρισμα των πετρωμάτων του SPC είναι ότι διαχωρίζονται σε δύο ομάδες, μια «όξινη» αποτελούμενη από τους TMG και LG (βόρειο τμήμα) και μια «βασική» που περιλαμβάνει τους γρανοδιόριτες (HBGD, BGD), τον HBTON και τα MME. Οι δύο αυτές

ομάδες διαχωρίζονται σαφώς σε πολλά διαγράμματα μεταβολής δείχνοντας έτσι ότι αποκλείεται μια απ' ευθείας γένεση της μιας από την άλλη.

Σύμφωνα με τους Christofides et al. (2007) δύο είναι τα μάγμα που είχαν κυρίαρχο λόγο στη γένεση του πλουτωνίτη. Ένα βασικό μάγμα, μανδουακής προέλευσης με λαμπροφυρική σύσταση, υποεδρευόμενο ενός κατώτερου φλοιού αμφιβολιτικής - βασαλτικής σύστασης και ένα όξινο φλοιϊκής προέλευσης. Το βασικό μάγμα προκάλεσε μερική τήξη του φλοιού, δημιουργώντας το όξινο μάγμα σύστασης TMG. Το κατώτερο τμήμα του TMG μάγματος, στην επαφή του με το βασικότερο μάγμα, τροποποιήθηκε με διαδικασίες μεταφοράς και διάχυσης δημιουργώντας ένα όξινο μάγμα που έδωσε τον LG. Το μάγμα σύστασης αντίστοιχης του TMG μετανάστευσε πριν περίπου 50 Ma στα 15 Km, όπου και στερεοποιήθηκε και έδωσε το βορειότερο τμήμα του πλουτωνικού συμπλέγματος της Σιθωνίας.

Η βασική ομάδα του πλουτωνικού συμπλέγματος δημιουργήθηκε με τη διαδικασία κλασματικής κρυστάλλωσης και μίξης (MFC) μεταξύ του βασικού μάγματος και του LG σε δύο στάδια. Κατά το πρώτο στάδιο η κλασματική κρυστάλλωση κυριάρχησε δημιουργώντας στην αρχή MME μεγαλύτερα σε μέγεθος και λιγότερο διαφοροποιημένα (μονζονιτικά MME) και στη συνέχεια μικρότερα και περισσότερο διαφοροποιημένα (τοναλικά MME). Κατά το δεύτερο στάδιο αυξήθηκε ο ρόλος της μίξης σε σχέση με την κλασματική κρυστάλλωση δίνοντας γένεση σε πετρώματα υβριδικά με συστατικό εύρος HBTON, HBGD και BGD.

Με βάση τα στοιχεία υπαίθρου μετά την τοποθέτηση του TMG γίνεται η τοποθέτηση του HBGD και του HBTON και ακολουθεί ο LG. Στη συνέχεια διεισδύει ο BGD. Το τελευταίο μαγματικό συμβάν έδωσε τους απλίτες και πηγματίτες.

### 5 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΡΑΔΙΟΧΡΟΝΟΛΟΓΗΣΗΣ ΟΡΥΚΤΩΝ ΑΠΟ ΤΟΥΣ ΓΡΑΝΟΔΙΟΡΙΤΕΣ ΚΑΙ ΤΟΝΑΛΙΤΕΣ

Στην παρούσα μελέτη έγιναν συνολικά 27 χρονολογήσεις σε δείγματα των HBGD, BGD και HBTON. Οι θέσεις δειγματοληψίας αποτυπώνονται στο σχήμα 1 μαζί με αυτές προγενεστέρων χρονολογήσεων με άλλες μεθόδους (Rb/Sr, Ar/Ar). Σ' όλα τα δείγματα χρονολογήθηκε ο βιοτίτης (Bt) και ο Κ-άστριος (Kf), ενώ στα δείγματα του HBTON STH-63, 91 και 9 και η κεροσίλβη (Hb).

Οι αναλύσεις K/Ar έγιναν στο Ινστιτούτο ΑΤΟΜΚΙ ακολουθώντας τη μεθοδολογία που περιγράφεται παρακάτω. Για τον προσδιορισμό του Κ, περίπου 0,05g δείγματος κονιοποιείται λεπτομερώς και στη συνέχεια διαλύεται σε οξέα (HF, H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, HClO<sub>4</sub>) και τελικά σε διάλυμα HCl συγκέντρωσης 0,2M. Το Κ προσδιορίστηκε με φλογοφωτόμετρο τύπου Corning 480 Flame Photometer που χρησιμοποιεί ρυθμιστή Na και εσωτερική σταθερά Li. Οι διεργαστηριακές σταθερές που χρησιμοποιήθηκαν για την επαλήθευση των μετρήσεων είναι οι Asia 1/65, LP-6, HD-B1 και GL-O.

Πίνακας 1. Αποτελέσματα χρονολόγησης K/Ar σε βιοτίτη, κερροσίλβη και K-ούχο άστριο.

Πετρογρ. Τύπος	Δείγμα	Ορυκτό	K (%)	<sup>40</sup> Ar <sub>rad</sub> cm <sup>3</sup> /g	<sup>40</sup> Ar <sub>rad</sub> (%)	Ηλικία (Ma)	±	<sup>40</sup> Ar <sub>atm</sub> (%)	<sup>40</sup> Ar <sub>atm</sub> cm <sup>3</sup> /g	<sup>36</sup> Ar cm <sup>3</sup> /g	<sup>40</sup> Ar <sub>total</sub> cm <sup>3</sup> /g	<sup>40</sup> K/ <sup>36</sup> Ar	<sup>40</sup> Ar <sub>total</sub> / <sup>36</sup> Ar
<b>BGD</b>	<b>STH-66</b>	Βιοτίτης	7,55	1,318E-05	90,8	44,36	1,34	9,2	1,21256E-06	4,10342E-09	1,439E-05	1,337E+06	3,507E+03
	<b>STH-66</b>	K-άστριο	10,45	1,484E-05	89,9	36,17	1,10	10,1	1,49884E-06	5,07222E-09	1,634E-05	1,497E+06	3,221E+03
	<b>STH-347</b>	Βιοτίτης	7,47	1,261E-05	85,9	42,91	1,31	14,1	1,77801E-06	6,01695E-09	1,439E-05	9,023E+05	2,391E+03
	<b>STH-347</b>	K-άστριο	9,91	1,501E-05	91,0	38,54	1,17	9,0	1,3509E-06	4,57157E-09	1,636E-05	1,575E+06	3,579E+03
	<b>STH-118</b>	Βιοτίτης	7,42	1,262E-05	89,8	43,23	1,31	10,2	1,28724E-06	4,35614E-09	1,391E-05	1,238E+06	3,193E+03
	<b>STH-118</b>	K-άστριο	10,72	1,594E-05	77,5	37,85	1,18	22,5	3,5865E-06	1,21371E-08	1,953E-05	6,419E+05	1,609E+03
<b>HBGD</b>	<b>STH-153</b>	Βιοτίτης	7,81	1,266E-05	86,5	41,23	1,26	13,5	1,7091E-06	5,78376E-09	1,437E-05	9,814E+05	2,484E+03
	<b>STH-153</b>	K-άστριο	11,44	1,738E-05	80,9	38,66	1,19	19,1	3,31958E-06	1,12338E-08	2,070E-05	7,401E+05	1,843E+03
	<b>STH-172</b>	Βιοτίτης	7,92	1,437E-05	88,7	46,08	1,40	11,3	1,62381E-06	5,49513E-09	1,599E-05	1,048E+06	2,911E+03
	<b>STH-172</b>	K-άστριο	10,79	1,795E-05	89,4	42,29	1,28	10,6	1,9027E-06	6,43892E-09	1,985E-05	1,218E+06	3,083E+03
	<b>STH-8</b>	Βιοτίτης	7,51	1,250E-05	87,8	42,33	1,29	12,2	0,00001525	5,16074E-09	1,403E-05	1,058E+06	2,718E+03
	<b>STH-8</b>	K-άστριο	11,43	1,745E-05	91,5	38,86	1,18	8,5	1,48325E-06	5,01946E-09	1,893E-05	1,655E+06	3,772E+03
	<b>STH-6</b>	Βιοτίτης	8,47	1,395E-05	93,9	41,88	1,26	6,1	8,5095E-07	2,8797E-09	1,480E-05	2,138E+06	5,140E+03
	<b>STH-6</b>	K-άστριο	11,06	1,733E-05	92,3	39,86	1,21	7,7	1,33441E-06	4,51577E-09	1,866E-05	1,780E+06	4,133E+03
	<b>STH-71</b>	Βιοτίτης	7,49	1,759E-05	91,4	*59,43	1,80	8,6	1,51274E-06	5,11926E-09	1,910E-05	1,063E+06	3,732E+03
	<b>STH-71</b>	K-άστριο	12,09	1,941E-05	89,3	40,82	1,23	10,7	2,07687E-06	7,02832E-09	2,149E-05	1,250E+06	3,057E+03
	<b>STH-51</b>	Βιοτίτης	7,20	1,240E-05	40,7	41,00	1,60	59,3	7,3532E-06	2,48839E-08	1,975E-05	2,103E+05	7,938E+02
	<b>STH-51</b>	K-άστριο	11,92	1,849E-05	81,4	39,49	1,22	18,6	3,43914E-06	1,16384E-08	2,193E-05	7,444E+05	1,884E+03
<b>HBTON</b>	<b>STH-63</b>	Βιοτίτης	7,68	1,217E-05	67,8	40,32	1,30	32,2	3,91874E-06	1,32614E-08	1,609E-05	4,209E+05	1,213E+03
	<b>STH-63</b>	Κερροσίλβη	0,99	1,737E-06	80,7	44,58	1,30	19,3	3,35241E-07	1,13449E-09	2,072E-06	6,342E+05	1,827E+03
	<b>STH-63</b>	K-άστριο	7,96	1,162E-05	93,4	37,16	1,10	6,6	7,6692E-07	2,59533E-09	1,239E-05	2,229E+06	4,773E+03
	<b>STH-91</b>	Βιοτίτης	6,80	1,240E-05	50,4	42,05	1,51	49,6	6,1504E-06	2,08135E-08	1,855E-05	2,374E+05	8,913E+02
	<b>STH-91</b>	Κερροσίλβη	0,90	1,760E-06	83,1	49,62	1,40	16,9	2,9744E-07	1,00657E-09	2,057E-06	6,498E+05	2,044E+03
	<b>STH-91</b>	K-άστριο	*2,02	2,959E-06	82,3	37,30	1,15	17,7	5,23743E-07	1,7724E-09	3,483E-06	8,283E+05	1,965E+03
	<b>STH-9</b>	Βιοτίτης	5,94	9,617E-06	86,5	41,18	1,26	13,5	1,2983E-06	4,3936E-09	1,092E-05	9,826E+05	2,484E+03
	<b>STH-9</b>	K-άστριο	10,40	1,589E-05	84,3	38,89	1,19	15,7	2,49473E-06	8,4424E-09	1,838E-05	8,953E+05	2,178E+03
	<b>STH-9</b>	Κερροσίλβη	0,91	1,723E-06	58,6	48,06	1,62	41,4	7,13322E-07	2,414E-09	2,436E-06	2,740E+05	1,009E+03

\*Μη ικανοποιητικά αποτελέσματα.

Το Ar εξάγεται από τα δείγματα με τήξη σε χωνευτήρια Mo τα οποία προθερμαίνονται σε σύστημα κενού ανοξειδωτού ατσάλιου. Προστίθεται  $^{38}\text{Ar}$  από σιφώνιο του συστήματος και στη συνέχεια καθαρίζονται τα πρόσμικτα αέρια με χρήση Ti και SAES getter (υλικά απορρόφησης αερίων σε κενό) καθώς και παγίδων υγρού αζώτου. Το καθαρισμένο Ar μεταβιβάζεται αμέσως σε φασματογράφο μάζας όπου μετρώνται οι λόγοι του Ar σε στατική κατάσταση με χρήση μαγνητικού ακτινικού τομέα 15cm ο οποίος κατασκευάστηκε στο Debrecen.

Τα αποτελέσματα χρονολόγησης K/Ar παρουσιάζονται στον πίνακα 1. Στον ίδιο πίνακα παρουσιάζονται, η περιεκτικότητα αργού ραδιογενούς προέλευσης ( $^{40}\text{Ar}_{\text{rad}}$ ), ατμοσφαιρικού αργού ( $^{40}\text{Ar}_{\text{atm}}$ ),  $^{36}\text{Ar}$  και το συνολικό αργό ( $^{40}\text{Ar}_{\text{total}}$ ) σε  $\text{cm}^3/\text{g}$  δείγματος υπό STP συνθήκες (Standard Temperature Pressure,  $T=273\text{K}$ ,  $P=1\text{atm}$ ).

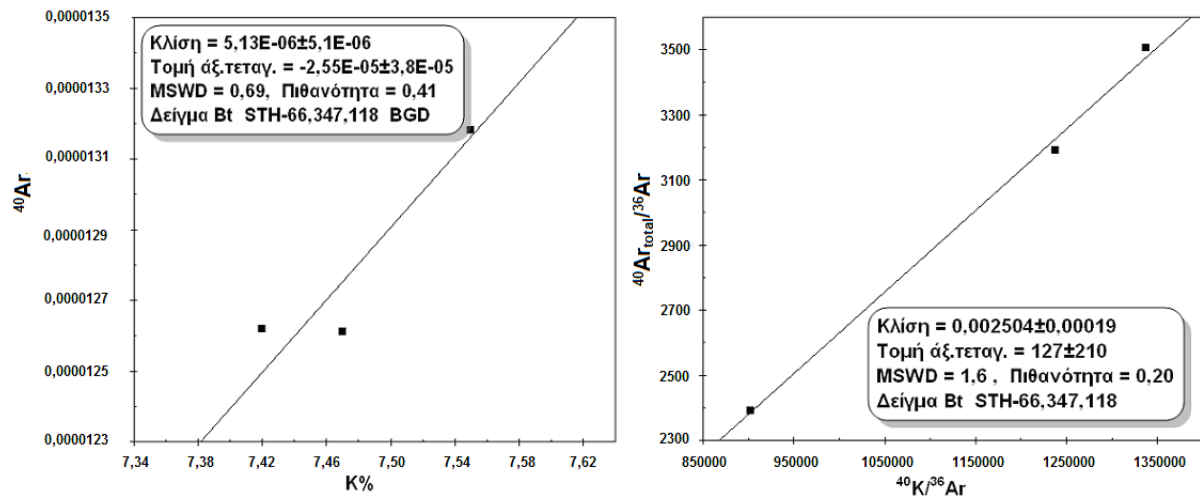
Από τα αποτελέσματα του πίνακα 1 συμπεραίνεται ότι: τα δείγματα βιοτίτη του BGD, έδωσαν αξιόπιστα αποτελέσματα, ως προς την % περιεκτικότητα σε K και  $^{40}\text{Ar}_{\text{rad}}$ . Στον HBGD το δείγμα STH-71 δίνει ηλικία πολύ μεγαλύτερη του μέσου όρου ηλικιών παρόλο που η περιεκτικότητα K% είναι παρόμοια με αυτές που δίνονται από τους Christofides et al. (1998). Για το λόγο αυτό τα αποτελέσματα από το βιοτίτη δεν θεωρούνται ικανοποιητικά. Στο δείγμα STH-91 (HBTON) δεν θεωρούνται αξιόπιστα τα αποτελέσματα του βιοτίτη και του K-αστρίου διότι στο βιοτίτη το ποσοστό του ραδιογενούς Αργού (%  $^{40}\text{Ar}_{\text{rad}}$ ) είναι χαμηλό ενώ ο K-άστριος εμφανίζει πολύ χαμηλή περιεκτικότητα σε K% (πιθανή μόλυνση δείγματος με πλαγιόκλαστο).

μπεράνουμε αν πράγματι το σύστημα (ορυκτό) παρέμεινε κλειστό ή όχι, και εάν έχει λάβει χώρα κάποιο θερμικό γεγονός από την κρυστάλλωση του ορυκτού έως και σήμερα.

**Διάγραμμα  $^{40}\text{Ar}_{\text{total}}/^{36}\text{Ar}$  συναρτήσει του  $^{40}\text{K}/^{36}\text{Ar}$ .** Στην περίπτωση αυτή, η τομή της ισόχρονης με τον άξονα των τεταγμένων θα αντιστοιχεί στην ισοτοπική αναλογία του  $^{40}\text{Ar}_{\text{atm}}/^{36}\text{Ar}=295\pm 0,5$  στην ατμόσφαιρα. Από την κλίση αυτής της ισόχρονης υπολογίζουμε την ηλικία του δείγματος, αν το σύστημα παρέμεινε κλειστό απ' τη δημιουργία του και μετά, ή την ηλικία του τελευταίου γεωλογικού γεγονότος, που προκάλεσε ολική απώλεια του ραδιογενούς προέλευσης αργού.

Η πιθανότητα, ανάλογα με τον αριθμό των δειγμάτων και την επαναληψιμότητα, μία ευθεία ν' αποτελεί ισόχρονη ελέγχεται με τη χρήση του δείκτη MSWD (Mean Square of Weighted Deviates).

**BGD.** Καμιά ισόχρονη βιοτίτη-K-αστρίου ανά δείγμα δεν μπορεί να κατασκευαστεί. Οι ηλικίες των βιοτιτών κυμαίνονται από 42,9 έως 44,4 Ma (Πίν. 1). Οι ηλικίες αυτές είναι κοντά στις ηλικίες (39,3±1.2 – 42,2±1,3 Ma) που βρέθηκαν από τους Christofides et al. (1990) με Rb/Sr (θερμοκρασία κλεισίματος με Rb/Sr=300±50 °C). Από την ισόχρονη των βιοτιτών (πιθανότητα 20%) του BGD ( $^{40}\text{Ar}_{\text{total}}/^{36}\text{Ar}$  συναρτήσει του  $^{40}\text{K}/^{36}\text{Ar}$ , Σχ. 2), υπολογίζεται η ηλικία της θερμοκρασίας κλεισίματός τους (310±30 °C) σε 42,6±3,2 Ma. Οι ηλικίες των K-αστρίων κυμαίνονται από 36,2 έως 38,5 Ma ενώ δεν είναι δυνατόν να κατασκευαστούν ισόχρονες K-άστριου του BGD, όπως φαίνεται από τις τιμές του δείκτη MSWD, υποδηλώνοντας ένα διαταραγμένο σύστημα.



Σχήμα 2. Διαγράμματα ισόχρονης βιοτιτών BGD (Δείγματα STH-66, 347 και 118).

## 6 ΣΥΖΗΤΗΣΗ – ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

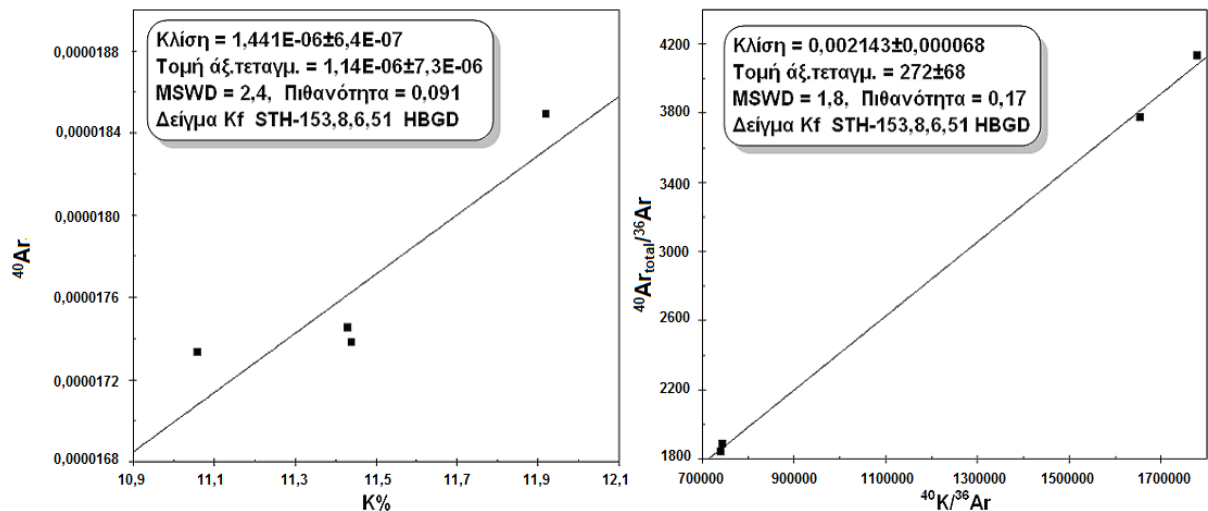
Τα διαγράμματα ισοχρόνων που χρησιμοποιήθηκαν, κατά Shafiqullah and Damon (1974), και με τη χρήση του προγράμματος Isoplot/Ex 3.66 (Ludwig 2008) είναι:

**Διάγραμμα ραδιογενούς αργού ( $^{40}\text{Ar}_{\text{rad}}$ ) συναρτήσει του K% .** Το συγκεκριμένο διάγραμμα χρησιμοποιείται για δείγματα πετρωμάτων στα οποία υπολογίστηκε το ραδιογενές  $^{40}\text{Ar}_{\text{rad}}$  και το K% σε διάφορα ορυκτά. Η χρήση του κρίνεται απαραίτητη προκειμένου να συ-

**HBGD.** Και εδώ, καμιά ισόχρονη βιοτίτη-K-αστρίου ανά δείγμα δεν μπορεί να κατασκευαστεί. Οι ηλικίες των βιοτιτών κυμαίνονται από 41,2 έως 46,1 Ma (εξαιρώντας το δείγμα STH-71). Οι ηλικίες αυτές είναι κοντά στις ηλικίες (43,1±1,3 – 46,6±1,4 Ma) που βρέθηκαν από τους Christofides et al. (1990) με Rb/Sr. Αναφορικά με τη δυνατότητα κατασκευής ισόχρονης βιοτιτών πρέπει να αναφερθεί ότι δεν μπορεί να κατασκευαστεί κάποια από όλα τα δείγματα. Οι ηλικίες των K-αστρίων κυμαίνονται από 38,7 έως 42,3 Ma ενώ είναι δυνατόν να κατασκευαστεί ισόχρονη K-άστριου του

BGD, (πιθανότητα 17%, Σχ. 3) που δίνει ηλικία θερμοκρασίας κλεισίματος των K-αστρίων ( $150 \pm 25$  °C)  $36,5 \pm 1,2$  Ma.

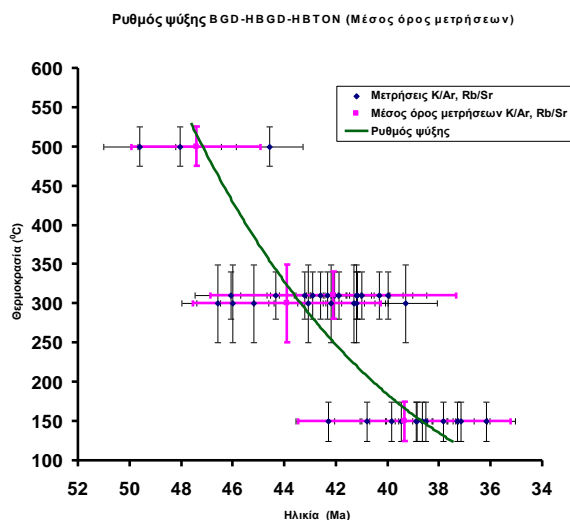
μπεράσματα προτείνεται για το SPC το εξής σενάριο: πρώτα τοποθετείται ο TMG (~50 Ma), ακολουθεί ο HBGD με τον HBTON (~45-50 Ma) και περίπου ταυτό-



Σχήμα 3. Διαγράμματα ισόχρονης K-ούχου άστριου HBGD (Δείγματα STH-153, 8, 6 και 51)

**HBTON.** Και εδώ, καμιά ισόχρονη κερστίλβης - βιοτίτη - K-αστρίου ανά δείγμα δεν μπορεί να κατασκευαστεί. Οι ηλικίες των κερστίλβων που είναι πολύ κοντά στην ηλικία διείσδυσης (θερμοκρασία κλεισίματος με  $K/Ar=500 \pm 25$  °C) κυμαίνονται από 44,6 έως 49,6 Ma. Οι ηλικίες των βιοτιτών κυμαίνονται από 40,3 έως 41,2 Ma και είναι κοντά στις ηλικίες ( $41,2 \pm 1,2$  –  $41,3 \pm 1,2$  Ma) που βρέθηκαν από τους Christofides et al. (1990) με Rb/Sr. Οι ηλικίες των K-αστρίων κυμαίνονται από 37,2 έως 38,9 Ma

Για τη μελέτη της θερμικής εξέλιξης του νότιου τμήματος του πλουτωνίτη της Σιθωνίας χρησιμοποιήθηκε όπως φαίνεται στο σχήμα 4 διάγραμμα θερμοκρασίας κλεισίματος των ορυκτών Hb-Bt-Kf συναρτήσει του μέσου όρου των υπολογισμένων ηλικιών. Από το διάγραμμα αυτό ο μέσος ρυθμός ψύξης υπολογίζεται σε  $\Delta^{\circ}C/\Delta t=40,1$  °C/Ma.



Σχήμα 4. Διάγραμμα ρυθμού ψύξης HBGD – HBTON – BGD

Με βάση δεδομένα γεωχρονολογήσεων (Christofides et al. 1990, Πιπερά 2008, παρούσα μελέτη), γεωλογικές παρατηρήσεις υπαίθρου και πετρολογικά συ-

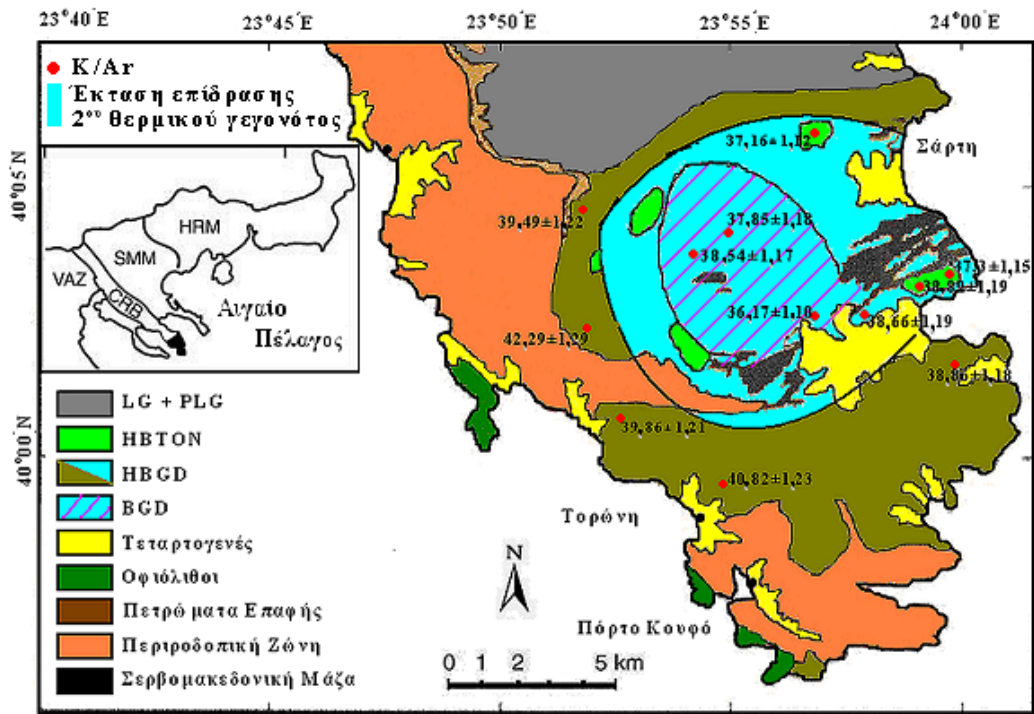
χρονα ο LG (45-49) και τέλος ο BGD (42-43).

Η τοποθέτηση του LG είχε ως αποτέλεσμα τη θερμική διατάραξη, κυρίως στο βόρειο τμήμα του HBGD, του ισοτοπικού συστήματος K/Ar στο βιοτίτη και λιγότερο αυτό του Rb/Sr στο ίδιο ορυκτό. Αυτό υποστηρίζεται από τις μικρότερες ηλικίες που προσδιορίστηκαν με Rb/Sr, K/Ar και Ar/Ar σε βιοτίτες στο βόρειο τμήμα (43,1, 41,0, 40,3 και 40,0). Αναφορικά με τον BGD, συμπεραίνεται, με βάση προηγούμενες γεωχρονολογήσεις με Rb/Sr (Christofides et al. 1990) και τα παρόντα αποτελέσματα ότι α) ο πετρογραφικός αυτός τύπος ψύχθηκε με αργότερο ρυθμό από ότι οι άλλοι πετρογραφικοί τύποι και β) το ισοτοπικό σύστημα K/Ar στους K-αστρίους στο BGD διατηρήθηκε ανοικτό για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα τροφοδοτώντας έτσι ομοιογενώς τους βιοτίτες με ραδιογενές Ar, λόγω του αργού ρυθμού ψύξης και της απουσίας στη συνέχεια κάποιου θερμικού γεγονότος που ξεπέρασε τη θερμοκρασία κλεισίματος του συστήματος K/Ar των βιοτιτών.

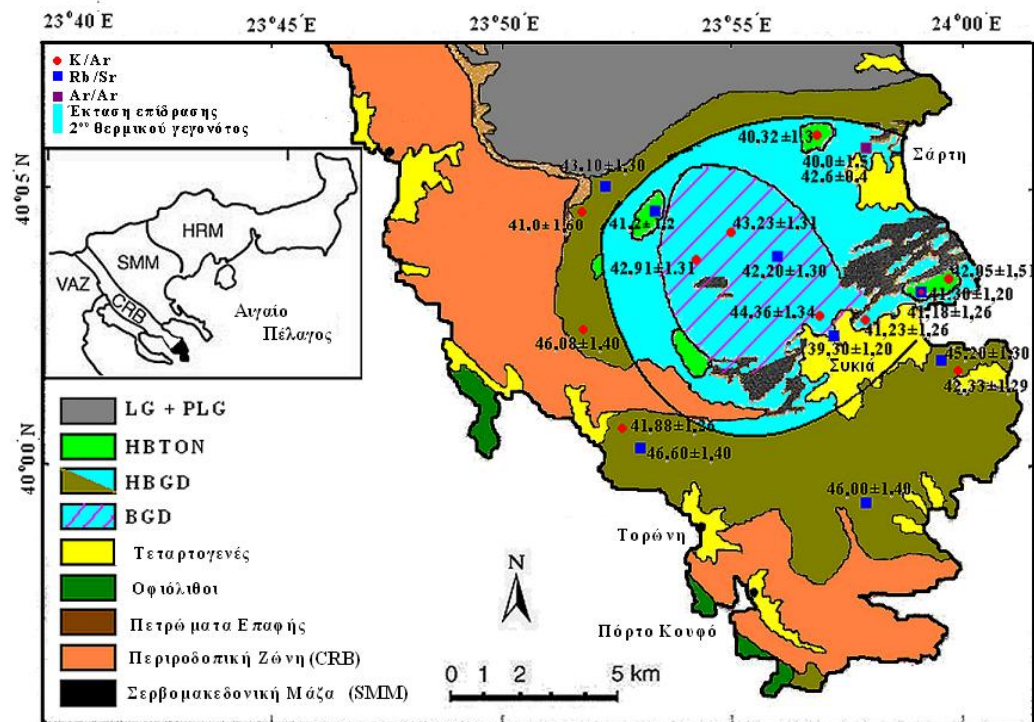
Συμπερασματικά τα θερμικά γεγονότα που πιθανώς επηρέασαν τον SPC είναι:

- A) το πρώτο, μετά την τοποθέτηση του HBGD (στα 46 Ma), οφειλόμενο στην τοποθέτηση του LG στα βόρεια. Ο LG επηρέασε μόνο την περιοχή του HBGD που βρίσκεται σ' επαφή μαζί του. Η θερμοκρασία κλεισίματος του ισοτοπικού συστήματος Rb/Sr για τον Bt ( $T \approx 350$  °C), για το λόγο αυτό η επίδρασή του είναι μεγαλύτερη στους Bt για το ισοτοπικό σύστημα K/Ar.
- B) το δεύτερο θερμικό γεγονός (σχήματα 5 και 6) είναι αυτό που οφείλεται στην τοποθέτηση του BGD (στα 42 Ma), που είχε ως αποτέλεσμα τη θερμική επίδραση στους HBGD και HBTON. Οι υπολογισμένες μικρότερες ηλικίες των K-αστρίων για τον BGD υποδεικνύουν έναν αργότερο ρυθμό ψύξης έναντι του βόρειου τμήματος του. Ο HBTON, που βρίσκεται εντός του HBGD ο οποίος περιβάλλει το BGD, έχει επηρεαστεί προφανώς από την τοποθέτηση του BGD και





Σχήμα 5. Τροποποιημένος πετρογραφικός χάρτης της Σιθωνίας κατά Christofides et al. (2007) όπου αποτυπώνονται οι ηλικίες K-αστρίων με K/Ar και η έκταση επίδρασης του 2<sup>ου</sup> θερμικού γεγονότος.



Σχήμα 6. Τροποποιημένος πετρογραφικός χάρτης της Σιθωνίας κατά Christofides et al. (2007) όπου αποτυπώνονται οι ηλικίες βιοπιδίων με τη μέθοδο K/Ar και Rb/Sr και η έκταση επίδρασης του 2<sup>ου</sup> θερμικού γεγονότος.

Γ) το τρίτο θερμικό γεγονός, έχει σχέση με το τελευταίο μαγματικό συμβάν που δημιούργησε τους απλίτες και πηγματίτες (Christofides et al. 2007, Πιπερά 2008). Το συμβάν αυτό δεν μπορεί να είναι μικρότερο σε ηλικία από τη μικρότερη υπολογισμένη ηλικία των 36,17 Ma (δείγμα STH-66). Η ηλικία αυτή συμφωνεί περίπου με την υπολογισμένη από την κλίση της ευθείας στο σχήμα 3 ( $t(\text{Ma})=36,8\pm 1,2$ ).

#### ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Πιπερά Κ. 2008. Χρονολόγηση πετρογραφικών τύπων του πλουτωνίτη της Σιθωνίας με K-Ar σε ορυκτά. Διατριβή Ειδικεύσεως, Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, 103σ.
- Ρωμανίδης Γ. 2009. Ραδιοχρονολόγηση K/Ar (σε ορυκτά) και θερμοχρονομετρία του νότιου τμήματος του πλουτωνικού συμπλέγματος της Σιθωνίας (Χαλκιδική, Β. Ελλάδα) Διατριβή Ειδικεύσεως, Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, 88σ.

- Σαπουντζής Η., Σολδάτος Κ., Ελευθεριάδης Γ. & Χριστοφίδης Γ. 1976. Συμβολή εις την μελέτην του πλουτωνίου της Σιθωνίας. Πετρογραφικόν-Πετρογενετικόν μέρος. Γεωλ. Χρον. Ελλ. Χωρών, 28, 98-134.
- Σολδάτος Κ., Σαπουντζής Η., Χριστοφίδης Γ. & Ελευθεριάδης Γ. 1976. Συμβολή εις την μελέτην του πλουτωνίου της Σιθωνίας. Ορυκτολογία. Γεωλ. Χρον. Ελλ. Χωρών, 28, 62-98.
- Alagna, E.K., Petrelli M., Perugini D. & Poli G. 2008. Micro-analytical zircon and monazite U-Pb isotope dating by laser ablation-inductively coupled plasma-Quadrupole mass spectrometry. *Geost. and Geolan. Resear.*, 32(1), 103-120.
- Christofides G., D' Amico C., Del Moro A., Eleftheriadis G. & Kyriakopoulos C. 1990. Rb/Sr geochronology and geochemical characters of the Sithonia plutonic complex (Greece). *Eur. J. Mineral.*, 2 (1), 79-87.
- Christofides, G., Eleftheriadis, G., Neiva, M.A., Vlahou, M. & Papadopoulou, L. 1998. Major and trace element geochemistry of micas and amphiboles of the Sithonia pluton (Chalkidiki, N. Greece): constraints on its evolution. *Bulletin of the Geological Society of Greece*, XXXII/3, 231–240.
- Christofides G., Koroneos A., Soldatos T., Eleftheriadis G. & Kiliias A. 2001. Eocene magmatism (Sithonia and Elatia plutons) in the Internal Hellenides and implications for Eocene-Miocene geological evolution of the Rhodope Massif (Northern Greece). *Acta Vulcanologica*, 13(1-2), 73-89.
- Christofides G., Perugini D., Koroneos A., Soldatos T., Poli G., Eleftheriadis G., Del Moro A. & Neiva A.M. 2007. Interplay between geochemistry and magma dynamics during magma interaction: An example from the Sithonia Plutonic Complex (NE Greece). *Lithos*, 95, 243–266
- D'Amico C., Christofides G., Eleftheriades G., Bargossi G.M., Campana R. & Soldatos T. 1990. The Sithonia Plutonic Complex (Chalkidiki, Greece). *Mineralogica et Petrographica Acta*, 33, 143–177.
- De Wet A.P., Miller J.A., Bickle M.A. & Chapman H.J. 1989. Geology and geochronology of the Arnea, Sithonia and Ouranoupolis intrusions, Chalkidiki Peninsula, northern Greece. *Tectonophysics*, 161, 65-79.
- Ludwig R.K. 2008. A geochronological toolkit for Microsoft Office excel. Berkley Geochronology Center, Special Publication, 4.
- Pe-Piper G. & Piper D.J.W. 2002. The igneous rocks of Greece. The anatomy of an orogen. Gebruder Borntraeger-Berlin, Struttgard, 573p.
- Perugini D., Poli G., Christofides G. & Eleftheriadis G., 2003. Magma mixing in the Sithonia Complex, Greece: evidence from mafic microgranular enclaves. *Mineralogy and Petrology*, 78, 173–200.
- Sakellariou D. 1989. Geologie des Serbomazedonischen Massivs in der Nordoestlichen Chalkidiki, N. Griechenland-Deformation und Metamorphose. Diss. Mainz. Univ., Geol. Monographs N. 2, Dept. of Geology, Univ. Athens, 177 pp.
- Shafiqullah M. & Damon E.P. 1974. Evaluation of K/Ar isochron methods. *Geoch. et Cosmoch. Acta*, 38, 1341-1358.
- Soldatos K. & Sapountzis S.E. 1975. Myrmekite of the Sithonia granodiorite. *Sci. Annals, Fac. Phys. & Mathem., Univ. Thessaloniki*, 15, 391-407.
- Tranos M.D., Kiliias A.A. & Mountrakis D.M. 1999. Geometry and kinematics of the Tertiary post-metamorphic Circum Rhodope Belt Thrust System (CRBTS), Northern Greece. *Bull. Geol. Soc. Greece*, 33, 5-16.