

Επιστημονική Επιτηρίδα, Τμήμα Γεωλογίας, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης Τιμητική έκδοση στη μνήμη του ομότιμου καθηγητή Κ. Σολδάτου	Ειδικός τόμος 101	87-94	Θεσσαλονίκη 2012
--	----------------------	-------	---------------------

## ΜΟΝΙΜΗ ΡΑΔΙΕΝΕΡΓΟΣ ΙΣΟΡΡΟΠΙΑ ΤΩΝ ΡΑΔΙΕΝΕΡΓΩΝ ΣΕΙΡΩΝ ΤΟΥ U ΚΑΙ ΤΟΥ Th ΣΕ ΠΛΟΥΤΩΝΙΚΑ ΠΕΤΡΩΜΑΤΑ ΤΗΣ ΕΛΛΑΔΑΣ

Παπαδόπουλος Α.

Τομέας Ορυκτολογίας-Πετρολογίας-Κοιτασματολογίας, Τμήμα Γεωλογίας, Α.Π.Θ. 541 24 Θεσσαλονίκη, [argpapad@geo.auth.gr](mailto:argpapad@geo.auth.gr)

### ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σε δείγματα από τις κυριότερες εμφανίσεις πλουτωνικών πετρωμάτων της Ελλάδας, που καλύπτουν ένα ευρύ φάσμα συστάσεων και πετρογραφικών τύπων, μετρήθηκαν οι ειδικές ενεργότητες του  $^{238}\text{U}$  και του  $^{226}\text{Ra}$  από τη ραδιενεργό σειρά του  $^{238}\text{U}$  και των  $^{228}\text{Ra}$  και  $^{228}\text{Th}$  από τη ραδιενεργό σειρά του  $^{232}\text{Th}$  (Bq/kg), με φασματοσκοπία ακτίνων-γ. Σκοπός της μελέτης αυτής είναι η διερεύνηση της μόνιμης ραδιενεργού ισορροπίας στις ραδιενεργές σειρές του  $^{238}\text{U}$  και του  $^{232}\text{Th}$  σε πλουτωνικά πετρώματα της Ελλάδας. Η έλλειψη μόνιμης ραδιενεργού ισορροπίας στις ραδιενεργές σειρές του  $^{238}\text{U}$  και του  $^{232}\text{Th}$ , που παρατηρήθηκε στα εξετασθέντα δείγματα σχετίζεται με μεταμαγματικές διαδικασίες και ειδικότερα με αλληλεπίδραση υπόγειων υδάτων και πετρώματος.

## SECULAR RADIOACTIVE EQUILIBRIUM OF U AND Th RADIOACTIVE SERIES IN PLUTONIC ROCKS OF GREECE

Papadopoulos A.

Department of Mineralogy-Petrology-Economic Geology, School of Geology, Aristotle University of Thessaloniki, 541 24, Thessaloniki, [argpapad@geo.auth.gr](mailto:argpapad@geo.auth.gr)

### ABSTRACT

Samples taken from the major plutons of Greece that cover a wide range of composition and rock-types, have been studied for their specific activity concentrations of  $^{238}\text{U}$ ,  $^{226}\text{Ra}$  from  $^{238}\text{U}$  radioactive series and  $^{228}\text{Ra}$  and  $^{228}\text{Th}$  from  $^{232}\text{Th}$  radioactive series (Bq/kg) by using gamma-ray spectroscopy. The purpose of this study is to provide information about the presence of radioactive secular equilibrium of both  $^{238}\text{U}$  and  $^{232}\text{Th}$  radioactive series in the granitic rocks of Greece. The lack of equilibrium in the radioactive series of  $^{238}\text{U}$  and  $^{232}\text{Th}$  can be associated with post magmatic processes, more specifically with rock-water interactions.

### 1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Όταν ένα ισοτοπικό σύστημα είναι αδιατάρακτο, εννοείται ότι αυτό είναι κλειστό. Σε αυτή την περίπτωση η ραδιενέργεια του μητρικού ραδιονουκλιδίου είναι ίδια με αυτή του/των ενδιάμεσων και του τελικού προϊόντος διάσπασης, που σημαίνει ότι όλα τα παραπάνω, διασπώνται με τον ίδιο ρυθμό. Αυτή η κατάσταση σε μια ραδιενεργό σειρά, ορίζεται ως *μόνιμη ραδιενεργός ισορροπία (radioactive secular equilibrium)*.

Η μόνιμη ραδιενεργός ισορροπία διαταράσσεται όταν το μητρικό ραδιονουκλίδιο ή το προϊόν διάσπασης του εισέρχεται στο, ή απομακρύνεται από το ισοτοπικό σύστημα κατά τη διάρκεια περιόδου συγκρίσιμης με την ημιπερίοδο ζωής του θυγατρικού ραδιονουκλιδίου και σε απόσταση συγκρίσιμη με το μέγεθος του συστήματος. Η διαταραχή της μόνιμης ραδιενεργού ισορροπίας μπορεί να έχει διάφορα αίτια και έχει σαν αποτέλεσμα τον εμπλουτισμό ή την απομάκρυνση είτε του μητρικού ραδιονουκλιδίου, είτε του προϊόντος διάσπασής του. Επίσης, αυτή είναι μια μη σταθερή κατάσταση και ο χρόνος της αποκατάστασης της ισορροπίας εξαρτάται από τους ρυθμούς διάσπασης των ραδιονουκλιδίων που εξετάζονται. Για τη μελέτη της μόνιμης ραδιενεργού ισορροπίας, συνήθως χρησιμοποιείται ένα μητρικό ραδιονουκλίδιο με μεγάλο χρόνο ημιπεριόδου ζωής και ένα θυγατρικό του με αρκετά μικρότερο χρόνο ημιπεριόδου ζωής (Osmond et al. 1983).

Οι αιτίες που δημιουργούν τη διαταραχή της μόνιμης ραδιενεργού ισορροπίας, σχετίζονται με γεωχημικές διαδικασίες οι οποίες μετακινούν ένα ραδιονουκλίδιο κατά τη διάρκεια περιόδου συγκρίσιμης με την ημιπερίοδο ζωής του θυγατρικού ραδιονουκλιδίου (Osmond & Cowart 1982). Οι μηχανισμοί αυτοί δρουν σε επιφανειακό περιβάλλον αφορούν τη διάλυση και την καταβύθιση των πιο ευδιάλυτων νουκλιδίων μιας ραδιενεργού σειράς, τη διάχυση των νουκλιδίων του ραδονίου και τις επιπτώσεις της ανάκρουσης των σωματιδίων-α (α-particle recoil) (Gascoyne 1992, Ivanovich & Harmon 1982, Ivanovich & Harmon 1992, Osmond & Cowart 1976, Osmond & Cowart 1982). Σε περίπτωση που ένα γρανιτικό πέτρωμα δεν είναι τεκτονισμένο και δεν παρουσιάζει ρωγμές, προφανώς δεν μπορεί να επηρεαστεί σημαντικά από τη δράση του υπόγειου νερού και η αιτία της μη ύπαρξης μόνιμης ραδιενεργού ισορροπίας θα πρέπει να αποδοθεί στην ανάκρουση των σωματιδίων-α, στην ενέργεια δηλαδή που μεταδίδεται στο θυγατρικό πυρήνα κατά τη διάρκεια μιας α- διάσπασης, η οποία μπορεί να προκαλέσει βλάβη στο κρυσταλλικό πλέγμα του ορυκτού που περιέχει το νουκλίδιο, με αποτέλεσμα να κινητοποιηθεί γεωχημικά το θυγατρικό νουκλίδιο (Gascoyne & Miller 2001). Αν το ισοτοπικό σύστημα κλείσει, τότε η ισορροπία μεταξύ μητρικού-θυγατρικού ραδιονουκλιδίου

θα αποκατασταθεί, αν δε συμβεί αυτό, τότε η ισορροπία δε θα αποκατασταθεί.

Σε ένα ισοτοπικό σύστημα που ήταν ανοικτό και έχει κλείσει, η μόνιμη ραδιενεργός ισορροπία μεταξύ ενός ραδιονουκλιδίου και των προϊόντων διάσπασής του, αποκαθίσταται σε χρόνο ίσο με το πενταπλάσιο ή εξαπλάσιο της ημιπεριόδου ζωής του θυγατρικού ραδιονουκλιδίου (Dosseto et al. 2008).

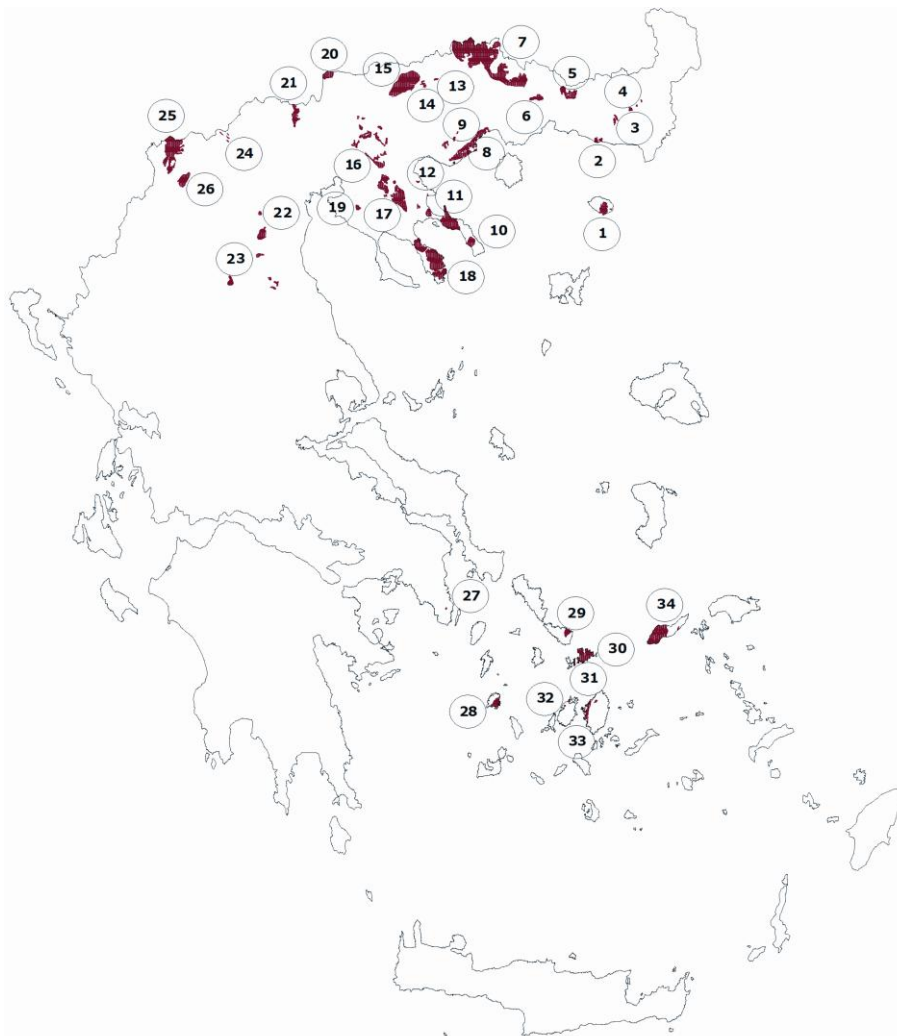
Η μέτρηση και ο υπολογισμός του βαθμού της μόνιμης ραδιενεργού ισορροπίας, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον εντοπισμό πρόσφατων γεωλογικά αλληλεπιδράσεων μεταξύ νερού και γρανιτικών πετρωμάτων. Οι διαδικασίες που είναι δυνατό να επηρεάσουν το ισοτοπικό σύστημα της σειράς του  $^{238}\text{U}$ , είναι η αποσάθρωση και η επίδραση του υπόγειου νερού στα γρανιτικά πετρώματα. Το σύστημα μπορεί να έχει διαταραχτεί απότομα (σε χρόνο πολύ μικρότερο από τις ημιπεριόδους ζωής των ισοτόπων που μελετώνται), ή να έχει υποστεί συνεχείς διαταραχές για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα και μάλιστα οι διαταραχές αυτές μπορεί να συνεχίζονται μέχρι σήμερα (Scott et al. 1992). Τα παραπάνω είναι δυνατό να προκαλέσουν

την κινητοποίηση και απομάκρυνση των ισοτόπων του  $\text{U}$  ( $^{238}\text{U}$ ,  $^{234}\text{U}$ ) και του  $^{226}\text{Ra}$ , που είναι γεωχημικά αρκετά πιο ευκίνητα σε σχέση με το  $^{230}\text{Th}$ , που είναι μη ευκίνητο και δεν απομακρύνεται εύκολα (Gascoyne & Schwarcz 1986).

## 2 ΓΕΩΛΟΓΙΑ

Τα μαγματικά πετρώματα αποτελούν ένα από τα κυριότερα χαρακτηριστικά του ελληνικού ορογενούς (Pe-Piper & Piper 2002) και απαντώνται τόσο με την πλουτωνική, όσο και με την ηφαιστειακή μορφή τους. Εμφανίζονται στις περισσότερες ελληνικές γεωτεκτονικές ζώνες με ηλικίες που κυμαίνονται από το Παλαιοζωικό μέχρι το Καινοζωικό.

Ειδικότερα, τα γρανιτικά πετρώματα στον ελλαδικό χώρο εντοπίζονται σε όλες τις εσωτερικές Ελληνίδες και τις ζώνες της ενδοχώρας. Πιο συγκεκριμένα, εντοπίζονται στη Μάζα της Ροδόπης, στη Σερβομακεδονική Μάζα, στην Περιροδοπική ζώνη, στη ζώνη Αξιού, στην Πελαγονική ζώνη και στην Αττικοκυκλαδική Μάζα (Σχ. 1).



Σχήμα 1. Οι κυριότερες εμφανίσεις γρανιτικών πετρωμάτων στην Ελλάδα. 1 Σαμοθράκη, 2 Μαρώνεια, 3 Λεπτοκαρυά-Κίρκη Κασσιπερά, 4 Τρεις Βρύσες-Χαλάσματα, 5 Παπίκιο, 6 Ξάνθη, 7 Ελατιά-Παρανέσι, 8 Καβάλα, 9 Φίλιπποι, 10 Αγ. Όρος, 11 Ιερισσός, 12 Στρατώνι, 13 Γρανίτης, 14 Πανόραμα, 15 Βροντού, 16 Φλαμούρι, 17 Αρναία, 18 Σιθωνία, 19 Μονοπήγαδο, 20 Μουρίες, 21 Φανός, 22 Καστανιά, 23 Δεσκάτη, 24 Βόρας, 25 Βαρνούνας, 26 Καστοριά, 27 Λαύριο, 28 Σέριφος, 29 Τήνος, 30 Μύκονος, 31 Δήλος, 32 Πάρος, 33 Νάξος, 34 Ικαρία.

Θα πρέπει να διευκρινιστεί ότι στην παρούσα εργασία, με τον όρο γρανιτικά πετρώματα, θα εννοείται ο εμπορικός όρος. Αυτός περιλαμβάνει όχι μόνο τα γρανιτικά πετρώματα υπό την πετρογραφική έννοια του όρου, αλλά ένα ευρύ φάσμα συστάσεων στο οποίο συγκαταλέγονται όξινα έως βασικά πυριγενή πετρώματα, καθώς και μεταμορφωμένα πετρώματα.

Η γεωλογία των παραπάνω γεωτεκτονικών ζωνών, καθώς και η πετρολογία, η γεωχημεία και η ηλικία των γρανιτικών πετρωμάτων που βρίσκονται σε αυτές έχουν μελετηθεί από πλήθος ερευνητών (Piper and Piper 2002 και αναφορές).

### 3 ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ

Η πετρογραφική ταξινόμηση των δειγμάτων (Πίν.1) έγινε με βάση το διάγραμμα Q'-ANOR των Streckeisen & Le Maitre (1979) και παρουσιάζεται στον πίνακα 1. Για να γίνει η προβολή των δειγμάτων σε αυτό το διάγραμμα, πρώτα υπολογίστηκε η δυνητική τους ορυκτολογική σύσταση με βάση τις χημικές τους αναλύσεις. Αυτές προέρχονται από την Καραβασίλη (2004) και τις αναφορές σ' αυτήν, ενώ αυτά της Μαρώνας από την Παπαδοπούλου (2003), του Βαρνούνα από τον Κορωνάιο (1991), του Μονοπήγαδου από τον Κορόνεος (2009), του Φανού από τους Christofides et al.

Πίνακας 1. Δυνητική ορυκτολογική σύσταση και πετρογραφικός τύπος των εξεταζόμενων δειγμάτων. (Q=χαλαζίας, O =ορθόκλαστο, Ab=αλβίτης, An=ανορθίτης, Di=διοψίδιος, Hy=υπερσθενής, Ol=ολιβίνης, Il=ιλιμνίτης, Hm=αιματίτης, Tn=πιτανίτης, Ru=ρουτίλιο, Ap=απατίτης, Tot=Σύνολο, bi=βιοτίτης, hb=κεροσίλβη).

	Q	Or	Ab	An	Di	Hy	Ol	Il	Hm	Tn	Ru	Ap	Tot	Πετρογραφικός Τύπος
GAE1	0,0	8,8	23,2	32,5	12,1	10,6	2,1	0,3	8,7	1,3	0,0	0,4	100	rx-ol γάββρος
GAE9	1,8	17,4	29,1	28,8	5,0	6,2	0,0	0,3	8,0	2,1	0,0	1,3	100	rx-ol γάββρος
GAE11	2,5	4,9	26,4	34,2	9,3	9,6	0,0	0,4	10,0	2,0	0,0	0,7	100	rx γάββρος
XMZ501	4,2	29,2	24,9	14,8	9,1	6,3	0,0	0,3	7,9	2,0	0,0	1,3	100	bi-rx qz-μονζοδιορίτης
X270	19,9	22,9	28,9	16,9	1,1	3,8	0,0	0,2	4,8	1,1	0,0	0,4	100	bi-hb γρανοδιορίτης
NG5	4,5	3,0	25,5	34,6	2,2	16,2	0,0	0,4	11,0	2,0	0,0	0,6	100	rx γάββρος
MZ500	0,0	24,1	28,1	15,9	12,0	8,1	0,0	0,4	7,4	2,3	0,0	1,7	100	bi-rx qz-μονζοδιορίτης
X602	18,4	22,7	30,1	17,5	0,9	4,0	0,0	0,2	4,6	1,2	0,0	0,4	100	hb γρανοδιορίτης
L13	34,9	42,7	18,5	2,8	0,0	0,2	0,0	0,1	0,7	0,0	0,0	0,1	100	αλκαλιγρανίτης
MP5	10,5	27,2	28,9	16,7	0,4	7,0	0,0	0,3	5,8	1,7	0,0	1,5	100	bi-hb qz- μονζονίτης
P5	24,9	28,9	30,1	9,4	0,0	3,3	0,0	0,2	2,4	0,0	0,3	0,5	100	bi γρανίτης
I3	27,6	30,2	37,0	3,1	0,0	0,6	0,0	0,1	1,2	0,0	0,1	0,1	100	αλκαλιγρανίτης
T10	11,5	26,7	30,5	15,8	1,1	5,9	0,0	0,2	5,4	1,8	0,0	1,1	100	hb γρανοδιορίτης
P7	0,7	16,0	30,8	24,1	1,7	13,7	0,0	0,4	7,7	3,0	0,0	1,9	100	bi-hb qz-μονζοδιορίτης
KR9	10,2	25,4	26,6	18,3	1,3	7,7	0,0	0,3	6,4	2,0	0,0	1,8	100	bi hb qz-μονζονίτης
MP12	0,1	7,2	11,1	27,8	26,7	11,6	0,0	0,4	11,3	1,8	0,0	2,0	100	rx γάββρος
MP34	7,3	23,1	22,3	23,2	5,1	7,7	0,0	0,3	7,8	2,1	0,0	1,1	100	hb qz-μονζονίτης
MP3	6,1	26,1	26,1	18,3	4,5	8,2	0,0	0,3	7,6	1,7	0,0	1,1	100	hb qz-σηνίτης
MP6	1,9	20,1	21,1	20,7	19,7	4,4	0,0	0,3	8,7	1,9	0,0	1,2	100	rx-hb-bi μονζογάββρος
MP38	3,3	22,9	26,0	20,4	11,6	4,3	0,0	0,3	8,3	2,0	0,0	0,9	100	bi qz-μονζοδιορίτης
MP53	1,3	30,6	18,4	15,3	16,2	6,8	0,0	0,3	7,8	2,1	0,0	1,2	100	bi-hb qz-μονζοδιορίτης
MP77	9,4	27,8	24,4	18,8	1,2	8,2	0,0	0,3	6,7	1,9	0,0	1,3	100	hb qz-μονζονίτης
MP90	19,9	37,4	20,0	11,2	2,4	3,6	0,0	0,1	3,9	1,0	0,0	0,5	100	hb γρανίτης
MR11	4,2	25,1	21,1	17,2	15,9	5,0	0,0	0,3	8,0	1,8	0,0	1,4	100	hb-bi -rx μονζονίτης
PE11	19,3	25,4	34,3	13,2	0,2	3,0	0,0	0,2	3,2	0,8	0,0	0,4	100	bi-hb γρανίτης
TH5	22,4	25,0	38,2	7,9	1,5	1,8	0,0	0,1	2,2	0,6	0,0	0,3	100	hb-bi γρανίτης
STH162	32,7	14,2	39,9	9,7	0,0	1,1	0,0	0,2	1,5	0,0	0,2	0,5	100	γρανοδιορίτης
STH170	33,1	18,7	35,5	9,6	0,0	1,2	0,0	0,1	1,4	0,0	0,2	0,2	100	γρανίτης
STH9	23,1	16,9	34,5	18,3	0,6	0,8	0,0	0,2	3,9	1,0	0,0	0,7	100	hb γρανοδιορίτης
STH5	29,1	16,6	39,2	10,6	0,8	1,4	0,0	0,0	1,7	0,0	0,3	0,2	100	γρανίτης
STH6	22,1	16,4	39,5	14,9	0,0	3,4	0,0	0,1	2,8	0,0	0,3	0,5	100	bi γρανοδιορίτης
STH13	27,5	20,6	44,2	6,7	0,0	0,3	0,0	0,0	0,6	0,0	0,1	0,0	100	γρανίτης
STH118	27,0	19,9	36,3	11,7	0,0	2,3	0,0	0,2	2,0	0,0	0,2	0,4	100	bi γρανοδιορίτης
STH450	21,1	21,4	37,7	13,4	0,1	3,0	0,0	0,1	2,2	0,6	0,0	0,4	100	hb-bi γρανοδιορίτης
SB36	0,0	36,9	33,6	12,3	11,3	0,0	0,3	0,3	4,5	0,0	0,0	0,8	100	hb σηνίτης
SB41	20,1	25,0	30,0	16,5	0,7	3,4	0,0	0,2	2,9	0,7	0,0	0,5	100	hb γρανοδιορίτης
SB50	17,2	21,6	33,0	17,3	4,9	1,0	0,0	0,3	3,8	0,6	0,0	0,3	100	hb qz-μονζονίτης
SB55	0,0	2,4	8,3	44,4	20,2	1,2	7,3	0,4	13,1	2,5	0,0	0,2	100	rx γάββρος
L4	18,4	25,3	28,2	15,7	6,2	0,4	0,0	0,3	4,3	0,7	0,0	0,5	100	hb qz-σηνίτης
B7	21,5	26,3	29,5	9,8	6,2	0,0	0,0	0,4	5,1	0,8	0,0	0,4	100	hb γρανίτης
TS10	11,5	36,1	31,9	11,8	1,6	0,0	0,0	0,3	4,8	1,1	0,0	0,9	100	hb γρανίτης
D5	15,6	15,1	35,5	22,5	0,0	5,0	0,0	0,2	4,4	0,3	0,4	1,0	100	bi τοναλίτης
D8b	18,2	18,2	35,1	19,1	0,0	4,1	0,0	0,2	3,6	0,1	0,5	0,9	100	bi γρανοδιορίτης
D15	30,7	28,3	29,9	7,3	0,0	1,9	0,0	0,2	1,3	0,0	0,2	0,2	100	γρανίτης
DSK17	14,1	13,3	36,3	23,3	0,0	6,0	0,0	0,3	5,1	0,0	0,6	1,0	100	bi τοναλίτης
A13	28,5	30,9	32,2	6,6	0,0	0,6	0,0	0,1	0,9	0,0	0,1	0,1	100	γρανίτης
H9	32,3	29,5	30,0	5,3	0,0	1,3	0,0	0,1	1,3	0,0	0,1	0,1	100	αλκαλιγρανίτης
G2	35,7	37,3	19,5	5,4	0,0	0,7	0,0	0,2	1,0	0,0	0,1	0,1	100	γρανίτης
PR27	24,7	23,7	29,7	14,6	1,3	1,7	0,0	0,3	3,1	0,6	0,0	0,3	100	bi γρανίτης
P6	18,8	28,5	30,6	14,9	0,6	2,0	0,0	0,2	3,4	0,7	0,0	0,3	100	hb γρανίτης
YD12	11,7	26,5	27,5	17,6	11,8	0,0	0,0	1,2	2,4	0,6	0,0	0,7	100	bi-hb qz-μονζονίτης

Πίνακας 1. Συνέχεια...

<b>MP500</b>	32,7	35,3	21,8	5,8	0,0	0,1	0,0	1,5	0,0	2,7	0,0	0,1	100	γρανίτης
<b>MP105</b>	30,5	32,3	32,1	2,9	0,0	0,2	0,0	0,2	1,6	0,0	0,1	0,1	100	γρανίτης
<b>MP501</b>	31,8	31,9	29,8	4,2	0,0	0,2	0,0	0,1	1,6	0,0	0,3	0,1	100	γρανίτης
<b>L23a</b>	11,2	20,6	19,5	18,6	5,1	16,8	0,0	0,2	6,3	1,3	0,0	0,4	100	bi-rx-hb qz-μονζονίτης
<b>MO4</b>	19,7	22,0	28,0	13,8	0,0	7,3	0,0	0,3	7,6	0,0	0,7	0,6	100	bi γρανодиορίτης
<b>MO41</b>	29,6	27,2	30,4	8,0	0,0	2,0	0,0	0,1	2,2	0,0	0,3	0,2	100	bi γρανίτης
<b>ARN3</b>	32,5	36,9	26,8	2,0	0,0	0,2	0,0	0,1	1,4	0,0	0,1	0,0	100	αλκαλιγρανίτης
<b>ARN9</b>	39,6	2,1	50,1	7,3	0,0	0,3	0,0	0,0	0,3	0,0	0,1	0,2	100	τοναλίτης
<b>ARN12</b>	73,0	12,6	1,7	0,9	0,0	0,3	0,0	0,1	1,3	0,0	0,1	0,0	100	bi γρανίτης
<b>FN51</b>	29,7	31,8	30,6	5,2	0,0	0,9	0,0	0,1	1,4	0,0	0,1	0,2	100	γρανίτης
<b>F5</b>	37,7	29,2	29,2	2,5	0,0	0,5	0,0	0,0	0,7	0,0	0,1	0,1	100	γρανίτης
<b>MD2</b>	35,9	30,6	30,0	3,0	0,0	0,8	0,0	0,2	0,9	0,0	0,0	0,1	100	γρανίτης
<b>FP1</b>	28,4	31,8	29,2	5,9	0,0	1,8	0,0	0,1	1,8	0,0	0,2	0,3	100	bi γρανίτης
<b>XX2</b>	22,8	22,9	39,0	10,4	0,0	2,5	0,0	0,2	1,8	0,0	0,2	0,2	100	bi γρανίτης
<b>RF24</b>	23,7	21,0	34,5	12,7	0,0	3,4	0,0	0,2	3,5	0,0	0,3	0,7	100	bi γρανодиορίτης
<b>KB31</b>	33,3	25,3	32,9	7,3	0,1	0,3	0,0	0,1	0,6	0,0	0,0	0,1	100	γρανίτης
<b>KB6</b>	24,3	22,4	35,7	12,5	1,1	1,4	0,0	0,2	1,9	0,3	0,0	0,2	100	hb γρανίτης
<b>KB33</b>	25,9	14,9	37,8	16,4	0,0	2,2	0,0	0,2	2,2	0,0	0,1	0,3	100	bi γρανодиορίτης
<b>K36</b>	26,9	22,8	33,8	12,6	0,0	1,8	0,0	0,2	1,6	0,0	0,1	0,2	100	γρανодиορίτης
<b>K42</b>	27,3	19,8	34,5	14,7	0,0	1,7	0,0	0,2	1,6	0,1	0,0	0,1	100	γρανодиορίτης
<b>KB1</b>	20,8	17,5	38,2	17,2	0,0	2,9	0,0	0,2	2,6	0,0	0,2	0,4	100	bi γρανодиορίτης
<b>K38</b>	27,9	22,2	31,0	14,2	0,0	2,0	0,0	0,2	2,0	0,2	0,1	0,2	100	γρανодиορίτης
<b>K32</b>	23,4	19,2	33,9	17,6	0,0	2,6	0,0	0,2	2,5	0,2	0,1	0,3	100	bi γρανодиορίτης
<b>IERP-1</b>	26,2	26,0	25,0	13,3	0,0	5,8	0,0	0,2	2,7	0,0	0,3	0,5	100	bi γρανодиορίτης
<b>STR-1</b>	31,9	19,8	37,1	9,6	0,0	0,5	0,0	0,1	0,8	0,0	0,1	0,1	100	γρανодиορίτης
<b>AO9</b>	28,1	19,0	33,1	12,5	0,0	3,3	0,0	0,1	3,1	0,0	0,3	0,5	100	bi γρανодиορίτης
<b>AO27</b>	25,7	31,9	28,5	8,6	0,0	1,9	0,0	0,1	2,5	0,0	0,4	0,4	100	bi γρανίτης
<b>AO127</b>	14,4	29,4	26,3	11,8	0,6	7,0	0,0	0,2	6,0	3,2	0,0	1,1	100	bi qz-συνήτης
<b>AO57</b>	25,9	22,3	29,4	14,3	0,0	3,6	0,0	0,1	3,4	0,0	0,5	0,5	100	bi γρανодиορίτης
<b>FL1</b>	23,7	15,2	27,2	22,4	0,0	6,2	0,0	0,2	4,4	0,0	0,4	0,3	100	bi τοναλίτης
<b>FL2</b>	27,9	8,5	27,4	23,9	0,0	6,5	0,0	0,2	4,9	0,0	0,4	0,3	100	bi-hb τοναλίτης
<b>3BR102</b>	9,9	9,4	21,2	33,8	5,9	8,6	0,0	0,3	9,2	1,4	0,0	0,3	100	hb qz διορίτης
<b>3BR1</b>	15,0	11,0	25,7	28,1	3,3	7,8	0,0	0,4	7,0	1,2	0,0	0,5	100	hb bi τοναλίτης
<b>PTV1</b>	35,3	5,3	31,8	19,0	0,0	4,0	0,0	0,2	3,9	0,0	0,3	0,2	100	bi τοναλίτης
<b>PLH1</b>	12,2	11,9	22,8	30,9	3,6	8,5	0,0	0,3	7,9	1,6	0,0	0,3	100	hb bi qz-διορίτης
<b>PLH2</b>	5,6	9,2	24,4	35,9	2,8	10,1	0,0	0,3	9,3	1,9	0,0	0,5	100	hb-bi διορίτης
<b>KR1</b>	11,8	19,9	18,1	19,7	5,8	16,7	0,0	0,3	6,2	1,1	0,0	0,4	100	bi-hb γρανодиορίτης
<b>FAL1</b>	30,7	25,5	29,8	10,1	0,0	1,7	0,0	0,1	1,7	0,0	0,2	0,2	100	γρανίτης
<b>FAL2</b>	26,7	22,3	29,0	15,9	0,0	2,6	0,0	0,1	2,7	0,0	0,4	0,3	100	bi γρανодиορίτης
<b>TUM1</b>	28,8	26,6	26,8	12,2	0,0	1,9	0,0	0,1	2,3	1,0	0,0	0,3	100	bi-hb γρανίτης
<b>PLM1</b>	25,2	21,5	26,4	17,6	0,9	2,6	0,0	0,1	3,6	1,7	0,0	0,4	100	bi γρανодиορίτης
<b>NP2</b>	31,9	27,1	29,5	8,4	0,0	1,1	0,0	0,1	1,5	0,0	0,2	0,2	100	γρανίτης
<b>KP1</b>	23,7	21,8	35,5	13,3	0,0	2,0	0,0	0,3	2,6	0,0	0,4	0,4	100	mu-bi γρανодиορίτης
<b>APN1</b>	24,7	24,6	25,4	16,5	0,0	3,8	0,0	0,1	3,5	0,8	0,2	0,4	100	bi γρανодиορίτης
<b>AAN1</b>	27,7	26,1	24,6	14,5	0,0	2,9	0,0	0,1	2,9	0,7	0,2	0,3	100	bi γρανодиορίτης
<b>KAN1</b>	30,9	27,9	28,6	9,1	0,0	1,6	0,0	0,0	1,4	0,0	0,3	0,2	100	γρανίτης
<b>VN1</b>	26,7	30,2	22,6	13,1	0,2	2,9	0,0	0,1	2,7	1,1	0,0	0,4	100	hb γρανίτης
<b>API2</b>	35,2	25,7	29,3	7,6	0,0	0,8	0,0	0,1	1,1	0,0	0,1	0,1	100	γρανίτης
<b>A11</b>	32,8	27,8	29,4	7,7	0,0	0,9	0,0	0,1	1,1	0,0	0,1	0,1	100	γρανίτης
<b>KI2</b>	35,6	26,5	24,7	9,6	0,0	1,5	0,0	0,1	1,6	0,0	0,2	0,2	100	γρανίτης
<b>MI1</b>	26,8	23,7	29,1	14,0	0,0	2,9	0,0	0,1	2,7	0,0	0,4	0,3	100	bi γρανодиορίτης
<b>PI1</b>	32,8	28,4	32,7	4,9	0,0	0,3	0,0	0,2	0,6	0,0	0,0	0,1	100	γρανίτης
<b>KI1</b>	36,9	25,3	25,6	9,1	0,0	1,2	0,0	0,1	1,5	0,0	0,2	0,1	100	γρανίτης
<b>XI3</b>	29,9	24,7	34,9	7,6	0,0	1,2	0,0	0,1	1,2	0,0	0,2	0,2	100	γρανίτης
<b>KAS1</b>	24,5	20,1	29,9	17,5	0,0	3,7	0,0	0,1	3,4	0,0	0,5	0,3	100	bi γρανодиορίτης
<b>KS1</b>	19,1	22,1	36,1	14,0	2,4	2,9	0,0	0,1	1,7	1,3	0,0	0,3	100	bi-hb γρανίτης
<b>XS1</b>	21,1	19,7	30,4	19,7	0,0	4,1	0,0	0,1	3,5	0,9	0,2	0,3	100	hb-bi γρανодиορίτης
<b>L1</b>	29,8	20,3	27,5	16,1	0,0	2,5	0,0	0,0	3,1	0,0	0,4	0,3	100	bi γρανодиορίτης
<b>KST20</b>	31,5	22,8	31,8	10,1	0,0	1,5	0,0	0,1	1,9	0,0	0,0	0,3	100	mu-bi γρανίτης
<b>KST5</b>	35,8	26,7	24,5	9,8	0,0	1,1	0,0	0,1	1,7	0,0	0,2	0,1	100	mu-bi γρανίτης
<b>P108</b>	18,4	21,5	29,5	16,9	1,2	5,3	0,0	0,2	5,3	1,3	0,0	0,4	100	hb γρανодиορίτης
<b>P220</b>	21,8	30,1	26,7	11,1	0,7	4,0	0,0	0,1	3,8	1,4	0,0	0,3	100	hb γρανίτης
<b>P115</b>	42,9	2,5	45,4	8,1	0,0	0,5	0,0	0,0	0,3	0,0	0,2	0,1	100	τοναλίτης
<b>DESK05</b>	39,0	24,2	34,8	1,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,9	0,0	0,0	0,0	100	αλκαλιγρανίτης
<b>PAA1</b>	23,4	21,6	32,2	13,9	0,0	4,3	0,0	0,2	3,5	0,0	0,4	0,5	100	bi γρανодиορίτης
<b>DEL1</b>	23,9	22,0	27,9	17,3	0,0	3,8	0,0	0,1	3,7	0,6	0,3	0,4	100	bi γρανодиορίτης
<b>DEL2</b>	33,1	31,3	23,9	8,7	0,0	1,1	0,0	0,0	1,5	0,0	0,2	0,2	100	γρανίτης
<b>PKS1</b>	10,7	16,4	21,8	20,4	9,4	12,4	0,0	0,2	6,9	1,4	0,0	0,4	100	hb qz-μονζονίτης
<b>49</b>	30,7	24,5	35,5	6,7	0,0	0,8	0,0	0,1	1,3	0,0	0,2	0,2	100	γρανίτης

(1990b), του Παρανεστίου από τον Σκλαβούνο (1981), της Καστανιάς από την Τσουτσικα (1999) και τους Koroneos et al. (2000), της Σιθωνίας από τους Christofides et al. (2001, 2007), της Σαμοθράκης από τους Christofides et al. (2000b), των Μουριών από τους Christofides et al. (1999), της Καβάλας από τους Christofides et al. (1995) και Neiva et al. (1996) και τέλος της Αρναίας από τους Christofides et al. (2000a). Οι χημικές αναλύσεις των δειγμάτων της Δεσκάτης και της Καστοριάς προέρχονται από αδημοσίευτα στοιχεία που παραχωρήθηκαν από τον κ. Α. Κορωναίο ενώ των δειγμάτων με κωδικό GAE και MZ της Ξάνθης και των δειγμάτων του Αγίου Όρους από αδημοσίευτα στοιχεία του κ. Γ. Χριστοφίδη. Για όλα τα υπόλοιπα δείγματα, πραγματοποιήθηκαν νέες χημικές αναλύσεις με XRF και ICP-ES. Η πετρογραφική ταξινόμηση των δειγμάτων έγινε με χρήση του λογισμικού GCD (Geo-Chemical Data) kit των Janousek et al (2008) υπολογίζοντας τη CIPW norm.

Οι τιμές της ειδικής ενεργότητας (σε Bq/kg) των σειρών  $^{238}\text{U}$  και  $^{232}\text{Th}$  για τα εξεταζόμενα δείγματα, προέκυψαν χρησιμοποιώντας τη φασματοσκοπία ακτίνων- $\gamma$  και μετρήθηκαν στο Εργαστήριο Ατομικής και Πυρηνικής Φυσικής του τομέα Πυρηνικής Φυσικής και Φυσικής Στοιχειωδών Σωματιδίων του τμήματος Φυσικής του Α.Π.Θ. Χρησιμοποιήθηκαν δυο συστήματα φασματοσκοπίας ακτίνων- $\gamma$  υψηλής ανάλυσης. Το πρώτο αποτελείται από ένα ομοαξονικό ανιχνευτή HPGe με απόδοση 42% και ανάλυση 1,9 keV σε φωτόνια ενέργειας 1,33 MeV, που καλύπτεται από 4" Pb, 1mm Cd και 1mm Cu. Το δεύτερο αποτελείται από έναν επίπεδο, χαμηλής ενέργειας ανιχνευτή γερμανίου (LEGe) με ανάλυση 0,7 keV σε φωτόνια ενέργειας 122 keV, που καλύπτεται από 1,3" Pb, 1mm Cd και 1mm Cu. Στις μετρήσεις χρησιμοποιήθηκαν υψηλής ποιότητας υλικά αναφοράς (IAEA, RG-set) με πυκνότητα παρόμοια αυτής των γρανιτικών πετρωμάτων μετά την κονιοποίηση. Τα δείγματα αφού κονιοποιήθηκαν σε κοκκομετρία <800  $\mu\text{m}$ , στη συνέχεια ξηράθηκαν σε θερμοκρασία περίπου 60°C, με σκοπό να απομακρυνθεί η υγρασία που πιθανόν περιέχουν. Έπειτα τοποθετήθηκαν σε δοχεία κυλινδρικής γεωμετρίας διαμέτρου 55mm και ύψους 20mm, θεωρώντας πως η ραδιενέργεια είναι ομογενώς κατανομημένη στα δείγματα, ενώ η διάρκεια κάθε μέτρησης ήταν μέχρι 200000 sec.

#### 4 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Στον πίνακα 2 παρουσιάζονται οι τιμές των λόγων  $^{226}\text{Ra}/^{238}\text{U}$  από τη σειρά του  $^{238}\text{U}$  και  $^{228}\text{Th}/^{228}\text{Ra}$  από τη σειρά του  $^{232}\text{Th}$  των εξετασθέντων δειγμάτων. Η θέση των παραπάνω ραδιονουκλιδίων στις ραδιενεργές σειρές του  $^{238}\text{U}$  και  $^{232}\text{Th}$  παρουσιάζεται στο σχήμα 2. Εξαιτίας της έλλειψης δεδομένων για τις ενεργότητες των ραδιονουκλιδίων που προηγούνται του  $^{226}\text{Ra}$  στη σειρά του  $^{238}\text{U}$ , δεν μπορεί να βγει κάποιο συμπέρασμα για το αν τα ζεύγη  $^{238}\text{U}$ - $^{234}\text{U}$ ,  $^{234}\text{U}$ - $^{230}\text{Th}$  και  $^{230}\text{Th}$ - $^{226}\text{Ra}$  βρίσκονται σε κατάσταση ισορροπίας μεταξύ τους. Συνεπώς, δεδομένου ότι η ηλικία όλων των εξεταζόμενων δειγμάτων είναι σαφώς μεγαλύτερη του 1 Ma, για τα δείγματα που εμφανίζουν λόγο  $^{226}\text{Ra}/^{238}\text{U}$  στατιστικά σημαντικά διαφορετικό από τη μονάδα, θε-

ωρείται ότι το ισοτοπικό σύστημα της σειράς του  $^{238}\text{U}$  των δειγμάτων επηρεάστηκε από δευτερογενείς διαδικασίες στο διάστημα από περίπου 1 Ma - 10 ka μέχρι σήμερα, χρόνος ο οποίος είναι αρκετός ώστε να επιτρέψει το διαχωρισμό μεταξύ των ισοτόπων και τη διατήρηση της διαταραχής στη ραδιενεργό ισορροπία. Αντίστοιχα, πετρώματα που έχουν λόγο  $^{226}\text{Ra}/^{238}\text{U}=1$  είναι πραγματικά αναλλοίωτα, ή δεν έχουν επηρεαστεί από υπόγεια νερά κατά το παραπάνω διάστημα (Gascoyne & Miller 2001).

Πίνακας 2. Τιμές του  $^{226}\text{Ra}/^{238}\text{U}$  και  $^{228}\text{Th}/^{228}\text{Ra}$  για τα εξεταζόμενα δείγματα.

Περιοχή	Δείγμα	$^{226}\text{Ra}/^{238}\text{U}$	$^{228}\text{Th}/^{228}\text{Ra}$	
Ξάνθη	GAE-1	1,13	0,95	
	GAE-9	0,94	0,98	
	GAE-11	0,72	1,16	
	XMZ-501	0,96	0,98	
	X-270	1,09	0,95	
	NG-5	-	-	
	MZ-500	0,92	1,06	
	X-602	1,02	1,04	
	Βαρνούτσας	L-13	0,92	0,97
		MP-5	0,98	0,96
P-5		0,95	0,97	
I-3		0,89	0,95	
T-10		1,02	1,02	
P-7		0,66	0,97	
KR-9		1,00	1,01	
Μαρώνεια		MP-12	0,79	0,97
		MP-34	0,92	0,98
	MP-3	0,97	1,00	
	MP-6	1,09	0,95	
	MP-38	0,96	0,98	
	MP-53	1,03	1,02	
	MP-77	1,09	0,99	
	MP-90	1,18	0,99	
	MR-11	1,10	1,05	
	Καστοριά	PE-11	0,90	1,00
TH-5		0,94	1,04	
Σιθωνία	STH-162	0,81	0,97	
	STH-170	0,89	0,93	
	STH-9	0,94	1,03	
	STH-5	0,93	1,00	
	STH-6	0,93	1,05	
	STH-13	1,37	0,95	
	STH-118	1,11	1,00	
	STH-450	1,14	1,01	
	Βροντού	SB-36	0,97	0,99
SB-41		1,02	0,97	
SB-50		0,99	1,01	
SB-55			1,11	
L-4		1,23	1,03	
B-7		1,04	0,92	
TS-10		0,90	0,95	
Ελατιά		D-5	0,89	1,01
	D-8b	0,98	1,00	
	D-15	0,92	0,98	
	DSK-17	0,95	1,04	
	A-13	1,08	1,00	
	H-9	0,94	0,98	
	Γρανίτης	G-2	1,37	0,96
G-6		1,13	0,99	
Πανόραμα	PR-27	1,17	1,05	
	P-6	0,98	1,01	
Φίλιπποι	YD-12	1,40	1,03	
Μουριές	MP-500	0,77	1,02	
	MP-105	0,82	1,00	
	MP-501	0,92	1,00	
Λεπτοκαρυά-Κίρκη	L-23a	1,10	1,07	
Μονοπήγαδο	MO-4	0,83	1,00	
	MO-41	0,94	0,95	
Αρναία	ARN-3	0,74	1,00	
	ARN-9	0,80	0,97	
	ARN-12	0,65	0,99	
Φανός	FN-51	0,85	0,97	
	F-5	0,69	0,98	
	MD-2	0,64	1,00	
	FP-1	0,81	0,97	
Σαμοθράκη	XX-2	0,94	1,01	
	RF-24	0,97	0,97	

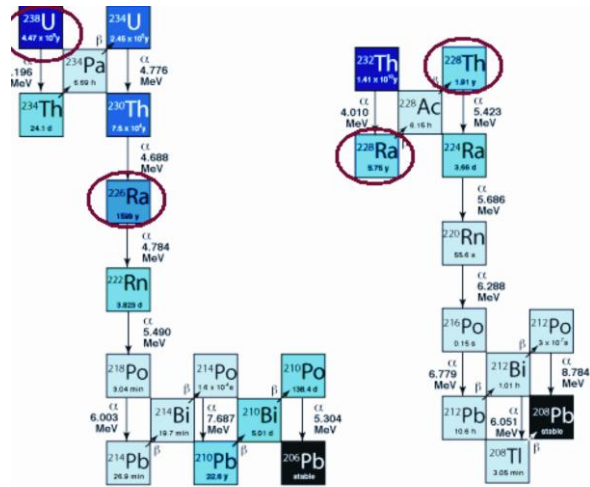
Πίνακας 2. Συνέχεια...

Καβάλα	KB-31	1,12	1,01
	KB-6	0,92	1,06
	KB-33	0,93	1,05
	K-36	0,82	0,99
	K-42	0,92	0,99
	KB-1	0,90	1,15
	K-32	0,92	1,04
K-38	0,70	1,01	
Ιερισσός	IERP-1	0,79	1,05
Στρατώνι	STR-1	0,73	0,98
Άγιο Όρος	AO-9	0,94	1,00
	AO-27	0,83	1,05
	AO-127	0,78	1,04
	AO-57	1,17	1,01
Φλαμούρι	FL-1	0,89	0,92
	FL-2	0,93	1,00
3 Βρύσες	3BR-102	0,61	0,94
	3BR-1	1,26	1,02
	CHAL-1	0,88	1,06
Χαλάσματα	PLH-1	1,25	1,04
	PLH-2	1,10	1,15
	KR-1	0,92	1,02
Τήνος	FAL-1	1,13	1,09
	FAL-2	1,33	1,03
Μύκονος	TUM-1	0,37	0,99
	PLM-1	1,13	0,99
Πάρος	NP-2	0,96	1,06
	KP-1	0,96	1,04
Νάξος	APN-1	1,01	1,01
	AAN-1	0,87	1,02
	KAN-1	1,06	1,06
	VN-1	1,01	0,99
Ικαρία	API-2	0,90	1,04
	AI-1	1,26	1,02
	KI-2	0,92	1,05
	MI-1	0,94	1,04
	PI-1	1,02	0,97
	KI-1	1,10	1,05
	XI-3	1,17	0,95
Σέριφος	KAS-1	1,02	1,07
	KS-1	0,84	1,06
	XS-1	0,97	1,02
Λαύριο	L-1	0,94	1,04
Καστανιά	KST-20	0,97	0,98
	KST-5	1,36	1,00
Πατίκιο Όρος	P-108	0,79	1,02
	P-220	0,77	1,05
	P-115	0,75	1,04
Δεσκάτη	DESK05	0,76	1,03
Παλιός Άγιος Αθανάσιος	PAA-1	0,87	1,04
Δήλος	DEL-1	0,95	1,05
	DEL-2	0,93	1,04
Κασσιτερές	PKS-1	1,41	1,00
Πεύκη (Παρανέστι)	49	0,80	0,99
Τυπική Απόκλιση		0,27	0,04

Σε δείγματα με λόγο  $^{226}\text{Ra}/^{238}\text{U} > 1$ , το  $^{238}\text{U}$  έχει αποπλυθεί και μεταφερθεί ή το  $^{226}\text{Ra}$  έχει αποθεθεί. Η απόθεση και ο εμπλουτισμός του  $^{226}\text{Ra}$  μπορεί να γίνει τοπικά και μπορεί να οφείλεται σε μίξη θαλάσσιου με επιφανειακό νερό (Gascogne & Schwarcz 1986). Όσο υψηλότερος είναι ο λόγος  $^{226}\text{Ra}/^{238}\text{U}$ , τόσο υψηλότερη είναι η διαταραχή του ισοτοπικού συστήματος εξαιτίας της διήθησης του νερού στο πέτρωμα διαμέσου ρωγμών ή ζωνών αποσάθρωσης (Perez del Villar et al. 1996). Γενικά, η κατάσταση διαταραχής της μόνιμης ραδιενεργού ισορροπίας μεταξύ  $^{226}\text{Ra}$  και  $^{238}\text{U}$ , καταδεικνύει εκλεκτική απόθεση του  $^{230}\text{Th}$  ή του  $^{226}\text{Ra}$ , τα οποία είναι λιγότερα διαλυτά στο νερό από το U (Ibrahiem 2003). Αντίθετα, σε δείγματα με  $^{226}\text{Ra}/^{238}\text{U} < 1$  η περισσεια του  $^{238}\text{U}$  οφείλεται πιθανόν στη μεταφορά και την απόθεση του σε εκείνη τη θέση.

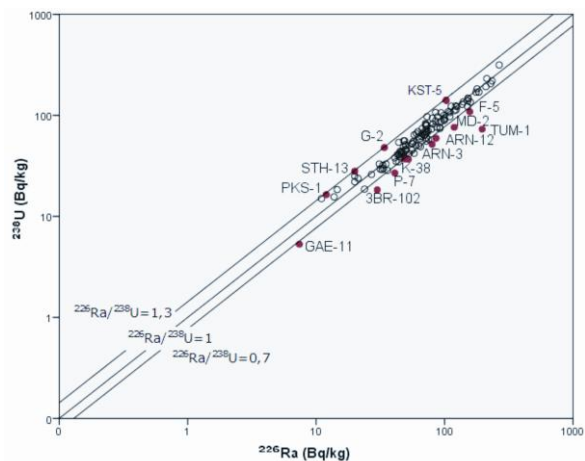
Σχετικά με τη σειρά του  $^{232}\text{Th}$ , η ύπαρξη μόνιμου ραδιενεργού ισορροπίας μεταξύ του  $^{228}\text{Ra}$  και του  $^{228}\text{Th}$ , δείχνει ότι το ισοτοπικό σύστημα παρέμεινε κλειστό για περισσότερα από 40 a, δηλαδή όσο είναι

περίπου το διπλάσιο της ημιπεριόδου ζωής του  $^{228}\text{Th}$  (Santos & Marques 2007).



Σχήμα 2. Οι ραδιενεργές σειρές του  $^{238}\text{U}$  και του  $^{232}\text{Th}$ . Μέσα σε κόκκινο κύκλο βρίσκονται τα ισότοπα που εξετάζονται.

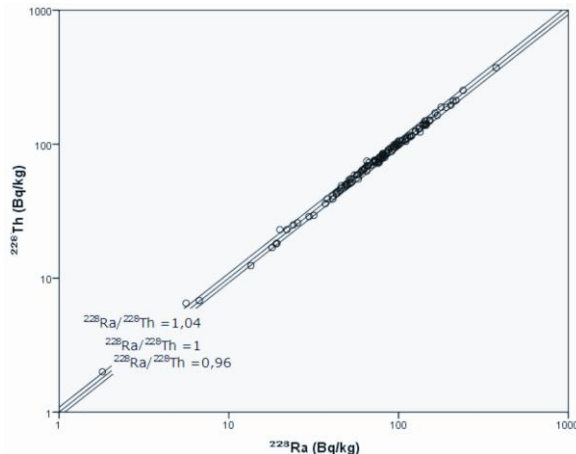
Στο σχήμα 3 παρουσιάζεται σε λογαριθμική μορφή η συσχέτιση μεταξύ της ειδικής ενεργότητας (Bq/kg) του μητρικού  $^{238}\text{U}$  και του προϊόντος διάσπασής του  $^{226}\text{Ra}$  για τα δείγματα, σε σχέση με τη γραμμική ισορροπίας  $^{226}\text{Ra}/^{238}\text{U} = 1$  και τις ευθείες που αντιστοιχούν στο  $\pm 0.3$ . Τα δείγματα που προβάλλονται κοντά στη γραμμή ισορροπίας βρίσκονται σε κατάσταση μόνιμου ραδιενεργού ισορροπίας. Τα ισοτοπικά συστήματα αυτών των δειγμάτων θεωρούνται κλειστά για χρόνο συγκρίσιμο με τις ημιπεριόδους ζωής του  $^{234}\text{U}$  και του  $^{230}\text{Th}$  που παρεμβάλλονται μεταξύ του  $^{238}\text{U}$  και  $^{226}\text{Ra}$  στη ραδιενεργό σειρά του  $^{238}\text{U}$ .



Σχήμα 3. Λογαριθμικό διάγραμμα συσχέτισης του  $^{238}\text{U}$  και  $^{226}\text{Ra}$ . Με κόκκινους κύκλους εμφανίζονται τα δείγματα με την πιο διαταραγμένη ραδιενεργού ισορροπία. Οι ευθείες με κλίση 1,3 ( $^{226}\text{Ra}/^{238}\text{U} = 1,3$ ) και 0,7 ( $^{226}\text{Ra}/^{238}\text{U} = 0,7$ ) παριστάνουν το  $\pm 0.3$

Στο σχήμα 4 παρουσιάζεται σε λογαριθμική μορφή η συσχέτιση μεταξύ της ειδικής ενεργότητας (Bq/kg) του μητρικού  $^{228}\text{Ra}$  και του προϊόντος διάσπασής του  $^{228}\text{Th}$  για τα δείγματα, σε σχέση με τη γραμμική ισορροπίας  $^{228}\text{Ra}/^{228}\text{Th} = 1$  και τις ευθείες που αντιστοιχούν

στο  $\pm\sigma$ . Τα δείγματα που προβάλλονται κοντά στη γραμμή ισορροπίας βρίσκονται σε κατάσταση μόνιμου ραδιενεργού ισορροπίας. Από τον πίνακα 2 και το σχήμα 4, παρατηρούμε πως όλα τα εξεταζόμενα δείγματα προβάλλονται πάνω ή πολύ κοντά στην ευθεία ραδιενεργού ισορροπίας του λόγου  $^{228}\text{Ra}/^{228}\text{Th}$  και στις ευθείες που αντιπροσωπεύουν το  $\pm\sigma$ . Τη μεγαλύτερη εξαίρεση σε αυτό αποτελεί το δείγμα GAE-11 από την Ξάνθη, με λόγο  $^{228}\text{Ra}/^{228}\text{Th}=1,16$ . Αξίζει να σημειωθεί επίσης ότι το συγκεκριμένο δείγμα παρουσίασε διαταραγμένο το ισοτοπικό σύστημα του U, όπως παρουσιάστηκε νωρίτερα.



Σχήμα 4. Λογαριθμικό διάγραμμα συσχέτισης του  $^{228}\text{Ra}$  και  $^{228}\text{Th}$ . Οι ευθείες με κλίση 1,04 ( $^{228}\text{Th}/^{228}\text{Ra}=1,04$ ) και 0,96 ( $^{226}\text{Ra}/^{238}\text{U}=0,96$ ) παριστάνουν το  $\pm\sigma$

Είναι φανερό ότι αντίστοιχα συμπεράσματα για τη διαταραχή της ραδιενεργού ισορροπίας δεν μπορούν να βγουν από τη συσχέτιση μητρικού-θυγατρικού ραδιονουκλιδίου στη σειρά του Th. Το Th είναι γεωχημικά μη ευκίνητο στοιχείο και πολύ δύσκολα επηρεάζεται από δευτερογενείς διαδικασίες, ενώ οι πολύ μικροί ημιπερίοδοι ζωής των ραδιονουκλιδίων της σειράς του Th ( $^{228}\text{Ra}$  5,75 a και  $^{228}\text{Th}$  1,91 a) που εξετάστηκαν δεν επιτρέπουν τη διατήρηση διαταραχών στη ραδιενεργό ισορροπία.

## 5 ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Από τον πίνακα 2 και το σχήμα 3 φαίνεται ότι μεταξύ των δύο ισοτόπων της σειράς του  $^{238}\text{U}$  φαίνεται πως υπάρχει μια πολύ καλή συσχέτιση, γεγονός που υποδηλώνει την ύπαρξη μόνιμου ραδιενεργού ισορροπίας στα περισσότερα δείγματα. Αντίθετα, εκτός ραδιενεργού ισορροπίας και με λόγο  $^{226}\text{Ra}/^{238}\text{U}$  στατιστικά σημαντικό  $<1$  ( $\pm 1\sigma$ ) βρίσκονται τα δείγματα TUM-1 (Μύκονος,  $^{226}\text{Ra}/^{238}\text{U}=0,37$ ), F-5 και MD-2 (Φανός,  $^{226}\text{Ra}/^{238}\text{U}=0,69$  και 0,64 αντίστοιχα), ARN-12 και ARN-3 (Αρναία,  $^{226}\text{Ra}/^{238}\text{U}=0,65$  και 0,74 αντίστοιχα), K-38 (Καβάλα,  $^{226}\text{Ra}/^{238}\text{U}=0,7$ ), P-7 (Βαρνούντας,  $^{226}\text{Ra}/^{238}\text{U}=0,66$ ), 3BR-102 (Τρεις Βρύσες,  $^{226}\text{Ra}/^{238}\text{U}=0,61$ ) και GAE-11 (Ξάνθη,  $^{226}\text{Ra}/^{238}\text{U}=0,72$ ). Από τα παραπάνω προκύπτει ότι τα συγκεκριμένα δείγματα εμπλουτίστηκαν σε U τα τελευταία 1Ma-10ka, πιθανώς μέσω μιας διαδικασίας απόθεσης του U, ή απομάκρυνσης του Ra.

Τα δείγματα που εμφανίζουν στατιστικά σημαντικό λόγο  $^{226}\text{Ra}/^{238}\text{U} >1$  ( $\pm 1\sigma$ ) είναι το G-2 (Γρανίτης,  $^{226}\text{Ra}/^{238}\text{U}=1,37$ ), PKS-1 (Κασσιτερές,  $^{226}\text{Ra}/^{238}\text{U}=1,41$ ) STH-13 (Σιθωνία,  $^{226}\text{Ra}/^{238}\text{U}=1,37$ ), KST-5 (Καστανιά,  $^{226}\text{Ra}/^{238}\text{U}=1,36$ ) και FAL-2 (Τήνος,  $^{226}\text{Ra}/^{238}\text{U}=1,33$ ). Σύμφωνα με τα παραπάνω, στα δείγματα αυτά έχει επέλθει απόπλυση και μεταφορά του U από τη δράση υδατικών διαλυμάτων ή εμπλουτισμό σε  $^{226}\text{Ra}$ .

Όλα τα παραπάνω δείγματα παρουσιάζονται φαινομενικά αναλλοίωτα, εκτός από την παρουσία σε ορισμένα από αυτά καολινίωσης ή και σερικιτίωσης, σε βαθμό όμως όχι μεγαλύτερο αυτού που εμφανίζεται στα υπόλοιπα δείγματα. Εφόσον η διαταραχή της μόνιμης ραδιενεργού ισορροπίας στα παραπάνω δείγματα έγινε πρόσφατα στο γεωλογικό χρόνο, τα αίτια θα πρέπει να αναζητηθούν στη διαλυτότητα και τη γεωχημεία του U σε χαμηλές θερμοκρασίες. Έντονη απόπλυση και μεταφορά του U ως  $\text{U}^{+6}$  σε χαμηλές θερμοκρασίες, παρατηρείται παρουσία κάποιων ανιόντων όπως  $\text{F}^-$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{CO}_3^{2-}$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  και  $\text{PO}_4^{3-}$  ή σε  $\text{pH}<4$ . Συνεπώς, τέτοιες συνθήκες πιθανολογείται ότι επικράτησαν στα δείγματα με  $^{226}\text{Ra}/^{238}\text{U}>1$ . Αντίθετα, παρουσία αλκαλικού pH, και απουσία όλων των παραπάνω ανιόντων εκτός του  $\text{PO}_4^{3-}$ , προκαλούν μείωση του λόγου  $^{226}\text{Ra}/^{238}\text{U}$  σε τιμές  $<1$ .

Είναι φανερό ότι αντίστοιχα συμπεράσματα για τη διαταραχή της ραδιενεργού ισορροπίας δεν μπορούν να βγουν από τη συσχέτιση μητρικού-θυγατρικού ραδιονουκλιδίου στη σειρά του Th. Το Th είναι γεωχημικά μη ευκίνητο στοιχείο και πολύ δύσκολα επηρεάζεται από δευτερογενείς διαδικασίες, ενώ οι πολύ μικροί ημιπερίοδοι ζωής των ραδιονουκλιδίων της σειράς του Th ( $^{228}\text{Ra}$  5,75 a και  $^{228}\text{Th}$  1,91 a) που εξετάστηκαν δεν επιτρέπουν τη διατήρηση διαταραχών στη ραδιενεργό ισορροπία.

## 6 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Μεταξύ των δύο ραδιονουκλιδίων της σειράς του  $^{238}\text{U}$  ( $^{238}\text{U}$  και  $^{226}\text{Ra}$ ) που μελετήθηκαν φαίνεται πως υπάρχει μια πολύ καλή συσχέτιση, γεγονός που υποδηλώνει την ύπαρξη μόνιμου ραδιενεργού ισορροπίας στα περισσότερα δείγματα. Αντίθετα, μικρός αριθμός δειγμάτων εμφανίζεται να μην παρουσιάζει μόνιμη ραδιενεργό ισορροπία με  $^{226}\text{Ra}/^{238}\text{U}<1$ . Τα δείγματα αυτά εμπλουτίστηκαν σε U τα τελευταία 1 Ma-10 ka με διαδικασίες απόθεσης του U ή απομάκρυνσης του Ra. Στα δείγματα που εμφανίζουν  $^{226}\text{Ra}/^{238}\text{U}>1$ , θεωρείται ότι στη μείωση του U συνέβαλε η απομάκρυνσή του από υδατικά διαλύματα. Η διαταραχή της μόνιμης ραδιενεργού ισορροπίας στα παραπάνω δείγματα πιθανότατα οφείλεται στη δράση του νερού, υπόγειου ή θαλάσσιου, ανερχόμενο πιθανότατα μέσω διαρρήξεων και με την επίδραση ή μη του μετεωρικού νερού.

## 7 ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Ευχαριστίες οφείλονται στον Καθηγητή κ. Γ. Χριστοφίδη και στον Αναπληρωτή Καθηγητή κ. Α. Κορωναίο του Τμήματος Γεωλογίας του Α.Π.Θ. για την παραχώρηση δειγμάτων και γεωχημικών δεδομένων, όπως επίσης και στο Εργαστήριο Εργαστήριο Ατομικής και Πυρηνικής Φυσικής του τομέα Πυρηνικής Φυ-

σικής και Φυσικής Στοιχειωδών Σωματιδίων του τμήματος Φυσικής του Α.Π.Θ. και ειδικά στον Καθηγητή κ. Κωνσταντίνο Παπαστεφάνου και στον Επίκουρο Καθηγητή κ. Στυλιανό Στούλο για τις μετρήσεις των ραδιονουκλιδίων.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Καραβασίλη Ε., 2004. Ορυκτολογία, Πετρογραφία και Ραδιενέργεια Ελληνικών γρανιτικών πετρωμάτων. Διατριβή ειδίκευσης. Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης. 105σ.
- Κορωναίος Α., 1991. Ορυκτολογία, πετρολογία και γεωχημεία του πλουτωνίτη του Ανατ. Βαρνούντα (ΒΔ Μακεδονία). Διδακτορική διατριβή, 451 σ.
- Παπαδόπουλος Α. 2011. Φυσική ραδιενέργεια σε σχέση με την ορυκτολογία, γεωχημεία ουρανίου και θορίου μαγματικών πετρωμάτων από τον ελλαδικό χώρο: Συμβολή στη χρήση φυσικών δομικών υλικών. Διδακτορική Διατριβή, 283σ.
- Παπαδοπούλου Λ., 2003. Ισορροπία ορυκτών φάσεων, συνθήκες κρυστάλλωσης και εξέλιξη του πλουτωνίτη της Μαρώνειας, Θράκη. Διδακτορική διατριβή, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, 4 – 94.
- Σκλαβούνος Σ., 1981. Ο γρανίτης του Παρανεστίου (Ορυκτολογία – Πετρογραφία). Διδακτορική Διατριβή, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Επιστ. Επετ. Της Φυσικομαθηματικής Σχολής, Παράρτημα 33, Τόμος 20, 175 σ.
- Τσούτσικα Π., 1999. Ορυκτολογία, Πετρολογία και Γεωχημεία του πλουτωνίτη της Καστανιάς (Βέρμιο). Διπλ. Εργ. Τμήμα Γεωλογίας Α.Π.Θ. 136σ.
- Christofides G, Soldatos T, Koroneos A., 1990b. Geochemistry and evolution of the Fanos granite, N. Greece. *Mineralogy and Petrology* 43: 49–63.
- Christofides G., Neiva A. M.R., Soldatos T., and Eleftheriadis G., 1995, Petrology of the Kavala pluton (eastern Macedonia, Greece): Geological Society of Greece, Special Publication No. 4, Proceedings of the XV Congress of the Carpatho-Balkan Geological Association, September 1995, Athens, Greece, 489-494.
- Christofides G, Koroneos A, Soldatos T, Eleftheriadis G, Kiliyas 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, 73–89.
- Christofides G, Eleftheriadis G, Esson J, Soldatos T, Koroneos A, Brocker M., 2000b. The evolution of the Samothraki granitic pluton (N. Aegean sea, Greece): geochronology, chemical and isotopic constraints for AFC modeling. In Proceedings to the Third International Conference on the Geology of the Eastern Mediterranean, Panayides I, Xenophontos C, Malpas J (eds). Nicosia: Cyprus, 193–209.
- 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.
- Dosseto A., Bourdon B., Turner S.P., 2008. Uranium-series isotopes in river materials: insights into the timescales of erosion and sediment transport. *Earth Planet. Sci. Lett.* 265 (1–2), 1–17.
- Gascoyne M., 1992. The geochemistry of the actinides and their daughters. In: Ivanovich, M. and Harmon, R.S. (eds), *Uranium-series Disequilibrium: Applications to Earth, Marine, and Environmental Sciences*, 2nd Edn, pp. 3458. Clarendon Press, Oxford.
- Gascoyne M. & Schwarcz H.P., 1986. Radionuclide migration over recent geologic time in a granitic pluton. *Chem. Geol.*, 59, 75-85.
- Gascoyne M. & Miller N.H., 2001. Uranium-series disequilibrium in tuff and granite: Hydrogeological implications. Proceedings of the 9th International High-Level Radioactive Waste Management Conference. American Nuclear Society, La Grange Park, Ill., CD-ROM file 06-4.pdf.
- Ibrahiem N.M., 2003. Radioactive disequilibrium in the different rocktypes in Wadi Wizr, the Eastern Desert of Egypt. *Applied Radiation and Isotopes* 58, 385–392.
- Ivanovich M. & Harmon R.S., 1982. *Uranium Series Disequilibrium: Applications to Environmental Problems*. Clarendon Press, Oxford.
- Ivanovich M. & Harmon R.S., 1992. *Uranium-series Disequilibrium: Applications to Earth, Marine, and Environmental Sciences*, 2nd Edn. Clarendon Press, Oxford.
- Janousek V., Farrow C. & Erban V., 2008. *Geochemical Data Toolkit for Windows*. Available on <http://www.gla.ac.uk/gcdkit>, 188p.
- McKenzie, D., 1985.  $^{230}\text{Th}$ – $^{238}\text{U}$  disequilibrium and the melting processes beneath ridge axes. *Earth and Planetary Science Letters* 72, 149–157.
- Osmond J.K. & Cowart J.B., 1982. Groundwater. In: Ivanovich, M. & Harmon, R.S. (eds), *Uranium Series Disequilibrium: Applications to Environmental Problems*, pp. 202–245. Clarendon Press, Oxford.
- Osmond J.K. & Cowart J.B., 1976. The theory and uses of natural uranium isotopic variations in hydrology. *Atomic Energy Review*, 14, 621-678.
- Osmond J.K. & Cowart J.B., 1982. Groundwater. In: Ivanovich, M. & Harmon, R.S. (eds), *Uranium Series Disequilibrium: Applications to Environmental Problems*, pp. 202–245. Clarendon Press, Oxford.
- Osmond J. K., Cowart J. B. & Ivanovich M., 1983. Uranium isotopic disequilibrium in ground water as an indicator of anomalies, *Intern. J. Appl. Radiat. Isot.* 34, 283-308.
- Pe-Piper G., Piper D.J.W., 2002. *The igneous rocks of Greece: the anatomy of an orogen*, Borntraeger, Berlin, 645pp.
- Perez del Villar L., Crespo M. T., Pardillo J., Pelayo M. & Galan M. P., 1996. U and Th Series Disequilibrium in Unaltered and Hydrothermally-altered Granites from the E1 Berrocal Site (Spain): Weathering Effects *Appl. Radiat. Isot.* Vol. 47, No. 9/10, pp. 1115-1119.
- Santos R.N., Marques L.S., 2007. Investigation of  $^{238}\text{U}$ – $^{230}\text{Th}$ – $^{226}\text{Ra}$  and  $^{232}\text{Th}$ – $^{228}\text{Ra}$ – $^{228}\text{Th}$  radioactive disequilibria in volcanic rocks from Trindade and Martin Vaz Islands (Brazil´ Southern Atlantic Ocean). *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 161, 215–233.
- Scott R.D., McKenzie A.B. & Alexander W.R., 1992. The interpretation of  $^{238}\text{U}$ – $^{234}\text{U}$ – $^{230}\text{Th}$ – $^{226}\text{Ra}$  disequilibria produced by rock-water interactions. *Journal of Geochemical Exploration*, 45, 323-343.
- Streckeisen A. & Le Maitre R.W., 1979. A chemical approximation to the modal QAPF classification of the igneous rocks. *N. Jb. Min. Abh.*, 136, 169-206.