

## ΠΡΟΓΝΩΣΗ ΣΕΙΣΜΙΚΩΝ ΔΟΝΗΣΕΩΝ ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΤΗΣ ΒΟΡΕΙΑΣ ΕΥΒΟΙΑΣ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΙΣ ΜΕΤΑΒΟΛΕΣ ΤΗΣ ΠΕΡΙΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΤΟΥ ΡΑΔΟΝΙΟΥ ΣΤΑ ΥΠΟΓΕΙΑ ΝΕΡΑ.

Π. Μητρώπουλος<sup>1</sup>, Κ. Notsu<sup>2</sup>, Ν. Δεληήμπασης<sup>1</sup>, Ν. Κακαβάς<sup>3</sup> και Π. Βουδούρης<sup>1</sup>

<sup>1</sup>. Πανεπιστήμιο Αθηνών, Τμήμα Γεωλογίας

<sup>2</sup>. University of Tokyo, Department of Earthquake Chemistry

<sup>3</sup>. ΙΓΜΕ, Μεσογείων 70, Αθήνα 11527

### ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σημαντικές μεταβολές της συγκέντρωσης του Ραδονίου στα υπόγεια νερά, παρατηρήθηκαν στις 29/7/2003, στο σταθμό μέτρησης των Καμμένων Βούρλων. Οι μεταβολές αυτές είναι αποτέλεσμα των προσεισμικών τάσεων που αναπτύσσονται και έχουν σαν αποτέλεσμα τον προσωρινό εμπλουτισμό του υδροφόρου ορίζοντα σε ραδόνιο. Για την ύπαρξη των μεταβολών αυτών ενημερώθηκε αμέσως ο ΟΑΣΠ. Στις 3/8/2003 καταγράφηκε, σε διάστημα μερικών ωρών ένας σημαντικός αριθμός σεισμικών δονήσεων στην Βόρεια Εύβοια. Τα επίκεντρα των σεισμικών αυτών δονήσεων τοποθετούνται στην νοητή γραμμή μεταξύ του επίκεντρου του μεγάλου σεισμού της Σκύρου και της θέσης του σταθμού μέτρησης Ραδονίου στα Καμμένα Βούρλα. Δηλαδή στην προέκταση του ρήγματος του Βορείου Αιγαίου.

Στις 23/1/2003, παρουσιάστηκαν στον ίδιο σταθμό μέτρησης 3 σημαντικές μεταβολές του Ραδονίου. Ειδοποιήθηκε ο ΟΑΣΠ για επικείμενη σεισμική δραστηριότητα στη Βόρεια Εύβοια. Στις 29 Ιανουαρίου έγιναν πράγματι τρεις σεισμικές δονήσεις με το επίκεντρο τους να ευρίσκεται πολύ κοντά στο σταθμό μέτρησης των Καμμένων Βούρλων.

Στις 2/2/2003, παρουσιάστηκε νέα σημαντική μεταβολή του Ραδονίου στον Σταθμό των Καμμένων Βούρλων που επίσης συνοδεύτηκε από σεισμική δόνηση (7/2/2003) με το ίδιο επίκεντρο. Στις 12/2/2003 σε επιστολή που απευθύνουμε στην διοίκηση του ΟΑΣΠ, αναφερόταν η έναρξη νέας μεταβολής του Ραδονίου που επίσης κατέληξε σε σεισμική δόνηση με επίκεντρο στην Β. Εύβοια απέναντι από τον σταθμό των Καμμένων Βούρλων.

Οι μεταβολές που καταγράφονται στο σύστημα μέτρησης Ραδονίου που είναι τοποθετημένο στην περιοχή των Καμμένων Βούρλων, προηγούνται κατά 4-6 ημέρες, σεισμικών δονήσεων που συνδέονται με την προέκταση του ρήγματος του Β. Αιγαίου προς την Στερεά Ελλάδα και έχουν το επίκεντρό τους στην Β. Εύβοια. Η μέθοδος φαίνεται ότι θα αποτελέσει ένα σημαντικό εργαλείο στην βραχυπρόθεσμη πρόγνωση σεισμικών δονήσεων, σε τοπικό επίπεδο.

### I ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι μεταβολές στην περιεκτικότητα του Ραδονίου στα υπόγεια νερά πριν από τους σεισμούς παρατηρήθηκαν για πρώτη φορά κατά τον μεγάλο σεισμό της Τασκένδης το 1966 (Utiyof & Mavashen, 1971). Οι μεταβολές αυτές θεωρούνται από τότε σαν ένα από τα σημαντικότερα πρόδρομα φαινόμενα των σεισμών. Χρησιμοποιήθηκαν για την επιτυχή πρόγνωση των μεγάλων σεισμών της Κίνας το 1975 και 1976 (Group of Hydrochemistry, Seismological Brigade of Hebei Province, 1976).

Σημαντικές μελέτες της μεταβολής της περιεκτικότητας του Ραδονίου στα υπόγεια νερά με στόχο την πρόγνωση σεισμών γίνονται στην Ιαπωνία από το 1973, κυρίως από το Laboratory of Earthquake Chemistry του Πανεπιστημίου του Tokyo με επικεφαλής τους Καθηγητές Η. Wakita και Κ. Notsu. Το 1977, ανέπτυξαν μέθοδο αυτόματης, συνεχούς μέτρησης των μεταβολών της περιεκτικότητας του Ραδονίου στην αέρια φάση που διαχωρίζεται, με ειδική συσκευή, από τα υπόγεια νερά

μιας περιοχής (Noguchi & Wakita 1977) και με ταυτόχρονη αυτόματη μέτρηση και άλλων παραμέτρων (θερμοκρασία, ύψος νερού κλπ).

Από το 1977 μέχρι σήμερα η μέθοδος αυτή αναπτύσσεται συνεχώς και έχουν προκύψει σημαντικά αποτελέσματα που έχουν δημοσιευτεί σε διεθνή περιοδικά (Wakita et al., 1980, Wakita et al., 1989, Wakita et al., 1991, Igarashi & Wakita, 1991, Notsu et al., 1991). Ηδη μόνο στην ευρύτερη περιοχή του Tokyo λειτουργούν, υπό την ευθύνη του Laboratory of Earthquake Chemistry του Πανεπιστημίου του Tokyo, 18 σταθμοί παρακολούθησης των μεταβολών του Ραδονίου σε υπόγεια νερά. Η συγκεκριμένη μέθοδος θεωρείται η πλέον κατάλληλη για την ευρύτερη περιοχή του Tokyo επειδή σε αντίθεση με άλλες μεθόδους (ηλεκτρικές, μαγνητικές κλπ) δεν επηρεάζεται από τις ανθρωπίνες δραστηριότητες.

Τον Σεπτέμβριο του 1998, στα πλαίσια ερευνητικού προγράμματος που χρηματοδοτείται από την Ιαπωνική Κυβέρνηση και αφορά την μελέτη των μεταβολών της περιεκτικότητας του Ραδονίου (Rn) στην αέρια φάση υπόγειων νερών πριν από σεισμούς, τοποθετήθηκε συσκευή συνεχούς μέτρησης του Rn, σε μία από τις γεωτρήσεις από τις οποίες υδρεύεται η πόλη της Αταλάντης. Από τις μετρήσεις προέκυψε ότι υπήρχαν χαρακτηριστικές μεταβολές στις τιμές του Rn πριν από όλες τις σεισμικές δονήσεις που έγιναν στην περιοχή του ρήγματος της Αταλάντης (Μητρόπουλος et al, 2001). Η προσωρινή αύξηση της συγκέντρωσης του ραδονίου στον υπόγειο υδροφόρο ορίζοντα, οφείλεται στην απελευθέρωση του από τα περιβάλλοντα πετρώματα, στα οποία είναι εγκλωβισμένο χωρίς να σχηματίζει ενώσεις, λόγω των ελαστικών τάσεων που αναπτύσσονται πριν από την εκδήλωση ενός σεισμού.

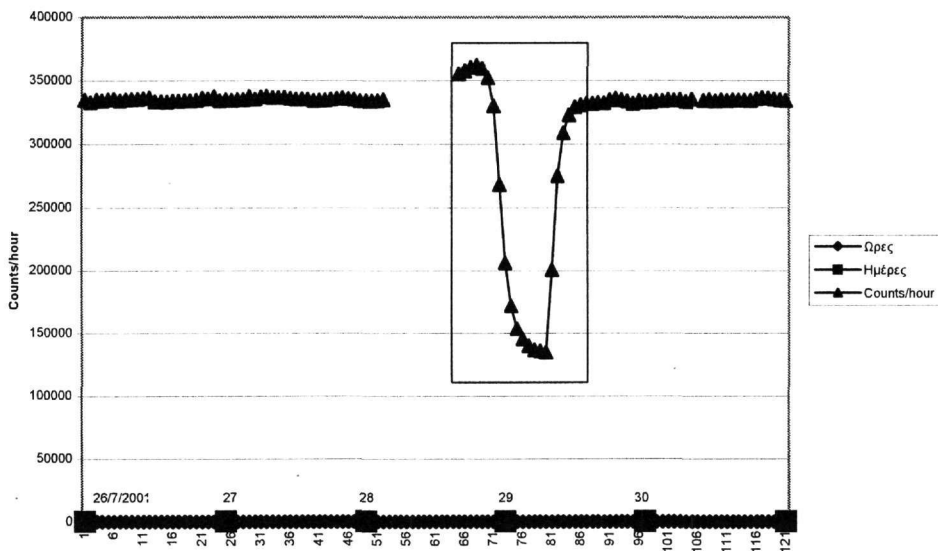
Με βάση τα παραπάνω σημαντικά αποτελέσματα, και με την χρηματοδότηση της Ιαπωνικής Κυβέρνησης και του ΟΑΣΠ, τοποθετήθηκαν συσκευές μέτρησης Ραδονίου σε δεύτερη γεώτρηση, δυτικά της Αταλάντης, στα Καμμένα Βούρλα και στο Κρουονέρι Αττικής στην περιοχή του ρήγματος της Πάρνηθας.

Στην παρούσα εργασία παρουσιάζονται σημαντικά αποτελέσματα μετρήσεων που ελήφθησαν στο σταθμό μέτρησης Ραδονίου των Καμμένων Βούρλων.

## 2 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

Το σύστημα μέτρησης Ραδονίου των Καμμένων Βούρλων είναι τοποθετημένο, από το 2000, σε φυσική πηγή που χρησιμοποιείται από το Δήμο για την υδροδότηση της πόλης.

Σχήμα 1: Καμμένα Βούρλα (Ιούλιος 2001)



ΠΙΝΑΚΑΣ 1. Κατάλογος σεισμών από 1/8/01-3/8/01 (από Γεωδ. Ινστ. Εθν. Αστερ.)

Date	Time	North	East	Depth	M
	(GMT)	(N)	(E)	(km)	(Local)
2001 AUG 3	00 21 11.5	38.77	23.57	10	2.7
2001 AUG 3	05 00 20.2	38.80	23.59	10	2.9
2001 AUG 3	20 54 6.9	38.83	23.53	10	2.8
2001 AUG 3	21 08 5.4	38.82	23.54	5	2.8
2001 AUG 3	23 40 20.7	38.73	23.43	10	2.8

Τον Ιούλιο του 2001, την περίοδο μετά τον μεγάλο σεισμό της Σκύρου η περιεκτικότητα του Ραδονίου στο νερό παρουσίασε σημαντική μεταβολή ( Σχ. 1). Η μεταβολή αυτή δεν μπορούσε να συνδέεται ούτε τοπικά ούτε χρονικά με τον σεισμό της Σκύρου. Για την ύπαρξη της μεταβολής αυτής ενημερώθηκε αμέσως ο υπεύθυνος από τον ΟΑΣΠ για την παρακολούθηση του ερευνητικού προγράμματος Δρ. Π. Σιβέντας.

Όπως φαίνεται από τον κατάλογο των σεισμών εκείνης της περιόδου ( Γεωδυναμικό Ινστιτούτο Εθνικού Αστεροσκοπείου), εκτός από τον μεγάλο αριθμό των μετασεισμικών δονήσεων του σεισμού της Σκύρου, την 3<sup>η</sup> Αυγούστου έγινε, σε διάστημα μερικών ωρών ένας σημαντικός αριθμός σεισμικών δονήσεων στην Βόρεια Εύβοια (Πίν. 1). Τα επίκεντρα των σεισμικών αυτών δονήσεων τοποθετούνται στην νοητή γραμμή μεταξύ του επίκεντρου του μεγάλου σεισμού της Σκύρου και της θέσης του σταθμού μέτρησης Ραδονίου στα Καμμένα Βούρλα.

Από γεωλογικές και γεωφυσικές έρευνες που γίνονται στο Τμήμα Γεωλογίας του Πανεπιστημίου Αθηνών (Κράνης, 1999) φαίνεται ότι το ρήγμα του Βορείου Αιγαίου προεκτείνεται προς την περιοχή των Καμμένων Βούρλων. Θεωρήθηκε επομένως πιθανό ότι, οι μεταβολές του Ραδονίου που καταγράφονται στο σύστημα μέτρησης των Καμμένων Βούρλων να οφείλονται σε σεισμικές δονήσεις που συνδέονται με το ρήγμα αυτό.

Στις 23 Ιανουαρίου του 2003, παρουσιάστηκαν 3 σημαντικές μεταβολές του Ραδονίου ( Σχ. 2) στον Σταθμό των Καμμένων Βούρλων. Αμέσως ενημερώθηκε η διοίκηση του ΟΑΣΠ για επικείμενη σεισμική δραστηριότητα στη Βόρεια Εύβοια. Στις 29 Ιανουαρίου έγιναν πράγματι τρεις σεισμικές δονήσεις, με τα επίκεντρό τους να ευρίσκεται πολύ κοντά στο σταθμό μέτρησης των Καμμένων Βούρλων (Πίν. 2).

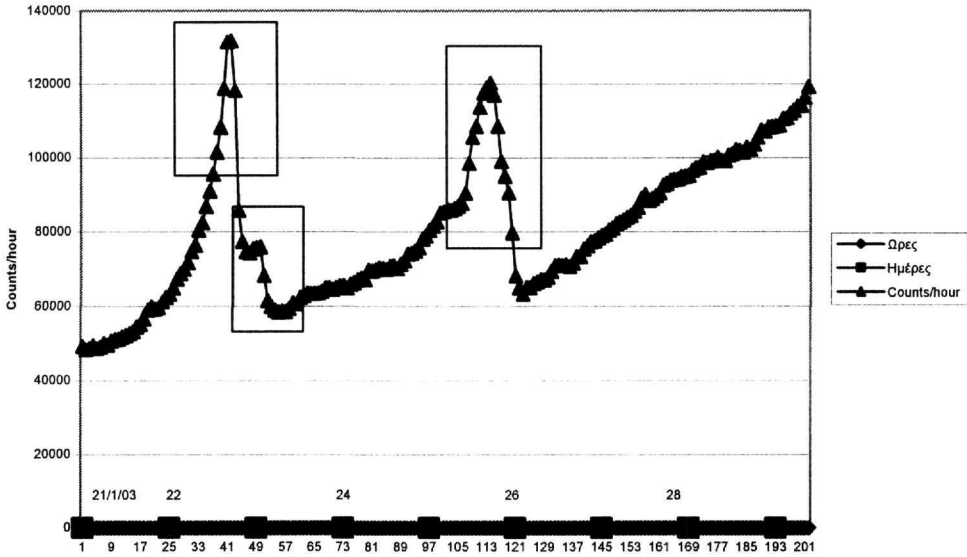
Στις 2 Φεβρουαρίου του 2003, παρουσιάστηκε ακόμη μια σημαντική μεταβολή του Ραδονίου στον Σταθμό των Καμμένων Βούρλων που επίσης συνοδεύτηκε από σεισμική δόνηση (7/2/2003) με το ίδιο επίκεντρο (Πίν. 2).

Στις 12 Φεβρουαρίου σε επιστολή που απευθύνουμε στον ΟΑΣΠ, αναφερόταν η έναρξη νέας σημαντικής μεταβολής του Ραδονίου ( Σχ. 3) που επίσης κατέληξε σε σεισμική δόνηση την 20/2/2003, με επίκεντρο στην Β. Εύβοια απέναντι από τον σταθμό των Καμμένων Βούρλων στην περιοχή των επίκεντρων των σεισμικών δονήσεων της 3/8/2001.

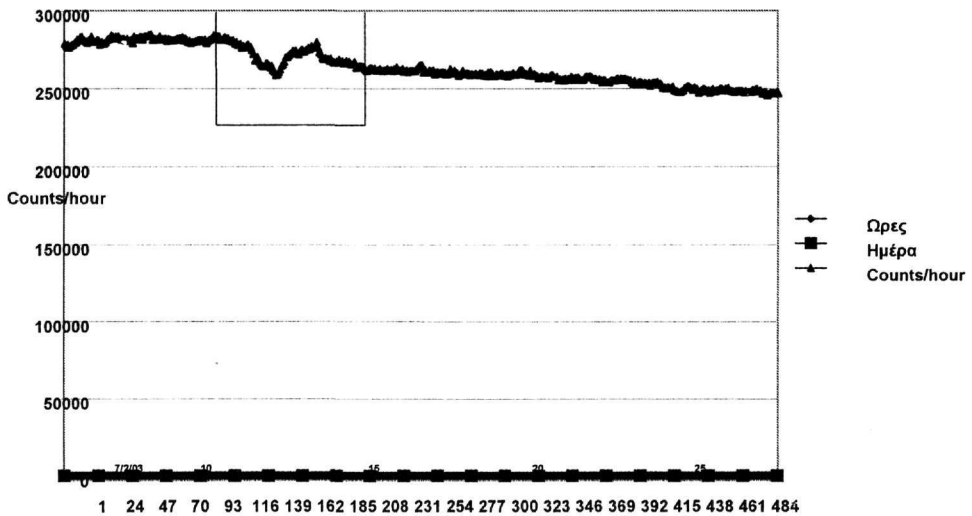
ΠΙΝΑΚΑΣ 2. Κατάλογος σεισμών από 28/1/03-7/2/03 και από 15/2/03-24/2/03 (από Γεωδ. Ινστ. Εθν. Αστερ.)

Date	Time	North	East	Depth	M
	(GMT)	(N)	(E)	(km)	(Local)
2003 JAN 29	02 13 6.3	38.70	22.75	5	2.8
2003 JAN 29	02 44 6.8	38.73	22.68	4	2.7
2003 JAN 29	09 09 3.9	38.75	22.82	13	3.1
2003 FEB 7	13 06 52.8	38.72	22.79	10	3.2
2003 FEB 22	02 23 16.3	38.74	23.47	23	3.5

Σχήμα 2: Καμμένα Βούρλα (Ιανουάριος 2003)



Σχήμα 3: Καμμένα Βούρλα (Φεβρουάριος 2003B)



### 3 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Από τα παραπάνω προκύπτει ότι οι μεταβολές της συγκέντρωσης του Ραδονίου στην αέρια φάση των υπόγειων νερών, που καταγράφονται στο σύστημα μέτρησης που είναι τοποθετημένο στην περιοχή των Καμμένων Βούρλων, προηγούνται κατά 4-6 ημέρες σεισμικών δονήσεων που συνδέονται με την προέκταση του ρήγματος του Β. Αιγαίου προς τη Στερεά Ελλάδα και έχουν το επίκεντρό

τους στην Β. Εύβοια απέναντι από το σημείο που τοποθετείται ο σταθμός μέτρησης. Σημειώνεται, η επιτυχής πρόβλεψη τέτοιων σεισμικών δονήσεων στην περιοχή (Ιανουάριος και Φεβρουάριος 2003).

Αντίστοιχες μεταβολές της συγκέντρωσης του Ραδονίου στην αέρια φάση των υπόγειων νερών παρατηρήθηκαν και στα συστήματα μέτρησης τόσο της Αταλάντης όσο και του Κρουονερίου. Οι μεταβολές αυτές, προηγούνται κατά 4-6 ημέρες σεισμικών δονήσεων που συνδέονται με τα ρήγματα της Αταλάντης και της Πάρνηθας αντίστοιχα. Πρέπει να σημειωθεί ότι και στις τρεις περιοχές (Καμμένα Βούρλα, Αταλάντη, Πάρνηθα) υπάρχει πλήρης αντιστοιχία του αριθμού των σεισμικών δονήσεων ( $M \geq 2.5$ ) με τον αριθμό των μετρούμενων μεταβολών για τις χρονικές περιόδους που είναι σε λειτουργία τα συστήματα μέτρησης του Ραδονίου.

Επόμενο στάδιο της έρευνας είναι η τοποθέτηση τριών συστημάτων μέτρησης σε κάθε περιοχή ώστε να είναι δυνατός ο ακριβής υπολογισμός του μεγέθους των σεισμικών δονήσεων.

Συμπερασματικά, φαίνεται ότι η μέθοδος μπορεί να αποτελέσει ένα εξαιρετικό εργαλείο για την βραχυπρόθεσμη πρόβλεψη σεισμικών δονήσεων σε τοπικό επίπεδο.

## ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Οι συγγραφείς θέλουν να ευχαριστήσουν την Ιαπωνική Κυβέρνηση, τον ΟΑΣΠ και το Ε.Κ. Πανεπιστήμιο Αθηνών, για την χρηματοδότηση της έρευνας. Επίσης τον κ. Ε. Μιχαηλίδη, ηλεκτρονικό του Τομέα Οικονομικής Γεωλογίας και Γεωχημείας του Πανεπιστημίου Αθηνών για την τεχνική επίβλεψη της έρευνας. Τέλος οι συγγραφείς θέλουν να ευχαριστήσουν τους Δημάρχους των Καμμένων Βούρλων, της Αταλάντης και του Κρουονερίου για την συμπαράστασή τους.

## ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- Group of Hydrochemistry, Seismological Brigade of Hebei Province (1976). Studies of forecasting earthquakes in the light of the abnormal variations of Rn concentration in ground water. *Acta Geophys. Sinica*, 18, 279-283.
- Igarashi G. & Wakita H. (1991). Tidal responses and earthquake-related changes in the water level of deep wells. *J. Geophys. Res.*, 96, 4269-4278.
- Κράνης Χ. (1999). Νεοτεκτονική δραστηριότητα ρηξιγενών ζωνών Κεντροανατολικής Στερεάς Ελλάδας (Λοκρίδα). Διδακτορική Διατριβή. Πανεπιστήμιο Αθηνών.
- Μητρόπουλος Π., Notsu K., Δελημπασής Ν. & Κακαβάς Ν., (2001). Μεταβολές της συγκέντρωσης Ραδονίου σε υπόγεια νερά πριν από όλες τις σεισμικές δονήσεις ( $M \geq 2.5$ ), από τον Σεπτέμβριο 1998 έως τον Ιανουάριο 1999, στην περιοχή του ρήγματος της Αταλάντης, Δελτίο της Ελληνικής Γεωλογικής Εταιρίας, 34/4, 1433-1439.
- Noguchi M. & Wakita H. (1977). A method for continuous Measurement of Radon in groundwater for earthquake prediction. *J. Geophys. Res.*, 82, 1353-1357.
- Notsu K., Wakita H., Igarashi G. & Sato T. (1991). Hydrological and geochemical changes related to the 1989 seismic and volcanic activities off the Izu peninsula. *J. Phys. Earth*, 39, 245-254.
- Ulomof V.I. & Mavashev B.Z. (1971). The Tashkent earthquake of 26 April 1966. *Akad. Nauk. Uzbek. SSR FAN*, 188.
- Wakita H., Nakamura Y., Notsu K., Noguchi M. & Asada T. (1980). Radon anomaly: A possible precursor of the 1978 Izu-Oshima-kinkai Earthquake. *Science*, 207, 882-883.
- Wakita H., Igarashi G., Nakamura Y., Sano Y. & Notsu K., (1989). Coseismic Radon changes in groundwater. *Geophys. Res. Lett.*, 16, 417-420.
- Wakita H., Igarashi G. & Notsu K. (1991) An anomalous Radon decrease in groundwater prior to an M6.0 earthquake: A possible precursor? *Geophys. Res. Lett.*, 18, 629-632.

## ABSTRACT

### **EARTHQUAKE PREDICTION IN THE AREA OF N. EVIA ON THE BASIS OF GROUNDWATER RADON CONCENTRATION CHANGES**

P. Mitropoulos<sup>1</sup>, K. Notsu<sup>2</sup>, N. Delibasis<sup>1</sup>, N. Kakavas<sup>3</sup> and P. Voudouris<sup>1</sup>

<sup>1</sup>. *University of Athens, Department of Geology*

<sup>2</sup>. *University of Tokyo, Department of Earthquake Chemistry*

<sup>3</sup> *I.G.M.E., Mesogion Str. 70, 115 27, Athens*

Significant changes in the groundwater radon concentration, were observed on the 29/7/2003, at Kammena Vourla. The radon concentration changes can be attributed to the temporary enrichment of the groundwater by radon from the surrounding rocks due to the action of stress release or stress accumulation prior an earthquake. EPPO was immediately informed for the existence of these changes.

On the 3/8/2003, a significant number of earthquakes in Northern Evia were recorded in an interval of a few hours. The epicentres of the earthquakes were located in the conceivable line between the epicentre of the strong earthquake of Skyros island (July 2001) and the site of the station of radon measurement at Kammena Vourla, on the extension of the Northern Aegean fault.

In the 23/1/2003, in the same station, 3 significant changes of radon concentration were measured EPPO was immediately informed for impending seismic activity in Northern Evia. On the 29<sup>th</sup> of January three earthquakes were recorded. Their epicentres were located in N. Evia, close to the radon measurement. station.

On the 2/2/2003, a new significant radon change occurred at Kammena Vourla followed by an earthquake (7/2/2003). In the 12/2/2003 in a letter that we addressed to the EPPO administration, the beginning of a new radon change was reported which also led to an earthquake with the same epicentre.

The changes that are recorded in the system of radon measurement of Kammena Vourla are precursors of earthquakes, related to the extension of the N. Aegean fault towards the Sterea Hellas and have their epicentre in N. Evia. It seems that the method can be an important tool for local, short term earthquake prediction.