

ΠΕΔΙΟ ΚΡΑΤΗΡΩΝ ΔΙΑΦΥΓΗΣ ΑΕΡΙΩΝ ΥΔΡΟΓΟΝΑΝΘΡΑΚΩΝ ΣΤΟ ΝΑ ΠΑΤΡΑΪΚΟ ΚΑΙ Η ΕΝΕΡΓΟΠΟΙΗΣΗ ΤΟΥΣ ΚΑΤΑ ΤΟΝ ΣΕΙΣΜΟ ΤΗΣ 14/7/1993

Θ. Χασιώτης, Γ. Παπαθεοδώρου και Γ. Φερντινός

ΣΥΝΟΨΗ

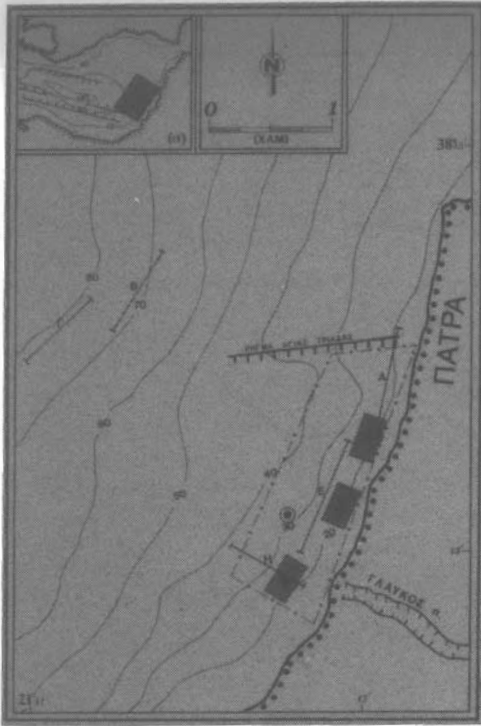
Η θαλάσσια γεωφυσική διασκόπηση της παράκτιας ζώνης του ΝΑ-ίκου Πατραϊκού κόλπου έδειξε ότι ο πυθμένας αποτελείται από 2 ιζηματογενείς ακολουθίες ενώ επιπλέον εντοπίστηκε ένα σημαντικό πεδίο κρατήρων διαφυγής αερίων υδρογονανθράκων. Τα αέρια συγκεντρώνονται στην κατώτερη ακολουθία, η οποία χαρακτηρίζεται από υψηλότερες τιμές γεωτεχνικών ιδιοτήτων έναντι της υπερκείμενης, χωρίς να παρουσιάζει καμία λιθολογική διαφορά με την τελευταία. Θερμοκρασιακές μεταβολές της υδάτινης στήλης λίγο πριν το σεισμό της 14/7/1993 οφείλονται μάλλον σε διαφυγές αερίων, ενώ γενικότερα, η υψηλή σεισμική δράση του Πατραϊκού πιστεύεται ότι είναι ο κύριος παράγων έκλυσης αερίων και σχηματισμού κρατήρων στην περιοχή.

ABSTRACT

Marine geophysical surveys in the SE part of the Gulf of Patras have shown the presence of a large field of pockmarks and that the seabed consist of two sedimentary sequences. Gas accumulates in the lower sequence whose geotechnical properties have higher values than the overlying sequence, although there is no difference in the grain size. It is believed that the gas seepage and the formation of pockmarks in the surveyed area are controlled by the high seismicity of the Patras Gulf. Temperature changes in the water column before the seismic event on the 14th of July 1993 were probably caused by the release of gas.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ - INTRODUCTION

Η παρουσία των αερίων υδρογονανθράκων στα θαλάσσια ιζήματα είναι γνωστή εδώ και πολλά χρόνια (Emery and Hoggan 1958, Aktinson and Richards, 1967). Τις τελευταίες δεκαετίες, θαλάσσιες γεωφυσικές έρευνες από τη βιομηχανία πετρελαίου σε διάφορα υποθαλάσσια περιβάλλοντα, αποσκοπούσαν κυρίως στην ανίχνευση αερίων υδρογονανθράκων στα ιζήματα πλησίον του πυθμένα, για δύο λόγους: (i) διότι η παρουσία τους είναι ενδεικτική για την ύπαρξη υδρογονανθράκων θερμογενούς προέλευσης σε βαθύτερα στρώματα και (ii) αέρια (κυρίως βιογενή) στα επιφανειακά ιζήματα προκαλούν υψηλές πιέσεις στους πόρους και συνεπώς ελαττώνουν τη φέρουσα ικανότητα των ιζημάτων, οπότε αποτελούν επισφαλές περιβάλλον για την κατασκευή θαλάσσιων εγκαταστάσεων. Επιπλέον τα τελευταία χρόνια γίνεται προσπάθεια για τον υπολογισμό της παροχής μεθανίου από την θάλασσα προς την ατμόσφαιρα καθώς έχει διαπιστωθεί



Εικ. 1: Χάρτης στον οποίο φαίνονται: (i) οι θέσεις των τομογραφιών και ηχογραφιών που αναφέρονται στο κείμενο, (ii) η θέση του ρευματογράφου (κύκλος), (iii) το σήμα της Αγίας Τριάδας και (iv) η περιοχή όπου διαπιστώθηκε η ύπαρξη κρατήρων διαφυγής αερίων (οριοθετημένη περιοχή). Στον ένθετο χάρτη παρουσιάζεται η περιοχή έρευνας και τα κυριότερα ορήματα που τέμνουν τον Πατραϊκό κόλπο.

Fig. 1: Map showing (i) the location of the 3.5KHz profiles and the sonographs (ii) the current-meter position (circle) (iii) the Agias Triadas fault and (iv) the area covered by pockmarks (). The index map shows the location of the surveyed area and the major active faults in the Gulf of Patras.

E.G.&G. 260, ισομετρικής καταγραφής

- ρευματογράφος τύπου SENSORDATA συνεχούς καταγραφής ταχύτητας ρεύματος και θερμοκρασίας.

Για την πλοήγηση και τον προσδιορισμό της θέσης του πλοίου χρησιμοποιήθηκαν δύο "Δορυφορικά συστήματα" (G.P.S.). Το πρώτο ήταν τύπου "MAGNAVOX MX200" με

ότι μεθάνιο που διαφεύγει από τους πόρους των ιζημάτων συνεισφέρει στο φαινόμενο του θερμοκηπίου (Hovland and Judd 1992).

Αν και τα τελευταία χρόνια έχουν πραγματοποιηθεί πολλές θαλάσσιες γεωφυσικές έρευνες στο χώρο της Μεσογείου, η ύπαρξη αερίων έχει αναφερθεί σε λίγες περιπτώσεις. Στον Ελληνικό χώρο οι Newton et al (1980) αναφέρουν την παρουσία μικρών και ρηχών κρατήρων διαφυγής αερίων υδρογονανθράκων βορείως της νήσου Θάσου, ο Lykousis (1991) συζητά την ύπαρξη τους σε δελταϊκά περιβάλλοντα, οι Chronis et al (1991) αναφέρουν την ύπαρξή τους στον Πατραϊκό κόλπο, ο Ferentinos (1992) αναφέρει γενικά στοιχεία για την ύπαρξη αερίων υδρογονανθράκων στον ευρύτερο Ελληνικό χώρο και αντιμετωπίζει το φαινόμενο της παρουσίας τους σαν μια γεωλογική επικινδυνότητα, ενώ οι Paratheodorou et al (1993) αναφέρονται λεπτομερειακά στην παρουσία τους σε διάφορα ιζηματογενή περιβάλλοντα.

Το άρθρο αυτό επικεντρώνει το ενδιαφέρον στην παρουσία κρατήρων διαφυγής αερίων υδρογονανθράκων στον πυθμένα του Πατραϊκού κόλπου (Εικ. 1) και στην παροξυσμική τους δράση κατά το σεισμό της 14/7/1993. Τα στοιχεία συλλέχθηκαν από το Εργαστήριο Θαλάσσιας Γεωλογίας και Φυσικής Ωκεανογραφίας στην παράκτια περιοχή του νοτίου Πατραϊκού, από την πόλη της Πάτρας ως τις εκβολές της Γλαύκου ποταμού (Εικ. 1).

ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΡΕΥΝΑΣ - METHODS OF STUDY

Τα όργανα σεισμικής διασκόπησης τα οποία χρησιμοποιήθηκαν για τη συλλογή των στοιχείων ήταν:

- τομογράφος υποδομής πυθμένα υψηλής διακριτικότητας, 3.5KHz, τύπου GEOPULSE
- τομογράφος υποδομής πυθμένα υψηλής διεισδυτικότητας, Sparke, τύπου S.I.G
- ηχοβολιστής πλευρικής σάρωσης τύπου

ακρίβεια 30 - 50μ, ενώ το δεύτερο ήταν ένα "Διαφορικό δορυφορικό σύστημα" (D.G.P.S.) τύπου "TRIMBLE 4000II" με ακρίβεια προσδιορισμού θέσης της τάξης των 2 - 5μ. Οι θέσεις των τομογραφιών, των ηχογραφιών και του ρευματογράφου παρουσιάζονται στην εικόνα 1.

Ο ακουστικός χαρακτήρας των ιζημάτων, οι πόροι των οποίων είναι πληρωμένοι με αέριους υδρογονάνθρακες, διαμορφώνεται ανάλογα με την ποσότητα των αερίων στους πόρους των ιζημάτων, το είδος του ιζήματος και τη συχνότητα λειτουργίας των οργάνων σεισμικής διασκόπησης που χρησιμοποιούνται. Στο άρθρο αυτό χρησιμοποιείται η ακόλουθη ορολογία (Hovland and Judd 1988, Watkins and Worzel 1978 και Mullins and Nagel 1982):

- Σεισμοκονιασμένες ζώνες (acoustic turbid zones or acoustic smearing): είναι ζώνες με χαώδεις και ασαφείς ανακλαστικές η δημιουργία των οποίων οφείλεται στη διάχυση της ακουστικής ενέργειας λόγω της ύπαρξης αερίων στους πόρους του ιζήματος. Συνήθως κάτω από τις σεισμοκονιασμένες ζώνες δημιουργείται μία ακουστική σκιά (wipe out or acoustic void) μέσα στην οποία δεν καταγράφονται ανακλάσεις λόγω της ολικής διάχυσης της ενέργειας των ακουστικών κυμάτων.

- Λαμπρές κηλίδες (enhanced reflectors or bright spots): είναι υψηλής ανακλαστικότητας και μεγάλης εύρους (παρτεταμένοι) μεμονωμένοι ανακλαστές και οφείλονται στην παγίδευση αερίων υδρογονανθράκων σε στρώματα μεγαλύτερου πορώδους σε σχέση με τα περιβάλλοντα.

- Στηλοειδείς διαταράξεις (columnar disturbances): είναι ακουστικά διαφανείς κατακόρυφες στήλες οι οποίες οφείλονται στην καταστροφή του ιστού των οριζόντιων στρωμάτων λόγω της διαφυγής αερίων.

- Νεφλώματα αερίων (gas plumes) και θύλακες αερίων (gas rockets): είναι ανακλαστικές χαώδους η ασαφούς χαρακτήρα η δημιουργία των οποίων οφείλεται στη διάχυση της ενέργειας των ακουστικών κυμάτων οι οποίες όμως λόγω της συγκεκριμένης γεωμετρίας και της θέσης που παρουσιάζουν μέσα στα ιζηματογενή στρώματα ή την υδάτινη στήλη παίρνουν τις ανώτερες ονομασίες.

ΓΕΩΛΟΓΙΑ ΤΗΣ ΕΥΡΥΤΕΡΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ - GEOLOGICAL SETTING

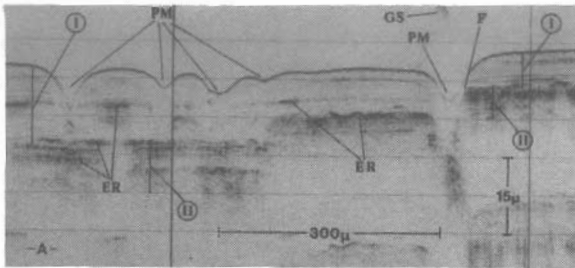
Ο Πατραϊκός κόλπος έχει μέγιστο μήκος 34 χλμ και πλάτος 17.5χλμ.. Το μέγιστο βάθος είναι 130μ, το οποίο βρίσκεται στο δυτικό και κεντρικό τμήμα του κόλπου ενώ προς τα ανατολικά, πλησιάζοντας το στενό του Ρίου-Αντιρρίου, το βάθος ελαττώνεται σε 40μ (Εικ. 1α).

Ο Πατραϊκός κόλπος έχει σχήμα τοξοειδές με το κυριό τμήμα προς τα νότια. Το δυτικό σκέλος του τόξου αποτελεί μία ενεργά τεκτονική τάφρο ΔΒΔ-ΑΝΑ διεύθυνσης (Εικ. 1α) η οποία αρχίζει στη δυτική είσοδο του κόλπου και καταλήγει απότομα στη νοτιο-ανατολική παραλία του Πατραϊκού μεταξύ Βραχυνέικων και Πάτρας (Εικ. 1α). Το ανατολικό σκέλος του τόξου αποτελεί τμήμα της ΒΑ-ΔΝ-ικής ενεργά τεκτονικής τάφρου του Ρίου-Αντιρρίου (Ferentinos et al 1985, Doutsos et al 1992).

Ο πυθμένας της ΔΒΔ-ΑΝΑ -ικής τάφρου τέμνεται από ενεργά ρήγματα διεύθυνσης ΔΒΔ-ΑΝΑ, τα οποία έχουν άλμα από 0.5 έως 15μ και διαμορφώνουν τη βυθομετρία του κόλπου ενώ ο πυθμένας της ΒΑ-ΝΔ-ικής τάφρου του Ρίου-Αντιρρίου δε διασχίζεται από ρήγματα.

Ο πυθμένας του Πατραϊκού καλύπτεται από Ολοκαινικά ιζήματα πάχους περίπου 30μ τα οποία επικάθονται με γωνιώδη ασυμφωνία σε Πλειστοκαινικά ιζήματα (Ferentinos et al, 1985; Chronis et al, 1991).

Τα Ολοκαινικά και Πλειστοκαινικά ιζήματα του πυθμένα φαίνεται να περιέχουν στους πόρους τους, αέριους υδρογονάνθρακες (Chronis et al, 1991; Ferentinos, 1992; Paratheodorou et al, 1993). Οι υδρογονάνθρακες είναι μάλλον μεθάνιο βιογενούς προέλευσης οι οποίοι ανέρχονται προς την επιφάνεια του πυθμένα



Εικ. 2: Τομογραφία 3.5KHz (A) στην οποία παρουσιάζονται η ανώτερη (I) και η κατώτερη (II) στρωματογραφική ακολουθία, το σήμα της Αγίας Τριάδας (F), κοίτηνες διαφωγής οσείων (PM), κούβες και λαμπρές κηλίδες (ER) και διαφωγές οσείων (GS) στην υδατινή στήλη.

Fig. 2: 3.5KHz profile (A) showing the upper (I) and lower (II) sedimentary sequences, the Asia Triada fault (F), rockmarks (PM), enhanced reflectors (ER) and gas scoops (GS) in the water column.

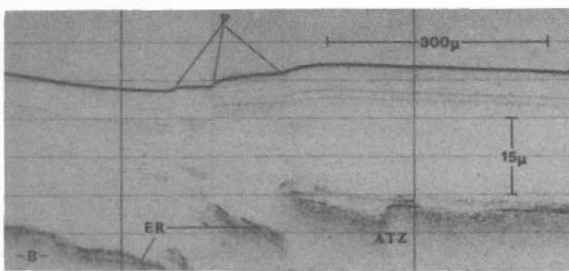
ασθενείς παράλληλες εσωτερικές ανακλάσεις (Εικ. 2). Ο διαφωγής ακουστικός χαρακτήρας υποδηλώνει ότι τα στρώματα αποτελούνται από ομοιογενές υλικό, ενώ οι παράλληλοι ασθενείς ανακλαστήρες δηλώνουν την ασθενή μεταβολή της σύστασης ή της πυκνότητας των ιζημάτων στην ανώτερη ακολουθία. Η κατώτερη ακολουθία συνίσταται από παράλληλους ως υποπαράλληλους διακοπτομένους και έντονους ανακλαστήρες (Εικ. 2). Η ανώτερη επιφάνεια της ακολουθίας αυτής παρουσιάζει ένα μικροανάγλυφο καθώς και ανάμεικτους ακουστικούς χαρακτήρες, όπως σεισμικονιασμένες περιοχές (seismic spearing) και λαμπρές κηλίδες (enhanced reflectors) που δηλώνουν την ύπαρξη αέριων σιους πόρους των ιζημάτων. Συχνά, αλλά τοπικά, ανακλαστήρες με τους προαναφερθέντες ακουστικούς

διαμέσου της διαχωριστικής επιφάνειας Ολοκαίνου/ Πλειστοκαίνου η οποία φαίνεται να αποτελεί επιφάνεια συγκέντρωσης των αέριων υδρογονανθράκων (Chronis et al, 1991; Paratheodorou et al, 1993).

ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ - PRESENTATION OF DATA

(I) ΣΕΙΣΜΙΚΗ ΣΤΡΩΜΑΤΟΓΡΑΦΙΑ - SEISMIC STRATIGRAPHY

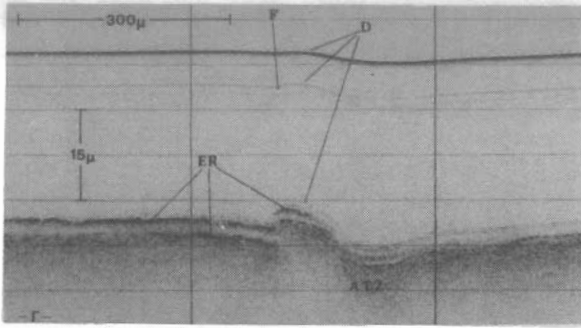
Η σεισμική διασκόπηση με τομογράφους υποδομής πυθμένα τύπου 3.5 KHz και Sparker έδειξε ότι η ιζηματογενής σειρή αποτελείται από δύο ακολουθίες. Η ανώτερη ακολουθία παρουσιάζει διαφανή ακουστικό χαρακτήρα με ασθενείς παράλληλες εσωτερικές ανακλάσεις (Εικ. 2). Η ανώτερη επιφάνεια της ακολουθίας αυτής παρουσιάζει ένα μικροανάγλυφο καθώς και ανάμεικτους ακουστικούς χαρακτήρες, όπως σεισμικονιασμένες περιοχές (seismic spearing) και λαμπρές κηλίδες (enhanced reflectors) που δηλώνουν την ύπαρξη αέριων σιους πόρους των ιζημάτων. Συχνά, αλλά τοπικά, ανακλαστήρες με τους προαναφερθέντες ακουστικούς χαρακτήρες βρίσκονται και στην ανώτερη ακολουθία (Εικ. 2).



Εικ. 3: Τομογραφία 3.5KHz (B) στην οποία παρουσιάζονται ενεργά σήματα (F) να τέμνουν τον πυθμένα του Ποσειδωνικού κόλπου, καθώς και λαμπρές κηλίδες (ER) και σεισμικονιασμένες ζώνες (ATZ).

Fig. 3: 3.5KHz profile (B) showing active faulting affecting the seabed in the Gulf of Patras, enhanced reflectors (ER) and acoustic turbid zones (ATZ).

Η ανάπτυξη με το βάθος των δύο παρακάτω ακολουθιών δεν είναι ομοιόμορφη, στην περιοχή έρευνας, αλλά ελέγχεται από την παρουσία του ρήγματος της Αγίας Τριάδας το οποίο εντοπίστηκε στις τομογραφίες και φαίνεται να μετατοπίζει τον πυθμένα από 0.5 - 7.5μ (Εικ. 2). Συγκεκριμένα, βάρεια του ρήγματος η ανώτερη ακολουθία παρουσιάζει ένα πάχος που κυμαίνεται από μερικές δεκάδες εκατοστά ως 10μ περίπου ενώ νότια του ρήγματος το πάχος αυξάνει και

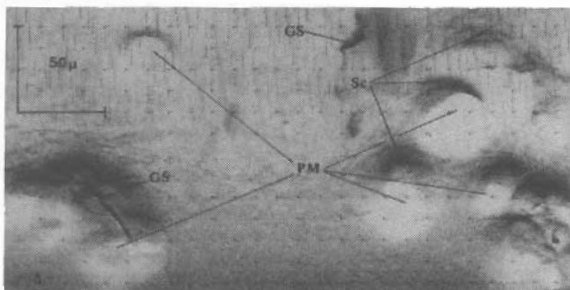


Εικ. 4: Τομογραφία 3.5ΚΗz (Γ) στην οποία φαίνεται η αναθολωση του πυθμένα και των υποεπιφανειακών στοματίων (D), το ρήγμα που προσκολλάει η αναθολωση (F), σεισμοκονιασμένες ζώνες (ATZ) και λαμπροές κηλίδες (ER).

Fig. 4: 3.5ΚΗz profile (Γ) showing seabed and intrasedimentary doming (D), a fault (F) associated with the doming and acoustic turbid zones (ATZ) and enhanced reflectors (ER).

φίες, γεγονός το οποίο οφείλεται στη διαφυγή και διασπορά των αερίων κατά μήκος των ρηγμάτων.

Ακόμη παρατηρήθηκαν περιοχές όπου παρουσιάζεται αναθολωση του πυθμένα και των υποκείμενων στρωμάτων (Εικ. 4) από μερικές δεκάδες εκατοστά έως 7μ η οποία αποδόθηκε στην πίεση που ασκείται από θύλακες αερίων ή σεισμοκονιασμένες ζώνες προς τα υπερκείμενα στρώματα. Πολλές φορές η συνέχεια των καμπυλωμένων στρωμάτων διακόπτεται, στοιχείο που δηλώνει την ύπαρξη μικρών ρηγμάτων τα οποία προκαλούνται από την αναθολωση λόγω της πίεσης των αερίων.



Εικ. 5: Ηχογραφία (Δ) στην οποία φαίνονται κρατήρες (PM), διαφυγές υδρογονανθράκων στην υδάτινη στήλη (GS) και η κλιμακωτή μορφολογία (Sc) που παρουσιάζουν οι παυφές οστιασμένων κρατήρων.

Fig. 5: Sonograph (Δ) showing rockmarks (PM), gas seeps (GS) in the water column and the step-like morphology (Sc) of the seabed surrounding the rockmarks.

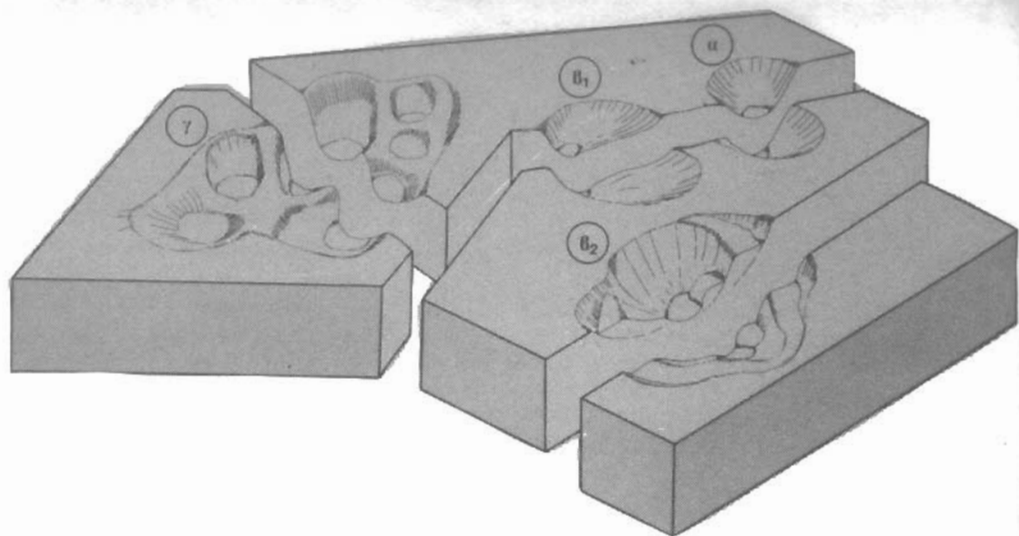
κυμαίνεται από 10 έως 20m με τάση περαιτέρω αύξησης προς τις εκβολές του ποταμού Γλαύκου. Το μικρό πάχος της ανώτερης ακολουθίας βόρεια του ρήγματος της Αγίας Τριάδας μπορεί να αποδοθεί στη μετανάστευση των αερίων και την πλήρωση των πόρων των ανωτέρων στρωμάτων από αυτά.

Μικρότερα ενεργά ρήγματα διαπιστώθηκε ότι μετατοπίζουν τον πυθμένα έως 1μ (Εικ. 3). Το άλμα των ρηγμάτων αυτών αυξάνεται με το βάθος, όπως φαίνεται από την μετατόπιση των υποεπιφανειακών ανακλάσεων. Η πραγματική μετατόπιση των στρωμάτων σε μεγαλύτερα βάθη είναι μικρότερη από αυτή που παρουσιάζεται στις τομογραφίες.

(II) ΚΡΑΤΗΡΕΣ ΔΙΑΦΥΓΗΣ ΑΕΡΙΩΝ - ROCKMARKS

Η συνδυαστική μελέτη των τομογραφιών 3.5ΚΗz και Sparker και των ηχογραφιών του ηχοβολιστή πλευρικής σάρωσης έδειξε ότι η περιοχή έρευνας χαρακτηρίζεται από έντονο ανάγλυφο το οποίο έχει τη μορφή κρατήρων (rockmarks) (Εικ. 2, 5). Η δημιουργία των κρατήρων οφείλεται στην απότομη διαφυγή αερίων υδρογονανθράκων οι οποίοι έχουν παγιδευτεί στη διαχωριστική επιφάνεια μεταξύ των δύο ακολουθιών.

Το πλήθος των κρατήρων είναι σημαντικό και

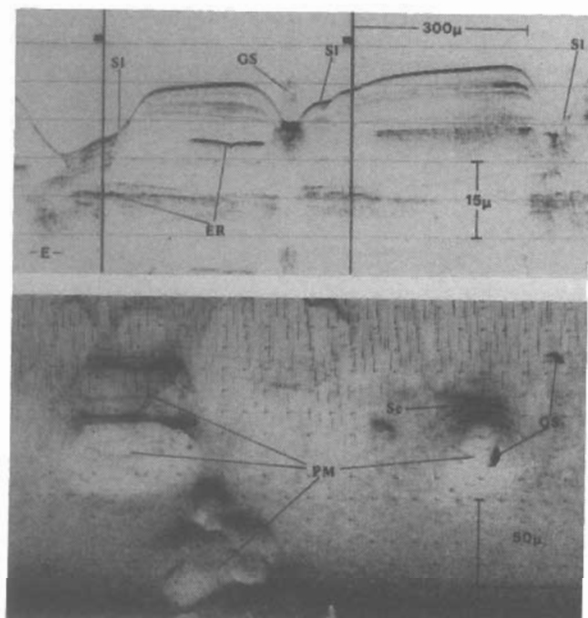


Εικ. 6: Τοιαδιόμοιατη γραφική απεικόνιση (α) κανονικών, (β₁ και β₂) ασυμμετρικών και (γ) σύνθετων κρατήρων διαφυγής αερίων.

Fig. 6: 3-D graphical representation of (α) regular, (β₁ and β₂) asymmetric and (γ) composite rockmarks.

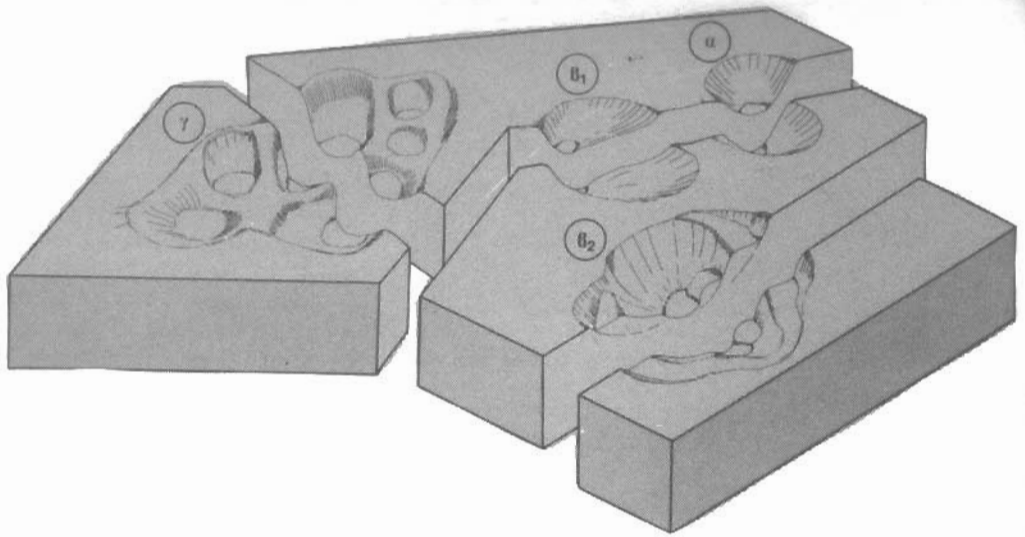
παρουσιάζουν διάμετρο που κυμαίνεται από 25 έως 185μ και βάθος από 0.5 έως 15 περίπου μέτρα. Η μέση διάμετρος και το μέσο βάθος τους είναι 73.5 και 5μ αντίστοιχα. Οι μέγιστες κλίσεις των τοιχωμάτων τους κυμαίνεται από 40-45%.

Οι διαστάσεις αυτές κατατάσσουν τους κρατήρες ανάμεσα στους μεγαλύτερους που έχουν εντοπιστεί ανά τον



Εικ. 7: Τομογραφία 3.5KHz (E) στην οποία παρουσιάζονται κρατήρες διαφυγής αερίων (PM), τα τοιχώματα των οποίων ελέγχονται από κατολισθήσεις (SI). Ηχογραφία (z) στην οποία φαίνεται η κλιμακωτή μορφολογία (Sc) των παρυφών των κρατήρων.

Fig. 7: 3.5KHz profile (E) rockmarks (PM) affected by sliding (SI). Sonograph (z) showing the step-like morphology (Sc) of the seabed surrounding the rockmarks.

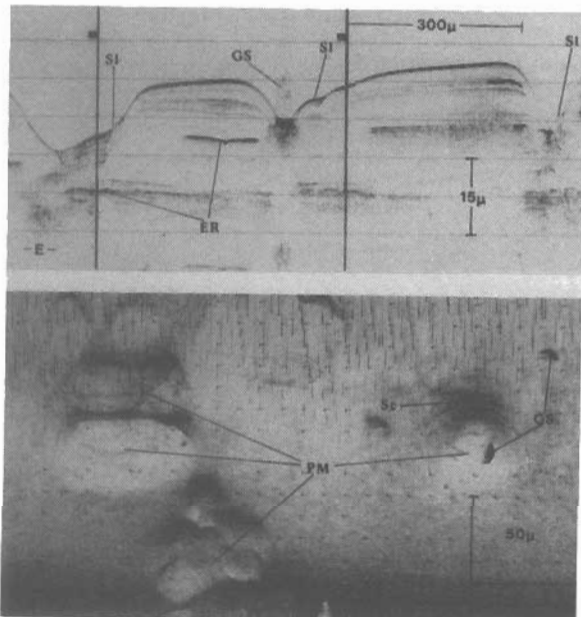


Εικ. 6: Τρισδιάστατη γραφική απεικόνιση (α) κανονικών, (β₁ και β₂) ασύμμετρων και (γ) σύνθετων κρατήρων διαφυγής αερίων.

Fig. 6: 3-D graphical representation of (α) regular, (β₁ and β₂) asymmetric and (γ) composite rockmarks.

παρουσιάζουν διάμετρο που κυμαίνεται από 25 έως 185μ και βάθος από 0.5 έως 15 περίπου μέτρα. Η μέση διάμετρος και το μέσο βάθος τους είναι 73.5 και 5μ αντίστοιχα. Οι μέγιστες κλίσεις των τοιχωμάτων τους κυμαίνεται από 40-45%.

Οι διαστάσεις αυτές κατατάσσουν τους κρατήρες ανάμεσα στους μεγαλύτερους που έχουν εντοπιστεί ανά τον



Εικ. 7: Τομογραφία 3.5KHz (E) στην οποία παρουσιάζονται κρατήρες διαφυγής αερίων (PM), τα τοιχώματα των οποίων ελέγχονται από κατολισθήσεις (Sl). Ηχογραφία (z) στην οποία φαίνεται η κλιμακωτή μορφολογία (Sc) των παρυφών των κρατήρων.

Fig. 7: 3.5KHz profile (E) rockmarks (PM) affected by sliding (Sl). Sonograph (z) showing the step-like morphology (Sc) of the seabed surrounding the rockmarks.

κόσμο (Hovland and Judd 1988).

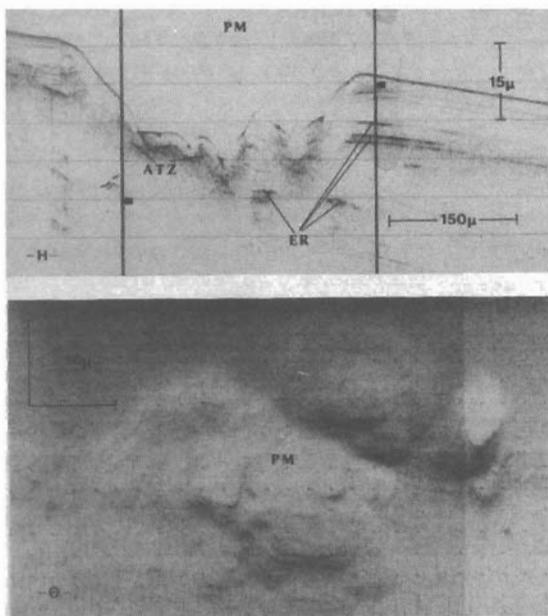
Το σχήμα των κρατήρων, όπως φαίνεται από τις ηχογραφίες, είναι σχεδόν κυκλικό ως ελλειπτικό. Δεν παρατηρήθηκε κάποιο είδος χείλους (περιφερειακού αναχώματος) γύρω από τις παρυφές τους, αν και άλλοι ερευνητές (Hovland 1981, 1984 και Ellis and McGuinness 1986) έχουν εντοπίσει περιμετρικά χείλη μικρού ύψους.

Διακρίθηκαν 3 είδη κρατήρων βάση του σχήματος και της μορφολογίας τους: α) κανονικοί (regular) β) ασύμμετροι (asymmetric) και γ) σύνθετοι (composite) (Εικ. 6).

Οι κανονικοί κρατήρες είναι οι πιο συνήθεις στην περιοχή έρευνας και το σχήμα τους είναι σχεδόν κυκλικό (Εικ. 6α)

Οι ασύμμετροι κρατήρες παρουσιάζουν πλευρικά τοιχώματα τα οποία έχουν έντονα διαφορετικές κλίσεις. Οι λόγοι της ασυμμετρίας αυτής μπορεί να είναι η δράση ρευμάτων (ακόμη και μικρής έντασης) και άρα η διάβρωση του τοιχώματος το οποίο βρίσκεται αντίθετα προς τη ροή του ρεύματος (Johenhans et al 1978), η διεύθυνση υποκείμενων ή παρακείμενων ασυνεχειών (Εικ. 6β.), καθώς και κατολισθήσεις τεμαχών από τα πλευρικά τοιχώματα του κρατήρα (Εικ. 6β., 5, 7).

Οι σύνθετοι κρατήρες δημιουργούνται από τη συνένωση και ομαδοποίηση μεμονωμένων κανονικών κρατήρων οι οποίοι, όπως χαρακτηριστικά φαίνεται στις ηχογραφίες, διεισδύουν ο ένας μέσα στον άλλο (Εικ. 6γ, 8). Σε ορισμένες περιπτώσεις η συνένωση έχει επιτευχθεί σε τέτοιο βαθμό με αποτέλεσμα στις ηχογραφίες να



Εικ. 8: Τομογραφία 3.5KHz (H) και ηχογραφία (Θ) στις οποίες παρουσιάζεται ο σύνθετος μορφολογικός χαρακτήρας κρατήρα διαφυγής αερίων.

Fig. 8: 3.5KHz profile (H) and sonograph (Θ) showing the morphology of a composite rockmark.

παρουσιάζεται ένας μεγάλος κρατήρας με πολύ ανώμαλο ανάγλυφο. Ένας άλλος λόγος σχηματισμού τους μπορεί να είναι το γεγονός της δημιουργίας πολλαπλών οδών διαφυγής αερίων υδρογονανθράκων μέσα από τον ίδιο τον κρατήρα. Σαν αποτέλεσμα έχουμε ένα μεγάλο μεγέθους κρατήρα που αποτελείται στη βάση του από μικρότερες επιμέρους καταβυθίσεις οι οποίες είναι και οι κύριοι οδοί διαφυγής αερίων (Εικ. 8). Κρατήρες με περισσότερα από ένα κέντρα διαφυγής αερίων έχουν παρατηρηθεί και στη Βόρειο Θάλασσα (Hovland and Sommerville 1985).

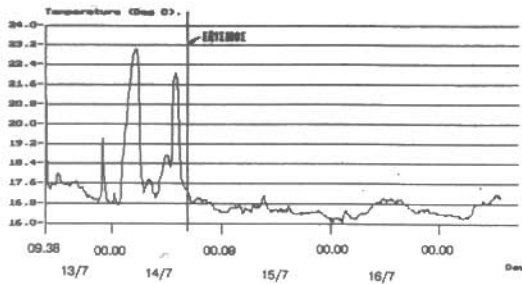
Σε ορισμένες περιπτώσεις κάτω από τον πυθμένα των κρατήρων παρουσιάζονται σεισμοκονιασμένες ζώνες, θύλακες αερίων και λαμπερές κηλίδες ενώ σε άλλες περιπτώσεις οι ακουστικοί αυτοί χαρακτηριστές απουσιάζουν. Στην πρώτη περίπτωση, οι θέσεις παγίδευσης των αερίων υδρογονανθράκων είτε δεν έχουν

αδειάσει πλήρως μετά την τελευταία διαφυγή είτε μετά από μία περίοδο ηρεμίας έχουν επαναπληρωθεί, ενώ στη δεύτερη περίπτωση φαίνεται ότι τα αέρια έχουν διαφύγει προς την υδάτινη στήλη.

Η απότομη απόληξη των εσωτερικών ασθενών ανακλάσεων, της ανώτερης στρωματογραφικής ακολουθίας, αρκετά πριν από την επιφάνεια των τοιχωμάτων και η παρουσία ακουστικά διαφανούς ζώνης είναι στοιχεία που υποδηλώνουν ότι τα τοιχώματα των κρατήρων συνίστανται από ιζήματα των οποίων ο ιστός έχει διαταραχθεί εξαιτίας της διαφυγής των αερίων. Παρόμοιος ακουστικός χαρακτήρας, με τη μορφή στηλοειδούς διατάραξης, διαπιστώθηκε κάτω από τους κρατήρες. Οι παραπάνω παρατηρήσεις οδηγούν στο συμπέρασμα ότι η διαφυγή των αερίων προς την υδάτινη στήλη δεν περιορίζεται στον πυθμένα των κρατήρων αλλά λαμβάνει χώρα και από τα τοιχώματά τους, ενισχύοντας την άποψη της δυναμικής έως εκρηκτικής φύσης της διαφυγής.

Γενικά οι κρατήρες αυτοί παρουσιάζουν μεγάλη ανάπτυξη στην ανώτερη ενότητα, νοτίως του ρήγματος της Αγίας Τριάδας όπου η ανώτερη σεισμική ενότητα είναι μεγάλου πάχους, ενώ παρουσιάζουν περιορισμένη ανάπτυξη (μικρό βάθος και μικρή διάμετρο) βορείως του ρήγματος. Σε ορισμένες περιπτώσεις διαπιστώθηκε ότι ο πυθμένας των βαθύτερων κρατήρων προσεγγίζει την κατώτερη στρωματογραφική ενότητα, η οποία αποτελεί και την κύρια

επιφάνεια συγκέντρωσης των αερίων.



Εικ. 9: Εικόνα στην οποία παρουσιάζονται οι τρεις απότομες μεταβολές της θερμοκρασίας στην υδάτινη στήλη πριν το σεισμό της 14/7/1993.

Fig. 9: Figure showing the three sharp temperature changes in the water column before the earthquake of the 14th of the July.

η οποία διήρκησε 1 ώρα και 20 λεπτά. Η δεύτερη μεταβολή συνέβη στις 14/7, ώρα 1.30' και η θερμοκρασία αυξήθηκε από 16.8°C σε 23°C για 8 ώρες και 30 λεπτά. Τέλος, Τρίτη μεταβολή ξανά στις 14/7, ώρα 13.30' και η θερμοκρασία αυξήθηκε από 17°C σε 22°C για 11 ώρες.

Θαλάσσιες γεωφυσικές έρευνες που εκτελέστηκαν στην ίδια περιοχή λίγες μέρες αργότερα αποκάλυψαν ακουστικές ανωμαλίες στην υδάτινη στήλη οι οποίες είχαν τη μορφή υψηλής ανακλαστικότητας οξυλιγκτων υπερβολικών ανακλάσεων. Οι ανακλάσεις αυτές είναι ενδεικτικές νεφελωμάτων αερίων, ενώ η ακόμη μεγαλύτερη ανακλαστικότητα που παρατηρήθηκε στις ηχογραφίες, πάνω από συγκεκριμένους κρατήρες, μπορεί να οφείλεται στην παρουσία λεπτόκοκκου υλικού το οποίο τέθηκε σε αιώρηση από τη διαφυγή των αερίων προς την υδάτινη στήλη.

(iii) ΠΑΡΟΞΥΣΜΙΚΗ ΔΡΑΣΗ ΤΩΝ "ROCKMARKS" - ROCKMARK'S PAROXYSMICAL ACTIVITY

Η ανάλυση συλλεχθέντων στοιχείων ρευματογράφου με αισθητήρια θερμοκρασίας, ο οποίος τονίσθηκε από τις 13/7 έως 17/7/1993, στη θαλάσσια περιοχή όπου διαπιστώθηκαν οι κρατήρες, έδειξε τρεις σημαντικές θερμοκρασιακές μεταβολές πριν το σεισμό της 14/7/1993, μεγέθους 5.4R με επίκεντρο τον ανατολικό Πατραϊκό (Εικ. 9). Η πρώτη συνέβη στις 13/7 και παρατηρήθηκε αύξηση της θερμοκρασίας από 16.8°C σε 19.3°C,

ΕΥΖΗΤΗΤΗ - DISCUSSION

Η θαλάσσια γεωφυσική διασκόπηση του ΝΑ-ικού Πατραϊκού κόλπου έδειξε: (α) ότι ο πυθμένας συγκροτείται από δύο ιζηματογενείς ακολουθίες (β) την παρουσία ανώμαλων σεισμικών ανακλάσεων στην κατώτερη ιζηματογενή ακολουθία, ενδεικτικό στοιχείο της παρουσίας αερίων υδρογονανθράκων και (γ) το κύριο μορφολογικό χαρακτηριστικό του πυθμένα είναι η έντονη παρουσία κρατήρων διαφυγής αερίων.

Η επιλεκτική συγκέντρωση των αερίων υδρογονανθράκων στην κατώτερη ιζηματογενή ακολουθία και όχι στην αντίστοιχη ανώτερη, είναι αποτέλεσμα της μεταβολής των φυσικών και μηχανικών ιδιοτήτων των ιζημάτων και όχι έντονης λιθολογικής μεταβολής. Οι παραπάνω διαπιστώσεις προκύπτουν από τη μελέτη των αποτελεσμάτων αριθμού γεωτρήσεων που εκτελέστηκαν στη θαλάσσια περιοχή με σκοπό την κατασκευή του νέου λιμένας Πατρών. Οι γεωτρήσεις διέτρησαν την κατώτερη ακολουθία έδειξαν ότι τουλάχιστον τα ανώτερα 20m του πυθμένα, στην οποία βρίσκεται η κατώτερη ακολουθία, αποτελούνται από αργιλικό υλικό με τοπικές ενστρώσεις αμμοιλύς. Από τη μελέτη των φυσικών και μηχανικών ιδιοτήτων των ιζημάτων των γεωτρήσεων, διαπιστώθηκε ότι σε βάθος 10-12μ περίπου, όπου βρίσκεται η διαχωριστική επιφάνεια ανώτερης και κατώτερης ιζηματογενούς ακολουθίας, οι παραπάνω ιδιότητες μεταβάλλονται δραστικά ενώ η κοκκομετρική σύσταση παραμένει πάντα η ίδια. Συγκεκριμένα η σχετική υδαρότητα των ιζημάτων στο ανώτερη ακολουθία παρουσιάζει τιμές μεγαλύτερες της μονάδας ($I_1 > 100\%$) ενώ στην κατώτερη ακολουθία παρουσιάζει μείωση (80-90%) αν και γενικά κυμαίνεται σε υψηλά επίπεδα. Παρομοίως το ξηρό φαινόμενο βάρος παρουσιάζει μία αξιοσημείωτη τάση αύξησης στην κατώτερη ακολουθία μεταβάλλοντας την τιμή του (κατά μέσο όρο) από $1.35T/m^3$ σε $1.45T/m^3$. Τα αποτελέσματα της τυποποιημένης δοκιμής διείδυσης έδειξαν ότι ο αριθμός κρούσεων αυξάνεται, κατά μέσο όρο, από 2 στην ανώτερη ακολουθία σε 4-5 στην κατώτερη ακολουθία. Παρομοίως η αστραγγιστή διατμητική αντοχή και η αντοχή σε ανεμπόδιση θλίψη σχεδόν διπλασιάζουν τις τιμές τους κάτω από τη διαχωριστική επιφάνεια ανώτερης και κατώτερης ακολουθίας.

Συνεπώς ο έντονος (παρατεταμένος) ακουστικός χαρακτήρας των σεισμικών ανακλάσεων της κατώτερης ιζηματογενούς ακολουθίας είναι αποτέλεσμα σημαντικών μεταβολών των φυσικών και μηχανικών ιδιοτήτων τους σε συνδυασμό με την παρουσία αερίων υδρογονανθράκων στους πόρους τους.

Οι κύριοι παράγοντες που ελέγχουν τη δημιουργία κρατήρων, είναι η ποσότητα των περιεχομένων στα ιζήματα αερίων υδρογονανθράκων, η κοκκομετρική σύσταση και η διατμητική αντοχή των ιζημάτων. Οι κρατήρες διαφυγής αερίων (rockmarks) σχηματίζονται από την απότομη διαφυγή αερίων υδρογονανθράκων προς την υδάτινη στήλη από τα βαθύτερα στρώματα του πυθμένα. Για να συμβεί αυτό θα πρέπει τοπικά η πίεση η οποία ασκείται λόγω της δράσης των αερίων να υπερβεί τη διατμητική αντοχή του ιζήματος. Καθώς τα αέρια εκτονώνονται προς την επιφάνεια του πυθμένα ρευστοποιούν τα περιβάλλοντα ιζήματα και τα ανασηκώνουν προς την υδάτινη στήλη. Η αργιλοϊλυώδης σύσταση της ανώτερης ιζηματογενούς ακολουθίας σε συνδυασμό με την ιδιαίτερη ασθενή διατμητική αντοχή τους και την παρουσία σημαντικών ποσοτήτων αερίων υδρογονανθράκων στην κατώτερη ιζηματογενή ακολουθία, καθιστούν τον πυθμένα της περιοχής έρευνας, ιδιαίτερα ευνοϊκό περιβάλλον για την ανάπτυξη κρατήρων διαφυγής αερίων.

Επιπλέον ένας δεύτερος μηχανισμός δημιουργίας κρατήρων είναι δυνατό να αναπτυχθεί ανεξάρτητα ή συνδυαστικά με τον πρώτο. Όταν η πίεση των αερίων υδρογονανθράκων δεν είναι σημαντική ώστε να υπερβεί τη διατμητική αντοχή των υπερκείμενων ιζημάτων, διαφυγή αερίων μπορεί να προκληθεί από την

άσκηση περιοδικών κύκλων φόρτισης η οποία προκαλεί αύξηση της πίεσης των αερίων στα επιφανειακά ιζήματα. Τέτοιες τάσεις μπορεί ν' ασκηθούν από σεισμούς ή κύματα.

Οι ξαφνικές και χρονικά μικρής διάρκειας αυξήσεις της θερμοκρασίας της υδάτινης στήλης, που παρατηρήθηκαν 24 ώρες πριν από τον σεισμό της 14/7/1993, μπορεί να εξηγηθούν ως αποτέλεσμα προσεισμικών τάσεων οι οποίες ασκήθηκαν στα ιζήματα προκαλώντας μερική αναδιάταξη των κόκκων και συνεπώς τη διαφυγή των αερίων. Πιστεύεται ότι ο αισθητήρας θερμοκρασίας του ρευματογράφου κατέγραψε τρία γεγονότα διαφυγής αερίων μετρώντας τη θερμοκρασία των φυσαλίδων αερίων, οι οποίες ανερχόμενες στην υδάτινη στήλη προσκολλήθηκαν στον αισθητήρα της θερμοκρασίας λόγω επιφανειακών τάσεων.

Οι κρατήρες θεωρούνται θέσεις επαναλαμβανόμενης διαφυγής αερίων. Κατά τη διάρκεια της περιόδου που οι κρατήρες είναι "ανενεργοί" οι θέσεις παγίδευσης των υδρογονανθράκων συγκεντρώνουν ξανά αέρια ενώ οι κρατήρες γεμίζουν σταδιακά με αποθέσεις από τις κατολισθήσεις των πλευρικών τοιχωμάτων.

Η διάρκεια των φάσεων δράσης και "ηρεμίας" των κρατήρων είναι δύσκολο να προσδιοριστεί. Η περίοδος επαναδραστηριοποίησης εξαρτάται από το ρυθμό παραγωγής αερίων, το μέγεθος των θέσεων παγίδευσης και τα χαρακτηριστικά των ιζημάτων του πυθμένα.

Οι κρατήρες που εντοπίστηκαν στο ΝΑ-ικό Πατραϊκό κόλπο είναι δυνατό να διακριθούν όσον αφορά το στάδιο εξέλιξής τους σε ενεργούς, ανενεργούς και "εμβρυακής" ηλικίας. Οι κρατήρες που διανύουν ενεργή περίοδο ζωής παρουσιάζουν έντονες διαφυγές προς την υδάτινη στήλη ενώ η περιοχή τροφοδοσίας τους χαρακτηρίζεται από σημαντικές ποσότητες αερίων.

Οι κρατήρες που διανύουν ανενεργή περίοδο ζωής χαρακτηρίζονται από περιοχή τροφοδοσίας με απουσία αερίων υδρογονανθράκων, οι οποίοι διοχετεύθηκαν στην υδάτινη στήλη κατά τη διάρκεια προηγούμενης ενεργής περιόδου του κρατήρα. Η περιοχή τροφοδοσίας είναι πιθανό να επαναπληρωθεί με αέρια έτσι ώστε ο κρατήρας να επανασεισέλθει σε ενεργή περίοδο ζωής.

Οι κρατήρες "εμβρυακής" ηλικίας αναπτύσσονται πάνω από περιοχές τροφοδοσίας με σημαντικές ποσότητες αερίων, είναι μικροί σε μέγεθος, χαρακτηρίζονται από πυθμένα με έντονο μικροανάγλυφο και παρουσιάζουν σημαντικές διαφυγές αερίων προς την υδάτινη στήλη. Θέσεις αναθόλωσης του πυθμένα και των υποκείμενων στρωμάτων θεωρούνται πιθανές θέσεις μελλοντικών κρατήρων διαφυγής αερίων, αφού η αναθόλωση είναι το αμέσως προηγούμενο μορφολογικό στάδιο πριν τη δημιουργία των κρατήρων.

Η δημιουργία νέων κρατήρων επιβεβαιώνεται και από τις πληροφορίες ψαράδων της περιοχής οι οποίοι ισχυρίζονται ότι τα αλιευτικά τους εργαλεία σκάλωναν σε κρατήρες και ότι με την πάροδο των χρόνων νέοι κρατήρες δημιουργούνται προς την πόλη της Πάτρας. Επίσης έχει παρατηρηθεί από ψαράδες η ύπαρξη φυσαλίδων στην επιφάνεια της θάλασσας σε συγκεκριμένες θέσεις μέσα στη ζώνη έρρευνας.

Παροξυσμική δράση διαφυγής αερίων πρέπει να έχει συμβεί στο παρελθόν και σε άλλες θαλάσσιες περιοχές της Ελλάδος. Το 1882 περιγράφηκε η διαφύγη αερίων υδρογονανθράκων και υδροθείου (H₂S) στη λιμνοθάλασσα του Αιτωλικού, η οποία προκάλεσε το θάνατο πολλών θαλάσσιων οργανισμών. Η διαφύγη αυτή των αερίων συνέπεσε με την εκδήλωση σεισμού. Παρόμοια διαφύγη αερίων έλαβε χώρα το 1990, χωρίς όμως να έχει καταγραφεί κανένας σεισμός στην ευρύτερη περιοχή. Λαμβανομένου υπόψη ότι οι επικρατούσες

καιρικές συνθήκες ήταν ήπιες και επομένως δεν υπήρχαν κύματα μεγάλης περιόδου έξω από την λιμνοθάλασσα, είναι πιθανό, η πίεση των αερίων να υπερέβη τη διατμητική αντοχή των ιζημάτων του πυθμένα, με αποτέλεσμα τη διαφυγή και διασπορά των αερίων στην υδάτινη στήλη.

Ο περιηγητής Rouscqueville περιγράφει ότι στην περιοχή του Αιγίου, κατά τη διάρκεια του σεισμού της 23/8/1817 μεγέθους 6.5R "η θάλασσα ζεστάθηκε τόσο πολύ ώστε τα χέρια των ψαράδων ζεματίστηκαν". Κατά τον ίδιο σεισμό το ακρωτήριο που αποτελεί τμήμα του λιμανιού του Αιγίου και εκτείνεται ως τις εκβολές του Μελανίτη, έβγαλε πυκνό καπνό και καταβυθίστηκε στη θάλασσα (Παπαζάχος 1989).

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ - REFERENCES

- AKTINSON, P. and RICHARDS, A. (1967). The occurrences and distribution of methane in the marine environment. *Deep-Sea Res.*, 14, 673-684.
- CHRONIS, G., PIPER, D. and ANAGNOSTOU, G. (1991). Last Quaternary evolution of the gulf of Patras, Greece. Tectonism, deltaic sedimentation and sea level changes. *Marine Geology*, 97, 191-199.
- DOUTSOS, T. and POULIMENOS, G. (1992). Geometry and kinematics of active faults and their seismotectonic significance in the western Corinth-Patras rift (Greece). *Jour. Structural Geology*, 1-11.
- ELLIS, P. and McGUINNESS, T. (1986). Pockmarks of the northwestern Arabian Gulf. *Proc. Oceanology International Conf.*, Brighton, March 1986.
- EMERY, O. and HOGGAN, D. (1958). Gases in marine sediments. *A.A.P.G. Bull.*, 42, 2174-2188.
- FERENTINOS, G., BROOKS, M. and DOUTSOS, T. (1985). Quaternary tectonics in the gulf of Patras, western Greece. *Jour. Structural Geology*, 7(6), 713-717.
- FERENTINOS, G. (1992). Offshore geological hazards in the Hellenic arc. *Mar Geotechnology*, 9, 261-277.
- HOVLAND, M. (1981). A classification of pockmark related features in the Norwegian Trench. *Continental Shelf Institute, Norway, Publ. No 106*, 28pp.
- HOVLAND, M., JUDD, A. and KING, L. (1984). Characteristic features of pockmarks on the North Sea floor and Scotian Shelf. *Sedimentology*, 31, 471-480.
- HOVLAND, M. and SOMMERVILLE, J. (1985). Characteristics of two natural gas seepages in the North Sea. *Marine and Petrol. Geol.*, 2, 319-326.
- HOVLAND, M. and JUDD, A. (1988). Seabed Pockmarks and Seepages. *Graham & Trotman press*, 293pp.
- HOVLAND, M. and JUDD, A. (1992). The global production of methane from shallow submarine sources. *Contin. Shelf Res.*, 12(10), 1231-1238.
- JOSEPHANS, H., KING, L. and FADER, G. (1978). A side scan sonar mosaic of pockmarks on the Scotian Shelf. *Canad. Jour. Earth Science*, 15, 831-840.
- LYKOUSIS, V. (1991). Submarine slope instabilities in the Hellenic Arc Region, Northeastern Mediterranean Sea. *Mar. Geotechn.*, 10, 83-96.
- MULLINS, H. and NAGEL, D. (1982). Evidence for shallow hydrocarbons offshore Northern Santa Cruz Country, California. *A.A.P.G. Bull.*, 75, 1130-1140.
- NEWTON, R., CUNNINGHAM, R. and SCHUBERT, C. (1980). Mud volcanoes and pockmarks: seafloor engineering hazards or geological curiosities? *Offsh.*

Techn. Conf., Pap. 3729, 425-435.

ΠΑΠΑΖΑΧΟΣ, Β. και ΠΑΠΑΖΑΧΟΥ, Κ. (1989). Οι σεισμοί της Ελλάδας. *Εκδόσεις Ζήτη*, Θεσσαλονίκη.

ΠΑΡΑΤΗΟΔΟΡΟΥ, Γ., ΗΑΣΙΟΤΙΣ, Τ. and FERENTINOS G. (1993). Gas-charged sediments in the Aegean and Ionian seas, Greece. *Marine Geology*, 112, 171-184.

WATKINS, S. and WORZEL, L. (1978). Serendipity gas seep area, South Texas offshore. *A.A.P.G. Bull.*, 62, 1067-1074.