

Κεφάλαιο 11

ΠΡΟΓΝΩΣΗ ΣΕΙΣΜΩΝ

Με τον όρο πρόγνωση σεισμών εννοούμε την γνώση από πριν του μεγέθους του σεισμού (πόσο δυνατός είναι), του χρόνου γένεσης (πότε θα γίνει) και του επικέντρου του σεισμού (που θα γίνει) και πρέπει σε αυτά να συνυπολογίζεται πάντα το σφάλμα τους. Δεν υπάρχει πρόγνωση αν δεν συντρέχει κάποια από τις παραπάνω συνθήκες. Αυτή είναι η ειδική πρόγνωση για να ξεχωρίζει από την γενική πρόγνωση που σχετίζεται με την σεισμικότητα ή της σεισμική επικινδυνότητα μίας περιοχής. Σήμερα, με την βοήθεια και της σύγχρονης τεχνολογίας, η πρόγνωση των σεισμών αποτελεί έναν ρεαλιστικό στόχο της επιστήμης.

Η δυσκολία της πρόγνωσης είναι η ανεπαρκής γνώση μας για την διαδικασία που γίνεται στους σεισμογόνους χώρους πριν την γένεση των σεισμών. Αλλά ακόμα και αν το γνωρίζαμε θα υπήρχαν δυσκολίες για την συνεχή παρακολούθησή τους στο εσωτερικό της Γης από την επιφάνεια αφού η δυσκολία αυτή οφείλεται στο γεγονός ότι ο φλοιός της Γης όπου γεννώνται οι σεισμοί είναι ένα **μη γραμμικό σύστημα**, δηλαδή ένα σύστημα το οποίο έχει **χαοτική συμπεριφορά**. Ακόμα και ένα ασήμαντο γεγονός μπορεί να επηρεάσει την λεπτή ισορροπία που υπάρχει στους χώρους αυτούς

(συνέχεια)

- Ανάλογα με την χρονική της ακρίβεια η πρόγνωση κατατάσσεται σε 4 κατηγορίες:
- **Μακράς διάρκειας.** Όταν η ακρίβεια στην γένεση του σεισμού είναι της τάξης μερικών ετών (π.χ. τα επόμενα 10 χρόνια)
Μεσοπρόθεσμη πρόγνωση (π.χ. τα επόμενα 3 χρόνια) και στηρίζεται στις προγνωστικές ιδιότητες ορισμένων τύπων σεισμικότητας που προκύπτουν από πλήθος αξιόπιστων σεισμολογικών παρατηρήσεων και από τη φυσική ερμηνεία αυτών των τύπων σεισμικότητας με βάση τη θεωρία του χάους. Η **«επιταχυνόμενη σεισμικότητα»** και η **«επιβραδυνόμενη σεισμικότητα»** είναι δύο από τους σημαντικότερους τέτοιους τύπους σεισμικότητας. Σε αυτούς τους τύπους σεισμικότητας βασίζεται η μέθοδος μεσοπρόθεσμης πρόγνωσης που ονομάζεται μέθοδος **«Επιβραδυνόμενης Εντός – Επιταχυνόμενης Εκτός Παραμόρφωσης».**
- **Βραχείας διάρκειας.** Όταν η ακρίβεια είναι της τάξης ολίγων εβδομάδων ή μηνών (π.χ. τους επόμενους 12 μήνες)
- **Άμεση πρόγνωση.** Όταν ο χρόνος γένεσης είναι της τάξης ολίγων ωρών ή ημερών.
- Αλλά ακόμα και στην περίπτωση της απόλυτης πρόγνωσης η ζημία, που θα υπάρξει από τον πανικό και την ανασφάλεια, θα είναι πολύ μεγάλη, όσο και αν εκπαιδεύσουμε για αυτό τους πολίτες.

(συνέχεια)

- Οι έρευνες που γίνονται στρέφονται προς 2 κατευθύνσεις:
- **1) αιτιοκρατική**, δηλαδή αν μπορέσουμε με ακρίβεια να μετρήσουμε την ταχύτητα της κίνησης μίας λιθοσφαιρικής πλάκας ως προς μία άλλη (**αίτιο**), και σε κάποιο χώρο την αντοχή των πετρωμάτων (**αντικείμενο**), θα προβλέψουμε τον χρόνο και το μέγεθος της διάρρηξης, δηλαδή τον χρόνο γένεσης του σεισμού και το μέγεθός του (**αποτέλεσμα**).
- Η κατεύθυνση αυτή βρήκε εφαρμογή μέθοδο των **προσωρινών σεισμικών κενών** για την οποία θα αναφέρουμε στην συνέχεια.

(συνέχεια)

- **2) πρόδρομα φαινόμενα**, υπάρχει η άποψη (η οποία έχει διαπιστωθεί σε πολλές περιπτώσεις) και στηρίζεται σε γεωφυσικές και γεωδαιτικές παρατηρήσεις, αλλά και σε εργαστηριακά πειράματα, ότι κατά τον **προπαρασκευαστικό χρόνο**, γένεσης του σεισμού συμβαίνουν διάφορα φαινόμενα (π.χ. ανίχνευση ραδονίου σε πηγάδια) τα οποία προηγούνται του σεισμού και έχουν άμεση σχέση με την γένεσή του.
- Οι επιστημονικές προσπάθειες μακροπρόθεσμης πρόγνωσης των σεισμών επικεντρώνονται στην αρχή ότι σε κάθε μεγάλο ενεργό σεισμικό ρήγμα γίνονται κατ' επανάληψη ισχυροί κύριοι σεισμοί σύμφωνα με τη θεωρία του Reid αλλά και με άλλες σχετικές θεωρήσεις όπως π.χ. αυτές του σεισμικού κύκλου, του χαρακτηριστικού σεισμού, κτλ.
- Οι περισσότερες και πιο πρόσφατες από τις προσπάθειες αυτές βασίζονται επιπλέον στην αρχή ότι η γένεση του επόμενου κυρίου σεισμού σε ένα ενεργό ρήγμα καθορίζεται σε ορισμένο βαθμό (π.χ. ο χρόνος γένεσής του) και από την πρόσφατη δράση γειτονικών ρηγμάτων.

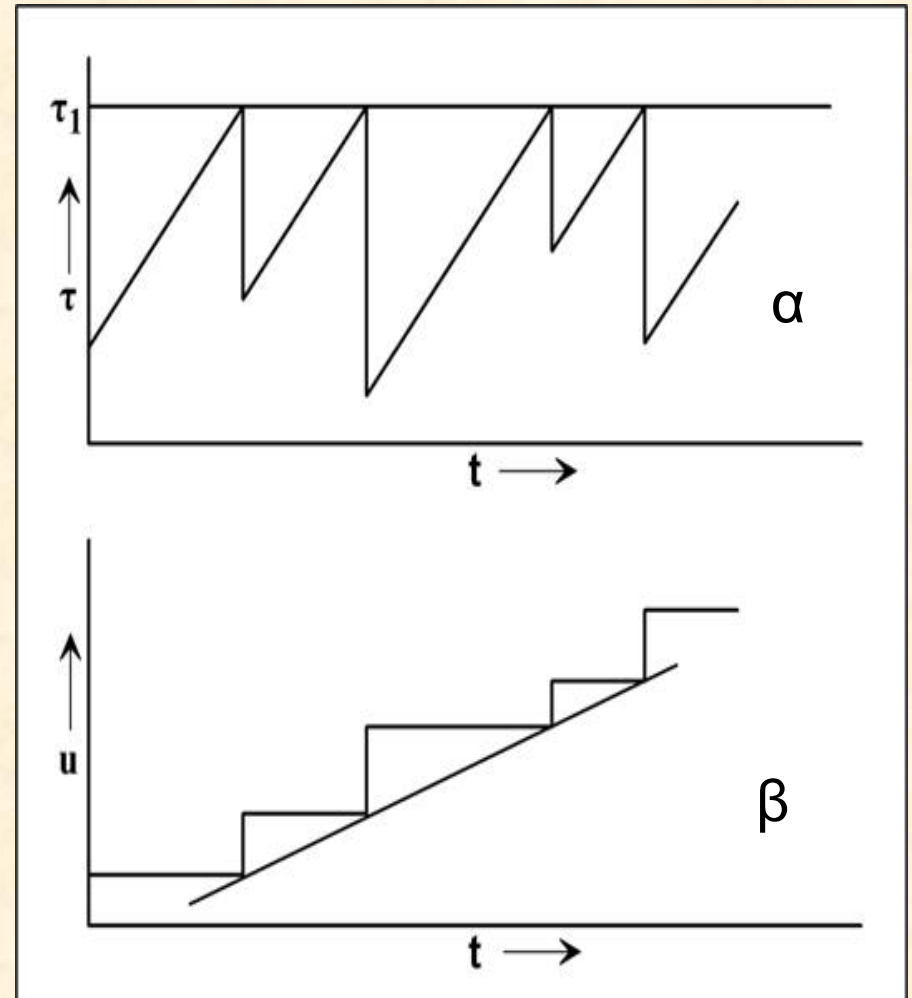
(συνέχεια)

Στις αρχές της δεκαετίας του 90 αναπτύχθηκαν δύο μοντέλα που βασίζονται στην υπόθεση ότι ο επόμενος κύριος σεισμός σε ένα ρήγμα εξαρτάται μόνο από τις τεκτονικές τάσεις που ενεργούν στο ρήγμα και από τον προηγούμενο κύριο σεισμό που έγινε στο ρήγμα. Το ένα από αυτά ονομάζεται **μοντέλο πρόγνωσης χρόνου** (time predictable model) και το άλλο **μοντέλο πρόγνωσης ολίσθησης** (slip predictable model). Και τα δύο αυτά μοντέλα συνδέονται με την μακροπρόθεσμη πρόγνωση των σεισμών.

Άλλο μοντέλο που επίσης χρησιμοποιείται είναι αυτό της **μεταβολής της στατικής τάσης**.

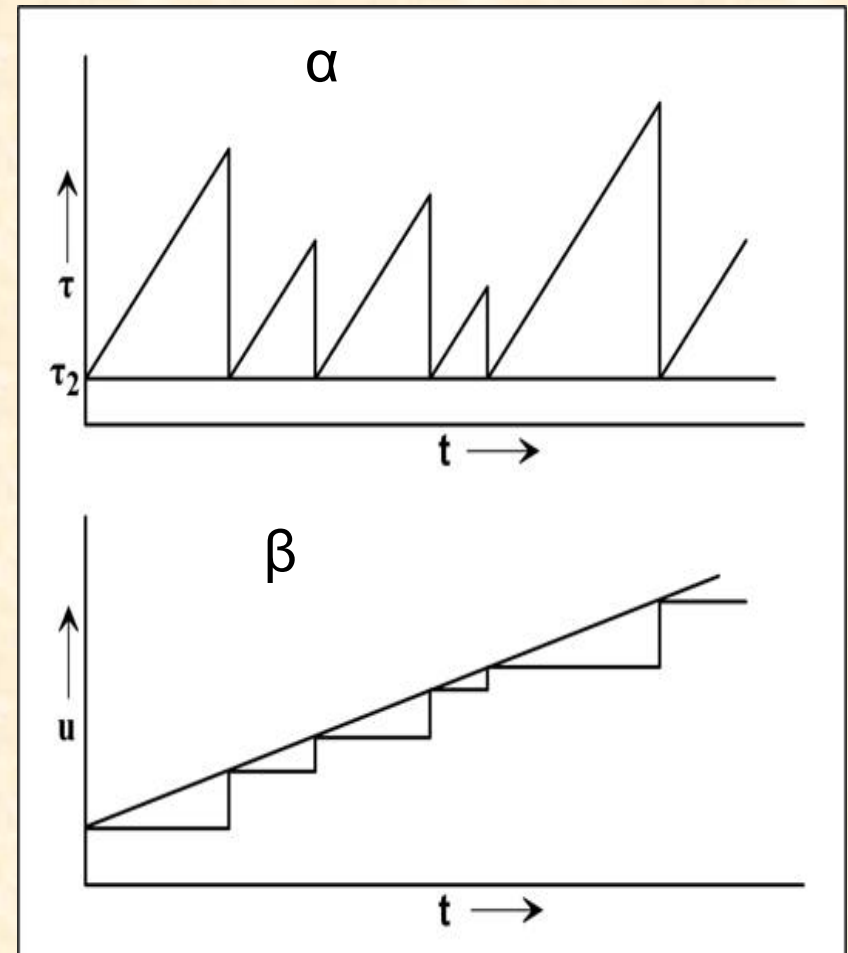
μοντέλο πρόγνωσης χρόνου

- Η τάση μεταβάλλεται χρονικά ώσπου να φτάσει ένα σταθερό ανώτερο όριο πάνω στο ρήγμα (α). Η πτώση τάσης μεταβάλλεται σε κάθε σεισμό άρα οι τιμές της ελάχιστης τάσης δεν είναι σταθερές. Οι τιμές της ελάχιστης αθροιστικής ολίσθησης u βρίσκονται σε ευθεία γραμμή (β). Η ολίσθηση όπως φαίνεται στο σχήμα είναι διαφορετική για κάθε σεισμό γιατί μεταβάλλονται και οι μέγιστες τιμές της αθροιστικής ολίσθησης.
- Ο χρόνος γένεσης μπορεί να προβλεφθεί από την ολίσθηση πάνω στο ρήγμα κατά τον προηγούμενο σεισμό που είναι γνωστή ή υπολογίζεται από το μέγεθος του προηγούμενου σεισμού που είναι επίσης γνωστό



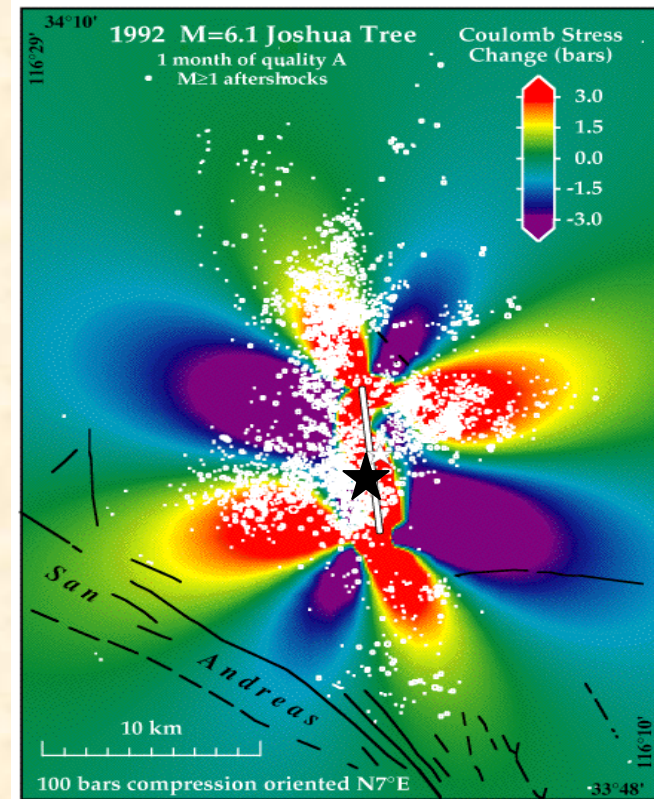
μοντέλο πρόγνωσης ολίσθησης

- Το κάτω όριο της τάσης παραμένει σταθερό (α) κάτι που δεν συμβαίνει στο πάνω όριο και σαν συνέπεια η πτώση τάσης μεταβάλλεται σε κάθε σεισμό. Το ανώτερο όριο της αθροιστικής ολίσθησης βρίσκεται σε ευθεία γραμμή (β) ενώ η μεταβολή του κάτω ορίου ποικίλει από σεισμό σε σεισμό.
- Μπορούμε να προβλέψουμε την ολίσθηση ενός επερχόμενου σεισμού, γιατί αυτή καθορίζεται από τον χρόνο που πέρασε από τον χρόνο γένεσης του προηγούμενου σεισμού.



μεταβολής της στατικής τάσης

- Σύμφωνα με τις τώρα μελέτες η γένεση των σεισμών επιφέρει μεταβολή στην διατμητική και την κάθετη τάση στα γειτονικά ρήγματα. Η μεταβολή εκτιμάται από την μεταβολή της συνάρτηση του Coulomb. Αυτή είναι ορισμένη χωρική κατανομή γύρω από την εστία του σεισμού και εξαρτάται από την ολίσθηση στην εστία του σεισμού και από τις διαστάσεις και τον προσανατολισμό του ρήματός του και υπολογίζεται από τις σχετικές παραμέτρους της εστίας.
- Μας είναι χρήσιμη για να εκτιμήσουμε αν η γένεση ενός σεισμού επιταχύνει ή επιβραδύνει την γένεση κάποιου άλλου σεισμού



Χωρική κατανομή σε σεισμό στο Joshua tree το 1992.. Βλέπουμε ότι ο σεισμός (μαύρο αστέρι) με μέγεθος M=6.1 έγινε στη περιοχή μέγιστης αύξησης της στατικής τάσης, πάνω σχεδόν στο ρήγμα του.

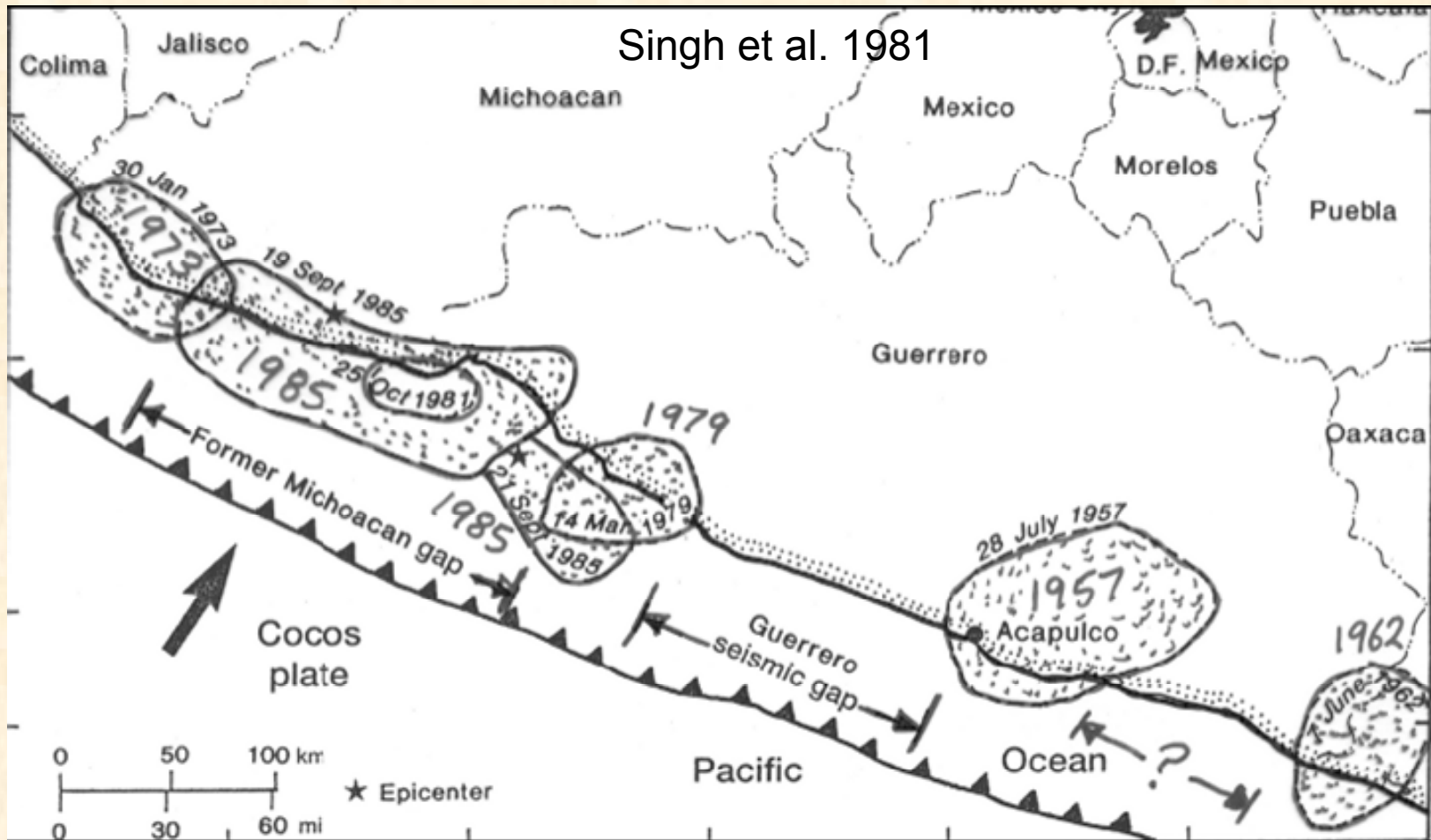
ΠΡΟΣΩΡΙΝΑ ΣΕΙΣΜΙΚΑ ΚΕΝΑ

- Η πρόγνωση έχει νόημα όταν γίνεται σε περιοχή όπου συμβαίνουν συχνοί και καταστρεπτικοί σεισμοί (π.χ. νότια Αμερική).
- Αν χαρτογραφήσουμε στον χάρτη μίας περιοχής τα επίκεντρα των σεισμών, παρατηρούμε ότι σε ορισμένες περιπτώσεις εμφανίζεται απουσία επικέντρων εκεί που λογικά θα αναμένονταν. Όταν μάλιστα στην περιοχή αυτή υπάρχουν πληροφορίες ότι υπήρξε έντονη σεισμική δράση στο παρελθόν.
- Δεχόμενοι αυτό υποθέτουμε ότι προφανώς σε αυτό φταίει ή η χρονική περίοδος που χαρτογραφήσαμε ή τα δεδομένα μας καλύπτουν μεγάλα μεγέθη ενώ στην περιοχή η έντονη σεισμικότητα εμφανίζεται με σεισμούς ενδιαμέσων μεγεθών.
- Αν λυθούν οι δύο προαναφερθείσες υποθέσεις καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι στις περιοχές αυτές στο μέλλον θα εκδηλωθεί πάλι έντονη σεισμική δράση.
- Οι περιπτώσεις αυτές ονομάζονται **προσωρινά σεισμικά κενά**.

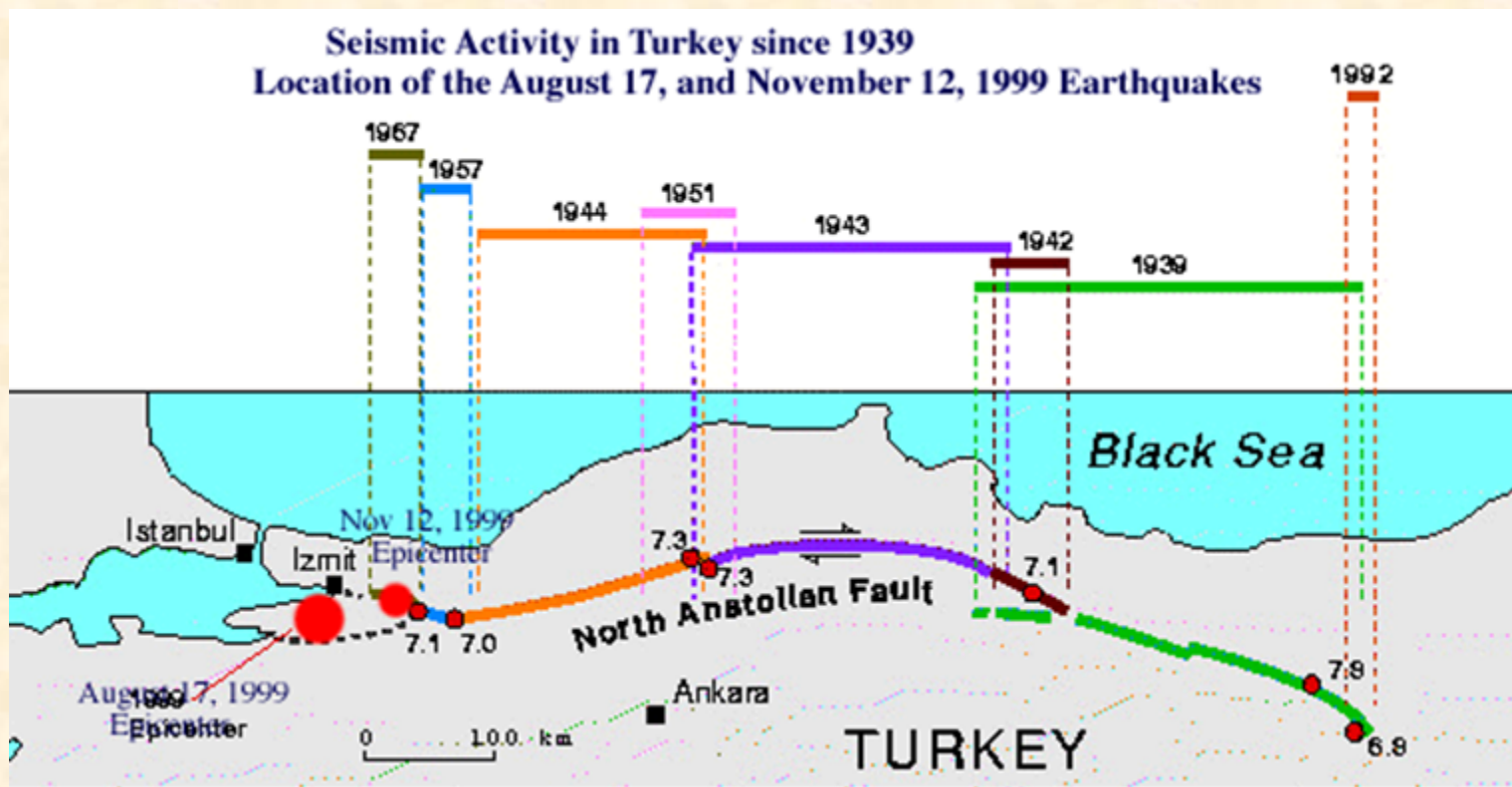
(συνέχεια)

- Για να θεωρηθεί μία περιοχή σαν προσωρινό σεισμικό κενό εφαρμόζονται διάφορα κριτήρια και το περισσότερο ιδιαίτερο κριτήριο είναι ότι στη περιοχή αυτή δεν έγινε σεισμός τα τελευταία 30 χρόνια και ότι τα ρήγματα τις περιοχής είναι ανάστροφα ή οριζόντιας μετατόπισης.
- Στη συνέχεια στην περιοχή του σεισμικού κενού γίνεται προσπάθεια της εκτίμησης του χρόνου γένεσης του σεισμού.
- Οι σεισμογόνοι χώροι των μεγάλων σεισμών που έγιναν τις τελευταίες δεκαετίες και για τον λόγο αυτόν έχουν μελετηθεί επαρκώς, μας έδειξαν από την κατανομή των μετασεισμών ότι δεν συμπίπτουν αλλά κατανέμονται ο ένας δίπλα στον άλλο κατά μήκος της ζώνης επαφής δύο πλακών. Όταν σε έναν από αυτούς τους χώρους δεν έχει συμβεί σεισμός για πολλά χρόνια, ενώ παλαιότερα είχαν γίνει, τότε αυτός ο χώρος θεωρείται σεισμικό κενό

Σεισμικό κενό σε περιοχή του Μεξικού



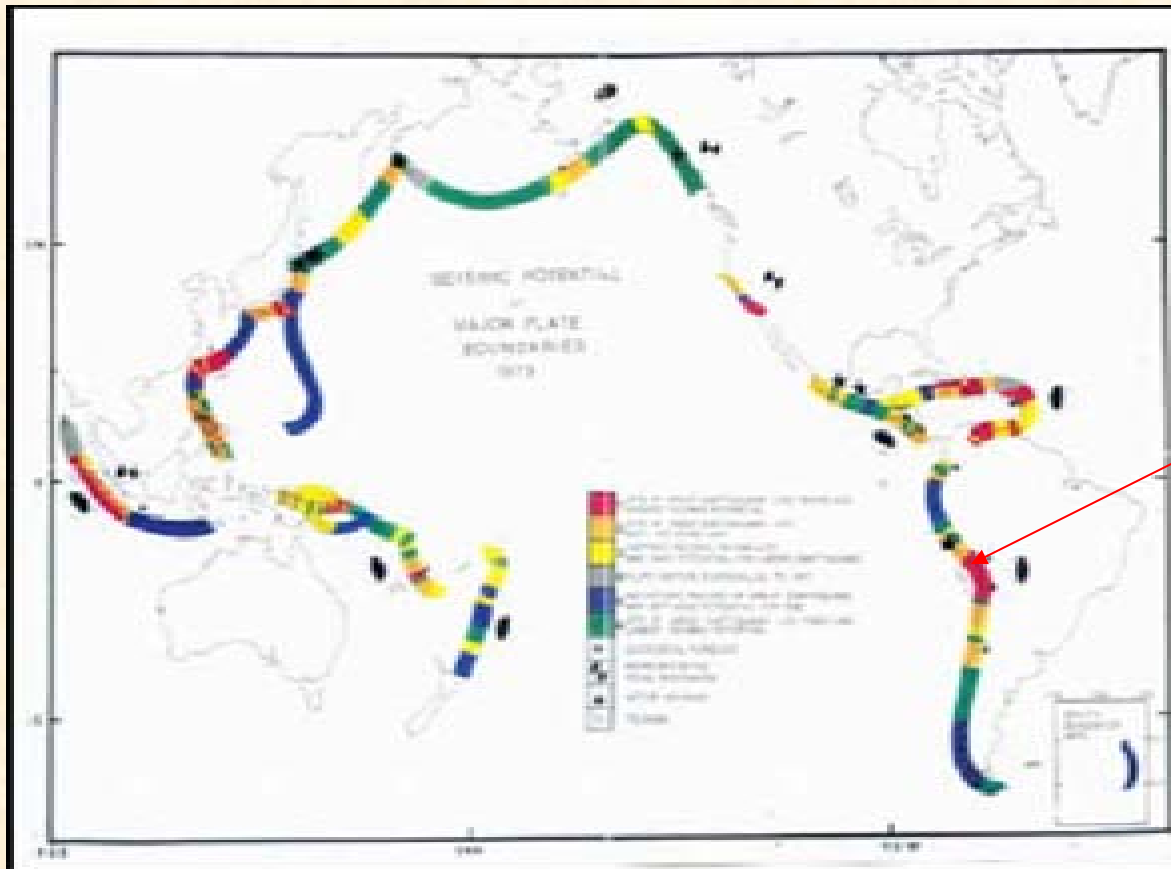
Μία άλλη προσέγγιση του προβλήματος είναι η **μετατόπιση ή περιοδία των επικέντρων**. Σύμφωνα με αυτήν έχει παρατηρηθεί συστηματική μετάθεση του επικέντρου του σεισμού κατά μήκος μίας σεισμικής ζώνης προς ορισμένη κατεύθυνση. Αν προς την κατεύθυνση αυτή υπάρχει ένα σεισμικό κενό τότε μπορούμε να είμαστε βέβαιοι για την γένεση του σεισμού χωρίς φυσικά να γνωρίζουμε τον ακριβή χρόνο γένεσης.



Μετανάστευση προς τα δυτικά επικέντρων στο ρήγμα της βόρειας Ανατολίας, σεισμών που έγιναν από το 1939 μέχρι το 1967 με μεγέθη μεταξύ 7.3-8.0

(συνέχεια)

Τα σεισμικά κενά στην Περι-Ειρηνική Ζώνη, όπως αυτά ορίστηκαν το 1981 από τους Nishenko και McCann. Με διαφορετικά σύμβολα καθορίζονται τα τμήματα των ορίων των λιθοσφαιρικών πλακών στη ζώνη αυτή με διαφορετικό «σεισμικό δυναμικό». Για παράδειγμα τα τμήματα με κόκκινο χρώμα θεωρούνται ώριμα σεισμικά κενά, δηλαδή, τμήματα στα οποία αναμένονται ισχυροί σεισμοί

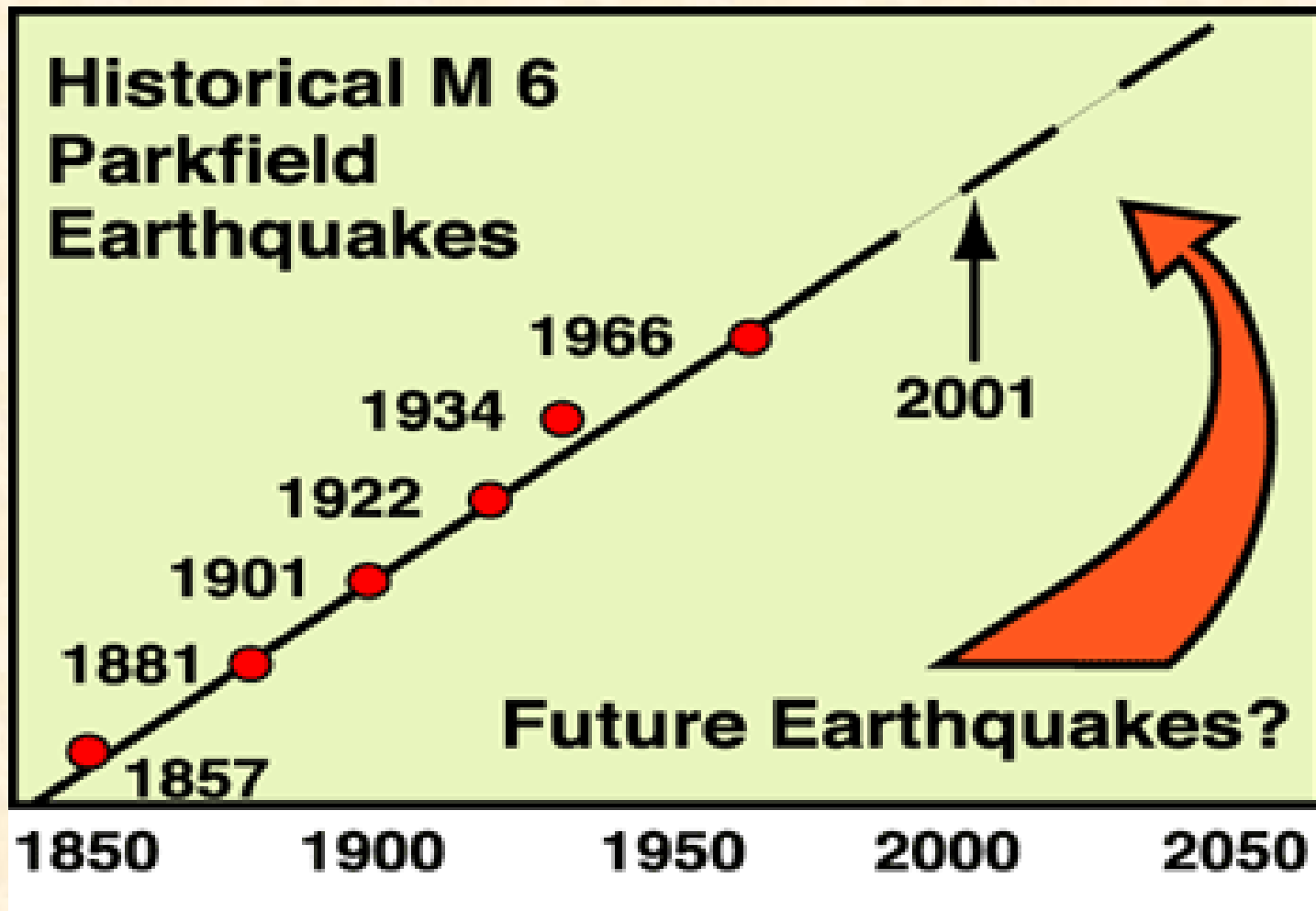


2001, M=8.4

(συνέχεια)

- Μία άλλη μέθοδος βασίζεται στην **περίοδο επανάληψης** των σεισμών. Με βάση αυτήν συλλέγονται τα δεδομένα μίας περιοχής που υπάρχουν για το σεισμικό κενό. Στη συνέχεια ορίζεται ο ανά σεισμικό μέγεθος αριθμός των σεισμών και γίνεται αναγωγή του στη μονάδα του χρόνου. Συνήθως αυτός είναι το 1 έτος.
- Υπολογίζονται οι παράμετροι a και b της σχέσης των Gutenberg και Richter και με βάση αυτές υπολογίζεται η ανά μονάδα μεγέθους αναμενόμενη περίοδος επανάληψης.
- Η μέθοδος χρησιμοποιείται για την κατασκευή χαρτών σεισμικής επικινδυνότητας και εφαρμόζεται στην τεχνική σεισμολογία.

Περίοδος επανάληψης. Στο Parkfield της Καλιφόρνιας έχει παρατηρηθεί ένας ισχυρός σεισμός ($M=6.0$) κάθε 22 χρόνια



(συνέχεια)

- Μία ακόμα μέθοδος που αφορά τον καθορισμό του χρόνου γένεσης σεισμού σε σεισμικό κενό στηρίζεται στην ταχύτητα κίνησης των λιθοσφαιρικών πλακών και στην αντοχή των πετρωμάτων. Η ανηγμένη παραμόρφωση θραύσης των πετρωμάτων είναι της τάξης του 5×10^{-5} , ενώ οι ταχύτητες των λιθοσφαιρικών πλακών φθάνουν γενικά τα 20 cm/yr.
- Εφόσον σε συγκεκριμένη περιοχή (σεισμικό κενό) είναι γνωστή η ταχύτητα κίνησης των λιθοσφαιρικών πλακών, μπορούμε να εκτιμήσουμε το ρυθμό μεταβολής της ανηγμένης παραμόρφωσης των πετρωμάτων και εφόσον γνωρίζουμε την κρίσιμη τιμή όπου το πέτρωμα σπάει (ρήγμα-σεισμός) μπορούμε να προσδιορίσουμε τον χρόνο που μεσολαβεί μεταξύ δύο σεισμών.

Πρόδρομα φαινόμενα σεισμών

- Η σεισμική ενέργεια συσσωρεύεται λόγω των τάσεων που ασκούνται για ικανή χρονική περίοδο στον σεισμογόνο χώρο των σεισμών με μορφή *ενέργειας ελαστικής παραμόρφωσης*. Η παραμόρφωση αυτή έχει σαν αποτέλεσμα την μεταβολή των φυσικών ιδιοτήτων των πετρωμάτων στο σεισμογόνο χώρο (π.χ. μικρορωγμές) αλλά και άλλων φυσικών παραμέτρων, και έχει σαν αποτέλεσμα να εμφανίζονται διάφορα **πρόδρομα φαινόμενα**.
- Οι τιμές των παραμέτρων αυτών αποκλίνουν από τις κανονικές για ένα ορισμένο χρονικό διάστημα που ποικίλλει από λίγες ώρες μέχρι αρκετά χρόνια και επανέρχονται στην αρχική τους τιμή λίγο πριν ή κατά την γένεση ενός σεισμού.

(συνέχεια)

- Πολλές από τις προσπάθειες που έγιναν με παρατήρηση τέτοιων μεταβολών είχαν επιτυχές αποτέλεσμα.
Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η πρόγνωση του σεισμού στην πόλη Haicheng της Κίνας το 1975. Οι κάτοικοι ειδοποιήθηκαν πριν τον σεισμό και έτσι γλύτωσαν 10.000 κάτοικοι.
- Η προσπάθεια που κάνουν οι επιστήμονες είναι η συνεχής παρακολούθηση και καταγραφή των τιμών των παραμέτρων αυτών και η επισήμανση των τιμών που αποκλίνουν από τις κανονικές.
- Οι κυριότερες από τις παραμέτρους αυτές που μελετώνται αφορούν:
 - 1) παραμορφώσεις του φλοιού της Γης
 - 2) μεταβολές της σεισμικής δράσης
 - 3) ορισμένες μεταβολές σε σεισμικές παραμέτρους

Παραμορφώσεις του φλοιού της Γης

- - Οριζόντιες μεταβολές εδάφους (επιμηκύνσεις ή επιβραχύνσεις) της τάξης του 10^{-6} μετριοούνται συνεχώς με τοπογραφικές μεθόδους.
- - Κατακόρυφες μεταβολές του εδάφους (ανυψώσεις και καθιζήσεις) της τάξης μερικών εκατοστών που έχουν προσδιορισθεί στην ξηρά ή στην θάλασσα όπου παρατηρείται μεταβολή της μέσης στάθμης.
- - Μεταβολή της κλίσης του εδάφους της τάξης 10^{-5} έως 10^{-6} rad/yr που μετριοούνται με κλισιόμετρα.

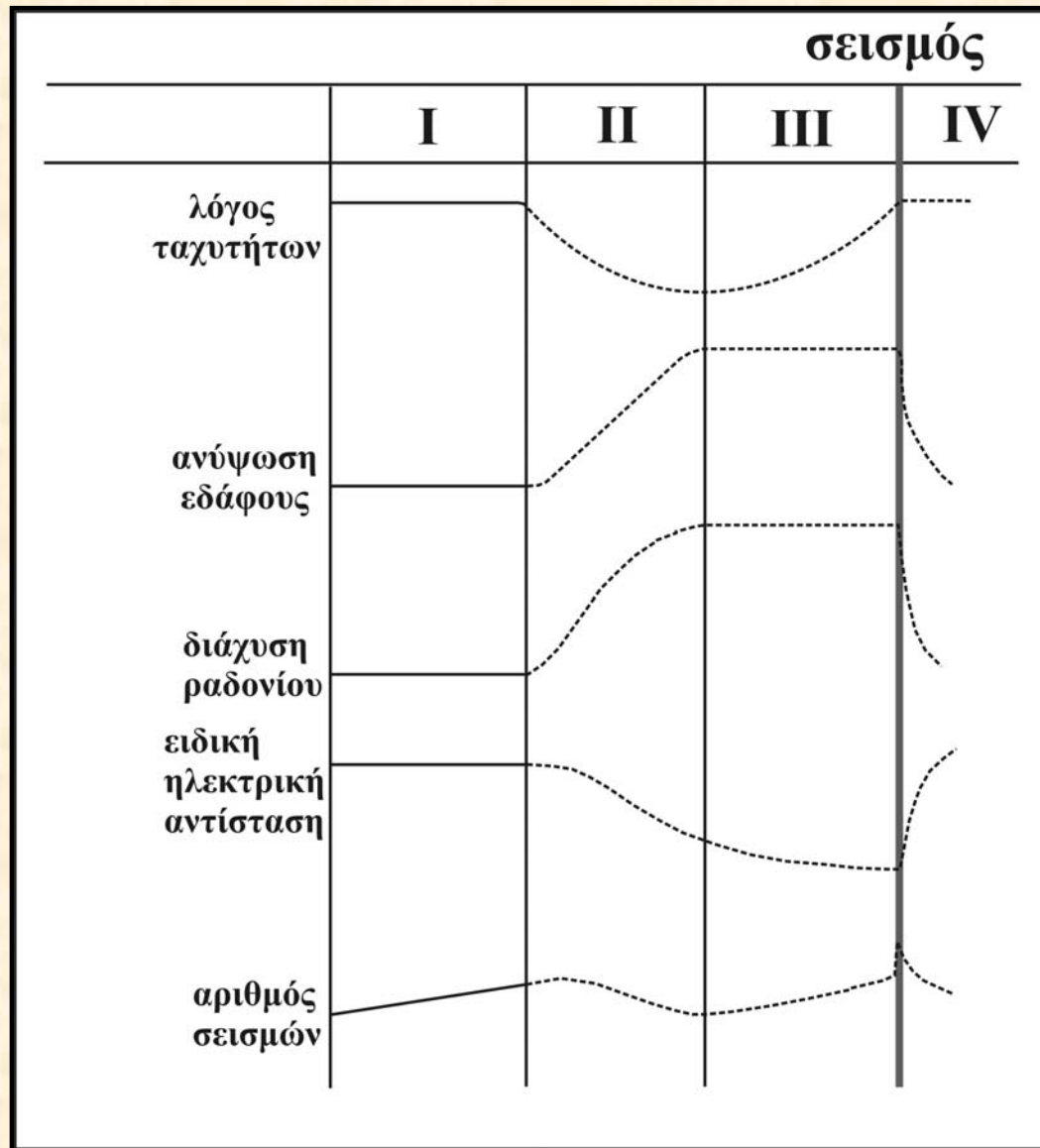
Μεταβολές της σεισμικής δράσης

- Οι μεταβολές που έχουν παρατηρηθεί πριν την γένεση σεισμών είναι:
 - - Ελάττωση του ρυθμού γένεσης μικρών σεισμών στον εστιακό χώρο μεγάλων σεισμών. Αυτή μπορεί να αρχίσει μερικά χρόνια πριν τον σεισμό. Τέτοιο φαινόμενο παρατηρήθηκε πριν τον σεισμό του 1953 ($M=7.2$) στα Ιόνια νησιά (Parazachos 1980).
 - - Αύξηση της συχνότητας γένεσης μικρών σεισμών κοντά στην εστία του κύριου σεισμού ορισμένες μέρες ή εβδομάδες πριν την εκδήλωσή του. Οι σεισμοί αυτοί θεωρούνται ως προσεισμοί και η στατιστική τους συμπεριφορά είναι διαφορετική από την συνηθισμένη σεισμική δράση της περιοχής.
 - - Έχει παρατηρηθεί αύξηση των σεισμών βάθους πριν την γένεση επιφανειακών σεισμών.

Μεταβολές των γεωφυσικών παραμέτρων

- - ελάττωση του λόγου α/β της ταχύτητας των επιμήκων και εγκαρσίων κυμάτων μέχρι και 15 % από την κανονική τιμή
- - μεταβολή του μηχανισμού γένεσης μικρών σεισμών (αλλάζει διεύθυνση η συνιστώσα θλίψης)
- - μεταβολή της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης στα πετρώματα του εστιακού χώρου
- - μεταβολή της έντασης του μαγνητικού πεδίου της Γης
- - μεταβολή της έντασης του γεωηλεκτρικού πεδίου.
- - μεταβολή της έντασης του πεδίου βαρύτητας
- - μεταβολές της στάθμης και της θερμοκρασίας του υπόγειου νερού
- - μεταβολή της περιεκτικότητας σε ραδόνιο του μεταλλικού νερού

Μεταβολές διαφόρων παραμέτρων



(συνέχεια)

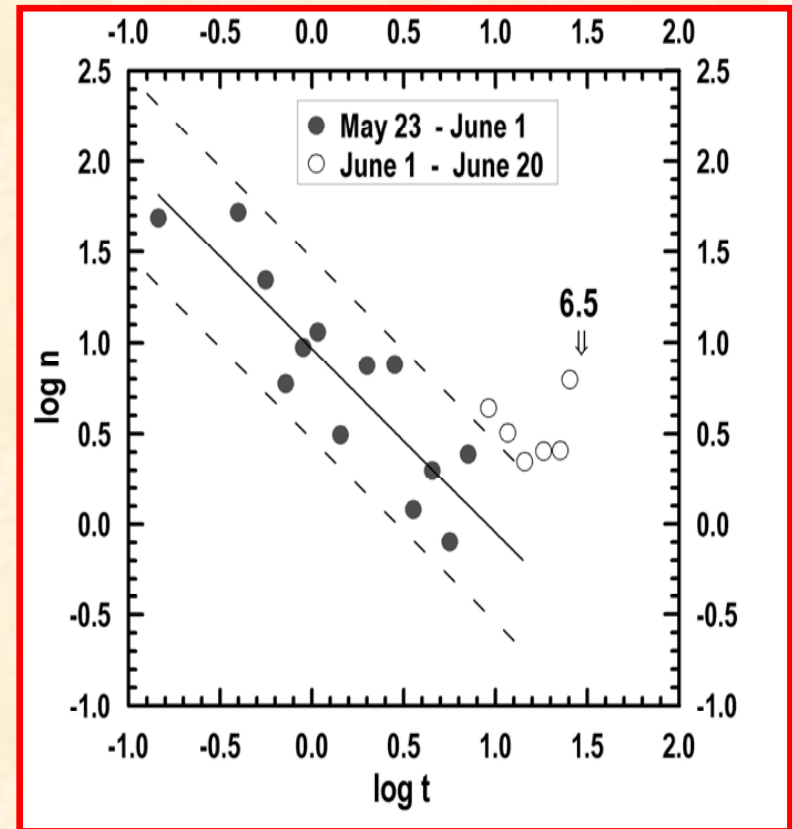
- Για τις περισσότερες φυσικές παραμέτρους βρέθηκε ότι υπάρχει στατιστική σχέση μεταξύ του χρόνου που αρχίζει η μεταβολή και της εκδήλωσης του κύριου σεισμού και το χρονικό αυτό διάστημα εξαρτάται από το μέγεθος του σεισμού. Ισχύει γενικά η σχέση (Παπαζάχος 1990)

$$\log T = 0.76M - 1.83$$

- όπου T ο χρόνος σε μέρες πριν από τον κύριο σεισμό
- Υπάρχουν όμως και φαινόμενα όπως π.χ. η απόσυρση της θάλασσας που εμφανίζονται λίγο πριν τον κύριο σεισμό και δεν εξαρτώνται από το μέγεθός του.
- Γενικά η πρόγνωση μπορούμε να πούμε ότι είναι ένα πολυκλαδικό πρόβλημα και απαιτείται η στενή συνεργασία σεισμολόγων, γεωλόγων, μηχανικών, τοπογράφων, κτλ.

(συνέχεια)

- Η χρονική κατανομή των μετασεισμών ακολουθεί φθίνουσα πορεία όπως είπαμε και στο αντίστοιχο κεφάλαιο σύμφωνα με τον νόμο του Ομογι. Η παρέκκλιση της από αυτόν τον νόμο μπορεί να θεωρηθεί σαν πρόδρομο φαινόμενο επερχόμενου σεισμού.
- Στις 23 Μαΐου 1978 κοντά στη Θεσσαλονίκη (λεκάνη της Μυγδονίας) έγινε σεισμός με μέγεθος $M=5.8$. η χρονική κατανομή των μετασεισμών (μαύροι κύκλοι) έδειξε ότι υπήρχε ομαλή εξέλιξη μέχρι την 1^η Ιουνίου. Από τότε παρατηρήθηκε απόκλιση από την κανονική κατανομή που ήταν οι προσεισμοί (άσπροι κύκλοι) του σεισμού της 20^{ης} Ιουνίου με μέγεθος $M=6.5$ που ακολούθησε. Οι διακεκομμένες γραμμές ορίζουν το διάστημα εμπιστοσύνης (Papazachos et al., 1983).

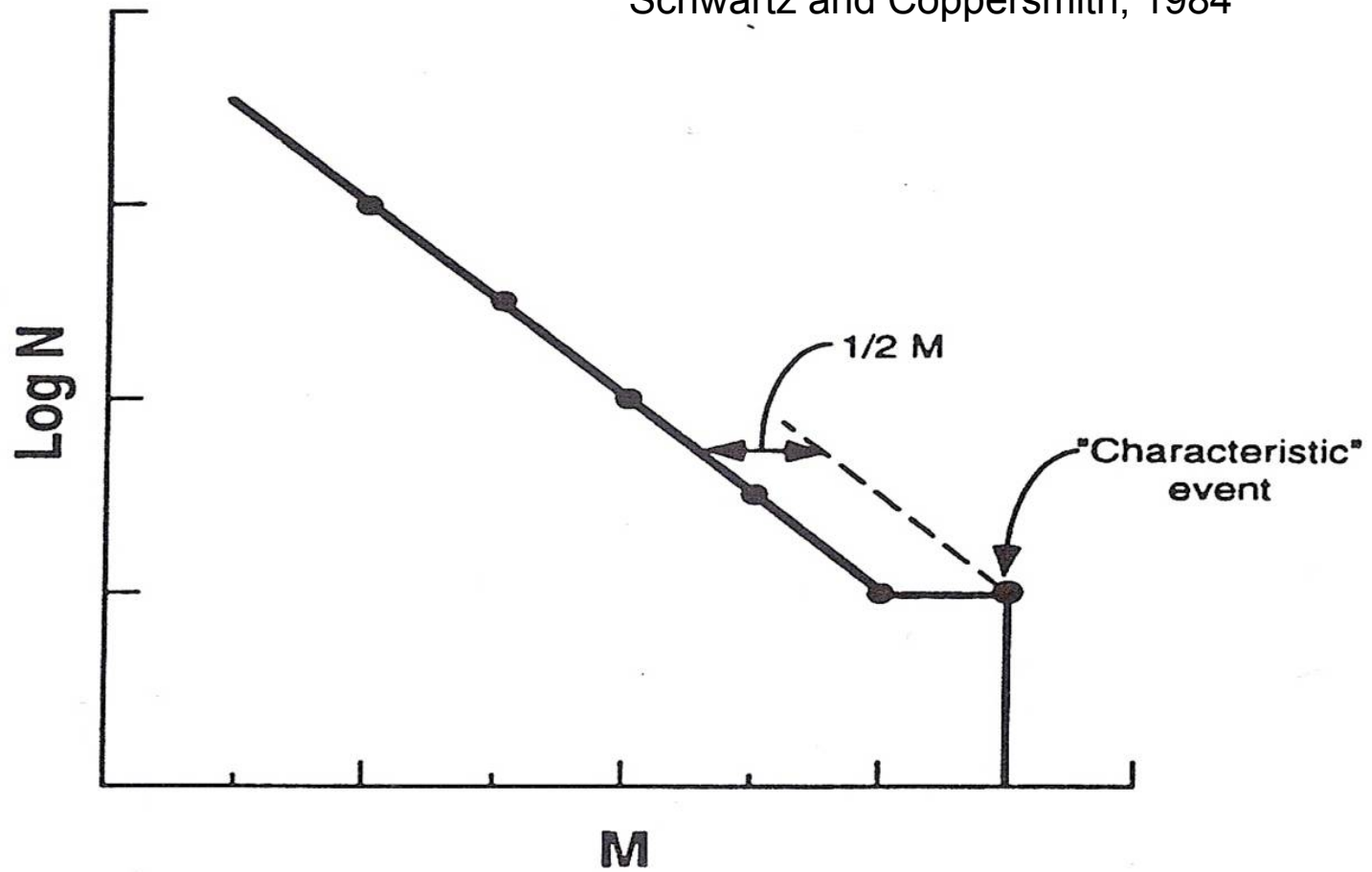


Ο χαρακτηριστικός σεισμός

- Προτάθηκε από τους Schwartz and Coppersmith (1984) η έννοια του «χαρακτηριστικού» σεισμού. Σύμφωνα με αυτόν σε κάποια συγκεκριμένα ρήγματα υπάρχει η τάση να γίνονται σεισμοί της ίδιας περίπου κλίμακας μεγέθους το οποίο θα είναι το μέγιστο μέγεθος σεισμού που μπορεί να δώσει το συγκεκριμένο ρήγμα όπως αυτό καθορίζεται από τις τοπικές μηχανικές ιδιότητες, τάσεις, γεωμετρία, κτλ. χωρίς αυτό να σημαίνει ότι το ρήγμα αυτό δεν δίνει και μικρότερους σεισμούς που ακολουθούν τον νόμο των Gutenberg-Richter. Συνήθως ο «χαρακτηριστικός» σεισμός δεν ακολουθεί την ευθεία όπου κατανέμονται τα μικρότερα μεγέθη σεισμών αλλά είναι μετατοπισμένος κατά μισή μονάδα μεγέθους περίπου μεταξύ της μέσης ευθείας που ακολουθούν οι άλλοι σεισμοί και του σημείου που αντιπροσωπεύει τον μεγαλύτερο «χαρακτηριστικό» σεισμό. Το μοντέλο αυτό εξηγεί με άλλα λόγια την συμπεριφορά ενός ρήγματος κατά την διάρκεια της δραστηριοποίησής του. Μία συχνή παρεξήγηση για το μοντέλο αυτό είναι ότι υπονοεί σταθερές ή περιοδικές περιόδους επανάληψης. Ο όρος «χαρακτηριστικός» αναφέρεται μόνο στην επανάληψη παρόμοιου μεγέθους σεισμών και όχι στο χρονικό διάστημα που μεσολαβεί μεταξύ τους

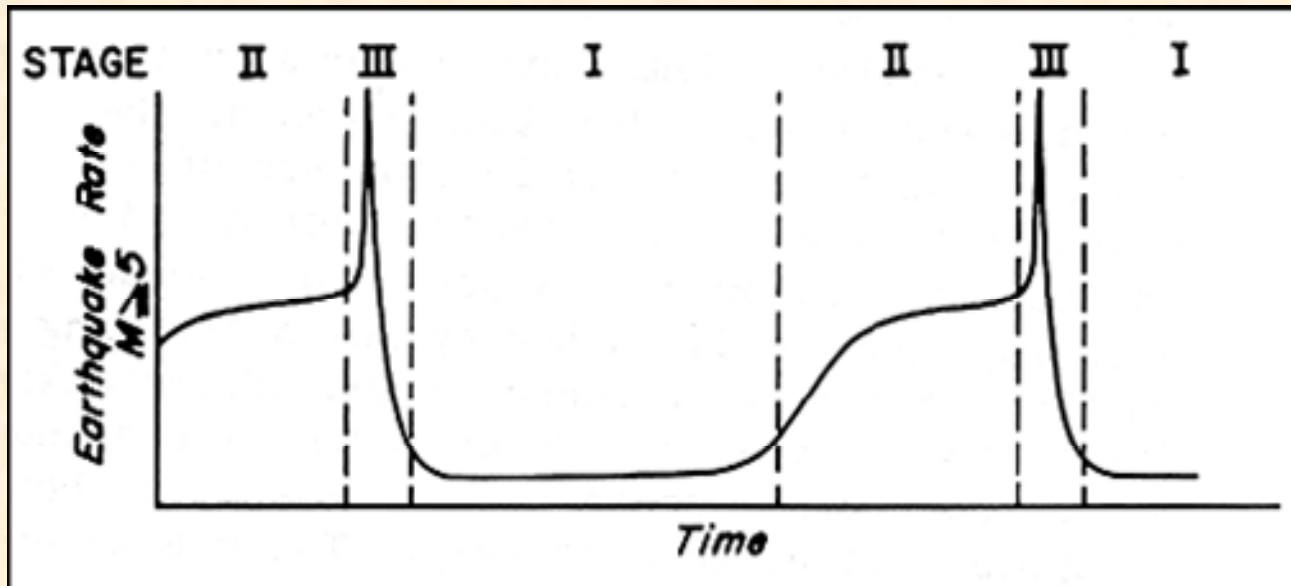
Σχηματική παράσταση του χαρακτηριστικού σεισμού

Schwartz and Coppersmith, 1984



Ο σεισμικός κύκλος

- Η δραστηριότητα ενός ρήγματος δεν είναι σταθερή αλλά ακολουθεί κύκλους έντονης δράσης σε εναλλαγές με μεγάλες περιόδους ηρεμίας (clusters) (Hecker and Schwartz 1994, McCalpin and Nishenko 1996). Ο ρυθμός ολίσθησης (r) πάνω στο ρήγμα διακρίνεται σε 2 είδη: α) στον «μέσο» ρυθμό ολίσθησης που είναι ο κανονικός ρυθμός σε συνάρτηση με τον χρόνο και β) στον «φαινόμενο» ρυθμό ολίσθησης που είναι διαφορετικός για κάθε περίοδο σεισμικής έξαρσης.
- είναι: $r = D/T = \text{μετατόπιση} / \text{χρόνος}$
- δηλαδή ο λόγος της συνολικής ολίσθησης ενός ρήγματος προς την μονάδα του χρόνου (T) που χρειάστηκε για την μετατόπιση



Σχηματική παράσταση του ρυθμού σεισμικότητας κατά την διάρκεια ενός σεισμικού κύκλου.

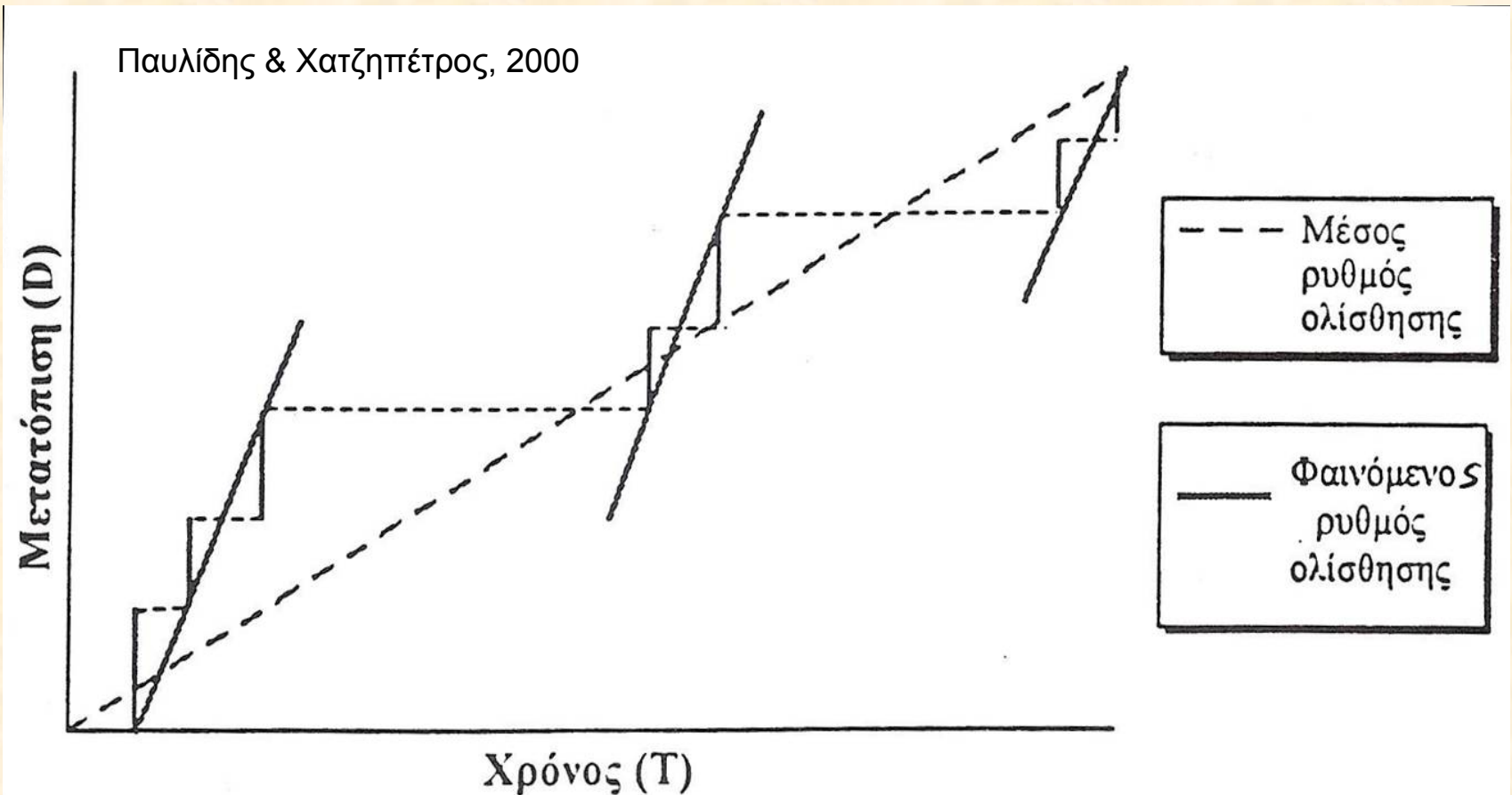
(I) περίοδοι ηρεμίας,
(II) ενεργές περιόδους
(III) μετασεισμικές περιόδους

(Ellsworth et al., 1981)

(συνέχεια)

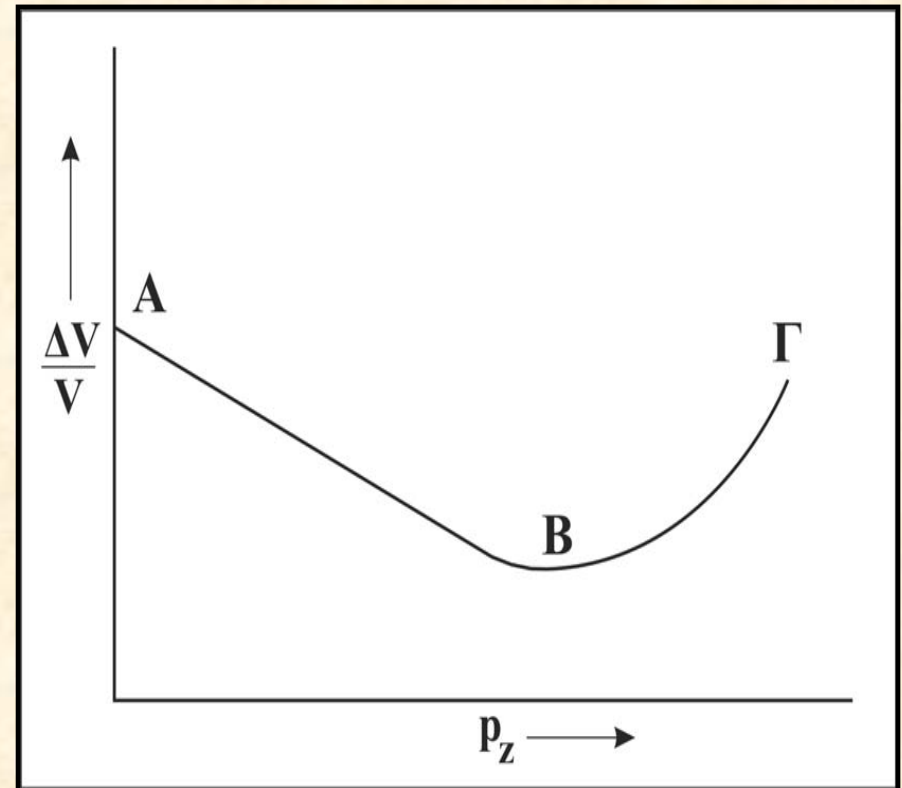
- Χρησιμοποιώντας τα δύο προηγούμενα μοντέλα (του χαρακτηριστικού σεισμού και του σεισμικού κύκλου) έγιναν προσπάθειες πρόγνωσης σεισμών.
- Γενικά μπορούμε να πούμε ότι η συμπεριφορά κάποιου σεισμογόνου ρήγματος εξαρτάται από το γεωτεκτονικό καθεστώς στην περιοχή και κανένα από τα μοντέλα δεν έχει εφαρμογή για κάθε μία περίπτωση γένεσης σεισμού.
- Σε γενικές γραμμές φαίνεται ότι τα μεγάλα ρήγματα στα όρια των λιθοσφαιρικών πλακών τείνουν να έχουν περιοδικότητα στις εμφανίσεις σεισμών συγκεκριμένου μεγέθους (χαρακτηριστικός σεισμός), ενώ ρήγματα που βρίσκονται στην ενδοχώρα τείνουν να ακολουθούν το μοντέλο του σεισμικού κύκλου με περιόδους σεισμικής ησυχίας και σεισμικής έξαρσης.

Σχηματική παράσταση μοντέλου clusters. Διακρίνονται οι περίοδοι σεισμικής ησυχίας και σεισμικής δραστηριότητας καθώς και ο μέσος και ο φαινόμενος ρυθμός ολίσθησης



Φυσική ερμηνεία των πρόδρομων φαινομένων

- Οι προσπάθειες που έγιναν για την κατανόηση των προδρόμων φαινομένων κατέληξαν στην διατύπωση της **θεωρίας της διασταλτικότητας**. Σύμφωνα με αυτήν αν ασκήσουμε σε ένα πέτρωμα τάσεις συμπίεσης κατά την διεύθυνση ενός τρισσορθογωνίου συστήματος αξόνων και χαρτογραφήσουμε την ανηγμένη παραμόρφωση με την τάση P_z κατά την διεύθυνση της μέγιστης συμπίεσης παρατηρούμε το εξής: στην αρχή αυξανομένης της τάσης ο όγκος του πετρώματος συστέλλεται και η $\Delta V/V$ ακολουθεί μία σχεδόν γραμμική σχέση με την τάση (AB). Στη συνέχεια η γραμμική σχέση παύει να υπάρχει και παρά την αύξηση της τάσης το πέτρωμα διαστέλλεται (BΓ) μέχρι που το πέτρωμα υφίσταται θραύση (Γ)



Μεταβολή της ανηγμένης παραμόρφωσης πετρώματος σε συνάρτηση με την ασκούμενη σε αυτό μέγιστη τάση συμπίεσης. AB=κανονική συστολή, BΓ=διασταλτικότητα (Παπαζάχος 1990)

(συνέχεια)

- Το φαινόμενο εξηγείται αν δεχθούμε ότι ενώ το πέτρωμα υφίσταται διαστολή δημιουργούνται κενά από την δημιουργία μικρορωγμών μέσα του. Ο μεγάλος άξονας των μικρορωγμών είναι παράλληλος με την διεύθυνση της μέγιστης συμπίεσης ενώ αυτές διογκώνονται κατά την διεύθυνση της ελάχιστης συμπίεσης.
- Αν μεταφέρουμε το φαινόμενο αυτό στον εστιακό χώρο πριν τον σεισμό τότε οι μικρορωγμές που δημιουργούνται είναι οι εστίες των προσεισμών. Οι μικρορωγμές στη συνέχεια γεμίζουν με νερό και έτσι εξηγείται η ελάττωση του λόγου α/β που παρατηρείται πριν την γένεση σεισμού (έχουμε αναφερθεί σε προηγούμενο κεφάλαιο για τις ιδιότητες των S-κυμάτων).
- Οι προσπάθειες να εξηγηθούν και τα άλλα πρόδρομα φαινόμενα με την θεωρία αυτήν συνεχίζονται.

THE MARKOV MODEL AS A PATTERN FOR EARTHQUAKES RECURRENCE IN SOUTH AMERICA

by

THEODOROS M. TSAPANOS

Aristotle University of Thessaloniki, School of Geology, Geophysical
Laboratory, 54006 Thessaloniki, Greece

Υπάρχουν και στατιστικά μοντέλα με τα οποία
μπορούμε να κάνουμε πρόγνωση

METHOD APPLIED

- Time span 1899-1992. Only shallow shocks with magnitude $M \geq 6.5$
- Among other models, Markov chain is a probabilistic model of earthquake recurrence, with various applications.
- The Markov process has a basic property which is the memory of one-step. According to this property the probability of being in some state j at a future time is deduced from the knowledge of the state l at an earlier time.
- The process describes the visits between the states which is the Markov-chains process. Anything can be considered as a state in the Markov model, i.e. stress of energy release levels or magnitude of earthquakes., etc.
- Steps from one state to another imply the occurrence of earthquakes and are described by the transition probabilities (Anagnos and Kiremidjian, 1988)
- In the present work as states are defined the seismic zones in which the investigated area is pre-divided (Papadimitriou , 1993 ; Papazachos, et al., 1997; Cernadas, et al., 1998). The zones finally considered are six. So we have six states.

- Let P_{ij} be the probability the Markov process, which entered state i on its last transition, will enter state j on the next transition and is computed by the maximum likelihood estimators.
- The transition probabilities which completely determine the Markov process must satisfy the following properties:

$$P_{ij} \geq 0 \quad i = 1, 2, 3, \dots, N \quad j = 1, 2, 3, \dots, N \quad (1)$$

$$\text{and} \quad \sum_{i=1}^N P_{ij} = 1 \quad (2)$$

where N is the total number of states in a system.

- Whenever the process enters a state i the likelihood that it will go to state j in the next step is determined by the transition probability P_{ij} , which can be estimated by :

$$P_{ij} = \frac{n_{ij}}{n_i} \quad (3)$$

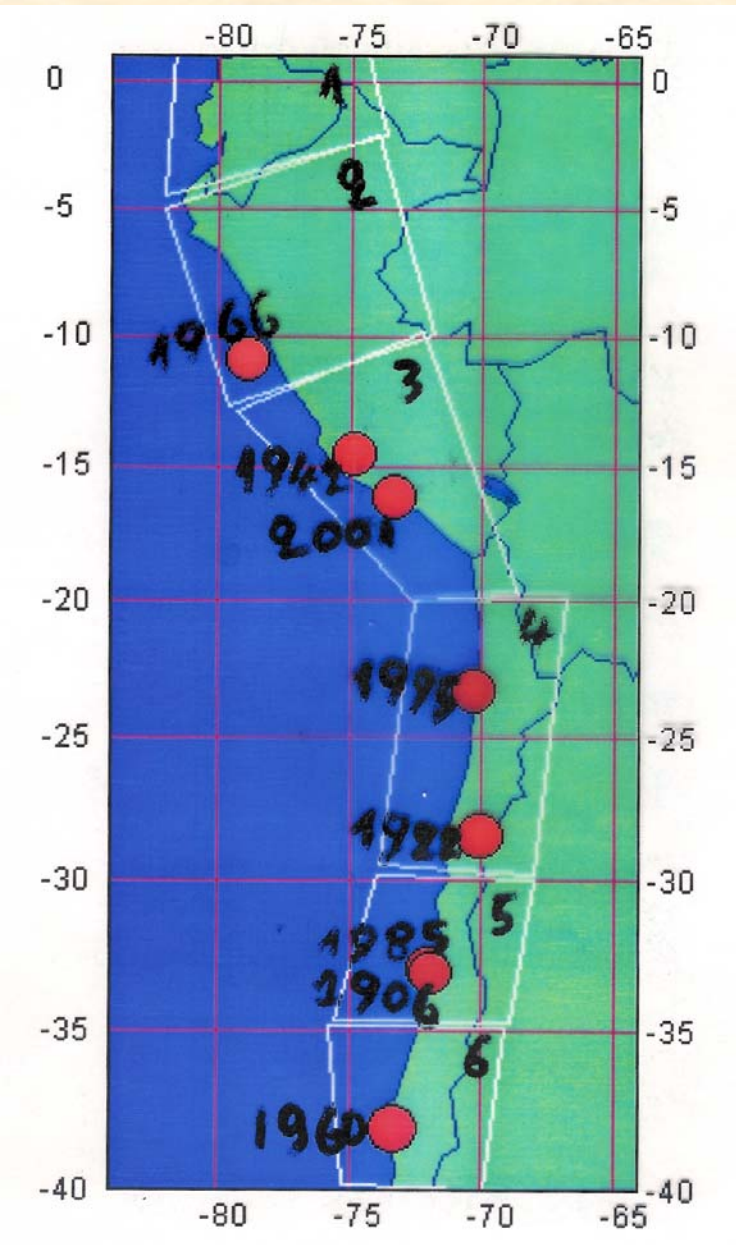
where n_i is the observed number of the transitions from state i to state j and n_{ij}

is the observed number of transitions from state i to all possible states.

- The frequency of visits in every state and the transition probabilities between the states can be expressed through the transition probability matrix. A frame work of a transition matrix (2*2) is presented below:

	state 1	state 2	row total
State 1	n_{11}	n_{12}	n_1
	p_{11}	p_{12}	
State 2	n_{21}	n_{22}	n_2
	p_{21}	p_{22}	

In this matrix, the frequency of transitions in every state and the transition probabilities between the states, are demonstrated. Symbols n_{11}, \dots, n_{22} denote frequency of visits in every state, while p_{11}, \dots, p_{22} are the corresponding transition probabilities of visits from state i to state j and n_1 and n_2 represent the total number of visits in every row.



Transition matrix of earthquakes with $M \geq 7.5$. Frequency of visits (earthquake occurrence) and transition probabilities for occurrence of earthquakes in the zones of South America. The probability estimators are multiplied by 100

	1	2	3	4	5	6	Row Total
1			1 100				1
2	1 33.3				2 66.7		3
3					1 50	1 50	2
4			2 66.7			1 33.3	3
5				2 66.7	1 33.3		3
6		2 50			1 25	1 25	4

Synthetic matrix (50000 steps), obtained through Monte Carlo simulation, of transition probabilities for occurrences of earthquakes with $M \geq 7.5$.

	1	2	3	4	5	6
1						
2	0.3318				0.6682	
3					0.4484	0.5516
4			0.6581			0.3419
5				0.6935	0.3077	
6		0.6438			0.1734	0.1828

A PATTERN FOR THE SPATIAL DISTRIBUTION OF THE EARTHQUAKES

- The area of south America is one of the most seismically active regions of the world. It is bounded between the latitudes 47°S - 0° and longitudes 85° - 65°W .
- Spatial distribution and the 6 zones (states) in Figure 1.

•Temporal and spatial distribution of severe earthquakes

1906	8.0	Zone 5	(central Chile)
1922	8.1	Zone 4	(north Chile)
1942	8.0	Zone 3	(south Peru)
1960	8.5	Zone 6	(south Chile)
1966	7.8	Zone 2	(north Peru)
1985	7.8	Zone 5	(central Chile)
1995	8.0	Zone 4	(north Chile)

CONCLUSIONS

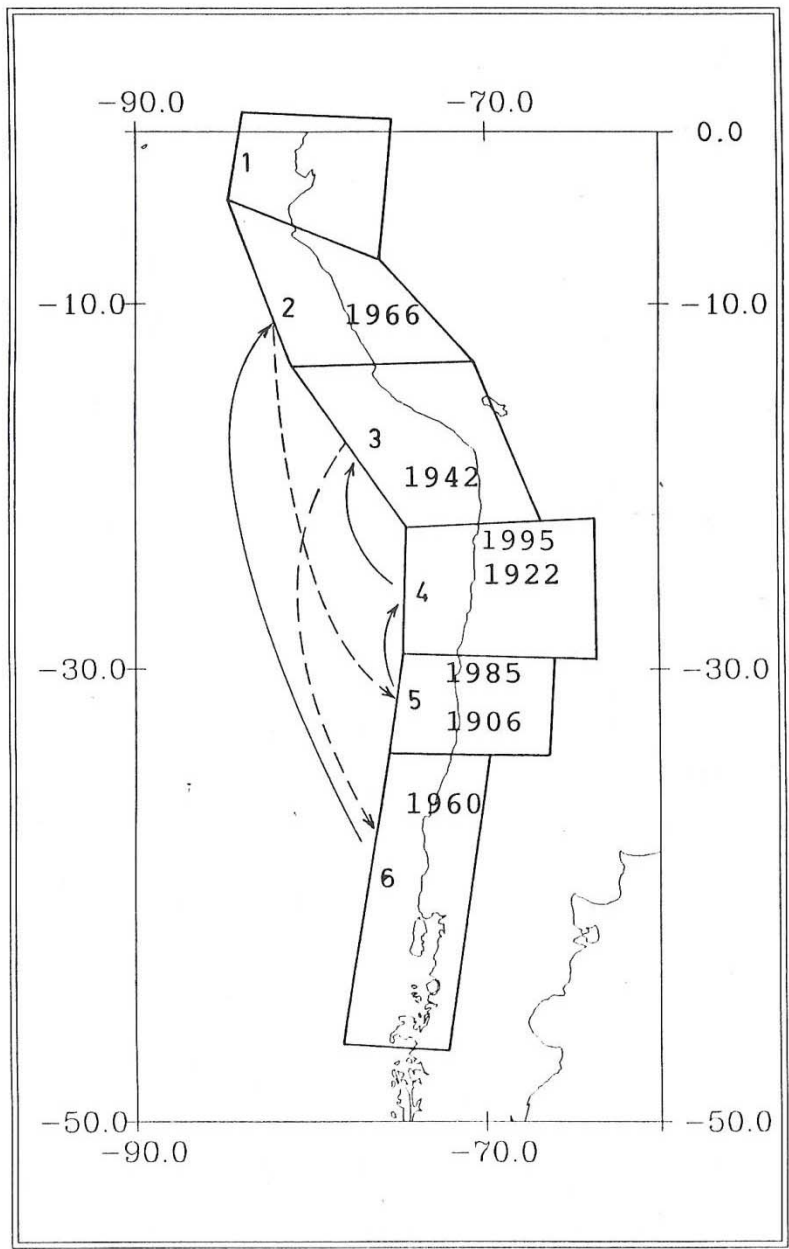
- The study presents a method for earthquake recurrence on south America.
- The pattern found, suggests a south-north direction of the large earthquakes (with $M \geq 7.5$) occurrence in the examined area.
- The results are tested by the application of Monte Carlo process.
- The pattern suggests:

Zone 5 1906 (8.0)→1985 (7.8)

Zone 4 1922 (8.1)→1995 (8.0)

Zone 3 1942 (8.0)→2001 (7.9, new 8.4)

- The last event of 2001 was forecasted : It was suggested that an earthquake with $M \geq 7.8$ will strike zone 3. The visit from zone 4 to zone 3 showed a transition probability of 28.6%.



Scale 1: 50000000