

UNIVERSITATEA DIN BUCUREȘTI
Facultatea de Geologie și Geofizică
Școala Doctorală de Geologie



UNIVERSITATEA CATOLICĂ LOUVAIN
Facultatea de Științe
Școala Doctorală GEOS



TEZĂ DE DOCTORAT **ÎN COTUTELĂ**

**Studiu asupra influențelor gravimetrice induse
de mările terestre în activitatea
seismică intermediară din zona Vrancea**

Doctorand: Nicoleta CADICHEANU

Conducători de doctorat :

Prof. Dr. Marian IVAN

Prof. Dr. Michel van RUYMBEKE

București 2008

«The Cosmos is all that is
or ever was
or ever will be»

- Carl Sagan, Cosmos,
1982



Autorul fotografiei: John Lanoue

*Chiar dacă spiritul său străbate acum dimensiunile altor lumi,
este o imensă onoare pentru mine
să îi pot dedica tot ceea ce am strâns în paginile acestei lucrări.*

Nicoleta Cadicheanu

Teza de doctorat cuprinde 172 de pagini, 8 tabele și este ilustrată cu 111 figuri color și 2 planșe format A3 color alcătuite, la rândul lor, din colajele altor figuri independente.

Alături de introducere, 5 capitole, concluzii și perspective și referințe bibliografice, teza prezintă în anexe conținutul a patru lucrări importante publicate pe parcursul elaborării tezei de doctorat, lucrări din care două au fost publicate, în anul 2007, în *Natural Hazards*, revistă cu cotație ISI.

Referințele bibliografice cuprinzând 209 titluri de articole și cărți al căror conținut a fost parcurs în faza de documentare, încheie lucrarea.

În prezentul rezumat s-a păstrat aceeași numerotare a capitolelor, figurilor și tabelor ca în lucrarea propriu-zisă. Indicativul paginilor din cuprins corespunde cu cea din teză și nu reprezintă numerotarea paginilor din rezumatul lucrării.

MULȚUMIRI

*Mulțumirile mele se îndreaptă
către conducătorii mei de doctorat,
Prof. dr. Marian IVAN și Prof. dr. Michel van RUYMBEKE
a căror disponibilitate, deschidere totală și încurajări
au făcut posibilă această lucrare;*

*către persoanele care au evaluat activitatea mea:
Dr. Pascal Bernard, Dr. Thierry Camelbeeck și Dr. Michel Everaerts.*

*În mod particular către Dr. Denis Favart care m-a îndrumat în permanență și a contribuit,
împreună cu Dr. Isabelle Donnay, la gestionarea administrativă a cotutelei.*

Mulțumirile mele se îndreaptă, de asemenea, către:

*Directorul Observatorului Regal al Belgiei care mi-a permis inițierea și defășurarea stagiilor de
lucru necesare dezvoltării și finalizării tezei;*

Domnul Dr Jacques Zlotnicki și Domnul Ing Guy Berthault cu profundă recunoștință,

*colaboratorul și prietenul meu, Zhu Ping,
prietenii mei belgieni, francezi și spanioli
care mi-au acordat necondiționat ajutorul lor,*

*toți reprezentanții Universității catolice Louvain,
care m-au ajutat cu multă amabilitate și promptitudine;*

*Directorilor Școlii Doctorale a Facultății de Geologie și Geofizică,
domnul profesor Nicolae Anastasiu și domnul profesor Cristian Mărunțeanu,
pentru amabilitatea și răbdarea dâșșilor față de mine;*

*toți profesorii Facultății de Geologie și Geofizică a Univertății din București
care au avut amabilitatea de a mă sfătui și îndruma în mod util la elaborarea tezei;
doamna Secretar Șef Corina Duminiță
pentru ajutorul dat la realizarea formalităților Școlii Doctorale,*

*Conducerea Institutului de Geodinamică al Academiei Române care mi-a oferit oportunitatea
desfășurării cercetărilor mele. Aceasta mi-a permis participarea la activități de cercetare originale
în cadrul cooperării bilaterale dintre ORB și IGAR;*

Adresez mulțumiri speciale

Domnului Director onorific al IGAR, Dr. ing. Dorel ZUGRĂVESCU,

Doamnei Dr. Maria Tumanian și Doamnei Dr. Luminița Ardeleanu,

*Tuturor colegilor mei și celor care m-au încurajat cu sinceritate,
tuturor celor cu care am avut schimburi constructive de idei legate de prezenta lucrare,*

*Dr. Cristian Alexandru Șuțeanu, Dr. Mioara Manda, Dr. Cristina Stan, Dr. Irina-Apostoiu Marin,
Dr. Mihai Roharik, Prof.dr. Victor Mocanu, Prof.dr. Dumitru Ioane, Dr. Florin Munteanu, Drd.
Liviu Mateescu, Prof.dr. Gyula Lőrinczi, Dr. Magda Stavinschi, Dr Ion Berbeleac, Dr. Lucian
Beșușiu, Dr. Dumitru Stănică, D-na Ileana Fătulescu, Drd. Valentin Furnică, Conf.dr. Cristian
Panaiotu, Conf.dr. Bogdan Niculescu, Dr. Mihaela Popa și Dr. Mircea Radulian, precum și
regretatul nostru coleg Dr. Horia Grumăzescu.*

*Mulțumiri D-nei Ing. Alina Marin și D-lui Adrian Constantin pentru ajutorul dat la imprimarea
lucrării.*

*În timpul stagiilor mele de cercetare, am putut conta în permanență pe ajutorul societății Rotary din
Waterloo reprezentată prin Domnul Jacques Beaujean*

Întotdeauna cu recunoștință

Familiei mele și

Lui Paul

CUPRINSUL TEZEI

INTRODUCERE	1
Scopul și obiectivele tezei • Planul tezei • Scurtă prezentare a capitolelor tezei.....	1
1 ZONA SEISMICĂ VRANCEA – PRIVIRE GENERALĂ	7
1.1. Zona seismică Vrancea în contextul tectonic global	7
1.1.1. Compararea cu alte zone intracontinentale cu seismicitate intermediară.....	7
1.1.2. Zona seismică Vrancea – laborator geodinamic natural	8
1.2. Activitatea seismică.....	8
1.2.1. Delimitarea geografică a zonei epicentrale	8
1.2.2. Cutremure istorice importante	8
1.2.3. Particularități ale seismicității	9
1.2.4. Catalogul de cutremure RomPlus	9
1.2.5. Pre- și postșocuri. Criteriul Kossobokov-Romashkova	10
1.3. Structura tectonică.....	11
1.3.1. Plăci tectonice convergente	11
1.3.2. Sistemul planelor de falii	11
1.3.3. Regimul seismic dominant	12
1.4. Modele geodinamice	12
1.4.1. Modelul fragmentului de placă litosferică („slab”) în curs de desprindere	12
1.4.2. Modelul delaminării	13
1.4.3. Modelul termo - tectonic	13
1.4.4. Modelul obținut prin tomografie seismică și tomografie magnetotelurică.....	14
1.4.5. Modelul fragmentului de placă în prezența curenților de convecție	16
1.4.6. Modelul triplei joncțiuni	17
Observații.....	18
2 IMPLICAREA MAREELOR TERESTRE ÎN DECLANȘAREA CUTREMURELOR DE PĂMÂNT	19
2.1. Potențialul de atracție gravitațională	19
2.1.1. Dezvoltarea în serie de polinoame Legendre	19
2.1.2. Semnificația termenilor principali	21
2.2. Mările terestre – considerații generale.....	21
2.2.1. Definiție	21
2.2.2. Dezvoltarea Laplace. Principalele grupe ale marelor terestre	21
2.2.3. Componentele locale ale marelor terestre	22
2.2.4. Notațiile lui Darwin	24
2.2.5. Dezvoltarea în serie Doodson și clasificarea sistematică Doodson	24
2.2.6. Variația amplitudinii undelor	25
2.2.7. Spectrul Fourier al marelor terestre	27
2.3. Problema corelației dintre mările terestre și cutremurele de pământ	29
2.3.1. Considerații geofizice	29
2.3.2. Abordarea sistematică a problemei. Rezultate controversate	30
Observații.....	30

3 METODOLOGIA DE ANALIZĂ 31

3.1. Metodologia de analiză a corelației dintre mările terestre și cutremurele de pământ	31
3.1.1 Tehnici de analiză utilizate în studiul corelației	31
3.1.2. Câteva limite ale aplicațiilor	31
3.2. Metoda de analiză spectrală HiCum	32
3.2.1. Descriere generală	32
3.2.2. Interpolare cosinusoidală cu ajutorul metodei celor mai mici pătrate.....	34
3.2.3. Aplicații ale metodei HiCum	37
3.3. Testele statistice utilizate pentru validarea rezultatelor obținute	39
3.3.1. Testul lui Schuster	39
3.3.2. Testul permutărilor	40
3.4. Intervale de încredere. Metoda Bootstrap	41
3.5. Analize în ferestre mobile	42
3.5.1. Criteriile de alegere a dimensiunilor ferestrei mobile	42
3.5.2. Fereastra mobilă temporală	42
3.5.3. Fereastra mobilă 3D	42
3.6. Validarea rezultatelor cu ajutorul seriilor sintetice temporale de evenimente seismice aleatoare	43
Observații.....	44

4 ANALIZA DATELOR ȘI VALIDAREA REZULTATELOR ÎN CAZUL ACTIVITĂȚII SEISMICE INTERMEDIARE DIN ZONA VRANCEA 45

4.1. Tendințe periodice în activitatea seismică intermediară din zona de Vrancea	45
4.1.1. Baza de date utilizată	46
4.2. Calculul coeficientului statistic p	48
4.2.1. Calculul coeficientului p cu ajutorul testelor statistice	48
4.2.2. Compararea rezultatelor obținute	48
4.3. Variații temporale și spațiale ale coeficientului statistic p	49
4.3.1. Variații temporale ale coeficientului statistic p obținute cu ajutorul ferestrelor de timp mobile	49
4.3.2. Variații temporale ale coeficientului statistic p obținute cu ajutorul ferestrelor mobile cu număr fix de evenimente seismice	62
4.3.3. Activitatea seismică intermediară a zonei Vrancea analizată în ferestre mobile 3D ...	64
Observații.....	71

5 DISCUȚII PRIVIND REZULTATELE OBȚINUTE ȘI VALORIFICAREA LOR 72

5.1. Punerea în evidență a unor tendințe temporale în declanșarea cutremurelor de pământ intermediare din zona Vrancea de către mările terestre	72
5.1.1. Coeficientul statistic p , un posibil factor precursor	72
5.1.2. Sensibilitatea testului permutărilor la tipul de distribuție statistică a evenimentelor seismice.....	87

5.2. Conceptul de tomografie statistică cu ajutorul mareelor terestre.....	90
5.2.1. Tomografia mareică statistică. Comparație cu rezultatele obținute prin tomografie seismică, tomografie magnetotelurică și analiza patternului de seismicitate	90
5.2.2. Aspecte ale fenomenului de atenuare a undelor seismice în zona seismică Vrancea confirmate prin tomografie mareică statistică	93
5.3. Valorificarea rezultatelor	96
5.3.1. Caracterizarea unei zone seismice prin tendințele de modulare mareică	96
5.3.2. Răspunsul caracteristic integrat într-un model specific pentru zona seismică analizată	96
5.3.3. Tomografia mareică statistică cu ajutorul undelor M2 și S2 în zone cu activitate seismică intermediară intracontinentală: Vrancea, Bucaramanga și Hindu-Kush	98

CONCLUZII ȘI PERSPECTIVE..... 101

ANEXE 105

ANEXA A Cadicheanu, N., van Ruymbeke, M., ZUGRĂVESCU, D., Everaerts, M. and Howard, R. 2006, *Periodical tendencies in Vrancea seismic activity detected by the Hi-Cum stacking method.*, Rev. Roum. Geophysique, 50, p.31-57. 105

ANEXA B Michel van Ruymbeke, Zhu Ping, Nicoleta Cadicheanu, Sébastien Naslin, 2007, *Very Weak Signature (VWS) detected by stacking method according different astronomical periodicities (HiCum)*, Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 7, 651–656, 2007. 129

ANEXA C Cadicheanu N., M. van Ruymbeke and P. Zhu, 2007, *Tidal triggering evidence of intermediate depth earthquakes in the Vrancea zone (Romania)*, Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 7, 733-740, 2007..... 135

ANEXA D Cadicheanu, N. Zhu, P. and van Ruymbeke,M.: *Spatial and temporal variations of the correlation coefficient between M2 and S2 earth tides components and earthquake occurrence for the intermediate-depth seismic activity zones*, Acta Geodaetica et Geophysica Hungarica, Special issues, Vol. 43, No. 2-3 (June), pp.131-144, 2008..... 143

REFERINȚE BIBLIOGRAFICE 159

INTRODUCERE

Scopul și obiectivele tezei

Studiul geofizic al zonei Vrancea este foarte important pentru România deoarece este vorba despre o zonă puternic seismică unde trăiesc milioane de oameni. Impactul ultimelor cutremure de pământ cu magnitudini superioare valorii 7 pe scara Richter (1940 și 1977) a fost devastator pentru București (Fig. 1) și în zona epicentrală [CONSTANTINESCU and ENESCU, 1985]. Periodicitatea unor asemenea evenimente este în jur de 30-40 ani.



Fig. 1 - București, 4 martie 1977; consecințe ale unui cutremur cu magnitudinea $M_w=7.4$.

Problema declanșatorilor seismici ocupă, în general, un loc important în literatura științifică de specialitate. În acest context, numeroși autori au investigat eventualitatea unei modulări a procesului de declanșare seismică prin intermediul unor influențe gravitaționale induse de către mările terestre în activitatea seismică a unor zone [KNOPOFF, 1964; KLIEN, 1976 ; HEATON, 1982 ; DING et al, 1983 ; KILSTON et al, 1983, PALUMBO, 1986, STAVINSCHI, 2003, etc.]. Dar din punct de vedere geodinamic, mecanismele prin care mările terestre ar putea fi implicate nu sunt încă bine explicate.

Procesele de acumulare a energiei într-o zonă seismică sunt complexe și diverse, însă rămân puternic legate de contextul geologic și tectonic al regiunii. Din cauza eterogenităților de structură, fiecare zonă se poate comporta asemenea unui filtru pentru mările terestre și, uneori, ca un veritabil amplificator pentru anumite componente ale acestora. [ENESCU et al., 1999].

Mecanismele specifice marelui terestre acționează în paralel cu alte cauze, cu influențe la scări foarte diferite: presiunea atmosferică, fenomenele termomecanice și tectonice sau de circulația fluidelor (apă, lavă, etc.). Mările terestre ar putea modifica energia acumulată prin alți factori de origine internă sau externă Pământului care acționează asupra aceleiași regiuni.

Lucrări relativ recente descriu posibilitatea implicării marelor terestre în declanșarea cutremurelor de pământ [ZUGRĂVESCU et al, 1989 ; VAN RUYMBEKE et al, 1981, 1983a, 1983b ; LIN et al, 2003 ; COCHRAN, 2004]. În trecut, seriile de evenimente disponibile pentru analize erau limitate. În prezent, suprafața zonelor studiate a putut fi extinsă iar bazele de date sunt acum suficient de dezvoltate pentru a permite analize corelaționale de bună calitate.

Abordările globale în problema corelației dintre cutremurele de pământ și mările terestre, în virtutea unor aproximații uneori extrem de grosiere, ascund reacții specifice ale fiecărei structuri geologice, implicând-o într-un răspuns general, fără posibilitatea găsirii unor corelații semnificative.

În prezent băncile de date conțin zeci de mii de cutremure permițând, prin mijloace statistice adecvate, observarea unor tendințe în activitatea seismică a unei anume zone.

Toate aceste lucruri menționate anterior, ne-au condus către fixarea a două obiective majore.

Primul obiectiv : obținerea caracteristicilor de răspuns ale unei zone seismice cu activitate intermediară supusă acțiunii anumitor componente ale marelor terestre.

Poziția geografică și tectonica zonei Vrancea, adâncimea activității seismice analizate și tipul de interacțiune dominantă la această adâncime, gravitația, ne permit simplificarea considerațiilor problemei. În consecință, vom analiza posibilele cuplaje dintre mările terestre și producerea cutremurelor de pământ luând în considerare doar implicarea anumitor periodicități în declanșarea evenimentelor seismice.

Cu ajutorul unei metodologii proprii, ne propunem să urmărim tendințele de modulare a activității seismice a zonei analizate de către principalele componente ale marelor terestre, componente reprezentative pentru grupul spectral din care fac parte. De asemenea, am luat în calcul posibilitatea obținerii unui posibil factor precursor, urmărind variația temporală ale acestor caracteristici.

Al doilea obiectiv pe care ni l-am propus este de a integra rezultatele obținute în cadrul modelelor geodinamice acceptate în prezent pentru zona seismică Vrancea.

Cele două obiective conduc la realizarea scopului general al acestui studiu, care constă în a pune în evidență interacțiunile dintre mările terestre și cutremurele de pământ pentru o zonă particulară cu activitate seismică intermediară, în cazul de față zona seismică Vrancea (România).

Dorim să precizăm de la început că nu ne-am propus să realizăm o monografie pe tema corelației dintre mările terestre și cutremurele de pământ. De aceea lucrarea a apelat doar la acele părți de teorie și la experiența de până acum, în măsură să ajute la realizarea scopului principal al tezei.

Planul tezei

În sensul scopului propus, structura tezei cuprinde cinci capitole bazate pe conținutul prezentat în schema de mai jos (Fig. 2).

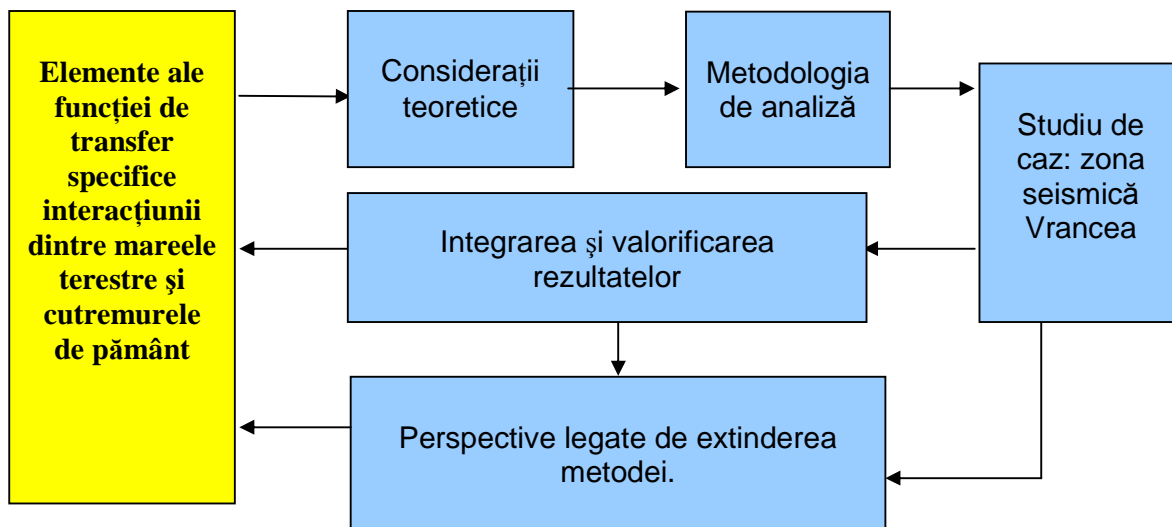


Fig. 2 - Schema-bloc a principalelor etape ale tezei

Scurtă prezentare a capitolelor tezei

Capitolul 1 reprezintă o privire generală asupra zonei seismice Vrancea în contextul tectonicii globale, subliniind trăsăturile caracteristice din punct de vedere seismic, tectonic și geodinamic. Sunt menționate concis coordonatele geografice ale zonei, evenimentele seismice istorice, particularitățile distribuției focarelor cutremurelor vrâncene, direcționalitatea ei NE – SV, soluțiile dominante ale planelor de falie, sistemul de falii și regimul compresiv caracteristic, energia de fond cvasiconstantă, periodicitatea de aproximativ 30-40 de ani a cutremurelor puternice.

Se face o scurtă prezentare a celui mai complet și omogen catalog de cutremure vrâncene, catalogul RomPlus elaborat de Institutul Național de Fizica Pământului din București. Deoarece în atenția noastră se află doar cutremurele principale, tot în acest capitol este descris criteriul Kossobokov-Romashkova de eliminare a postșocurilor.

Expunerea succintă a fiecărui model geodinamic acceptat în prezent pentru zona Vrancea, în încercarea de a explica specificitatea activității ei seismice, pune în evidență caracterul dominant al forțelor gravitaționale asupra fragmentului de placă sau slab-ului seismic cum mai este denumit.

Capitolul se încheie cu câteva concluzii sintetizatoare asupra conținutului prezentat.

Capitolul 2 conține elementele generale de teoria mareelor terestre, elemente necesare și suficiente pentru înțelegerea posibilei implicări a acestora în declanșarea cutremurelor de pământ intermediare din zona Vrancea. Se pornește de la definirea și demonstrarea formulei potențialului de atracție exercitată de un corp perturbator (Lună și Soare în principal) asupra unui punct oarecare de pe Pământ, pas necesar în înțelegerea definiției mareelor terestre și a principalelor familii de unde mareice în care se descompune acest potențial. Sunt introduse notațiile și denumirile specifice undelor de maree terestre în vederea stabilirii cadrului terminologic necesar.

Spectrul Fourier al mareelor terestre prezintă o imagine sugestivă a principalelor grupe de maree terestre și a undelor dominante din fiecare grupă. Acest spectru oferă justificarea

alegerii ulterioare a anumitor componente ca posibile candidate la declanșarea evenimentelor seismice.

După câteva observații importante asupra suportului geofizic care stă la baza considerării mareelor terestre ca declanșator seismic, sunt amintite rezultatele care confirmă/infirmă ipoteza corelației în cadrul studiilor întreprinse anterior.

Bazându-se pe cele mai recente studii și pe rezultatele lor pozitive în problema existenței corelației, capitolul se încheie subliniind posibila implicare a mareelor în declanșarea cutremurelor de pământ.

Capitolul 3 este consacrat în întregime prezentării metodologiei de analiză și descrie toate etapele procedurii utilizate cuprinzând:

- metoda principală de analiză, metoda de stacking numită **HiCum**, prescurtare a denumirii englezești *Histogram cumulating*;
- testele statistice utilizate care dau coeficientul statistic p și intervalele de încredere pentru parametrul analizat. Au fost introduse pentru prima dată în acest tip de analiză a corelației pentru zona Vrancea, **testul permutărilor și metoda Bootstrap**;
- analize în ferestre mobile temporale și 3D. Acestea din urmă au permis introducerea unui concept nou în analiza corelațiilor marea-cutremure, conceptul de tomografie mareică statistică **a unei zone seismice**;
- validarea rezultatelor de corelație obținute, în toate cazurile, se face cu ajutorul seriilor sintetice de evenimente seismice aleatoare.

Capitolul 4 cuprinde aplicația propriu-zisă sau studiul de caz. Numeroase imagini însoțesc etapele prezentate în capitolul 3 și reprezintă materia primă pentru discuțiile care urmează a fi dezvoltate ulterior. Capitolul 4, de analiză a datelor și validare a rezultatelor în cazul activității seismice intermediare din zona Vrancea, formează o parte importantă a tezei și aici este concentrată o mare parte a graficelor lucrării.

Capitolul 5 valorifică rezultatele obținute în capitolul 4 și conține interpretări proprii autorului asupra rezultatelor obținute. Astfel, este pus în discuție un posibil pattern temporal al declanșării cutremurelor puternice datorită prezenței unor amprente specifice ale variației coeficientului statistic p în apropierea unui cutremur de pământ mediu, intermediar sau puternic. Aceste semnături particulare au fost confirmate atât în ferestre mobile definite prin intervale de timp bine precizate, deplasate cu intervale de timp constante, cât și prin utilizarea unor ferestre cu număr fix de evenimente seismice, ferestre deplasate cu un număr constant de evenimente. Prin urmare, se propune considerarea lui ca un posibil factor precursor.

O altă parte importantă a acestui capitol este dedicată comparării rezultatelor obținute prin alte tipuri de tomografii și analize de pattern de seismicitate, cu rezultatele obținute cu ajutorul tomografiei mareice statistice prin intermediul diferitelor componente mareice asupra activității seismice vrâncene. Informația astfel obținută confirmă concluzii ale tomografiei

seismice și magnetotelurice, ale analizei patternului de seismicitate și studiului atenuării undelor seismice, conducând către un model integrator al acestor rezultate.

În acest sens, se propune o **schemă de cuplaj dintre undele declinaționale, pe de o parte, și cele eliptice, pe de altă parte, cu slab-ul seismic**, modelul ținând cont de prezența triplei joncțiuni între cele trei plăci continentale (corespunzând tectonicii actuale din zona Vrancea), de diferențele reologice la nivelul părții superioare a mantalei (puse în evidență prin tomografia seismică și atenuarea undelor seismice la nord-vest de slab-ul seismic) și de acțiunea curenților de convecție din astenosferă.

Capitolul se încheie printr-o aplicație restrânsă a tomografiei mareice statistice, redusă doar la utilizarea a două din cele zece unde mareice propuse la începutul lucrării, (undele semidiurne M2 și S2) asupra a două zone cu seismicitate intermediară asemănătoare zonei Vrancea din punct de vedere al distribuției focarelor.

Capitolul dedicat concluziilor cuprinde trei părți definitorii ale lucrării: o sinteză a rezultatelor mai importante obținute, contribuțiile punctuale și originale ale autorului și perspectivele deosebit de generoase ale subiectului abordat în teză.

1 ZONA SEISMICĂ VRANCEA – PRIVIRE GENERALĂ

1.1. Zona seismică Vrancea în contextul tectonic global

1.1.1. Compararea cu alte zone intracontinentale cu seismicitate intermediară

Activitatea seismică a unei zone se exprimă adesea în funcție de prezența «limitelor de placă». Aceste zone sunt dovada unei tectonici active și pot fi prezente și acolo unde litosfera mai puțin rezistentă este supusă unor constrângeri importante.

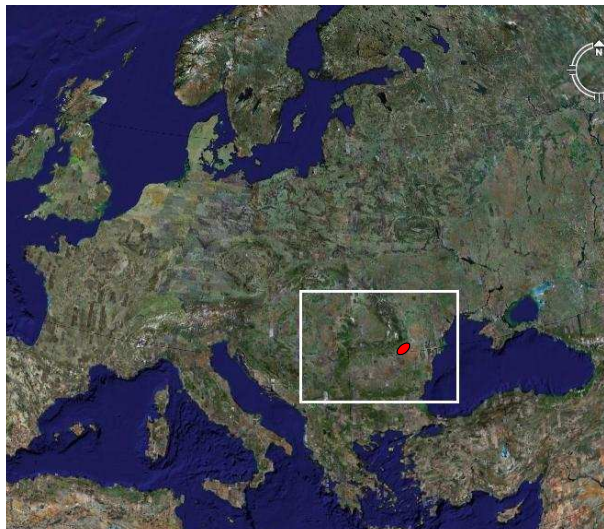


Fig. 1.1. –Poziția geografică a zonei Vrancea în contextul tectonic european

Studiul nostru are în vedere doar activitatea seismică intermediară adică evenimentele seismice care au loc la o adâncime mai mare de 60 km [BATH, 1973 ; APOSTOL, 2006,], pentru a elimina, în această etapă, complexitatea factorilor ce intervin în cazul cutremurelor crustale.

1.1.2. Zona seismică Vrancea – laborator geodinamic natural

Zona seismică Vrancea poate fi considerată un laborator geodinamic natural ideal pentru studiu datorită instrumentației geofizice deja implementată de mai mulți ani, structurii geologice bine delimitată spațial și grație accesibilității zonei [ZUGRĂVESCU, 1985a].

1.2. Activitatea seismică

1.2.1. Delimitarea geografică a zonei epicentrale

Zona seismică Vrancea conține cea mai mare parte a epicentrelor localizată între 26° - 27° longitudine estică și 45° - 46° latitudine nordică [RADU and POLONIC, 1982].

1.2.2. Evenimente istorice importante

Cele mai importante evenimente seismice istorice ale secolului 20 [ȘTEFĂNESCU, 1902 ; ATANASIU, 1961; BĂLAN et al., 1982, CONSTANTINESCU and ENESCU, 1985] în România au avut loc la data de:

- 6 octombrie 1908 (h=125 km , Mw=7.1),
- 10 noiembrie 1940 (h=150 km, Mw=7.7),
- 4 martie 1977 (h=94 km, Mw=7.4),
- 30 august 1986 (h=131 km, Mw=7.1)

1.2.3. Particularități ale seismicității

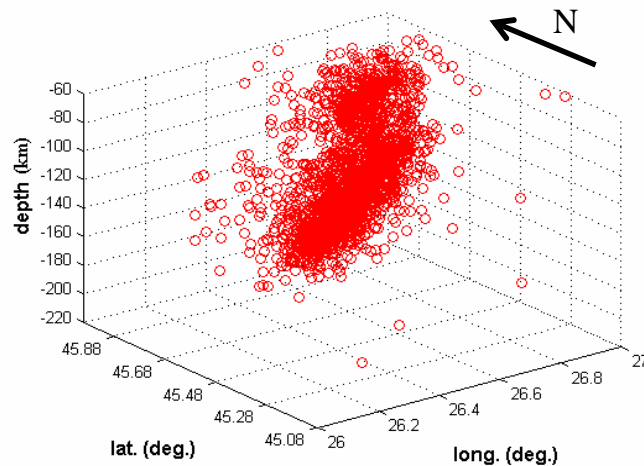


Fig. 1.2. – Distribuția hipocentrelor cutremurelor intermediare vrâncene în perioada (1970 -2007)

Activitatea seismică intermediară vrânceană prezintă următoarele caracteristici importante:

- Adâncimea frecventă a focarelor superioară valorii de 60 de km și o distribuție a hipocentrelor într-un volum foarte restrâns (Fig. 1.2) [CORNEA and RADU, 1978].
- Seismicitatea de fond cvasiconstantă [MÂNDRESCU and RADULIAN, 1999; RADULIAN et al., 2007]
- Evenimentele cu magnitudine $M_w > 7.0$ prezintă o periodicitate relativă în jur de 30 - 40 de ani, dar evenimentele cu magnitudinea cuprinsă între 5.0 și 7.0 pe scara Richter nu sunt prea numeroase [TRIFU and RADULIAN, 1989; IMOTO and HURUKAWA, 2006].

1.2.4. Catalogul de cutremure RomPlus

Institutul Național pentru Fizica Pământului din București a pus la dispoziția noastră catalogul de cutremure RomPlus pentru perioada 1970-2007. Completitudinea și omogenitatea datelor, mai ales după 1981., ne-au permis accesul la o bază semnificativă de date din punct de vedere statistic, atât ca număr de evenimente (aproximativ 2600 de evenimente principale cu adâncime intermediară) cât și calitativ.

1.2.5. Pre- și postșocuri. Criteriul Kossobokov-Romashkova

În studiul nostru bazat pe declanșarea evenimentelor de către factori externi Pământului, am luat în considerare doar preșocurile și șocurile principale, plecând de la ipoteza originii comune a factorului lor declanșator. Pentru evitarea unor erori posibile asupra rezultatelor calculelor noastre ca urmare a prezenței postșocurilor, am folosit criteriul Kossobokov-Romashkova, [2006] de eliminare a lor

1.3. Structura tectonică

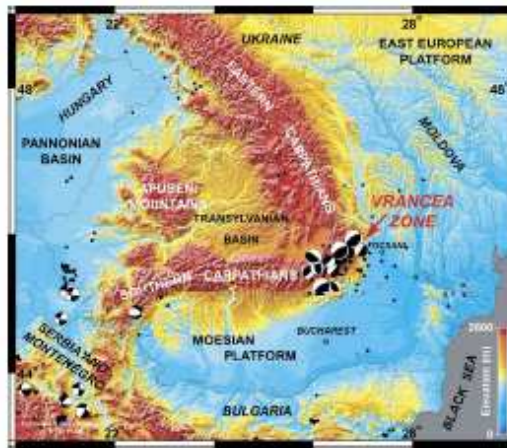


Fig. 1.3. - Aspecte tectonice ale zonei Vrancea și mecanisme în focar caracteristice (Knapp et al., 2005)

1.3.1. Plăci tectonice convergente

Epicentrele tuturor cutremurelor intermediare sunt distribuite pe o suprafață aproximativ eliptică într-un domeniu relativ îngust în partea de sud-est a Carpaților de Curbură, în zona de coliziune a trei plăci/subplăci intracontinentale: Placa est-europeană (PEE), Placa Tisza-Dacia (PTD) și Placa moesică (PM) (Fig. 1.3) [ZUGRĂVESCU and POLONIC, 1997; SEGHEDI et al., 1998; ARDELEANU, 1999].

1.3.2. Sistemul planelor de falii

Mecanismele în focar caracteristice faliilor inverse sunt cele dominante (Fig. 1.4) și se găsesc într-un plan aproape vertical și orientat NE-SV [CORNEA et al., 1987; ENESCU, 2003].

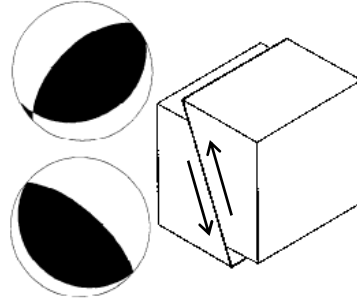


Fig. 1.4. – Mecanismele în focar caracteristice zonei seismice Vrancea

1.3.3. Regimul seismic dominant

Mecanismele în focar reflectă un regim de stres compresiv dominant în zona subcrustală. Tendința compresivă se accentuează o dată cu adâncimea [WENZEL et al., 1999; BĂLĂ, 2003].

1.4. Modele geodinamice

Există mai multe modele geodinamice pentru zona Vrancea. Dintre autorii acestora amintim, în ordine cronologică, pe: Roman, 1970; McKenzie, 1970, 1972; Fuchs et al, 1979; Riznichenko et al, 1980; Shchyukin and Dobrev, 1980; Constantinescu and Enescu, 1984; Oncescu 1984; Oncescu et al, 1984; Trifu and Radulian, 1989; Bobrinsky et al., 1990 ; Khain and Lobrovsky, 1994; Linzer, 1996; Gîrbacea and Frisch, 1998; Sperner et al., 2001; Beșuțiu, 2002; Ismail-Zadeh et al., 2003; Knapp et al., 2005.

Prezentăm în continuare pe cele mai importante și mai bine argumentate dintre aceste modele.

1.4.1. Modelul fragmentului de placă litosferică („slab”) în curs de desprindere

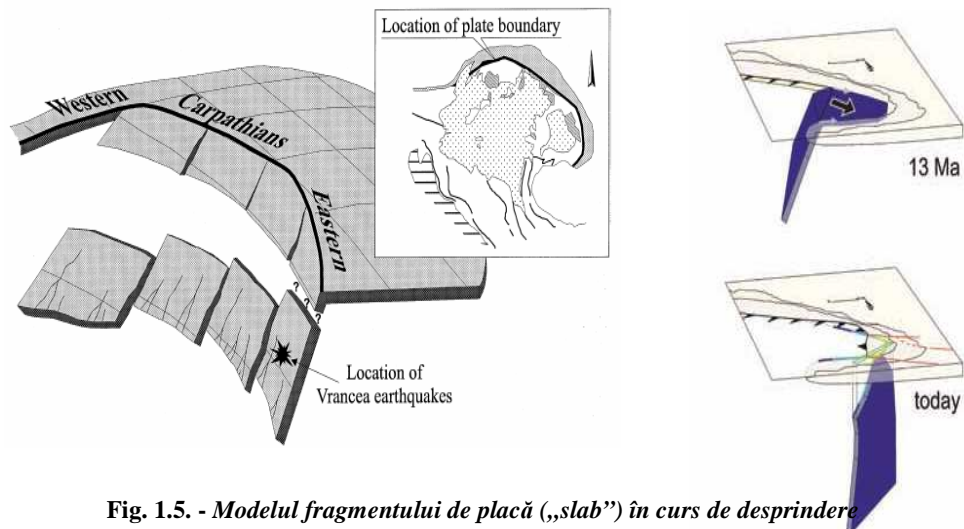


Fig. 1.5. - Modelul fragmentului de placă („slab”) în curs de desprindere (Linzer, 1996, Sperner et al., 2001)

1.4.2. Modelul delaminării

Acest model [GÎRBACEA and FRISCH, 1998] consideră existența unui proces de eroziune a părții inferioare a litosferei (Fig. 1.6) de către o masă astenosferică în ascensiune ca urmare a mișcărilor convective din mantaua superioară.

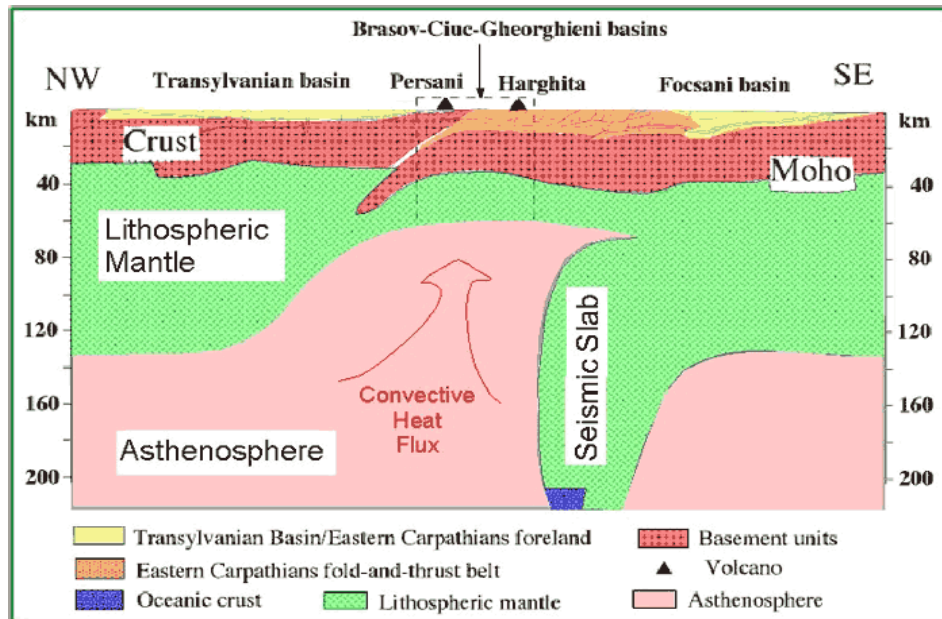


Fig. 1.6. – Modelul delaminării (Gîrbacea and Frisch, 1998)

1.4.3. Modelul termotectonic

Modelul propus de Cloetingh și colaboratorii săi [CLOETHING et al., 2004] consideră caracterul particular al subducției fragmentului de placă din zona Vrancea controlat de procese termo-mecanice sublitosferice și de variațiile laterale ce apar ca urmare a interacțiunii proceselor din litosferă și a celor de la suprafață (Fig.1.7).

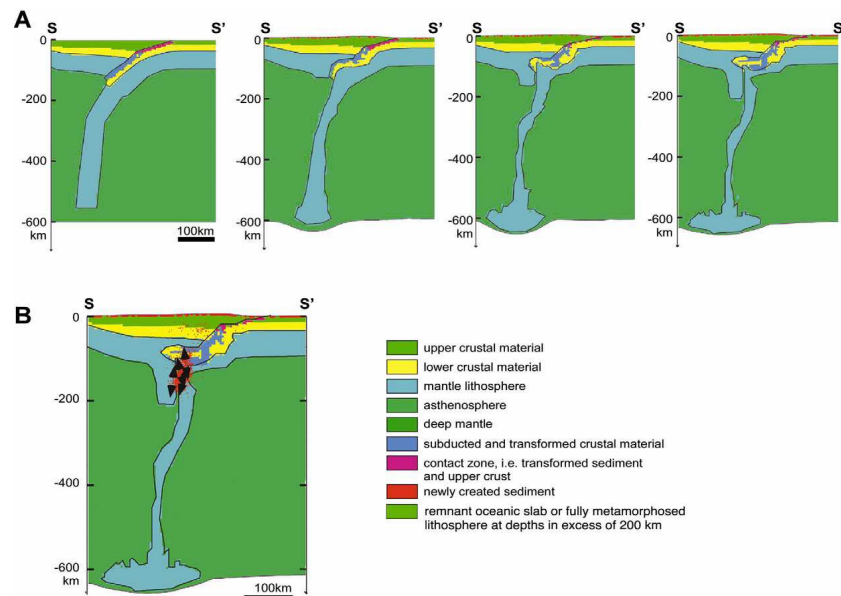


Fig. 1.7. – Modelul termo-tectonic (Cloetingh et al., 2004)

1.4.4. Modelul obținut prin tomografie seismică și tomografie magnetotelurică

În anul 1999 a avut loc în sud-estul României un experiment internațional de tomografie seismică, cu 143 de stații, CALIXTO'99 [MARTIN et al., 2001]. Inversiunea datelor au pus în evidență o zonă de mare viteză seismică cu un maxim al perturbației vitezei undei P de +3.5% în comparație cu modelul de bază. Această zonă de viteză mare a fost interpretată ca fiind un fragment litosferic în coborâre (Fig. 1.8.). Prezența lui a fost materializată până la 350-370 km, maximul rezoluției tomografiei. Imaginile tomografice au relevat caracteristici care nu fuseseră menționate în studiile anterioare [ONCESCU, 1984; WENZEL et al., 1999] și au permis determinarea geometriei fragmentului în coborâre și poziționarea hipocentrelor.

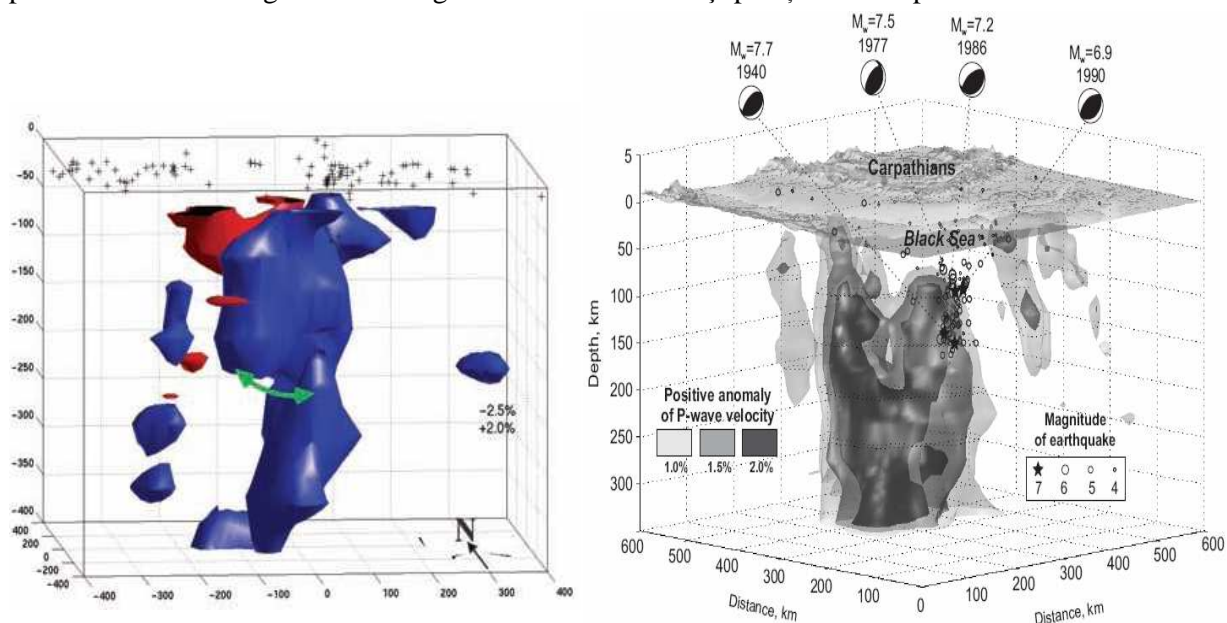


Fig. 1.8. - Modelul obținut prin tomografie seismică (Martin et al., 2001, 2005, 2006a, 2006b)

Pe baza analizelor efectuate asupra imaginilor tomografice, autorii [MARTIN et al., 2005, 2006] consideră fragmentul subdus ca nefiind complet detașat de litosferă. Partea de NE a fragmentului pare a fi cuplată cu litosfera moesică și găzduiește zona de seismicitate intermediară. Zona de cuplaj este delimitată de Falia Peceneaga-Camena și Falia Intramoesică. Partea de SV a fragmentului este aseismică, desprinsă de crustă și ușor rotită sub litosferă la adâncimea de 200 km.

Anomaliile de viteză mică de deasupra adâncimii de 110 km sunt interpretate ca o ascensiune a materialului astenosferic. Imediat sub 110 km se află o zonă de mare perturbație a vitezei seismice, considerată partea cea mai rigidă a slab-ului și o zonă cu acumulare mare a stresului. Cauza acestei acumulări mai mari a stresului este pusă pe seama forțelor arhimedice datorate scufundării fragmentului în faza de subducție din trecut.

Procesul de torsionare a fragmentului de la direcția NE-SV de la suprafață la cea N-S peste 200 de km a fost semnalat pentru prima dată prin tomografie magnetotelurică [STĂNICĂ et al., 2004] (Fig. 1.9).

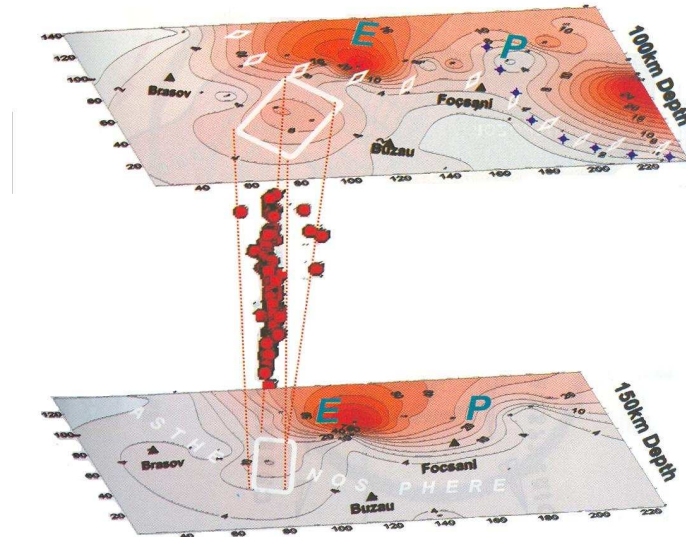


Fig. 1.9. – Tomografie magnetotelurică 3D. Cercurile roșii marchează focarele cutremurelor intermediare (Stănică et al., 2004)

1.4.5. Modelul fragmentului de placă în prezența curenților de convecție

Un alt model interesant a fost construit de Ismail-Zadeh pe baza tomografiei seismice, profilurilor de refracție seismică, fluxului termic și evoluției geodinamice a regiunii. Cu ajutorul acestora s-a efectuat o analiză cantitativă a curenților de convecție din manta și a stresului tectonic din partea de sud-est a Carpaților (Fig. 1.10).

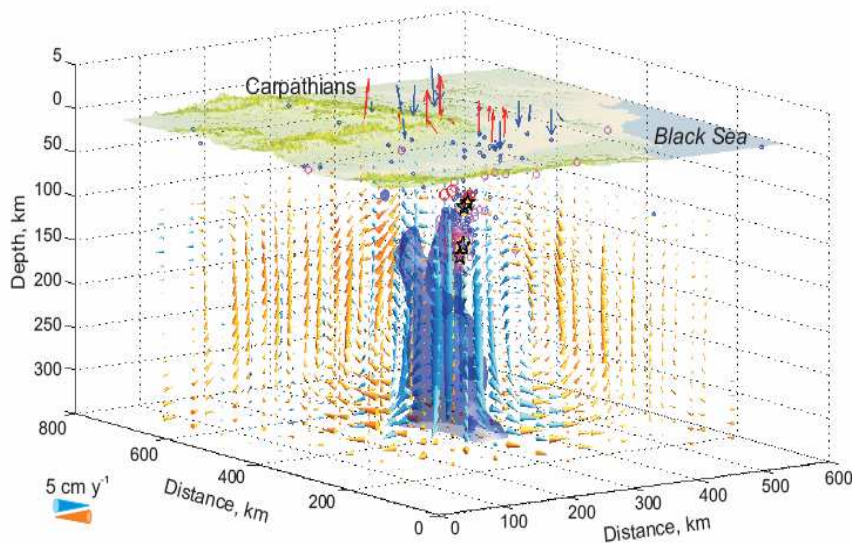


Fig. 1.10. – Model legat de mișcarea fluidelor în manta ca urmare acoborării slab-ului în manta (Ismail-Zadeh, 2005)

Și în acest caz problema pusă este interesantă pentru studiul nostru deoarece ridică o întrebare la care se caută încă un răspuns: de ce cutremurele sunt localizate doar în zona de stres maxim?

Autorul a încercat să răspundă printr-un model [ISMAIL-ZADEH et al., 2003] care arată că patternul stresului tectonic în cazul unui slab în subducție diferă de cel aflat într-o zonă de coliziune continentală. Maximul stresului migrează de la suprafața superioară fragmentului aflat în coborâre către cea inferioară datorită variației dinamicii acestuia (de la slab în subducție supus forțelor laterale, la slab în retragere datorită forțelor gravitaționale). În cazul Vrancei, cutremurele mari tind să se producă mai degrabă în partea inferioară a slab-ului decât în cea superioară [ISMAIL-ZADEH et al., 1999]. Acest lucru ar confirma faptul că activitatea seismică intermediară din zona Vrancea, în prezent, este sub controlul forțelor gravitaționale.

1.4.6. Modelul triplei joncțiuni

Zona seismică Vrancea se află în perimetrul de convergență a trei plăci/subplăci de pe teritoriul României [CONSTANTINESCU et al., 1976] separate prin discontinuități convergente către tripla joncțiune vrânceană: zona Tornquist-Teisseyre (TTZ), falia Peceneaga-Camena (PCF) și falia transgetică (TGF) [BEȘUȚIU, 2002].

Forța rezultantă din convergența plăcilor poate defini tripla joncțiune ca stabilă (rezultanta este zero) sau ca triplă joncțiune instabilă (rezultantă diferită de zero). Acest din urmă caz ar caracteriza zona seismică Vrancea în accepțiunea modelului geodinamic amintit. Mai precis, ar fi vorba de o triplă joncțiune instabilă de tip transform-transform-compresională al cărei rezultat s-a materializat prin colapsul vertical în mantaua superioară al corpului prismatic rezultat în urma coliziunii.

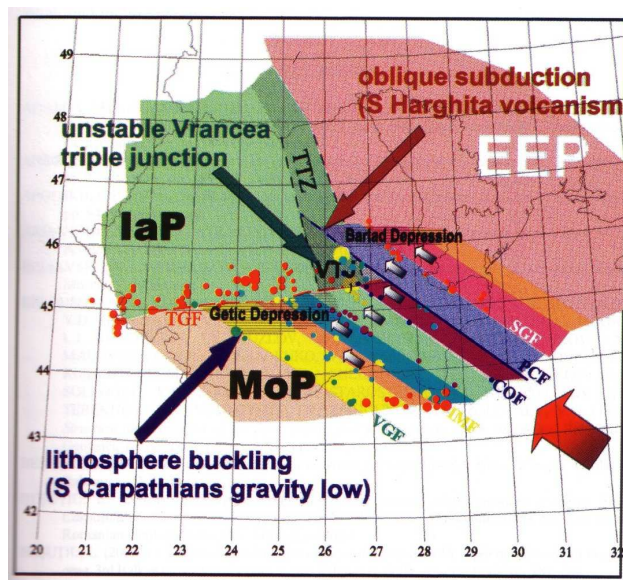


Fig. 1.11. - Modelul triplei joncțiuni (BEȘUȚIU et al., 2004)

Observații

Toate modelele prezentate susțin existența, în zona Vrancea, a unui fragment care coboară în manta sub acțiunea forțelor gravitaționale. Forțele hidrostactice, acționând în sens invers forței de greutate a slab-ului, concură la această coborâre lentă către nucleul Pământului.

Forțele de frecare și cele de vâscozitate se opun înaintării generând la adâncimi intermediare o acumulare de stres care se eliberează în principal prin intermediul cutremurelor de pământ.

În această situație, o forță gravitațională variabilă ar putea controla procesele de acumulare a stresului în zona seismică Vrancea și ar putea contribui la declanșarea cutremurelor de pământ.

2 IMPLICAREA MAREELOR TERESTRE ÎN DECLANȘAREA CUTREMURELOR DE PĂMÂNT

2.1. Potențialul de atracție gravitațional

2.1.1. Dezvoltarea în serie de polinoame Legendre

Potențialul forței de atracție exercitat de un corp perturbator asupra unui punct oarecare $A(\rho, \psi)$ aflat pe suprafața Pământului se poate exprima prin dezvoltarea în serie de polinoame Legendre [MELCHIOR, 1971], ecuația (2.1):

$$V = \frac{G\mu}{r} \sum_{n=0}^{\infty} \left(\frac{\rho}{r}\right)^n P_n(\cos\psi) \quad (2.1)$$

unde V este potențialul forței de atracție, G – constanta de atracție universală, μ – masa corpului perturbator (Luna sau Soarele în principal), r – distanța centrul Pământului-corp perturbator, ρ – distanța de la centru Pământului la punctul A , ψ – unghiul zenital format de direcția lui ρ și direcția lui r .

2.1.2. Semnificația termenilor principali

Primii doi termeni ai dezvoltării ($n=0$ și $n=1$) potențialului din ecuația (2.1) reprezintă potențialul exercitat asupra baricentrului. Termenul P_1 exprimă deplasarea în ansamblu a planetei. Alegerea baricentrului ca punct de referință elimină automat acest termen. Termenii corespunzători lui $n \geq 2$ sunt importanți în definirea mareelor terestre.

2.2. Mareele terestre – considerații generale

2.2.1. Definiție

Mareele terestre reprezintă un fenomen diferențial care generează deformări și, în consecință, potențialul mareic corespunzător acestui fenomen este constituit din potențialul forțelor ce acționează diferențiat într-un punct față de centrul de gravitație [Melchior, 1978].

2.2.2. Dezvoltarea în serie Laplace. Principalele grupe ale mareelor terestre.

Definim matematic potențialul mareic prin ecuația (2.11):

$$W = V_A - [V_0]_A = \frac{G\mu}{r} \sum_{n=2}^{\infty} \left(\frac{\rho}{r}\right)^n P_n(\cos\psi) \quad (2.11)$$

Dacă ne vom limita doar la primii doi termeni, vom obține:

$$W_2 = \frac{1}{2} G\mu \frac{a^2}{r^3} (3 \cos^2 \psi - 1) \tag{2.12}$$

$$W_3 = \frac{1}{2} G\mu \frac{a^3}{r^4} (5 \cos^3 \psi - 3 \cos \psi)$$

unde a reprezintă raza medie a Pământului. Cum raportul a/r este de aproximativ $1/60$, termenii cu $n > 3$ devin complet neglijabili. W_3 nu este folosit în practică deoarece chiar și tehnicile de măsură evoluat din prezent ar necesita costuri imense și timpi de măsură foarte lungi pentru decelarea acestui termen.

Luând în considerare relațiile dintre elementele unui triunghi sferic, W_2 din ecuația (2.12) se poate scrie astfel:

$$W_2 = D \left(\frac{c}{r} \right)^3 \left\{ \cos^2 \varphi \cos^2 \delta \cos 2H + \sin 2\varphi \sin 2\delta \cos H + 3 \left(\sin^2 \varphi - \frac{1}{3} \right) \left(\sin^2 \delta - \frac{1}{3} \right) \right\} \tag{2.13}$$

2.2.3. Componentele locale ale mareelor terestre

Ecuația (2.13) conține trei termeni ce definesc trei grupe mari ale mareelor terestre cu importanță deosebită prin semnificația fizică pe care o au (Fig. 2.2).

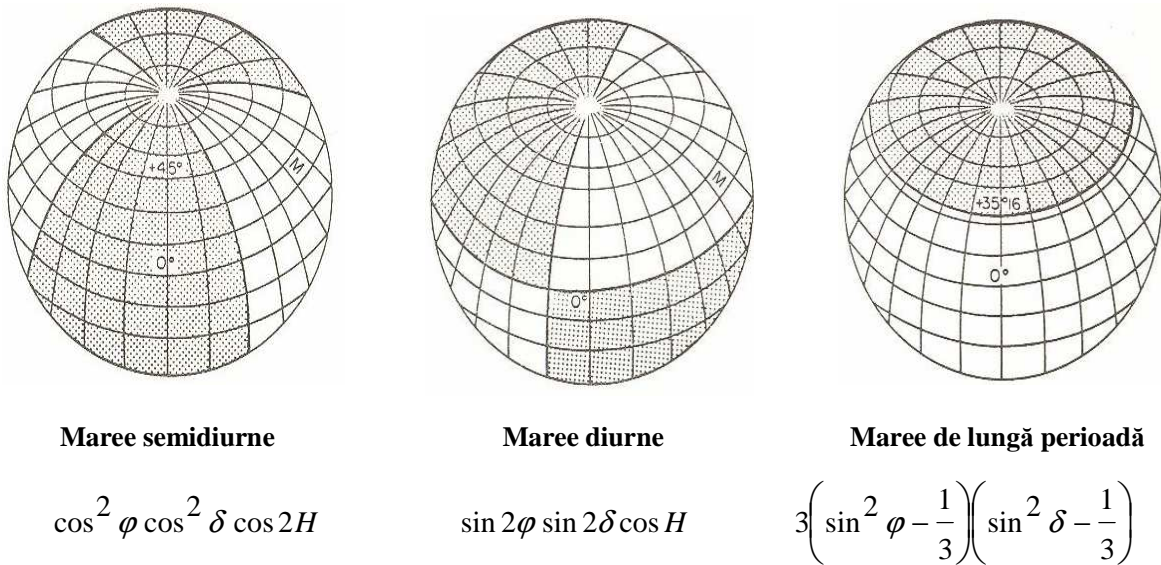


Fig. 2.2. – Cele trei grupe mari ale mareelor terestre (Melchior, 1971)

2.2.4. Notațiile lui Darwin

Darwin a introdus în 1883 o notație simplă pentru cele mai cunoscute unde mareice lunare și solare : M2 – pentru unda semidiurnă lunară principală, L2 și N2 pentru undele lunare semidiurne eliptice, K2 – pentru unda lunară semidiurnă declinațională, S2 – pentru unda semidiurnă solară principală, etc.

2.2.5. Dezvoltarea în serie Doodson și clasificarea sistematică a lui Doodson

Termenii în (c/r) , δ și H din ecuația 2.13 prezintă, fiecare, variații complexe în funcție de timp. O dezvoltare completă și pur armonică (o sumă de unde pur sinusoidale) a fost făcută pentru prima dată în 1921 de către A.T. Doodson [DOODSON, 1921]. În această dezvoltare,

argumentele sunt exprimate în funcție de șase variabile independente (Tabelul 2.2). Aceste variabile independente permit introducerea unui nou parametru, numit argumentul sau numărul lui Doodson, cu ajutorul căruia undele mareice pot fi clasificate în ordinea creșterii vitezelor lor unghiulare.

Tabelul 2.2 – Cele șase variabile astronomice independente ale mareelor terestre (Melchior, 1971)

τ	Timpul lunar mediu, socotit de la culminația inferioară a Lunii (=H+180°)
s	Longitudinea medie a Lunii
h	Longitudinea medie a Soarelui
p	Longitudinea perigeului Lunii
N'	=-N sau N, longitudinea nodului ascendent al Lunii
p_s	Longitudinea periheliului

Argumentul lui Doodson se scrie astfel în funcție de cele șase variabile (ec. 2.14) :

$$a\tau + bs + ch + dp + eN' + fp_s \tag{2.14}$$

unde a, b, c, d, e și f sunt niște coeficienți care, printr-un mic artificiu de calcul, vor fi menținuți doar la valori pozitive. În felul acesta, pentru fiecare undă mareică se obține o notație caracteristică (2.15), cunoscută sub numele de notația lui Doodson :

$$a, (b+5), (c+5), (d+5), (e+5), (f+5) \tag{2.15}$$

Această notație prezentată în tabelul 2.3, chiar dacă nu poate acoperi complexitatea tuturor undelor, este foarte utilă pentru cazul undelor mareice principale [LONGMAN, 1959].

Tabelul 2.3 - Notația Doodson pentru undele de maree terestră principale (Melchior, 1971)

Exemplu :		Exemplu :	
M_2	2τ	2	5
S_2	$2\tau - 2h + 2s$	2	7
Q_1	$\tau - 2s + p$	1	3
J_1	$\tau + 2s - p$	1	7
M_f	$2s$	0	7
	Specie		
	Grup		
	Constituent		
Grupele de unde sunt separabile după o luna. Constituentii sunt separabili după un an.		Grupul 16 reunește 6 constituenți principali :	
		K_1	165,555
		P_1	163,555
		S_1	164,556
		π_1	162,556
		ψ_1	166,554
		ϕ_1	167,555
		Grupul 27 reunește 4 constituenți principali :	
		S_2	T_2
		R_2	K_2

2.2.6. Variația amplitudinii undelor

Figura 2.3, preluată din capitolul dedicat mareelor terestre din volumul 1 «Physique et dynamique planétaires. Géodésie et astronomie géodésique» al lui Paul Melchior [1971], prezintă variațiile în amplitudine pentru diferitele componente mareice verticale în funcție de latitudinea punctului.

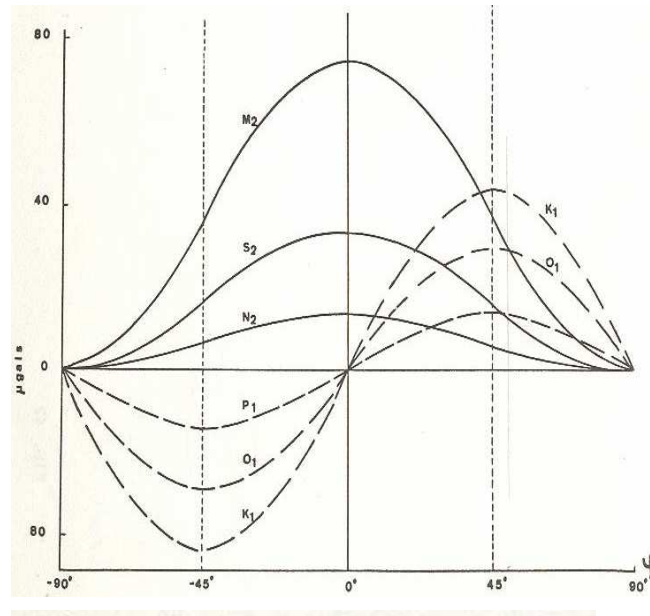


Fig. 2.3. - Variațiile amplitudinii undelor principale ale componentei verticale a forței mareice în funcție de latitudine.
K1, O1, P1 : unde tesarale diurne
M2, S2, N2 : unde sectoriale semidiurne

2.2.7. Spectrul Fourier al mareelor terestre

O altă metodă de a reprezenta în același timp frecvențele și amplitudinile componentelor mareice este spectrul Fourier al acestora (Fig. 2.4.) [HARRIS, 1978].

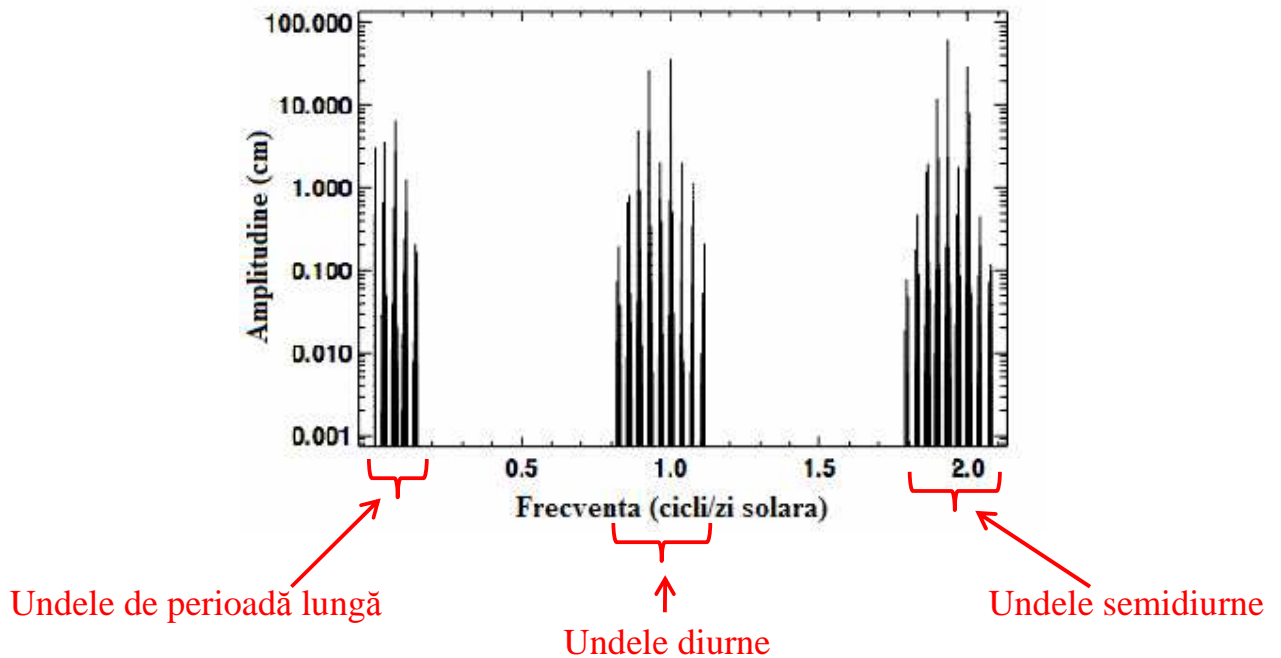


Fig. 2.4. - Spectrul Fourier general al componentelor mareelor terestre (Melchior, 1978).

În cele ce urmează reprezentăm, cu ajutorul spectrului Fourier, cele mai importante componente ale fiecărui grup de marea terestre, componente ce au fost selectate pentru a fi aplicate în analizele ulterioare din studiul nostru (Figurile 2.5a, b, c).

A)

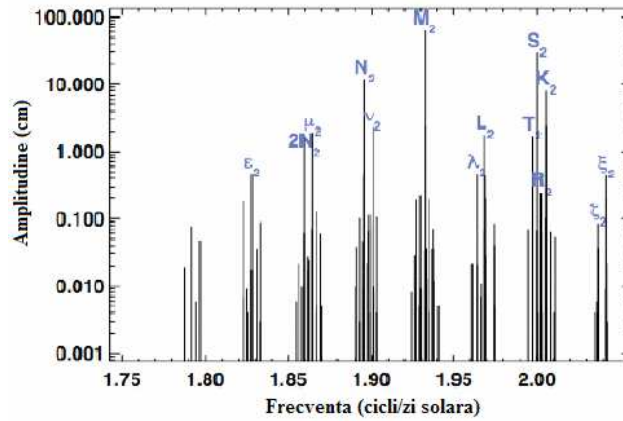


Fig. 2.5a - Spectrul Fourier al componentelor semidiurne (Melchior, 1978).

B)

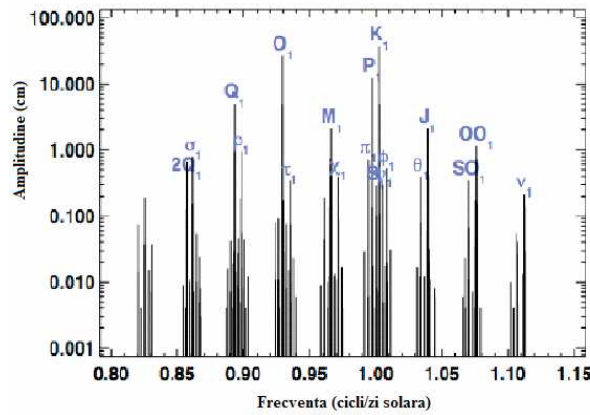


Fig. 2.5b - Spectrul Fourier al componentelor diurne (Melchior, 1978).

C)

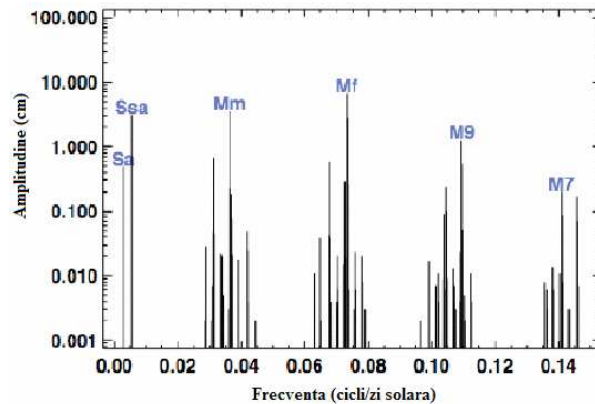


Fig. 2.5c - Spectrul Fourier al componentelor de lungă perioadă (Melchior, 1978)..

2.3. Problema corelației dintre mările terestre și cutremurele de pământ

2.3.1. Considerații geofizice

O zonă seismică este, prin definiție, o zonă puternic eterogenă din punct de vedere geologic [ENESCU et al., 1999; CLOETINGH et al., 2004]. Din cauza acestor eterogeneități, fiecare zonă seismică se comportă ca un filtru sau ca un adevărat amplificator pentru anumite componente ale mării terestre [CADICHEANU et al., 2005, 2006].

Se știe că amplitudinea stresului mareic, în jur de 0.03 bar, este mult mai mică, cu două-trei ordine de mărime, decât stresul tectonic eliberat în timpul unui cutremur de pământ [KLEIN, 1975; SOUCHAY and STAVINSCHI, 1999; VARGA, 2007]. În schimb, viteza de variație medie a stresului tectonic acumulat este de ordinul a 0.001 bar/h, cu unul-două ordine de mărime mai mic decât viteza de variație medie a stresului mareic. Prin urmare, în această situație stresul mareic poate juca rol de declanșator al cutremurelor de pământ [HARRIS, 1998; STAVINSCHI and SOUCHAY, 2003; STEACY et al., 2005; TANAKA et al., 2006].

Deoarece natura corelației se presupune a fi puternic legată de mecanismul faliilor, este preferabil ca studiile de corelație maree-cutremure să fie întreprinse în zone mai restrânse, unde prevalează o anumită orientare a sistemului de falii, decât în zone extinse sau globale. În acest din urmă caz, ne-am putea confrunta cu rezultate zero ale forțelor active la scară mare și, în consecință, fără șansa de a observa corelația căutată.

De altfel, cele mai multe rezultate pozitive obținute au fost raportate pentru zone seismice relativ restrânse.

O altă observație importantă este aceea legată de cazul fragmentelor rezultate din fenomenul de subducție și aflate în coborâre lentă în interiorul mantalei sub acțiunea, în principal, a forței de gravitație, a curenților de convecție și a forței arhimedice. Mișcarea lor în gradientul câmpului de forțe mareice ar putea implica un control parțial al stresului din interiorul slab-ului de către mările terestre și, în anumite condiții, declanșarea cutremurelor de pământ [KE, 1999 ; KILB et al., 2000; SUN and JIA, 2001 ; GOMBERG and JOHNSON, 2005].

În categoria zonelor seismice limitate geografic și implicând prezența unui fragment desprins sau în proces de desprindere de litosferă intră și zona Vrancea.

2.3.2. Abordarea sistematică a problemei. Rezultate controversate

Un număr considerabil de articole au fost dedicate posibilității declanșării cutremurelor de către mările terestre. Primul test de corelație, în acest sens, a fost publicat de către Schuster, 1897, a cărui metodă a rămas la baza multor studii întreprinse de atunci și până acum.

Dintre autorii de studii ale căror rezultate au pus în evidență existența corelației dintre mările terestre și cutremurele de pământ în lucrările lor, menționăm pe: Heaton (1975), Klein (1976), Young and Zurn (1979), Zugrăvescu et al. (1979, 1985), Souriau et al. (1982), Ulbrich et al. (1987), Rydelek et al. (1988), Shirley (1988), Tsuruoka et al. (1995), Enescu and Enescu (1996), Souchay (1999), Wilcock (2001), Tolstoy et al. (2002), Tanaka et al. (2002a, 200b, 2004, 2006).

Dintre autorii ale căror rezultate infirmă ipoteza corelației dintre cutremure și mările terestre, îi cităm pe: Schuster (1897), Knopoff (1964), Simpson (1967), Shudde and Barr (1977), Heaton (1982), Curchin and Pennington (1987), Hartzell and Heaton (1989), Rydelek et al. (1992), Vidale et al. (1998).

Lucrările recente, cu rezultate deosebit de interesante și pozitive ale autoarei Sashiko Tanaka, ne-au determinat să încercăm urmărirea variației aceluiași parametru statistic legat de corelația mării-cutremure în cazul zonei Vrancea, cu ajutorul unei metode de stacking, numită HiCum (Histogram Cumulating), dezvoltată de o echipă de cercetători de la Observatorul Regal al Belgiei [VAN RUYMBEKE et al., 2003].

Observații

Din toate cele prezentate în acest capitol reiese, fără nici un dubiu, că marea terestră poate fi considerată un candidat important la declanșarea cutremurelor de pământ și a evenimentelor în care gravitația ocupă un loc important.

3 METODOLOGIA DE ANALIZĂ

3.1. Metodologia de analiză a corelației dintre mările terestre și cutremurele de pământ.

3.1.1 Tehnici de analiză utilizate în studiul corelației

Într-un număr important de studii, momentul declanșării cutremurului a fost localizat pe curba mării terestre, curbă reprezentată cu ajutorul unor funcții teoretice variabile în timp și calculabile. S-a luat în considerare fie potențialul mareic [SHLIEN, 1972; SHIRLEY, 1988], fie accelerația gravitațională [KNOPOFF, 1964; SIMPSON, 1967; SAUCK, 1975; SHUDDE and BARR, 1977; RYKUNOV and SMIRNOV, 1985] sau deformarea Pământului [KLEIN, 1976; YOUNG and ZURN, 1979; MCNUTT and BEAVAN, 1984; OIKE and TANIGUCHI, 1988; RYDELEK et al., 1988].

Heaton [1975] a considerat pentru prima dată în studiul său variația stresului pe planul de falie din focar în cazul fiecărui eveniment seismic.

3.1.2. Câteva limite ale aplicațiilor

O limită importantă în aplicațiile anterioare a fost evaluarea stresului teoretic produs de marea terestră, în general, în epicentrul cutremurului, adică la suprafața pământului și nu la adâncimea corespunzătoare hipocentrului.

În plus, studiul global al corelației nu ia în considerare caracteristicile de orientare a sistemelor de falie, ceea ce conduce la o rezultantă nulă a forțelor ca urmare a compensării reciproce a fenomenelor care se manifestă pe falii cu orientări, pe ansamblu, foarte diferite.

Analiza corelației dintre mările terestre și cutremurele de pământ prin intermediul evaluării stresului mareic pe planul de falie [LIN et al., 1985] nu este singura posibilitate care

ne-ar putea conduce către rezultate elocvente în acest tip de analiză. În cele ce urmează, vom încerca să demonstrăm viabilitatea unei alte metode adaptată pentru a pune în evidență prezența unor periodicități sau tendințe de modulare, în cadrul seriilor temporale de evenimente sau variații ale unor parametri.

3.2. Metoda de analiză spectrală HiCum

3.2.1. Descriere generală

Metoda de analiză **HiCum** (cumulare de histograme) se bazează pe o procedură de cumulare sau stacking [BARTELS, 1938; VAN RUYMBEKE et al., 2003, 2007] prin intermediul căreia se face suma tuturor evenimentelor caracterizate de aceeași fază.

Faza fiecărui eveniment se determină divizând seria temporală dată în intervale de aceeași lungime egală cu perioada luată în calcul, T , și atribuind fiecărui interval valoarea de 360° sau 2π . Astfel toate evenimentele aparținând seriei temporale analizate vor fi caracterizate printr-o anumită fază sau vor aparține unui anumit interval de faze în cazul în care, pentru diminuarea zgomotului generat prin prezența unui număr insuficient de evenimente sau o dispersie prea mare a acestora, este mult mai indicată gruparea evenimentelor. Acestea vor aparține, în acest caz, unui interval de faze și nu unei faze anume (Fig. 3.1).

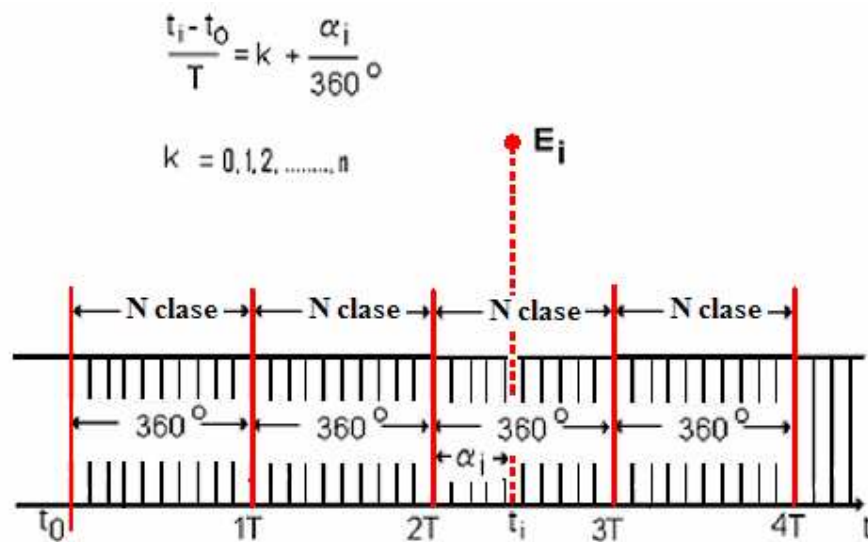


Fig. 3.1. – Schema de principiu a metodei de stacking HiCum. Împărțirea seriei temporale de evenimente în intervale egale cu perioada de timp T , divizată ulterior într-un număr de N clase (sectoare) echidistante reprezentând, fiecare, fază α_i sau intervalul de fază α_i în care un eveniment E_i are loc la momentul t_i .

Precizia depinde de perioada aleasă, de numărul de date și de așa numitul interval de eșantionare care nu este altceva decât lărgimea intervalului de faze amintit anterior și care se obține împărțind fiecare interval de perioadă T într-un număr convenabil de sectoare, funcție de valoarea perioadei T raportată la fenomenul analizat.

De exemplu, dacă vom căuta o tendință de modulare a unei serii temporale de evenimente seismice cu o perioadă de 12 ore, într-o zonă cu activitate moderată, vom prefera împărțirea fiecărei perioade în 12 sectoare, echivalând fiecare cu 60°, în loc de 360 de sectoare echivalând fiecare cu un grad. Dispersia va fi mai mică și testele statistice aplicate ulterior vor da rezultate mai bune.

Prin urmare, la sfârșitul procedurii descrise, fiecare eveniment va fi caracterizat prin faza căreia îi aparține sau intervalul de faze corespunzător, ceea ce ne va permite construirea unei histogramme în care numărul claselor corespunde fazelor sau intervalelor de fază. Mai trebuie precizat ca momentul de referință t_0 se alege în funcție de valoarea la care amplitudinea unei modulatori este maximă înainte de primul eveniment seismic considerat.

Etapa următoare constă în interpolarea histogrammei cu o funcție cosinusoidală a cărei perioadă este egală cu T . Interpolarea are la bază metoda celor mai mici pătrate. Amplitudinea și faza acestei cosinusoide reprezintă parametri importanți pentru evaluarea implicării componente de perioadă T a mareelor terestre în modularea activității seismice sau variația parametrilor seismici.

3.2.2. Interpolare cosinusoidală cu ajutorul metodei celor mai mici pătrate

Considerăm distribuția obținută la punctul anterior echivalentul unei distribuții temporale cu pas de eșantionare constant. Numărul claselor îl notăm cu N iar valoarea distribuției pentru o anumită clasă (fază) n se poate scrie: $x_n = x(n)$, $n=0, 1, \dots, N-1$.

Ne propunem să interpolăm aceste valori x_n printr-o cosinoidă de perioadă bine precizată, ceea ce corespunde unei viteze unghiulare cunoscute, ω_0 (Ec. 3.1). Acest lucru implică aflarea valorii fazei inițiale ϕ și a amplitudinii cosinusoidei de interpolare:

$$x_n = X \cos(\omega_0 n dt + \phi) + \varepsilon_n \quad n=0, 1, \dots, N-1 \quad (3.1)$$

unde X este amplitudinea, dt este echivalentul în secunde al intervalului de fază α_n , ϕ este faza inițială, iar ε_n reprezintă reziduul sau eroarea corespunzătoare fazei n .

Metoda celor mai mici pătrate minimizează suma la pătrat a erorilor conform ecuației (3.2):

$$E = \sum_{n=0}^{N-1} \varepsilon_n^2 = \sum_{n=0}^{N-1} (x_n - X \cos(\omega_0 n dt + \phi))^2 \quad (3.2)$$

Amplitudinea X se obține din ecuația (3.9) iar faza ϕ , din ecuația (3.10):

$$X = \sqrt{A^2 + B^2} \quad (3.9)$$

$$\phi = \arctg\left(\frac{-B}{A}\right) \quad (3.10)$$

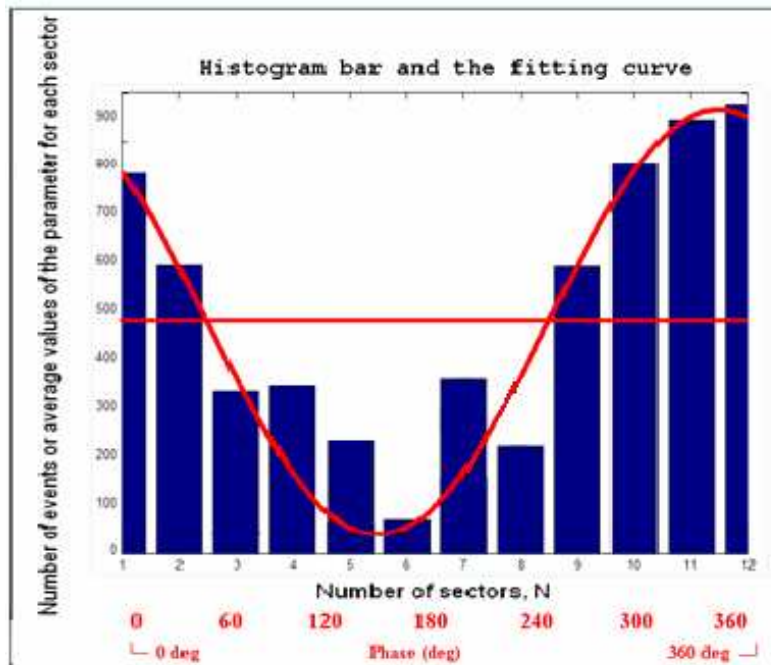


Fig. 3.3. –Histograma interpolată printr-o funcție cosinusoidală.

Amplitudinea depinde de perioada T , de lungimea seriei temporale și de numărul de clase sau sectoare cu ajutorul cărora s-a obținut histograma.

3.2.2. Aplicații ale metodei HiCum

Metoda de analiză spectrală descrisă mai sus a fost aplicată cu succes și în cazul unor serii de date parametrice precum înregistrările gravimetrice efectuate cu un gravimetru supraconductor sau înregistrări ale presiunii aerului.

Un alt avantaj al metodei HiCum este lipsa efectelor de margine și posibilitatea de aplicare asupra seriilor temporale aleatoare, fără impunerea unei eșantionări regulate a semnalului.

Și în cazul acestei metode fenomenul de aliasing este prezent dar el poate fi controlat cu ajutorul fazei unei teoretice de referință.

Rezultă că metoda este suficient de sensibilă pentru a pune în evidență, într-o serie temporală de evenimente cum sunt cutremurele de pământ, tendințe de modulare ale activității seismice cu anumite periodicități, în speță periodicități ale undelor de maree terestră.

Evident la prima vedere, orice distribuție obținută cu ajutorul acestei metode, chiar și în cazul unor serii temporale aleatoare construite sintetic, poate să conducă la interpolarea matematică printr-o cosinusoidă cu o perioadă stabilită a priori și o amplitudine mai mare sau mică în funcție de caz.

Problema testării statistice și validării rezultatelor obținute devine esențială.

3.3. Testele statistice utilizate pentru validarea rezultatelor obținute

Pentru testarea și validarea rezultatelor noastre am încercat, într-o primă etapă, să valorificăm experiența cu rezultate pozitive cunoscută până în prezent în domeniul corelației dintre mareele terestre și cutremurele de pământ. Astfel, observațiile, modelele teoretice și testele utilizate în cazul unor studii de caz asemănătoare au fost pentru noi punctul de pornire [VERE-JONES, 1978; REES, 1987, SNEDECOR and COCHRAN, 1989 ; TODORAN, 1989 ; TAMURA et al., 1991].

Am dedus că în studiile de corelație maree-cutremure unul din cele mai utilizate teste este testul lui Schuster iar validarea rezultatelor în anumite condiții s-a făcut cu ajutorul seriilor sintetice de evenimente aleatoare [TANAKA, 2002a, 2002b, 2004, 2006].

3.3.1. Testul lui Schuster

Testul lui Schuster atribuie fiecărui eveniment seismic un versor a cărui fază α_i coincide cu faza corespunzătoare producerii evenimentului în intervalul T , perioada fixată a priori ce va sta la baza aplicării stackingului. Rezultanta adunării vectoriale a tuturor versorilor se notează cu vectorul D (Obs.: se utilizează modul de scriere prin caracter italic, bold și cu majusculă).

Lungimea vectorului rezultant D se calculează cu ajutorul ecuației (3.11).

$$D^2 = \left(\sum_{i=1}^{Ne} \cos \alpha_i \right)^2 + \left(\sum_{i=1}^{Ne} \sin \alpha_i \right)^2 \quad i = 1, 2, \dots, Ne \quad (3.11)$$

unde α_i este faza evenimentului seismic i iar Ne reprezintă numărul total de evenimente analizate. Dacă presupunem că parametrul α_i are o distribuție aleatoare, probabilitatea de a obține un vector rezultant cu o valoare egală sau mai mare decât D este dată de ecuația (3.12):

$$p_s = \exp\left(-\frac{D^2}{Ne}\right) \quad (3.12)$$

Parametrul sau coeficientul p_s reprezintă nivelul de semnificație la care putem renunța la așa numita ipoteză de zero. Modul în care este definit acest parametru statistic este prezentat în figura 3.6. Ipoteza de zero presupune o distribuție aleatoare a fazelor α_i . Atunci când valoarea p_s este mică, înseamnă că ne îndepărtăm de cazul aleator. Am ales în studiul nostru ca nivel de semnificație la care putem renunța la ipoteza evenimentelor aleator distribuite, valoarea $p < 5\%$. Acest coeficient p este considerat în analizele noastre, ca peste tot în cazul analizelor privind corelația maree-cutremure într-o abordare asemănătoare cu a noastră, *coeficient statistic de evaluare a corelației* dintre mareele terestre și cutremurele de pământ.

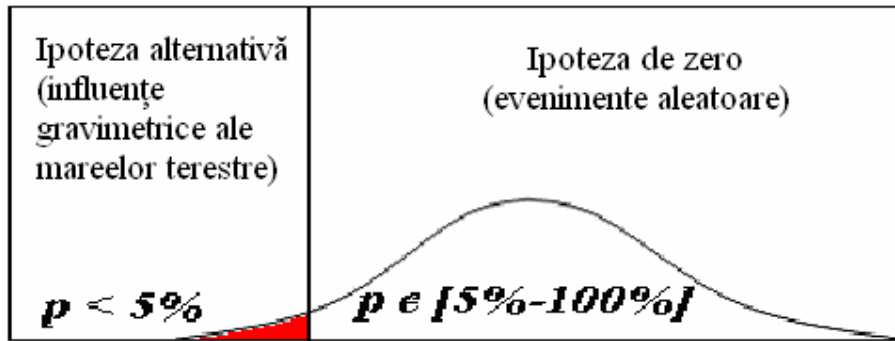


Fig. 3.6 – Definierea coeficientului statistic p

3.3.2. Testul permutărilor

Testul permutărilor [PITMAN, 1938] este cunoscut și folosit frecvent în genetică. Analizând caracteristicile acestui test, am considerat că el poate fi aplicat cu succes și în problema corelației dintre mareele terestre și cutremurele de pământ. Cu ajutorul lui putem obține valoarea aceluiași coeficient statistic p , notat de data aceasta p_{per} , având aceeași semnificație ca și coeficientul p_s . El reprezintă un coeficient de evaluare a corelației dintre mareele terestre și cutremurele de pământ la un nivel de semnificație stabilit a priori, nivel la care se poate renunța la ipoteza de zero a evenimentelor aleatoare.

Metoda de calcul a coeficientului p_{per} este relativ diferită de cea a coeficientului cu aceeași semnificație, p_s . Această metodă se bazează, ca și testul lui Schuster, pe o distribuție de evenimente obținută cu ajutorul metodei de stacking HiCum. Parametrul care se ia în calcul de data aceasta nu mai este faza α_i ci amplitudinea A_0 a sinusoidei obținută prin interpolarea distribuției. Această amplitudine devine amplitudine de referință pentru etapele care urmează testului.

Se permută aleator distribuția inițială de un număr suficient de ori, n . Teoria arată că permutarea de 1000 de ori este suficientă pentru obținerea unui rezultat stabil [FISHER, 1935]. Pentru fiecare din cele n distribuții obținute după fiecare permutare a distribuției inițiale se calculează amplitudinea A_j a cosinusoidei cu care se interpolează distribuția rezultată din permutarea aleatoare.

Se aleg acele valori ale acestor amplitudini pentru care $A_j > A_0$ ($j=0, 1, 2, \dots, m$) unde $m \leq n$. Valoarea p_{per} se calculează cu ajutorul ecuației (3.13) :

$$p_{per} = m/n \tag{3.13}$$

Corelând valorile p_s obținute prin aplicarea testului lui Schuster, cu valorile p_{per} calculate prin testul permutărilor, pentru mai multe cazuri analizate s-a obținut, în majoritatea situațiilor un coeficient statistic al rezultatelor superior valorii de 90%. Aceasta arată fără nici un dubiu, compatibilitatea totală a celor două teste și reprezintă o contribuție importantă în lărgirea posibilităților de analiză în problema corelațiilor maree-cutremure.

3.4. Intervale de încredere. Metoda Bootstrap

Unii cercetători consideră că intervalele de încredere calculabile statistic pentru diferiți parametri sunt mai indicate și mai informative decât testele statistice propriu-zise. Adevărul include, probabil, utilizarea concomitentă a ambelor posibilități deoarece testele ajută la verificarea ipotezei de zero și punerea în evidență a tendințelor unui parametru, după care calculul intervalelor de încredere aduce indicii prețioase legate de particularitățile parametrului aflat în discuție [DAVISON et al., 1992, DICICCO and EFRON, 1996].

Și **metoda Bootstrap** se bazează pe tehnica permutărilor dar aplicarea acesteia se face puțin diferit decât în cazul testului permutărilor [EFRON and TIBSHIRANI, 1998]. Pentru fiecare nouă distribuție se calculează statistica stabilită pentru parametrul Y (valoarea medie sau mediana sau deviația standard, etc.). Relația (3.14) exprimă intervalul de încredere sau confidență ($I.C.$) pentru un nivel de încredere β precizat:

$$I.C. = [Y_{(1-\beta)/2} : Y_{(1+\beta)/2}] \quad (3.14)$$

În lucrarea noastră parametrul Y este amplitudinea cosinusoidei de interpolare obținută pentru fiecare distribuție după aplicarea permutării de tip bootstrap. Studiul de față nu și-a propus să ia în calcul, deocamdată, ca parametru bootstrap, faza cosinusoidei de interpolare, deși apreciem că și aceasta ar putea aduce în viitor informații utile în problema corelației maree-cutremure.

3.5. Analize în ferestre mobile

3.5.1. Criteriile de alegere a dimensiunilor ferestrei mobile

Variația temporală a coeficientului statistic p este foarte importantă în înțelegerea caracteristicii de răspuns a zonei seismice analizate. În plus, acest coeficient ar putea avea calitatea unui potențial factor precursor.

În acest context, ne-am propus să calculăm valoarea coeficientului p în ferestre mobile temporale și ferestre mobile 3D, pentru baza de date seismice pe care o avem la dispoziție pentru zona Vrancea. Criteriul general de alegere a dimensiunilor ferestrelor în ambele cazuri a fost impus de cel al numărului minim de evenimente cerut de teorie în vederea aplicării testelor statistice corespunzătoare. Deși acest minim este de 10 evenimente, noi am dublat numărul, ridicând pragul la 20 de evenimente atât în cazul ferestrei temporale cât și în cel al ferestrei 3D.

De asemenea, am utilizat criterii legate de aspecte fenomenologice cum ar fi cel al completitudinii ciclurilor mareice suprapuse peste cele sezoniere îndeosebi.

3.5.2. Fereastra mobilă temporală

Ferestrele mobile temporale sunt caracterizate prin dimensiunea aleasă dar și prin momentul inițial față de care ne raportăm atunci când aplicăm metoda de stacking. Acest moment de referință foarte important corespunde fazei maximului de amplitudine a

componentei mareice considerată și se traduce prin momentul de timp cel mai apropiat dinaintea de producerea primului eveniment seismic din seria temporală de cutremure analizată.

Lungimea temporală a ferestrei mobile corespunde unui an tropic, în concordanță cu criteriile stabilite la punctul 3.5.1. Pasul de deplasare sau alunecare a ferestrei a fost ales egal cu o zi, în cazul analizelor de detaliu pentru o anumită componentă mareică, sau egal cu 30 sau 50 de zile în analizele cu periodicități ale tuturor componentelor mareice. Indiferent de alegerea acestui pas, rezultatele obținute au indicat aspecte comparabile.

3.5.3. Fereastra mobilă 3D

În cazul ferestrei mobile 3D, aceasta este reprezentată printr-un element de volum ale cărui dimensiuni respectă condițiile legate de erorile medii în determinarea parametrilor seismici ai hipocentrului în zona considerată. Pentru Vrancea aceste erori medii sunt: pentru longitudine și latitudine aproximativ ± 3 km, iar pentru adâncime aproximativ ± 10 km.

Elementul de volum mobil utilizat în cazul zonei seismice Vrancea este un paralelipiped delimitat de o suprafață pătrată cu latura de 12 km x 12 km și o înălțime de 20 km. Acest volum este deplasat de la vest spre est și de la sud spre nord cu un pas de 4 km, valoare superioară erorii medii în determinarea epicentrelor. După baleierea completă a primului strat operația se repetă pentru stratul următor coborând 10 km.

Metoda de stacking HiCum, testele statistice și validarea rezultatelor prin serii aleatoare sintetice sunt aplicate atunci când volumul analizat conține minimum 20 de evenimente seismice pentru a putea obține un rezultat consistent din punct de vedere statistic.

3.6. Validarea rezultatelor cu ajutorul seriilor sintetice temporale de evenimente seismice aleatoare

Validarea rezultatelor obținute cu ajutorul testelor statistice s-a făcut prin construirea unor serii sintetice de evenimente aleatoare care au fost apoi analizate în aceleași condiții și cu aceeași metodologie ca și seria originală de evenimente. Acest lucru s-a aplicat fiecărei ferestre mobile temporale sau 3D în care condiția de corelație (tradusă prin renunțarea la ipoteza de zero caracteristică a evenimentelor aleatoare) a fost satisfăcută, adică valoarea coeficientului $p < 5\%$.

Procedura se repetă de peste o sută de ori sau cel mai bine de o mie de ori, așa cum teoria statistică o recomandă [BENDAT and PIERSOL, 1986]. Reținem toate cazurile în care $p < 5\%$ și exprimăm raportul dintre numărul situațiilor în care $p < 5\%$ și numărul total al seriilor sintetice utilizate, în cazul nostru acesta este 1000.

Observații

Metoda de stacking HiCum este utilizată în prezentul studiu pentru a observa tendințele de modulare cu anumite periodicități specifice mareelor terestre, ale activității

seismice intermediare corespunzătoare unei zone seismice particulare. Cea mai importantă ipoteză pentru metoda HiCum este perioada bine precizată a priori.

Cu **testul lui Schuster** calculăm coeficientul statistic p dintre componenta de maree terestre propusă și seria cutremurelor de pământ aparținând unei zone seismice particulare. Alături de acest test am introdus pentru prima dată în acest gen de analiză privind corelația marea-cutremure, **testul permutărilor** comparând în final rezultatele celor două teste statistice.

Metoda Bootstrap, introdusă de asemenea pentru prima oară ca metodă de analiză a corelației marea-cutremure de pământ, ne va permite calculul intervalului de încredere pentru parametrul în discuție ; în cazul nostru este vorba de amplitudinea cosinusoidei cu care se interpolează distribuția obținută prin metoda HiCum prezentată la începutul acestui capitol.

Pentru a valida existența corelației găsită în seriile de evenimente corespunzătoare ferestrelor de timp sau 3D analizate, apelăm la construirea unor serii sintetice temporale pentru evenimentele seismice.

Considerăm **coeficientul p ca pe un potențial factor precursor** în analiza activității seismice intermediare a unei zone seismice datorită posibilității urmăririi variațiilor lui în timp cu ajutorul ferestrelor mobile analizate.

Alături de analiza corelației dintre mările terestre și cutremurele de pământ în ferestre mobile temporale, metodă deja cunoscută [TANAKA et al., 2006], introducem pentru prima dată în acest tip de analiză corelația în ferestre mobile 3D, inițializând conceptul de **tomografie statistică a unei zone seismice cu ajutorul mările terestre**.

4 ANALIZA DATELOR ȘI VALIDAREA REZULTATELOR ÎN CAZUL ACTIVITĂȚII SEISMICE INTERMEDIARE DIN ZONA VRANCEA

4.1. Tendințe periodice în activitatea seismică intermediară din zona Vrancea

Problema corelației dintre mările terestre și cutremurele de pământ pentru zona Vrancea a fost abordată de cercetătorii români începând cu anul 1979 [ZUGRĂVESCU et al., 1979, 1986, 1989]. Analiza s-a făcut considerând potențialul teoretic al mările terestre (componenta verticală) și utilizând o procedură de calcul bazată pe faza fiecărui eveniment seismic pe curba potențialului amintit. Această curbă a fost aproximată cu o sinusoidă, între două puncte succesive de inflexiune de același semn (Fig. 4.1), permițând evaluarea fazei corespunzătoare momentului de timp la care s-a produs cutremurul de pământ.

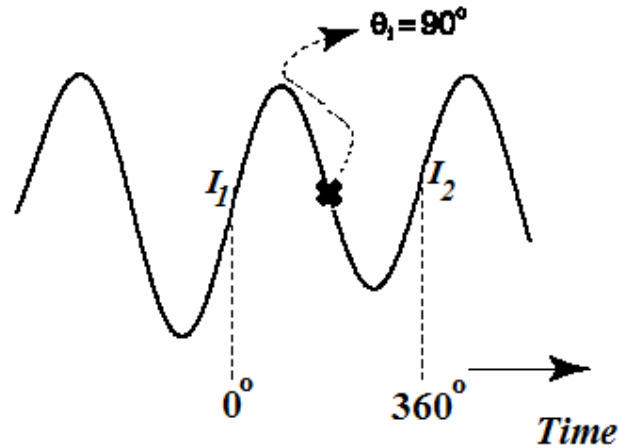


Fig. 4.1. – Definirea fazei pe curba de maree. Intervalul dintre cele două puncte de inflexiune I_1 și I_2 se împarte în diviziuni echidistante.

Cu toate limitările, aceste rezultate au demonstrat existența corelației între mările terestre și cutremurele vrâncene [ZUGRĂVESCU et al., 1979, 1986, 1989].

Transferând în întregime acest algoritm pe un calculator personal și considerând parte dintr-o sinusoidă doar porțiunea cuprinsă între un punct de extrem și punctul de inflexiune anterior sau posterior acestui punct de extrem, după caz, s-a ajuns la obținerea unor rezultate controversate [CADICHEANU, 1994]. Analiza aceluiași set de date a condus la diferențe destul de mari în calculul fazei pe curba de maree. Autorul a observat însă existența unor intervale de timp în care prevala tendința cutremurelor de a se produce doar pentru anumite faze ale potentialului mareic, dar și intervale în care o astfel de tendință nu putea fi observată.

În studiul de față am hotărât abordarea problemei corelației maree-cutremure pentru activitatea seismică intermediară din Vrancea cu ajutorul metodologiei prezentate la capitolul 3 pentru a atinge scopul propus pentru teză în introducerea acestei lucrări.

4.1.1 Baza de date utilizată

Baza de date seismice la care am apelat în acest studiu este catalogul de cutremure RomPlus, pus la dispoziția noastră prin amabilitatea Institutului Național pentru Fizica Pământului din București. Am ales pentru analiza noastră perioada 1970 – 2007. Deși datele prezintă o mai bună omogenitate și completitudine începând cu anul 1978, ni s-a părut interesantă posibilitatea comparării diferitelor intervale de activitate seismică calitativ diferite.

Au fost luate în calcul doar evenimentele seismice cu magnitudinea $M_w \geq 2.5$ și adâncimea egală sau mai mare de 60 km. În acord cu alți autori care consideră secvența postșocurilor o sursă posibilă de contaminare în sensul creșterii biasului rezultatelor [MAIN, 2006], aceasta a fost eliminată folosind criteriul Kossobokov-Romashkova pentru zona Vrancea [KOSSOBOKOV and ROMASHKOVA, 2006]. În final, 2649 de evenimente seismice principale au corespuns criteriilor stabilite de noi pentru analiza corelației maree-cutremure.

O atenție specială a fost acordată în analiza noastră valorilor parametrului statistic p calculat înainte și după producerea cutremurelor cu magnitudinea $M_w \geq 5.0$.

În cazul exemplului de extindere a metodologiei pentru alte zone similare Vrancei, este vorba de zonele seismice Bucaramanga din Columbia și Hindu Kush din Afganistan, am utilizat datele Centrului Internațional de Seismologie pentru perioada 1973-2005.

Programele profesionale la care am apelat au fost: μ GRAPH v1.9, ETERNA v.3.4, TSOFT v.2.1.4, MATLAB v6.5.1, MICROSOFT@Word 2002, MICROSOFT@PowerPoint 2002. La acestea s-au adăugat proceduri proprii construite sub mediul MatLab pe parcursul activităților de cercetare desfășurate în cadrul Observatorului Regal al Belgiei. Aceste mici programe, rulate ulterior în MatLab, ne-au ajutat la eliminarea postșocurilor, aplicarea metodei HiCum, a testelor statistice, a metodei Bootstrap, la construirea seriilor sintetice, calculul coeficientului statistic p pentru ferestrele mobile temporale și 3D, reprezentarea rezultatelor prin grafice 2D și 3D.

4.2. Calculul coeficientului statistic p

4.2.1. Calculul coeficientului statistic p cu ajutorul testelor statistice

Rezultatele pozitive obținute, în principal, de Tanaka [TANAKA et al., 2002a, 200b, 2006], ne-a determinat să extindem această direcție de cercetare și pentru zona Vrancea. Investigațiile noastre s-au concentrat, în acest sens, asupra influențelor gravimetrice induse de anumite componente (periodicități) ale marelor terestre în activitatea seismică intermediară din zona Vrancea. Aceste influențe sunt puse în evidență prin intermediul metodei de stacking HiCum și evaluate cu ajutorul coeficientului statistic p , calculat prin metode statistice care au la bază ipoteza de zero adică ipoteza evenimentelor distribuite aleator.

În cea mai mare parte a unor astfel de abordări se utilizează testul lui Schuster prezentat în capitolul 3.3.1. Înainte de a aplica acest test, obținem distribuția evenimentelor seismice, după algoritmul prezentat la capitolul 3.2.1, cu ajutorul metodei HiCum. Se iau în calcul periodicitățile undelor principale din fiecare grupă caracteristică a marelor terestre (Tabelul 4.2).

Tabelul 4.2 – Periodicitățile și numerele lui Doodson pentru principalele componente ale marelor terestre (Melchior, 1978)

Componente ale marelor terestre	Numărul lui Doodson	Perioada în cicluri/zi
S2 – Undă solară (S) principală semidiurnă	273.555	0.50000
M2 – Undă lunară(L) principală semidiurnă	255.555	0.51753
N2 - Undă L eliptică majoră semidiurnă pentru M2	245.655	0.52743
K1 – Unde L și S declinaționale diurne	165.555	0.99727
P1 – Undă S principală diurnă	163.555	1.00275
O1 – Undă L principală diurnă	145.555	1.07581
MF – Undă L declinatională	075.555	13.66079
MM – Undă L eliptică	065.455	27.55454
SSA – Undă S declinatională	057.555	182.62172
SA – Undă S eliptică	056.554	365.25678

În fiecare histogramă obținută pentru diferitele periodicități mareice, valorile distribuțiilor evenimentelor seismice sunt utilizate în vederea obținerii coeficientului statistic p , utilizând în acest scop atât testul statistic clasic al lui Schuster cât și **testul permutărilor**, introdus pentru prima oară în analiza corelației dintre mările terestre și cutremurele de pământ.

4.2.2. Compararea rezultatelor obținute

În prima etapă se calculează coeficientul statistic p prin intermediul celor două teste statistice, testul lui Schuster și testul permutărilor, aplicate distribuției obținute prin metoda HiCum considerând o singură fereastră de analiză ce include toate evenimentele seismice intermediare din perioada 1970 - 2007.

Nivelul de semnificație ales este 5%. Acest prag înseamnă renunțarea la ipoteza de zero, a distribuției aleatoare a evenimentelor seismice doar în cazul în care valoarea coeficientului statistic este mai mică decât 0.05 (sau 5%).

Pentru fiecare perioadă analizată, se obține o singură valoare p care exprimă existența corelației sau inexistența acesteia. Rezultatele arată o foarte bună compatibilitate între cele două teste, coeficientul de corelație a rezultatelor dintre aceste teste fiind mai mare de 90%. De asemenea, valorile celor două teste arată că nu există o corelație evidentă între niciuna dintre componentele mările terestre și cutremurele de pământ vrâncene atâta timp cât nu se introduce niciun criteriu de discriminare temporală privind existența unei faze premergătoare evenimentului seismic considerată ca fiind faza critică dinaintea declanșării cutremurului de pământ.

4.3. Variații temporale și spațiale ale coeficientului statistic p

4.3.1. Variații temporale ale coeficientului statistic p obținute cu ajutorul ferestrelor de timp mobile

Rezultatele prezentate în subcapitolul 4.2.2 impun utilizarea mai departe în studiul nostru a ferestrelor mobile. Aceasta este cea mai simplă modalitate de a urmări variațiile temporale ale coeficientului statistic p și de a răspunde la primul obiectiv al tezei, acela de a obține caracteristicile de răspuns ale zonei seismice Vrancea în cazul acțiunii diferitelor componente ale mările terestre.

Pentru cea mai mare parte a componentelor mareice enumerate în tabelul 4.2, mai precis pentru undele S2, M2, N2, K1, P1, O1, MF și MM, s-a utilizat o fereastră mobilă de 365.24 zile (anul tropic) iar pentru componentele SSA et SA, o fereastră de 5 ani tropici deoarece perioada însăși a acestor unde este mult mai mare decât a celorlalte componente mareice. Dimensiunile ferestrelor și a pasului de deplasare au fost alese fie pe considerente statistice, pentru a avea un număr suficient de evenimente seismice ($N \geq 20$ evenimente), fie având în vedere considerente geofizice, cum ar fi condiția de cuasi-ciclicitate sezonieră a Pământului.

Pentru fiecare fereastră se obține amplitudinea cosinusoidei de interpolare a distribuției (histogramei) construită prin metoda de stacking HiCum. Cu ajutorul valorilor numărului de cutremure de pământ corespunzător fiecărei faze definite pentru această distribuție se calculează valoarea coeficientului p aplicând mai întâi testul lui Schuster. Subliniem că pentru testul lui Schuster faza fiecărui cutremur este un parametru definitoriu. În aceeași fereastră, luând în calcul amplitudinea cosinusoidei de interpolare, se calculează coeficientul statistic p utilizând testul permutărilor, amplitudinea fiind, de data aceasta, parametru definitoriu pentru acest test.

Pentru stabilirea intervalului de încredere pentru valoarea amplitudinii în cazul fiecărei ferestre mobile, se aplică metoda Bootstrap așa cum a fost descrisă în subcapitolul 3.4.

Rezultatele repetării acestor proceduri pentru toate ferestrele mobile de timp și pentru toate componentele (periodicitățile) analizate ale mareelor terestre se regăsesc într-un set de reprezentări grafice din care am ales spre exemplificare figurile 4.2 și 4.3. Cutremurele de pământ cu magnitudinea $M_w \geq 5.0$ sunt, de asemenea, repere importante pe aceste figuri pentru interpretările ulterioare ale rezultatelor.

Se observă că intervalul de timp 1970-1978 este caracterizat de un număr insuficient de evenimente seismice. Reprezentările 3D și 2D marchează foarte bine acest aspect.

Rezultate obținute pe baza componentei S2 a mareelor terestre

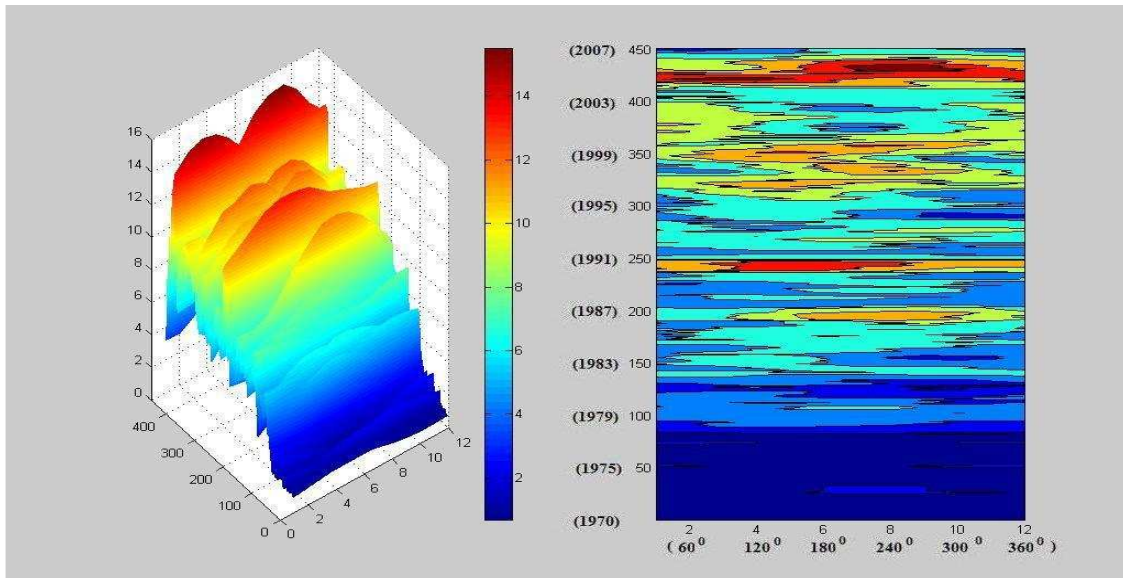


Fig. 4.2 - Distribuția 3D (în stânga figurii) a amplitudinilor curbelor de interpolare obținute prin metoda de stacking Hicum și exprimată în număr de evenimente seismice, în cazul unei ferestre mobile de 365.24 zile și un pas de alunecare de 30 zile. În dreapta este reprezentarea 2D a aceluiași lucru.

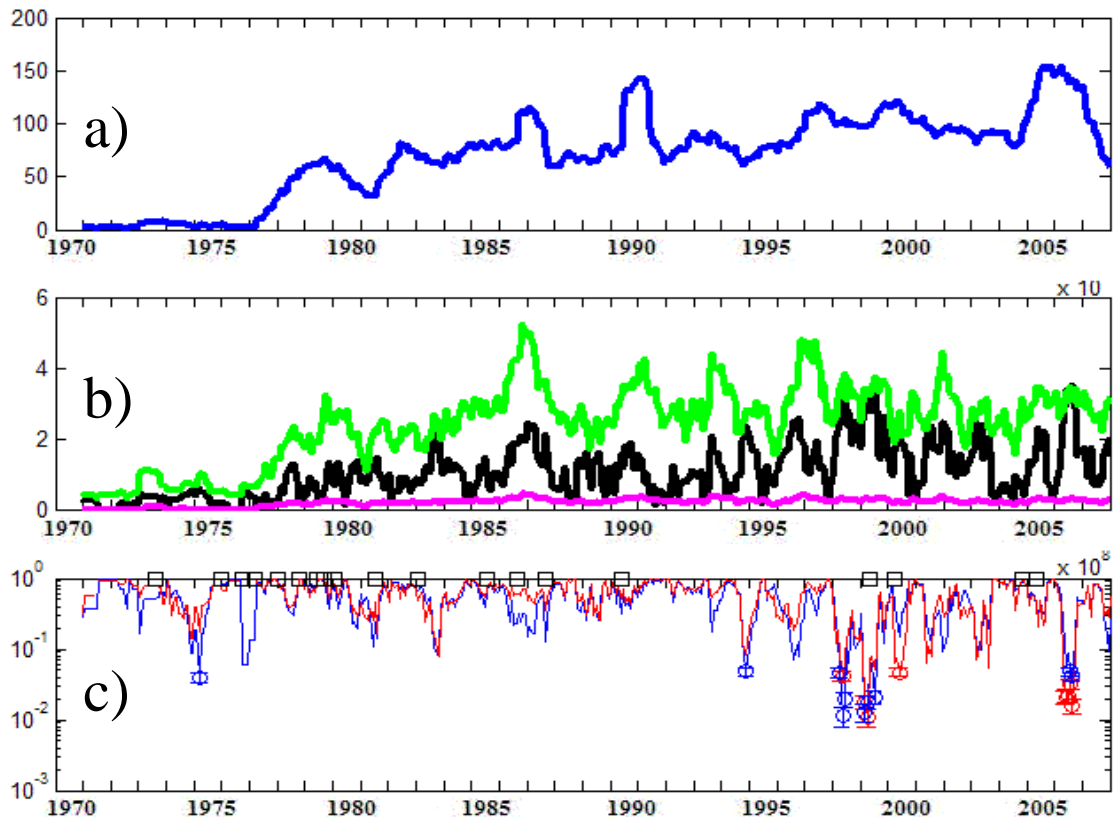
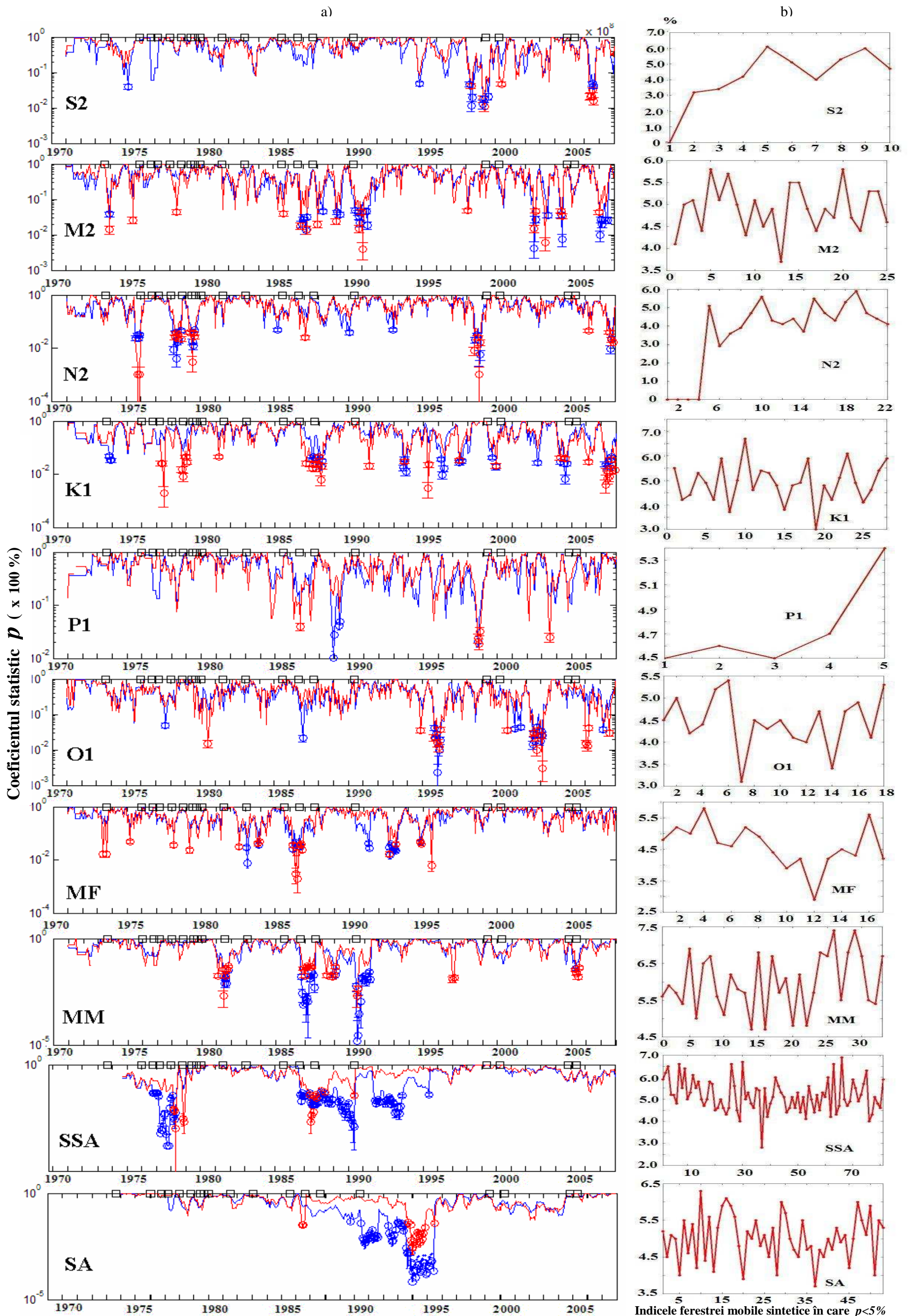


Fig. 4.3. - a) Variația temporală a numărului de evenimente seismice în fiecare fereastră mobilă; b) Valorile limită ale intervalului de încredere obținut prin metoda Bootstrap (magenta pentru limita inferioară și verde pentru cea superioară) pentru amplitudinea cosinusoidei HiCum în fiecare fereastră mobilă și, în negru, valoarea amplitudinii de referință corespunzătoare, de asemenea, fiecărei ferestre; c) Valorile coeficientului statistic p pentru testul Schuster (în albastru) și pentru testul permutărilor (în roșu), marcate cu cercuri și bare de eroare pentru $p < 5\%$. Cutremurele de pământ cu magnitudinea $M_w > 5.0$ sunt reprezentate prin pătrate negre.



Numărul de cazuri sintetice cu $p < 5\%$ raportate la numărul de serii sintetice aleatoare (%)

Fig. 4.22. – a) Valorile coeficientului de corelație p pentru testul lui Schuster (în albastru) și pentru testul permutărilor (în roșu), marcate cu cercuri și bare de erori pentru $p < 5\%$. Cutremurele de pământ cu magnitudinea $M_w > 5.0$ sunt reprezentate prin pătrate negre. b) Rezultatele validării cu ajutorul seriilor sintetice de evenimente aleatoare pentru zona Vrancea (pentru p obținut cu testul lui Schuster). OBS. : se utilizează ferestre mobile de 365.24 zile deplasate cu 30 de zile pentru undele M2, S2, N2, K1, P1, O1, MF, MM și ferestre mobile de 5 ani deplasate cu 30 de zile pentru undele SSA și SA.

Se poate demonstra relativ ușor că metoda ferestrelor mobile aplicată unei serii sintetice de evenimente aleatoare, folosind aceleași periodicități mareice, poate avea ca rezultat cazuri de corelații adică ferestre de timp în care coeficientul $p < 5\%$. Ne putem întreba dacă există posibilitatea validării corelației? Dacă distribuția evenimentelor din fereastra mobilă este una particulară, cu o anumită caracteristică diferită de aleatoriu, aceasta înseamnă că prin randomizarea datelor din această fereastră nu vom mai obține o situație similară decât foarte rar.

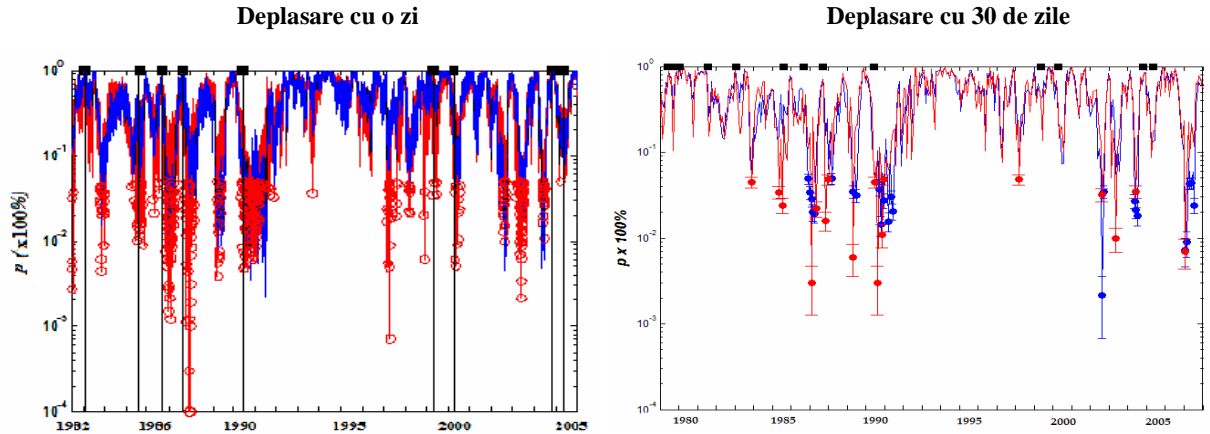
Prin urmare, am construit o mie de serii temporale sintetice corespunzătoare unor evenimente seismice aleatoare pornind de la momentele de început și sfârșit ale ferestrelor în care condiția de corelație a fost îndeplinită. Pentru fiecare serie sintetică am repetat întregul protocol de calcul al coeficientului statistic p . Am aplicat și aici un prag asemănător celui de încredere corespunzător testelor statistice, dar fără conotația matematică a acestuia. Astfel, dacă obținem doar în 5% din cazuri sau mai puțin un coeficient statistic sintetic egal sau mai mic decât coeficientul p al ferestrei inițiale, vom considera că distribuția noastră inițială de evenimente seismice nu este aleatoare. Dar limita de 5% rămâne în discuție.

4.3.2. Variații temporale ale coeficientului statistic p obținute cu ajutorul ferestrelor mobile cu număr fix de evenimente seismice

Întregul raționament descris în paragraful anterior poate fi aplicat utilizând, în locul ferestrelor mobile cu intervale de timp bine definite, deplasate cu un interval de timp precizat, ferestre cu un număr fix de evenimente seismice, deplasate cu un număr fix de evenimente. Evident, acest din urmă caz, implică o variație continuă a lungimii temporale atât a ferestrelor cât și a pasului de deplasare a acestora.

Pentru exemplificare, am ales ferestre de 100, 50 respectiv 30 de evenimente seismice, deplasate cu un eveniment și apoi cu 10 evenimente, în fiecare caz. Rezultatele au fost comparate cu cele obținute cu ajutorul ferestrelor mobile definite prin intervale de timp fixe. În toate cazurile se păstrează aceeași amprentă specifică a variației coeficientului statistic p pentru componenta mareică aleasă ($M2$) ca și în cazul ferestrelor mobile definite prin intervale de timp fixe.

(a) Ferestre mobile de 365.24 zile



(b) Ferestre mobile de 100 evenimente

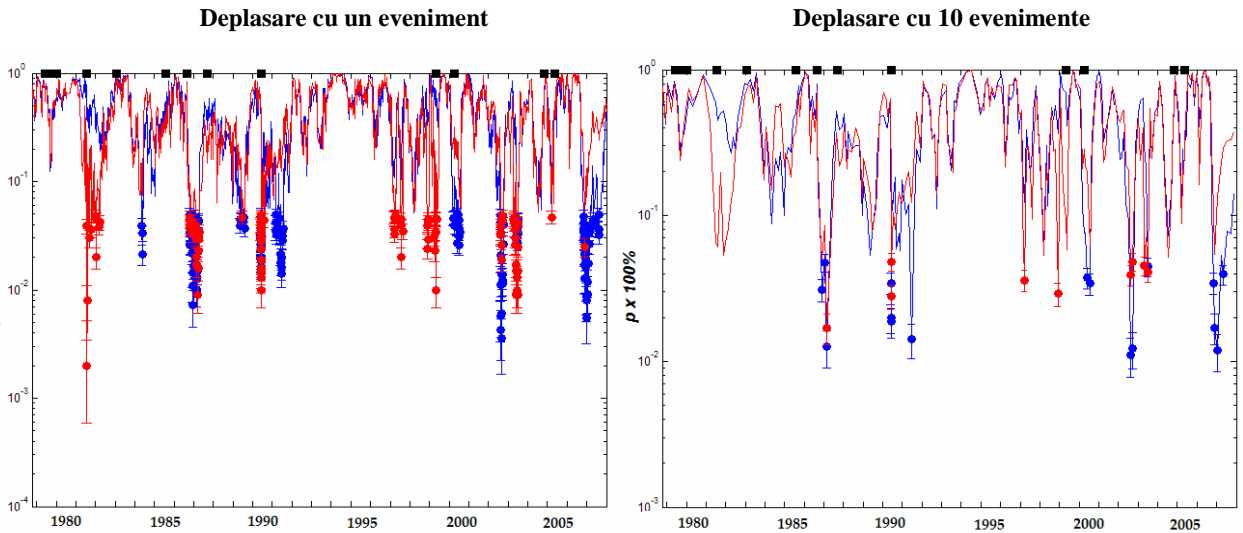


Fig. 4.23. – Valorile coeficientului statistic p pentru testul lui Schuster (în albastru) și pentru testul permutărilor (în roșu), marcate cu cerceuțe și bare de erori pentru $p < 5\%$. Cutremurele de pământ cu magnitudinea $M_w > 5.0$ sunt reprezentate prin pătrate negre. Comparație între rezultatele obținute în (a) cazul ferestrelor mobile definite prin interval fix de timp (365.24 zile și deplasare de 1 zi, respectiv 30 de zile) și (b) cazul ferestrelor mobile cu număr fix de evenimente (100 de evenimente seismice), deplasate cu un număr fix de evenimente (un eveniment, respectiv 10 evenimente).

4.3.3. Activitatea seismică intermediară a zonei Vrancea analizată în ferestre mobile 3D

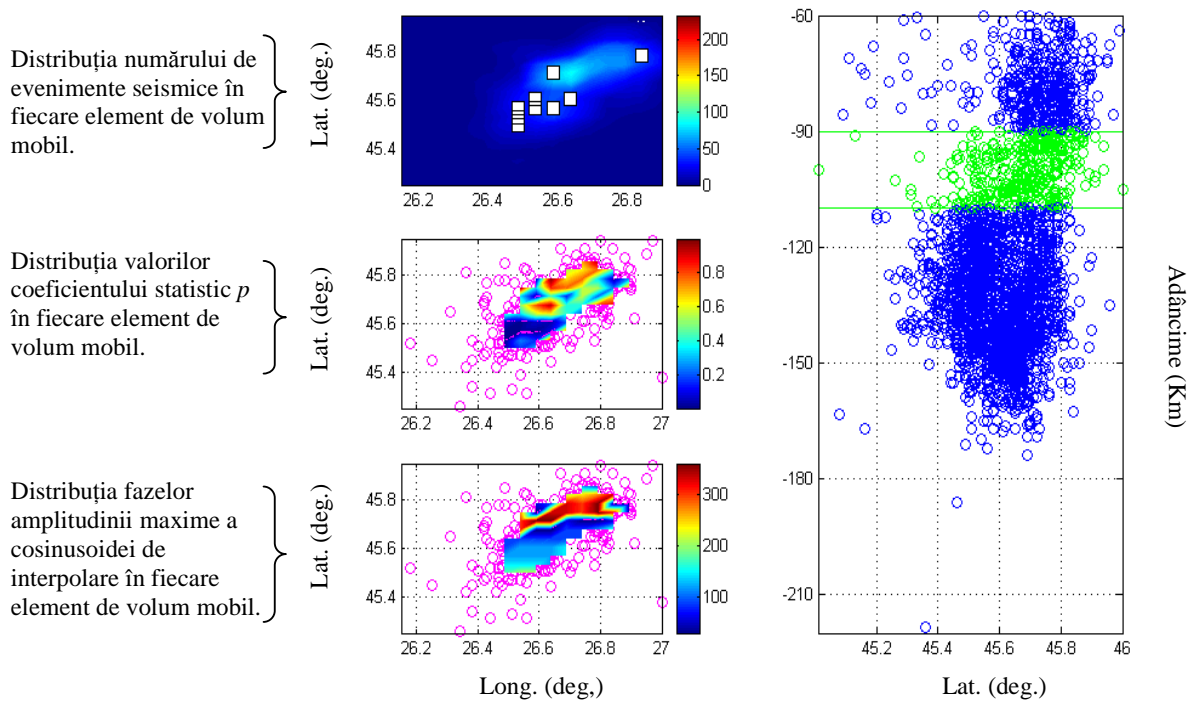
Ideea evaluării distribuției spațiale a coeficientului statistic p a fost inspirată de tomografia seismică. În această teză parametrul cu ajutorul căruia se construiește harta 3D este reprezentat, prin urmare, de coeficientul p care ne oferă posibilitatea detectării reacțiilor locale la diferite periodicități ale componentelor mareelor terestre în domeniul spațial.

Pentru acest demers se calculează coeficientul statistic p pentru activitatea seismică inclusă într-un element de volum mobil, de forma unui paralelipiped (Fig. 4.24). Calculele se efectuează în timp ce este parcursă întreaga suprafață a epicentrelor cutremurelor de pământ

Figura 4.25a prezintă în dreapta imaginea distribuției evenimentelor seismice în fiecare element de volum mobil peste care sunt suprapuse, marcate cu pătrate albe, volumele caracterizate prin $p < 5\%$; dedesubtul acestei imagini se găsește distribuția valorilor p pentru toate elementele de volum mobile în care numărul evenimentelor $N \geq 20$; în ultima imagine din rândul de jos este reprezentată distribuția fazelor ce corespund amplitudinii maxime a cosinusoidei HiCum de interpolare din fiecare element de volum mobil. În dreapta fiecărui grafic, în proiecție pe direcția nord-sud, este reprezentată distribuția tuturor hipocentrelor seismice ale șocurilor principale din zona Vrancea pentru intervalul 1970-2007, cu stratul analizat marcat prin culoarea verde.

S-a realizat o sinteză a tomografiei mareice pentru activitatea seismică intermediară din zona Vrancea (Fig. 4.26), în cazul tuturor componentelor mareelor terestre analizate în această lucrare. Discuțiile pe marginea acestor rezultate se găsesc în capitolul 5 al tezei.

Fig.4.25a – Componenta mareică S2 (90 km – 110 km)



Observații

Am aplicat metoda de stacking HiCum asupra bazei de date seismice fără postșocuri din zona Vrancea (1970-2007) și am descoperit tendințe de modulare ale câtorva componente principale ale mareelor terestre, caracteristice forțelor de atracție ale Lunii și Soarelui, în activitatea seismică intermediară.

Rezultatele testului lui Schuster și al testului permutărilor, validate sistematic prin serii sintetice de evenimente aleatoare, confirmă o corelație semnificativă între activitatea seismică intermediară și componentele mareice S2, M2, K1, O1, MF, MM, SSA și SA, de regulă în apropierea evenimentelor medii și puternice ($M_w \geq 5.0$).

Coeficientul statistic p prezintă o tendință sistematică de scădere în vecinătatea cutremurelor de pământ mai puternice. Rezultate similare au fost obținute de Sachiko Tanaka [2006] pentru regiunea Tokai din Japonia. Noi considerăm coeficientul statistic p un potențial factor precursor seismic.

Metoda Bootstrap, utilizată, de asemenea, pentru prima oară în problema corelației dintre mările terestre și cutremurele de pământ în zona Vrancea, arată variații ale limitelor superioare ale intervalului de încredere pentru amplitudinea cosinusoidei $HiCum$ în fiecare fereastră mobilă, manifestând anumite particularități în proximitatea evenimentelor seismice relativ puternice. Din acest punct de vedere rezultatele referitoare la variația amplitudinilor bootstrap și variația coeficientului p pot fi comparate.

Am introdus noțiunea de tomografie statistică cu ajutorul mările terestre, cu rezultate probante, fără îndoială acestea fiind legate de structura și reologia zonei seismice analizate.

5 DISCUȚII PRIVIND INTEGRAREA ȘI VALORIFICAREA REZULTATELOR

5.1. Un posibil pattern temporal al declanșării cutremurelor de pământ intermediare din zona Vrancea de către mările terestre

Mările terestre sunt candidate importante la funcția de declanșatori seismici așa cum o demonstrează o serie de studii privind corelația dintre mările terestre și cutremurele de pământ. Viteza de variație a stresului produs de unele componente mareice este comparabilă sau chiar superioară uneori vitezei de variație a stresului tectonic, concurând la declanșarea cutremurelor de pământ [TANAKA et al., 2002; STAVINSCHI et SOUCHAI, 2003].

Rezultatele obținute în capitolul 4 conduc către interpretări cu consecințe importante pentru zona seismică Vrancea. Prezentăm în continuare aspecte legate de obiectivele majore stabilite la începutul acestei lucrări.

5.1.1. Coeficientul statistic p , un posibil factor precursor

Am subliniat în analiza noastră tendința de scădere a valorii coeficientului statistic p pentru acele ferestre mobile caracterizate prin prezența cutremurelor de pământ cu magnitudinea $M_w \geq 5$. De asemenea, într-un studiu recent [CADICHEANU et al., 2008] în cazul zonei Vrancea s-a pus în evidență un pattern asemănător și în cazul cutremurelor de pământ cu magnitudinea $M_w \geq 4.5$ (Fig. 5.1), fapt menționat pentru regiunea Tokai din Japonia de către Tanaka et al. [2006].

Pentru acele ferestre în care se constată o amprentă specifică a coeficientului statistic p , curba de variație a limitei superioare a intervalului de încredere obținut prin metoda Bootstrap, se apropie de valoarea amplitudinii co-sinusoidei de referință, adică valoarea amplitudinii cosinusoidei de «fittare» a distribuției inițiale de evenimente seismice din fereastra respectivă (Figurile 4.2 ÷ 4.21).

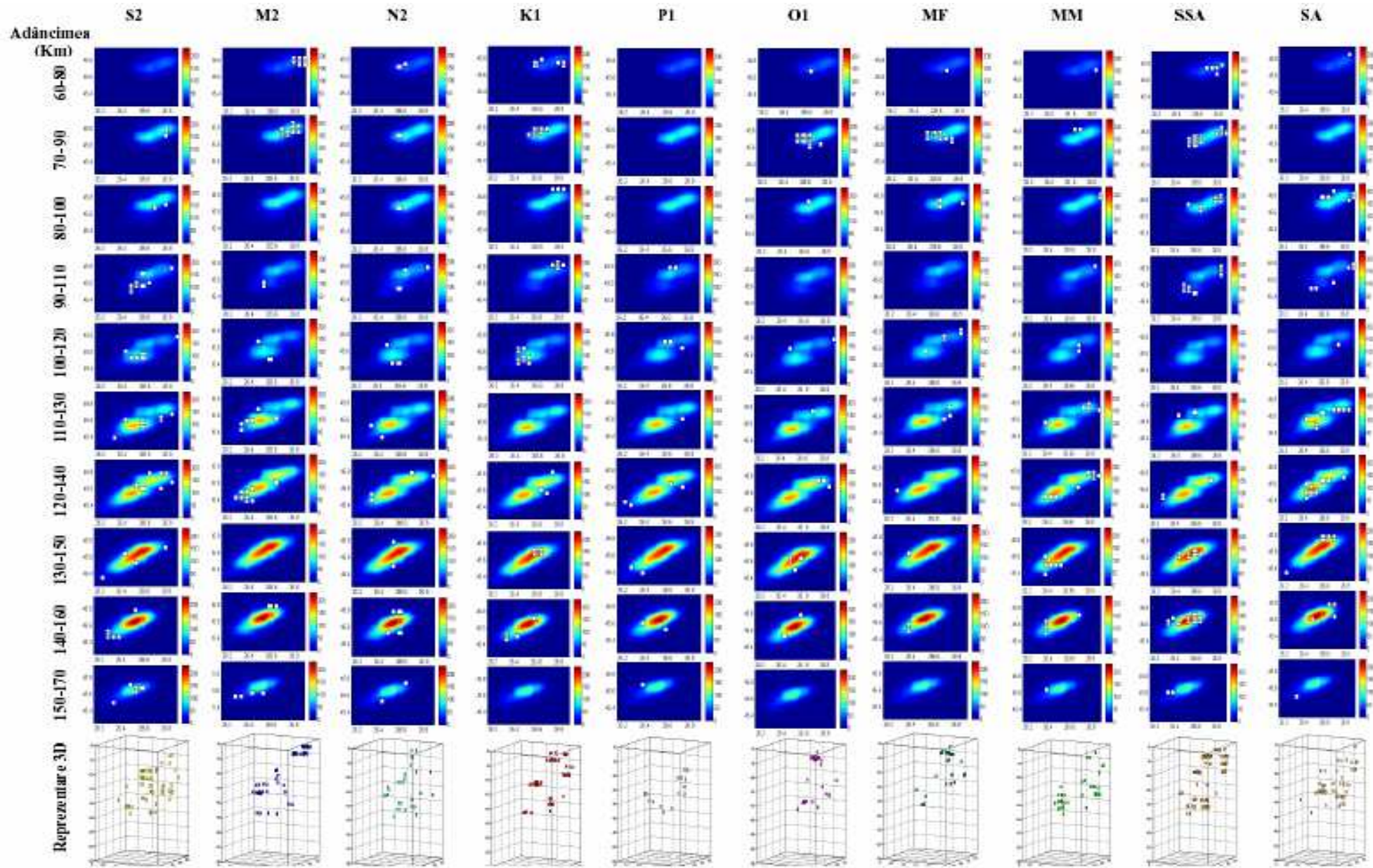


Fig. 4.26 – Topografie statistică a marelui. Distribuția elementelor de rotam caracterizate prin $p < 5\%$, corespunzând fiecărei componente a marelui analizate și fiecărui interval de adâncime. Reprezentare 3D pentru fiecare componentă.

Aceste amprente se păstrează chiar dacă lungimea ferestrei mobile sau a pasului de deplasare a ferestrei se schimbă. Pentru exemplificare am ales următoarele cazuri: ferestre mobile de 300 de zile deplasate cu 50 de zile (Fig. 5.1), ferestre mobile de 365.24 zile deplasate cu o zi (Fig. 5.2) și ferestre mobile de 365.24 zile deplasate cu 30 zile (Fig. 5.3).

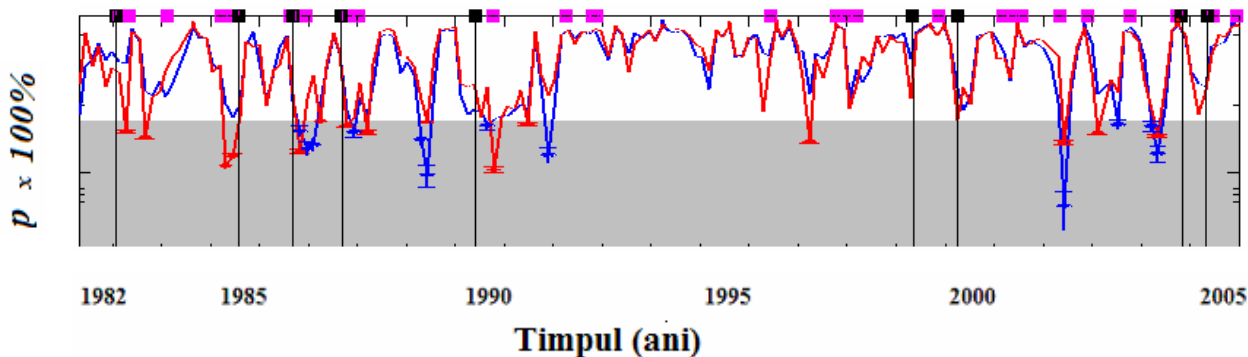


Fig. 5.1 – Componenta M2: variația temporală a coeficientului statistic p pentru testul Schuster (albastru) și pentru testul permutărilor (roșu); valorile $p < 5\%$ sunt marcate cu cercuri și bare de eroare (1982 – 2005, ferestre mobile de 300 zile deplasate cu 50 zile). Cutremurele cu $M_w > 5.0$ sunt reprezentate prin pătrate negre iar cele cu $4.5 \leq M_w < 5.0$ sunt reprezentate prin pătrate mov. Zona valorilor p corespunzătoare corelației este marcată prin culoarea gri.

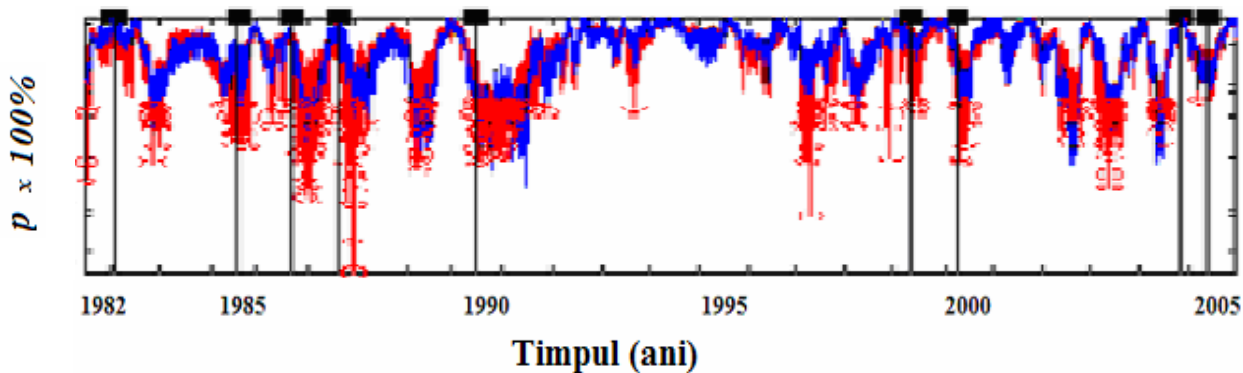


Fig. 5.2 – Componenta M2 : variația temporală a coeficientului statistic p pentru testul Schuster (albastru) și pentru testul permutărilor (roșu); valorile $p < 5\%$ sunt marcate cu cercuri și bare de eroare (1982 – 2005, ferestre mobile de 365.24 zile deplasate cu o zi). Cutremurele cu $M_w > 5.0$ sunt reprezentate prin pătrate negre.

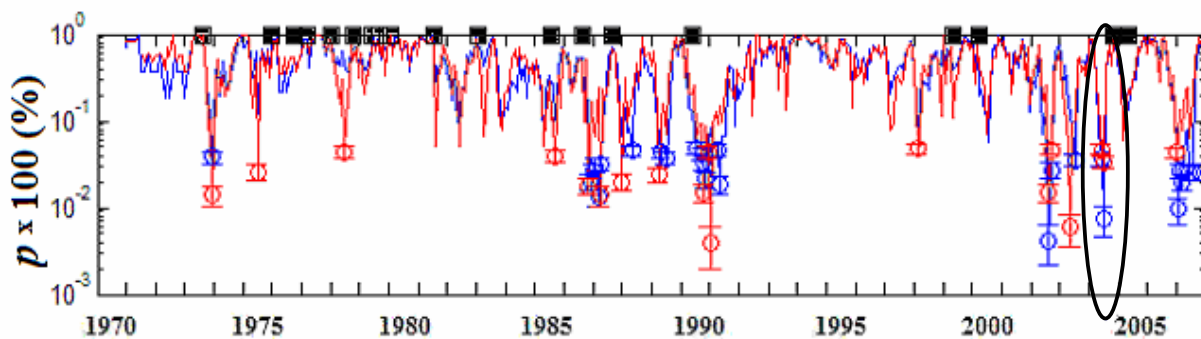


Fig. 5.3 – Componenta M2 : variația temporală a coeficientului statistic p pentru testul Schuster (albastru) și pentru testul permutărilor (roșu); valorile $p < 5\%$ sunt marcate cu cercuri și bare de eroare (1982 – 2005, ferestre mobile de 365.24 zile deplasate cu 30 de zile). Cutremurele cu $M_w > 5.0$ sunt reprezentate prin pătrate negre.

Analiza variației coeficientului statistic p cu rezoluție de un an, în condițiile în care deplasarea ferestrei mobile se face cu un pas de o zi, pune în evidență prezența unor amprente specifice ale variației coeficientului statistic p în apropierea unui cutremur de pământ mediu, intermediar sau puternic.

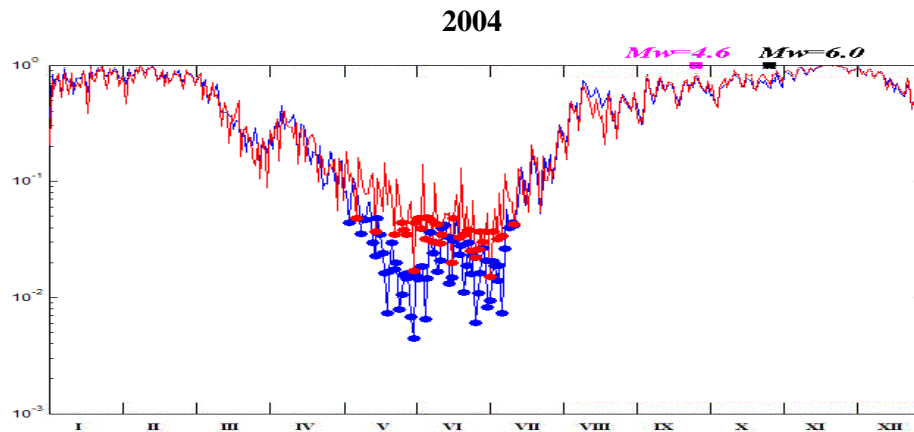


Fig. 5.4. – Detaliu anual din figura 5.3

5.1.2. Sensibilitatea testului permutărilor la tipul de distribuție statistică a evenimentelor seismice

În timpul validării rezultatelor obținute cu ajutorul celor două teste statistice, testul lui Schuster și testul permutărilor, s-a observat sensibilitatea caracteristică a acestuia din urmă la tipul de distribuție asupra căreia este aplicat testul.

Astfel, am construit două tipuri de serii sintetice de evenimente aleatoare, presupunând, într-o primă etapă, distribuția evenimentelor seismice uniforme și, într-o altă etapă, luând în calcul intervalele de timp dintre evenimentele seismice consecutive.

Utilizând pentru fiecare situație analizată perioada componentei mareice $M2$, am comparat numărul ferestrelor mobile în care coeficientul statistic p este mai mic decât 5%, pentru cazul distribuției reale de evenimente seismice, cu numărul ferestrelor mobile cu aceeași caracteristică, dar în cazul a 100 de serii sintetice aleatoare.

Aceste serii aleatoare au fost construite în două moduri diferite: considerând cazul unor distribuții aleatoare uniforme și cazul unor distribuții asemănătoare celei reale, adică s-a reconstruit seria temporală de evenimente prin permutări aleatoare ale intervalelor de timp dintre două evenimente seismice consecutive.

Pentru fiecare serie temporală de evenimente, reală sau sintetică aleatoare, au fost utilizate ferestre mobile de dimensiuni diferite (100, 150, 200, 250, 300, 350, 400, 450, 500 și 1000 de zile), deplasate, de fiecare dată, cu 30 de zile.

Subliniem că spre deosebire de testul lui Schuster, testul permutărilor este sensibil la tipul de distribuție asupra căreia se aplică .

5.2. Conceptul de tomografie statistică cu ajutorul mareelor terestre

Tomografia seismică se construiește, în principal, prin inversiunea undelor seismice care traversează Pământul [FAN et al., 1998]. Este modalitatea cea mai eficientă de a obține informații geofizice despre interiorul Pământului. Doar cutremurele de pământ sunt capabile în prezent să genereze o cantitate suficientă de energie care să poată ajunge la suprafață fără a fi complet atenuată, chiar dacă provine de la o sursă adâncă sau foarte adâncă [POPA et al., 2005; IVAN, 2006]. Printre celelalte surse a căror energie se înregistrează la suprafață, desigur nu complet atenuată, mai există magnetismul, energia termică (conectivă sau convectivă), curenții electrici. Dar intensitățile la suprafață a acestor surse au valori diferite și, în general, mult mai mici comparativ cu intensitatea seismică. Și scările de timp la care se manifestă sunt diferite. Spre exemplu, disiparea energiei termice este extrem de lentă în comparație cu cea a energiei seismice sau electromagnetice.

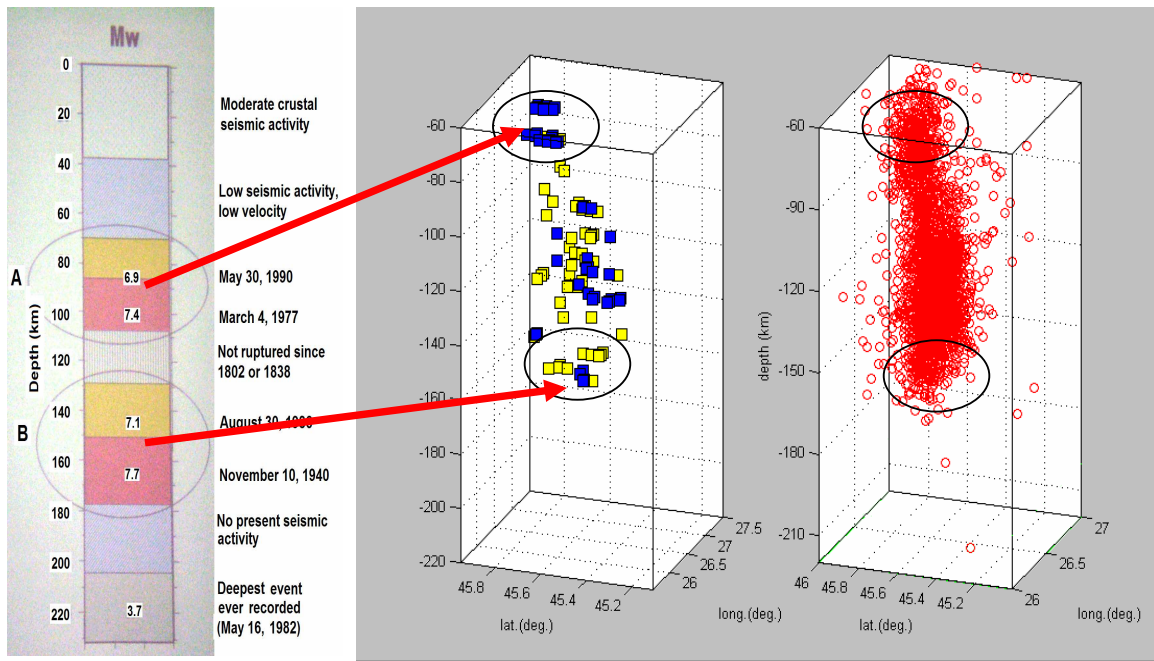
Tomografia statistică cu ajutorul mareelor terestre, având o altă semnificație decât tomografia deformărilor mareice introdusă de Wang în 1991 [WANG, 1991], se bazează pe distribuția 3D a coeficientului statistic p în zona în care se presupune interacțiunea dintre o componentă periodică a mareelor terestre și cutremurele de pământ. Ea permite studiul efectelor spațio-temporale ale mareelor terestre aducând informații asupra structurii zonelor seismice și asupra distribuției stresului în zonă.

Rezultatele prezentate în capitolul 4 arată importanța studiului corelației dintre diferitele componente ale mareelor terestre și activitatea seismică intermediară din zona Vrancea privind cuplajul preferențial dintre anumite unde mareice și activitatea seismică la diferite adâncimi ale hipocentrelor.

5.2.1. Tomografia mareică statistică: comparație între rezultatele obținute prin tomografie seismică, tomografie magnetotelurică și analiza patternului de seismicitate

Rezultatele obținute în urma tomografiei statistice cu ajutorul mareelor terestre, procedură pe care o vom numi în continuare tomografie mareică statistică [CADICHEANU et al., 2007, 2008], sunt confirmate, cel puțin parțial, de comparația cu rezultatele obținute prin analiza patternului de seismicitate (Fig. 5.7, Fig. 5.8d) [ROGOZ et al., 2006, RADULIAN et al., 2007], tomografie seismică (Fig. 5.8a), [FAN et al., 1998 ; ENESCU, 2003 ; MARTIN et al., 2001 , 2005, 2006], tomografie magnetotelurică [STANICA et al., 2004] (Fig. 5.8b), distribuția stresului bazată pe tomografie seismică (Fig. 5.8c) [ISMAIL-ZADEH, 2003], etc.

Sunt puse în evidență două zone distincte ale activității seismice intermediare între 70-100 km și 130-180 km (Fig. 5.7).



Radulian et al., 2007

Fig. 5.7. – Comparație între rezultatele obținute prin analiza patternului de seismicitate în zona Vrancea, în stânga imaginii (după Radulian et al., 2007) și rezultatele obținute prin tomografie statistică cu ajutorul componentei marelui semidiurne lunare, M2 (pătrate albastre), și componentei marelui semidiurne solare S2 (pătrate galbene), în dreapta imaginii. Pătratele colorate corespunzător componentei marelui utilizate reprezintă elementele de volum în care este prezentă corelația ($p < 5\%$). Cele două zone cu activitate seismică mai intensă aparținând slab-ului seismic sunt regăsite prin tomografie statistică cu ajutorul celor două componente marelui.

Tomografia mareică statistică pune în discuție chiar patru intervale sensibile la unele perioade particulare ale mareelor terestre (Fig. 5.9 și Fig. 5.10): 70-90 km (SSA, O1, M2, MF, K1), 90-120 km (S2, SSA, K1, SA, MF), 120-140 km (SA, M2, MM, S2) și 140-170 km (SSA, S2, K1, MM).

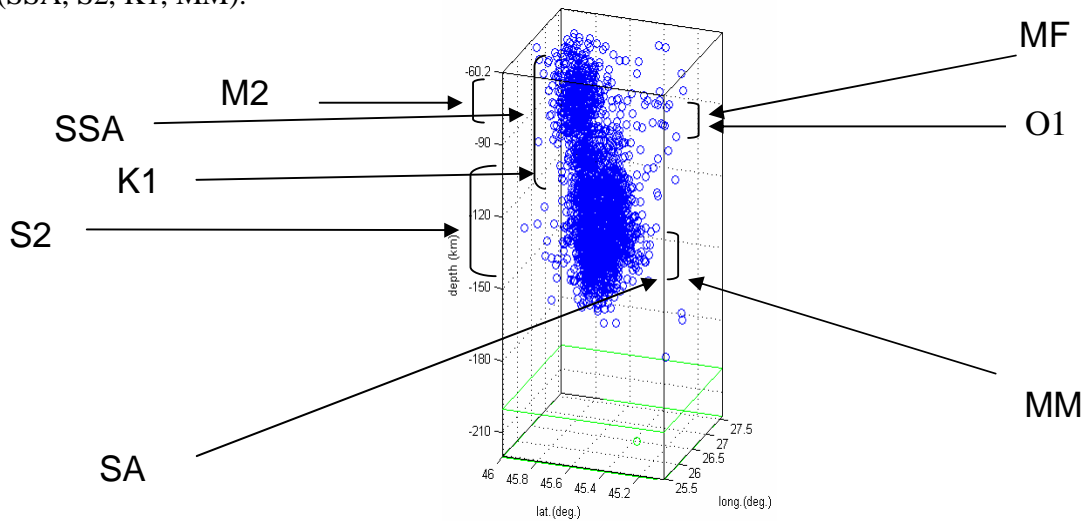


Fig. 5.9. – Zone preferențiale de corelație între principalele componente ale mareelor terestre și activitatea seismică intermediară din zona Vrancea. Rezultatele sunt obținute prin tomografie mareică statistică.

Partea superioară a slab-ului seismic este dominată de undele lunare semidiurnă (M2), diurnă (O1) și declinațională (MF), precum și de unda solară declinațională (SSA); partea inferioară a slab-ului seismic este dominată de undele solare eliptică (SA) și semidiurnă (S2), precum și de unda lunară eliptică (MM).

Aceste observații sunt foarte importante pentru integrarea rezultatelor obținute până acum în modelele geodinamice privind zona seismică Vrancea.

5.2.2. Aspecte ale fenomenului de atenuare a undelor seismice în zona seismică Vrancea confirmate prin tomografie mareică statistică

Un alt aspect important al tomografiei mareice statistice este legat de fenomenul de atenuare a undelor seismice [MOLNAR and OLIVER, 1969] privind prin comparație acest fenomen în forelandul și în arcul interior al munților Carpați [POPA et al., 2005; SUDHAUS and RITTER, 2005; RADULIAN et al., 2006; IVAN, 2003a, 2003b, 2006; WEIDLE et al., 2007]. Fenomenul de atenuare a undelor seismice a fost pus în evidență prin analize sistematice ale seismogramelor mai multor cutremure de pământ înregistrate la nivelul mai multor stații de pe teritoriul României dar și stații dinafara acestuia. Fenomenul se manifestă printr-o scădere accentuată a amplitudinii undelor seismice către bazinul Transilvaniei față de platforma forelandului carpatic. Rezultatele experimentului tomografic CALIXTO'99 au fost extrem de relevante pentru un asemenea studiu.

Explicația fenomenului de atenuare este oferită de structura laterală a mantalei superioare la nord-vest de zona seismică Vrancea. Aceasta reprezintă un aspect foarte important atunci când este vorba de mișcări periodice datorate mareelor terestre produse într-un câmp cu o structură puternic eterogenă. Eterogeneitățile amplifică efectul mareelor terestre prin creșterea valorii gradientului forțelor de deformare. Prezența unui volum cu proprietăți distincte în vecinătatea slab-ului seismic ar putea juca un rol esențial în distribuția stresului tectonic și declanșarea cutremurelor de pământ.

Tomografia seismică confirmă prezența unui volum cu asemenea proprietăți în partea dinspre nord-vest a zonei Vrancea, corespunzând sud-estului bazinului Transilvaniei. În același timp, tomografia cu ajutorul mareelor terestre confirmă influența perioadelor lungi (exemplu: undele declinaționale ale Lunii) și de foarte lungă perioadă (exemplu: undele declinaționale și eliptice solare) în declanșarea cutremurelor intermediare din zona Vrancea. (Fig. 5.10).

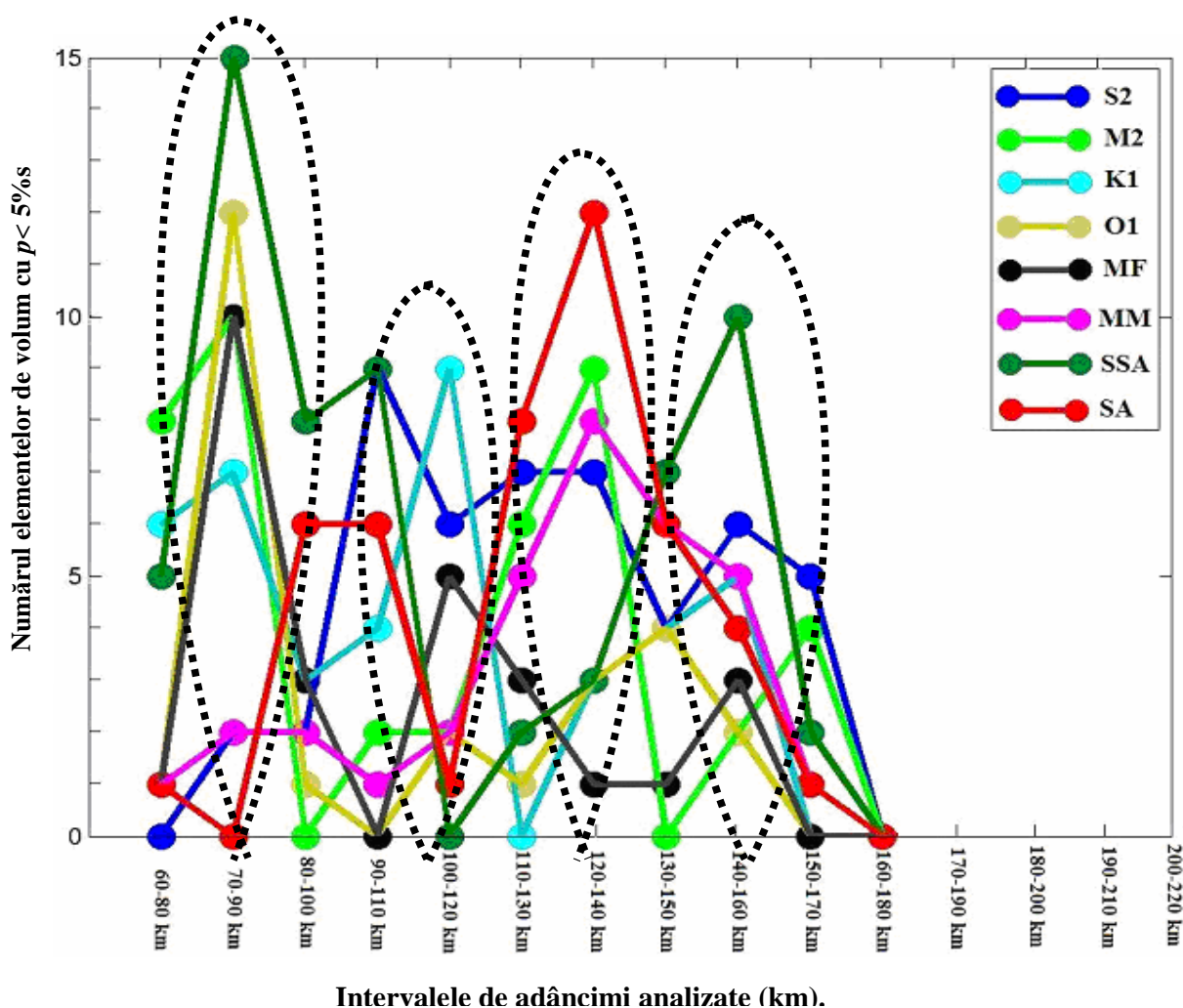


Fig. 5.10 - Distribuția elementelor de volum caracterizate printr-un coeficient statistic $p < 5\%$ pentru diferite componente ale mareelor terestre la diferite adâncimi. Zonele particulare au fost marcate prin linii curbe întrerupte.

5.3. Integrearea și valorificarea rezultatelor

5.3.1. Caracterizarea unei zone seismice prin tendințele de modulare mareică

Metodologia utilizată în lucrarea noastră permite observarea tendințelor de modulare în activitatea seismică intermediară din zona Vrancea din partea componentelor care caracterizează principalele grupe ale mareelor terestre. Aceste tendințe sunt specifice unor etape diferite în evoluția zonei seismice amintite (Fig. 5.2).

Dimensiunii temporale pentru analiza corelației marea-cutremure în ferestre mobile, i-am adăugat pe cea a analizei în ferestre mobile 3D, ceea ce ne-a permis introducerea

conceptului de tomografie statistică cu ajutorul mările terestre, deschizând o etapă nouă în istoria corelației dintre mările terestre și cutremurele de pământ.

5.3.2. Răspunsul caracteristic integrat într-un model specific pentru zona seismică analizată

În figura 5.6. se încearcă schițarea unui model care să țină seama de cuplajele puse în evidență prin metoda descrisă în capitolul 3, dintre undele declinaționale și cele eliptice ale mările terestre, pe de o parte, și activitatea seismică intermediară, pe de altă parte, prin prisma torsiunii slab-ului din zona Vrancea.

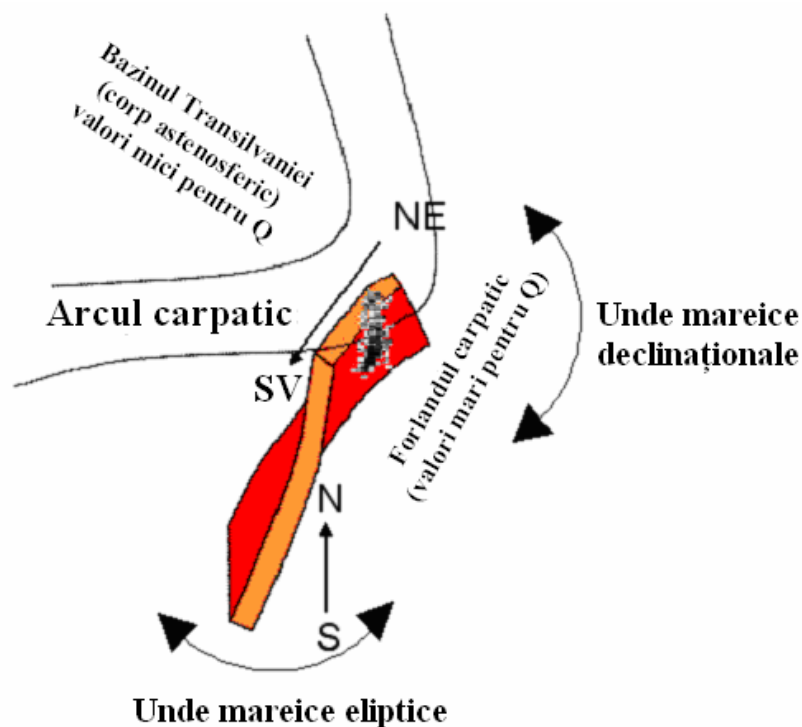


Fig. 5.11 – Poziția slab-ului aflat în torsiune [Stănică et al., 2004, Martin et al., 2006] cel mai probabil urmare a triplei joncțiuni a celor trei plăci continentale [Beșușiu, 2002] cu grosimi litosferice diferite în jurul lui, și în contact cu volume caracterizate prin reologii diferite. Toate aceste elemente ar putea explica dominanta undelor mareice declinaționale în partea superioară a slab-ului seismic și influența undelor mareice eliptice în partea inferioară a acestuia, la adâncimi mai mari.

Se presupune că direcția inițială nord-sud a subducției fragmentului litosferic s-a păstrat în adâncime, rezultat stabilit prin tomografie seismică [MARTIN, 2001, 2006] și tomografie magnetotelurică [STĂNICĂ et al., 2004]. Mișcările tectonice ulterioare au antrenat partea superioară a slab-ului într-o mișcare de torsiune, remarcabilă prin mecanismele specifice de acumulare și eliberare a stresului pe care le implică.

În condițiile unei orientări nord-sud a slab-ului în adâncime, la aproximativ 380 km, poziționat astfel în manta și înconjurat de curenți de convecție, acțiunea undelor eliptice ale mările terestre, caracterizată printr-un gradient eficient al forțelor într-un plan perpendicular pe direcția nord-sud a slab-ului, datorită mișcării Pământului pe orbită sau a mișcării Lunii în

jurul Pământului (este vorba de undele eliptice solare SA și undele eliptice lunare, MM), poate fi ușor acceptată.

În plus, partea superioară a slab-ului, cu un comportament rigid fie din cauza legăturii pe care o mai păstrează cu litosfera, fie din cauza coliziunii celor trei plăci cu rol important în tripla joncțiune instabilă, este sensibilă la componentele declinaționale ale marelor terestre (unda solară declinațională SSA și unda lunară declinațională MF). Acțiunea acestor unde este amplificată de diferențele reologice la nivelul părții superioare a mantalei și puse în evidență prin tomografie seismică și de analizele privind atenuarea undelor seismice în zona Vrancea. De asemenea, nu trebuie neglijate posibilele influențe ale undelor declinaționale și ale principalelor unde solare și lunare diurne și semidiurne asupra vitezei curenților de convecție aflați în gradientul de forțe al acestor componente mareice. Aceasta ar constitui o altă explicație a prezenței influenței lor la adâncimi mari.

Desigur acest model de interacțiune este perfectibil și trebuie să fie completat cu multe alte aspecte privind tranzițiile de fază [ȘECLĂMAN, 1978; BERNARD, 1999; BERNARD, 2001], variația rezistivității [VAROTSOS et al., 1981; BERNARD, 1997], cutremure declanșatoare [LOCKNER and BEELER, 1999; DEBORAH et al., 2007] circulația fluidelor [MARINE, 1975; LI and XU, 1999; BRODSKY et al., 2003; BOUROUIS and BERNARD, 2007], aspectele neliniare și complexe ale fenomenelor geofizice, etc. Nu trebuie însă uitat aportul marelor terestre, aport constant și la scară mare când ne raportăm la dimensiunile Pământului, scară la care numai răspunsul inerțial al unor fenomene generate de mările terestre ar putea concura cu amplitudinea altor fenomene geofizice cunoscute.

Studiile privind activitatea vulcanică pot aduce, de asemenea, informații complementare asupra corelației dintre mările terestre și cutremurele de pământ și reprezintă o direcție de cercetare promițătoare și în acest sens [LINDE and SACKS, 1998; HILL et al., 2002].

5.3.3. Tomografia mareică statistică cu ajutorul undelor M2 și S2 în zone cu activitate seismică intermediară intracontinentală: Vrancea, Bucaramanga și Hindu-Kush

Am încercat să lărgim domeniul aplicațiilor metodei noastre asupra altor zone cu seismicitate intermediară asemănătoare zonei Vrancea pentru a compara rezultatele obținute și a delimita specificitatea zonei seismice Vrancea în acest context. În lume mai sunt cunoscute două zone similare Vrancei prin dimensiunile și geometria de cuib (nest) a distribuției hipocentrelor [ZARIFI and HAVSKOV, 2003]: Hindu Kush (Afghanistan) și Bucaramanga (Columbia). Dar contextul tectonic al acestor două zone seismice este complet diferit de cel al zonei Vrancea [BEȘUȚIU and CADICHEANU, 2003].

Componentele mareice utilizate sunt unda lunară semidiurnă $M2$ și unda solară semidiurnă $S2$ deoarece aceste două componente sunt cele mai reprezentative în spectrul marelor terestre.

Tendințe de modulară a activității seismice intermediare sunt, de asemenea, prezente în zonele Bucaramanga și Hindu Kush (Fig. 5.14). Distribuția zonelor de cuplaj dintre componentele semidiurne $M2$ și $S2$, și activitatea seismică intermediară pentru fiecare caz în

parte este diferită în aceste regiuni seismice de cea din Vrancea, posibil datorită particularităților impuse de structura și mai ales tectonica specifică fiecărei regiuni în parte. [CADICHEANU et al., 2008].

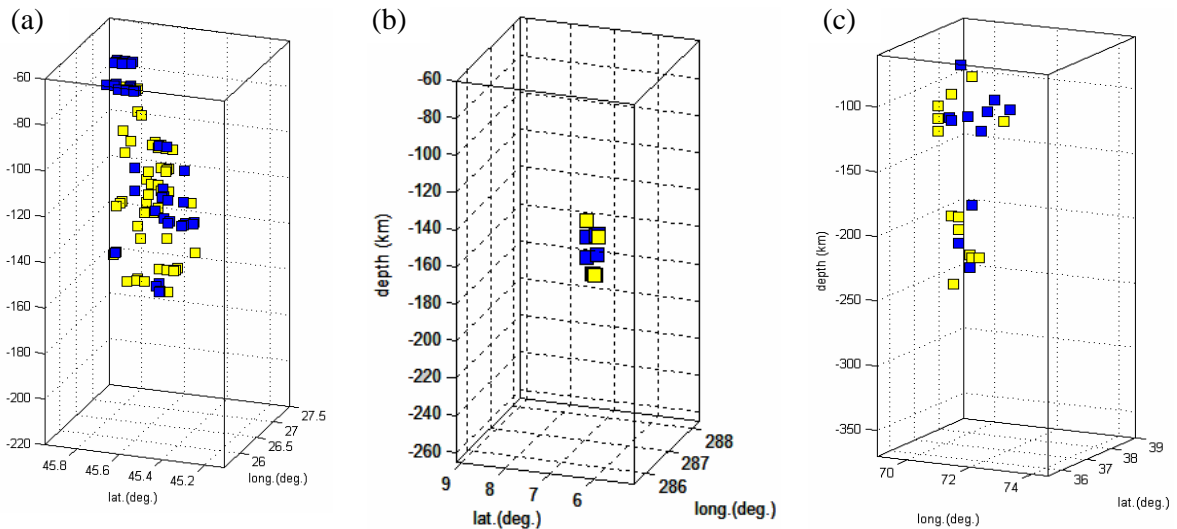


Fig. 5.14 – Distribuția elementelor de volum cu valori ale coeficientului statistic $p < 5\%$ pentru undele mareice semidiurne $M2$ lunare și $S2$ solare în Vrancea (a), Bucaramanga (b) și Hindu Kush (c).

Aceste rezultate confirmă încă o dată posibilitățile de caracterizare a unei zone seismice prin tendințele de modulare induse în activitatea seismică a zonei respective de către diferitele componente ale mareelor terestre, tendințe ce pot fi observate cu o metodologie proprie acestui gen de investigație.

CONCLUZII ȘI PERSPECTIVE

Scopul tezei a fost de a pune în evidență interacțiunile dintre mareele terestre și cutremurele de pământ pentru o zonă particulară cu activitate seismică intermediară, zona seismică Vrancea – România.

Pentru aceasta ne-am propus și realizat două obiective :

- Obținerea caracteristicilor de răspuns ale zonei Vrancea, zonă cu activitate seismică intermediară, supusă acțiunii mai multor componente ale mareelor terestre. Luând în calcul doar implicarea anumitor periodicități în declanșarea evenimentelor seismice, am analizat cuplajele posibile dintre mareele terestre și cutremurele de pământ.
- Integrarea rezultatelor obținute în modelele geodinamice acceptate în prezent pentru zona seismică Vrancea.

Realizarea acestor obiective a fost posibilă, în principal, datorită unei metodologii proprii scopului propus, caracterizată prin următoarele etape principale:

- metoda de analiză spectrală prin stacking numită HiCum (Histogram Cumulating);

- testul statistic Schuster, testul permutărilor și metoda Bootstrap pentru evaluarea coeficientului statistic p , respectiv a intervalului de încredere pentru amplitudinea cosinusoidei de interpolare calculată cu ajutorul distribuției HiCum;
- validarea rezultatelor prin serii sintetice de evenimente seismice aleatoare;
- utilizarea ferestrelor mobile de timp și 3D;
- introducerea și valorificarea pentru prima dată în problematica corelației dintre marea și cutremurele de pământ, a conceptului de tomografie mareică statistică ;

Câteva rezultate importante:

- ✓ S-au obținut distribuții ale evenimentelor seismice intermediare pentru **zona Vrancea**, aplicând pentru prima dată, pentru această zonă, **metoda de stacking HiCum**. Interpolarea de fiecare dată a distribuției astfel calculată, cu ajutorul unei cosinusoide prin metoda celor mai mici pătrate, a condus la obținerea a doi parametri importanți pentru analiza noastră, amplitudinea și faza inițială;
- ✓ Rezultatele corespund la zece perioade caracteristice grupelor principale de unde mareice : undele semidiurne **S2, M2, N2**; undele diurne **K1, P1, O1** și undele de lungă perioadă **MF, MM, SSA, SA**;
- ✓ S-au analizat tendințele de modulare a activității seismice intermediare de către undele menționate cu ajutorul coeficientului statistic p , calculat în **ferestre mobile temporale** (lărgime de un an și pas de deplasare de 30 de zile sau o zi pentru analize de detaliu) și în **ferestre mobile 3D**. Au fost utilizate în paralel, pentru calculul coeficientului p , testul lui Schuster și **testul permutărilor**, folosit pentru prima dată în acest tip de analize. S-a confirmat sensibilitatea acestui din urmă test la tipul de distribuție a evenimentelor;
- ✓ Analizele în ferestre mobile temporale arată prezența influențelor gravimetrice induse de mările terestre în activitatea seismică intermediară prin caracteristici specifice ale variației coeficientului statistic p în apropierea unui cutremur de pământ mediu, intermediar sau puternic. Aceste caracteristici particulare au fost confirmate atât în ferestre mobile definite prin intervale de timp bine precizate, deplasate cu intervale de timp constante, cât și prin utilizarea unor ferestre cu număr fix de evenimente seismice, ferestre deplasate cu un număr constant de evenimente. Ultimul caz implică o variație continuă a dimensiunii temporale a ferestrei și a pasului cu care este deplasată fereastra în care se calculează coeficientul statistic p . Rezultatele obținute ne permit să considerăm coeficientul p **un posibil factor precursor** pentru cutremurele vrâncene moderate și puternice sau un factor ce ar putea semnala un stadiu critic al zonei seismice analizate;
- ✓ **Metoda Bootstrap**, utilizată de asemenea pentru prima dată în problema corelației marea-cutremure în zona Vrancea, indică variații ale limitei superioare și inferioare ale **intervalului de încredere** pentru amplitudinea cosinusoidei HiCum în fiecare fereastră mobilă, cu particularități în vecinătatea evenimentelor puternice;
- ✓ Analiza în **ferestre mobile 3D** ne-a permis introducerea conceptului de “**tomografie statistică a unei zone seismice cu ajutorul mării terestre**”. Rezultatele obținute

prin tomografie mareică statistică prezintă, asemenea altor tipuri de tomografii, o hartă cu informații complementare acestora din urmă;

- ✓ Pentru validarea tuturor rezultatelor obținute în ferestre mobile pentru care coeficientul statistic $p < 5\%$, am utilizat **seriile sintetice de evenimente seismice aleatoare**;
- ✓ Pentru zona seismică Vrancea, **modelul geodinamic al slab-ului aflat în torsiune**, obținut prin tomografie seismică, tomografie magnetotelurică și analiza patternului de seismicitate, pe de o parte, precum și existența unei regiuni cu un coeficient de atenuare seismică mai mare în partea de NV a slab-ului seismic, pe de altă parte, sunt confirmate prin tomografia mareică statistică efectuată cu ajutorul undelor declinaționale și eliptice ale mareelor terestre.

Concluzii bazate pe rezultatele obținute

- Au fost puse în evidență intervale de timp și spațiu (localizări în interiorul slab-ului seismic cu ajutorul **tomografiei mareice statistice**) în care **activitatea seismică intermediară din zona Vrancea este modulată de către principalele componente ale mareelor terestre. Rezultatele**, validate prin trei teste statistice relativ diferite din punct de vedere al algoritmului matematic și prin serii sintetice de evenimente aleatoare, **confirmă ipoteza prezenței influențelor gravimetrice induse de mareele terestre în activitatea seismică intermediară din zona Vrancea**;
- Aceste influențe gravimetrice, traduse prin modularea activității seismice de către mareele terestre, nu sunt continui în timp și prezintă caracteristici diferite, descrise cu ajutorul variațiilor **coeficientului statistic p** ;
- Coeficientul statistic p , principalul cuantificator al tendințelor de cuplaj și al cuplajului propriu-zis dintre activitatea seismică și mareele terestre, are caracteristicile unui **posibil factor precursor sau indicator** al schimbării proprietăților zonei seismice în anumite condiții care se cer aprofundate. Avem în vedere aici și răspunsul structurilor diferite din punct de vedere vâsco-elastic;
- Componentele mareice semidiurne **$M2$** și **$S2$** prezintă un interes aparte față de celelalte componente mareice ca urmare a vitezei mari de variație a stresului produs de acestea în comparație cu celelalte componente analizate (viteză de 10 până la 100 de ori mai mare în punctul de inflexiune).

Contribuții originale ale autorului tezei

- ★ Implementarea soft și de principiu a metodei HiCum în analiza corelației dintre mareele terestre și activitatea seismică intermediară pentru zona Vrancea;
- ★ Introducerea cu bune rezultate a testului permutărilor pentru calculul coeficientului statistic p , alături de testul lui Schuster, un test deja consacrat pentru analiza corelațiilor maree-cutremure;
- ★ Introducerea metodei Bootstrap în analiza corelației dintre mareele terestre și activitatea seismică intermediară în zona Vrancea prin calculul intervalului de încredere al amplitudinii cosinusoidei de interpolare HiCum;

- ★ Graficele 3D și 2D ale amplitudinilor cosinusoidelor de interpolare în ferestre mobile pentru principalele unde mareice: S2, M2, N2, K1, P1, O1, MF, MM, SSA et SA;
- ★ Analiza în grafice de detaliu a evoluției temporale a coeficientului statistic p pentru unda semidiurnă M2 a Lunii și considerarea coeficientului statistic p ca un posibil factor precursor;
- ★ Introducerea conceptului de tomografie mareică statistică. Tomografia cu ajutorul componentelor mării terestre menționate mai sus, trasează o hartă comparabilă cu o hartă obținută prin tehnica tomografiei dar cu un conținut propriu instrumentului utilizat. Acest gen de tomografie prezintă cuplajele diferitelor componente mareice cu mediul pentru diferite adâncimi și necesită o interpretare în funcție de structura și reologia acestui mediu;
- ★ Elaborarea unui model integrator al rezultatelor tomografiei mareice statistice. S-a propus o schemă de cuplaj dintre undele declinaționale, pe de o parte, și cele eliptice, pe de altă parte, cu slab-ul seismic, modelul ținând cont de prezența triplei joncțiuni între cele trei plăci continentale (corespunzând tectonicii actuale din zona Vrancea), de diferențele reologice la nivelul părții superioare a mantalei (puse în evidență prin tomografia seismică și atenuarea undelor seismice la nord-vest de slab-ul seismic) și de acțiunea curenților de convecție din astenosferă.

Perspectivă legate de extinderea metodei și monitorizare a activității seismice

Demersul nostru în această lucrare deschide posibilitatea unor noi aplicații importante în domeniul geofizicii. Intenția noastră este de a dezvolta în continuare metodologia descrisă în această teză și a o extinde în următoarele direcții de cercetare:

- Aplicații ale metodologiei prezentate în acest studiu în alte zone caracterizate prin activitate seismică intermediară intracontinentală și volum confinat al seismicității (s-a început acest lucru pentru zonele Bucaramanga și Hindu Kush);
- Analiza posibilei legături dintre variația coeficientului statistic p și parametri seismici (latitudine, longitudine, adâncime și magnitudine);
- Analiza posibilei legături dintre amprentele specifice ale variației coeficientului statistic p și mecanismul în focar al fiecărui eveniment seismic;
- Aprofundarea problemei legate de coeficientul p ca factor precursor;
- Aprofundarea problemei legate de mecanismul de cuplaj dintre diferitele componente mareice și activitatea seismică;
- Aplicații pentru activitatea seismică a crustei;
- Aplicații în zone cu subducție activă;
- Studiul zonelor cu seismicitate indusă de activitatea vulcanică;
- Extinderea subiectului în domeniul monitorizării seismice a unei zone active.

Tema corelației dintre mările terestre și cutremurele de pământ este departe de a fi epuizată, dovadă fiind numeroasele perspective care așteaptă a fi prospectate și dezvoltate atât din punct de vedere metodologic cât și al aplicațiilor propriu-zise. Seismicitatea intermediară

a zonei Vrancea reprezintă doar unul dintre multele studii de caz ce ar putea fi întreprinse luând în discuție influența gravimetrică indusă de mareele terestre.

Softuri si programe utilitare utilizate

μGRAPH v1.9 release 3: Micro Graphic Data Analyser *Institut de Physique du Globe de Paris - Observatoire Royal de Belgique, F. Beauducel, IPGP, ORB, 1995–2004.*

ETERNA v.3.4.: software package enables the pre-processing and analysis of Earth tide observations and the prediction of Earth tide signals, *Hartmann and Wenzel, 1995a,b.*

TSOFT, vers. 2.1.2.: A software package for the analysis of Time Series and Earth Tides, *ORB, 2007*

MATLAB v6.5.1 : High-Performance Numeric Computation and Visualisation Software, *The Math Works Inc., 1984–2003.*

MICROSOFT@Word 2002, *Microsoft Corporation, 1983–2001.*

MICROSOFT@PowerPoint 2002, *Microsoft Corporation, 1983–2001.*

Bibliografie selectivă

ARDELEANU LUMINITA, Statistical Models of the Seismicity of the Vrancea Region, Romania, *Natural Hazards* **19**: 151–164, 1999.

BERNARD, P., From the search of ‘precursors’ to the research on ‘crustal transients’, *Tectonophysics*, **338**, 225–232, 2001.

BEȘUȚIU, L. and CADICHEANU, N.: Considerations on the space-time migration of the Vrancea intermediate-depth seismicity. *Geodynamic studies in Romania-Vrancea zone*, Monograph compiled in the frame of the Project CERGOP-2/Environment, Reports on Geodesy, No. 6 (81), 2006.

CADICHEANU, N., VAN RUYMBEKE, M., ZUGRĂVESCU, D., EVERAERTS, M. and HOWARD, R.: Periodical tendencies in Vrancea seismic activity detected by the Hi-Cum stacking method, *Rev. Roum. Geophysique*, **50**, 31–57, 2006.

CADICHEANU, N., VAN RUYMBEKE, M., and ZHU, P.: Tidal triggering evidence of intermediate depth earthquakes in the Vrancea zone (Romania), *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, **7**, 733-740, 2007.

CADICHEANU, N. ZHU, P. and VAN RUYMBEKE, M.: Spatial and temporal variations of the correlation coefficient between M2 and S2 earth tides components and earthquake occurrence for the intermediate-depth seismic activity zones, *Acta Geodaetica et Geophysica Hungarica*, vol. 43, 2, Special issues, 2008 (in press).

CHALOT-PRAT, F. and GIRBACEA, R., Partial delamination of continental mantle lithosphere, uplift-related crust–mantle decoupling, volcanism and basin formation: a new model for the Pliocene –Quaternary evolution of the southeastern East Carpathians, Romania. *Tectonophysics*, **327**, 83–107, 2000.

CLOETINGH, S.A.P.L., BUROV, E., MATENCO, L., TOUSSAINT, G., BERTOTTI, G., ANDRIESEN, P.A.M., Wortel, M.J.R., Spakman, W., Thermo-mechanical controls on the

mode of continental collision in the SE Carpathians (Romania). *Earth Planet. Sci. Lett.*, 57–76, 2004.

CONSTANTINESCU, L. and ENESCU, D., *Cutremurele din Vrancea în cadru științific și tehnologic*, Edit. Academiei, București, 1985.

DEMETRESCU, C., ANDREESCU, M., On the thermal regime of some tectonic units in a continental collision environment in Romania. *Tectonophysics* 230, 265–271, 1994.

EFRON, B., TIBSHIRANI, R.J., *An introduction to the Bootstrap*. Chapman and Hall/CRC, Boca Raton. 436 pp., 1998.

ENESCU, D. and ENESCU, B., A new model regarding the subduction process in the Vrancea zone, *Rom. J. Physics* 38, 321–328, 1993.

FAN, G., WALLACE, T.C. and ZHAO, D., Tomographic imaging of deep velocity structure beneath the Eastern and Southern Carpathians, Romania: implications for continental collision, *J. Geophys. Res.* 1023, 2705–2723. 1998.

FISHER, R. A.: *The Design of Experiment*, New York: Hafner, 1935.

GIRBACEA, R., FRISCH, W., Slab in the wrong place: lower lithospheric mantle delamination in the last stage of the Eastern Carpathians subduction retreat. *Geology* 26, 611–614, 1998.

HACKNEY, R., MARTIN, M., ISMAIL-ZADEH, A., SPERNER, B., IOANE, D., and CALIXTO WORKING GROUP, The gravity effect of the subducted slab beneath the Vrancea region, Romania, In: Michalik, J., Simon, L., Vozar, J. (Eds.), *Proceedings of the XVIIth Congress of the Carpathian-Balkan Geological Association*, vol. 53. Bratislava, September 1–4, 2002, *Geologica Carpathica*, pp. 119–121, 2002.

HEATON, T. H.: Tidal triggering of earthquakes, *Geophys. J. R. Astron. Soc.*, 43, 307–326, 1975.

ISMAIL-ZADEH, A.T., MUELLER, B., SCHUBERT, G.: Three-dimensional numerical modeling of contemporary mantle flow and tectonic stress beneath the earthquake-prone southeastern Carpathians based on integrated analysis of seismic, heat flow, and gravity data, *Physics of the Earth and Planetary Interiors* 149, 81–98, 2005.

IVAN, M., Short-period QpP-P in Vrancea area, Romania, *J. Balkan Geoph. Soc.* 6, 46–52, 2003a.

IVAN, M., QS-P in Vrancea and adjacent areas - Romania, *St. cerc. GEOFIZICA* 41, 57–63, 2003b.

IVAN, M.: Attenuation of P and pP waves in Vrancea area – Romania, *J. Seismology*, Springer Verlag, <http://dx.doi.org/10.1007/s10950-006-9038-7>, 2006.

KLEIN, F. W., Earthquake swarms and the semidiurnal solid earth tide. *Geophys. J. R. Astr. Soc.*, 45, 245–295, 1976.

KNOPOFF, L.: Earth tides as a triggering mechanism for earthquakes, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 54, 1865–1870, 1964.

KOSSOBOKOV, V. and ROMASHKOVA, L., Re-establishing intermediate-term real-time prediction of strong earthquakes in the Vrancea region, CE-Project, *Extreme Events: Causes and Consequences*, Perugia 2–6 September, 2006.

- LANDES, M., W. FIELITZ, F. HAUSER, M. POPA, CALIXTO Group, 3-D upper crustal tomographic structure across the Vrancea seismic zone, Romania, *Tectonophysics* 382 (2004) 85–102, 2004.
- LINZER, H.-G., Kinematics of retreating subduction along the Carpathian arc. *Geologz*, 24, 167-170, 1996.
- MARTIN, M., ACHAUER, U., KISSLING, E., MOCANU, V., MUSACCHIO, G. and the CALIXTO working group. First results from the tomographic experiment CALIXTO'99 in Romania, *Geophys. Res. Abstr.*, **3**, EGS, SE1.02, 2001.
- MARTIN M., RITTER J. R. R. and the CALIXTO working group: High-resolution teleseismic body-wave tomography beneath SE Romania – I. Implications for three-dimensional versus one-dimensional crustal correction strategies with a new crustal velocity model, *Geophys. J. Int.*, 162, 448–460, 2005
- MARTIN M., WENZEL F. and the CALIXTO working group: High-resolution teleseismic body wave tomography beneath SE-Romania – II. Imaging of a slab detachment scenario, *Geophys. J. Int.* 164, 579–595, 2006a.
- MELCHIOR, P., *Physique et dynamique planétaires. Géodésie et astronomie géodésique*, vol. 1, Ed. Vander, Bruxelles, 1971.
- MELCHIOR, P., *The Tides of the Planet Earth*, Pergamon Press, New York, 1978.
- ONCESCU, M. C. (1984), Deep Structure of the Vrancea Region, Romania, Inferred from Simultaneous Inversion for Hypocenters and 3-D Velocity Structure, *Ann. Geophys.* 2, 23-28.
- PĂTRAȘCU, ȘT., *Magnetism terestru și gravimetrie. Partea a II-a. Gravimetrie Aspecte generale*. Litografia Universității din București, 1981.
- POPA., M., RADULIAN, M., GRECU, B., POPESCU, E. and PLACINTA, A.O.: Attenuation in Southeastern Carpathians area: Result of upper mantle inhomogeneity, *Tectonophysics*, Volume 410, Issues 1-4, 9 December 2005, Pages 235-249.
- PULIDO, N., Seismotectonics of the northern Andes (Colombia) and the development of seismic networks, *Bulletin of the International Institute of Seismology and Earthquake Engineering*, Special Edition, p69-76, 2003.
- RADU C., POLONIC, G. Seismicity of the Romanian territory with a special reference to the Vrancea region. In: *The earthquake of March 4, 1977 (in Romania.)*. Ed. Acad., 75-136, 1982.
- RADULIAN M., PANZA G.F., POPA M., GRECU B., Seismic wave attenuation for Vrancea events revisited, *J. Earthquake Engineering* 10, no. 3, 411-427, 2006.
- RADULIAN, M., BONJER, K.-P., POPA, M., POPESCU, E., Seismicity patterns in SE Carpathians at crustal and subcrustal domains: tectonic and geodynamic implications, *International Symposium on Strong Vrancea Earthquakes and Risk Mitigation* Oct. 4-6, 2007, Bucharest, Romania
- RADULIAN M., POPA M., CĂRBUNAR O., ROGOZEA M., Seismicity patterns in Vrancea and predictive features, *The Third International Conference, SCIENCE AND TECHNOLOGY FOR SAFE DEVELOPMENT OF LIFE LINE SYSTEMS*, 24-26 October 2007, Bucharest, Romania, *Acta Geodaetica et Geophysica Hungarica*, vol.43, 2, Special issues (in press), 2008.
- RUSSO R.M., MOCANU V., RADULIAN M., POPA M., BONJER K.-P., Seismic attenuation in the Carpathian bend zone and surroundings, *Earth and Planetary Science Letters*, 237, 695-709, 2005.

- RYDELEK, P. A., SACKS, I. S. and SCARPA, R.: On tidal triggering of earthquakes at Campi Flegrei, Italy. *Geophys. J. Int.*, 109, 125–137, 1992.
- SANDULESCU, M., *Geotectonica României*. Editura Tehnica, Bucharest, 1984.
- SCHUSTER, A.: On lunar and solar periodicities of earthquakes, *Proc. R. Soc. Lond.*, 61, 455–465, 1897.
- SOUCHAY, J. and STAVINSCHI, M., Study of the correlations between long-periodic terrestrial tides and occurrence of earthquakes in the Vrancea site, *Earth, Moon and Planets*, 77, 105-124, 1997-1999.
- STAVINSCHI, M. and SOUCHAY, J.: Some correlations between Earthquakes and Earth Tides, *Acta Geod. Geoph. Hung.*, 38(1), 77–92, 2003.
- STANICA, D., STANICA, M., PICCARDI, L., TONDI, E., CELLO, G., Evidence of geodynamic torsion in the Vrancea (eastern carpathians), *Rev.roum. GEOPHYSIQUE*, 48, p. 15-19, 2004, Bucuresti, 2004
- STROUP, D. F., D. R. BOHNENSTIEHL, M. TOLSTOY, F. WALDHAUSER, and R. T. WEEKLY: Pulse of the seafloor: Tidal triggering of microearthquakes at 9° 50' N East Pacific Rise, *Geophys. Res. Lett.*, 34(15), 2007.
- ȘECLĂMAN, M., Transformările de fază ale mineralelor, cauză probabilă a cutremurelor cu focare adânci, *St.cerc.geol., geofiz., geogr., Geologie*, vol. 23, 2, p.195-205, București, 1978.
- ȘTEFĂNESCU, GR., Cutremurele de pământ în România timp de 1391, de la anul 455 până la 1874, *Anal. Acad. Rom., Mem. Secț. Științ. (II)*, t. XXIV, p. 1-34, București 1902.
- TAMURA, Y., T. SATO, M. OOE and M. ISHIGURO, A procedure for tidal analysis with a Bayesian information criterion, *Geophys. J. Int.*, 104, 507-516, 1991.
- TANAKA, S., OHTAKE, M., and SATO, H., Spatio-temporal variation of the tidal triggering effect on earthquake occurrence associated with the 1982 South Tonga earthquake of Mw 7.5, *Geophys. Res. Lett.*, 29 (16), 1756, doi: 10.1029/2002GL015386, 2002a.
- TANAKA, S., OHTAKE, M., and SATO, H.: Evidence for tidal triggering of earthquakes as revealed from statistical analysis of global data, *J. Geophys. Res.*, 107(5B10), 2211, doi: 10.1029/2001JB001577, 2002b
- TANAKA, S., OHTAKE, M., and SATO, H., Tidal triggering of earthquakes in Japan related to the regional tectonic stress, *Earth Planets Space*, 56, 511-515, 2004.
- TANAKA, S., SATO, H., MATSUMURA, S., and OHTAKE, M.: Tidal triggering of earthquakes in the subducting Philippine Sea plate beneath the locked zone of the plate interface in the Tokai region, Japan, *Tectonophysics*, 417, 69–80, 2006.
- TSURUOKA, H., OHTAKE, M., and SATO, H.: Statistical test of the tidal triggering of earthquakes: contribution of the ocean tide loading effect, *Geophys. J. Int.*, 122, 183–194, 1995.
- VAN CAMP, M. and VAUTERIN, P., Tsoft: graphical and interactive software for the analysis of time series and Earth tides, *Computers in Geosciences*, 31(5) 631–640, 2005.
- VAN RUYMBEKE M., DUCARME B., DE BECKER M., Parameterization of the tidal triggering of earthquakes. *B.I.M. n° 86 décembre pp 5521-5544*, 1981.
- VAN RUYMBEKE M., DUCARME B., DE BECKER M., An attempt to model the tidal triggering of earthquakes. 9th intern. Symp. on Earth Tides, New York O.R.B. Comm. S.A. n° 63, s. Géoph. n° 141 pp 47-57 Schweizerbart buchhandlung, pp 651-66, 1983a.

VAN RUYMBEKE M., DUCARME B., DE BECKER M., Confirmation of the tidal influence on the Alaska-aleutian earthquakes. XVIII Assembly Proc. Eur. Seism. Comm., august 23-27, 1982 Zentralinstitut fuer Physik der Erde, Potsdam vol. 2 pp 388, 1983b.

VAN RUYMBEKE, M., HOWARD, R., PUTZ, P., BEAUDUCEL, F., SOMERHAUSEN, A. and BARRIOT, J-P.: An Introduction to the use of HICUM for signal analysis, BIM 138, 10 955–10 966, 2003.

VAN RUYMBEKE, M., SHAOMING, L., QUINIF, Y., and CAMELBEECK,, T., The Monitoring of Tectonic Movements In Nature Caves, the 3rd International Conference on Continental Earthquakes Mechanism, Prediction, Emergency Management and Insurance, Beijing, 134–140, 2004.

VAN RUYMBEKE, M., ZHU, P., CADICHEANU, N., and NASLIN, S.: Very Weak Signals (VWS) detected by stacking method according to different astronomical periodicities (HiCum), Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 7, 651–656, 2007.

VARGA, P., Tidal influence on the temporal distribution of earthquake occurrences, The Third International Conference, SCIENCE AND TECHNOLOGY FOR SAFE DEVELOPMENT OF LIFE LINE SYSTEMS, 24-26 October 2007, Bucharest, Romania, Acta Geodaetica et Geophysica Hungarica, Special issues (in press), 2008.

VERE-JONES, D., Earthquake prediction- a statistician view. J. Phys. Earth, 26:129-146, 1978.

WANG, R., Tidal Deformations on a Rotating, Spherically Asymmetric, Visco-Elastic and Laterally Heterogeneous Earth. In: *European University Studies, Series XVII, Earth Sciences* Vol. 5, Peter Lang, Frankfurt am Main, 1991.

ZARIFI, Z, HAVSKOV, J., Characteristics of dense nests of deep and intermediate depth seismicity *Advances in Geophysics* 46, pp. 237-278. Academic Press., Published by Elsevier, 2003.

ZUGRĂVESCU DOREL, FĂTULESCU ILEANA, DOROBANȚU, R., MACARIE, C. Corelația dintre momentul declanșării cutremurelor cu focarul în Vrancea și marile terestre, *St.cerc.geol.,geofiz. geogr.-Geofizică*, 17,2, pp.161-165, 1979.

ZUGRĂVESCU DOREL, Observatoarele de geodinamică din România, *St.cerc.geol.,geofiz.,geogr., Geofizică*, Tom 23, pp 3-11. 1985a

ZUGRĂVESCU, D., ENESCU, D., DELION, D., FATULESCU, I., and DOROBANTU, R., Some correlations between the mechanism of Vrancea earthquakes occurrence and Earth tides, *Rev. Roum. Geophys.*, 29, 1–34, 1985b.

ZUGRĂVESCU DOREL, ILEANA FATULESCU, DUMITRU ENESCU, DORINA DANCHIV and OCTAV HARADJA, Peculiarities of the correlation between gravity tides and earthquakes, *Revue Roumaine de Geologie, Geophysique et Geographie, Serie de Géophysique*, Tome 33, pp.3-11, 1989.

ZUGRĂVESCU, D., POLONIC, G., Geodynamic compartments and present-day stress on the Romanian territory, *Rev. roum. Géophysique* 41, 3-24, 1997.

ANEXE

Rezultatele au fost publicate în următoarele reviste (2006 -2008):

Cadicheanu, N., van Ruymbeke, M., ZUGRĂVESCU, D., Everaerts, M. and Howard, R., *Periodical tendencies in Vrancea seismic activity detected by the Hi-Cum stacking method,* , Rev. Roum. Geophysique, 50, p.31-57, 2006.

Michel van Ruymbeke, Zhu Ping, Nicoleta Cadicheanu, Sébastien Naslin, *Very Weak Signature (VWS) detected by stacking method according different astronomical periodicities (HiCum),* Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 7, 651–656, 2007.

Cadicheanu N., M. van Ruymbeke and P. Zhu, *Tidal triggering evidence of intermediate depth earthquakes in the Vrancea zone (Romania),* Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 7, 733-740, 2007.

Cadicheanu, N. Zhu, P. and van Ruymbeke, M., *Spatial and temporal variations of the correlation coefficient between M2 and S2 earth tides components and earthquake occurrence for the intermediate-depth seismic activity zones,* Acta Geodaetica et Geophysica Hungarica, Special issues, Vol. 43, No. 2-3 (June), pp.131-144, 2008.