

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

Susținere publică în data de _____ 2008, București, în fața comisiei de doctorat formată din

Prof.dr. ing.Cristian MĂRUNȚEANU	Directorul Școlii Doctorale, Facultatea de Geologie și Geofizică Universitatea București (FGG – UB)	Președintele comisiei de doctorat
Prof.dr.ing. Marian IVAN	FGG – UB	Conducător de doctorat
Prof.dr. Michel van RUYMBEKE	Universitatea catolică Louvain (UCL)	Conducător de doctorat
Dr. ing. Dorel ZUGRĂVESCU	CS I, Director onorific al Institutului de Geodinamică al Academiei Române (IGAR), Membru coresp. al Academiei Române	Referent oficial
Prof.dr.ing. Cornel DINU	FGG – UB	Referent oficial
Dr. ing. Gheorghe MĂRMUREANU	CS I, Director al Institutului Național de Cercetare-Dezvoltare pentru Fizica Pământului (INCDFP)	Referent oficial
Prof.dr. Pascal BERNARD	Director al departam. de seismogeneză Institutul de Fizica Globului din Paris (IPGP)	Referent oficial
Prof.dr. Denis FAVART	Universitatea catolică Louvain (UCL)	Referent oficial

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

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 cotelor;*

Mulțumirile mele se îndreaptă, de asemenea, către:

*Directorul Observatorului Regal al Belgiei care mi-a permis inițierea și desfășurarea 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 dânilor față de mine;*

*toți profesorii Facultății de Geologie și Geofizică a Universității din București
care au avut amabilitatea de a mă sfătui și îndruma în mod util la elaborarea tezei;
doamna Secretar Șef Corina Duminică
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 Niclescu, 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!*

REMERCIEMENTS

Mes profonds remerciements vont :

à mes promoteurs, les professeurs Marian Ivan et Michel van Ruymbeke, dont la disponibilité, l'attention bienveillante et les encouragements ont rendu ce travail possible;

*aux personnes qui ont évalué mes activités. Je pense aux :
Dr Pascal Bernard, Dr Thierry Camelbeeck et Dr Michel Everaerts.*

Ma pensée va particulièrement vers le Dr Denis Favart qui m'a conseillé tout au long du travail et qui a contribué avec le Dr Isabelle Donnay, à la gestion administrative de la cotutelle.

Mes remerciements vont encore:

au Directeur de l'Observatoire Royal de Belgique qui m'a permis d'initier les travaux qui ont débouché sur ce mémoire doctoral ;

au Dr Jacques Zlotnicki et l'Ing Guy Berthault avec une profonde reconnaissance,

*à mon collaborateur et ami, Zhu Ping,
à mes amis belges, français et espagnols
qui sans compter m'ont apporté leur aide,*

*à tous les représentants de l'Université catholique de Louvain,
qui m'ont aidé avec une grande amabilité et promptitude;*

*aux Directeurs de l'Ecole Doctorale de la Faculté de Géologie et Géophysique,
Monsieur le Professeur Nicolae Anastasiu et Monsieur le Professeur Cristian Mărunțeanu
pour leur amabilité et leur patience à mon égard ;*

*à tous les professeurs de la Faculté de Géologie et Géophysique de l'Université de Bucarest
qui ont eu l'amabilité de me conseiller utilement et m'aider en cours de rédaction ;*

*à Madame Secrétaire Chef Corina Duminiță
pour son aide dans les formalités de l'Ecole Doctorale,*

*à la Direction de l'Institut de Géodynamique de l'Académie Roumaine qui m'a accordé
la possibilité de développer mes recherches. Cela me permet de participer à des recherches
origininales dans le cadre de coopération bilatérale entre l'ORB et l'IGAR ;*

*à Monsieur l'ex-Directeur de l'IGAR, Dr ing. Dorel Zugrăvescu,
aux Dr Maria Tumanian et Dr Luminița Ardeleanu,
à tous mes collègues et à ceux qui m'ont encouragé sincèrement,
à tous avec qui j'ai eu des changements constructives des idées sur mon travail*

*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
Beșuțiu, Dr Dumitru Stănică, Mme Ileana Fătulescu, Drd Valentin Furnică, Dr Cristian Panaiotu,
Dr. Bogdan Niculescu, Dr Mihaela Popa et Dr Mircea Radulian et aussi notre regreté collègue le
Dr Horia Grumăzescu.*

*Remerciements aux M-me Ing. Alina Marin et M. Adrian Constantin qui m'ont aidé imprimer la
thèse.*

*Durant mes séjours, j'ai pu également compter sur le support du Rotary de Waterloo représenté par
Jacques Beaujean.*

*Toujours reconnaissante
à ma famille et
à Paul!*

Rezumat

Problema declanșării cutremurelor de pământ, ca urmare a acțiunii Soarelui și a Lunii, a fost investigată de mulți autori. Această declanșare ar putea avea la origine și modulații gravimetrice induse de mareele terestre în activitatea seismică.

În acest studiu ne-am propus două obiective: **primul obiectiv** este de a obține caracteristicile de răspuns ale unei zone seismice cu activitate seismică intermediară, supusă acțiunii anumitor componente ale mareelor terestre. Poziția geografică și tectonica zonei Vrancea, adâncimea activității seismice analizată și tipul de interacțiune dominantă la această adâncime, gravitația, ne permit să simplificăm considerațiile problemei. Prin urmare, vom analiza cuplajele posibile dintre mareele terestre și cutremurele de pământ, ținând seama doar de implicarea diferitelor periodicități ale mareelor în declanșarea evenimentelor seismice. Cu o metodologie proprie, urmărim tendințele de modulare ale activității seismice în zona analizată de către componentele reprezentative spectral ale fiecărui grup de marea terestre: *S2*, *M2* și *N2* pentru grupul de unde semidiurne, *K1*, *P1* și *O1* pentru grupul de unde diurne, *MF*, *MM*, *SSA* și *SA* pentru grupul de unde cu perioade lungi. Coeficientul statistic *p*, măsură a sincronizării relative dintre variațiile cu o anumită perioadă a mareelor terestre și activitatea seismică a zonei analizate, constituie un potențial factor precursor deoarece variațiile temporale ale caracteristicilor lui evidențiază unele semnături sistematice în acest sens. **Al doilea obiectiv** este integrarea rezultatelor obținute în modelele geodinamice acceptate în prezent pentru zona Vrancea. O contribuție importantă la realizarea acestui obiectiv revine aplicării noului concept de tomografie statistică a unei zone seismice cu ajutorul mareelor terestre pe baza căreia poate fi susținută ipoteza torsiunii fragmentului de litosferă ce caracterizează zona seismică Vrancea.

Accesul la o bază completă și omogenă de cutremure principale, cum este catalogul de evenimente seismice RomPlus pentru perioada 1970 – 2007, metoda principală de analiză numită HiCum (bazată pe cumulare de histograme), testele statistice cu ajutorul cărora se calculează atât coeficientul statistic *p* pe baza căruia evaluăm corelația dintre mareele terestre și cutremurele de pământ cât și intervalele de încredere pentru parametrul de amplitudine a sinusoidei de interpolare, validarea rezultatelor prin metoda seriilor sintetice de evenimente aleatoare, analizele în ferestre mobile temporale și 3D, un concept nou utilizat pentru prima dată în problema corelației dintre mareele terestre și cutremurele de pământ numit tomografie mareică statistică a distribuției cutremurelor de pământ, toate aceste lucruri ne permit să urmărim realizarea obiectivelor propuse și, ca urmare, a **scopului general** al studiului nostru: de a pune în evidență interacțiunile dintre mareele terestre și cutremurele de pământ pentru o zonă seismică particulară, cu seismicitate intermediară: zona seismică Vrancea din România.

Cuvinte cheie: Vrancea, declanșator seismic, HiCum, coeficient statistic *p*, teste statistice, serii sintetice, ferestre mobile, 3D, tomografie statistică

Résumé

De nombreux auteurs ont investigué la question de l'éventualité d'une action d'origine solaire ou lunaire sur le déclenchement des tremblements de terre. Ce déclenchement serait du aux modulations gravitationnelles induites par les marées terrestres.

Dans ce travail nous nous proposons deux objectifs: **le premier** est d'obtenir les caractéristiques de réponse d'une zone sismique avec une activité intermédiaire, soumise à l'action de certaines composantes des marées terrestres. La position géographique et la tectonique de la zone de Vrancea, la profondeur de l'activité sismique analysée et le genre d'interaction dominante à cette profondeur, la gravitation, nous permettent de simplifier les considérations du problème.

Nous disposons pour nos recherches du catalogue RomPlus qui reprend sur la période 1970-2007, l'activité sismique de la zone étudiée. Nous analysons les couplages possibles entre les marées terrestres et les tremblements de terre en ne tenant compte que de l'implication de certaines périodicités dans le déclenchement des événements sismiques. Nos travaux utilisent une méthode de « stacking » nommée HICUM qui est complétée avec des tests statistiques caractérisés par le calcul d'un coefficient p d'évaluation de corrélation en fenêtres glissantes. La variabilité de ceux-ci semble présenter des tendances liées à l'activité sismique locale.

Le deuxième objectif est de confronter les résultats obtenus avec les modèles géodynamiques acceptés pour la zone de Vrancea. L'application de nouveau concept de la tomographie statistique à l'aide des marées terrestres contribue à réaliser cet objectif. Cela donne une explication cohérente qui soutient le modèle du slab en torsion dans la zone sismique de Vrancea et l'atténuation des ondes sismiques au nord-ouest de cette zone.

Ces deux objectifs concourent à la réalisation du **but général** de la thèse qui consiste à mettre en évidence les interactions entre les marées terrestres et les tremblements de terre pour une zone particulière avec activité sismique intermédiaire, la zone de Vrancea – Roumanie.

Mots clé: Vrancea, déclencheur sismique, HiCum, coefficient statistique p , tests statistiques, facteur précurseur, 3D, tomographie statistique.

Abstract

The possibility that Earth-tides could be triggering seismic events has been investigated by many authors. One of the triggering reasons of the earthquakes could be the induced gravitational modulations of the earth tides.

This study has two objectives: **the first objective** is to obtain the characteristic of response of an intermediate-seismic zone liable to certain tidal periodicities. The reasons of this problem are much simplify by geographical position and Vrancea tectonics, by the seismic activity depth and the prevailing type of interaction at this depth. That is the gravitation. Thus, we take in account only different tidal periodicities for analyse the possible coupling interaction between earthquakes and earth tides. The modulation tendencies of the representative components of every spectral group of the earth tides are analysed by a dedicated methodology. These earth tide components are: *S2*, *M2* and *N2* for semidiurnal waves, *K1*, *P1* and *O1* for diurnal waves, *MF*, *MM*, *SSA* and *SA*, for long period waves. The statistical coefficient p could be a potential seismic precursor if the time variations of its characteristic prove a systematically pattern in this sense. **The second objective** regards the integration of the obtained results in the context of the accepted geodynamical models for the Vrancea region. The new concept of tidal tomography is very important for touch this objective. It can offer a good explanation for the torsion property of the Vrancea seismic slab.

The access to a complete and homogenous data base of main earthquakes like RomPlus catalogue from 1970 to 2007, the principal method of analysis named HiCum (from Histogram Cumulating), the statistical tests for the estimation of the correlation between earthquakes and earth tides through statistical coefficient p and confidence intervals, the results validation by the method of the synthetically series of random events, the analyses in time and 3D sliding windows, the new concept named statistical tidal tomography of the earthquake distribution used for the first time in the earthquake – earth tides correlation, all this mentioned things contribute to realise the two proposed objectives and therefore to **the aim of our study**: to make obvious the interactions between earthquakes and earth tides for a particularly region with intermediate-depth seismic activity, the seismic Vrancea region.

Key words: Vrancea, seismic triggering, HiCum, statistical coefficient p , statistical tests, synthetically series, sliding windows, 3D, statistical tomography

CUPRINS

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. Mareele terestre – considerații generale.....	21
2.2.1. Definiție	21
2.2.2. Dezvoltarea Laplace. Principalele grupe ale mareelor terestre	21
2.2.3. Componentele locale ale mareelor 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 mareelor terestre	27
2.3. Problema corelației dintre mareele 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 mareele 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 mareele 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. Comparatie 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, <i>Periodical tendencies in Vrancea seismic activity detected by the Hi-Cum stacking method</i> , , Rev. Roum. Geophysique, 50, p.31-57.	105
ANEXA B	Michel van Ruymbeke, Zhu Ping, Nicoleta Cadicheanu, Sébastien Naslin,	2007, <i>Very Weak Signature (VWS) detected by stacking method according different astronomical periodicities (HiCum)</i> , Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 7, 651–656, 2007.	129
ANEXA C	Cadicheanu N., M. van Ruymbeke and P. Zhu,	2007, <i>Tidal triggering evidence of intermediate depth earthquakes in the Vrancea zone (Romania)</i> , Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 7, 733-740, 2007.....	135
ANEXA D	Cadicheanu, N. Zhu, P. and van Ruymbeke,M.:	<i>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</i> , Acta Geod. Geoph. Hung., Vol. 43(2–3), pp. 131–144 (2008),DOI: 10.1556/AGeod.43.2008.2–3.3.....	143
REFERINȚE BIBLIOGRAFICE			159



INTRODUCERE

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

eterogeneităților 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 mările 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 mările 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 mările 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 mările terestre, componente reprezentative pentru grupul spectral din care fac parte. De asemenea, am luat în calcul posibilitatea obținerii unui posibil factor precursor, urmărind variațiile temporale 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 mareele 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 mareele 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 lucru de mai jos (Fig. 2).

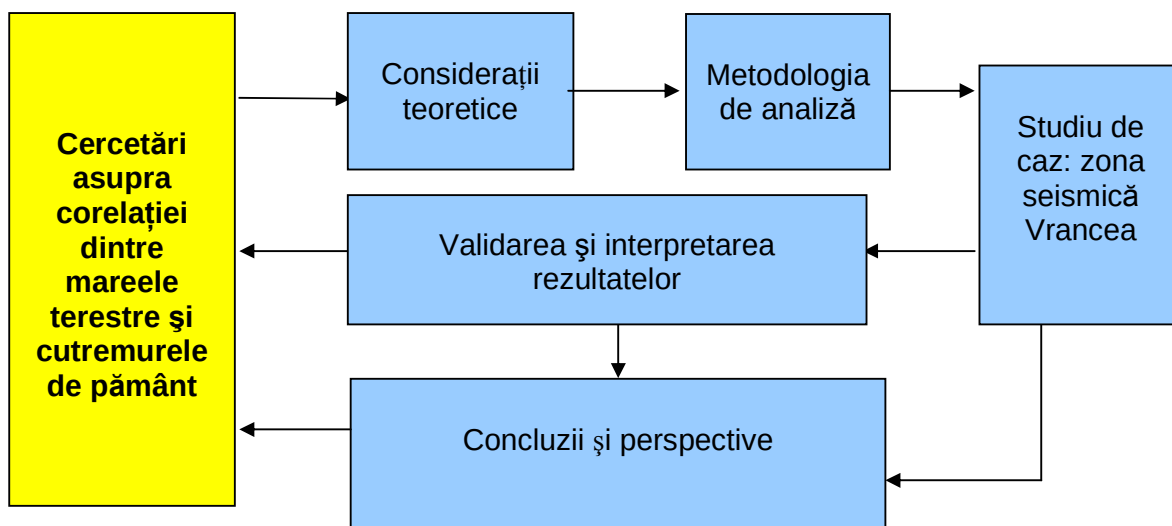


Fig. 2 - Schema-bloc a principalelor etape ale tezei

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 litosferică sau slab-ului seismic, cum mai este denumit, acest din urmă termen fiind utilizat frecvent în prezenta lucrare.

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, precum și pe rolul important pe care îl poate juca câmpul gradientului de forțe mareice asupra slab-ului seismic supus curenților de convecție din manta și forței arhimedice, 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 maree-cutremure, conceptul de **tomografie mareică statistică a unei zone seismice cu ajutorul mareelor terestre**;
- 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 să fie 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 concentrează 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 mareice, pe de o parte, și cele eliptice mareice, 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 conține 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.

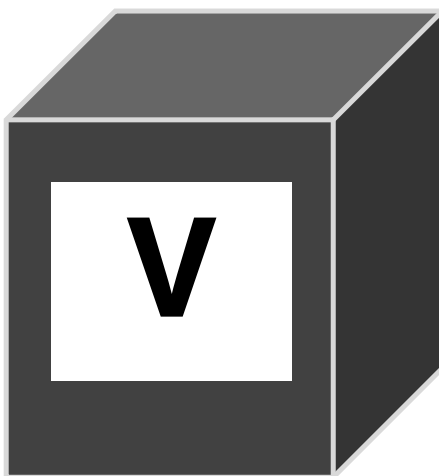
Lucrarea cuprinde 172 de pagini, 8 tabele și este ilustrată cu 111 figuri color și 2 planșe format A3 color alcătuite, la rândul lor, din colajele altor figuri independente.

Alături de introducere, 5 capitole, concluzii și 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 prezenta lucrare.

1

1. ZONA SEISMICĂ VRANCEA – PRIVIRE GENERALĂ



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»: de exemplu, zonele cu o subducție activă sau zone caracterizate de o paleosubducție (subducția propriu-zisă nemaieexistând în prezent), cum se crede că ar fi cazul zonei seismice Vrancea (Fig. 1.1) [SANDULESCU, 1984; ENESCU and ENESCU, 1993 ; LINZER et al., 1998, WORTEL and SPAKMAN, 2000]. Aceste zone sunt dovada unei tectonici active și pot fi prezente și acolo unde litosfera mai puțin rezistentă este supusă unor constrângeri importante.

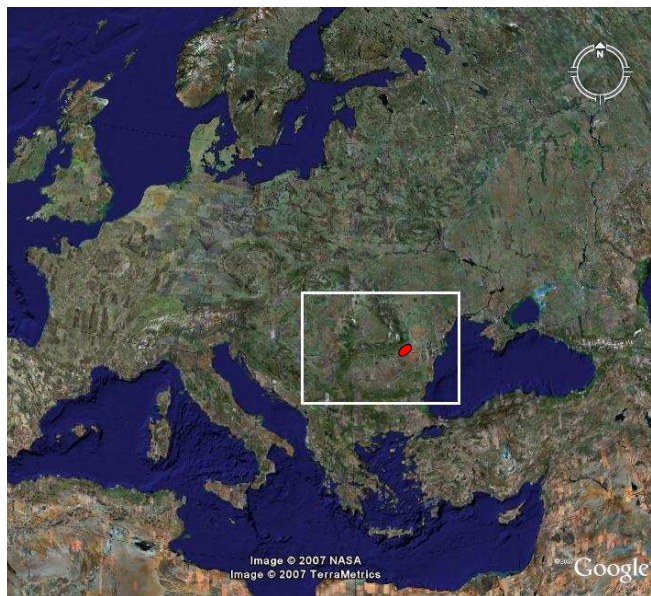


Fig. 1.1. –Poziția geografică a zonei Vrancea în contextul tectonic european

În lume se cunosc doar două zone intracontinentale similare Vrancei prin dimensiuni restrânse ale distribuției focarelor, caracterizate prin așa numita geometrie de « cuib » (de la englezescul, nest) a hipocentrelor [ZARIFI and HAVSKOV, 2003] : Hindu Kush (Afghanistan) și Bucaramanga (Columbia). Dar contextul tectonic al

acestor două zone este complet diferit de al Vrancei [BEȘUȚIU and CADICHEANU, 2003, 2006].

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. În acest din urmă caz, stresul tectonic este influențat de mai mulți factori externi [TURCOTTE and SCHUBERT, 1982] cum sunt: variațiile climatice [RUDDIMAN, 1997], procesele de eroziune a solului [CLOETHING et al., 2004], activitatea antropică, variațiile câmpului baric și ale temperaturii [ADUSHKIN and SPIVAK, 2006], dinamica pânzelor de apă freatică [STEJSKAL et al., 2007], etc.

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. Cutremure istorice importante

Cele mai importante evenimente seismice istorice ale secolului XX [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

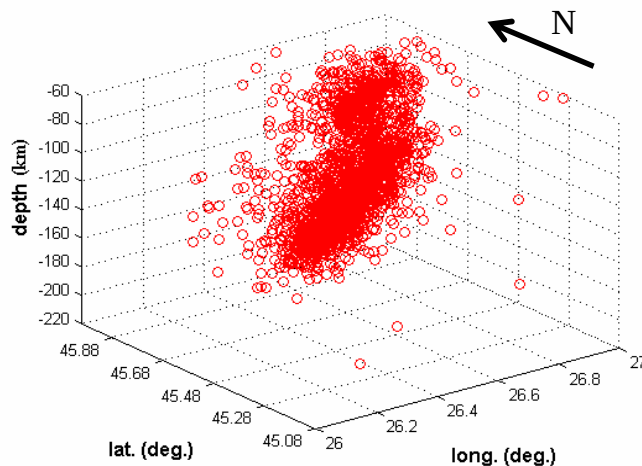


Fig. 1.2. –Distribuția hipocentrelor cutremurelor intermediare vrâncene în perioada (1970-2007)

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 (Tabelul 1.1)., 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.

Tabelul 1.1 – Cutremurele de pământ intermediare din zona Vrancea cu magnitudinea superioară valorii 5.0 pe scara Richter ($M_w \geq 5.0$; 1981-2005)

An	Lună	Zi	Oră	Min	Sec	Lat. (deg.)	Long. (deg)	Adâncime (km)	Mag. (M_w)
1981	7	18	0	2	59	45.69	26.42	166.1	5.5
1983	1	25	7	34	50	45.75	26.64	149.8	5.6
1985	8	1	11	17	36	45.79	26.77	118.6	5.2
1985	8	1	14	35	4	45.73	26.62	93.5	5.8
1986	8	30	21	28	37	45.52	26.49	131.4	7.1
1987	9	4	1	40	30	45.68	26.43	160.2	5.0
1990	5	30	10	40	6	45.83	26.89	90.9	6.9
1990	5	31	0	17	48	45.85	26.91	86.9	6.4
1999	4	28	8	47	56	45.49	26.27	151.1	5.3
2000	4	6	0	10	39	45.75	26.64	143.4	5.0
2004	10	27	20	34	36	45.78	26.73	98.6	6.0
2005	5		1	53	22	45.68	26.54	148.3	5.1

1.2.5. Pre- și postșocuri. Criteriul Kossobokov-Romashkova

Activitatea seismică vrânceană este caracterizată de multe ori prin șocuri produse înainte de descărcarea principală a energiei tectonice. Acestea sunt considerate preșocuri. Numeroase sunt și evenimentele produse după șocul principal, și numite curent postșocuri sau „afterșocuri”. 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 [CADICHEANU et al., 2007], criteriu elaborat special pentru zona Vrancea de către cei doi autori. Astfel, secvențele postșocurilor au fost excluse considerându-se postșocuri evenimentele care se produc într-un interval de timp mai mic de:

- 2 zile după șocul principal dacă acesta are magnitudinea $2.5 \leq M_w < 5.0$;
- 4 zile după șocul principal dacă acesta are magnitudinea $5.0 \leq M_w < 5.5$;
- 8 zile după șocul principal dacă acesta are magnitudinea $5.5 \leq M_w < 6.0$;
- 16 zile după șocul principal dacă acesta are magnitudinea $6.0 \leq M_w < 6.5$;
- 32 zile după șocul principal dacă acesta are magnitudinea $6.5 \leq M_w < 7.0$;
- 64 zile după șocul principal dacă acesta are magnitudinea $M_w \geq 7.0$

1.3. Structura tectonică

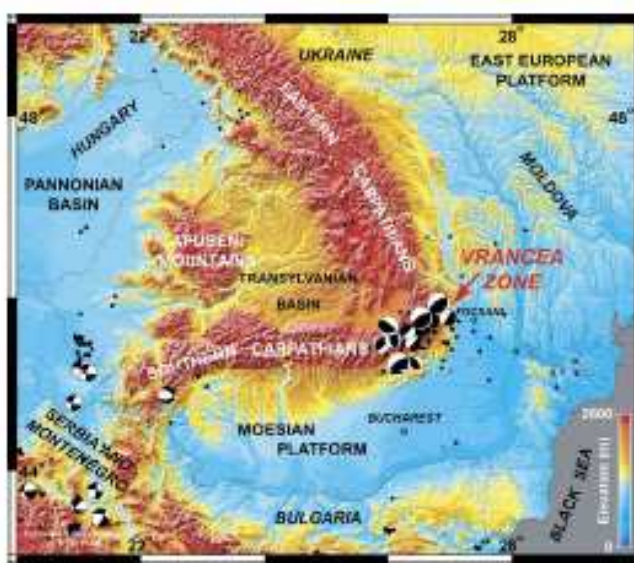


Fig. 1.3. - Aspecte tectonice ale zonei Vrancea și mecanisme în focar caracteristice (Knapp et al., 2005)

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

În zona seismică Vrancea sunt dominante mecanismele în focar caracteristice faliilor inverse (Fig. 1.4) și sunt situate într-un plan aproape vertical, orientat NE-SW [CORNEA et al., 1987; ENESCU, 2003].

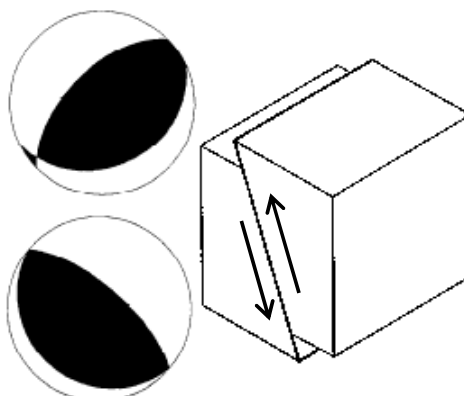


Fig. 1.4. – Mecanismele în focar caracteristice zonei seismice Vrancea

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

Studii întreprinse relativ recent consideră fragmentul de placă din zona subcrustală vrânceană ca fiind un ultim fragment de litosferă oceanică dintr-o bucată de mari dimensiuni din care s-au desprins, pe rând, mai multe fragmente ce au coborât și au fost încorporate în manta, ca urmare a procesului de subducție în urma căruia au luat naștere Carpații de răsărit [LINZER, 1996; SPERNER et al., 2001](Fig.1.5).

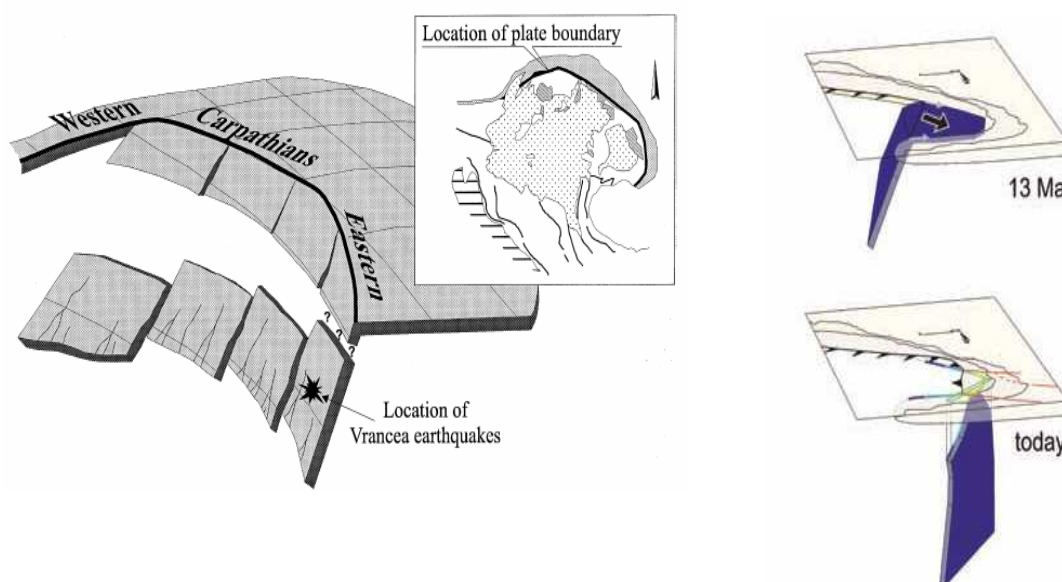


Fig. 1.5. - Modelul fragmentului de placă („slab”) în curs de desprindere (Linzer, 1996, Sperner et al., 2001)

În prezent, un ultim fragment aflat în zona de sud-est a Carpaților de Curbură se află în curs de desprindere și de alunecare lentă în astenosferă sub acțiunea dominantă a gravitației. Autorii nu pierd din vedere procesele izostatice care însoțesc aceste etape ale desprinderii fragmentului.

1.4.2. Modelul delaminării

Acest model 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.

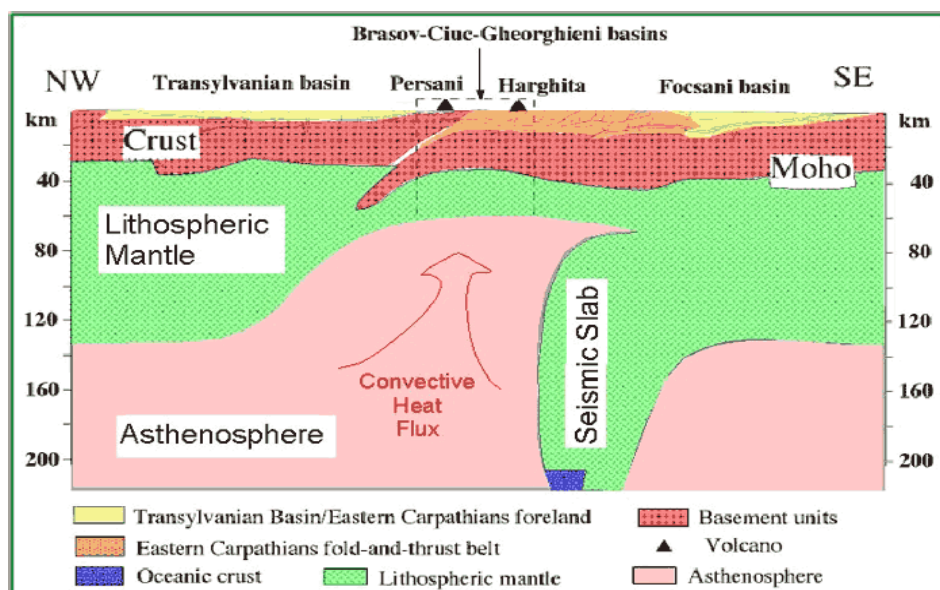


Fig. 1.6. – Modelul delaminării
(Gîrbacea and Frisch, 1998)

Procesul descris conduce la desprinderea lentă a fragmentului seismic de litosferă și coborârea lui în manta sub acțiunea propriei greutate [GÎRBACEA and FRISCH, 1998; PRAT and GÎRBACEA, 2000; RUSSO et al., 2005].

1.4.3. Modelul termotectonic

Modelul propus de Cloething 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).

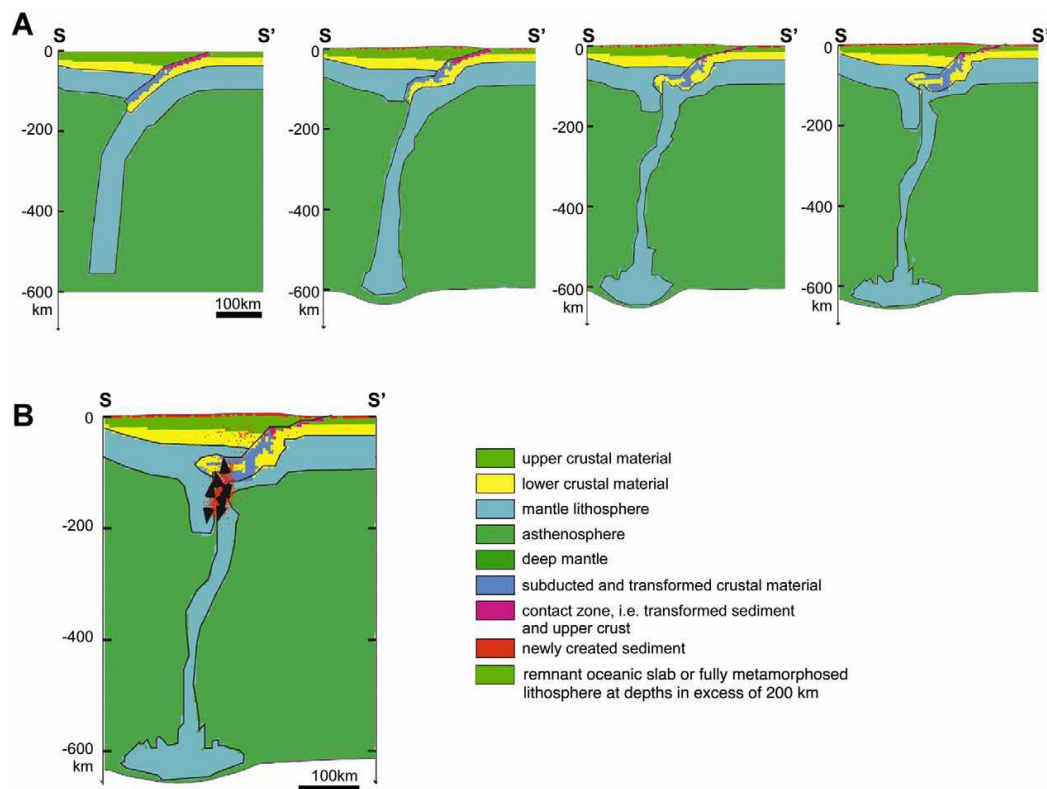


Fig. 1.7. – Modelul termo-tectonic (Cloetingh et al., 2004)

Și într-un caz și în celălalt gravitația joacă un rol important deoarece intervine atât în cazul instabilităților sublitosferice rezultate în urma proceselor geotermice, cât și în controlul proceselor izostatice generate de eroziune și sedimentare la suprafață.

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, ceea ce este în acord cu rezultatele de până atunci [WORTEL and SPAKMAN, 2000]. 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.

Deoarece rezultatele obținute în urma interpretării imaginilor tomografiei seismice sunt importante în studiul nostru, vom face în continuare o sinteză a acestora. Astfel, zona de mare viteză identificată cu fragmentul litosferic în coborâre are o orientare NE-SV între 70 și 200 km adâncime. Sub adâncimea de 200 km se produce o schimbare a orientării de la NE-SV la o orientare N-S iar maximul adâncimii atinge

350-370 km. Perturbația vitezei este maximă între 110 și 150 km adâncime și aproape constantă sub 200 km (Fig. 1.8).

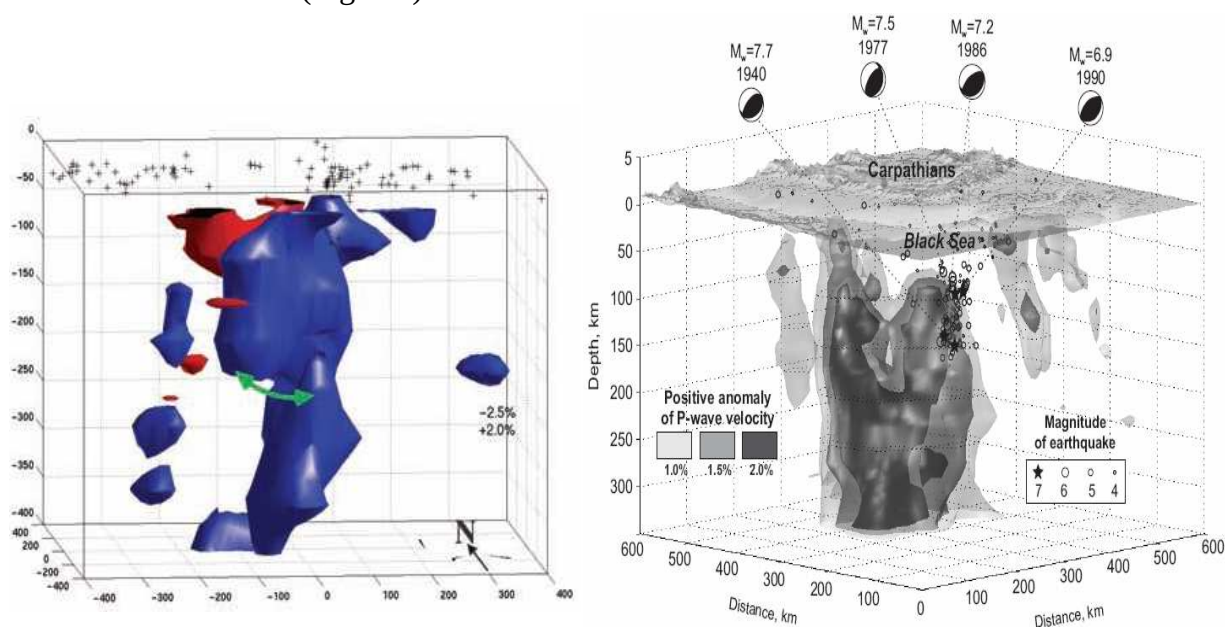


Fig. 1.8 - Modelul obținut prin tomografie seismică (Martin et al., 2001, 2005, 2006a, 2006b)

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 să fie 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. În plus, această anomalie este în acord cu discontinuitatea litosferă – astenosferă dintre 110 și 150 km sub Platforma moesică și mai adâncă de 200 km sub Platforma est-europeană.

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).

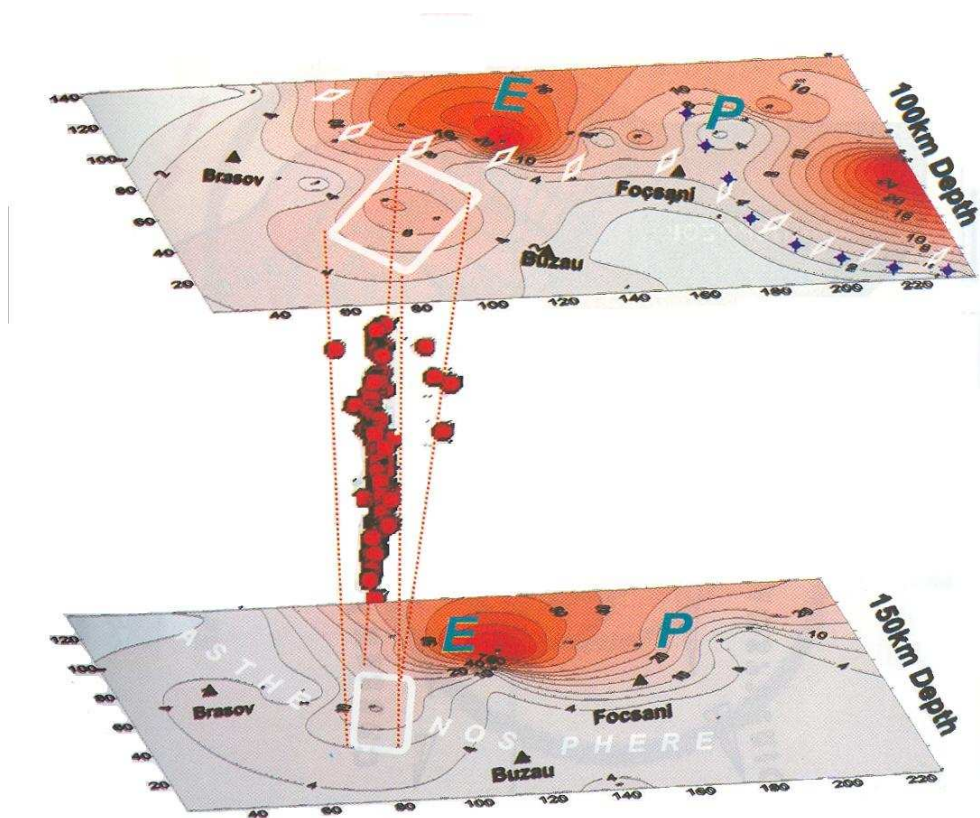


Fig. 1.9. – Tomografie magnetotelurică 3D. Cercurile roșii marchează focarele cutremurelor intermediare (Stănică et al., 2004)

Imaginile tomografice concordă cu ipoteza de rollback a fragmentului în timpul subducției, colisiunea plăcilor urmată de prăbușirea fragmentului și delaminare litosferică. Diferitele grade de cuplaj mecanic al fragmentului cu litosfera permite înțelegerea localizării seismicității în volume cu o concentrație mai mare a stresului.

Acest fragment torsionat de la direcția N-S la cea NE-SV și aflat în cădere sub propria greutate în manta, este sub controlul forței gravitaționale.

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, profilelor 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).

În plus, s-a demonstrat că forțele arhimedice, care rezultă din distribuția temperaturilor și densităților în crustă și manta [SHAW, 1970; DEMETRESCU and ANDREESCU, 1994], pot governa în prezent deformările subcrustale din sud-estul Carpaților și pot explica patternul regional al stresului și seismicitatea intermediară.

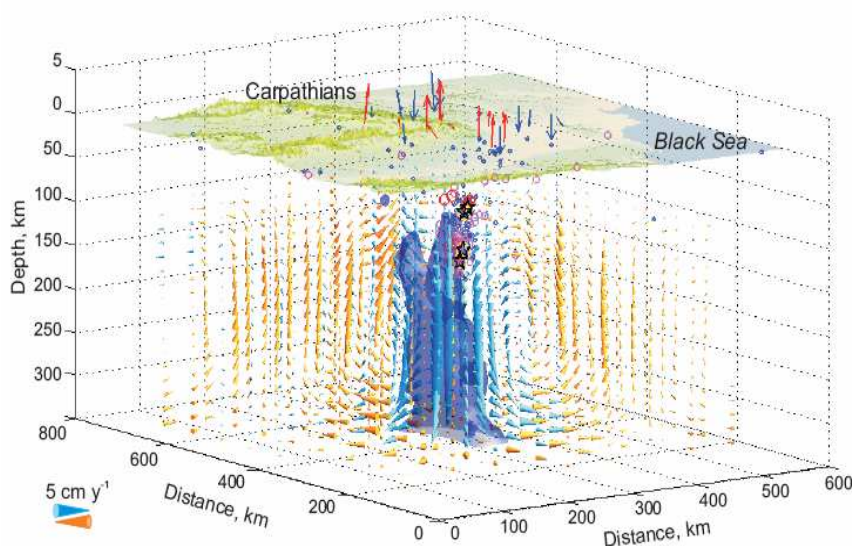


Fig. 1.10. – Model legat de mișcarea fluidelor în manta ca urmare a coborârii slab-ului în manta (Ismail-Zadeh, 2005)

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.

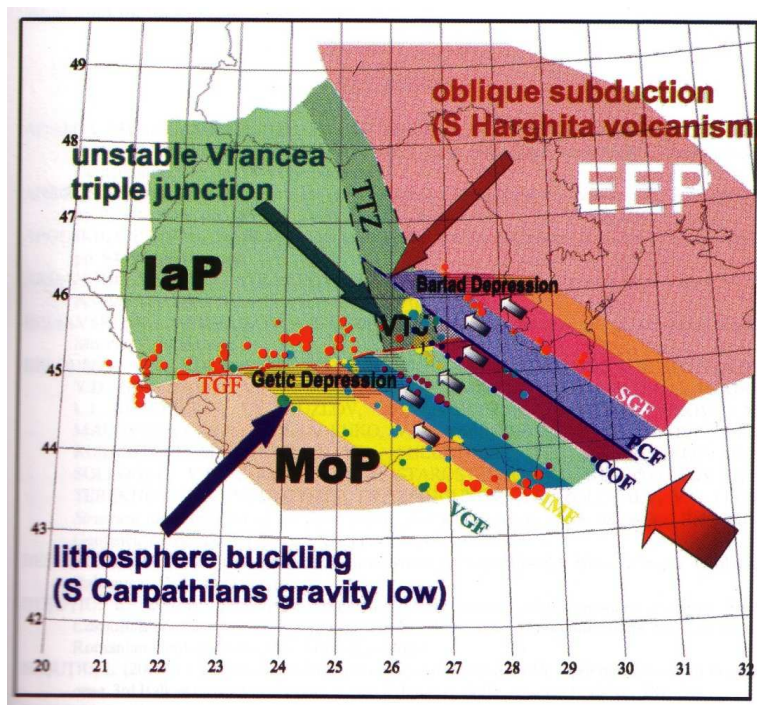


Fig. 1.11. - Modelul triplei joncțiuni (Beșuțiu et al., 2004)

Modelul încearcă să explice o serie de neconcordanțe ale modelelor bazate pe subducție. Pentru studiul nostru reținem ideea acțiunii mai multor tipuri de forță asupra corpului prismatic în care s-ar concentra activitatea seismică intermediară, una dintre aceste forțe importante fiind și cea gravitațională.

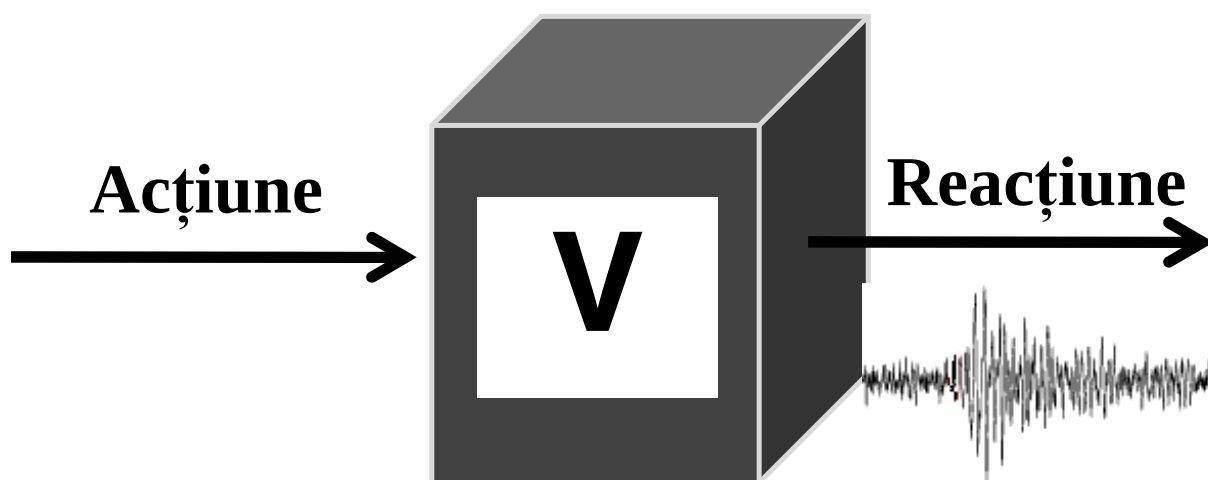
Observații

Toate modelele prezentate susțin existența, în zona Vrancea, a unui fragment care coboară în manta sub acțiunea forței gravifice. Forțele hidrostatice, 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, componentă a forței gravifice la care este supus slab-ul seismic, ar putea controla procesele de acumulare a stresului în zona seismică Vrancea și ar putea contribui la declanșarea cutremurelor de pământ.

2

2. IMPLICAREA MAREELOR TERESTRE ÎN 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 . În figura 2.1 este notată cu r' distanța dintre punctul A și corpul perturbator.

Demonstrația are ca punct de pornire expresia generală a potențialului într-un punct, în cazul nostru $V(A)$ (ecuația 2.2) [MELCHIOR, 1971]:

$$V(A) = V(\rho, \psi) = \frac{G\mu}{r'} \quad (2.2)$$

Conform teoremei lui Pitagora generalizată, în triunghiul AOB este adevărată relația 2.3:

$$r'^2 = r^2 - 2r\rho \cos \psi + \rho^2 = r^2 \left(1 - 2 \frac{\rho}{r} \cos \psi + \frac{\rho^2}{r^2} \right) \quad (2.3)$$

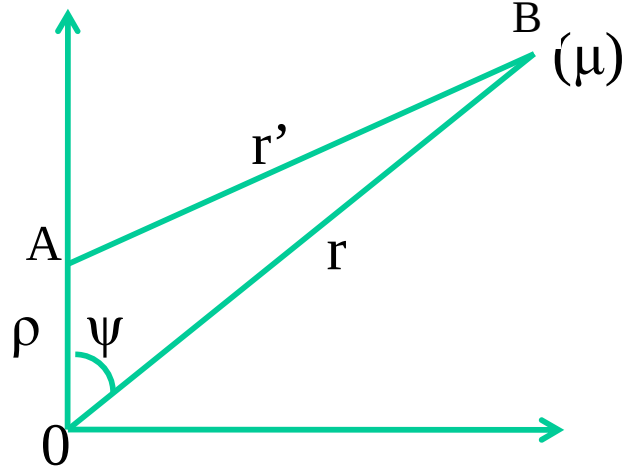


Fig. 2.1 – Schema care stă la baza calculului potențialului de atracție gravitațională exercitat de un corp perturbator extern asupra unui punct oarecare $A(\rho, \psi)$ aflat pe suprafața Pământului (Melchior, 1971).

Folosind notația $\frac{\rho}{r} = h < 1$, și ridicând relația (2.3) la puterea (-1) vom obține :

$$\frac{1}{r'} = \frac{1}{r} (1 - 2h \cos \psi + h^2)^{-\frac{1}{2}} \quad (2.4)$$

Dezvoltăm în serie convergentă, în raport cu h , paranteza din ecuația 2.4:

$$\frac{1}{r'} = \frac{1}{r} \sum_{n=0}^{\infty} h^n P_n(\cos \psi) \quad (2.5)$$

Se derivează în raport cu h ambii termeni ai ecuației 2.6:

$$(1 - 2h \cos \psi + h^2)^{-\frac{1}{2}} = \sum_{n=0}^{\infty} h^n P_n \quad (2.6)$$

Obținem succesiv:

$$(1 - 2h \cos \psi + h^2)^{-\frac{3}{2}} (\cos \psi - h) = \sum_{n=0}^{\infty} n h^{n-1} P_n \quad (2.7)$$

$$(\cos \psi - h) \sum_{n=0}^{\infty} h^n P_n = (1 - 2h \cos \psi + h^2) \sum_{n=0}^{\infty} n h^{n-1} P_n \quad (2.8)$$

Prin identificarea coeficienților în h^n ($n \geq 2$) se obține formula de recurență 2.9, Ossian Bonnet:

$$(n+1)P_{n+1} - (2n+1)\cos \psi P_n + nP_{n-1} = 0 \quad (2.9)$$

Conform acestei relații:

$$\begin{aligned}
 P_0 &= 1 \\
 P_1 &= \cos \psi \\
 P_2 &= \frac{3\cos^2 \psi - 1}{2} \\
 P_3 &= \frac{5\cos^3 \psi - 3\cos \psi}{2} \\
 P_4 &= \frac{35}{8}\cos^4 \psi - \frac{15}{4}\cos^2 \psi + \frac{3}{8}, \quad \text{etc....}
 \end{aligned} \tag{2.10}$$

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. În cazul termenului P_0 recunoaștem valoarea potențialului de atracție dintre masele celor două corpuri concentrate în centrele lor de masă, în timp ce prin P_1 obținem proiecția acestui potențial pe direcția zenitală a punctului A. Alegerea baricentrului ca punct de referință elimină automat acest termen.

Doar 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.

Revenind la figura 2.1, definim matematic potențialul mareic prin ecuația (2.11):

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

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

$$\begin{aligned}
 W_2 &= \frac{1}{2} G\mu \frac{a^2}{r^3} (3\cos^2 \psi - 1) \\
 W_3 &= \frac{1}{2} G\mu \frac{a^3}{r^4} (5\cos^3 \psi - 3\cos \psi)
 \end{aligned} \tag{2.12}$$

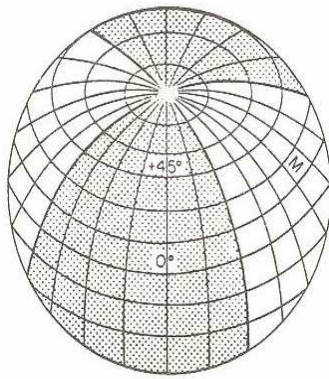
unde a reprezintă raza medie a Pământului. Cum raportul a/r este de aproximativ $1/60$, termenii cu $n > 3$ devin complet neglijabili. W_3 nu este folosit în practică deoarece chiar și tehnicile de măsură evoluat din prezent ar necesita costuri imense și timpi de măsură foarte lungi pentru decelarea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

Luând în considerare relațiile dintre elementele unui triunghi sferic, grupând în mod adecvat mărimile cunoscute cu ajutorul constantei lui Doodson D și introducând distanța medie c dintre Pământ și corpul perturbator, W_2 din ecuația (2.12) se poate scrie astfel:

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

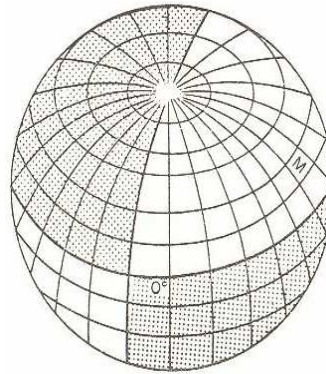
2.2.3. Componentele locale ale mareelor terestre

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).



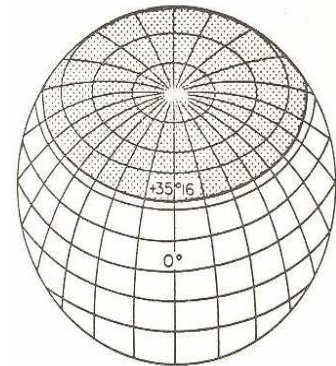
Maree semidiurne

$$\cos^2 \varphi \cos^2 \delta \cos 2H$$



Maree diurne

$$\sin 2\varphi \sin 2\delta \cos H$$



Maree de lungă perioadă

$$3 \left(\sin^2 \varphi - \frac{1}{3} \right) \left(\sin^2 \delta - \frac{1}{3} \right)$$

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

Astfel, conform Pătrașcu [1981], primul termen deformează suprafața echipotențială într-un sferoid ale cărui linii nodale sunt meridianele care fac 45° cu meridianul ce conține corpul perturbator ($2H=90^\circ$). La poli deformația va fi nulă ($\varphi=90^\circ$). Deformația maximă va fi la ecuator ($\varphi=0^\circ$), în special când declinația corpului perturbator va fi nulă ($\delta=0^\circ$), atât pentru $H=0$ cât și pentru $H= \pi/2$. Prin urmare, acest termen implică existența unor maree semidiurne, adică cu perioada de o jumătate de zi solară sau lunară.

Termenul al doilea, care conține pe $\cos H$, deformează suprafața echipotențială într-un sferoid ale cărui linii nodale sunt ecuatorul ($\varphi=0^0$) și meridianele depărtate cu 90^0 deoparte și de alta meridianului ce conține corpul perturbator ($H=\pm 90^0$). Deformarea suprafeței echipotențiale va fi zero la ecuator ($\varphi=0^0$) și poli ($\varphi=90^0$), iar maximă va fi la $\varphi=\pm 45^0$ în meridianul corpului perturbator. Acest termen impune existența unui grup de unde diurne.

Al treilea termen conține doi factori variabili, unul funcție de latitudinea punctului de observație $\left(\sin^2 \varphi - \frac{1}{3}\right)$ și altul funcție de timp $\left(\sin^2 \delta - \frac{1}{3}\right)$. Astfel suprafața echipotențială a Pământului va fi deformată de acest termen într-un sferoid armonic care este simetric în raport cu axa de rotație a Pământului și ale cărui linii nodale rezultă din ecuația $\left(\sin^2 \varphi - \frac{1}{3}\right) = 0$ ca fiind paralele corespunzătoare lui $\varphi = \pm 35^0 16'$. Prezența lui $\sin^2 \delta$ în acest termen face ca dimensiunile sferoidului respectiv să varieze periodic în timp. Luna va impune astfel o pulsație a sferoidului cu o perioadă de aproximativ 14 zile, iar Soarele cu o perioadă de o jumătate de an. Întrucât din combinarea celor doi factori rezultă și un termen constant în timp, acesta va produce o ușoară turtire permanentă a suprafeței echipotențiale. Datorită efectului simultan al Soarelui și Lunii suprafața echipotențială va fi întotdeauna cu 28 cm mai jos la poli și cu 14 cm mai sus la ecuator.

Precizăm că într-un triedru local de referință, fiecare grupă a mareelor terestre se descompune în trei componente locale (Tabelul 2.1): una verticală, una în plan orizontal pe direcția est-vest și o a treia, tot în plan orizontal, dar pe direcția nord-sud [KUMPEL, 1994].

Tabelul 2.1 – Coeficienții geodezici ai diferitelor familii de maree (Melchior, 1971)

Coeficienții geodezici ai diferitelor familii de maree în cele trei componente locale			
Funcția	Potențialul și componenta verticală	Componenta Nord-Sud	Componenta Est-Vest
Zonală	$3\left(\sin^2 \varphi - \frac{1}{3}\right)\left(\sin^2 \delta - \frac{1}{3}\right)$	$-3 \sin 2 \varphi \left(\sin^2 \delta - \frac{1}{3}\right)$	0
Teserală	$\sin 2 \varphi \sin 2 \delta \cos H$	$-2 \cos 2 \varphi \sin 2 \delta \cos H$	$+2 \sin \varphi \sin 2 \delta \sin H$
Sectorială	$\cos^2 \varphi \cos^2 \delta \cos 2 H$	$+ \sin 2 \varphi \cos^2 \delta \cos 2 H$	$+2 \cos \varphi \cos^2 \delta \sin 2 H$

Aceste componente sunt măsurabile cu ajutorul unui gravimetru, pentru componenta verticală, și două clinometre cu lichid sau penduli orizontali pentru componentele orizontale.

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 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 ($=H+180^\circ$)
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 (ecuația 2.14) :

$$a\tau + bs + ch + dp + eN' + fp_s \quad (2.14)$$

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 :

$$a, (b+5), (c+5), (d+5), (e+5), (f+5) \quad (2.15)$$

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 :				
M_2	2τ	2	5	5 5 5
S_2	$2\tau - 2h + 2s$	2	7	3 5 5 5
Q_1	$\tau - 2s + p$	1	3	5 6 5 5
J_1	$\tau + 2s - p$	1	7	5 4 5 5
M_f	$2s$	0	7	5 5 5 5
Specie				
Grup				
Constituent				
Grupele de unde sunt separabile după o luna. Constituentii sunt separabili după un an.				

Exemplu :	
Grupul 16 reunește 6 constituenți principali :	
K_1	165.555
P_1	163.555
S_1	164.556 } 4
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

Figurile 2.3a, 2.3b et 2.3c, preluate 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 în funcție de latitudinea punctului.

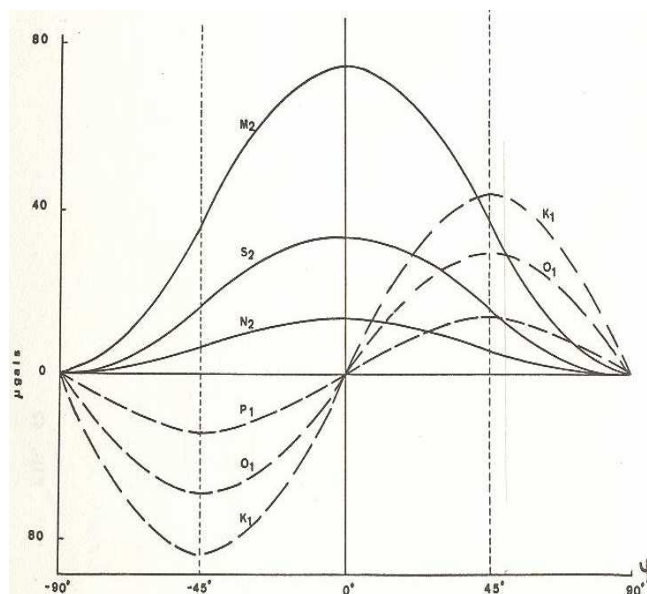


Fig. 2.3a - Variațiile amplitudinii undelor principale ale componentei verticale a forței mareice în funcție de latitudine.

K_1 , O_1 , P_1 : unde teserale diurne

M_2 , S_2 , N_2 : unde sectoriale semidiurne

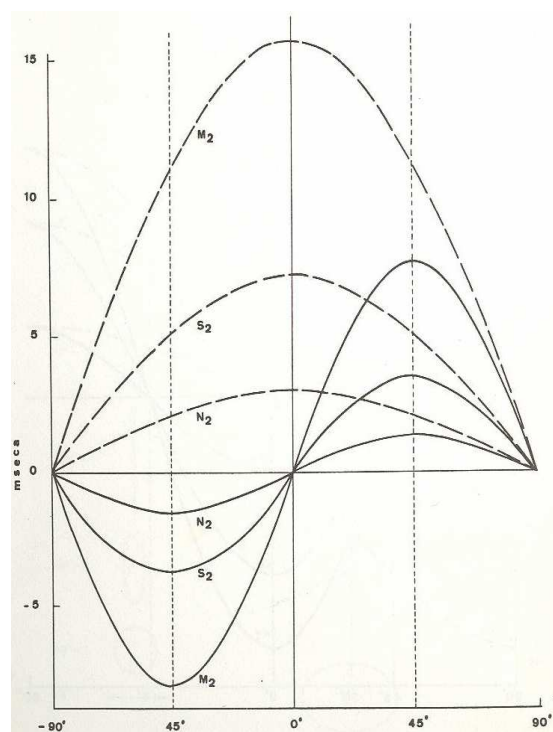


Fig. 2.3b - Variațiile amplitudinii undelor sectoriale semidiurne (M2, S2, N2) ale forței mareice pentru componentele Nord-Sud (linie continuă) și Est-Vest (linie întreruptă) în funcție de latitudine.

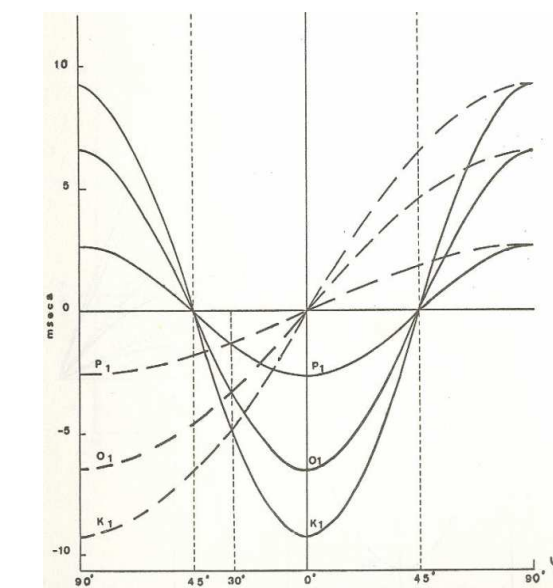


Fig. 2.3c - Variațiile de amplitudine ale undelor tesorale diurne (K1, O1, P1) ale forței mareice corespunzătoare componentelor Nord-Sud (linie continuă) și Est-Vest (linie întreruptă) în funcție de latitudine.

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].

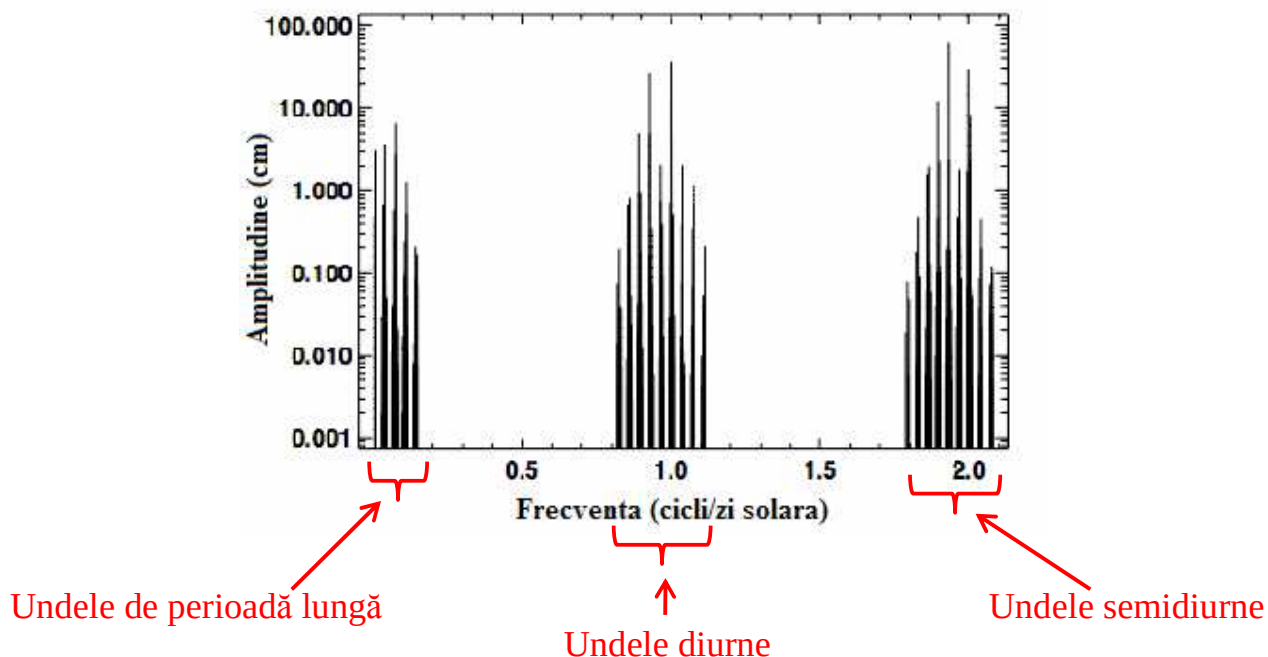


Fig. 2.4 - Spectrul Fourier general al componentelor mareelor terestre (Melchior, 1978).

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

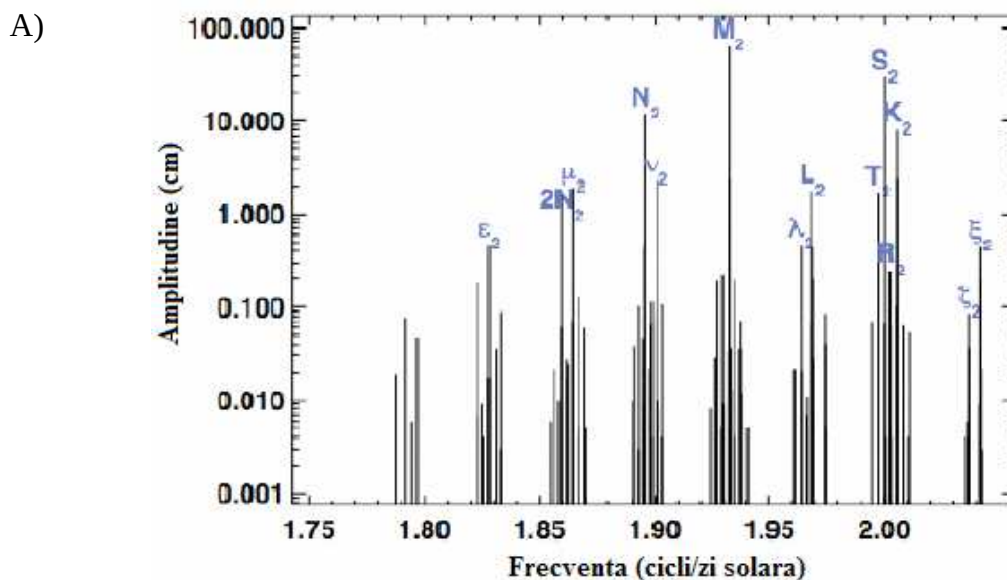


Fig. 2.5a - Spectrul Fourier al componentelor semidiurne (Melchior, 1978).

B)

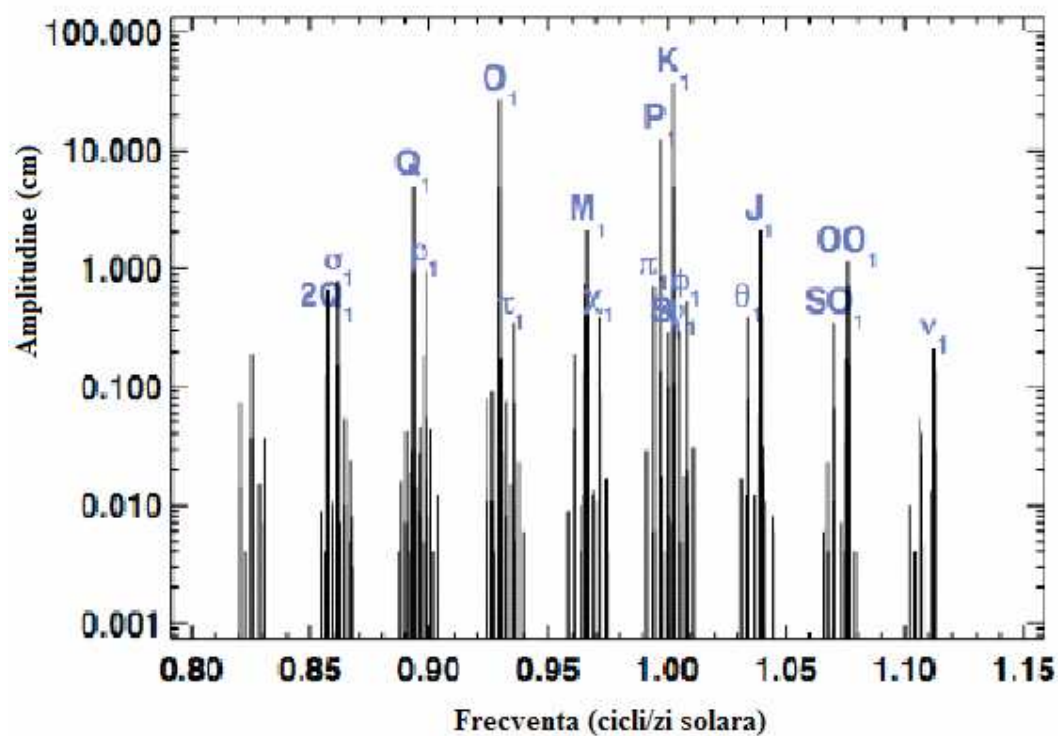


Fig. 2.5b - Spectrul Fourier al componentelor diurne (Melchior, 1978).

C)

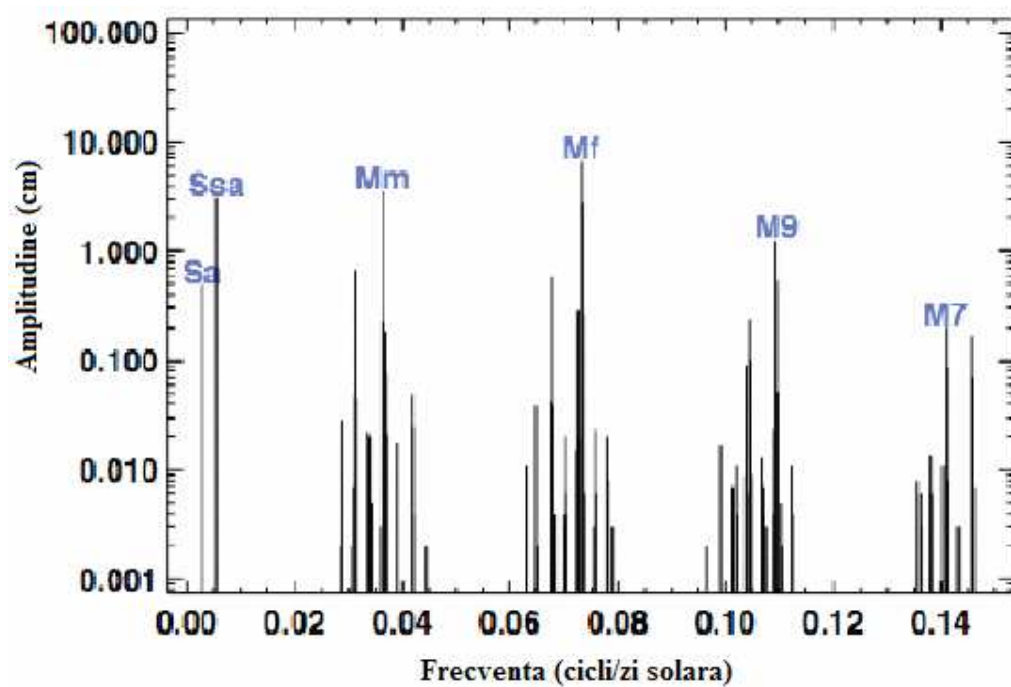


Fig. 2.5c - Spectrul Fourier al componentelor de lungă perioadă (Melchior, 1978)..

2.3. Problema corelației dintre mareele 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 mareelor 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, derivata sau, altfel spus, 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 produs de mareele terestre. 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 rezultante 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 mareele 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 mareele terestre. Primul test de corelație, în acest sens, a fost publicat de către Schuster, 1897, a cărei 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 cutremurele de pământ și mareele terestre 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 mareele 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).

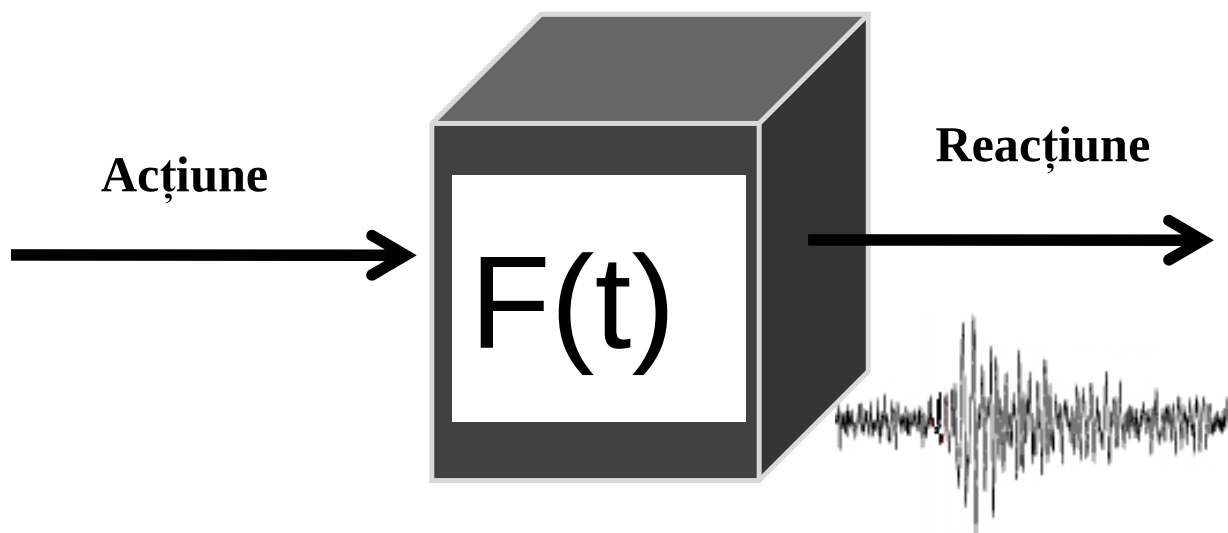
Lucrările recente, cu rezultate deosebit de interesante și pozitive ale autoarei Sashiko Tanaka, ne-au determinat să încercăm urmărirea variației aceluiași parametru statistic legat de corelația maree-cutremure în cazul zonei Vrancea, cu ajutorul unei metode de stacking, numită HiCum (Histogram Cumulating),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

Observații

Bazându-ne pe cele mai recente studii și pe rezultatele lor pozitive în problema existenței corelației, precum și pe rolul important pe care îl poate juca câmpul gradientului de forțe mareice asupra slab-ului seismic supus curenților de convecție din manta și forței arhimedice, 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

3. METODOLOGIA DE ANALIZĂ



3 METODOLOGIA DE ANALIZĂ

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

3.1.1 Tehnici de analiză utilizate în studiul corelației

Periodicitățile lunare și solare au fost cercetate, încă de la început, în seriile temporale globale sau locale de evenimente seismice [SCHUSTER, 1897; MORGAN et al., 1961 ; NAGASAWA, 1973 ; LAMMLEIN et al., 1974, NECOVETICS, 1984, NIKOLAYEV, 1997a, 1997b] sau în cele ce însoțeau erupțiile vulcanice [HAMILTON, 1973; EMTER, 1997].

Într-un număr important de studii, momentul declanșării cutremurului a fost localizat pe curba mareelor 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

Factorul cel mai probabil ce ar putea controla momentul declanșării unui cutremur de pământ este stresul, dar relația dintre componentele mareice și valoarea stresului implicat este complicată.

Și mai dificilă este explicația legăturii dintre mareele terestre și mecanismele fizice ale ruperii pe falie [SCHOLZ et al., 1973, WYSS, 1973]. Cea mai bună metodă ar fi examinarea stresului în relație cu planul de falie [KLEIN, 1976].

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. Puține au fost studiile care au ținut seama de acest aspect și rezultatele lor par să fie pozitive în cazul în care au fost respectate și alte condiții pe care le vom preciza în continuare.

Astfel, în regiunile seismice oceanice sau continentale situate până la 100 km de țărm sau în cazul unei abordări globale a corelației dintre mareele terestre și cutremurele de pământ, trebuia să se ia în considerare sarcina suplimentară adusă de marea oceanică sau așa numitul loading oceanic. Ignorarea ei a condus, evident, la rezultate negative privind corelația maree-cutremure [TANAKA et al., 2002].

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 mareele 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 RUYSBEKE 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 fază și nu unei faze anume (Fig. 3.1).

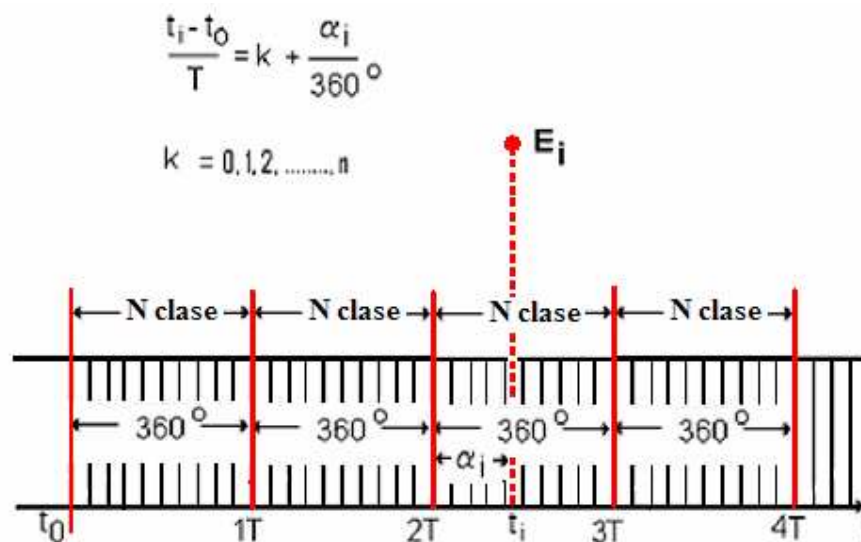


Fig. 3.1. – Schema de principiu a metodei de stacking HiCum. Împărțirea seriei temporale de evenimente în intervale egale cu perioada de timp T , divizată ulterior într-un număr de N clase (sectoare) echidistante reprezentând, fiecare, faza α_i sau intervalul de fază α_i în care un eveniment E_i are 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 fază 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 fază corespunzător, ceea ce ne va permite construirea unei histograme în care numărul claselor corespunde fazelor sau intervalelor de fază. Mai trebuie precizat că momentul de referință t_0 se alege în funcție de valoarea la care amplitudinea undei modulatorie este maximă înainte de primul eveniment seismic considerat.

Etapă următoare constă în interpolarea histogramei 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 componentei 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 cosinusoidă de perioadă bine precizată, ceea ce corespunde unei viteze unghiulare cunoscute, ω_0 (Ecuația 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):

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

Pentru simplificarea calculelor, considerăm media egală cu zero [BLOOMFIELD, 1976, BENDAT and PERSOL, 1986, LOMB, 1976] și scriem ecuația (3.1) care nu este liniară în X și ϕ , sub o altă formă (Ecuația. 3.3):

$$x_n = A \cos(\omega_0 n dt) + B \sin(\omega_0 n dt) + \varepsilon_n \quad n=0, 1, \dots, N-1 \quad (3.3)$$

unde $A = X \cos \phi$ și $B = -X \sin \phi$

Acum parametrul E este quadratic în A și B . Minimizarea valorii lui E se reduce la rezolvarea sistemului de ecuații obținut prin egalarea cu zero a următoarelor derivate

$$\frac{\partial E}{\partial A} = 0 \quad \text{și} \quad \frac{\partial E}{\partial B} = 0. \text{ Se obține matricea din ecuația (3.4):}$$

$$\begin{bmatrix} \sum \cos^2(\omega_0 n dt) & \sum \cos(\omega_0 n dt) \sin(\omega_0 n dt) \\ \sum \cos(\omega_0 n dt) \sin(\omega_0 n dt) & \sum \sin^2(\omega_0 n dt) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A \\ B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum x_n \cos(\omega_0 n dt) \\ \sum x_n \sin(\omega_0 n dt) \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

Simplificăm matricea din ecuația (3.4), utilizând identitățile trigonometrice următoare (Ecuația. 3.5) :

$$\begin{aligned}
\sum_{n=0}^{N-1} \cos^2(\omega_0 n dt) &= \frac{N}{2} (1 + D_N(2\omega_0 dt) \cos(\omega_0 N dt)) \\
\sum_{n=0}^{N-1} \sin^2(\omega_0 n dt) &= \frac{N}{2} (1 - D_N(2\omega_0 dt) \cos(\omega_0 N dt)) \\
\sum_{n=0}^{N-1} \cos(\omega_0 n dt) \sin(\omega_0 n dt) &= \frac{N}{2} D_N(2\omega_0 dt) \cos(\omega_0 N dt)
\end{aligned} \tag{3.5}$$

unde D_N este nucleul lui Dirichlet (Fig.3.2 și Ecuația 3.6):

$$D_N(a) = \frac{\sin\left(\frac{Na}{2}\right)}{N \sin\left(\frac{a}{2}\right)} \tag{3.6}$$

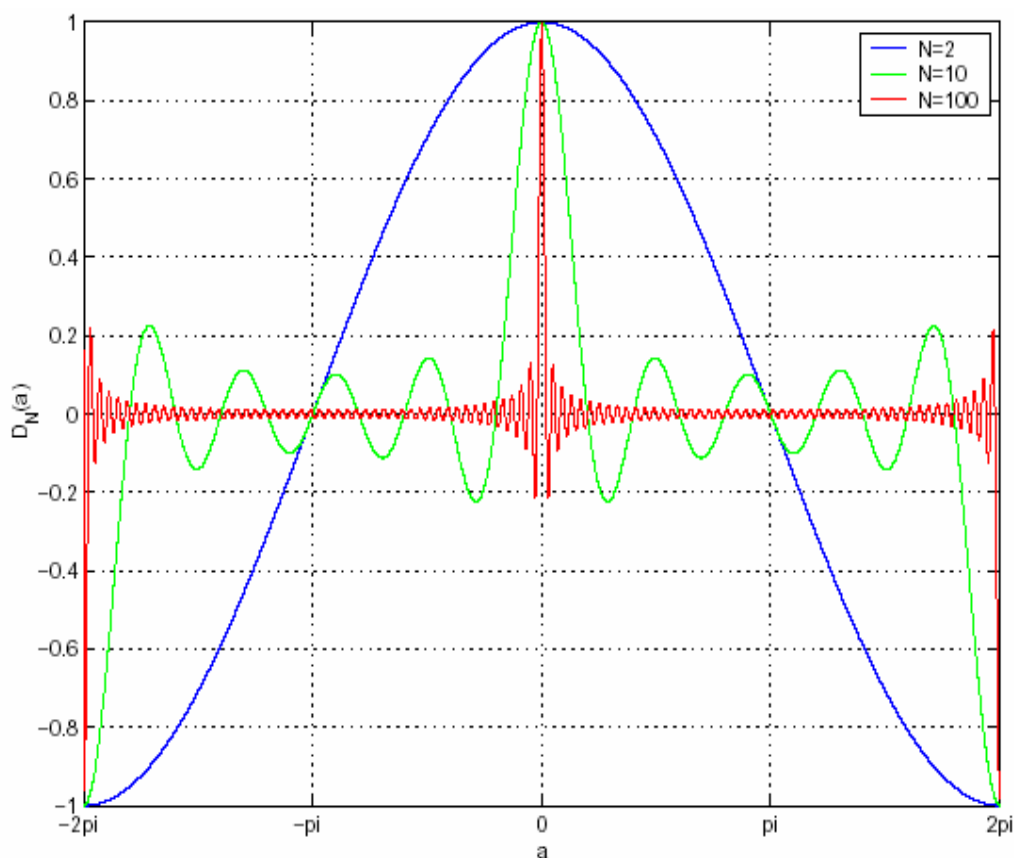


Fig. 3.2 – Funcțiile nucleului Dirichlet pentru diferite valori ale numărului de clase N ale distribuției date

Dacă

$$\omega_0 = k/4\pi N dt \quad k=1,2, \dots, N-1 \tag{3.7}$$

atunci $D_N(2\omega_0 dt) = 0$ și matricea din ecuația (3.4) devine diagonală, adică funcțiile $\sin$ și $\cos$ vor fi ortogonale pentru frecvențe particulare de forma celor din ecuația (3.7), ω_0 .

Acum se poate calcula ușor coeficienții A și B (Ecuația 3.8):

$$A = \frac{2}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x_n \cos(\omega_0 n dt) \quad (3.8)$$

$$B = \frac{2}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x_n \sin(\omega_0 n dt)$$

care sunt coeficienții Fourier standard [STEARN, 1975].

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

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

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

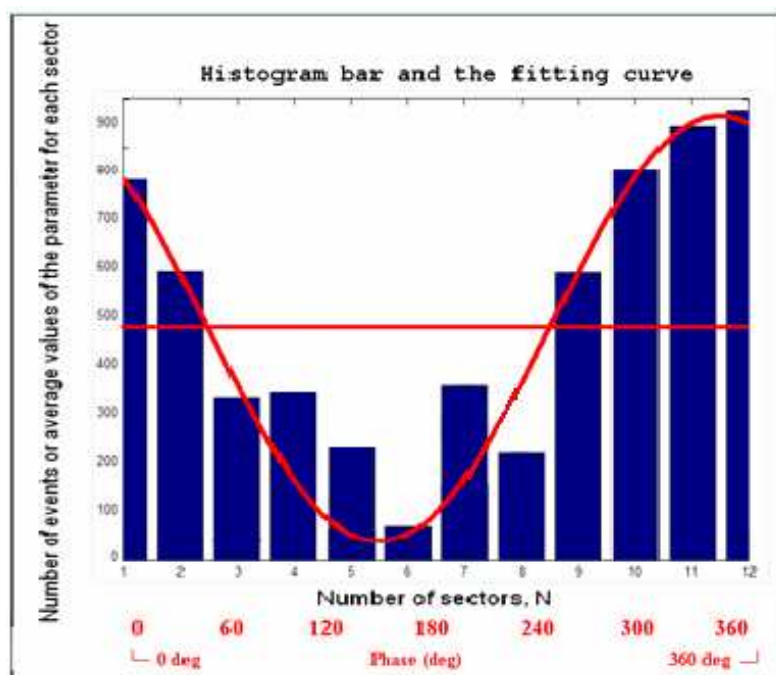


Fig. 3.3. –Histograma interpolată printr-o funcție cosinusoidală.

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.

În exemplele ce urmează am folosit în scopul comparării spectrului Fourier cu metoda de stacking HiCum, patru seturi de date temporale: înregistrări pe o perioadă de un an efectuate cu un gravimetru supraconductor la observatorul Membach din Belgia, marea sintetică, presiunea atmosferică și datele reziduale pentru aceeași perioadă și același observator (Fig. 3.4).

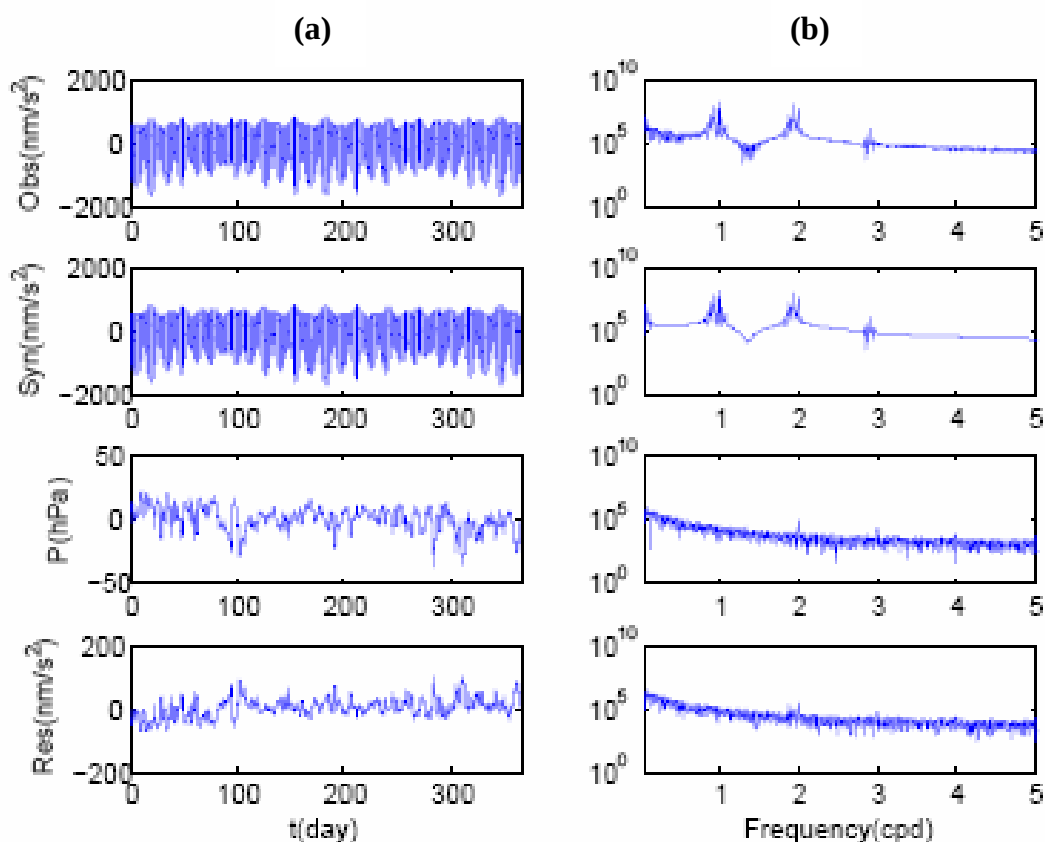


Fig. 3.4. – (a) 365 de zile de date înregistrate cu gravimetrul supraconductor (Membach – Belgia), marea sintetică corespunzătoare, presiunea atmosferică și datele reziduale pentru aceeași perioadă, precum și (b) spectrele Fourier corespunzătoare fiecărui caz în parte (van Ruymbeke et al., 2007).

Rezultatele analizei HiCum asupra acestor date luând în considerare, pentru fiecare caz în parte, frecvențele corespunzătoare undelor mareice K1, O1, M2 și S2, arată (Fig. 3.5), în comparație cu spectrul Fourier din figura 3.4, puterea de rezoluție a acestei metode de stacking capabilă să detecteze prezența frecvențelor amintite acolo unde spectrul Fourier nu ar putea face distincție ca urmare a nivelului ridicat al zgomotului de semnal.

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.

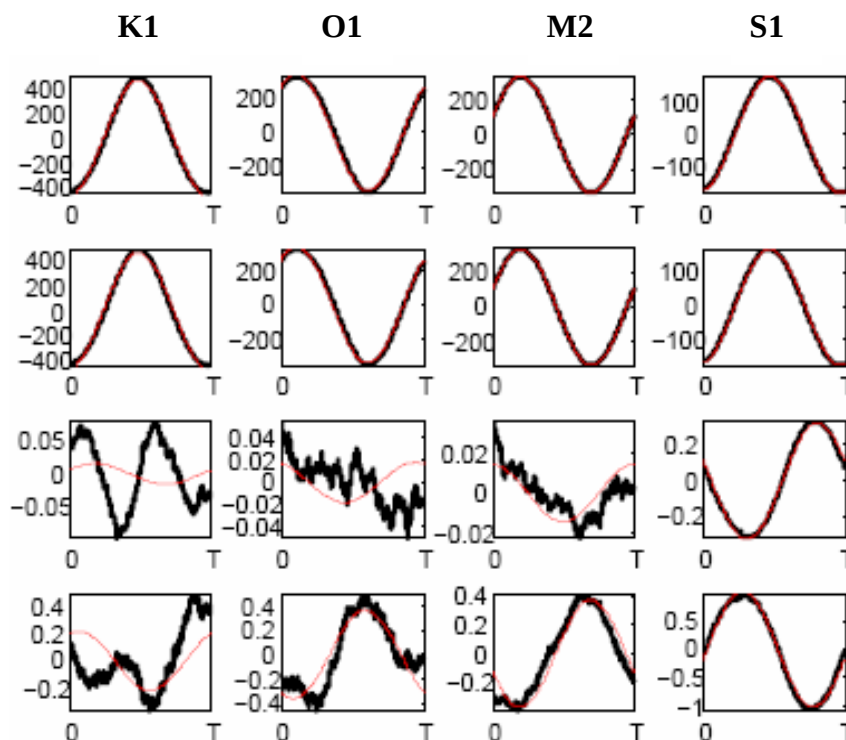


Fig. 3.5. – Rezultatul aplicării metodei de stacking HiCum folosind perioadele undelor mareice K1, O1, M2 et S2 pentru cele patru seturi de date menționate (van Ruyambeke et al., 2007).

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. Ea nu exclude însă existența aliasingului al cărui efect poate fi diminuat prin cunoașterea valorii exacte a perioadei implicate și a semnificației momentului de referință ales.

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 sinusoidă 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 rezultat ***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 rezultat 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 coeficient 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.

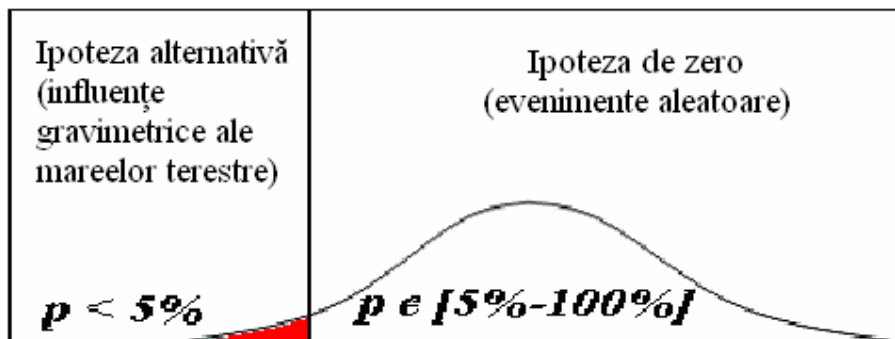


Fig. 3.6 – Definirea coeficientului statistic p

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, conform figurii 3.6.

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 sinusoidelor 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 cosinusoidelor cu care se interpoolează 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) :

$$p_{per} = m / n \quad (3.13)$$

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, DICICCIO 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]. Conform principii acestei metode, după fiecare permutare aleatoare a valorilor distribuției inițiale sau de referință, spre deosebire de testul permutărilor care nu mai permite efectuarea aceleiași permutări asupra distribuției inițiale, în cazul metodei Bootstrap se poate repeta aceeași variantă a permutării. Singura condiție este păstrarea dimensiunii inițiale a distribuției de referință adică a numărului ei de clase. Se poate observa că populația inițială, echivalentul numărului de evenimente seismice luate în calcul, poate să difere după fiecare permutare.

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 dinainte 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 $p < 5\%$.

În acest caz, se păstrează valoarea momentului de timp inițial și a celui final ce delimitează fereastra, iar celelalte momente de timp corespunzătoare evenimentelor seismice sunt supuse unei proceduri matematice de randomizare.

După aceasta, sunt parcurse toate etapele obișnuite de analiză. În final se obține coeficientul p . Această procedură 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 PIERSON, 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). Dacă procentul obținut depășește valoarea de 5%, vom considera că nu există o corelație reală între componenta mareică aleasă și cutremurele de pământ în fereastra inițială analizată. Pragul de 5%, deși ales după criteriile folosite uzual în asemenea cazuri de alți autori, rămâne în discuție.

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 maree-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 maree-cutremure de pământ, ne va permite calculul intervalului de încredere pentru parametrul în discuție; în cazul nostru este vorba de amplitudinea co-sinusoidei 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.

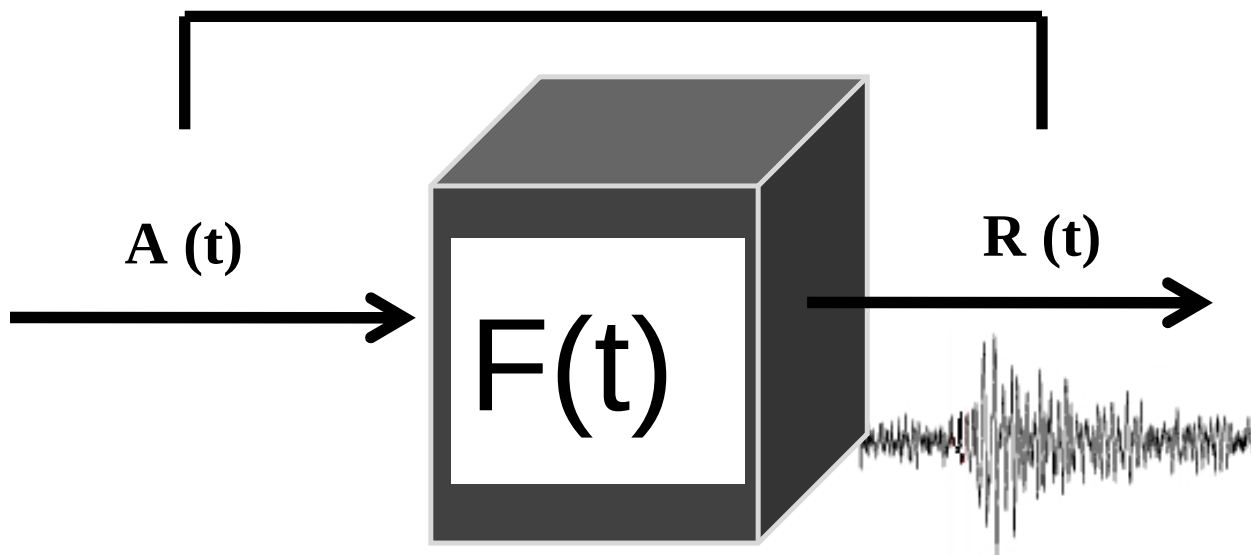
Considerăm **coeficientul p ca pe un potențial factor precursor** în analiza activității seismice intermediare a unei zone seismice datorită posibilității urmăririi variațiilor lui în timp cu ajutorul ferestrelor mobile analizate.

Alături de analiza corelației dintre mareele 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 mareelor terestre**.

4

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

HiCum + teste



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 mareele 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 mareelor 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.

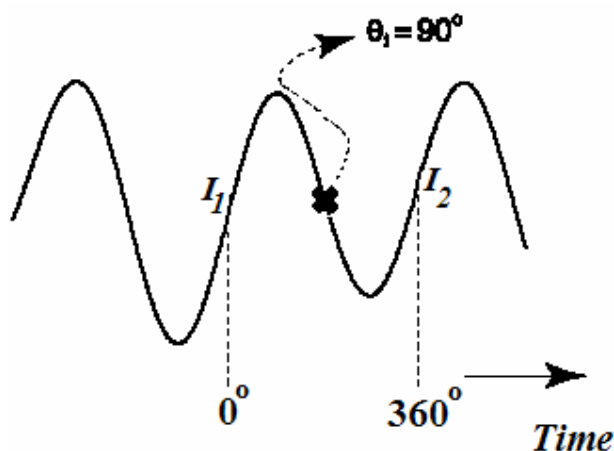


Fig. 4.1. – Definirea fazei pe curba de maree. Intervalul dintre cele două puncte de inflexiune I_1 și I_2 se împarte în diviziuni echidistante.

Histograma finală, corespunzătoare distribuției tuturor evenimentelor seismice în raport cu cele 360° pe curba de potențial mareic, indică faza sau fazele preferențiale în

cazul în care acest lucru este prezent, dar toate acestea doar observațional, fără vreo validare matematică a rezultatului.

Au fost analizate toate cutremurele de pământ fără a se ține seama de adâncimea lor, de tipul de cutremur (șoc principal, preșoc sau post șoc), de componenta mareică (solară sau lunară semidiurnă, diurnă sau de lungă perioadă) care ar putea avea un rol distinct față de celelalte. Trebuie precizat că rezultatele au fost obținute lucrând direct pe curba teoretică de potențial al mareelor terestre. Cu toate limitările menționate, aceste rezultate au demonstrat existența corelației între mareele 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 potențialului 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 coeficientului statistic p calculat înainte și după producerea cutremurelor cu magnitudinea $M_w \geq 5.0$. Aceste evenimente sunt prezentate în Tabelul 4.1.

Tabelul 4.1 – Cutremurele de pământ intermediare din Vrancea cu magnitudinea $M_w \geq 5.0$ și adâncimea $h \geq 60$ km (1970-2007)

An	Lună	Zi	Oră	Min	Sec	Lat. (grd.)	Long. (grd.)	Adâncime (km)	Mag. (Mw)
1973	8	20	15	18	28.3	45.74	26.48	-73	6
1975	12	27	18	32	21.2	45.75	26.74	-129	5.3
1976	10	1	17	50	43.2	45.68	26.49	-146	6
1977	3	4	19	21	54.1	45.77	26.76	-94	7.4
1978	1	1	7	40	14.6	45.72	26.46	-136.4	5.1
1978	10	2	20	28	52.6	45.72	26.48	-164.3	5.2
1979	5	31	7	20	6.3	45.55	26.33	-120	5.3
1979	9	11	15	36	54.2	45.56	26.3	-154.3	5.3
1980	1	14	15	7	54.5	45.78	26.6	-141	5.1
1981	7	18	0	2	58.6	45.69	26.42	-166.1	5.5
1983	1	25	7	34	50	45.75	26.64	-149.8	5.6
1985	8	1	11	17	35.9	45.79	26.77	-118.6	5.2
1985	8	1	14	35	4.3	45.73	26.62	-93.5	5.8
1986	8	30	21	28	37	45.52	26.49	-131.4	7.1
1987	9	4	1	40	29.9	45.68	26.43	-160.2	5
1990	5	30	10	40	6.4	45.83	26.89	-90.9	6.9
1990	5	31	0	17	47.9	45.85	26.91	-86.9	6.4
1999	4	28	8	47	56	45.49	26.27	-151.1	5.3
2000	4	6	0	10	38.8	45.75	26.64	-143.4	5
2004	10	27	20	34	36.4	45.78	26.73	-98.6	6
2005	5	14	1	53	21.5	45.68	26.54	-148.3	5.1

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, 2002b, 2006], ne-au 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 mareelor 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 mareelor terestre (Tabelul 4.2).

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

Componente ale mareelor 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 declinațională	075.555	13.66079
MM – Undă L eliptică	065.455	27.55454
SSA – Undă S declinațională	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 mareele 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 lucru 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 (Tabelul 4.3).

Tabelul 4.3 – Valorile coeficientului statistic p în cazul celor două teste statistice pentru principalele componente ale mareelor terestre

Componenta mareică	Coeficientul obținut prin testul lui Schuster P_s (%)	Coeficientul obținut prin testul permutărilor P_{per} (%)
S2	8.20	9.14
M2	42.40	39.70
N2	36.95	34.90
K1	67.00	49.33
P1	79.56	88.54
O1	50.41	60.45
MF	70.33	82.34
MM	53.82	64.82
SSA	64.81	68.26
SA	4.43	5.53

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 mareelor terestre și cutremurele de pământ vrâncene atât 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 mareelor 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. Pentru a aplica metoda de stacking HiCum avem nevoie de un interval mai mare decât cel egal cu perioada însăși a componentei de maree terestră. Pasul de deplasare a ferestrei a fost de 30 de zile, dar au existat și analize în care s-a folosit un pas de doar o zi, calculându-se coeficientul p prin intermediul ambelor teste statistice, testul lui Schuster și testul permutărilor. 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 în setul de reprezentări grafice, de la Fig. 4.2 la Fig. 4.21, precum și în figura de sinteză 4.22a. 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 mic de evenimente seismice. Metoda HiCum și testele statistice aplicate în ferestre mobile pentru aceste intervale de timp sunt folosite la limita condiției impuse de teoria statistică: minimum 10 evenimente seismice. Reprezentările 3D și 2D marchează foarte bine acest aspect. Interpretarea rezultatelor obținute pentru aceste intervale trebuie făcută cu prudența corespunzătoare. Nu este exclus însă ca ele să evidențieze puterea de aplicație a metodologiei de lucru pentru cazuri limită.

Rezultate obținute pe baza componentei S2 a mareelor terestre

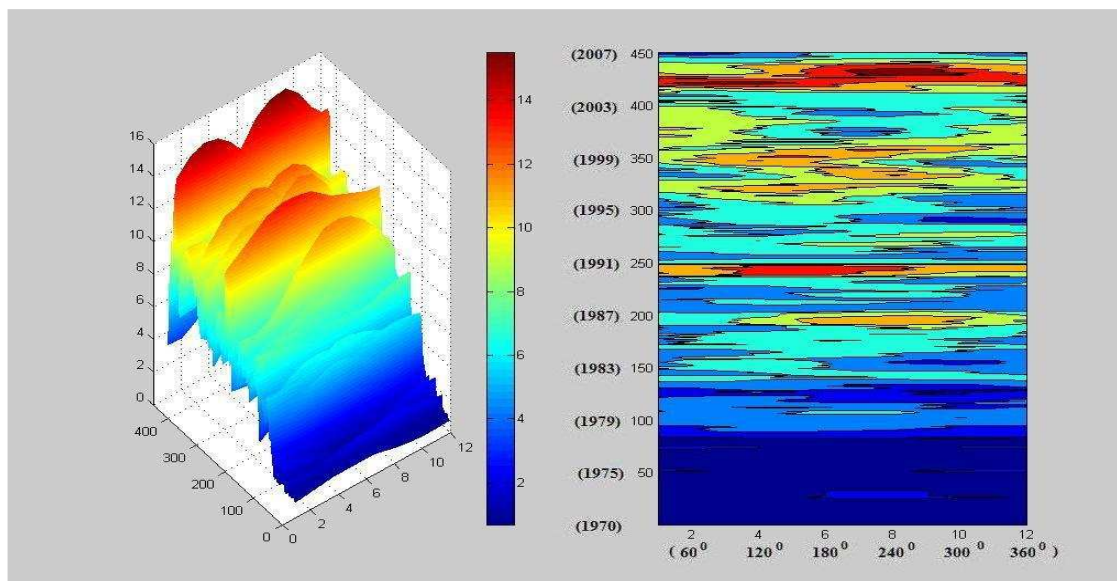


Fig. 4.2 - Distribuția 3D (în stânga figurii) a amplitudinilor curbelor de interpolare obținute prin metoda de stacking Hicum și exprimată în număr de evenimente seismice, în cazul unei ferestre mobile de 365.24 zile și un pas de alunecare de 30 zile. În dreapta este reprezentarea 2D a aceluiași lucru.

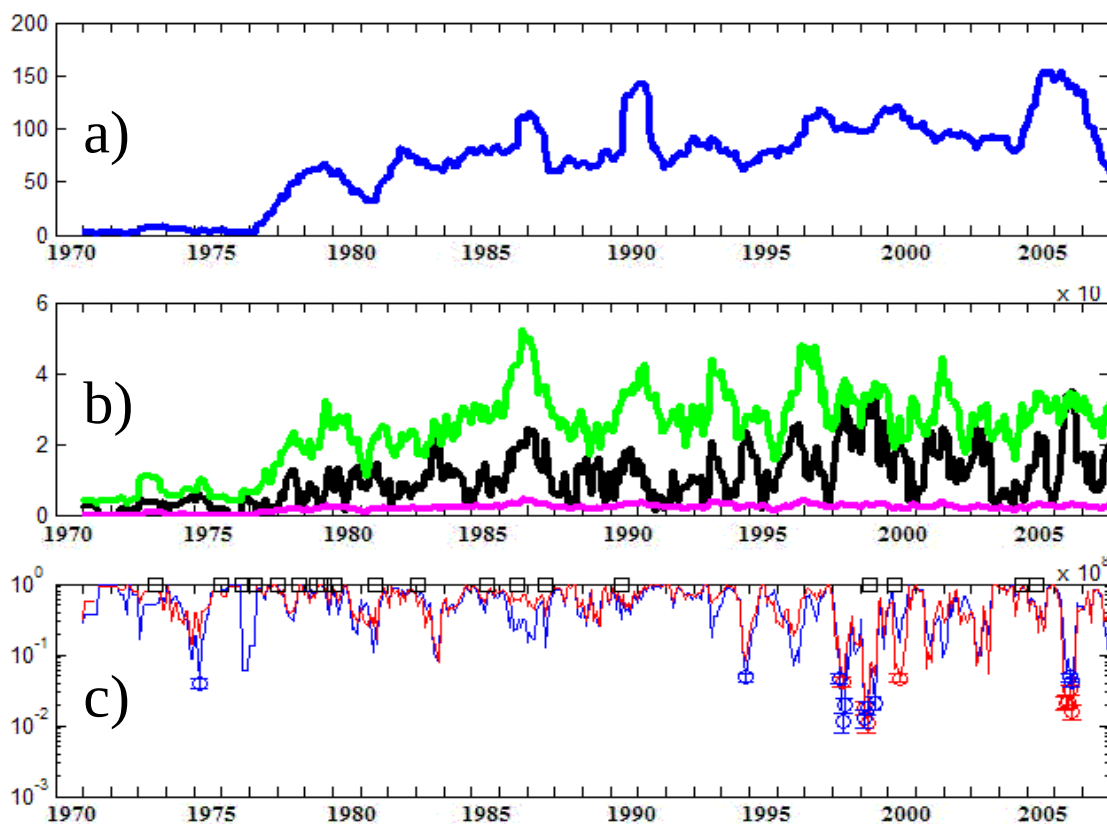


Fig. 4.3. - a) Variația temporală a numărului de evenimente seismice în fiecare fereastră mobilă; b) Valorile limită ale intervalului de încredere obținut prin metoda Bootstrap (magenta pentru limita inferioară și verde pentru cea superioară) pentru amplitudinea cosinusoidei HiCum în fiecare fereastră 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.

Rezultate obținute pe baza componentei M2 a mareelor terestre

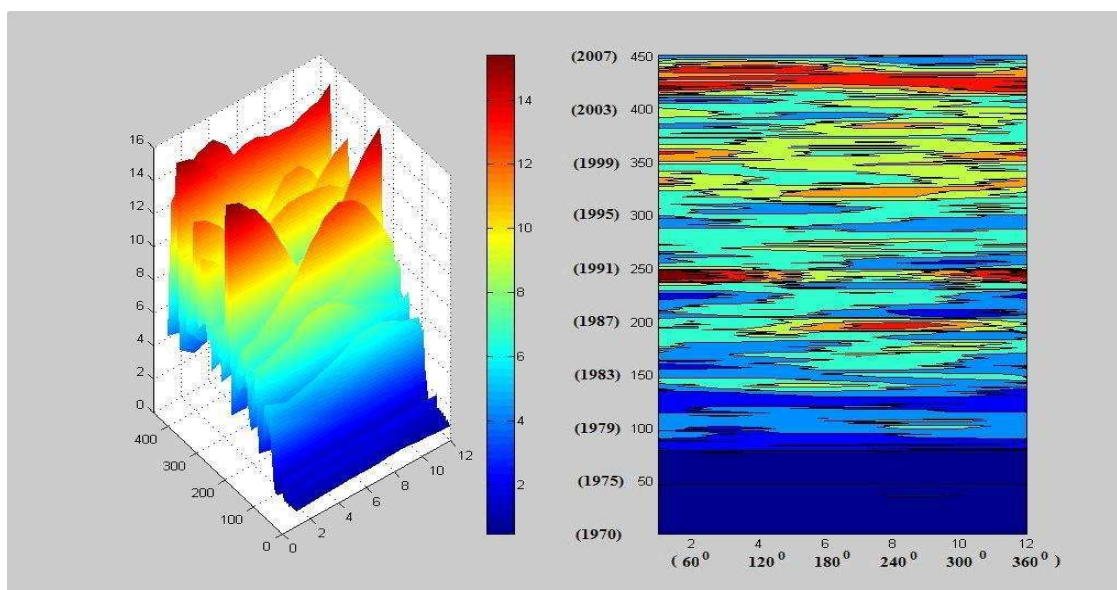


Fig. 4.4 - Distribuția 3D (în stânga figurii) a amplitudinilor curbelor de interpolare obținute prin metoda de stacking Hicum și exprimată în număr de evenimente seismice, în cazul unei ferestre mobile de 365.24 zile și un pas de alunecare de 30 zile. În dreapta este reprezentarea 2D a aceluiași lucru.

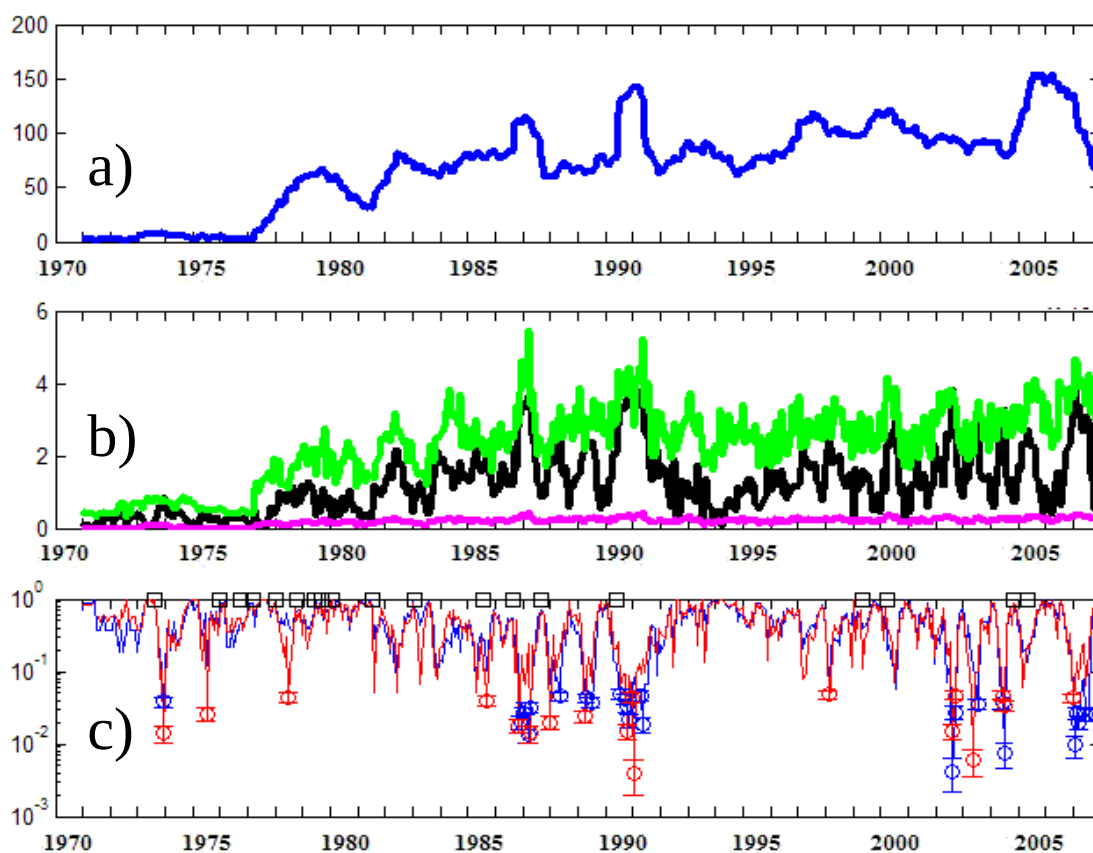


Fig. 4.5 - a) Variația temporală a numărului de evenimente seismice în fiecare fereastră mobilă; b) Valorile limită ale intervalului de încredere obținut prin metoda Bootstrap (magenta pentru limita inferioară și verde pentru cea superioară) pentru amplitudinea cosinusoidei HiCum în fiecare fereastră 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.

Rezultate obținute pe baza componentei N2 a mareelor terestre

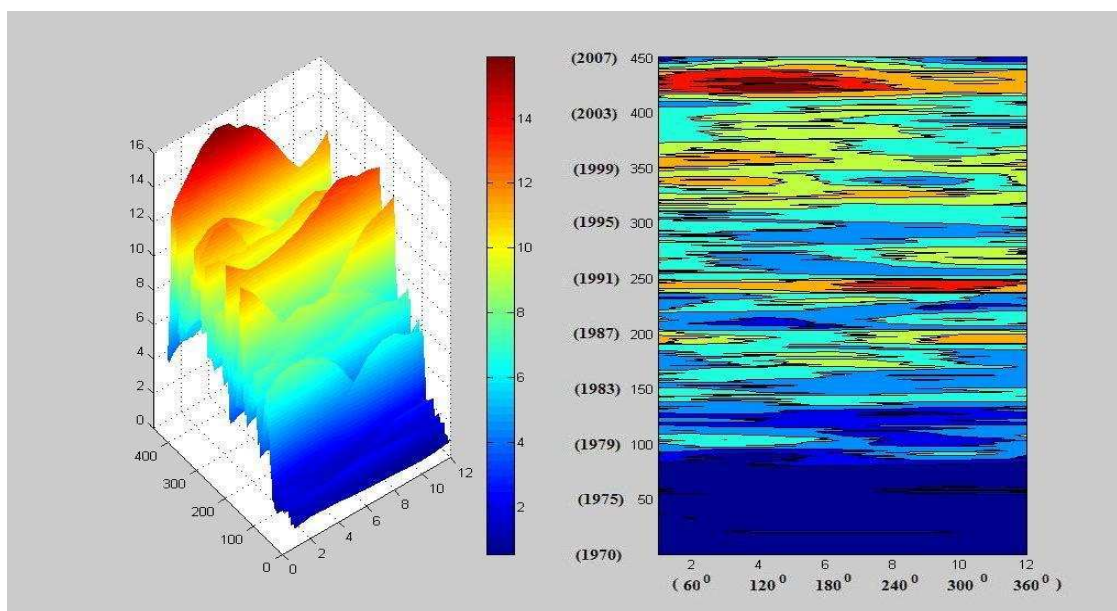


Fig. 4.6. - Distribuția 3D (în stânga figurii) a amplitudinilor curbelor de interpolare obținute prin metoda de stacking Hicum și exprimată în număr de evenimente seismice, în cazul unei ferestre mobile de 365.24 zile și un pas de alunecare de 30 zile. În dreapta este reprezentarea 2D a aceluiași lucru.

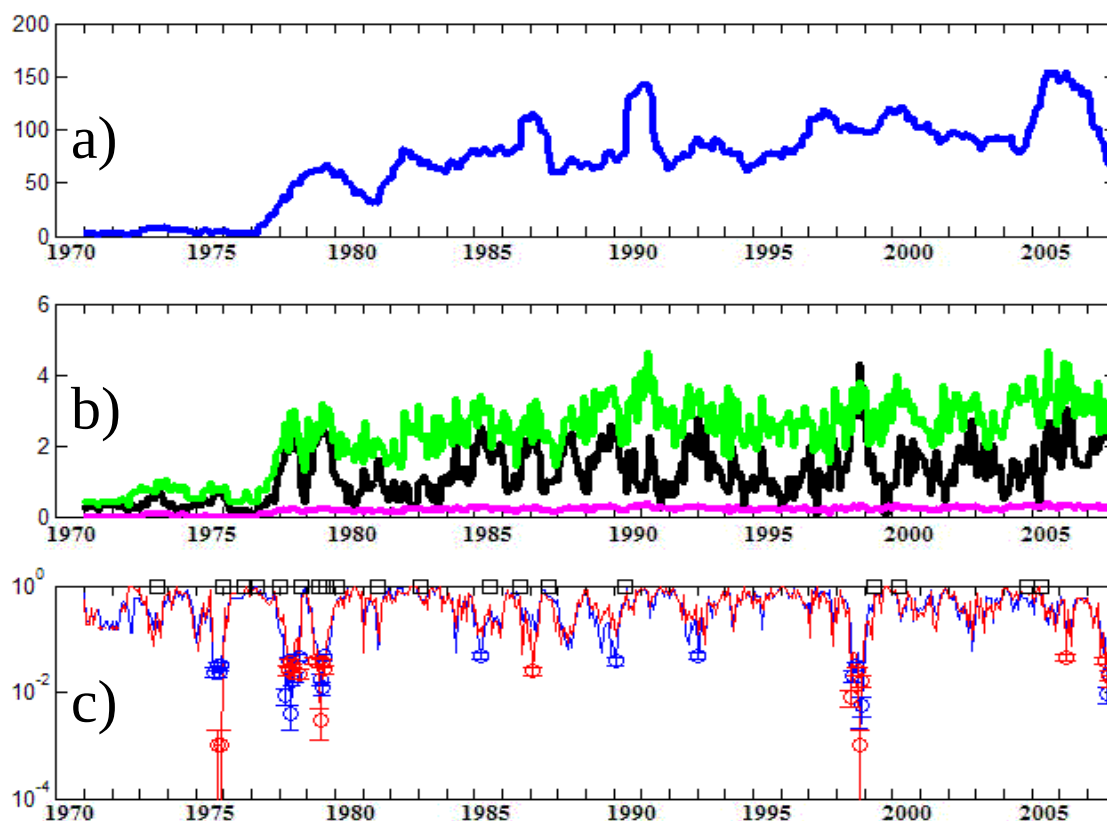


Fig. 4.7. - a) Variația temporală a numărului de evenimente seismice în fiecare fereastră mobilă; b) Valorile limită ale intervalului de încredere obținut prin metoda Bootstrap (magenta pentru limita inferioară și verde pentru cea superioară) pentru amplitudinea cosinusoidei HiCum în fiecare fereastră 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.

Rezultate obținute pe baza componentei K1 a mareelor terestre

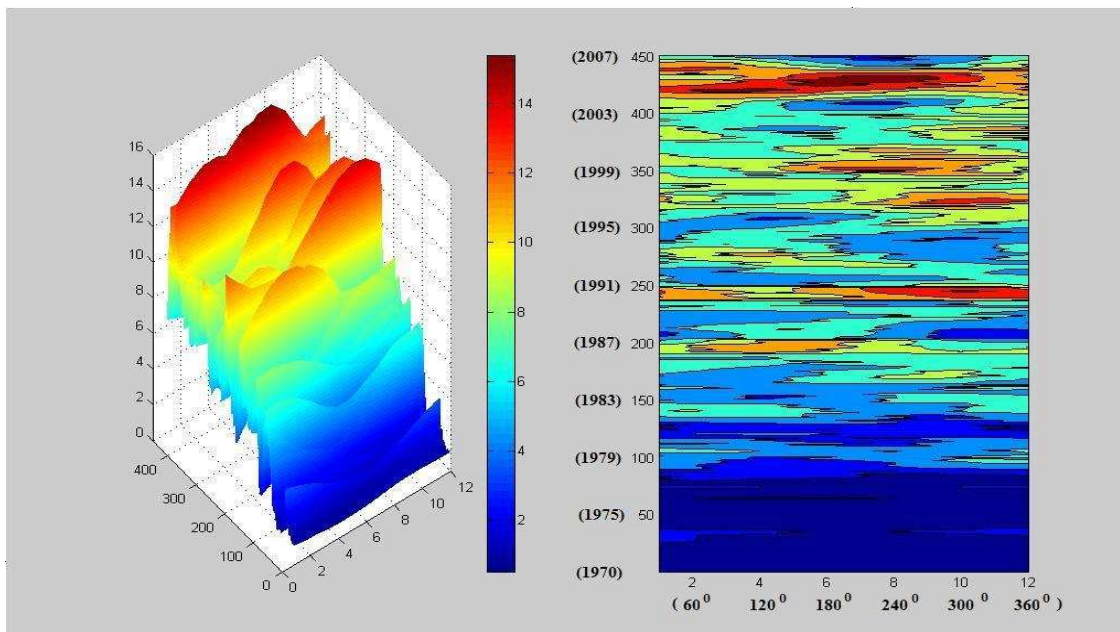


Fig. 4.8. -- Distribuția 3D (în stânga figurii) a amplitudinilor curbelor de interpolare obținute prin metoda de stacking Hicum și exprimată în număr de evenimente seismice, în cazul unei ferestre mobile de 365.24 zile și un pas de alunecare de 30 zile. În dreapta este reprezentarea 2D a aceluiași lucru.

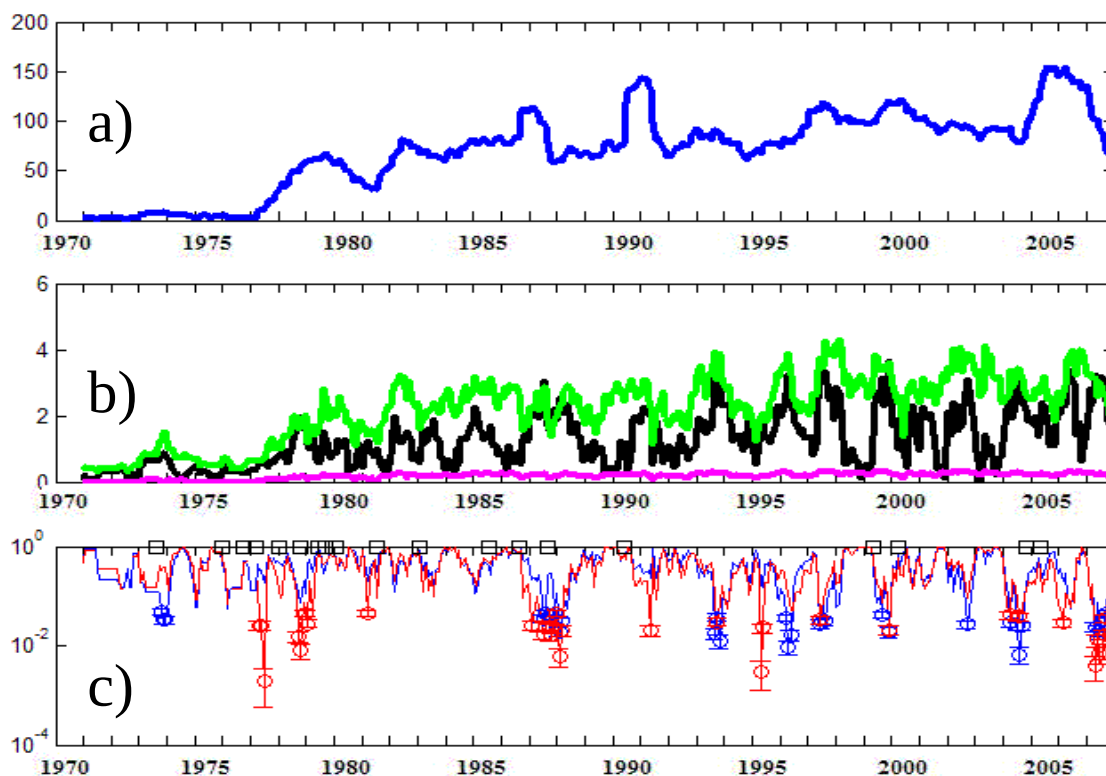


Fig. 4.9. - a) Variația temporală a numărului de evenimente seismice în fiecare fereastră mobilă; b) Valorile limită ale intervalului de încredere obținut prin metoda Bootstrap (magenta pentru limita inferioară și verde pentru cea superioară) pentru amplitudinea cosinusoidei HiCum în fiecare fereastră 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.

Rezultate obținute pe baza componentei P1 a mareelor terestre

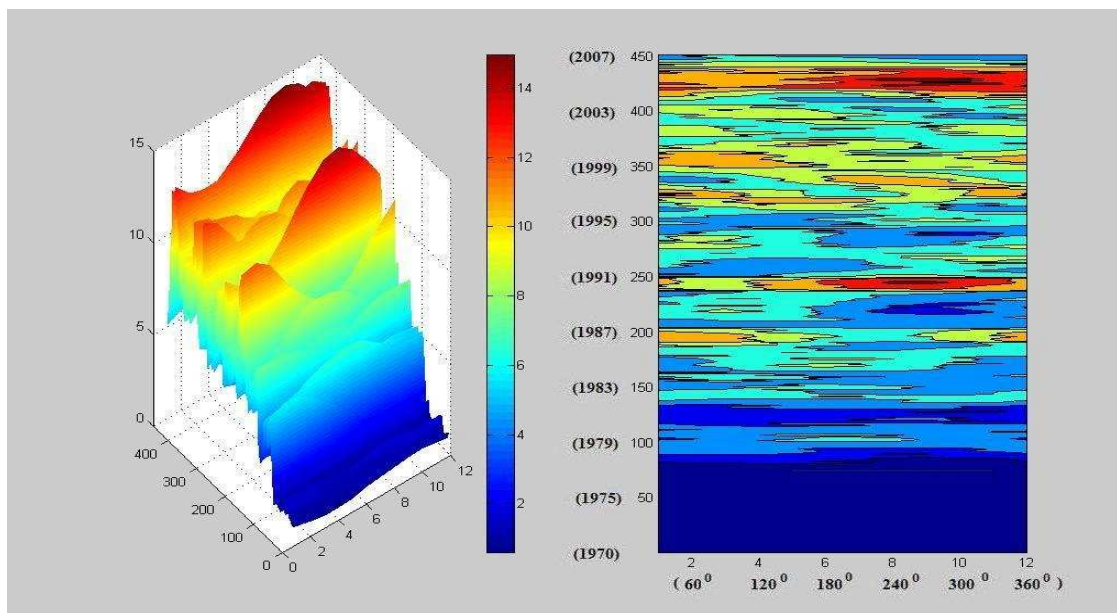


Fig. 4.10. - Distribuția 3D (în stânga figurii) a amplitudinilor curbelor de interpolare obținute prin metoda de stacking Hicum și exprimată în număr de evenimente seismice, în cazul unei ferestre mobile de 365.24 zile și un pas de alunecare de 30 zile. În dreapta este reprezentarea 2D a aceluiași lucru.

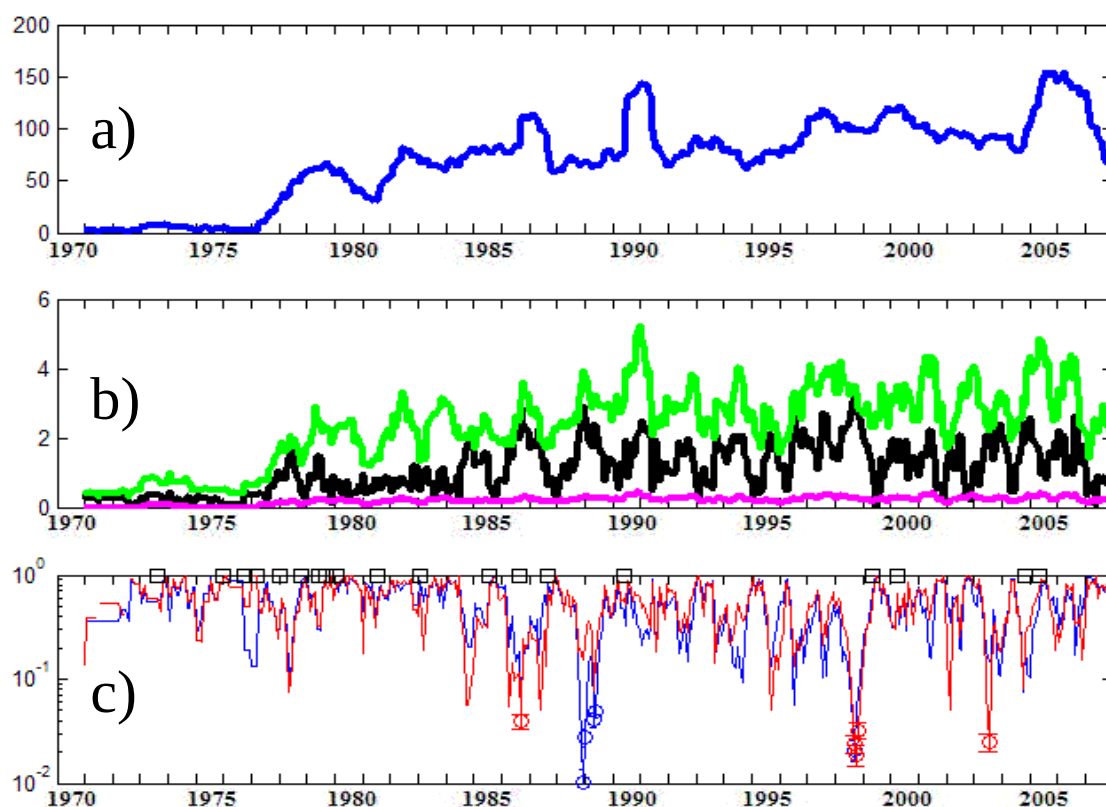


Fig. 4.11. - a) Variația temporală a numărului de evenimente seismice în fiecare fereastră mobilă; b) Valorile limită ale intervalului de încredere obținut prin metoda Bootstrap (magenta pentru limita inferioară și verde pentru cea superioară) pentru amplitudinea cosinusoidei HiCum în fiecare fereastră 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.

Rezultate obținute pe baza componentei O1 a mareelor terestre

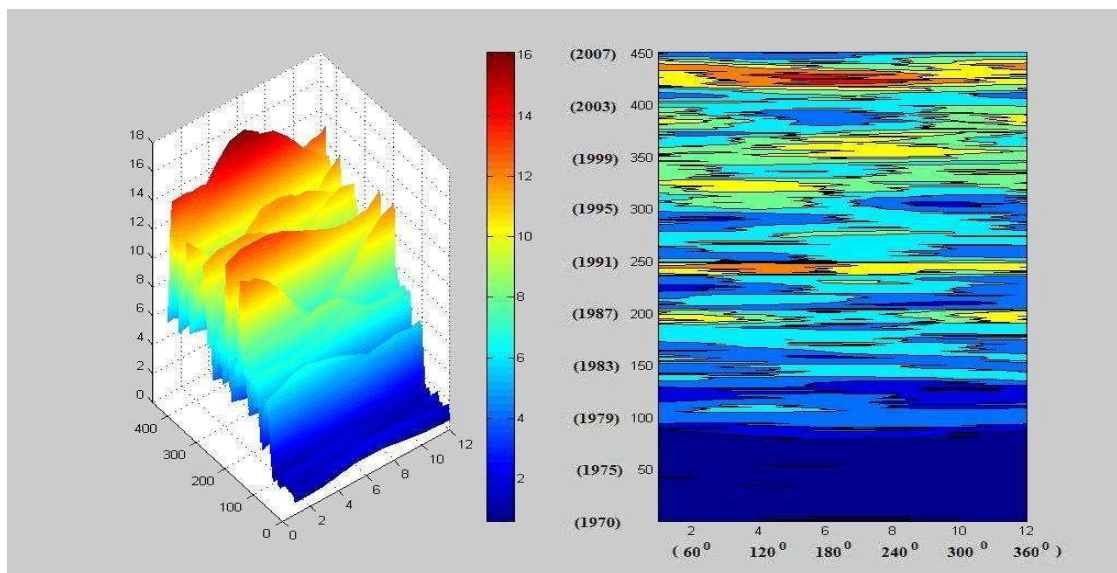


Fig. 4.12. - Distribuția 3D (în stânga figurii) a amplitudinilor curbelor de interpolare obținute prin metoda de stacking Hicum și exprimată în număr de evenimente seismice, în cazul unei ferestre mobil de 365.24 zile și un pas de alunecare de 30 zile. În dreapta este reprezentarea 2D a aceluiași lucru.

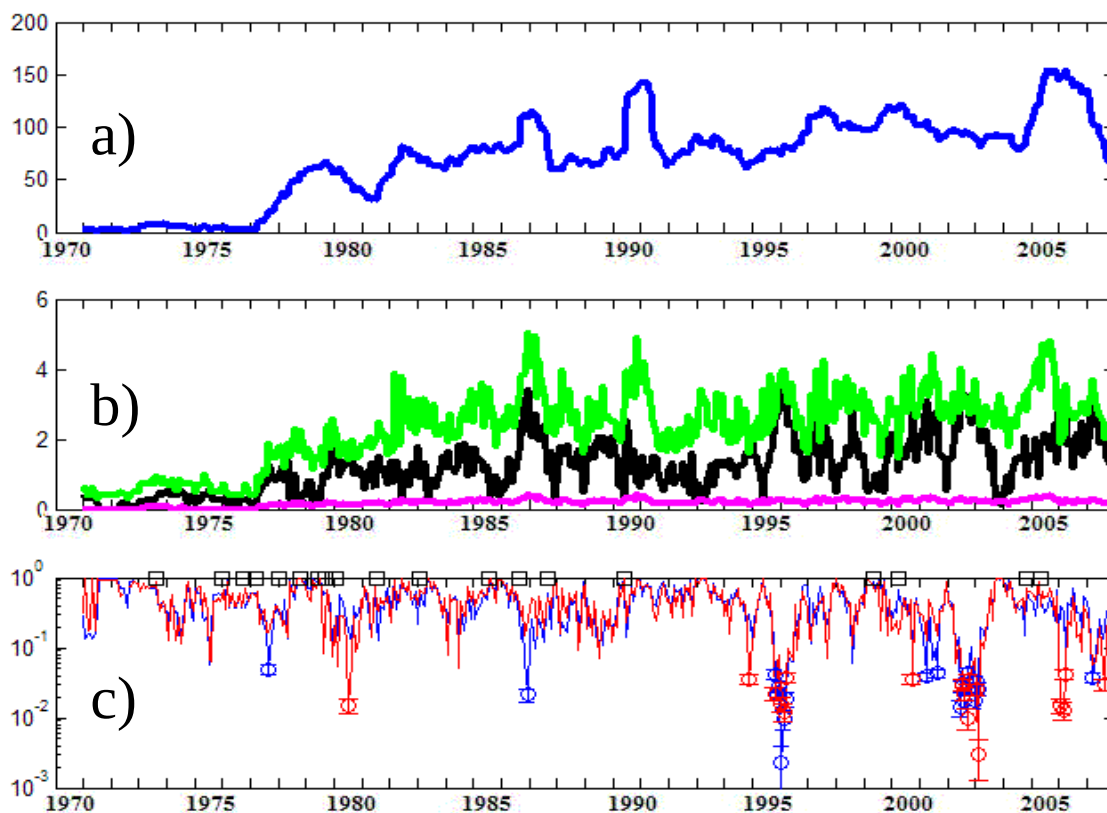
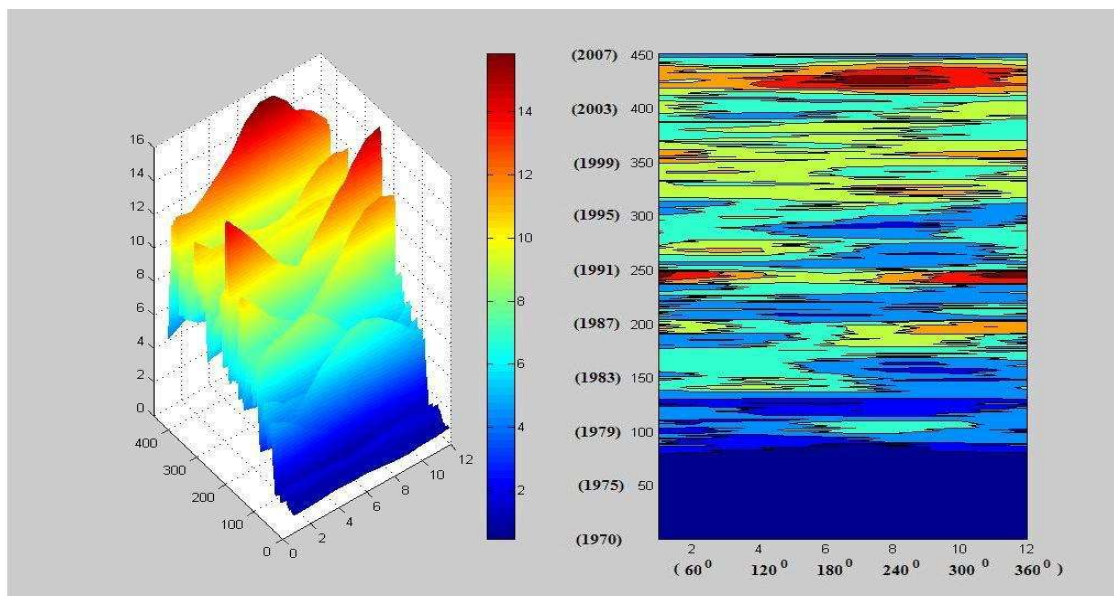


Fig. 4.13. - a) Variația temporală a numărului de evenimente seismice în fiecare fereastră mobilă; b) Valorile limită ale intervalului de încredere obținut prin metoda Bootstrap (magenta pentru limita inferioară și verde pentru cea superioară) pentru amplitudinea cosinusoidei HiCum în fiecare fereastră 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.

Rezultate obținute pe baza componentei MF a mareelor terestre



ig. 4.14. - 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.

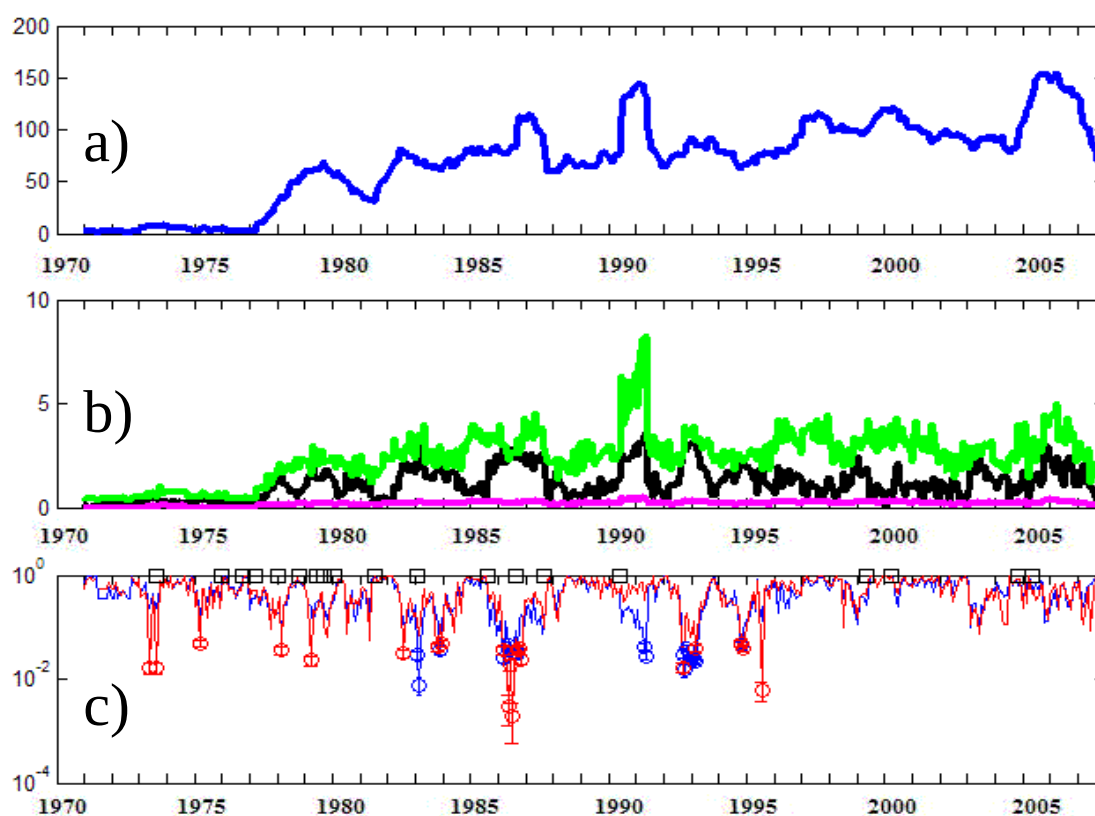


Fig. 4.15. - a) Variația temporală a numărului de evenimente seismice în fiecare fereastră mobilă; b) Valorile limită ale intervalului de încredere obținut prin metoda Bootstrap (magenta pentru limita inferioară și verde pentru cea superioară) pentru amplitudinea cosinusoidei HiCum în fiecare fereastră 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.

Rezultate obținute pe baza componentei MM a mareelor terestre

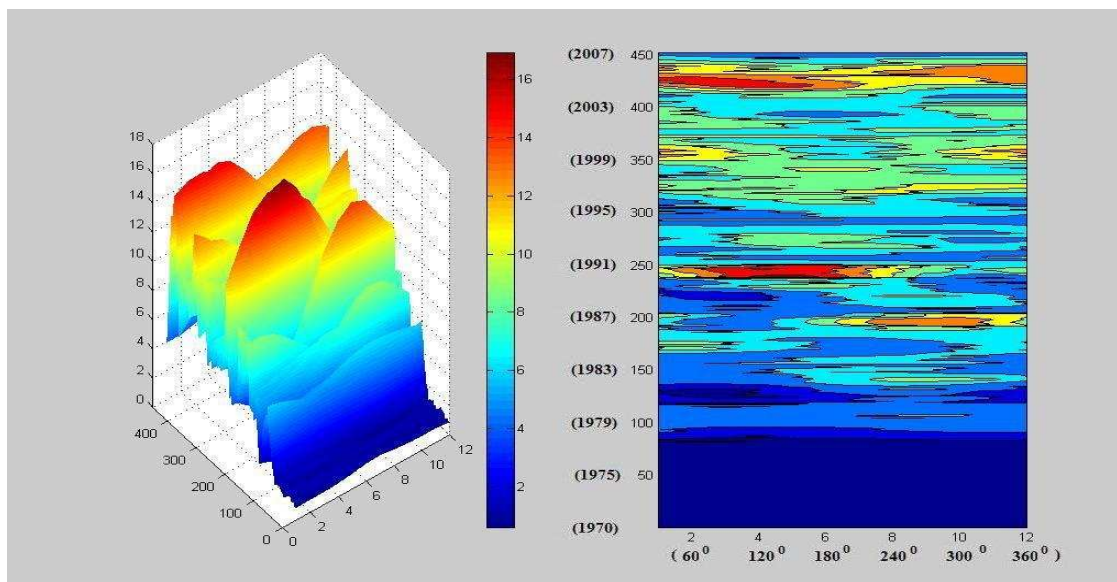


Fig. 4.16. - Distribuția 3D (în stânga figurii) a amplitudinilor curbelor de interpolare obținute prin metoda de stacking Hicum și exprimată în număr de evenimente seismice, în cazul unei ferestre mobile de 365.24 zile și un pas de alunecare de 30 zile. În dreapta este reprezentarea 2D a aceluiași lucru.

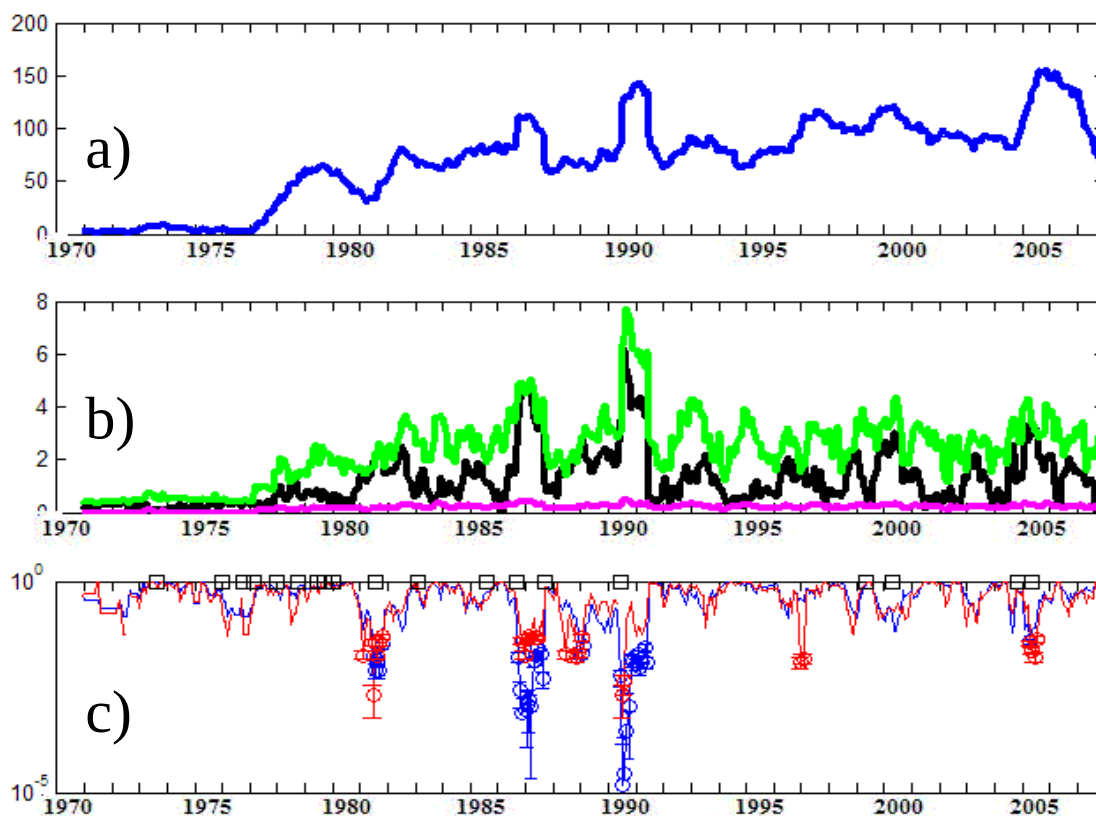


Fig. 4.17. - a) Variația temporală a numărului de evenimente seismice în fiecare fereastră mobilă; b) Valorile limită ale intervalului de încredere obținut prin metoda Bootstrap (magenta pentru limita inferioară și verde pentru cea superioară) pentru amplitudinea cosinusoidei HiCum în fiecare fereastră 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.

Rezultate obținute pe baza componentei SSA a mareelor terestre

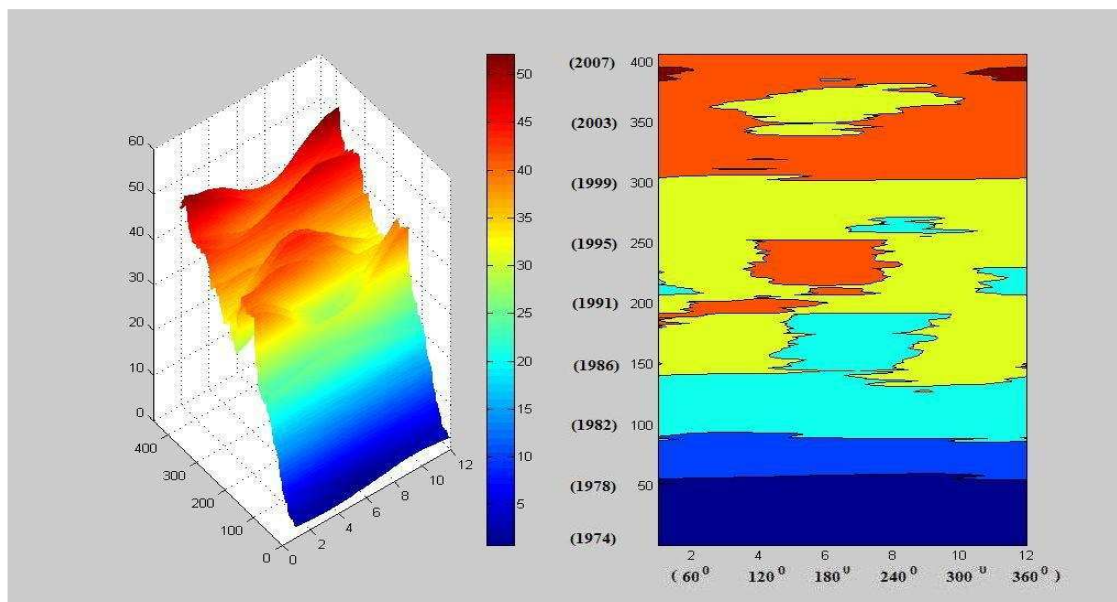


Fig. 4.18. - Distribuția 3D (în stânga figurii) a amplitudinilor curbelor de interpolare obținute prin metoda de stacking Hicum și exprimată în număr de evenimente seismice, în cazul unei ferestre mobile de 365.24 zile și un pas de alunecare de 30 zile. În dreapta este reprezentarea 2D a aceluiași lucru.

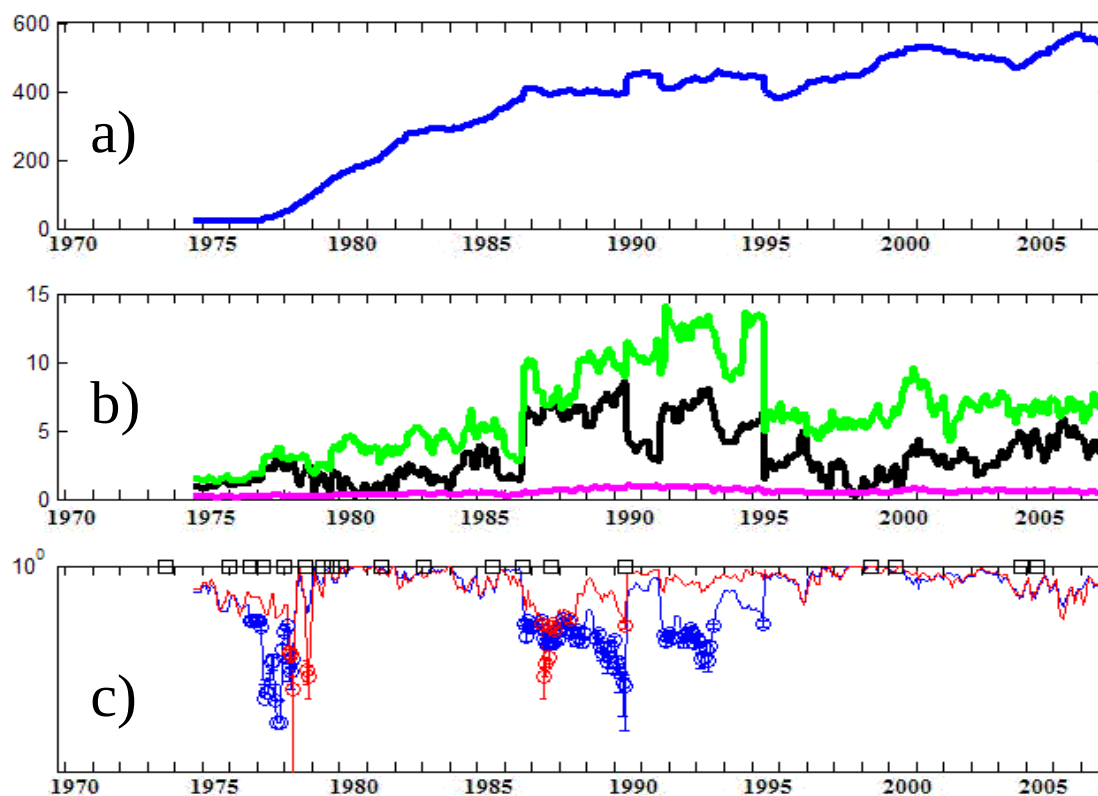


Fig. 4.19. - a) Variația temporală a numărului de evenimente seismice în fiecare fereastră mobilă; b) Valorile limită ale intervalului de încredere obținut prin metoda Bootstrap (magenta pentru limita inferioară și verde pentru cea superioară) pentru amplitudinea cosinusoidei HiCum în fiecare fereastră 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.

Rezultate obținute pe baza componentei SA a mareelor terestre

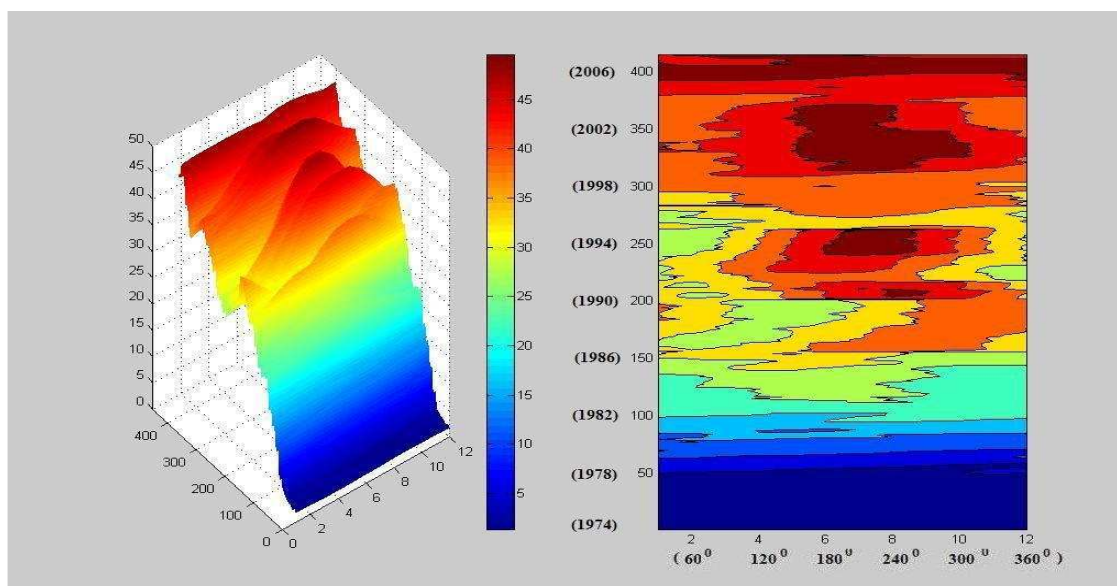


Fig. 4.20. - Distribuția 3D (în stânga figurii) a amplitudinilor curbelor de interpolare obținute prin metoda de stacking Hicum și exprimată în număr de evenimente seismice, în cazul unei ferestre mobile de 365.24 zile și un pas de alunecare de 30 zile. În dreapta este reprezentarea 2D a aceluiași lucru.

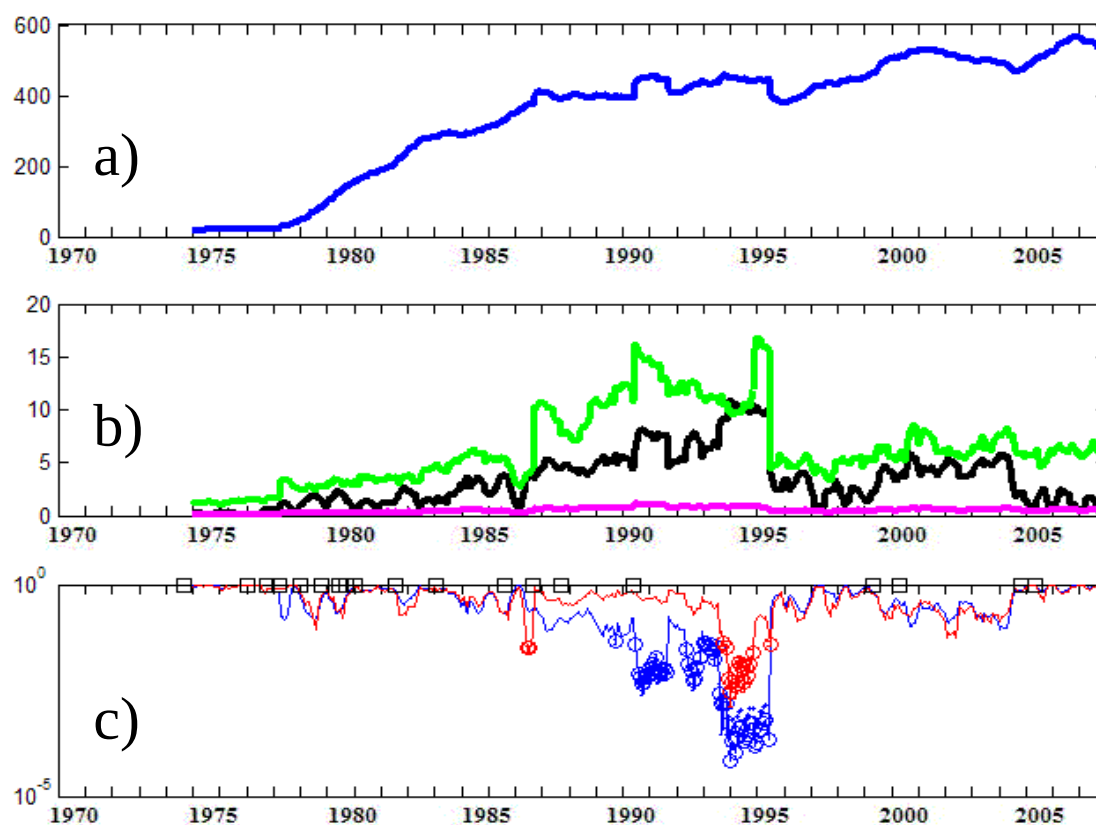


Fig. 4.21. - a) Variația temporală a numărului de evenimente seismice în fiecare fereastră mobilă; b) Valorile limită ale intervalului de încredere obținut prin metoda Bootstrap (magenta pentru limita inferioară și verde pentru cea superioară) pentru amplitudinea cosinusoidei HiCum în fiecare fereastră 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.

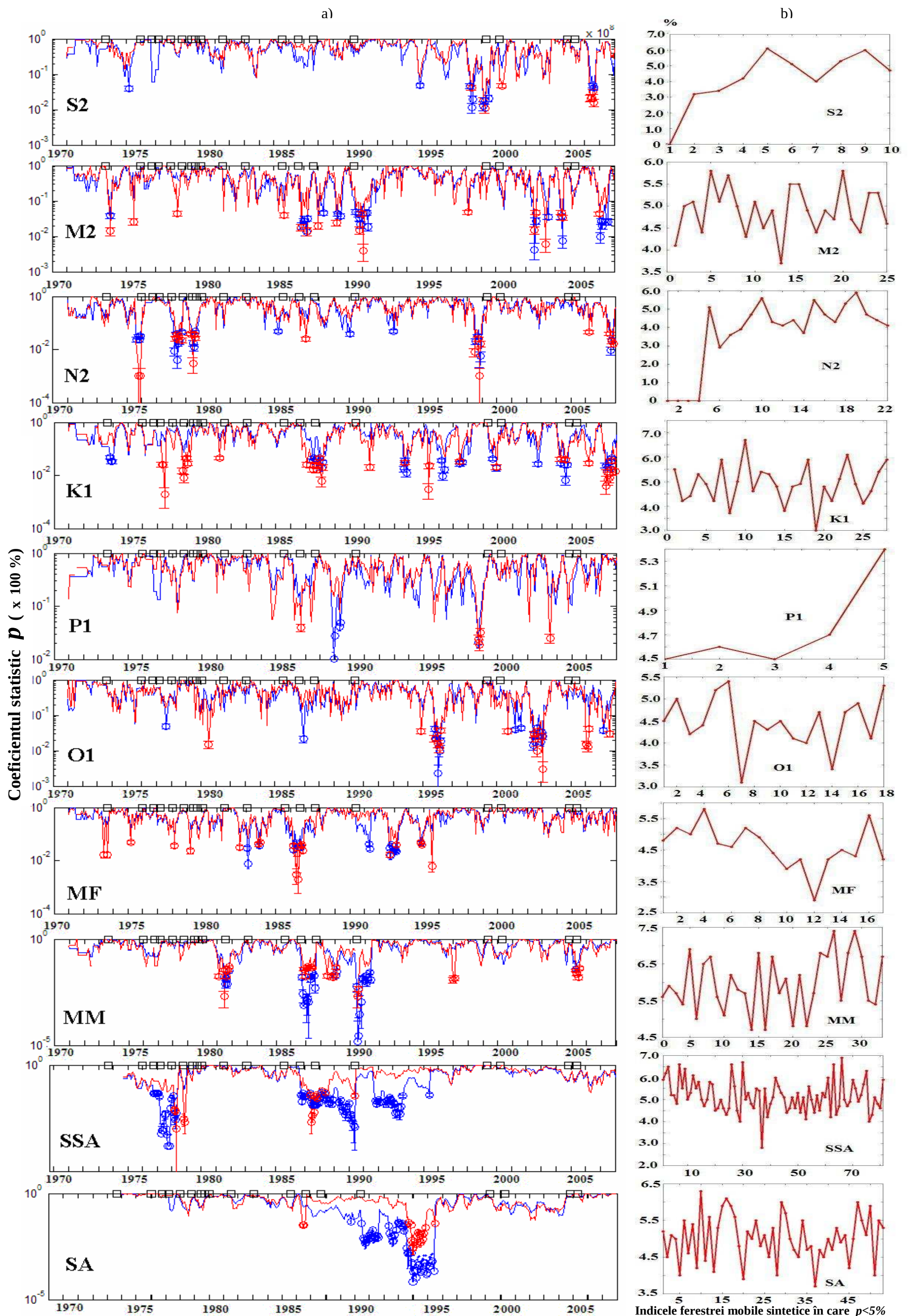


Fig. 4.22. – a) Valorile coeficientului de corelație p pentru testul lui Schuster (în albastru) și pentru testul permutărilor (în roșu), marcate cu cercuri și bare de erori pentru $p < 5\%$. Cutremurele de pământ cu magnitudinea $M_w > 5.0$ sunt reprezentate prin pătrate negre. b) Rezultatele validării 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. Conform teoriei statistice ar fi fost suficiente o sută de cazuri, dar în situația de față numărul ales, o mie, ne permite să tragem o concluzie relevantă. 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, așa cum am mai precizat anterior.

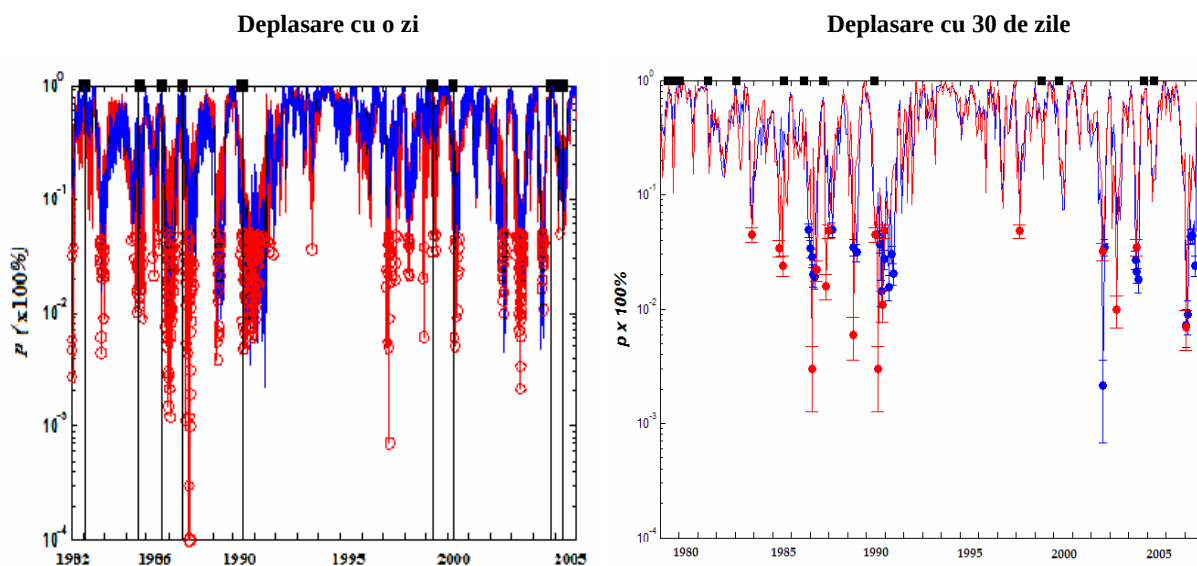
Figura 4.22b prezintă rezultatele validării cu ajutorul seriilor sintetice de evenimente aleatoare pentru zona seismică Vrancea.

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 (Fig. 4.23).

(a) Ferestre mobile de 365.24 zile



(b) Ferestre mobile de 100 evenimente

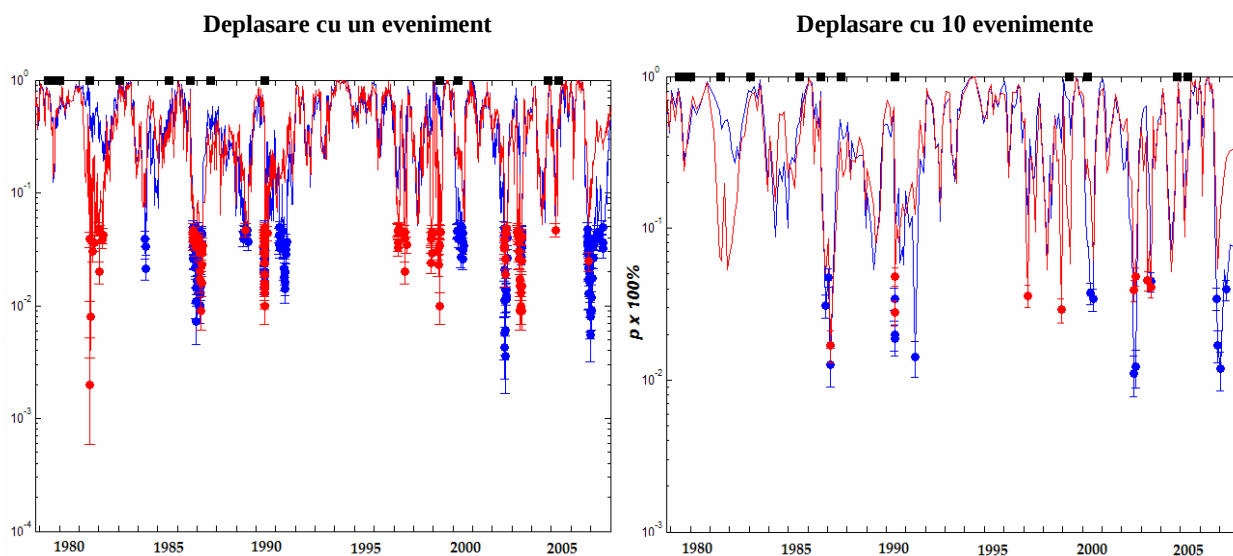


Fig. 4.23 – Valorile coeficientului statistic p pentru testul lui Schuster (în albastru) și pentru testul permutărilor (în roșu), marcate cu cercuri și bare de erori pentru $p < 5\%$. Cutremurele de pământ cu magnitudinea $M_w > 5.0$ sunt reprezentate prin pătrate negre. Comparație între rezultatele 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).

4.3.2. 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 cu înălțimea de 20 km și delimitat la suprafață de un pătrat cu latura de 12 km (Fig. 4.24). Algoritmul de calcul cunoscut deja, se aplică doar în elementele de volum ce conțin minim 20 de elemente seismice din aceleași rațiuni statistice despre care am mai vorbit. Calculele se efectuează în timp ce este parcursă întreaga suprafață a epicentrelor cutremurelor de pământ pentru zona Vrancea, de la vest la est între 26° și 27° longitudine estică, și de la sud spre nord între 45° și 46° latitudine nordică. Apoi procedura aceasta se repetă, strat după strat, coborând de fiecare dată în adâncime cu 10 km.

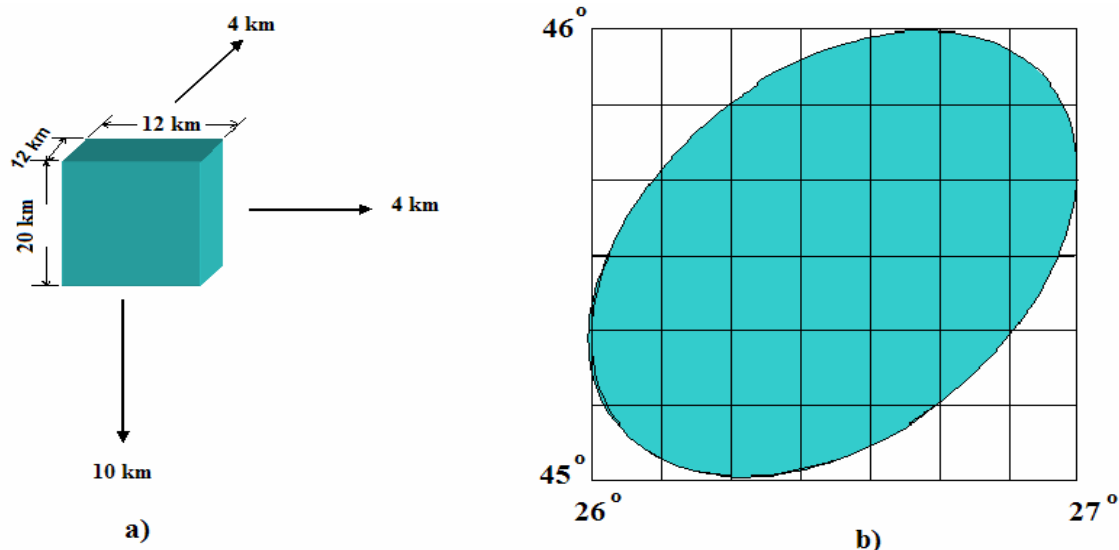


Fig. 4.24 - a) Un element de volum cu o suprafață pătrată de 12 km pe 12 km și o înălțime de 20 km este deplasat cu câte 4 km în longitudine și apoi în latitudine. b) Suprafața baleiată este delimitată de paralelele de 45° și 46° latitudine nordică, respectiv de meridianele de 26° și 27° longitudine estică. Procedura se repetă în adâncime, între 60 și 220 km de fiecare dată când, după parcurgerea unui strat, elementul de volum coboară cu 10 km.

Procedeul de validare rămâne valabil și se aplică întocmai și aici, tot cu ajutorul a 1000 de serii sintetice de evenimente aleatoare, atunci când elementele de volum se caracterizează printr-un coeficient statistic $p < 5\%$.

Tabelul 4.4 prezintă rezultatele care marchează stratele cu cel mai mare număr de elemente de volum unde corelația a fost pusă în evidență prin valori ale coeficientului statistic $p < 5\%$, pentru toate componentele mareelor terestre stabilite anterior.

Tabelul 4.4. Numărul elementelor de volum caracterizate printr-un coeficient $p < 5\%$

Limitele stratului în adâncime (km)	Componentele mareelor terestre									
	S2	M2	N2	K1	P1	O1	MF	MM	SSA	SA
60 – 80	0	8	2	6	0	1	1	1	5	1
70 – 90	2	10	1	7	0	12	10	2	15	0
80 – 100	2	0	1	3	0	1	3	2	8	6
90 – 110	9	2	3	4	2	0	0	1	9	6
100 – 120	6	2	3	9	3	2	5	2	0	1
110 – 130	7	6	2	0	1	1	3	5	2	8
120 – 140	7	9	4	3	4	3	1	8	3	12
130 – 150	4	0	2	4	2	4	1	6	7	6
140 – 160	6	2	4	5	2	2	3	5	10	4
150 – 170	5	4	2	0	1	0	0	1	2	1
160 – 180	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
170 – 190	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
180 – 200	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
190 – 210	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
200 - 220	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Figurile 4.25a ÷ 4.25h prezintă în stânga 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.

În figura 4.26 este realizată o sinteză a tomografiei mareice statistice pentru activitatea seismică intermediară din zona Vrancea, 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)

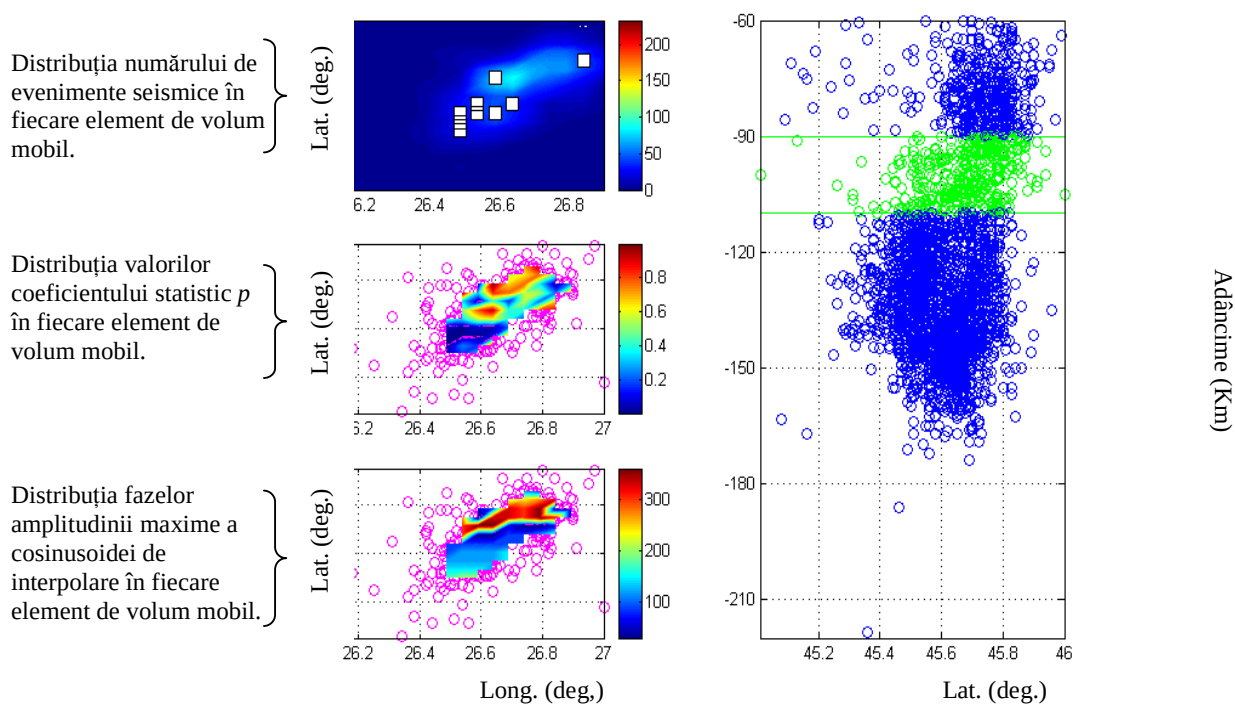


Fig.4.25b - Componenta mareică M2 (70 km – 90 km)

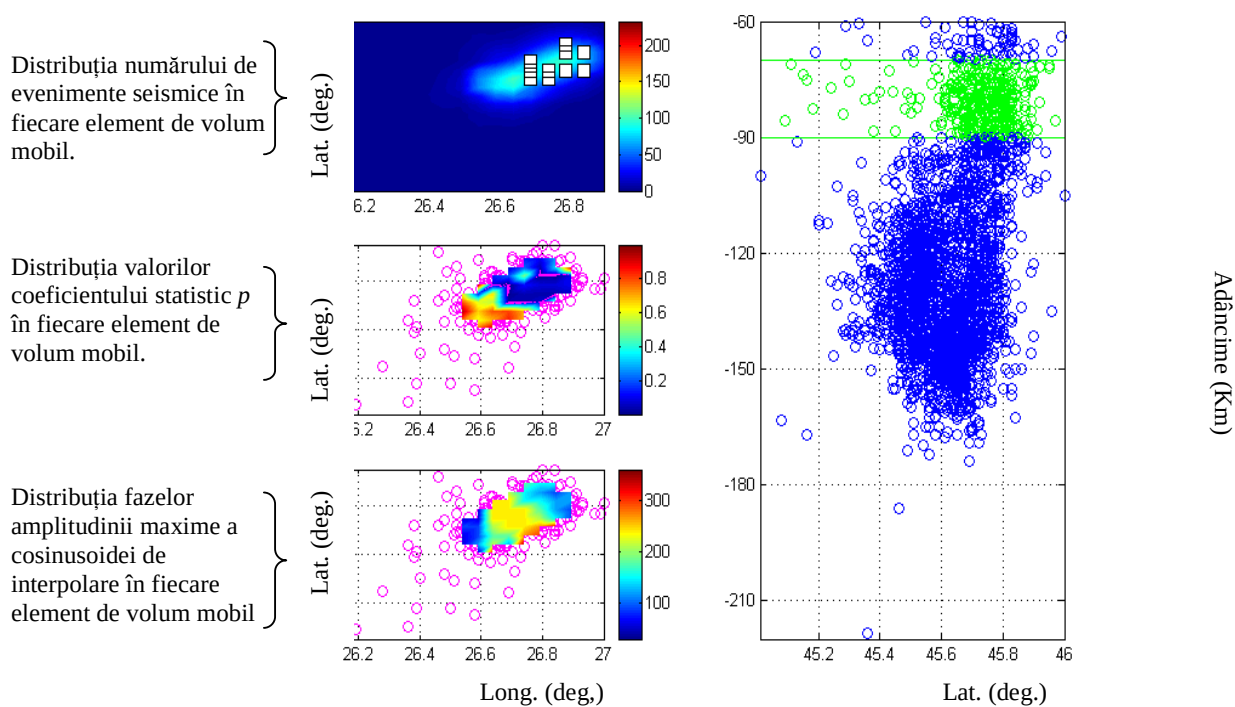


Fig.4.25c - Componenta mareică K1 (100 km – 120 km)

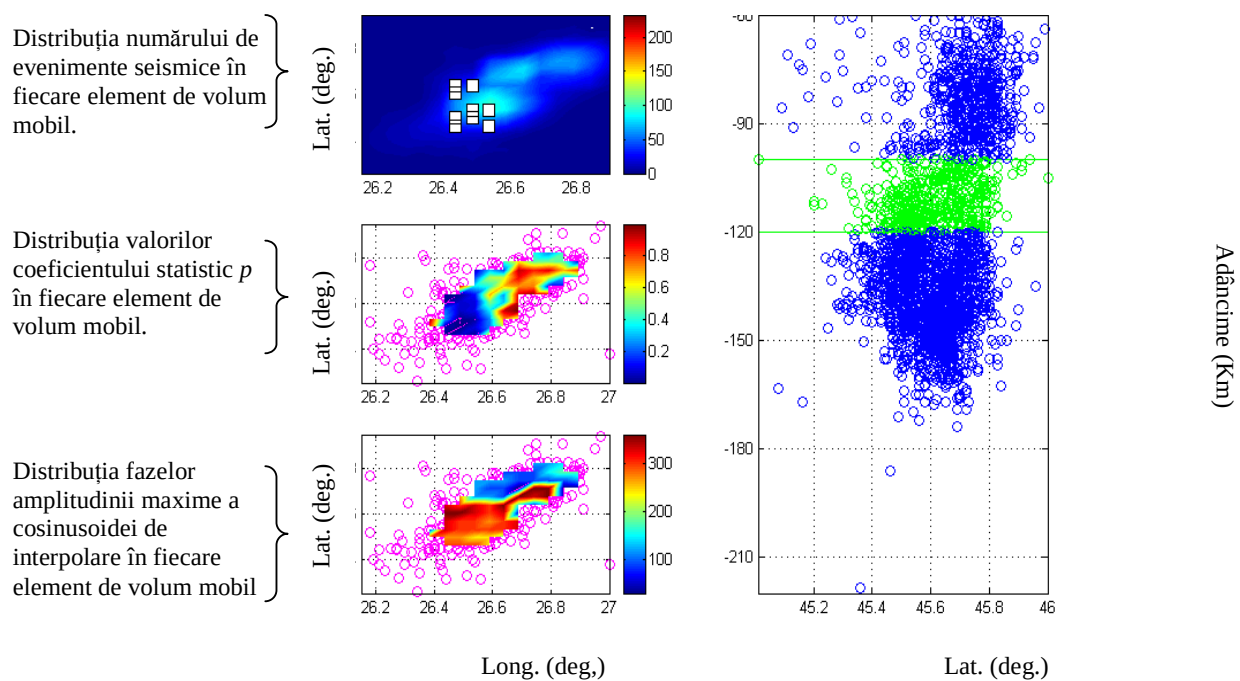


Fig.4.25d - Componenta mareică O1 (70 km – 90 km)

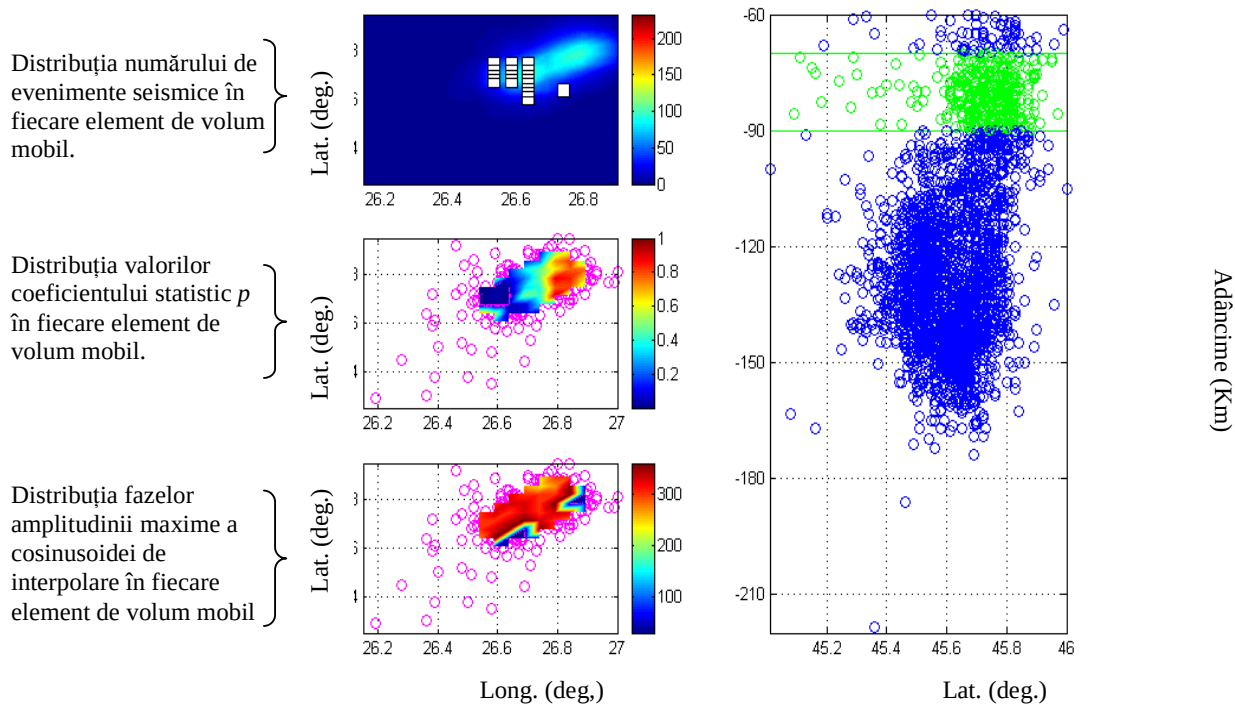


Fig.4.25e - Componenta mareică MF (70 km – 90 km)

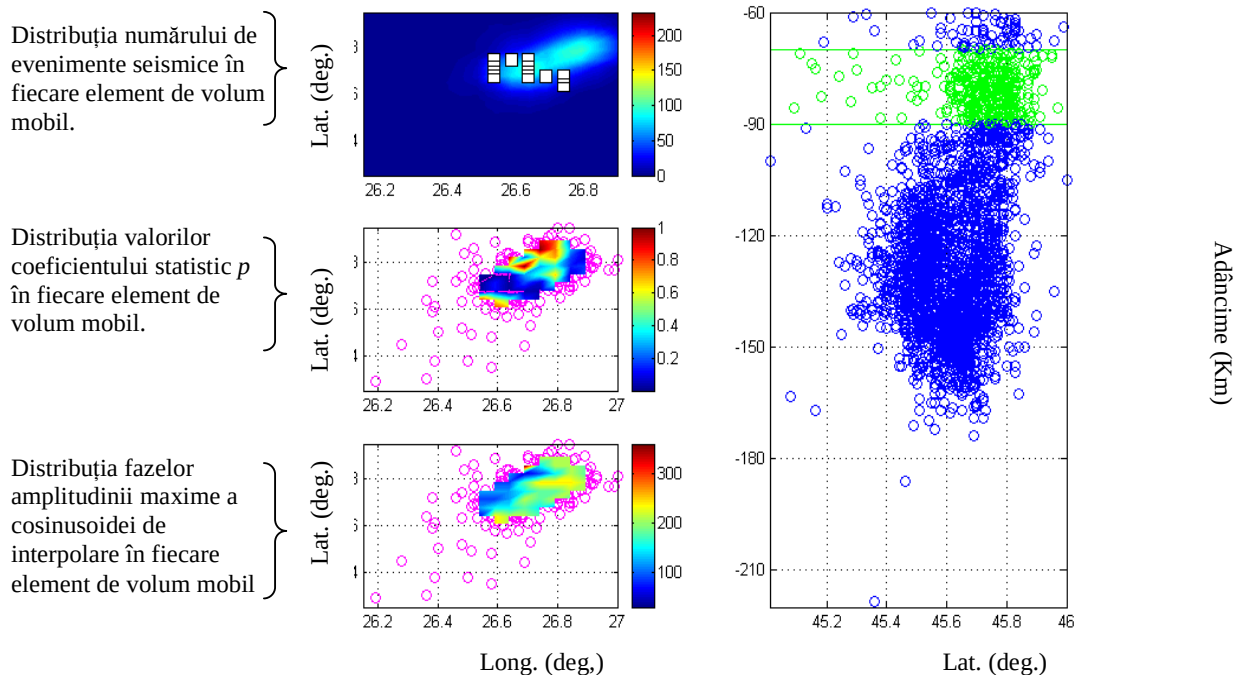


Fig.4.25f - Componenta mareică MM (120 km – 140 km)

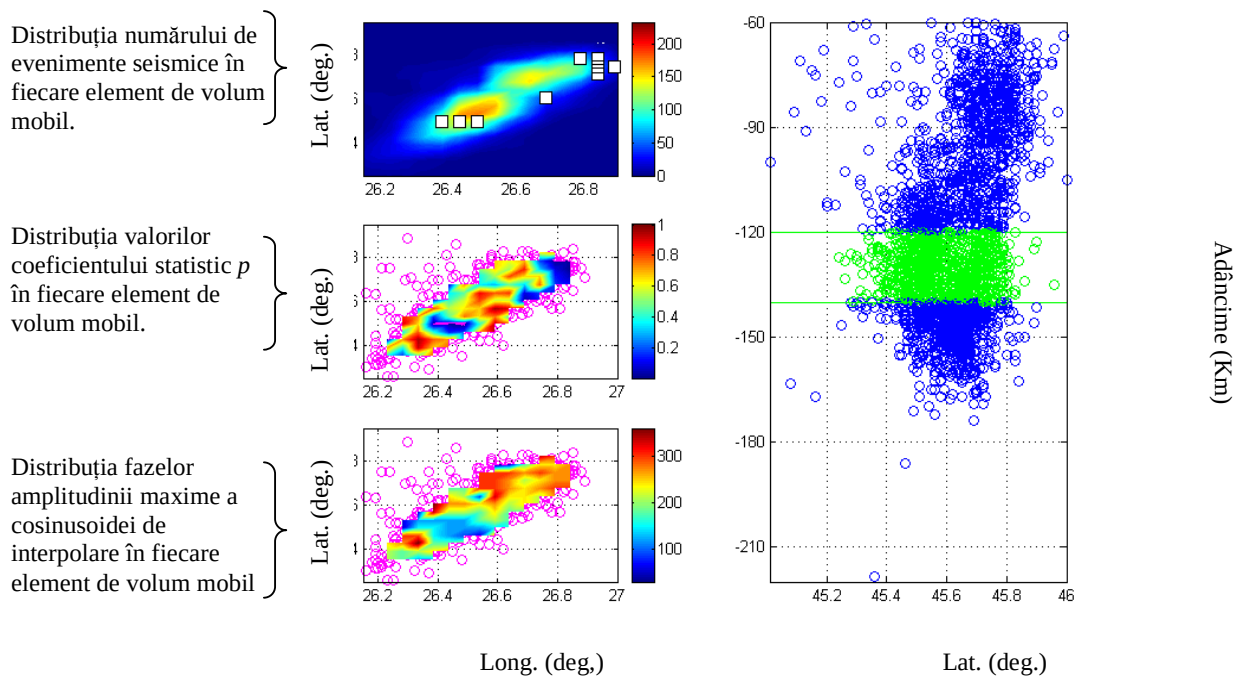


Fig.4.25g - Componenta mareică SSA (70 km – 90 km)

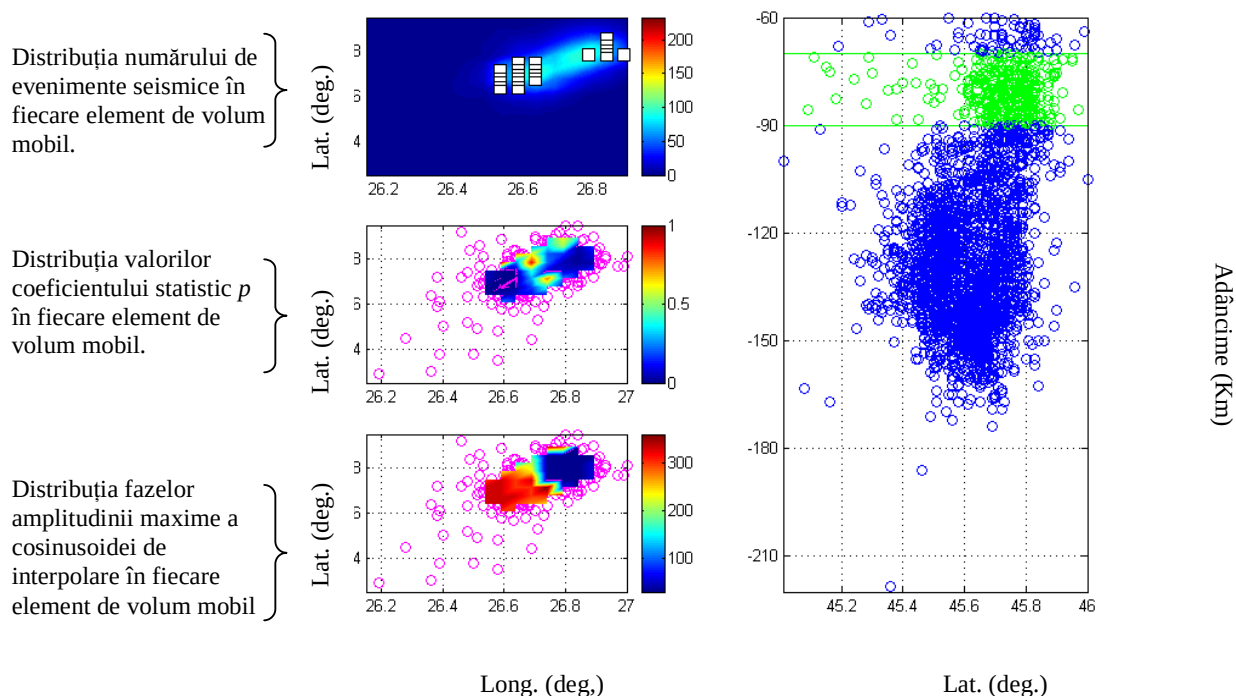


Fig.4.25h - Componenta mareică SA (120 km – 140 km)

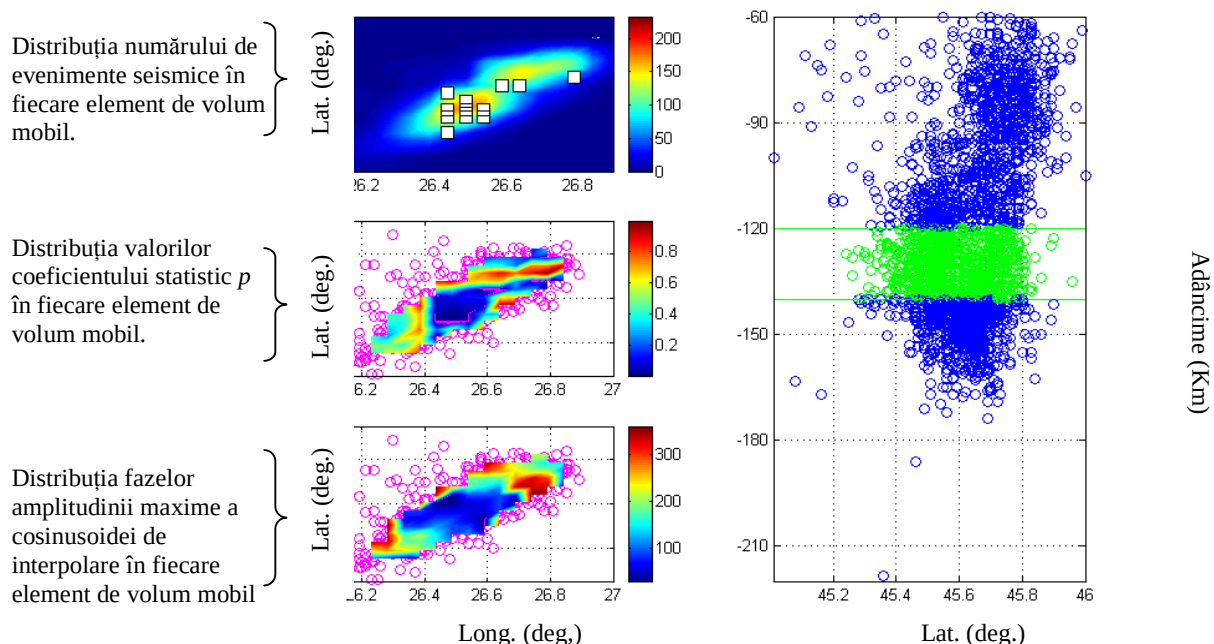


Fig. 4.25a) + 4.25h) Secvență de reprezentări ale corelației dintre mările terestre și cutremurele de pământ prin tomografie mareică statistică . În stânga, micile pătrate albe reprezintă pozițiile elementelor de volum mobile cu $p < 5\%$. În dreapta, zona verde indică stratul pentru care se efectuează analiza. Am ales pentru fiecare componentă a marelui terestre stratul cu cel mai mare număr de elemente de volum pentru care $p < 5\%$.

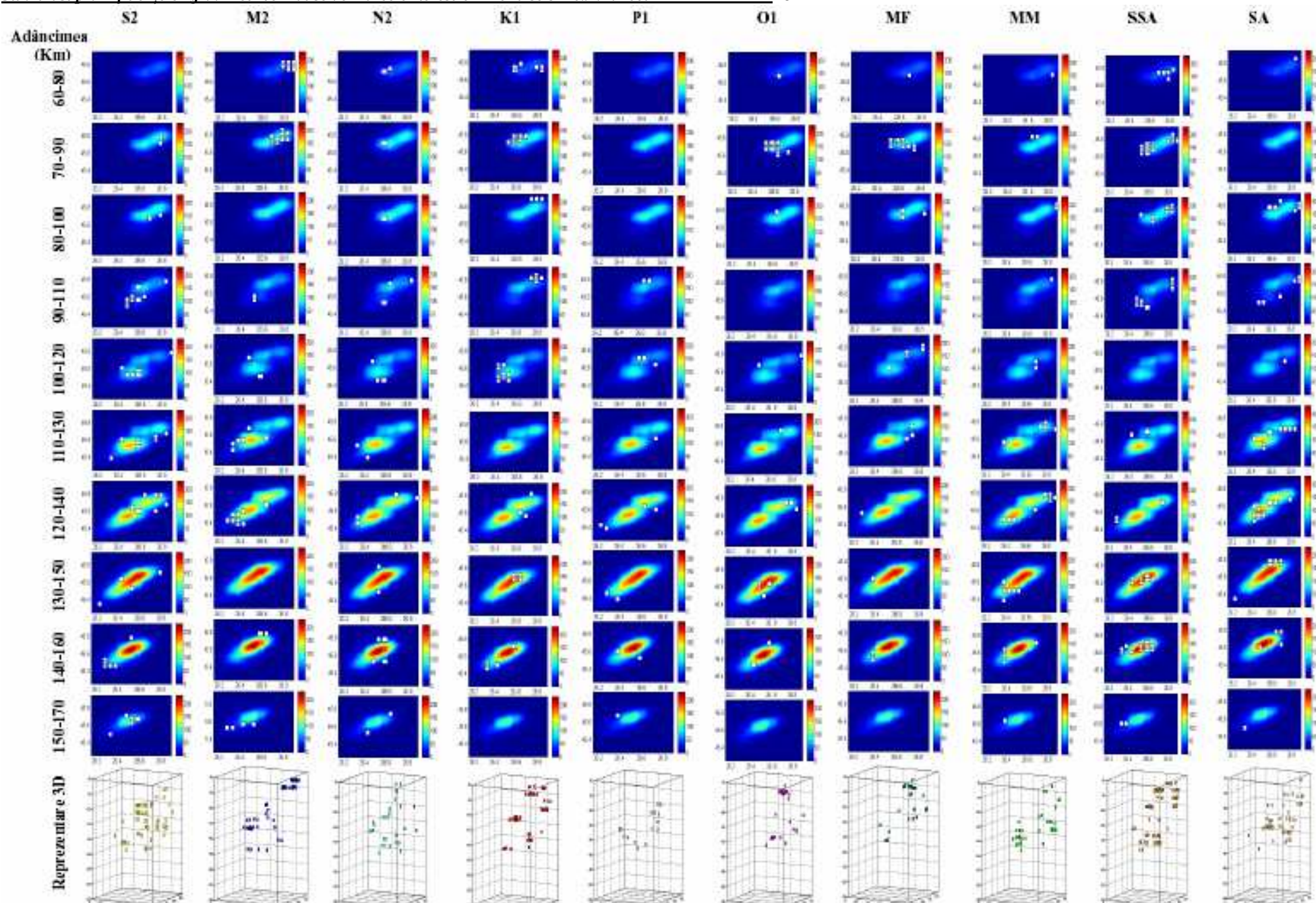


Fig. 4.26 – Tomografie statistică mareică. Distribuția elementelor de volum caracterizate prin $p < 5\%$, corespunzând fiecărei componente mareice analizate și fiecărui interval de adâncime. Reprezentare 3D pentru fiecare componentă.

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 ($M_w \geq 5.0$).

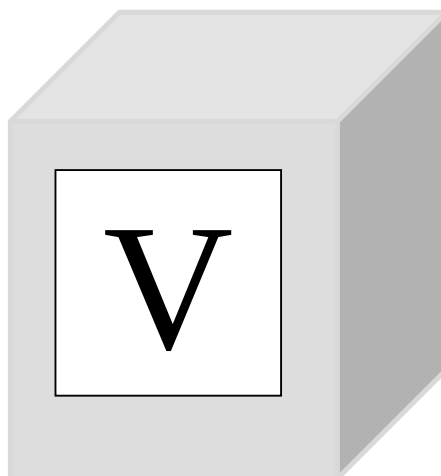
Coeficientul statistic p prezintă caracteristici de variație particulare în vecinătatea cutremurelor de pământ mai puternice. Rezultate similare au fost obținute de Sachiko Tanaka [2006] pentru regiunea Tokai din Japonia. Noi considerăm coeficientul statistic p un potențial factor precursor seismic.

Metoda Bootstrap, utilizată, de asemenea, pentru prima oară în problema corelației dintre mareele terestre și cutremurele de pământ în zona Vrancea, arată variații ale limitelor superioare ale intervalului de încredere pentru amplitudinea co-sinusoidei 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 mareelor terestre, cu rezultate probante, fără îndoială acestea fiind legate de structura și reologia zonei seismice analizate.

5

5. DISCUȚII PRIVIND INTEGRAREA ȘI VALORIFICAREA REZULTATELOR



5 DISCUȚII PRIVIND INTEGRAREA ȘI VALORIFICAREA REZULTATELOR

5.1. Punerea în evidență a unor tendințe temporale în declanșarea 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].

Eterogeneitățile locale și regionale produc răspunsuri diferite când sunt supuse unor frecvențe mecanice diferite, în concordanță cu proprietățile geologice și tectonice, asemenea tuturor sistemelor caracterizate prin frecvențele lor proprii [SANDI, 2001]. Răspunsul ar putea fi influențat de interfața manta-crustă printr-un mecanism de cuplare vâscoasă [ENESCU, 1985]. În acest context acțiunea marilor terestre ar putea juca un rol important în funcție de caracteristicile fiecărei regiuni.

Rezultatele obținute în capitolul 4 conduc către interpretări cu consecințe importante pentru zona seismică Vrancea. Prezентăm 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 confidență obținut

prin metoda Bootstrap, se apropie de valoarea amplitudinii co-sinusoidei de referință, adică valoarea amplitudinii cosinusoidei de «fitare» a distribuției inițiale de evenimente seismice din fereastra respectivă (Figurile 4.2 ÷ 4.21).

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).

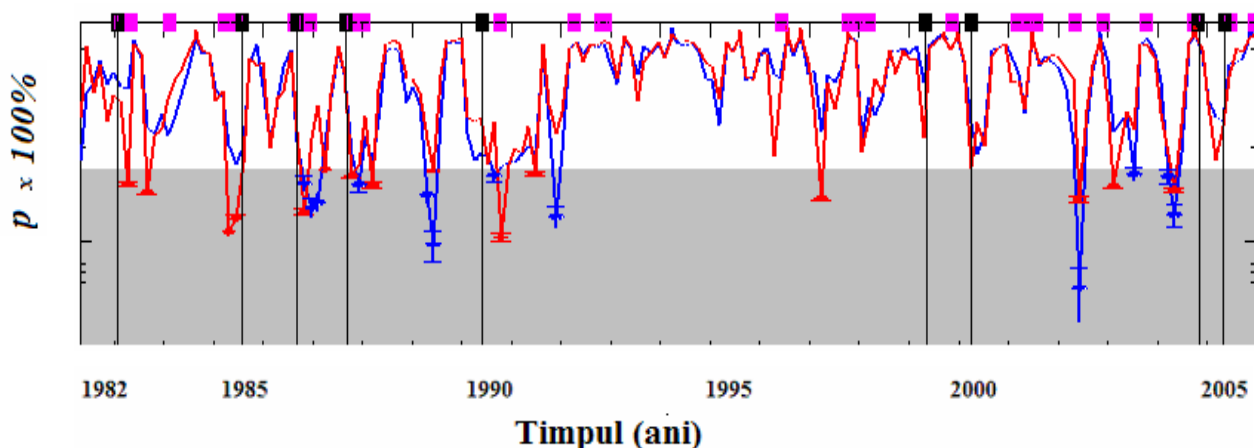


Fig. 5.1. – Componenta M2: variația temporală a coeficientului statistic p pentru testul Schuster (albastru) și pentru testul permutărilor (roșu); valorile $p < 5\%$ sunt marcate cu cercuri și bare de eroare (1982 – 2005, ferestre mobile de 300 zile deplasate cu 50 zile). Cutremurele cu $M_w > 5.0$ sunt 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.

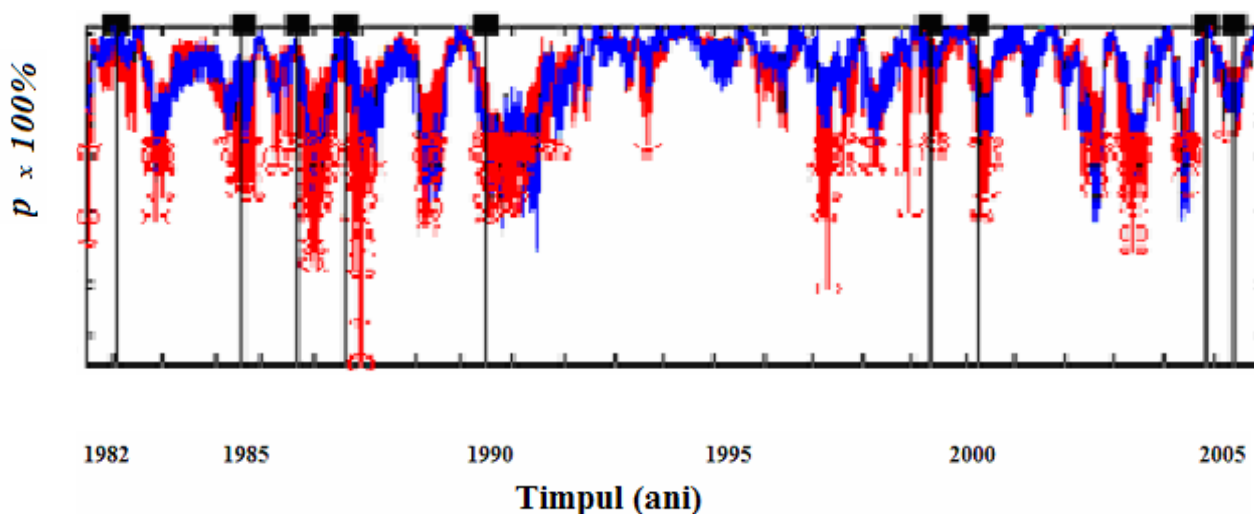


Fig. 5.2 – Componenta M2 : variația temporală a coeficientului statistic p pentru testul Schuster (albastru) și pentru testul permutărilor (roșu); valorile $p < 5\%$ sunt marcate cu cercuri și bare de eroare (1982 – 2005, ferestre mobile de 365.24 zile deplasate cu o zi). Cutremurele cu $M_w > 5.0$ sunt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

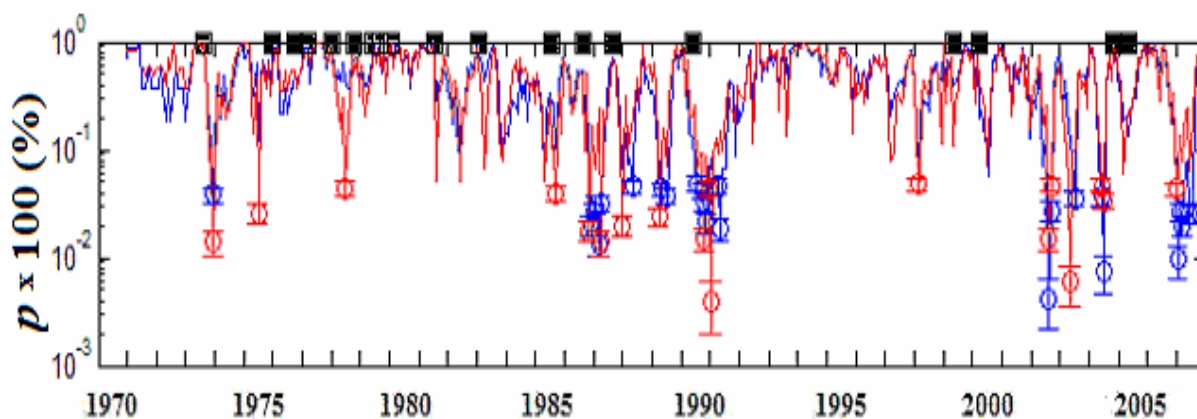
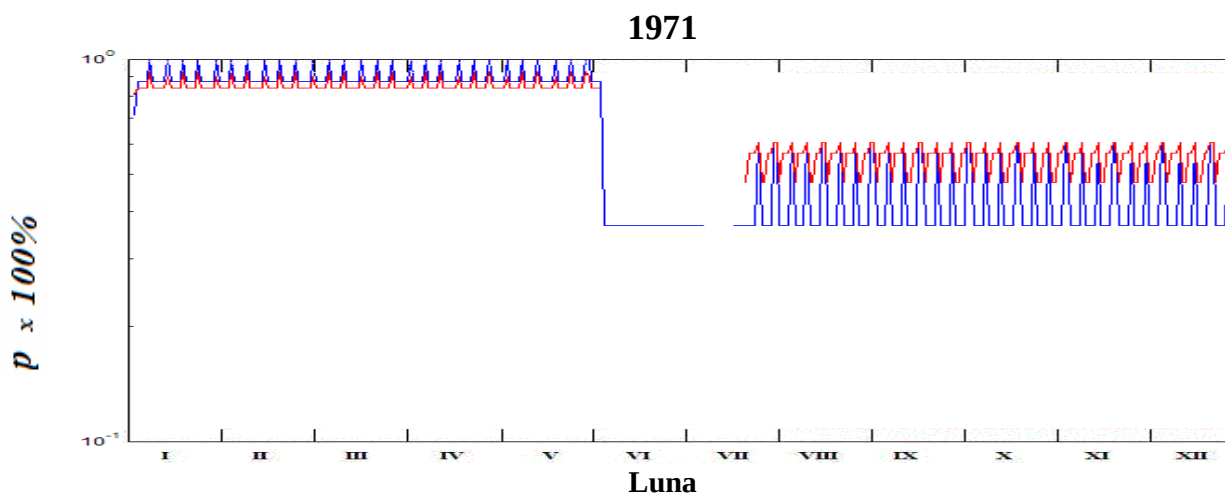


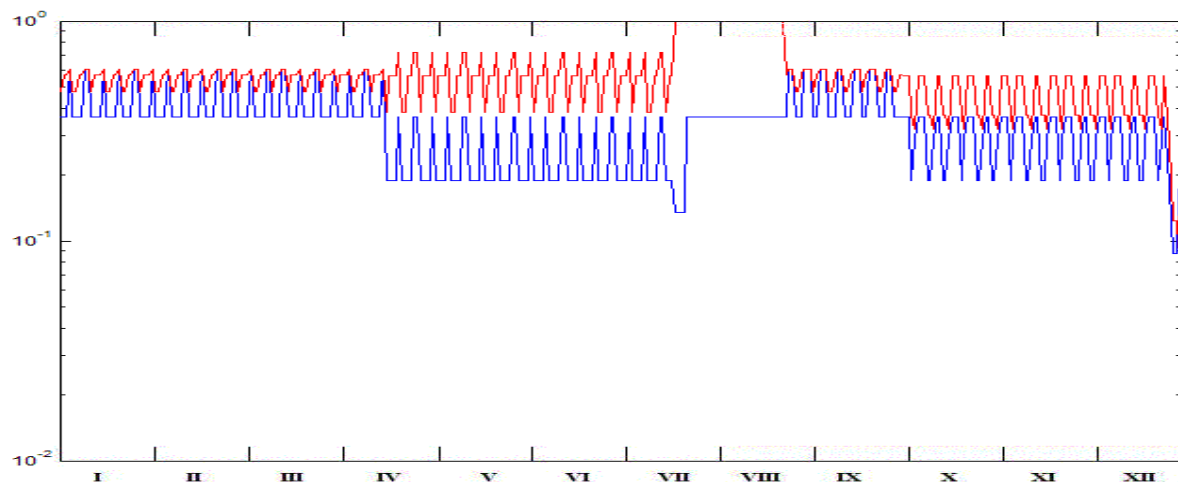
Fig. 5.3 – Componenta M_2 : variația temporală a coeficientului statistic p pentru testul Schuster (albastru) și pentru testul permutărilor (roșu); valorile $p < 5\%$ sunt marcate cu cercuri și bare de eroare (1982 – 2005, ferestre mobile de 365.24 zile deplasate cu 30 de zile). Cutremurele cu $M_w > 5.0$ sunt reprezentate prin pătrate negre.

Figura 5.4 s-a obținut calculând valoarea lui p în ferestre mobile de 365.24 zile și pas de deplasare de o zi, alegându-se pentru investigație unda semidiurnă M_2 ca undă cu cea mai mare amplitudine la latitudinea zonei Vrancea. Momentul de timp căruia i se atribuie valoarea din fereastra dată este întotdeauna limita din dreapta ferestrei respective pentru a putea evalua mai bine dacă diminuarea valorii lui p are loc înainte de cutremur, în momentul declanșării cutremurului sau după producerea acestuia.

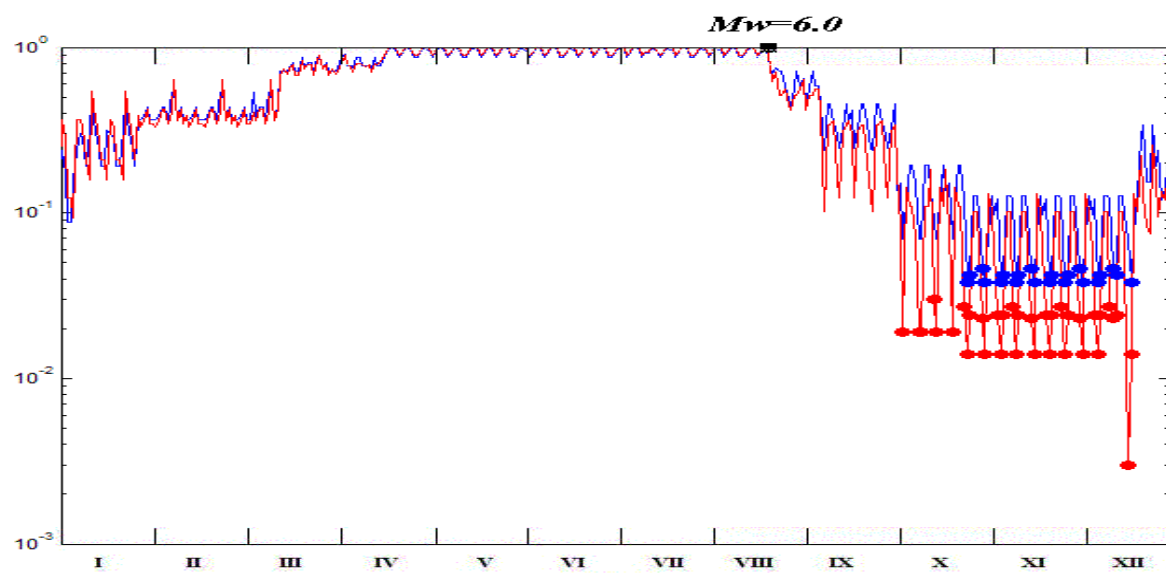
În secvența de figuri 5.4 se reprezintă variația coeficientului statistic p pentru componenta semidiurnă M_2 a mareelor terestre, observându-se în detaliu rezultatele în vecinătatea evenimentelor seismice mai puternice ($M_w \geq 5.0$) sau moderate ($4.5 \leq M_w < 5.0$) pentru fiecare an din 1971 până în 2007. „Zgomotul” prezent în curbele de variație ale coeficientului statistic p este datorat efectelor de margine ale metodei aplicată în ferestre mobile.



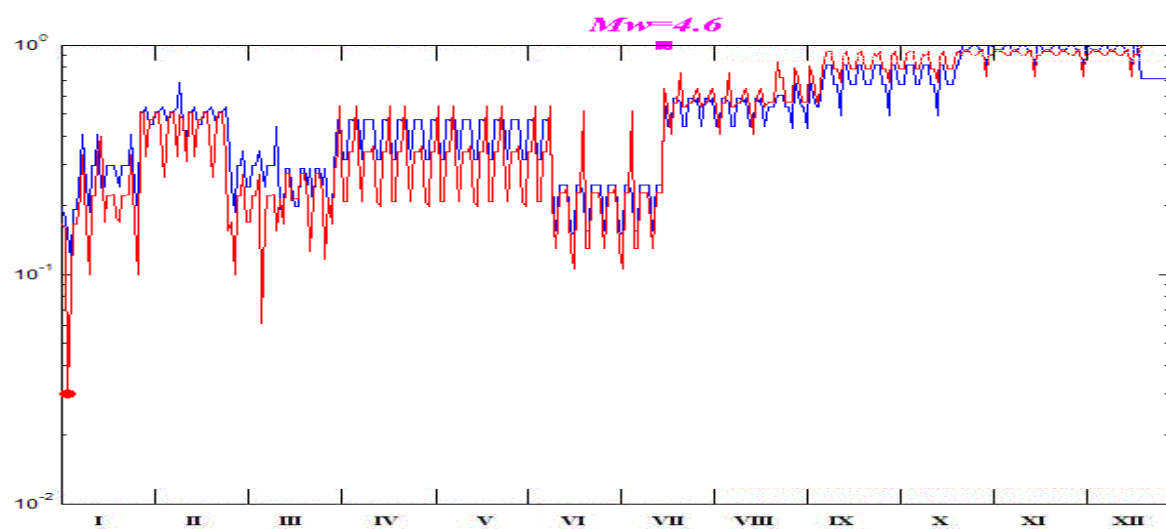
1972



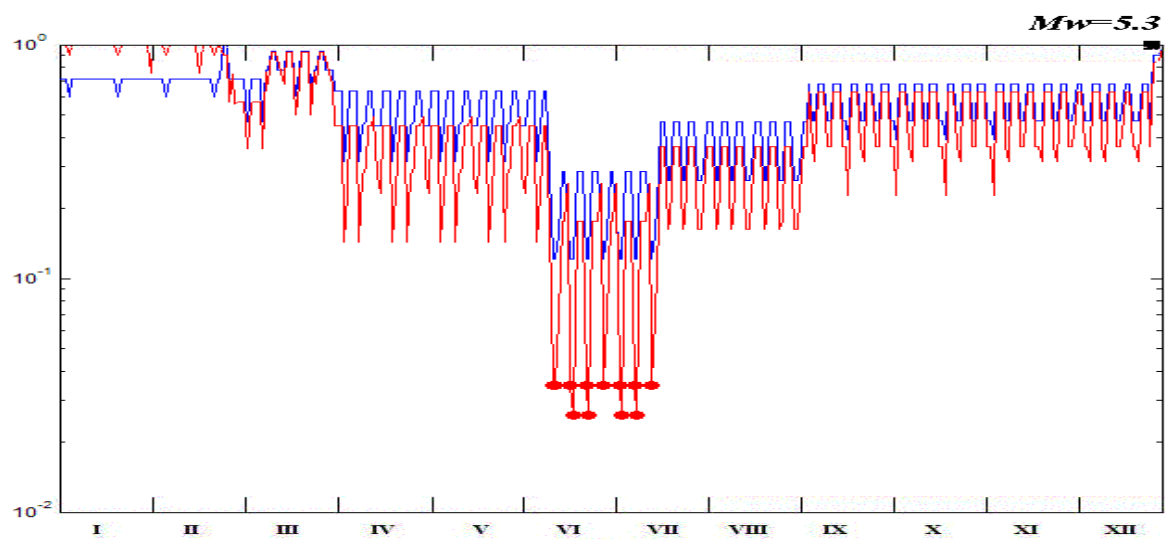
1973



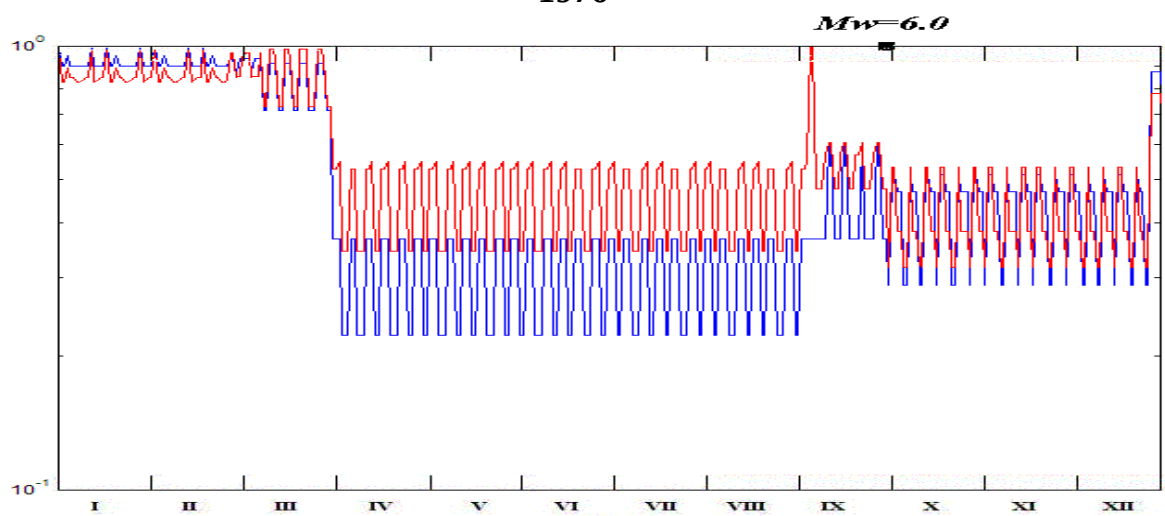
1974



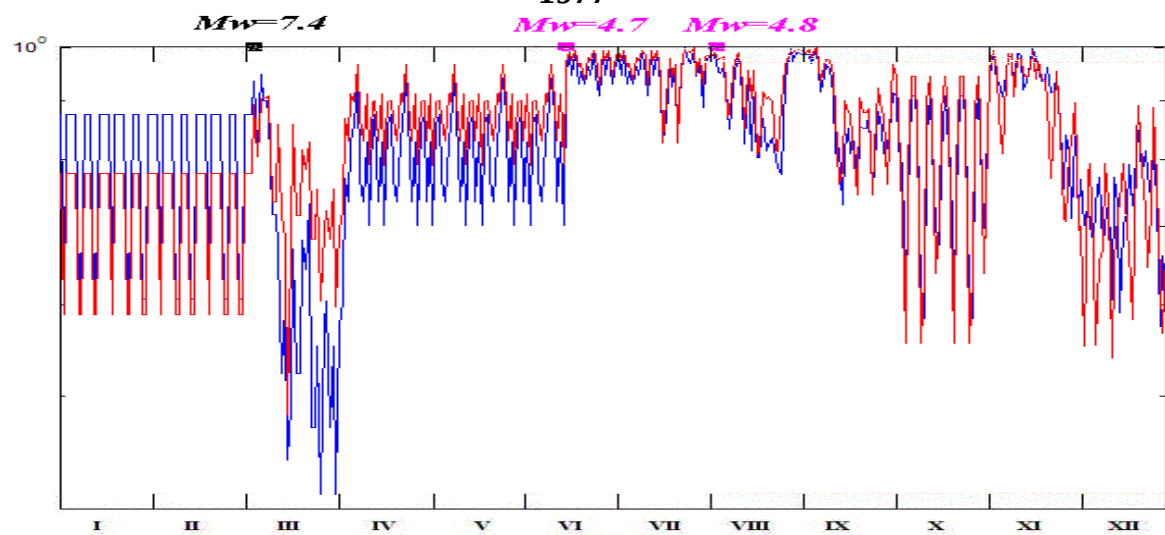
Luna
1975



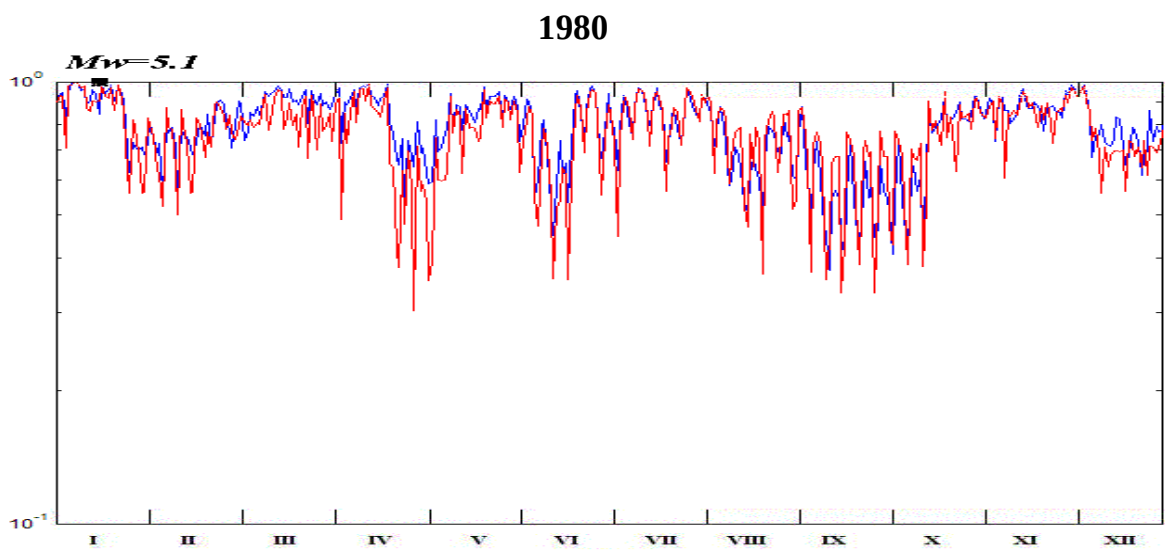
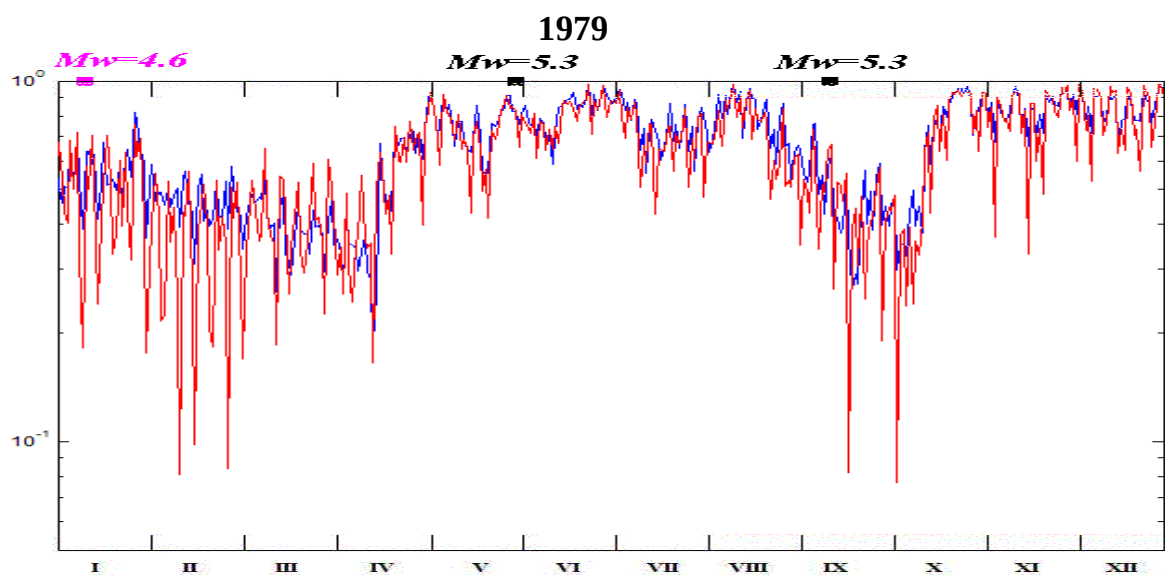
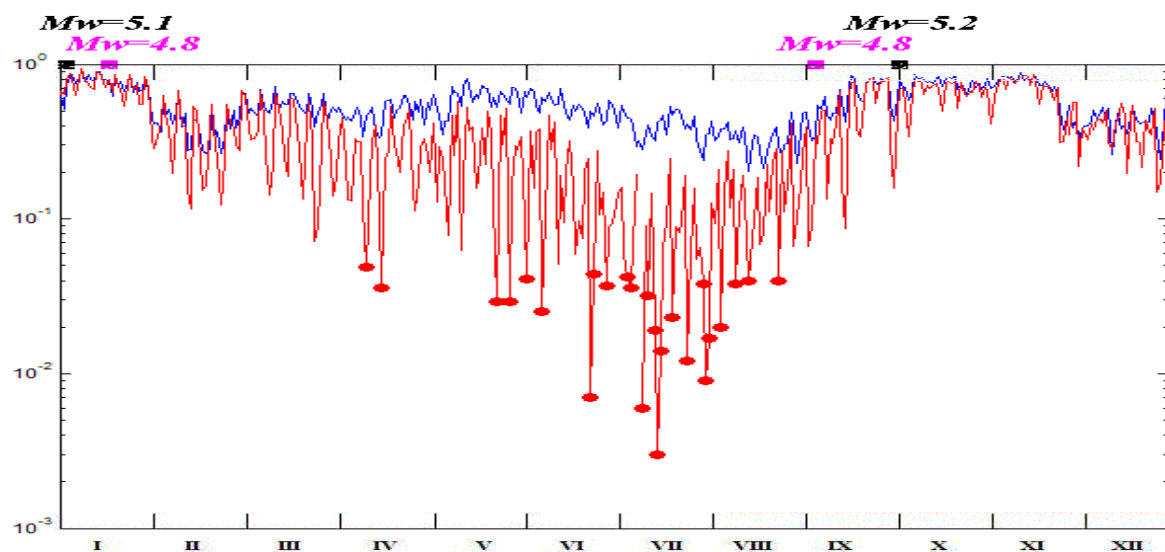
1976



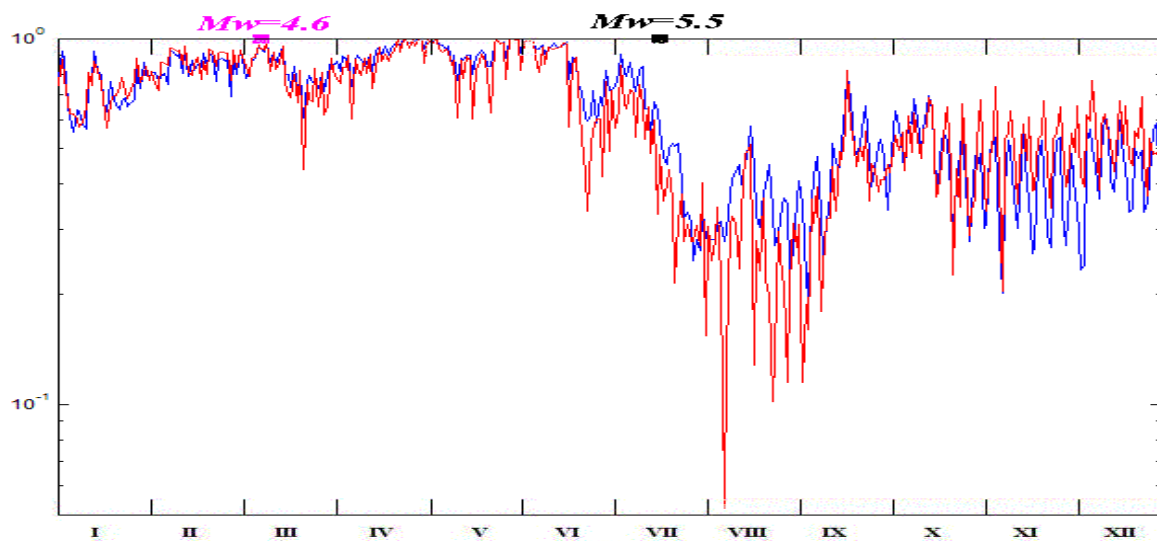
1977



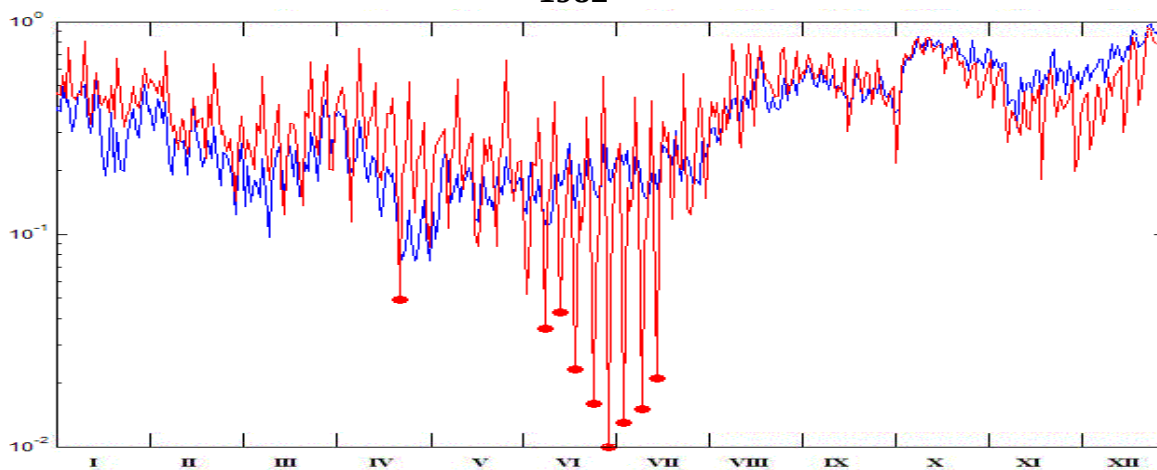
Luna
1978



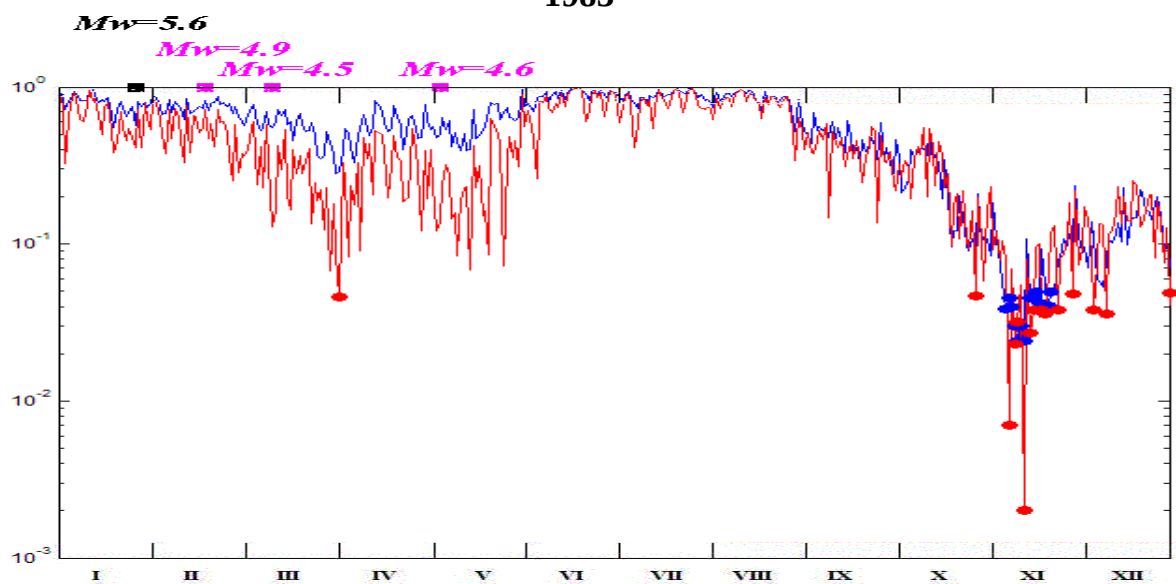
Luna
1981



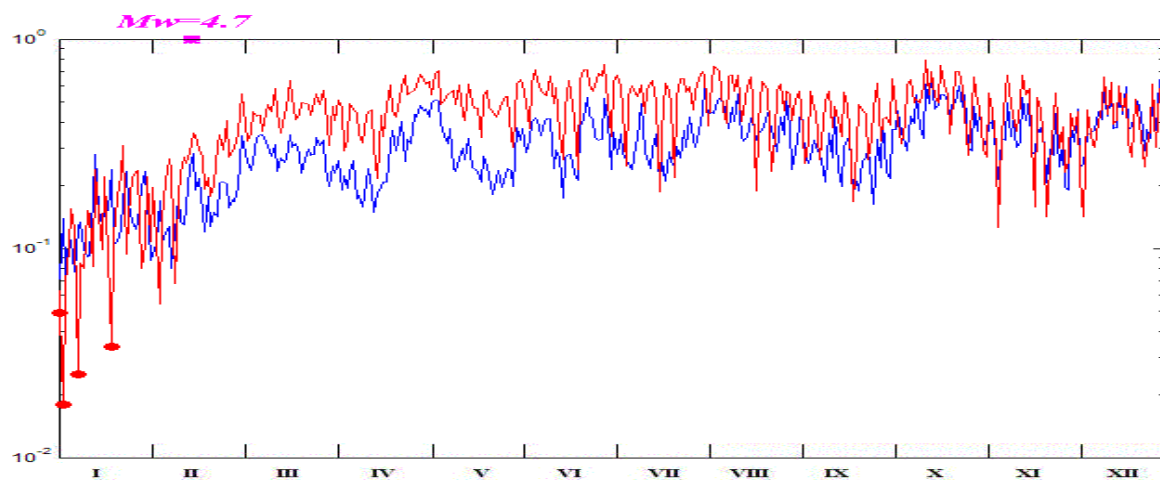
1982



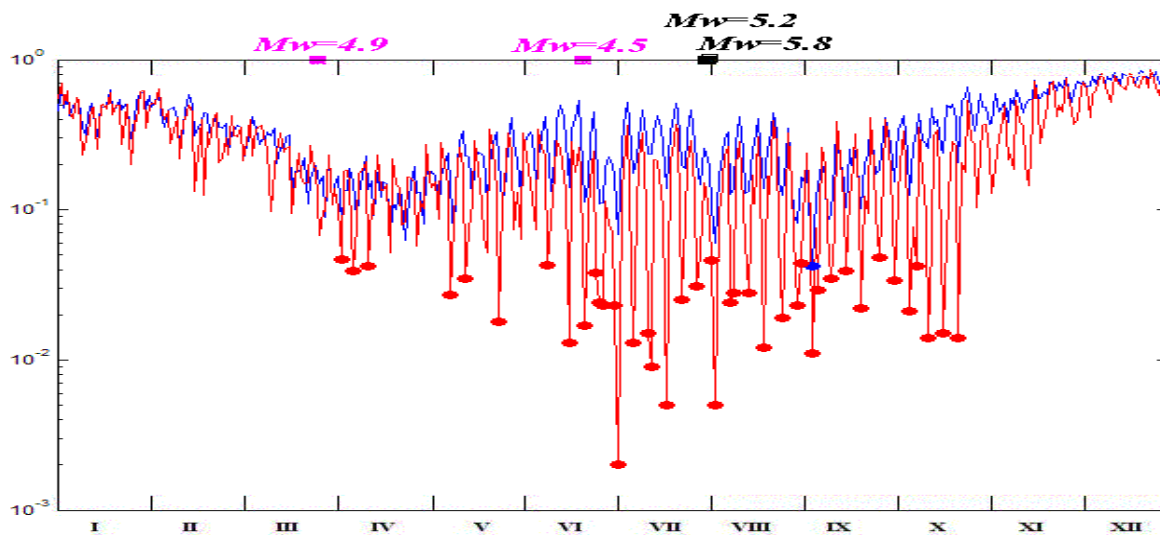
1983



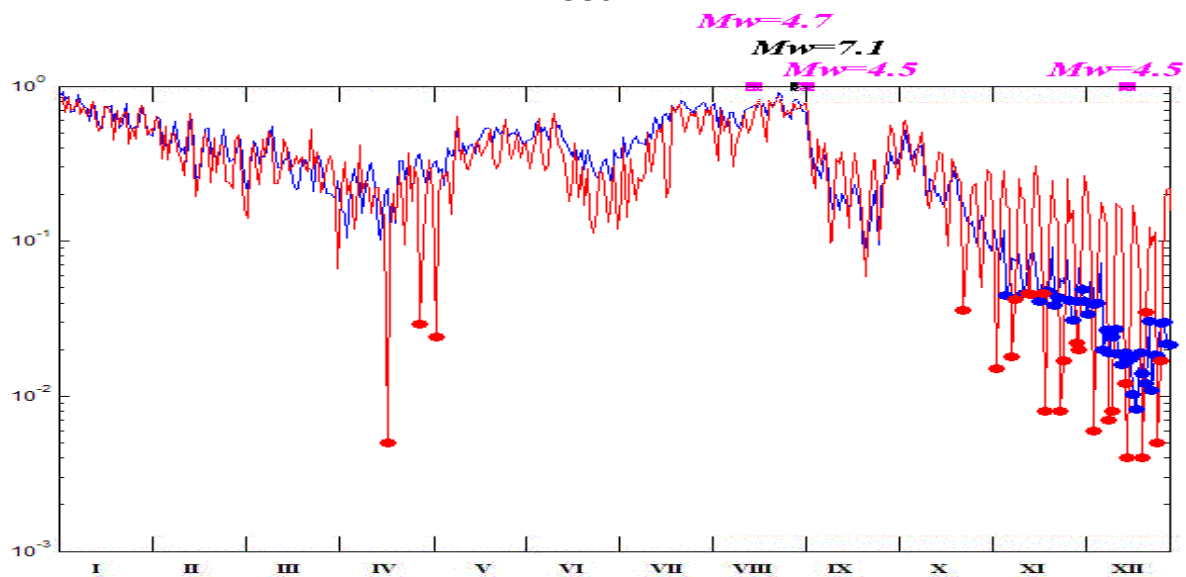
Luna
1984



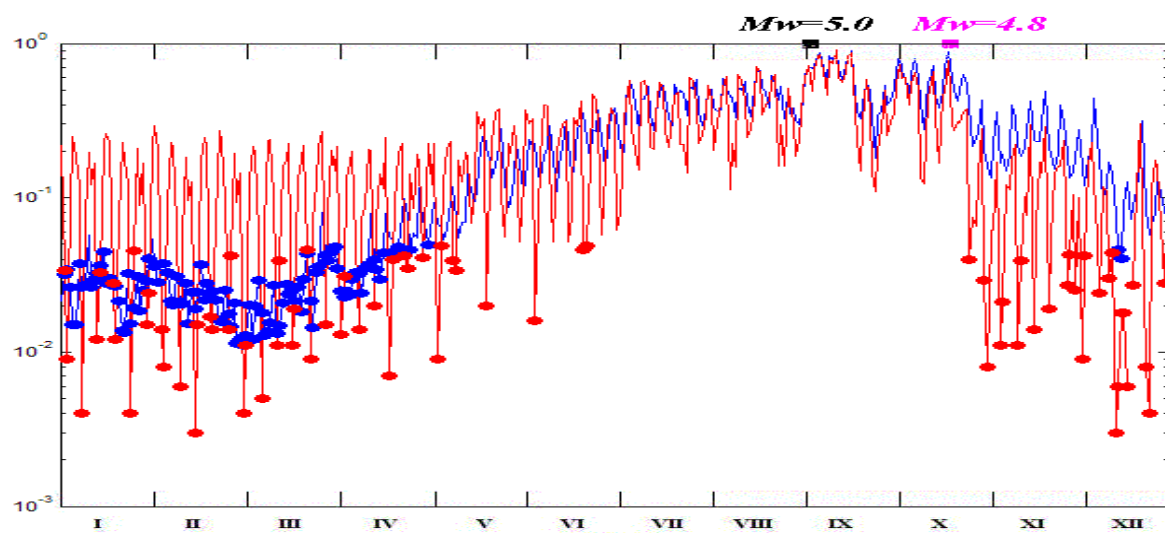
1985



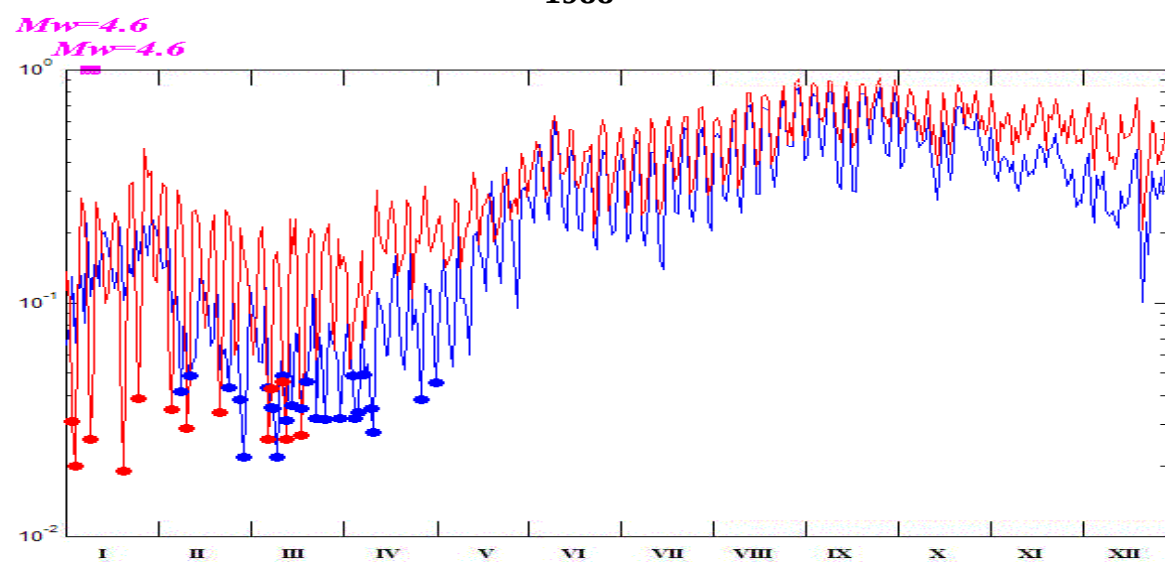
1986



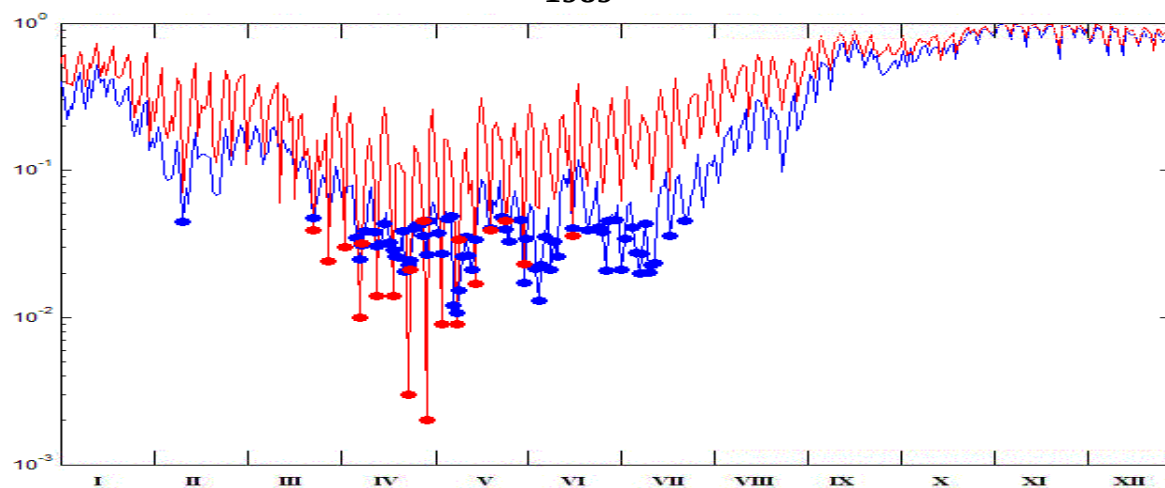
Luna
1987



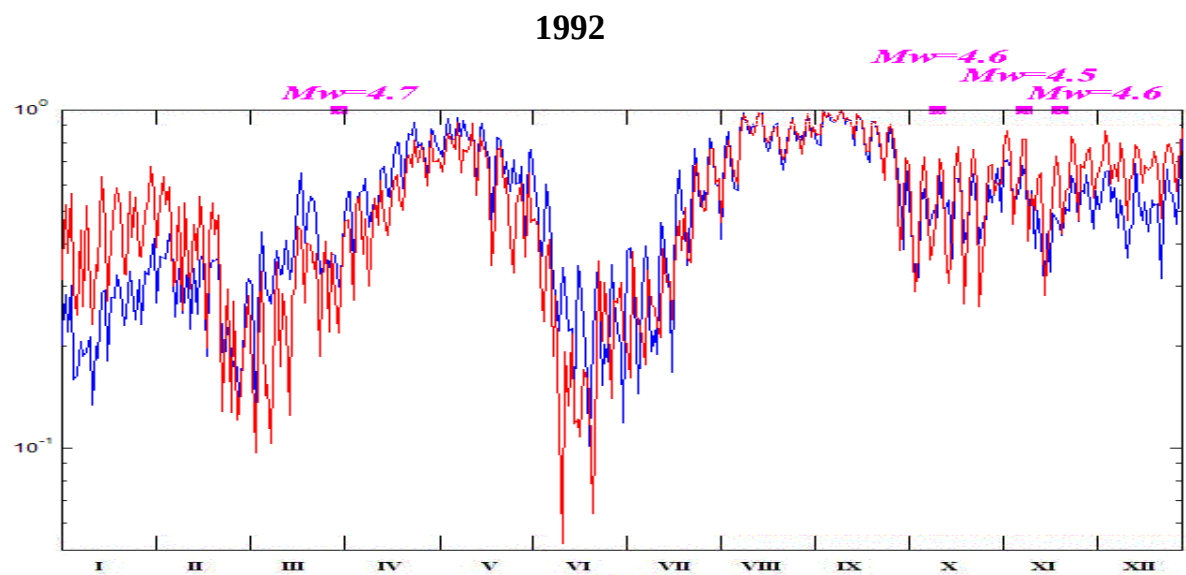
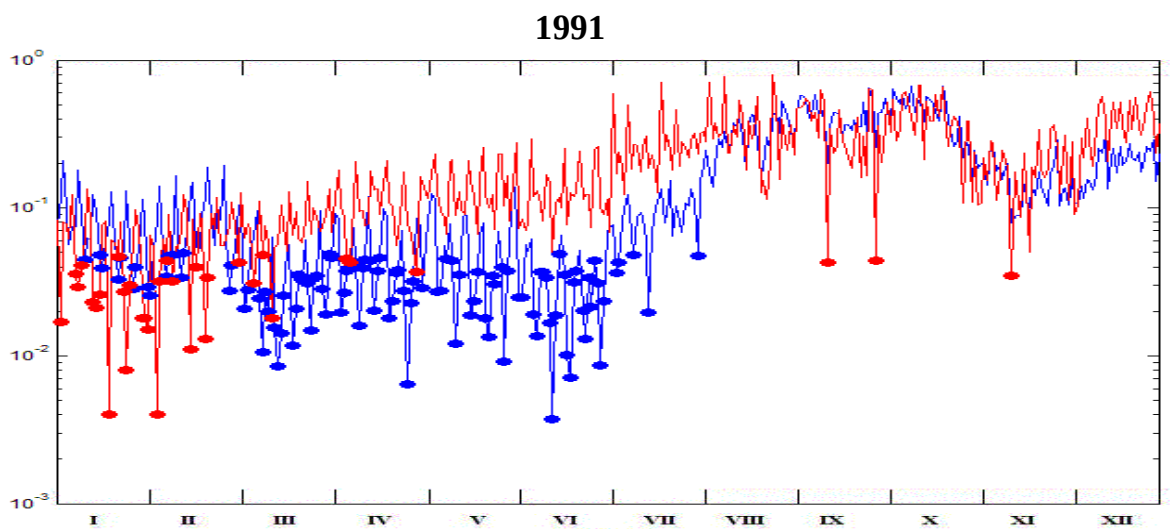
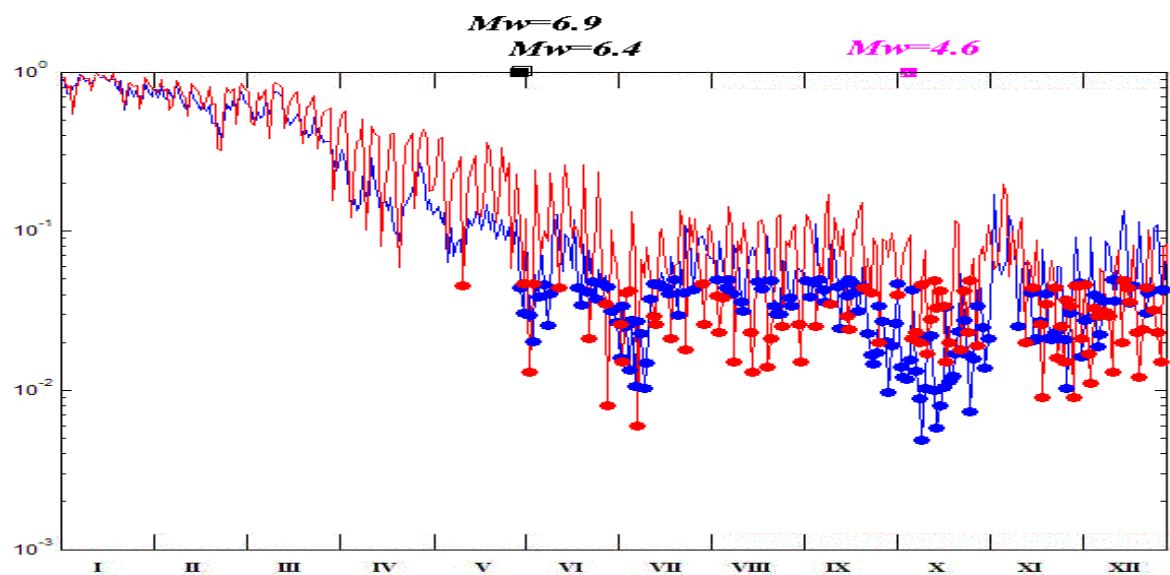
1988

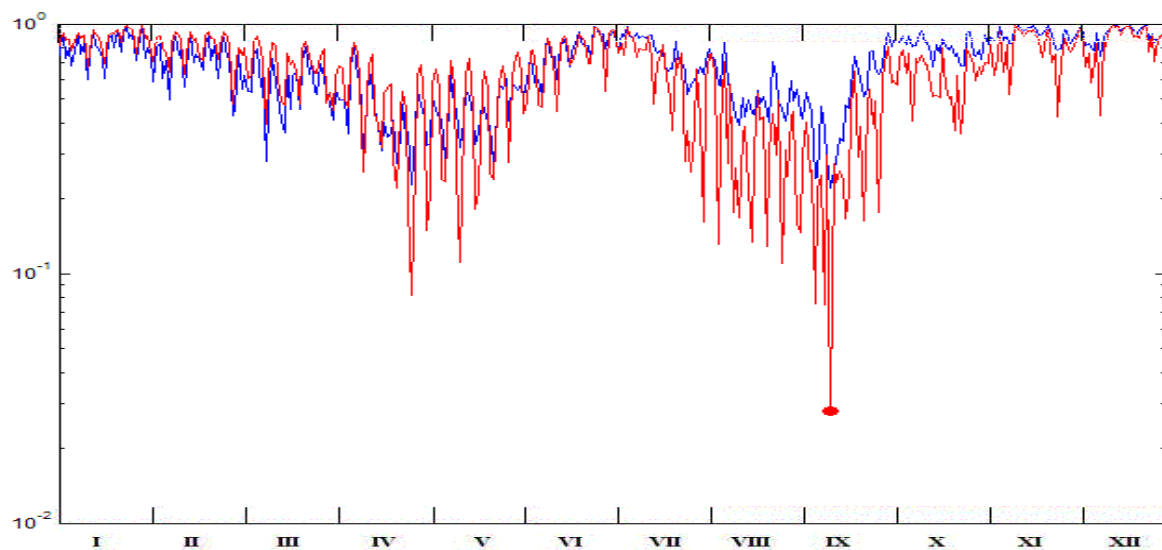


1989

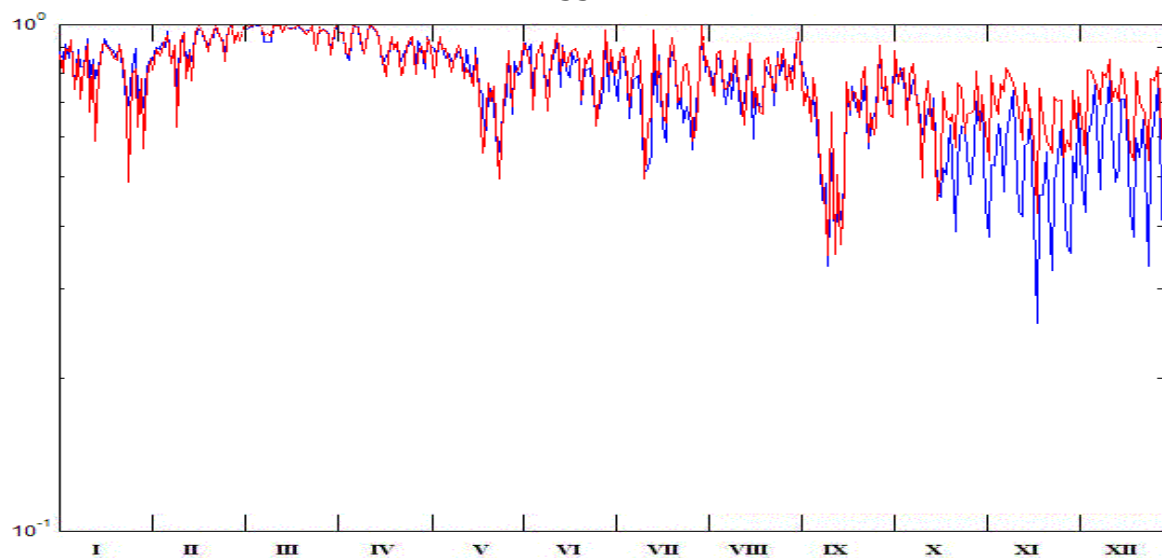


Luna
1990

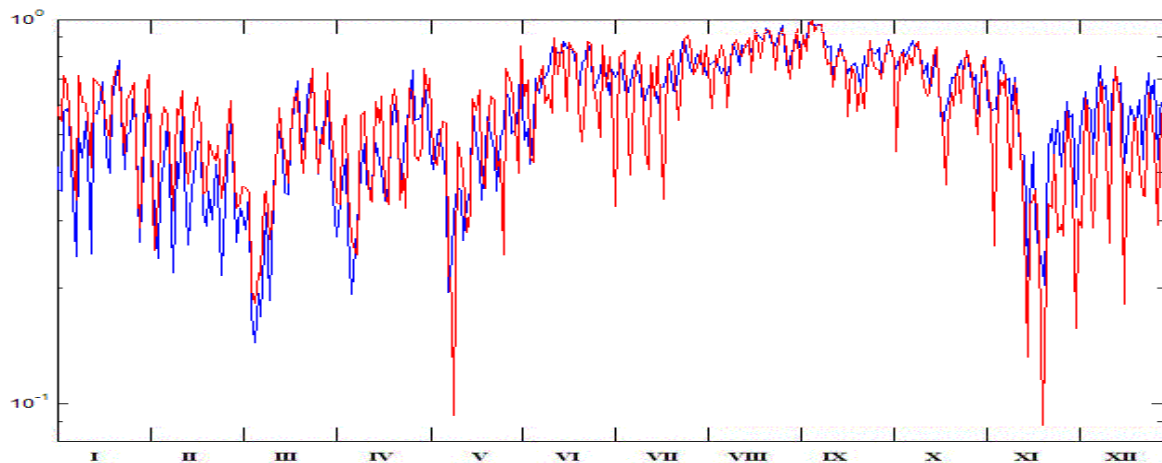




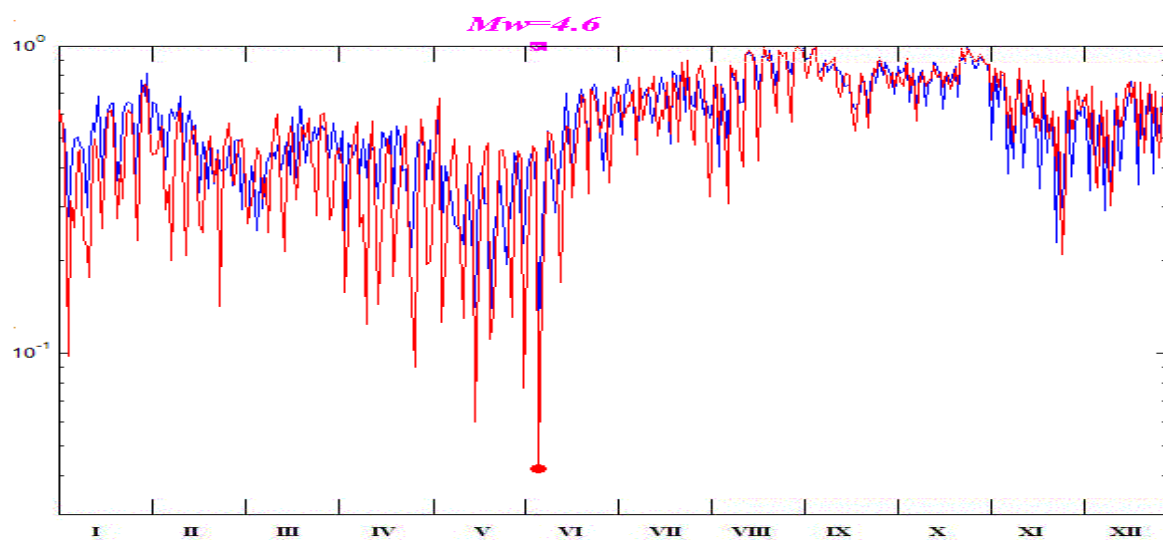
1994



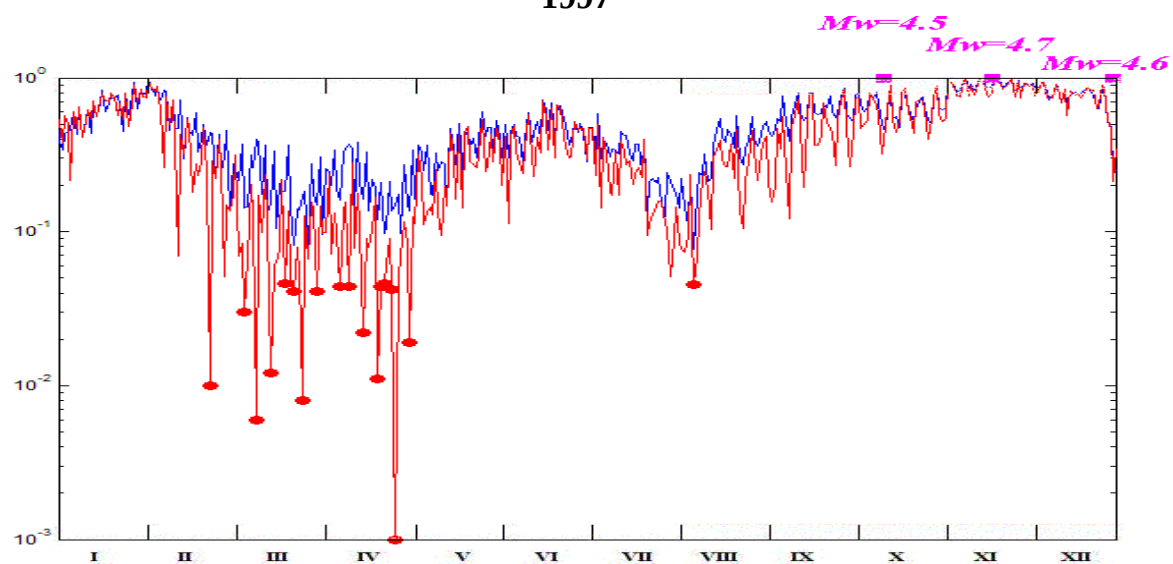
1995



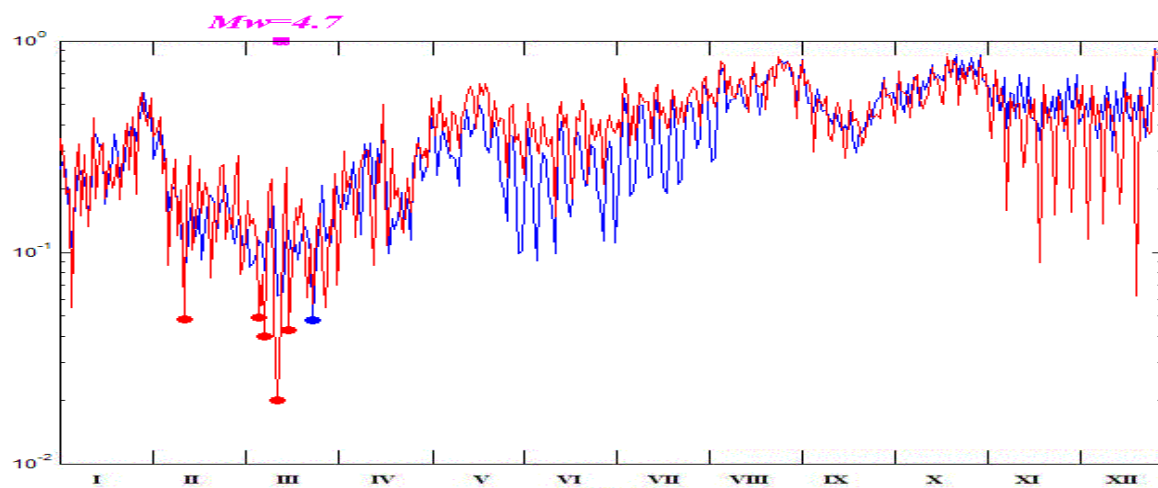
Luna
1996



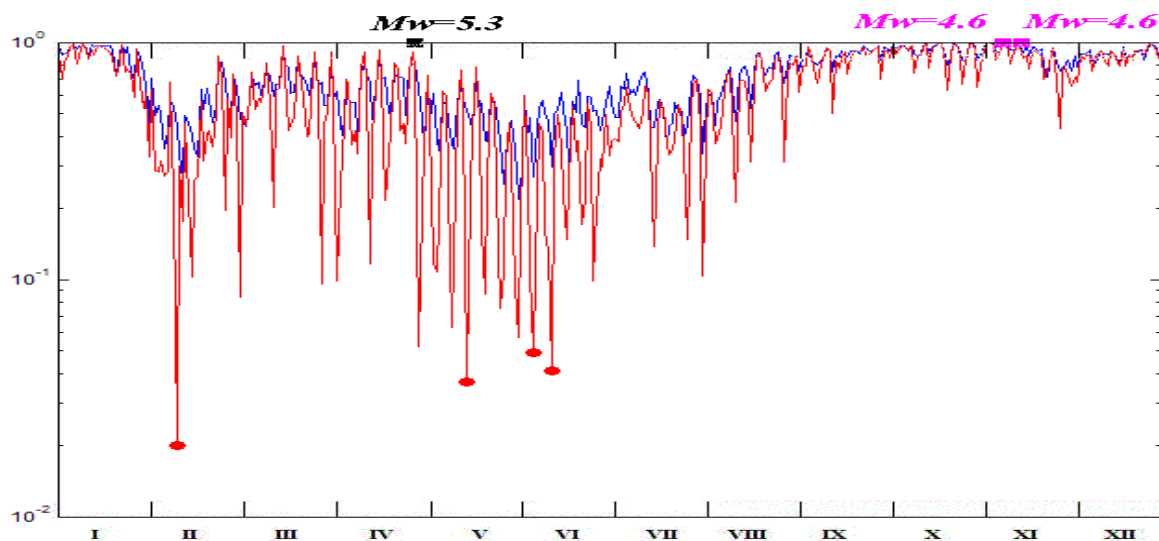
1997



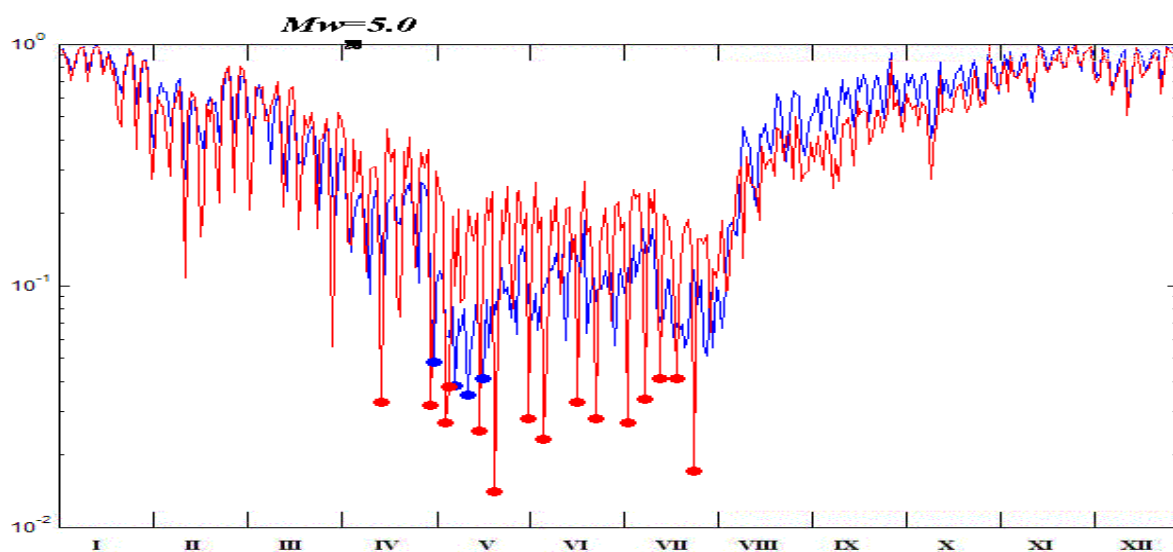
1998



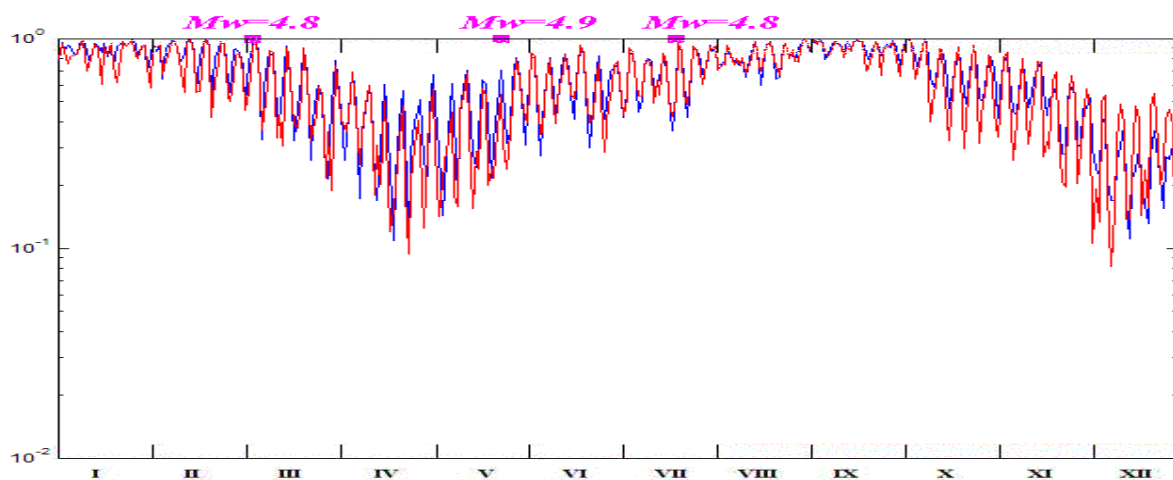
Luna
1999



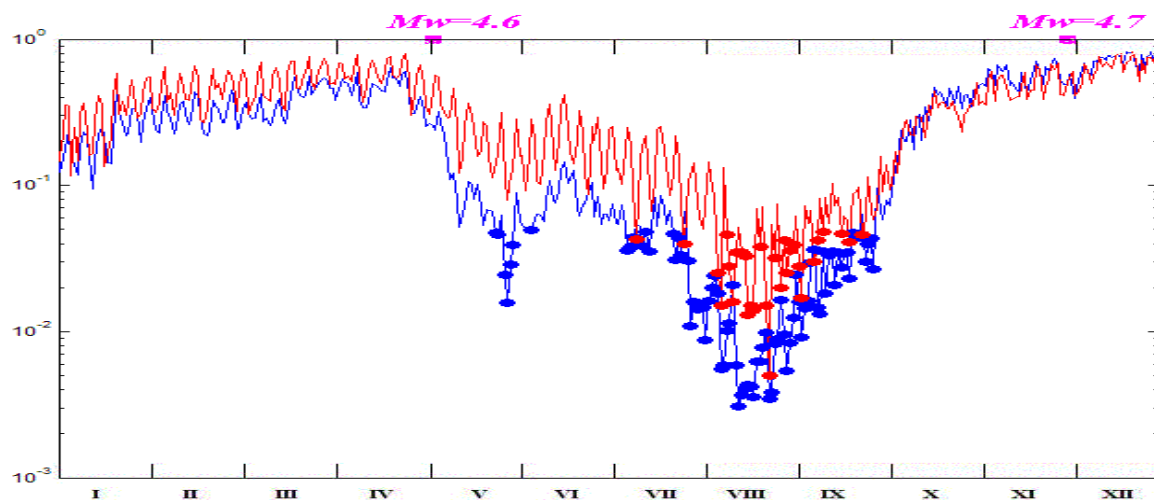
2000



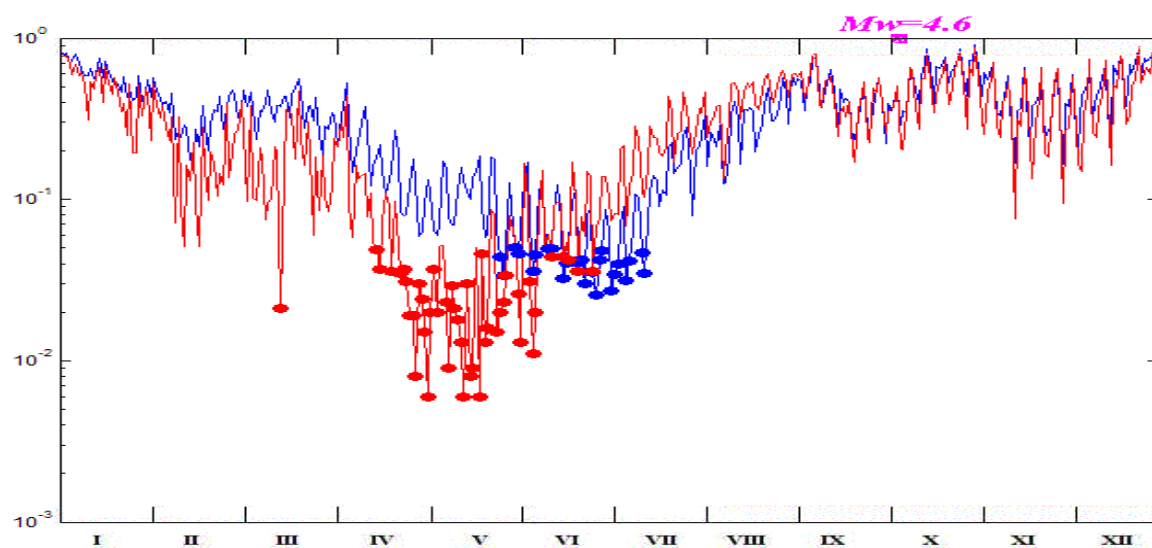
2001



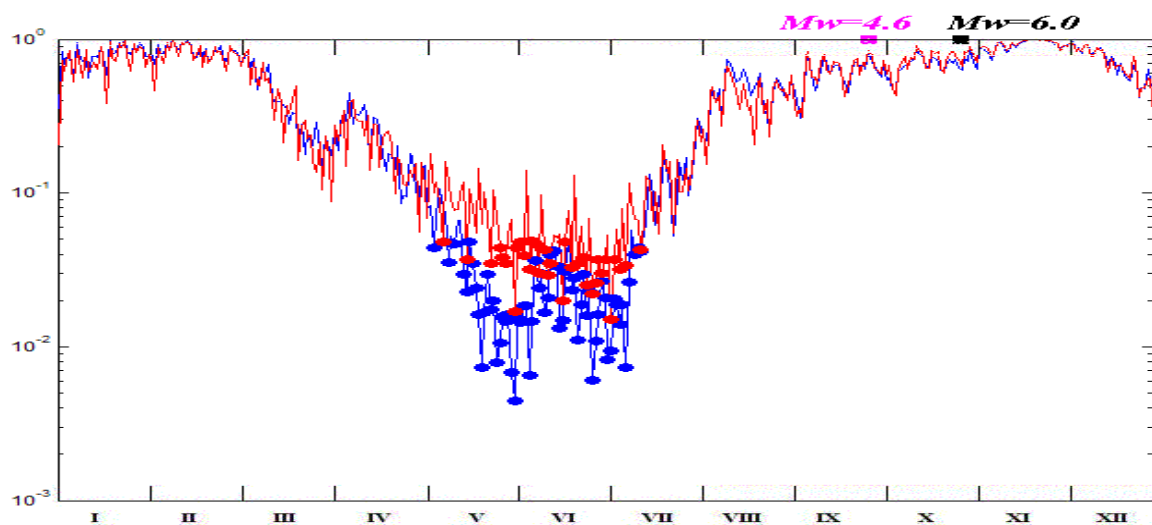
Luna
2002



2003



2004



Luna
2005

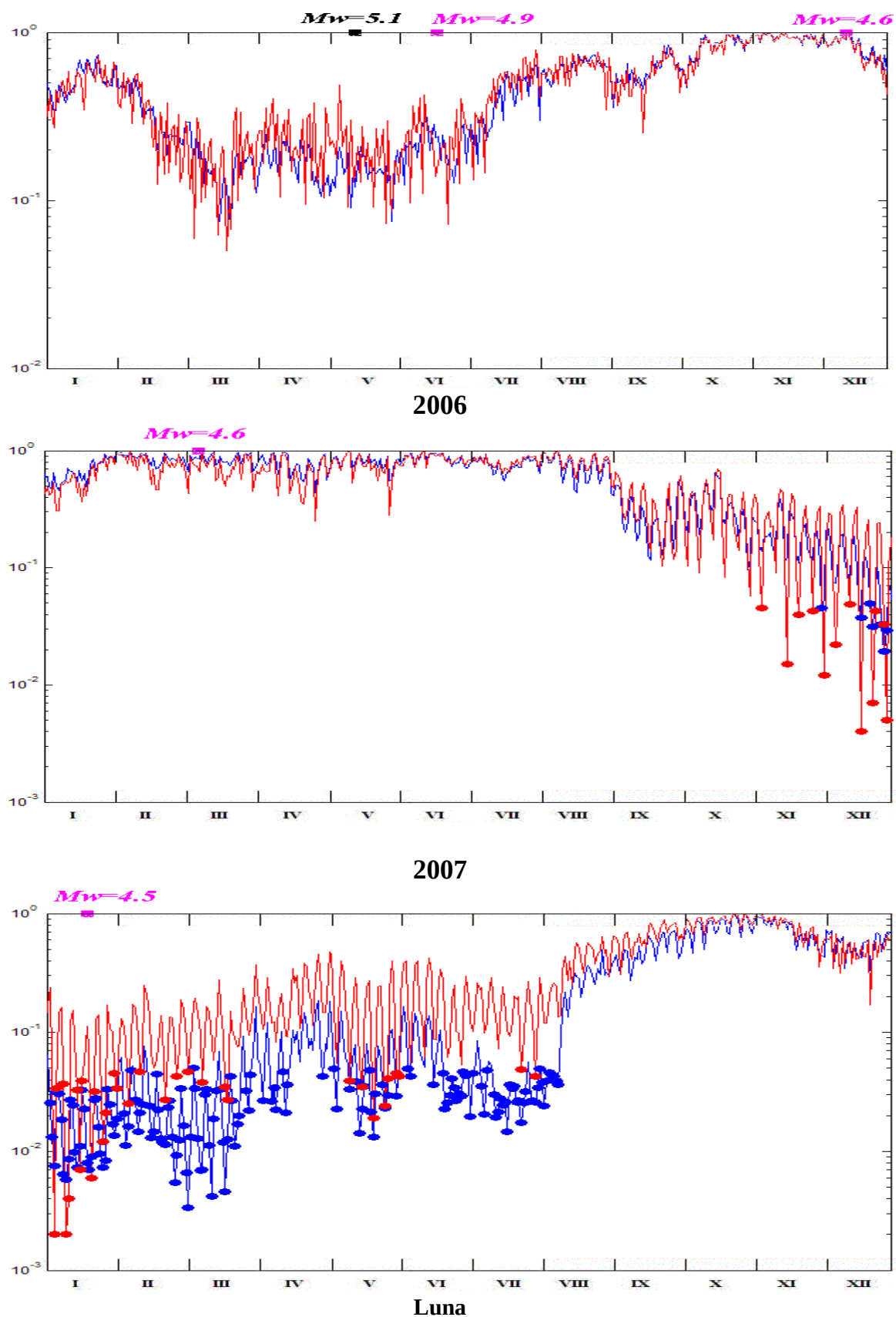


Fig. 5.4. – Detalii anuale ale figurii 5.2

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 amprente particulare a acestui coeficient înaintea producerii unui eveniment cu $M_w \geq 4.5$. Acest lucru ar putea indica o stare de cuplaj sau de rezonanță a componentei mareice, $M2$ în exemplul ales de noi, cu zona în care urmează să se producă sau s-a produs cutremurul.

Aceleași amprente specifice sunt confirmate prin utilizarea ferestrelor mobile ce conțin un număr constant de evenimente seismice și sunt deplasate cu un număr precizat de evenimente. Acest lucru înseamnă o variație continuă a dimensiunii temporale atât pentru fereastra mobilă și cât și pentru pasul ei de deplasare. Conservarea caracteristicilor de variație ale coeficientului statistic p și în acest caz, reprezintă o confirmare a tendinței de modulare a activității seismice sub acțiunea componentei mareice considerate pentru anumite ferestre temporale ale seriei de evenimente date.

Pentru a putea interpreta aceste rezultate avem nevoie de date geofizice complexe pentru întreaga perioadă analizată și un model adecvat pentru o asemenea analiză [AKI, 1981].

Deoarece în clipa de față acest lucru nu s-a dovedit a fi funcțional, am încercat să obținem informații suplimentare prin introducerea unui nou concept și lărgirea posibilităților de valorificare a proprietăților coeficientului statistic p .

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 (Fig. 5.5 și Fig. 5.6).

(a) Distribuții sintetice aleatoare uniforme

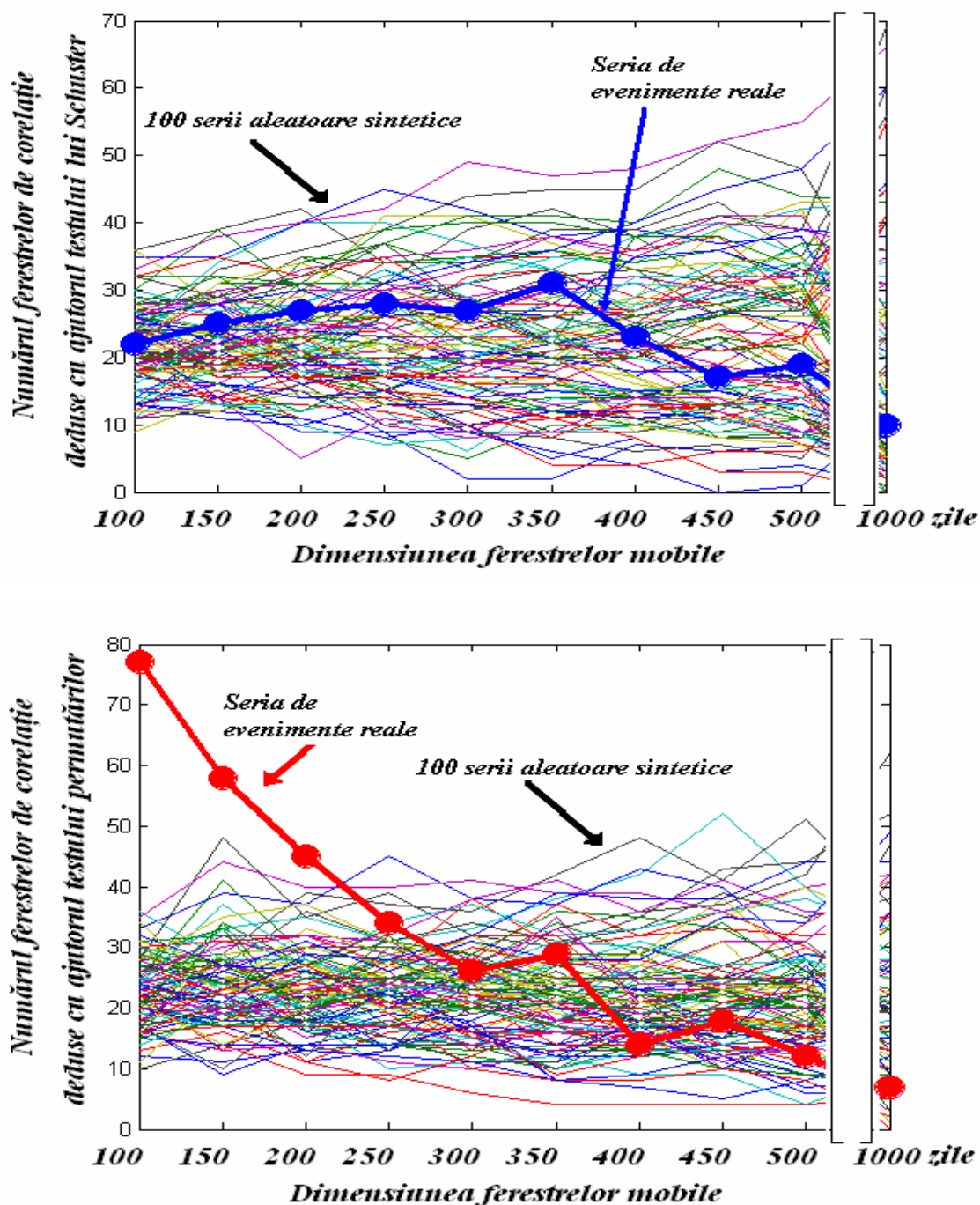


Fig. 5.5 - Sensibilitatea testelor statistice (testul lui Schuster și testul permutărilor) la tipul de distribuție al evenimentelor în cazul seriilor sintetice aleatoare uniforme

(b) Distribuții sintetice aleatoare obținute prin permutarea intervalelor consecutive dintre evenimentele seismice ale seriei de date inițiale

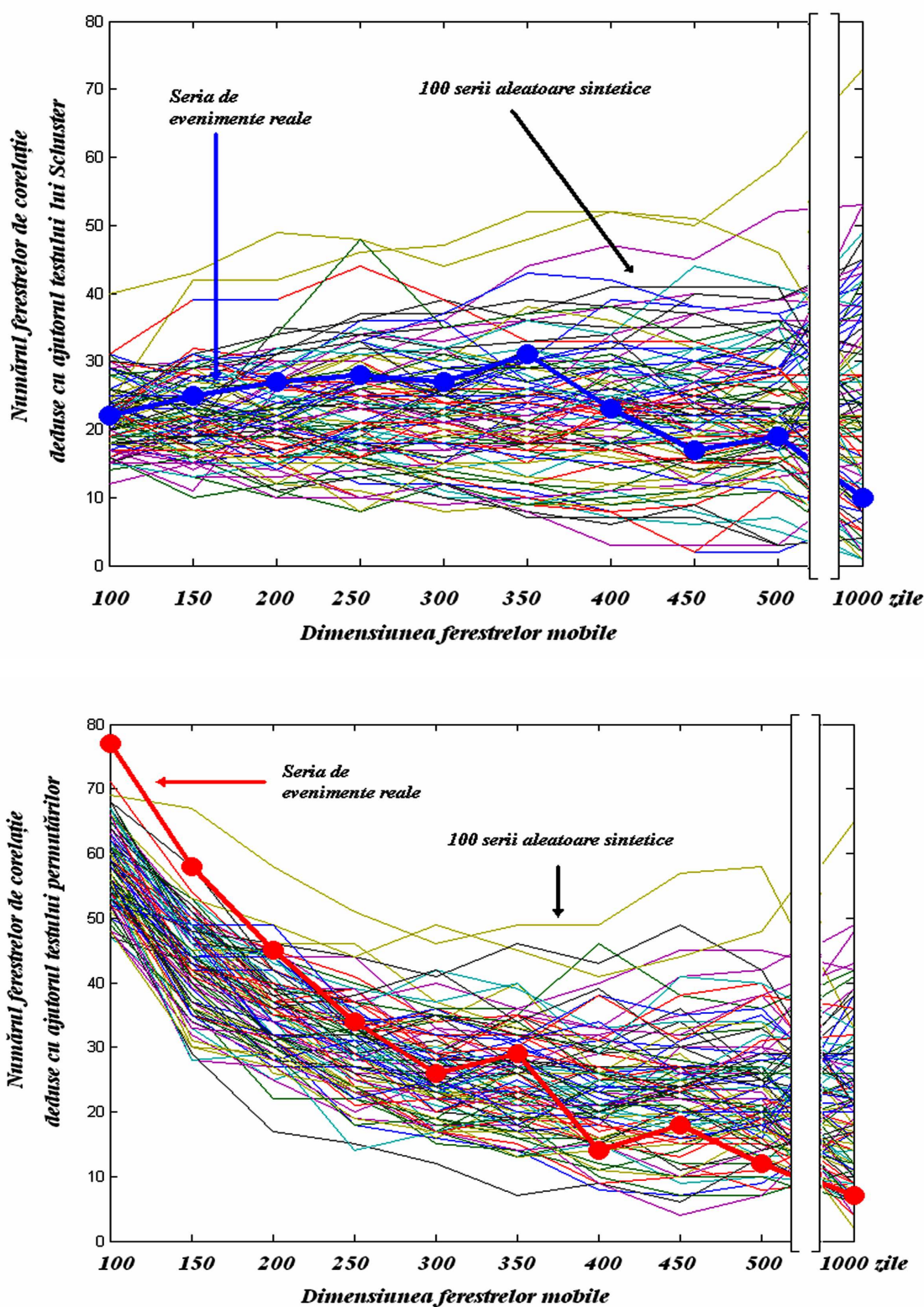


Fig. 5.6 - Sensibilitatea testelor statistice (testul lui Schuster și testul permutărilor) la tipul de distribuție al evenimentelor în cazul seriilor sintetice aleatoare construite prin permutarea aleatoare a intervalelor de timp dintre doua evenimente seismice consecutive.

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 (conductivă 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.

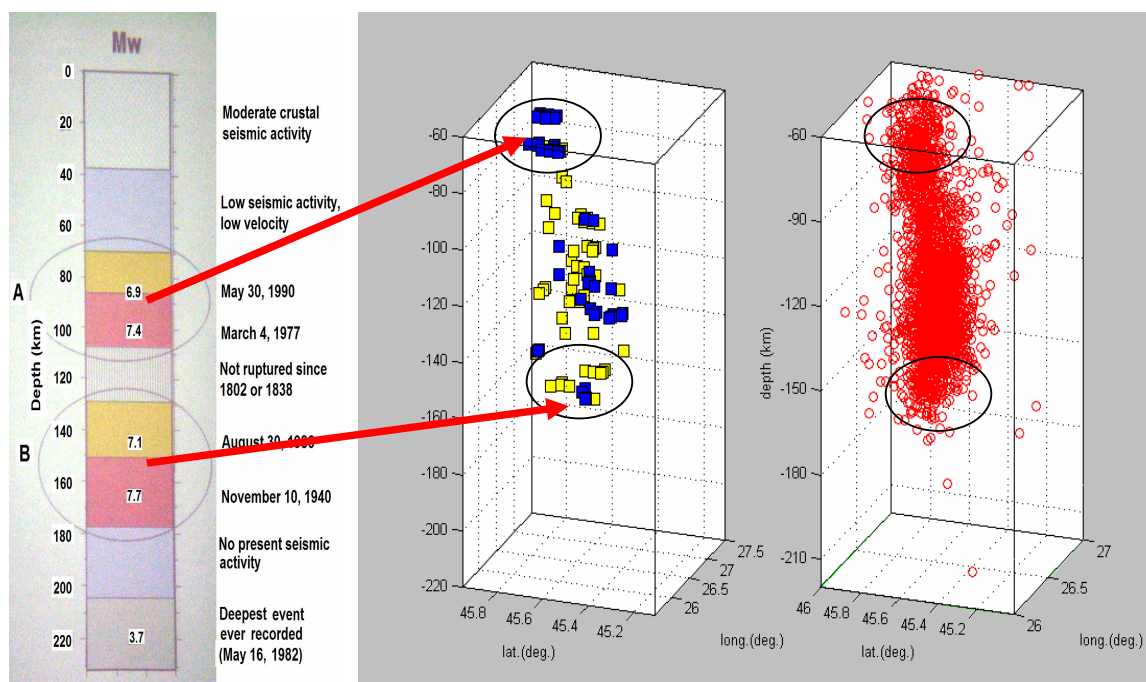
Tomografia statistică cu ajutorul mareelor terestre, având o altă semnificație decât tomografia deformărilor mareice introdusă de Wang în 1991 [WANG, 1991], se bazează pe distribuția 3D a coeficientului statistic p în zona în care se presupune interacțiunea dintre o componentă periodică a mareelor terestre 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) [ROGOZEA et al., 2007, 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.

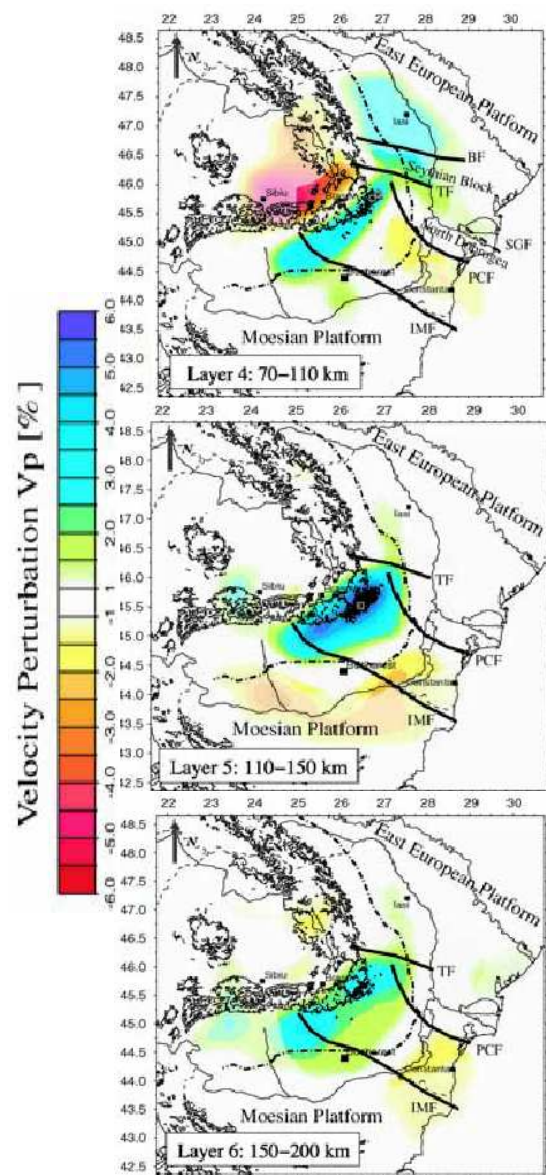
Sunt puse în evidență două zone distincte ale activității seismice intermediare între 70-100 km și 130-180 km (Fig. 5.7).



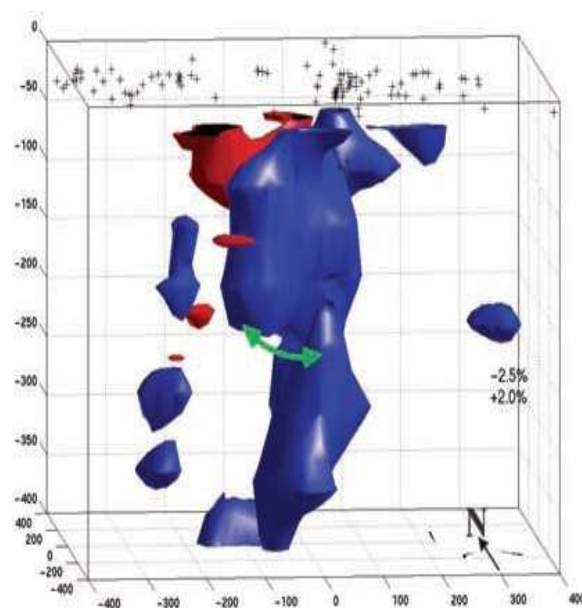
Radulian et al., 2007

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 mareice semidiurne lunare, M2 (pătrate albastre), și componentei mareice semidiurne solare S2 (pătrate galbene), în dreapta imaginii. Pătratele colorate corespunzător componentei mareice 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 mareice.

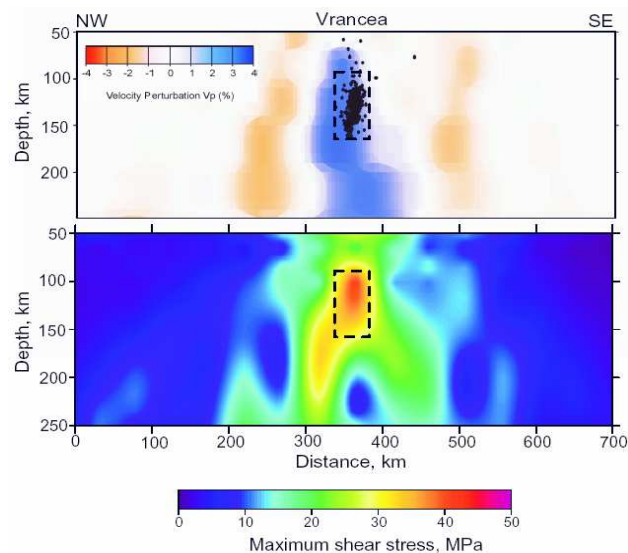
Tomografia mareică statistică pune în discuție chiar patru intervale sensibile la unele perioade particulare ale mareelor terestre (Fig. 5.9 și Fig. 5.10) : 70-90 km (SSA, O1, M2, MF, K1), 90-120 km (S2, SSA, K1, SA, MF), 120-140 km (SA, M2, MM, S2) și 140-170 km (SSA, S2, K1, MM).



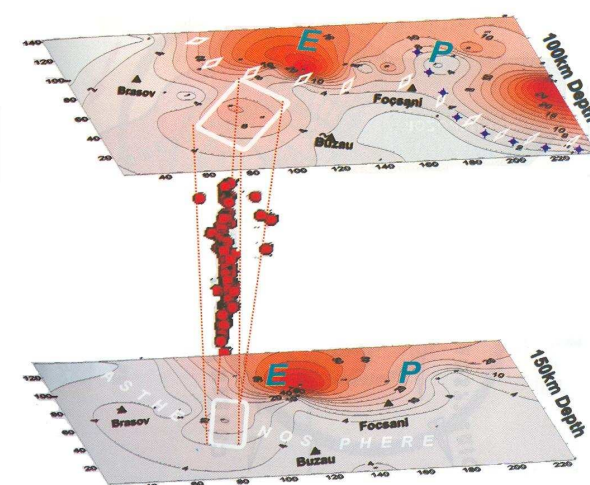
c) [Martin et al., 2006]



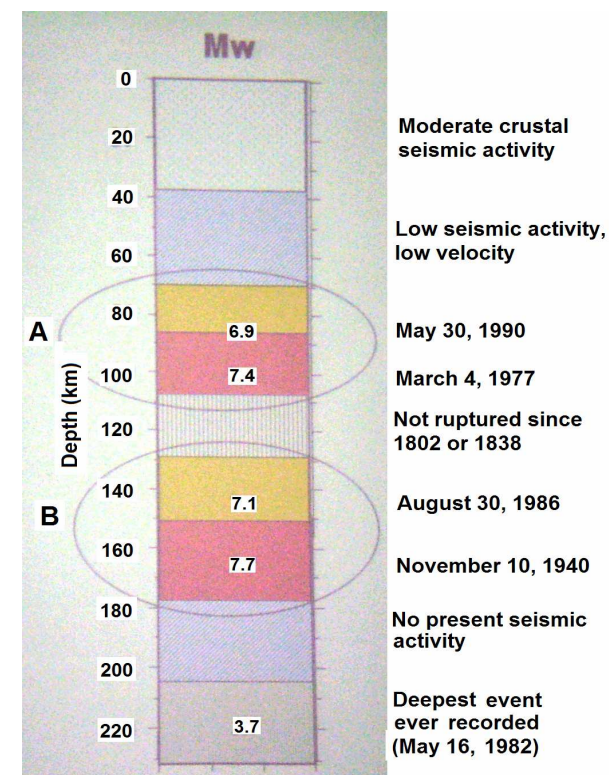
a) [Martin et al., 2001 2006]



d) [Ismail-Zadeh et al., 2005]



b) [Stănică et al., 2004]



e) [Radulian et al., 2007]

Fig. 5.8 – Câteva rezultate anterioare legate de zona seismică Vrancea : tomografie seismică (a, c, d), tomografie magnetotelurică (b) și analiza patternului de seismicitate (e).

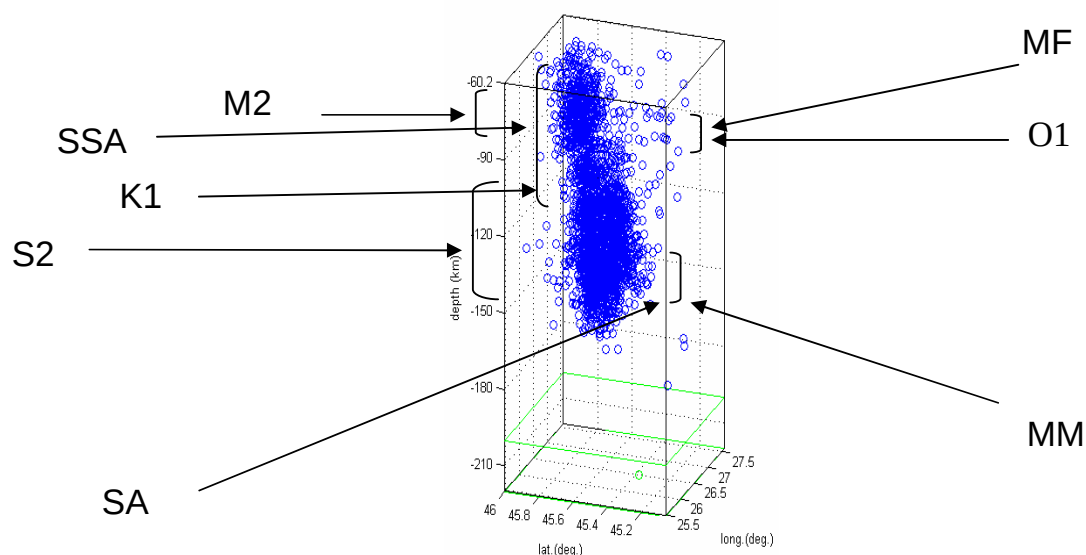


Fig. 5.9. – Zone preferențiale de corelație (stratele cu cel mai mare număr de elemente de volum cu $p < 5\%$) între principalele componente ale mareelor terestre și activitatea seismică intermediară din zona Vrancea. Rezultatele sunt obținute prin tomografie mareică statistică.

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 din afara 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.

S-a observat deja o clasificare preferențială cu adâncimea pentru anumite componente ale mareelor terestre care modulează activitatea seismică intermediară din zona Vrancea (Fig. 5.9). Se consideră că răspunsul la acțiunea mecanică a diferitelor unde de maree depinde de structura slab-ului seismic și în egală măsură de mediul în care acesta se află. Legile fizicii arată că structurile rigide răspund cu o constantă de timp mai mică la frecvențe mai înalte, în timp ce structurile mai puțin rigide se lasă antrenate mai ușor la frecvențe joase.

Dacă slab-ul seismic ar fi în contact doar cu structuri rigide, influența undelor mareice de lungă perioadă asupra activității seismice intermediare în partea superioară a acestuia ar fi aproape exclusă, dacă s-ar ține seama și de amplitudinea extrem de mică a acestora. Dar observăm că tomografia mareică statistică arată o prezență remarcabilă a undelor declinaționale lunare (MF), cu perioada de 13.66 zile, și declinaționale solare (SSA), cu perioada de o jumătate de an, în stratul cu activitate seismică cuprins între 70 și 90 km (Fig. 5.9). Aceasta implică o acțiune indirectă a unui volum cu densitate mai mică decât cea a zonei seismice, antrenat de oscilații mareice de lungă perioadă, cum sunt, spre exemplu, undele mareice declinaționale, ce pot contribui, împreună cu alte fenomene geofizice, la declanșarea cutremurelor de pământ, și, de ce nu, prin același mecanism, la acumularea de stres tectonic la nivelul slab-ului seismic.

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 statistică 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).

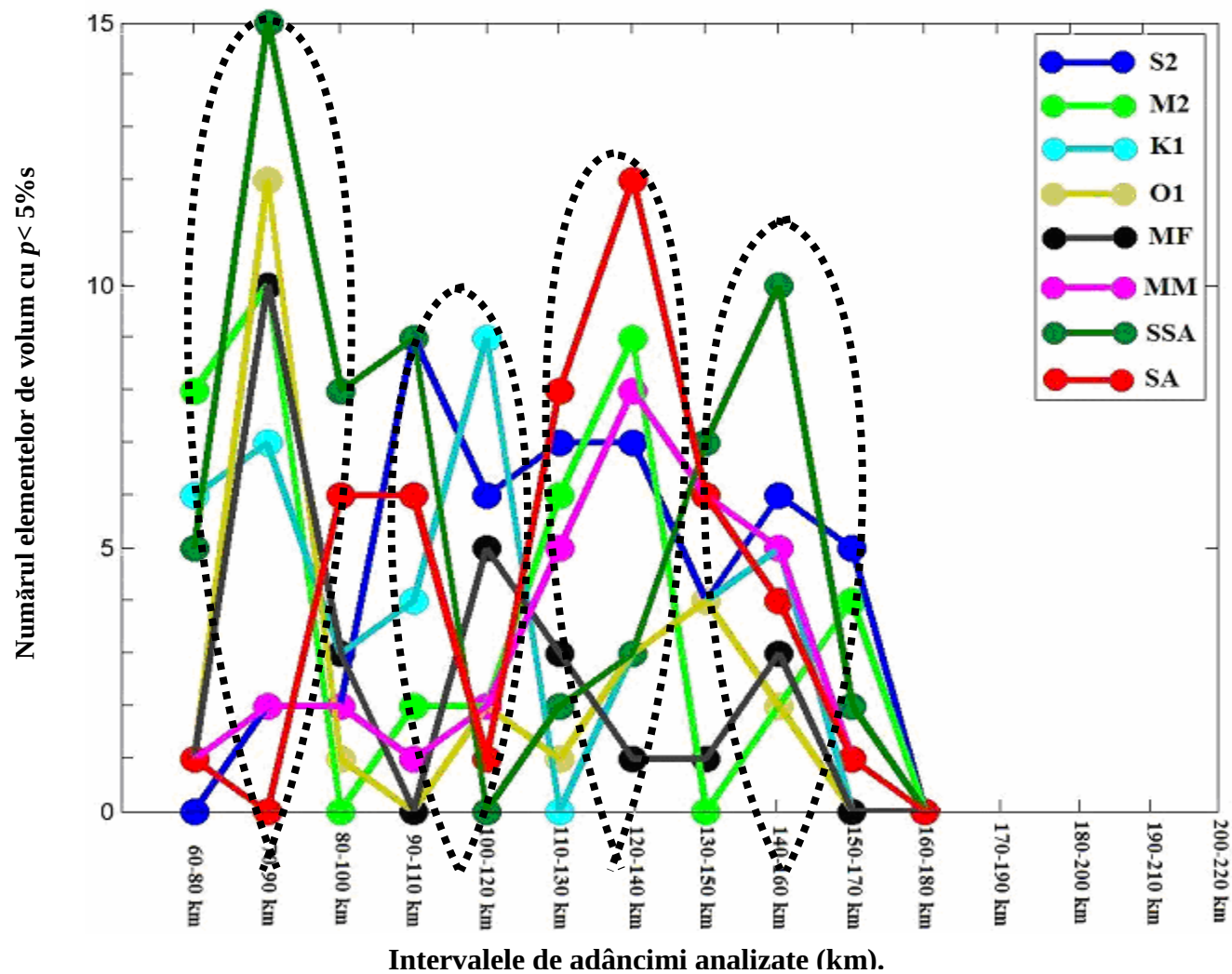


Fig. 5.10 - Distribuția elementelor de volum caracterizate printr-un coeficient statistic $p < 5\%$ pentru diferite componente ale mareelor terestre la diferite adâncimi. Zonele particulare au fost marcate prin linii curbe întrerupte.

5.3. Integrarea 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 de către componentele care caracterizează principalele grupe ale mareelor terestre. Aceste tendințe sunt, probabil, specifice unor etape diferite în evoluția zonei seismice amintite.

Am remarcat amprente specifice ale variației coeficientului statistic p în intervale de timp variabile ca lungime, înaintea declanșării unui cutremur de pământ moderat ($4.5 \leq M_w < 5.0$) sau mai puternic ($M_w \geq 5.0$).

Presupunem că preferința pentru anumite periodicități ale mareelor terestre în declanșarea cutremurelor de pământ implică caracteristici geologice și tectonice specifice zonei seismice Vrancea.

Dimensiunii temporale pentru analiza corelației maree-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 mareelor terestre, deschizând o etapă nouă în istoria corelației dintre mareele terestre și cutremurele de pământ.

Cu ajutorul tomografiei mareice statistice se poate obține o hartă comparabilă cu cea a unei tomografii seismice dar interpretarea semnificației reprezentării se găsește, deocamdată, la început. Rezultatele trebuie să fie completate cu alte informații geofizice pentru a avea o interpretare cât mai aproape de realitate.

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

În capitolul 1 al tezei au fost prezentate câteva modele geodinamice acceptate, mai mult sau mai puțin, sau aflate încă în discuție, pentru zona seismică Vrancea. Rezultatele obținute de noi până în momentul de față conduc spre câteva ipoteze care iau în considerare modelele amintite dar încearcă să integreze și informațiile noi.

În figura 5.11. 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 mareelor terestre, pe de o parte, și activitatea seismică intermediară, pe de altă parte, prin prisma torsiunii slab-ului din zona Vrancea.

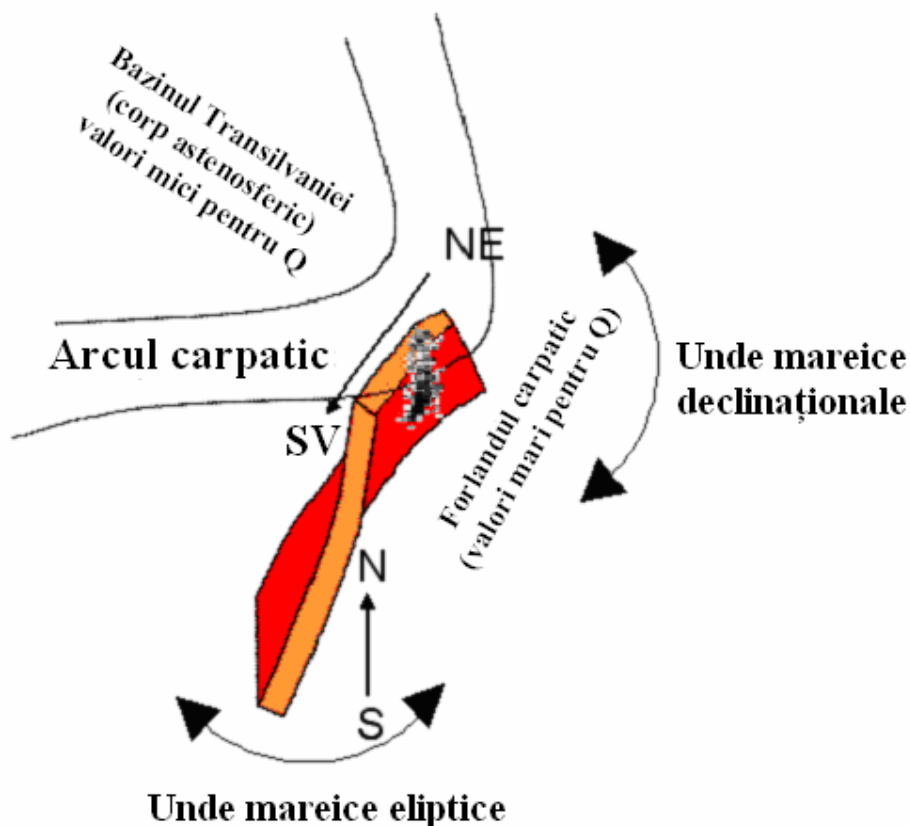


Fig. 5.11 – Poziția slab-ului aflat în torsiune [Stănică et al., 2004, Martin et al., 2006] cel mai probabil urmare a triplei joncțiuni a celor trei plăci continentale [Beșuțiu, 2002] cu grosimi litosferice diferite în jurul lui, și în contact cu volume caracterizate prin reologii diferite. Toate aceste 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 mareelor 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 mareelor 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 mareelor terestre, aport constant și la scară mare când ne raportăm la dimensiunile Pământului, scară la care numai răspunsul inerțial al unor fenomene generate de mareele terestre ar putea concura cu amplitudinea altor fenomene geofizice cunoscute.

Studiile privind activitatea vulcanică pot aduce, de asemenea, informații complementare asupra corelației dintre mareele 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 (Fig. 5.12). 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) (Fig. 5.13). Dar contextul tectonic al

acestor două zone seismice este complet diferit de cel al zonei Vrancea [BEȘUȚIU and CADICHEANU, 2003].

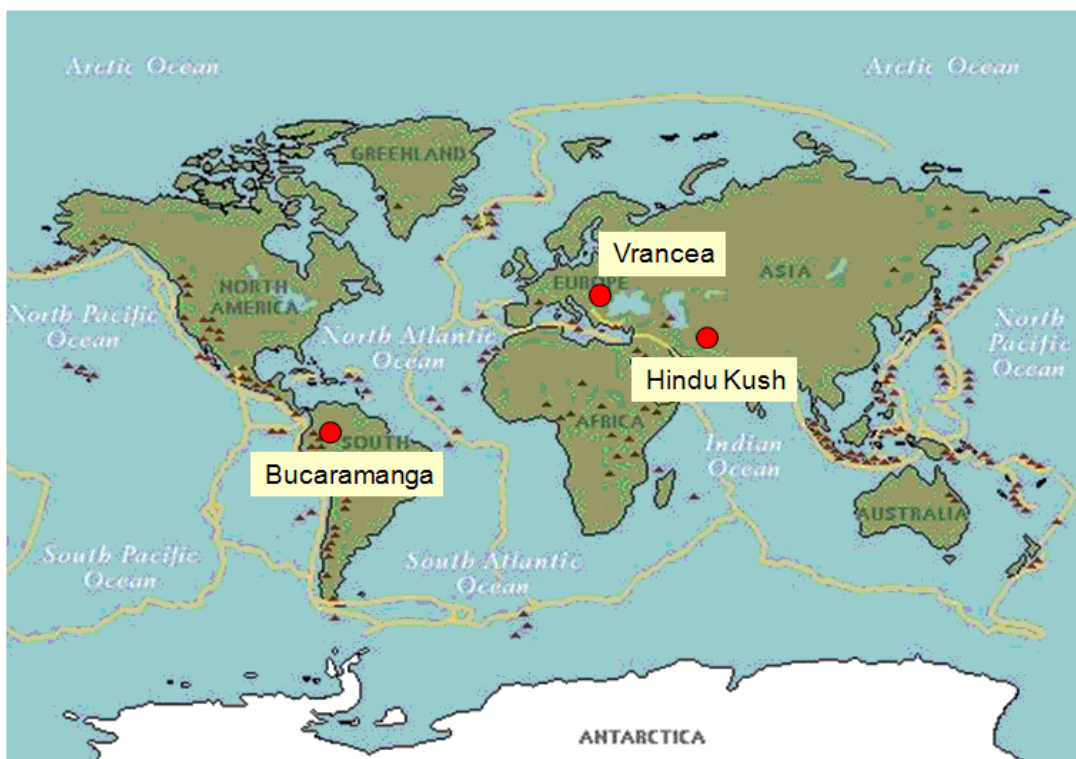


Fig. 5.12 – Zonele seismice Vrancea, Bucaramanga și Hindu Kush
(<http://gmt.soest.hawaii.edu>)

Componentele mareice utilizate sunt unda lunară semidiurnă M_2 și unda solară semidiurnă S_2 deoarece aceste două componente sunt cele mai reprezentative în spectrul mareelor terestre .

Tendențe de modulare a activității seismice intermediare sunt, de asemenea, prezente în zonele Bucaramanga și Hindu Kush (Fig.5.14). Distribuția zonelor de cuplaj dintre componentele semidiurne M_2 și S_2 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].

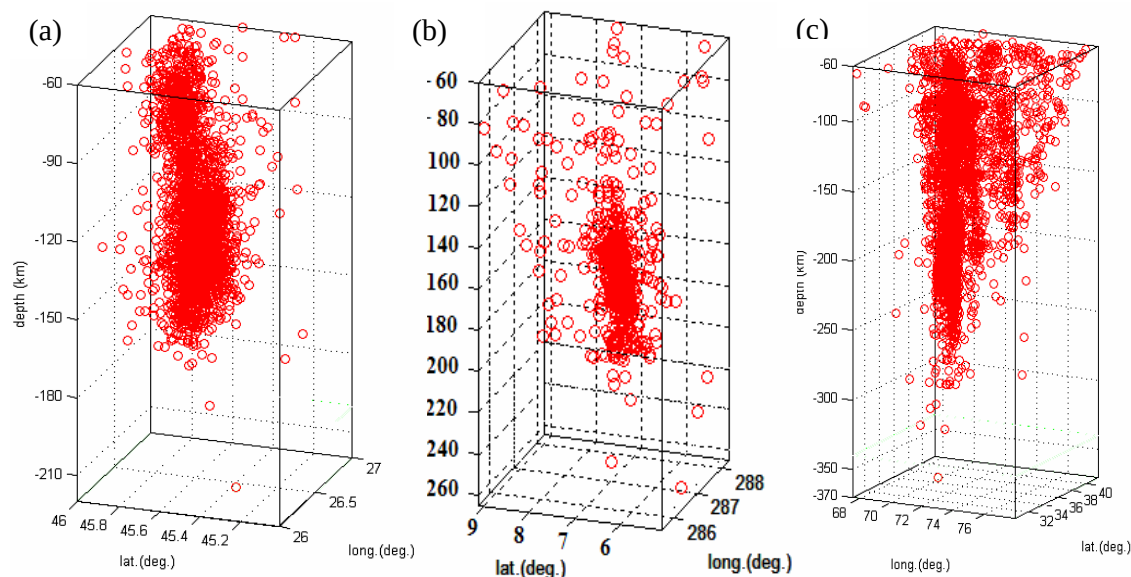


Fig. 5.13 - Distribuția activității seismice intermediare în zonele: Vrancea (a), Bucaramanga (b) și Hindu Kush (c)

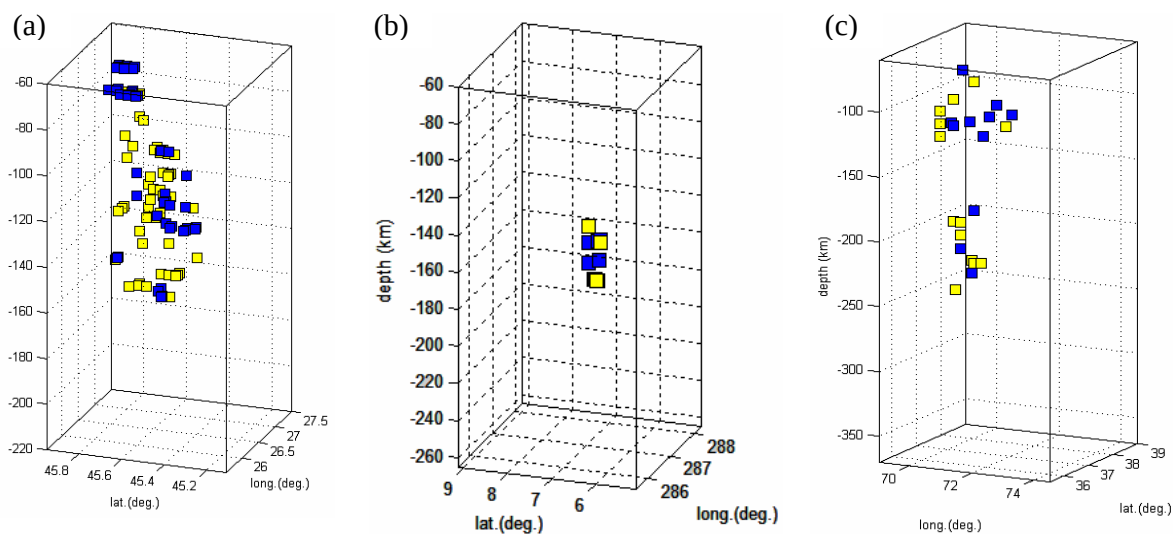


Fig. 5.14 – Distribuția elementelor de volum cu valori ale coeficientului statistic $p < 5\%$ pentru undele mareice semidiurne M2 lunare și S2 solare în Vrancea (a), Bucaramanga (b) și Hindu Kush (c).

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**

CONCLUZII ȘI PERSPECTIVE

Scopul tezei a fost de a pune în evidență interacțiunile dintre mările 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 mării terestre. Luând în calcul doar implicarea anumitor periodicități în declanșarea evenimentelor seismice, am analizat cuplajele posibile dintre mările 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 mări 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 mareele 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 puternice vrâncene 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 maree-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 mareelor 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 geometrice 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).

Contributii 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 mareelor 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.

Perspective legate de extinderea metodei și monitorizare a activității seismice

Demersul nostru în această lucrare deschide posibilitatea unor noi aplicații importante în domeniul geostiinelor. 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 amprente 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 mareele 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.



ANEXE

Anexa A

Articol: *Periodical tendencies in Vrancea seismic activity detected by the Hi-Cum stacking method*

**CADICHEANU, N., VAN RUYMBEKE, M.,
ZUGRĂVESCU, D., EVERAERTS, M. & HOWARD, R**
Rev. Roum. Geophysique, 50, p.31-57, 2006

*Periodical tendencies in Vrancea seismic activity detected
by the Hi-Cum stacking method*

**CADICHEANU, N., VAN RUYMBEKE, M.,
ZUGRĂVESCU, D., EVERAERTS, M. & HOWARD, R**
Rev. Roum. Géophysique, 50, p.31-57, 2006

- (1) The Geodynamic Institute of Romanian Academy, 19-21 J.L.-Calderon, 020032,
R-37 Bucharest, Romania
(2) Royal Observatory of Belgium, Avenue Circulaire, 3, B-1180 Bruxelles, Belgium
Tel: +32-2373-0286, E-mail: labvruy@oma.be

Abstract

The possibility that Earth-tides could be triggering seismic events has been investigated by many authors. In this paper we have analysed seismic events occurring in Vrancea (Romania) subcrustal region between December 1st, 1982 and November 30th, 2004 in order to further investigate this possible phenomenon. The stacking method of analysis (HiCum) has been applied in order to determine whether there is a periodicity in seismic activity related tidal and non-tidal events.

In some cases significant tendencies were found for different tidal periods related to Solar and Lunar time references. The periodic effects could be the result of the modulation of various geophysical parameters, which arise from any point on the Earth's surface moving in front of the Sun (climatic, magnetic, electric inductions etc.) and through the gravitational fields of the Moon and Sun (tidal gravitational inductions). These variations will be time and space dependent.

Keywords: seismic activity, earth-tides, tectonic movements, HiCum,

**LES TENDANCES PERIODIQUES DANS L'ACTIVITE SISMIQUE DE VRANCEA,
MISES EN EVIDENCE AVEC LA METHODE HI-CUM**

Résumé

De nombreux auteurs ont investigué la question de l'éventualité du déclenchement des tremblements de terre, d'une action d'origine solaire ou lunaire. Ce déclenchement serait dû aux modulations gravitationnelles induites par les marées terrestres. Dans ce travail nous avons plus spécialement analysé les événements sismiques produits dans la région de Vrancea (Roumanie) entre le 1^{er} Décembre 1982 et le 30 novembre 2004. Disposant des valeurs des périodes de ces actions d'origine astronomique avec une très grande précision, nous avons utilisé une méthode de stacking adaptée aux modulations luni-solaire développée sous le nom de HiCum. Son application à la base de données sismique nous a permis de confirmer la présence de périodicités liées aux marées terrestres ou à des événements ayant les mêmes périodes dans l'occurrence sismique.

Dans certains cas nous avons pu constater des tendances significatives. Les effets périodiques pourraient être le résultat de la modulation de divers paramètres géophysiques caractéristiques pour chaque point de la Terre, en fonction des positions respectives du Soleil (inductions d'origine climatique, magnétique, électrique, etc.) et par les champs gravitationnelles du Soleil et la Lune (les marées terrestres). Ces variations étant dépendantes du temps et de l'espace, nous avons tenté la mise en relation des résultats de cette analyse, avec les caractéristiques de la structure géologique de la région de Vrancea.

Mots clé: activité sismique, marées terrestres, mouvements tectoniques, Vrancea, HiCum

1. Introduction

Romania is, along with Italy and Turkey, one of the most active earthquake regions in Europe. The extremely peculiar seismotectonic and geodynamic process in the area of the Eastern Carpathian arch belt has been the subject of numerous investigations by seismologists. Enescu and Enescu (1998) used a histogram method to investigate the possibility that Earth tides could be triggering subcrustal earthquakes in this region.

Processes such as Earth tides and climatic induction are very small amplitudes. It will therefore be difficult to detect their effects. Stavinschi, and Souchay (2003) have used statistical analysis to detect correlations between earthquakes and earth-tides. The Royal Observatory of Belgium has developed HiCum (the **H**istograms **C**umulation method) which is a statistical method suitable for the detection of weak tendencies hidden in a random series of time occurrence events [van Ruymbeke, M. et al., 2001, 2003]. In this paper HiCum was used to look for a statistical tendency in the database of Vrancea earthquakes which occurred between 1982 and 2004. Since there are a large number of events available for analysis in ROMPLUS catalogue [Onicescu, M.C., Marza, V.I, Rizescu, M., Popa, M., 1999] and the periods from Earth tides are clearly defined, HiCum is a suitable tool to extract information about any very small modulations in the distribution of the seismic parameters (occurrence, longitude, latitude, depth or magnitude) which may be present.

For our research, a physical time reference is required. Since, in addition to the gravitational and centrifugal forces (which create a static equilibrium of the Earth) the Sun and the Moon's gravitational fields are the two major influences which exert a force on a given point on Earth, their periodicities are obvious candidates. We therefore selected the period between two passages of either the Sun or the Moon in the local Meridian plane (S1 of 24h period and M1 of 24.833248h period) as our main references. It should be noted that if any significant influences from the harmonics of these periods is detected, they could be as a result of tidal, climatic or gravitational effects.

However, because the lunar and solar effects are fully independent, any long period amplitude modulation corresponding to the beat of M1 and S1, which is related to the small difference between the respective S1 and M1 periods, could only be as a result of gravitational influences. If a signature of this beat could be found in our data then this could support our hypothesis that gravitational influences of earth-tides are possible earthquake triggers.

On applying HiCum to our database of earthquake it was discovered that the seismic activity was modulated by low frequency waves (Sa, Ssa, Md). In particular we studied the diurnal solar period S1 and its harmonic S2 as well as the diurnal lunar wave M1 and its harmonic M2. If any correlation is found, these time periods can be further investigated to determine more precisely their significance.

2. Selection of Seismic Data for Further Analysis

At present, the Romanian Earthquake catalogue ROMPLUS [Onicescu, M.C., Marza, V.I, Rizescu, M., Popa, M., 1999] is being collated. It contains information related to locations and other source parameters, as well as links to waveforms of strong earthquakes, for the period between the year 984 to present day.

If the entire databank were to be analysed, it is likely that, using data which covers entire Romanian territory with a high number of faults of various geographical orientations, any effects which may be caused by earth-tides would be swamped by other factors. In order to analyse gravitational correlation to the occurrence of quakes, we confined our studies to seismic data from Vrancea, where the number of faults is limited yet there is sufficient data to perform a statistical analysis.

The seismic Vrancea region is situated in the arch of the Eastern Carpathian belt (Fig 1). Many authors suggest that there is a process in progress related to a final stage of subduction [Gutenberg and Richter, 1954; Constantinescu and Enescu, 1984; Oncescu et al., 1998]. The recent models are based on a slab break-off scenario followed by lithospheric delamination of the lower portion of the slab (Csontos, 1995; Gîrbacea and Frisch, 1998) or invoke a subcontinental lithosphere delamination [Diaconescu et al., 2001, Ismail-Zadeh et al., 2003].

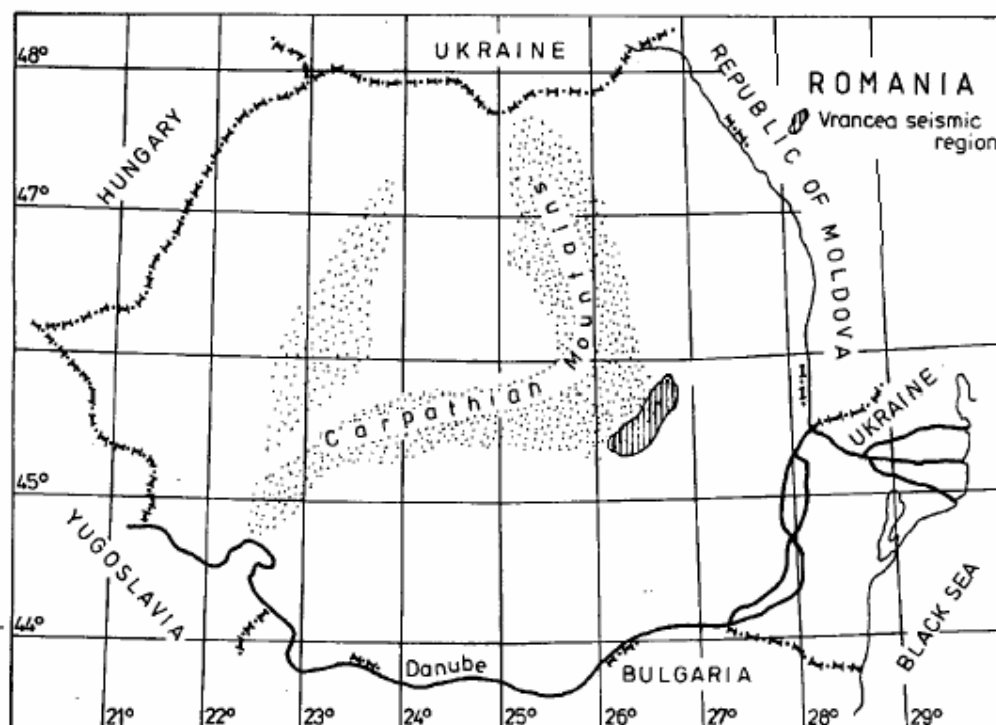


Figure 1. The seismic Vrancea region - epicenter area of the subcrustal earthquakes (dashed area) (after Bazacliu, O. et al., 1999)

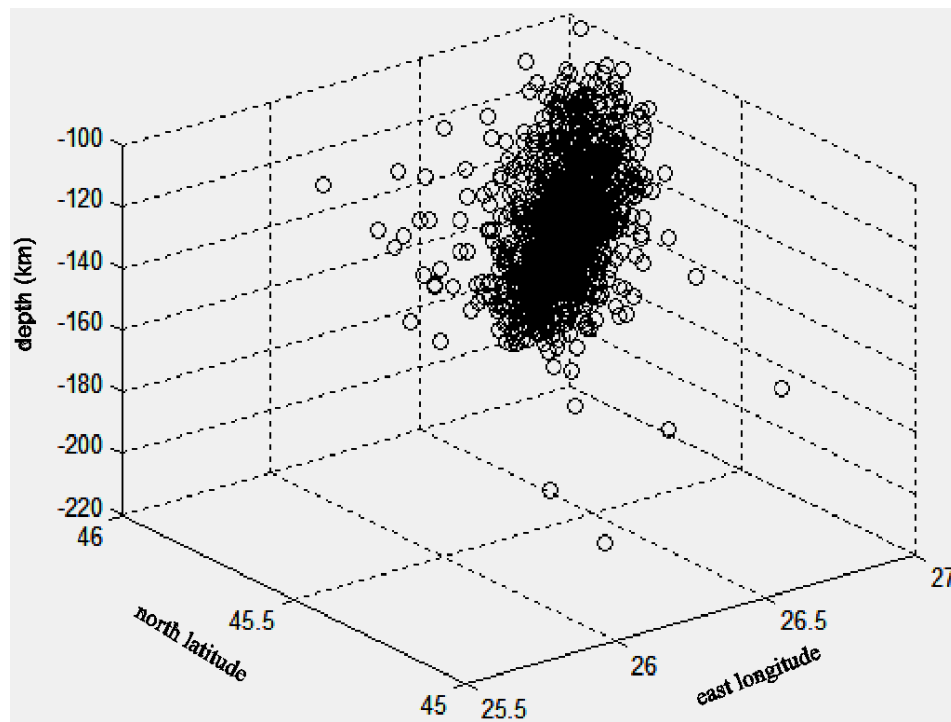
The Vrancea seismic region is characterized by three distinct zones : uppermost is a shallow seismicity zone ($0 < M_w < 5$), below this, located between about 40 and 55 - 60 km depth, there is a weak seismic zone, which separates the shallow seismic zone from a deeper zone of intermediate seismic activity where larger earthquakes ($5 < M_w \leq 7.4$) occur. The latter is a narrow vertical elongated region (40 x 80 km width, depth between 60 – 180 km).

The heterogeneity of geological conditions and the seismic activity in the deeper zone (depth > 100km) makes this an interesting candidate for our data analysis. This section of the data bank was analyzed to see if any significant relationship could be found between the solid earth-tides and seismic activity.

Before analysis some refinements were made to the data. All seismic activity with a value of less than 3.0 on the M_w scale (to avoid the inclusion of any data that might not be of seismic origin), the major events ($M_w > 5.6$) and the seismic events with the depth of less than 100 km were excluded. Secondly the data was filtered to remove data associated with aftershocks applying the same technique as described in Trifu and Radulian (1991a,b).

Romania is not located on the reference meridian but the longitude correction of the time for every earthquake is very small and moreover the events take place into a very small area so this correction was not applied.

Our analyze was made on a 1402 events occurred in the Vrancea zone ($25.5^{\circ} - 27.0^{\circ}$ east longitude, $45.0^{\circ} - 46.0^{\circ}$ north latitude) with the focal depths between 100 km and 200 km, and magnitudes between 3.0 M_w and 5.6 M_w (Fig.2a,b).



a)

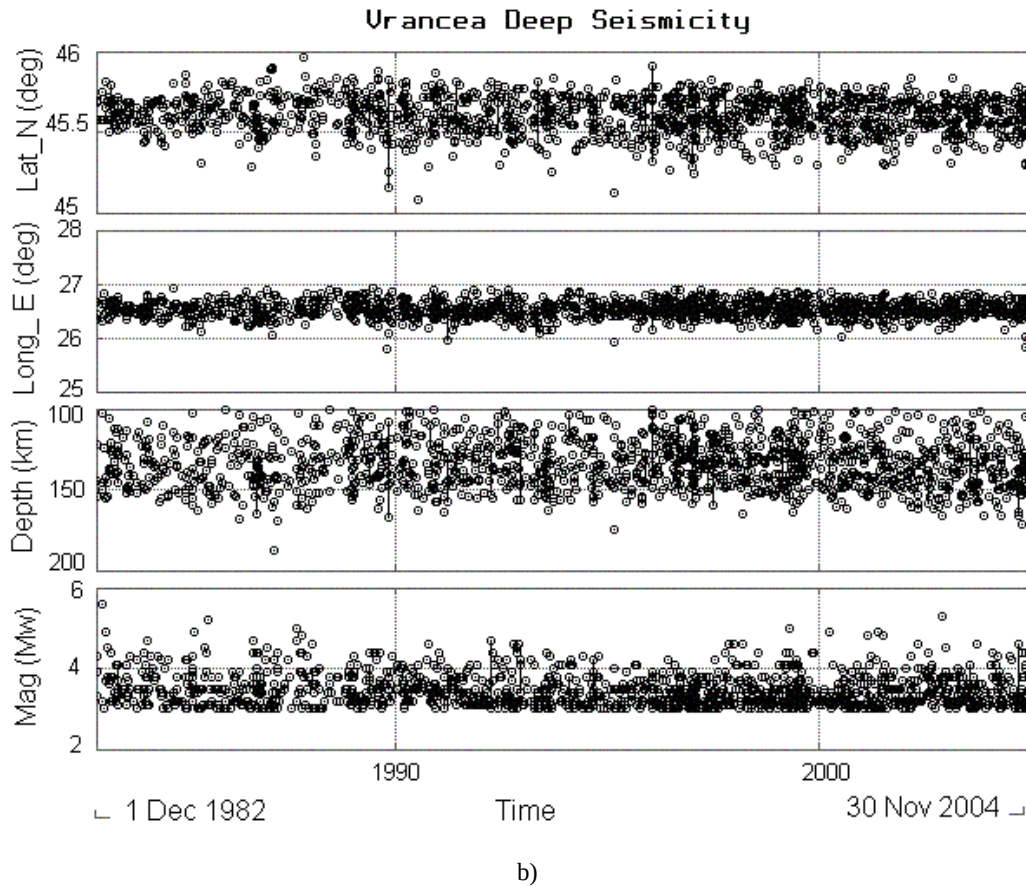


Figure 2. The 3D distribution of the seismic events (a) and the temporal distribution of the spatial and energetic seismic parameters (b) of Vrancea earthquakes between 1982 - 2004

3. Description of the HiCum Stacking Method.

The analysis of any data bank representing a series of events fixed by time may prove the results to be random, non-random or a mixture of both. If the data is completely random no patterns will be found, but if any part of the data is non-random, then patterns can be detected either as a Gaussian distribution or, according to Fourier analysis, in a series of fundamental and harmonics of cosine waves. A common method of detecting these waves is to use Spectrum Analysis, which will detect the frequency and strength of all waves present, but it can be difficult to implement. However, in the situation where the detection of the presence or absence of a particular frequency is the primary objective, HiCum is a powerful tool.

HiCum is dependant on a large amount of data available and on the frequency of the wave to be detected. As each earth-tide component can be defined with a very high degree of accuracy, HiCum is a useful tool for determining whether earth-tides are influencing any of the parameters recorded in a series of timed events. ROMPLUS provides us a long series of timed events and is therefore suitable for analysis using HiCum. Using this method we are able to compare, for selected earth-tides component, the influence they may have on various parameters. In our case the parameters under consideration were occurrence, latitude, longitude, depth and magnitude.

The inspiration for HiCum came from the field of meteorology where stacking was first used in the late 19th century by Darwin. In general terms a signal has its time base divided into a series of selected constant length time periods T . For the detection of earth-tides signals this time period would be the time period of the earth-tide in question e.g. the Solar time clock, S1, or the lunar time clock, M1. This time period is then represented by 360° . The time base for each of these periods is then normalised as shown in Fig. 3. The occurrence of an event, E_i , at time t_i can then be represented by the phase α_i , which is the difference between the event E_i time and the time of the original event in the series, t_0 , modulo T (except an integer number of periods T).

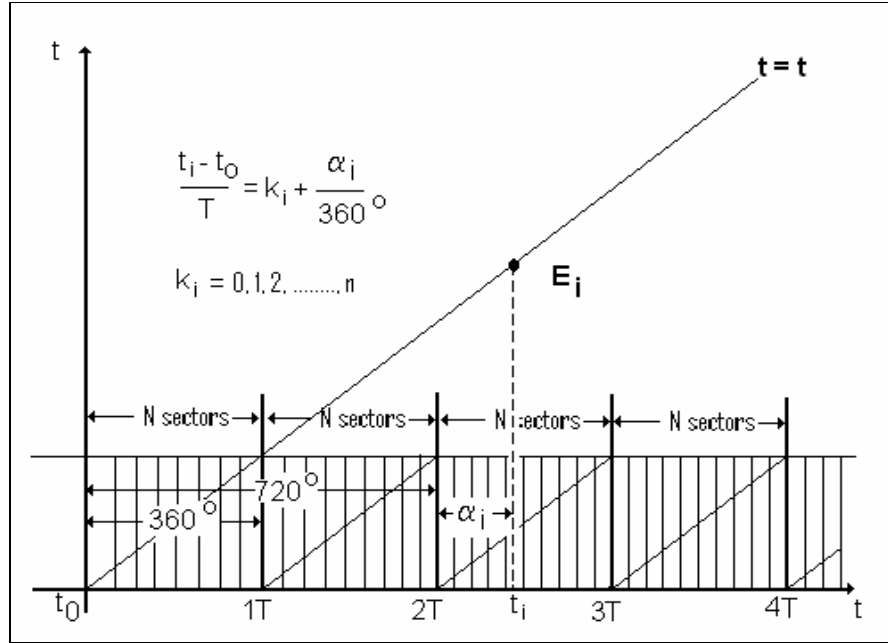


Fig.3 The time series partition into selected time period T . An event E_i occurring at time t_i will be α_i out of phase of the original event, t_0 .

Each of these time periods are further divided into N sectors each of length $360^\circ/N$. The selection of an optimal number of sectors is done to find enough precision in phase and a significant number of events in each sector (even for small N).

For a parameter recorded at regular intervals, the data for each sector N (for example, in our case, the latitude, the longitude, the depth or the magnitude) is averaged and synchronised. These averages are then stacked producing a histogram bar representing the activity for this sector. This process is carried out for each sector until a complete histogram is produced for the time period under consideration (Fig.4). The histogram is then fitted, by nonlinear least square method, with the cosine function for that time period. The parameters of amplitude and phase are calculated. A graph can then be produced showing the link, in terms of phase and modulation, between the parameter under consideration and the chosen time period (Fig.5).

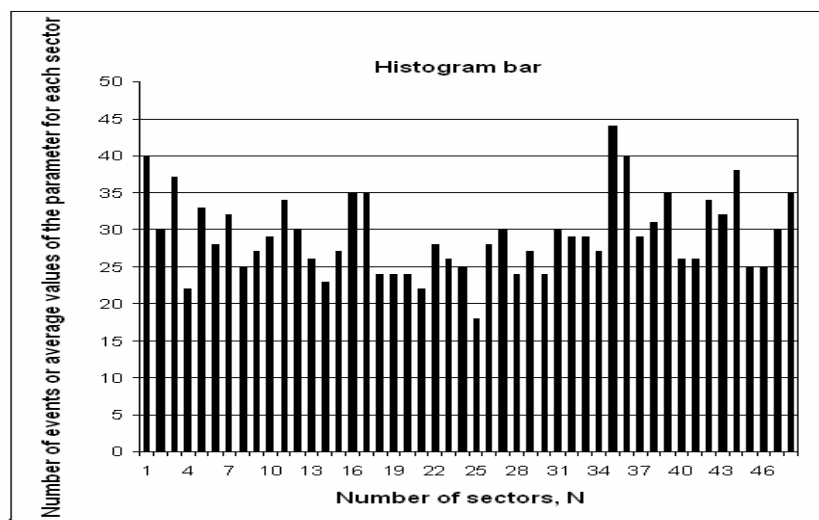


Fig.4 A histogram bar model, representing the distribution of the seismic activity or the average values of the parameter for each sector.

In the case of data recordings of discrete events, such earthquakes, the total number of all events recorded in each sector N is the value of the histogram bar for that sector. The remainder of the computation is then carried out in exactly the same fashion as for continuous recordings (See figure 5).

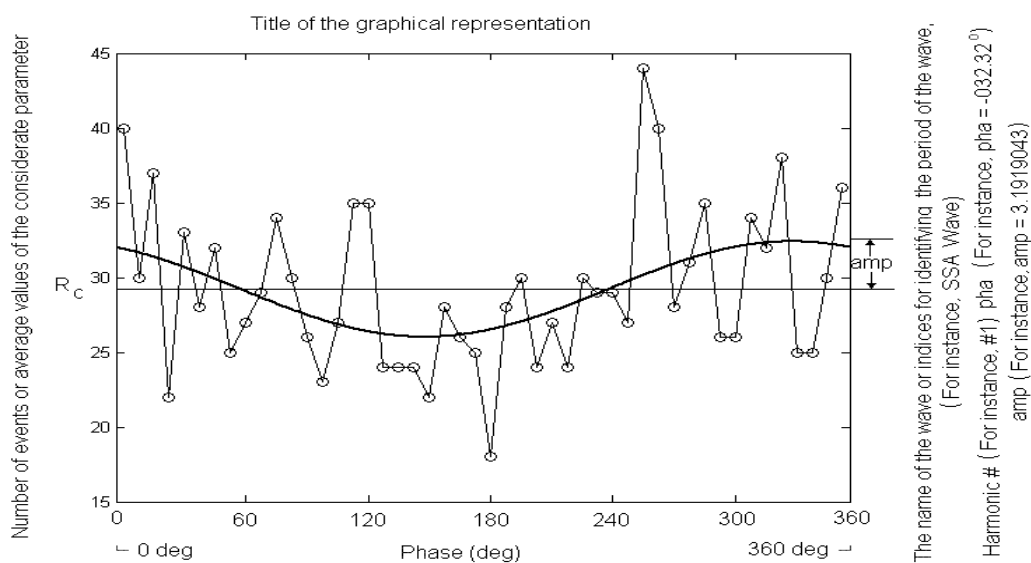


Fig. 5 A typical HiCum curve. The points represent the results of the stacking of data, sector by sector (in this case $N=48$ sectors). The cosine signal represents the phase of the detected signal in relation to the earth-tides under analysis and the amplitude of the modulation of the detected signal.

HiCum is embedded in a computer program which can take the data from ASCII files and display simultaneously the parameters of the above trigonometric function in a series of graphs. Thus the tendencies for various parameters can be expressed in terms of period, phase, amplitude and amplitude modulation. The input format for the HiCum software is based on the Doodson argument [Melchior, 1978)]. Fig.5 shows the characteristic features of a typical

HiCum graph. The HiCum curve is a combination of the total output signal and the modulation of that signal by the selected earth-tides component, as detected by HiCum.

Using this method we are able to compare, for selected periodicities, influences on various parameters, in our case the parameters under consideration were occurrence, latitude, longitude, depth and magnitude. The selected time period will be that which is suspected to have an influence on the parameters in question e.g. the solar time clock S1. A time period is equivalent to an interval of width 360° . It is also necessary to select the optimal number of sectors for the HiCum computation. For this study the data has been divided into 48 sectors.

4. HiCum Applied to the Vrancea Earthquake Data Base

Vrancea zone seismicity was tested for various periodicities related to Sun and Moon's motions. Firstly the solar semi-annual Ssa wave and solar annual Sa wave, which take into account the declination of the Earth with respect to the Sun. It is this declination that causes the seasons in Romania and in gravitational terms causes two maxima one at the spring equinox ($\sim$ March 21st) and the other at the autumn equinox ($\sim$ September 21st). Next the lunar diurnal M1 wave and its first harmonic M2 and the lunar declinational long period Md (lunar months in solar time) which are associated with gravitational changes are studied. Finally the solar diurnal S1 wave and its first harmonic S2, which are normally associated with climatic variations, are used in our analysis. A summary of the periodicities of these waves is given in Table 1. HiCum was applied for these Earth tides on the earthquake occurrences in the depth zone 100 – 200 km. Effects of these periodicities on the latitude, longitude, depth, magnitude and number of events were investigated.

Table 1. Earth tide waves and their periodicities

<i>Earth tide</i>	<i>Doodson argument</i>	Periodicity ($^\circ/\text{h}$)	Ratio of periodicity with S1	Periodicity (h)
S1	164.555	15.000000	1.000000	24.000000
S2	273.555	30.000000	2.000000	12.000000
M1	155.555	14.496694	0.966446	24.833248
M2	255.555	28.984104	1.9322736	12.421000
Md	065.555	0.549016	0.0366011	655.717968
Ssa	057.555	0.082137	0.0054758	4382.921200
Sa	056.554	0.041067	0.0027378	8766.162610

4.1 Analysis for any influence arising from the solar annual wave Sa and semi-annual time clock, Ssa.

In the first instance we analysed the distribution over time of the number of earthquakes (seismic activity) to see how it is correlated with the solar annual wave Sa. In order to locate the summer and winter solstices on the Sa wave, a synthetic data file was created which had the same time base as the seismic data.

We therefore carried out an analysis on the semi-annual time clock, Ssa, a wave whose main effect on Earth is gravitational.

HiCum analysis was then carried out on Ssa and from Fig.6 we can see also the modulation tendency of this component upon the Vrancea seismic activity. This tendency could be as a direct influence of the earth-tides gravitational effects.

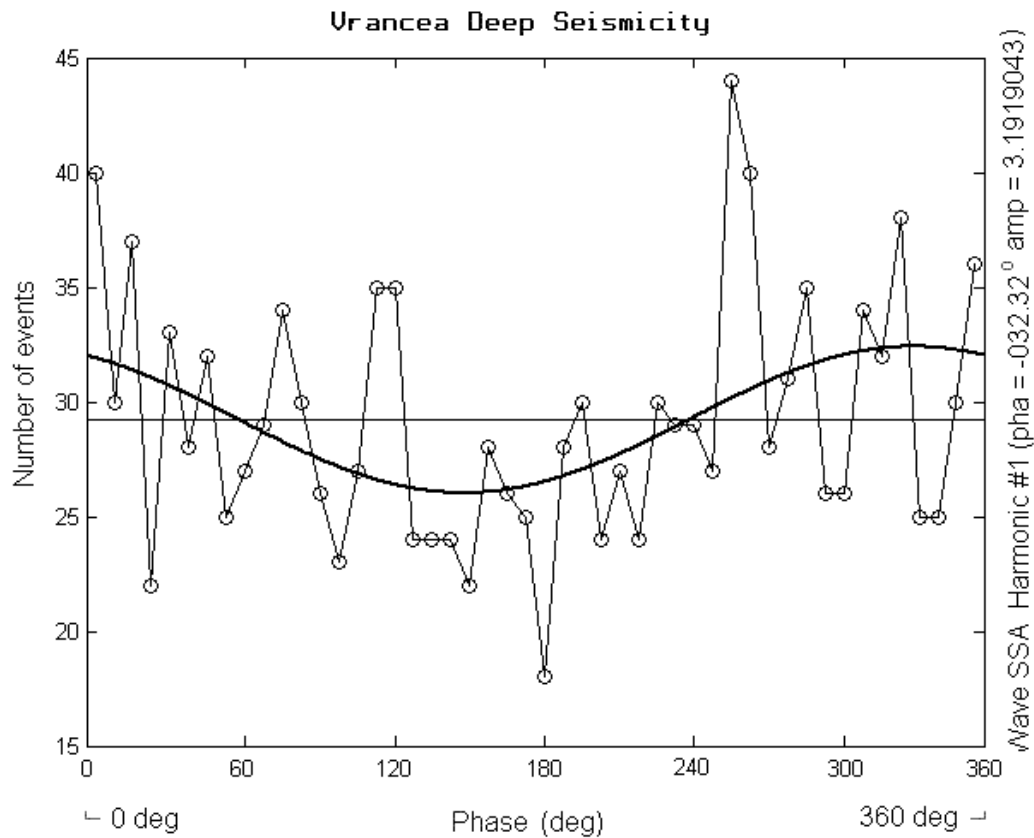


Fig.6 HiCum analysis on seismic activity (Research on semi-annual Time Clock Ssa wave 057.555)

The upper graph in the figure 7 (Fig.7a) represents the data of the lower graph modified with a superficially imposed large positive value (three orders of magnitude greater than the initial data) on Dec 21st and a large negative value (of the same order) on June 21st in order to mark the two annual astronomical moments. The lower graph displays the distribution over time of the seismic activity with reference to the annual Time Clock Sa wave 056.554.

Comparing the occurrence of seismic activity with the synthetic data reveals a modulation of Sa in the seismic activity with maximum activity occurring at each equinox. It is not clear, however, whether these effects are due to seasonal or gravitational influences, or a combination of the two.

4.2 Analysis for any influence arising from Sa and Ssa with respect to the occurrence, longitude, latitude and depth of the seismic activity.

Detailed analysis of the seismic activity of the Vrancea zone indicates that the most active zone is at a depth of 100-200 km [Bazaciu, Radulian-1999]. It was then decided to further sort the data. For this part of our studies, data on the three spatial dimensions of the location of a quake, namely the longitude, latitude and depth, were used for HiCum analysis along with the HiCum analysis of the frequency of earthquake occurrence, irrespective of its location within the Vrancea region.

The HiCum for Sa was then performed with the average value of latitude and longitude for each time sector and the results (Fig.7c,d) compared with the previous graphs (Fig.7b), to determine whether the location of the earthquakes could be linked to Sa. From Figure 6 we can see that there is a tendency for the site of the earthquake to vary with Sa, the solar annual wave.

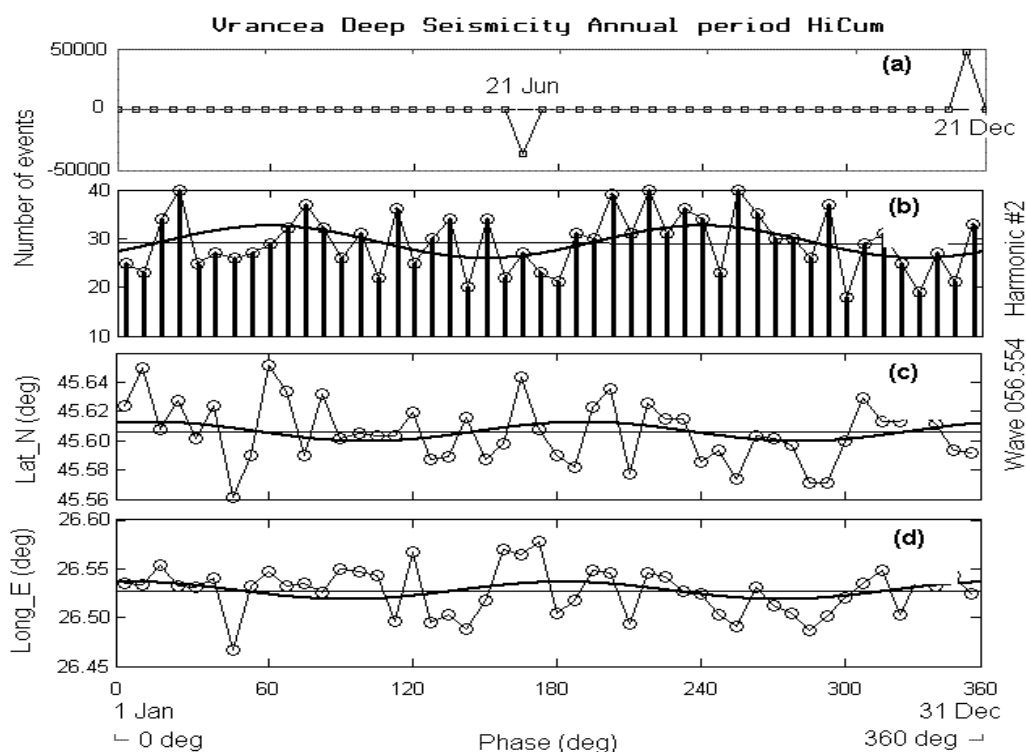
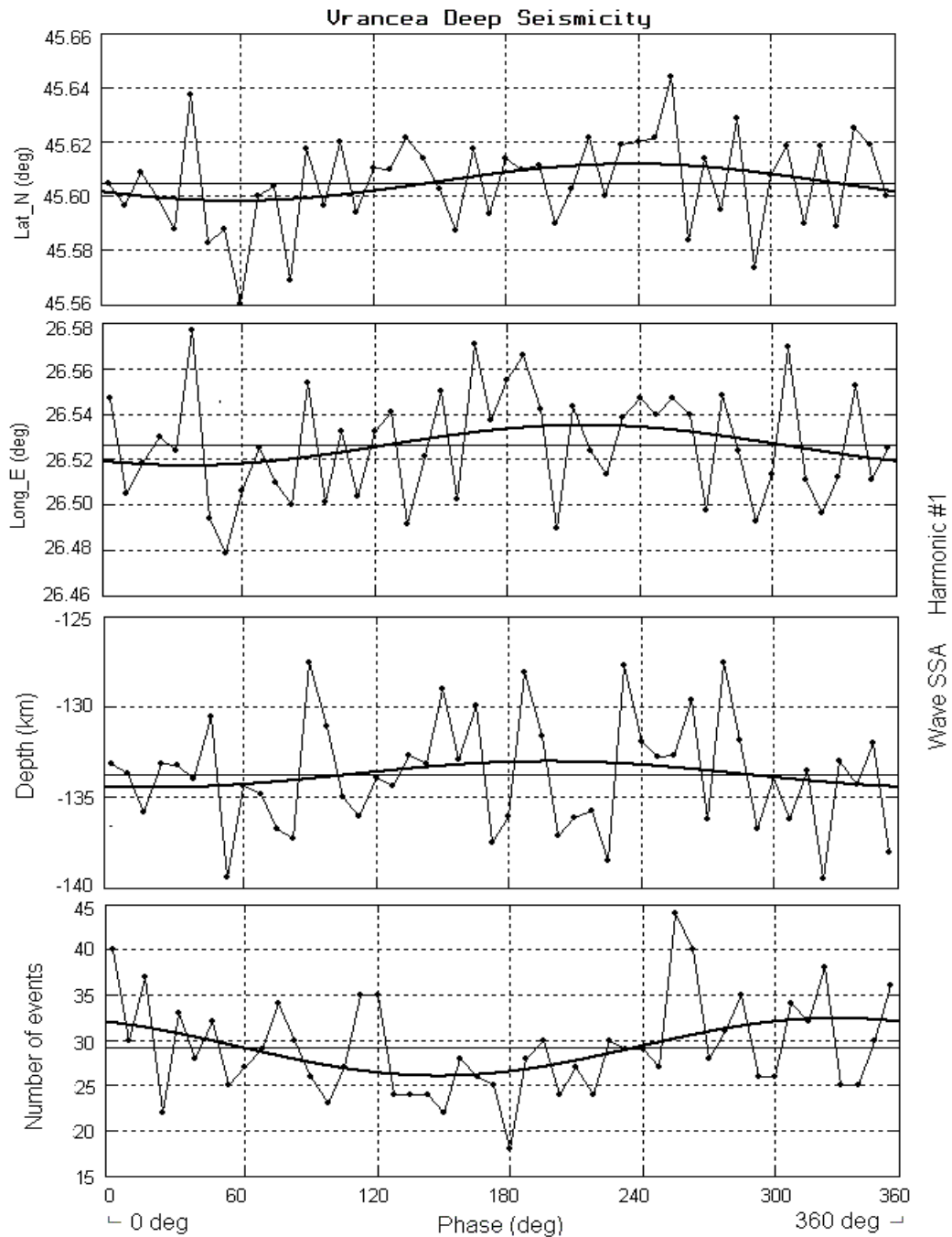


Fig.7 HiCum analysis on seismic activity (b), latitude (c) and longitude (d) relative to solstices moments (a) (Research on annual Time Clock Sa wave 056.554)

As the movement on the fault is likely to be affected by the change in direction of the gravitational field in relation to the fault [Enescu, 1999], this change in direction is defined by the derivative of Sa, Ssa. A series of graphs was then produced to determine the influence of Ssa on the distribution of the seismic activity for the main seismic parameters: occurrence, latitude, longitude, and depth. Figure 8 shows the HiCum analysis for these parameters.



**Fig.8 HiCum analysis on latitude, longitude, depth and activity
(Research on semi-annual Time Clock Ssa wave 057.555)**

The pattern found here was for the systematic tendency of the variations in the latitude, longitude and depth to be in phase, whilst the variation of the magnitude of the quakes was in opposite phase. This suggests that the spatial parameters of the seismic activity and its magnitude are influenced by Ssa wave, which suggest that the tendencies we have observed may be linked to the gravitational changes experienced by each particular point on Earth. These results indicate that any gravitational effects on the Earth, not only depend on the relative

location of the Sun, the Moon and the Earth, but also on the precise location of each place on Earth.

4.3 Analysis for any influence arising from the lunar declinational wave, Md with respect to the occurrence, location and magnitude of the seismic activity.

As with the Solar declination wave, the lunar declination wave, Md, will also have a gravitational effect on Earth with two maxima. A similar analysis was therefore carried out using Md. Results represented in Fig.9 indicate a tendency for the seismic activity to vary with Md, the lunar declination.

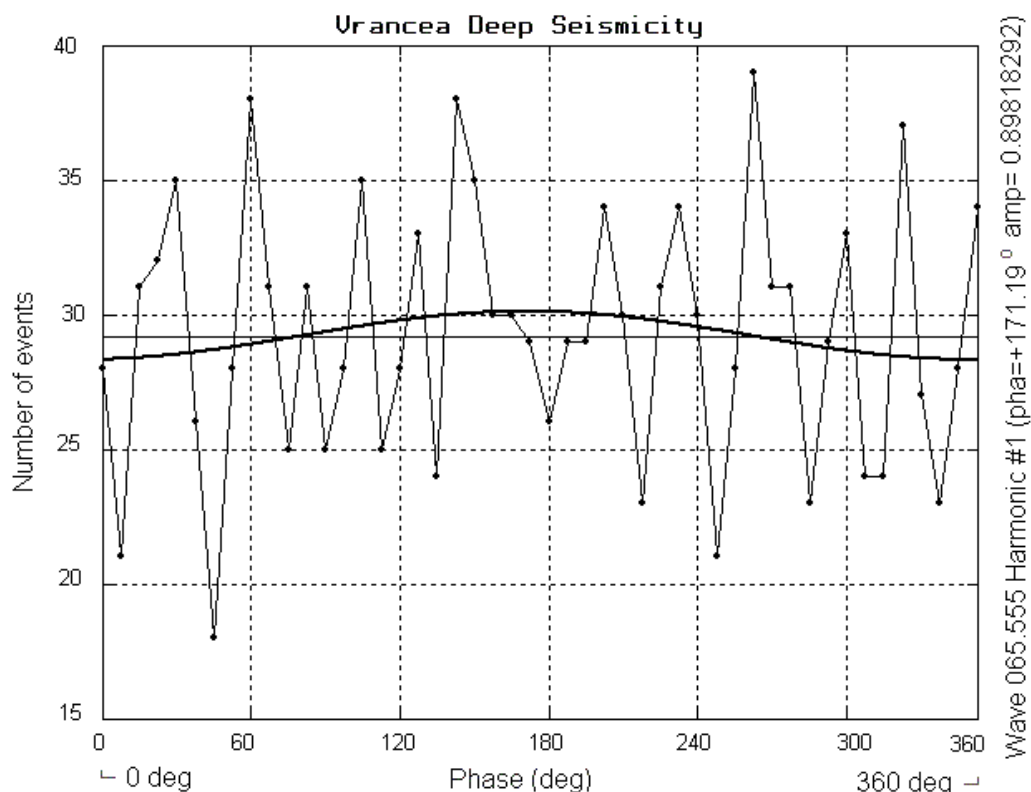


Figure 9 HiCum analysis on seismic activity on Lunar declinational Time Clock (Md Wave 065.555)

Figure 10 shows the HiCum analysis for latitude and longitude using Md and its first harmonic. Here we see only weak inductions in the case of Md and its first harmonic 2Md.

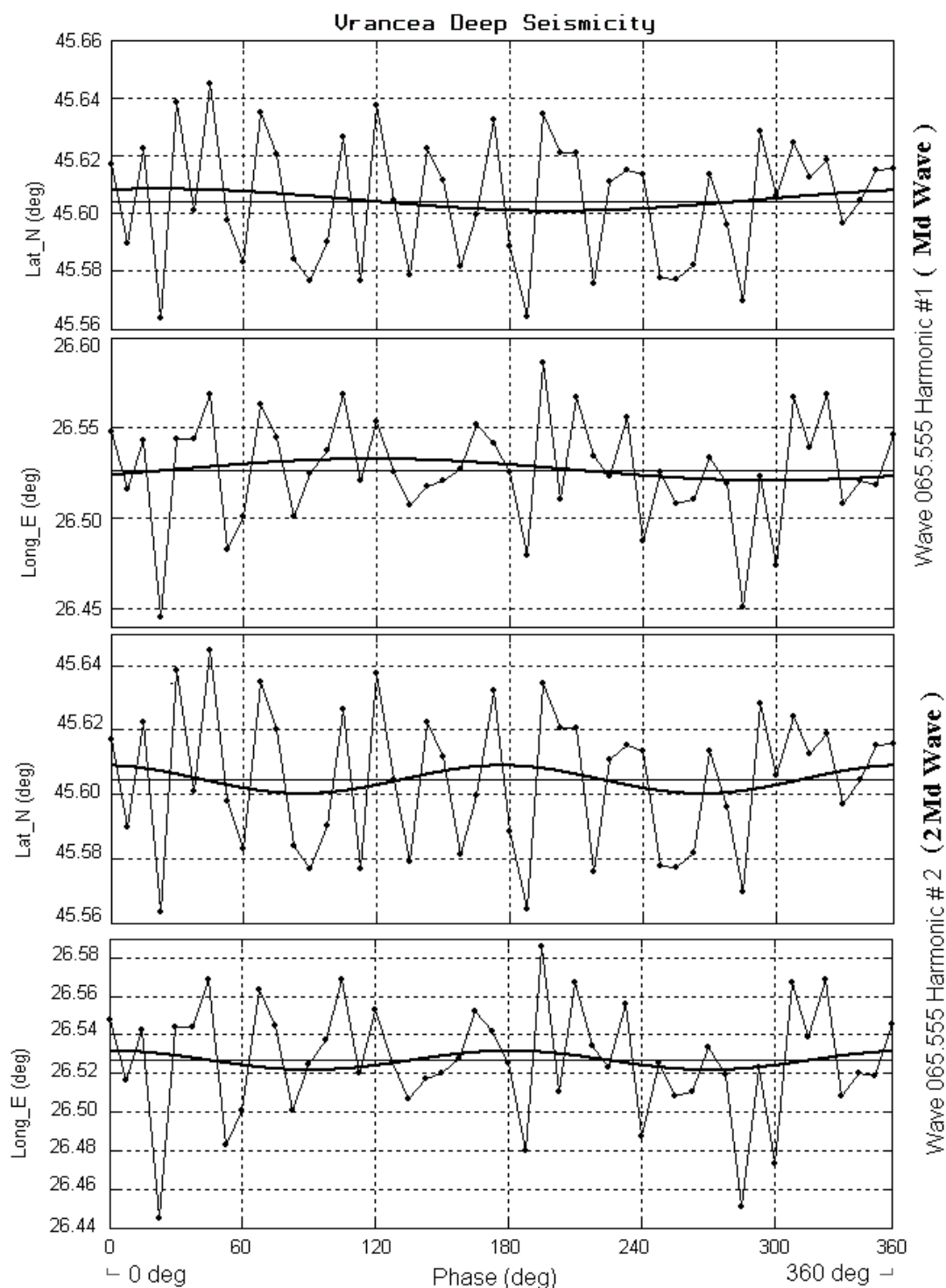


Figure 10 HiCum analysis on latitude and longitude, with respect to Lunar declinational Time Clock (Md Wave 065.555 and its first harmonic, 2Md)

As before, a series of analysis was produced on the distribution of the seismic activity for the main seismic parameters: latitude, longitude, depth and magnitude, to determine if there was a signature visible for Md.

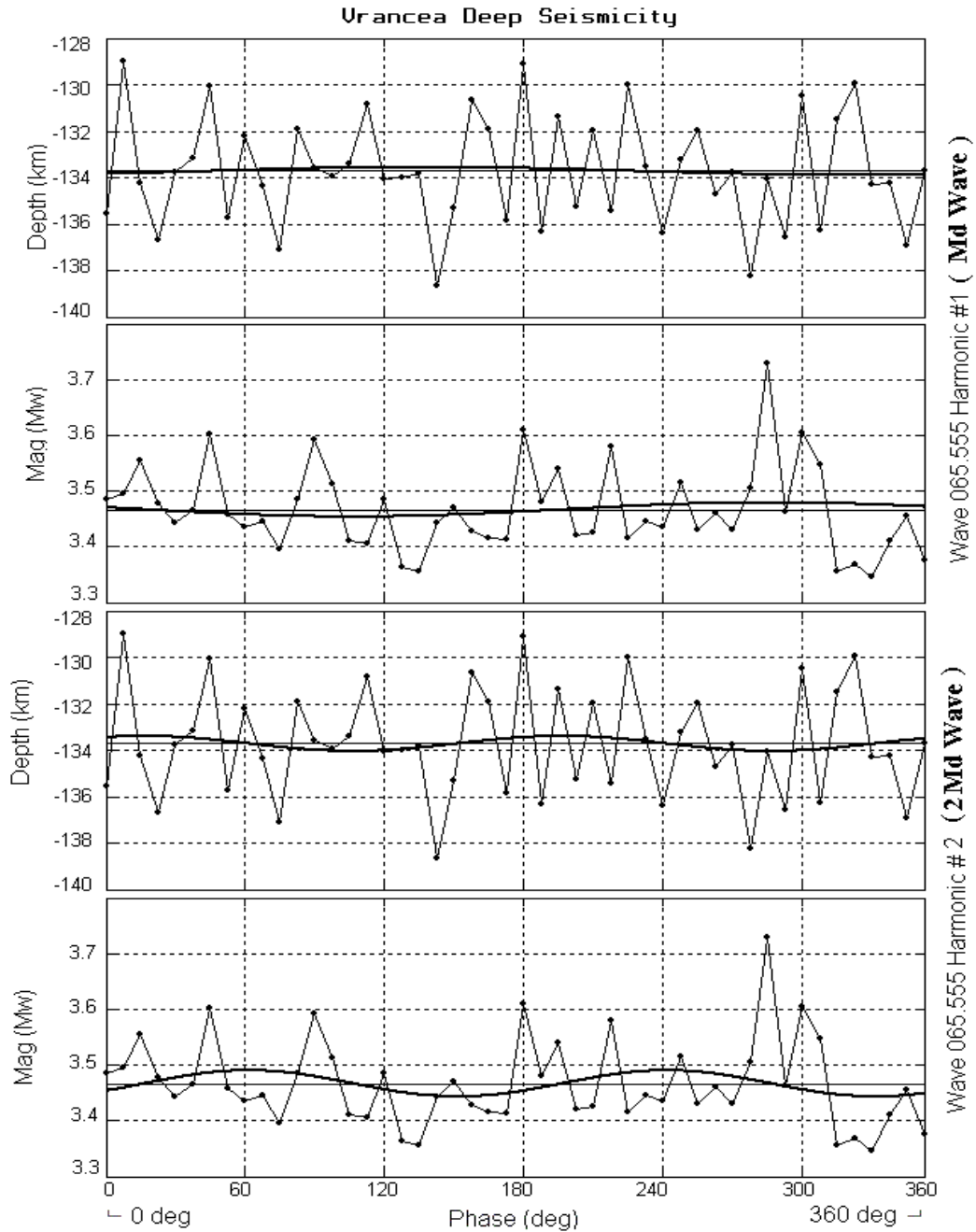


Figure 11 HiCum analysis on depth and magnitude
on Lunar declinational Time Clock (Md Wave 065.555 and its first harmonic, 2Md)

A similar pattern for Md (Fig. 11) was found as was described above for Ssa, that is that the systematic tendency of the variations in the latitude, longitude and depth were found to be in phase, whilst the variation of the magnitude of the quakes was in opposite phase. The influence of Md on seismic activity can only be explained in gravitational terms, which supports our hypothesis that gravitational changes brought about by earth-tides are responsible for some of the seismic activity on Earth.

4.4 Analysis for any influence arising from S1 with respect to the occurrence of the earthquakes.

Having found a link between seismic activity and the annual solar wave, Sa, the semi-annual time clock, Ssa, and the lunar declinational time clock, Md, the data bank was analysed to see if there were any diurnal or semi-diurnal effects due to the Sun. Figure 12 refers to the fundamental and main harmonic periodicities of S1 on the total seismic activity. A modulation tendency of the seismic activity can be found for S1 and its harmonic S2. Again any change in direction of gravitational effects is defined by S2, the harmonic of S1. S2 will have two maxima in a 24h period representing the moments when a point on the Earth cuts through the Sun's gravitational field at 90° (midday and midnight).

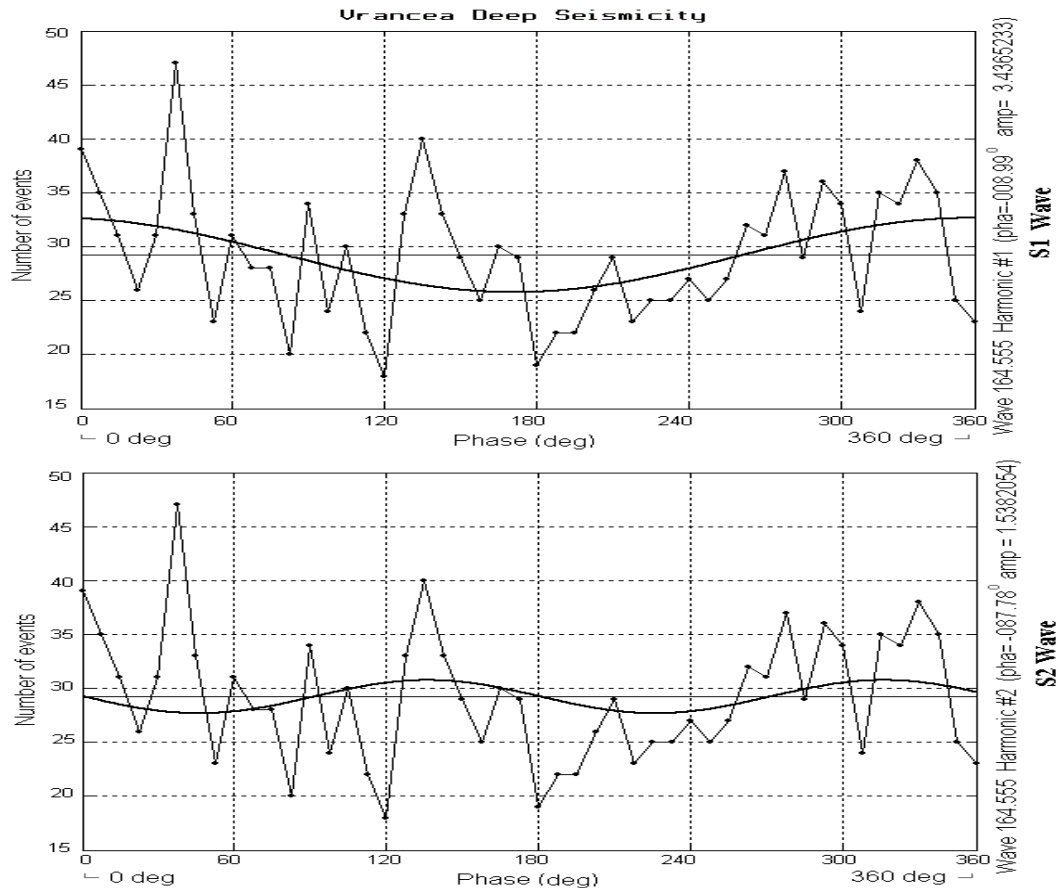


Figure 12 HiCum analysis on S1 (Solar Time Clock) and its main harmonic, S2, for the seismic activity

It is possible that the influences found here may be due climate changes and not gravitational influences. However, experiments carried out for earth-tides monitoring [Delcourt-Honorez et al 1993], have shown that at a depth of greater than 50km negligible (1-2%) climatic effects can be found and are out of the question at the depth over of 100 km. So with the focus of quakes in the most active zone being deeper than this, climatic effects cannot fully explain the observed phenomena.

4.5 Analysis for any influence arising from M1 with respect to the occurrence and magnitude of the seismic activity.

A similar analysis was then carried out for the main lunar wave M1. Figure 13 refers to the fundamental and main harmonic periodicities of M1 on the total seismic activity.

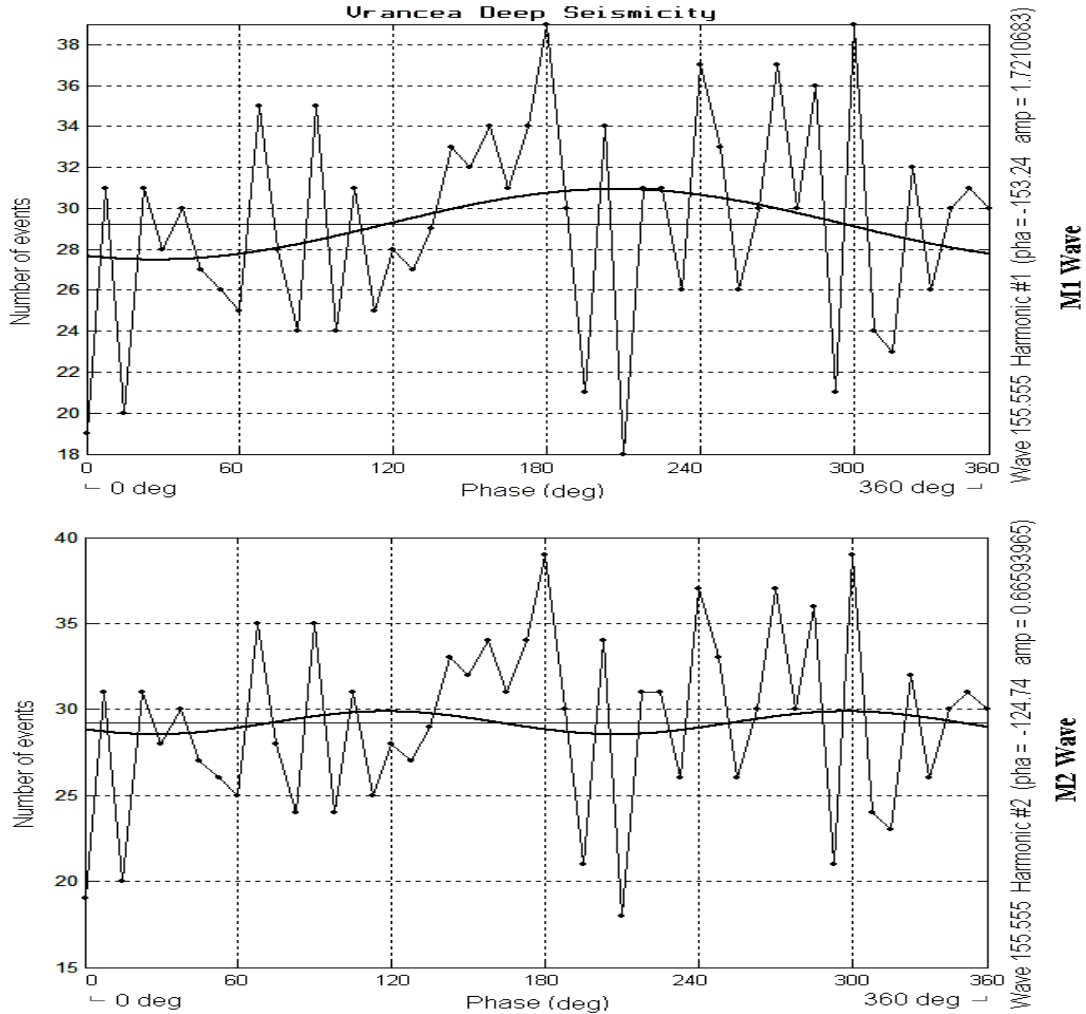


Fig. 13 HiCum analysis on M1 (Lunar Time Clock Wave 155.555) and its main harmonic, M2, for the seismic activity.

A modulation tendency of the seismic activity and magnitude can be found for M1 and its first harmonic M2 (fig. 13). These results suggest that it is the gravitational effects of the Moon which are influencing the occurrence of earthquakes in this region.

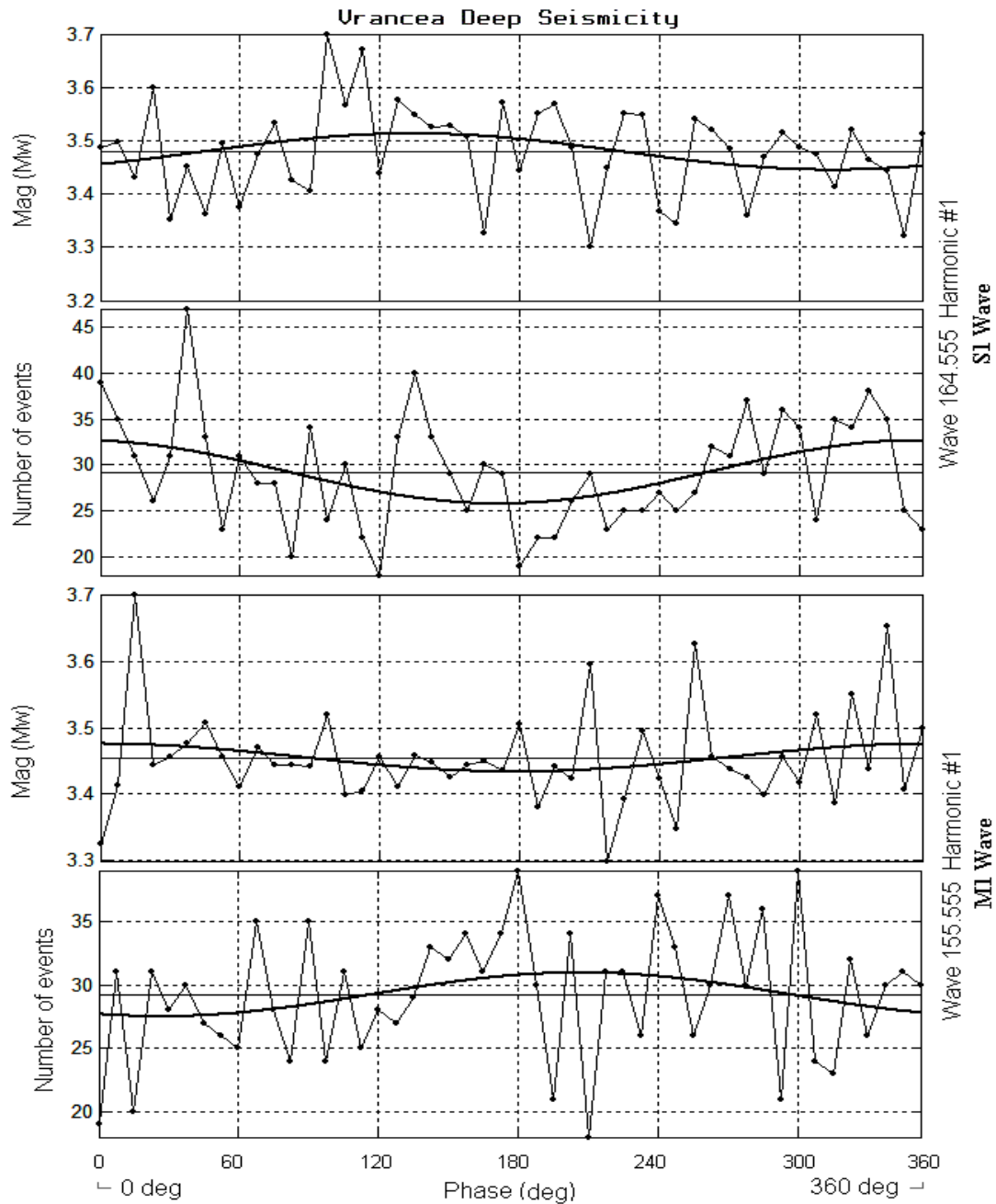


Fig. 14 Comparison of the HiCum on S1 (up) and M1 (down) applied to the magnitude (upper) and the seismic activity (lower).

The total seismic activity and magnitude distribution for both S1 and M1 were then compared. As can be seen from Figure 14, for both S1 and M1 waves, when there is a decrease in activity, when there is an increase in magnitude. The similarity in the patterns of S1 and M1 can only be explained by considering the gravitational influence of the Sun and the Moon.

4.6 Analysis for any influence arising from S2 with respect to the location and magnitude of the seismic activity.

HiCum analysis using S2 was then applied to study any location effects on the occurrence of the earthquakes and the influence on the magnitude distribution also. The results are presented in Fig. 15.

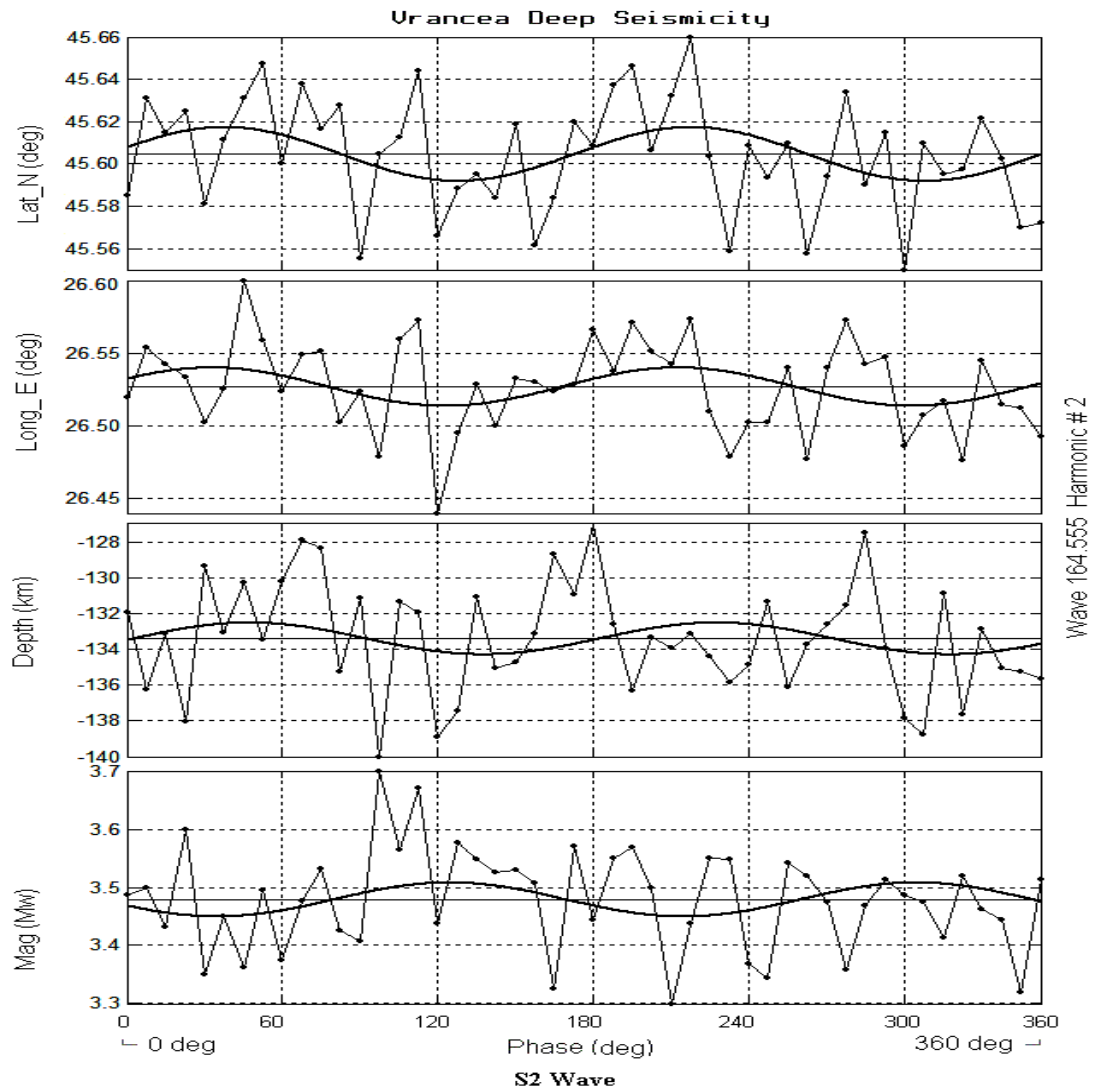


Figure 15 HiCum analysis on latitude, longitude, depth and magnitude for S2
(First harmonic of Solar Time Clock S1 Wave 164.555)

HiCum analysis on the main S2 wave also revealed a systematic tendency of the variations in the latitude, longitude and depth to be in phase, whilst the variation of the magnitude of the quake was inversed. It means that magnitude decrease when the other seismic parameters increase.

A summary of these results with the amplitude and phase values is displayed in Table 2 showing fundamental and main harmonic periodicities of S1 and its harmonic S2 for the latitude, longitude, depth and magnitude.

Table 2. S1 and S2 HiCum analysis on Vrancea Deep Seismicity

Parameter	S1		S2	
	Phase (deg)	Amplitude (see the 1 st col)	Phase (deg)	Amplitude (see the 1 st col)
Lat_N (deg)	+116.73	0.00445121	+076.82	0.0122741
LongE (deg)	+127.68	0.00354129	+066.07	0.0134480
Depth (km)	+127.01	0.67367400	+092.38	0.8834250
Mag (Mw)	+134.05	0.03635250	-110.07	0.0315460
HiCum_Count (Number of events)	-008.99	3.43652000	-087.78	1.5382100

4.7 Analysis for any influence arising from M2 with respect to the location and magnitude of the seismic activity.

HiCum on the main M2 wave revealed a systematic tendency of the variations in the latitude and longitude to be in phase, with weak induction on depth and magnitude (Fig. 16).

A summary of these results with the amplitude and phase values is displayed in Table 3, showing fundamental and main harmonic periodicities of M1 and its harmonic M2 for the latitude, longitude, depth and magnitude.

Table 3. M1 and M2 HiCum analysis on Vrancea Deep Seismicity

Parameter	M1		M2	
	Phase (deg)	Amplitude (see the 1 st col)	Phase (deg)	Amplitude (see the 1 st col)
Lat_N (deg)	-125.51	0.01073540	-037.53	0.00338199
LongE (deg)	-123.63	0.00903976	-063.82	0.00546098
Depth (km)	+106.88	0.61835800	-068.75	0.18423500
Mag (Mw)	-001.84	0.02538740	+008.33	0.01164170
HiCum_Count (Number of events)	-153.24	1.72107000	-124.74	0.66594000

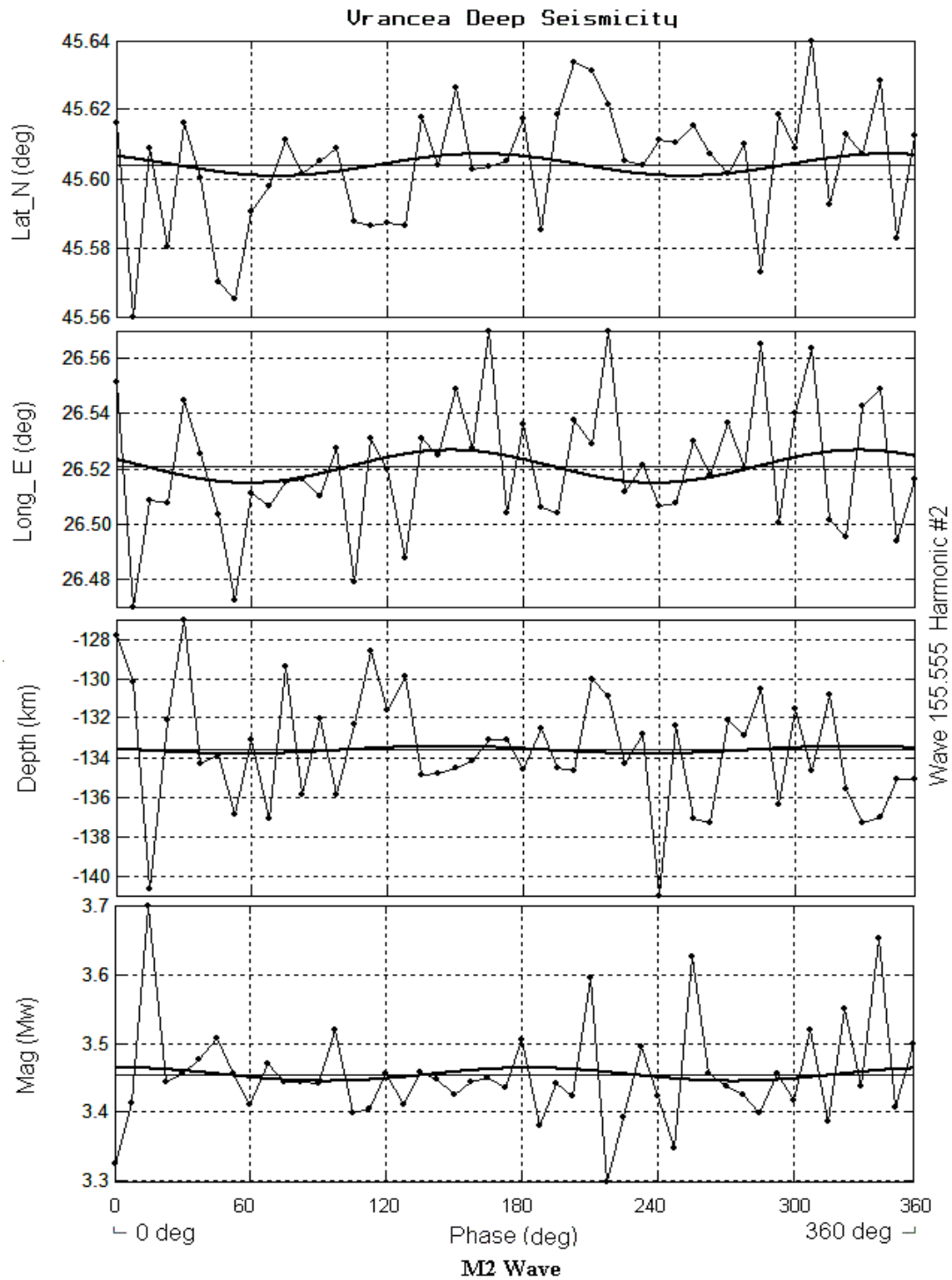


Fig. 16 HiCum analysis on latitude, longitude, depth and magnitude (*Lunar Time Clock M2 Wave 155.555*)

The influence of Md, M1 and M2 on seismic activity can only be explained in gravitational terms, which further adds to the evidence which supports our hypothesis that gravitational changes brought about by earth-tides are responsible for some of the seismic activity on Earth.

5 Discussion of Results

Our results show that there is a tendency for seismic activity to be linked with several of the earth-tides components, namely S_a , S_{sa} , S_1 , S_2 , M_d , M_1 and M_2 . An S_1 cycle is often attributed to climatic conditions, however, experiments carried out for earth-tides monitoring [Delcourt-Honorez et al 1993], have shown that at a depth of greater than 50km negligible (1-2%) climatic effects can be found and are out of the question at the depth over of 100 km. So with the focus of quakes in the most active zone being deeper than this, climatic effects cannot fully explain the observed phenomena and climatic conditions will certainly not explain the M_1 , M_2 , M_d and S_{sa} tendencies. The signatures found on the S_{sa} , M_1 , M_2 and M_d suggest a possible link between gravitational changes and the occurrence of earthquakes. If this is the case then it is also possible that a percentage of the diurnal and semidiurnal variations in seismic activity could be due to changes in the gravitational field.

To understand how earth-tides and earthquakes could act as triggers for an earthquake we need to consider the energy transfer mechanism which could be causing the earthquakes. In the case of both earth-tides and earthquakes, energy entering the system would be stored in the Earth; this storage can be considered as equivalent to the integral of the input signal. At a certain point the energy will be released in the form of an earthquake, this can be likened to the derivative of the signal. Energy entering a system from smaller earthquakes is random and low frequency and is unlikely to result in a continuous build-up of stored energy. In contrast, earth-tides are cyclical, caused by a changing gravitational field and, though low in energy, are regular and high frequency and as such can cause a build-up of stored energy, the nature of this energy storage will be dependent on the rheology of the region. In liquid regions there will be movement of fluid, which could cause a temperature movement which could provide micro energy shocks causing high frequency dynamics which could result in seismic activity. In a region of solid rock any faults or discontinuities could serve to amplify the movements due to the build up of stress in the rock [Tshibangu et al., 2004]. The stored energy in these regions could, over a period of time, result in a sudden release of energy in the form of an earthquake.

Our analysis suggests that as the location of the Earthquakes moves in a Northeastern direction and increases in depth, the magnitude of the seismic activity decreases, suggesting that the heterogeneity of geological conditions of the fault are having an effect on the nature and occurrence of the earthquakes.

It is possible therefore that the patterns we have found are a result of the heterogeneities locally amplifying the magnitude of the tidal stresses [Dieterich, 1986]. Such amplification might occur near the ends of creeping fault segments if the creep or after-slip rates vary in response to tides [ZUGRĂVESCU et al., 1998; Cochran, E.S., Vidale, J.E. et al., 2004].

6 Conclusion

An analysis of a databank of over 2000 earthquakes which occurred in Romania between 1982 and 2004 shows a tendency for the seismic activity to be linked to gravitational effects of the S_a , S_1 , M_1 and their first harmonics as the Earth rotates through the Sun's and Moon's gravitational fields.

In this paper we did not try to explain the causes of the observed correlations between different components of the earth-tides and seismic activity or its parameters. We just pointed this aspect and suggest taking it into account in the physical modulation problem of a seismic zone.

The variety of the gradients which characterize such a zone (rigidity, heterogeneity, fluid circulations,) could play a very important function under the modulation influences of the earth-tides.

In addition, the correlation of earthquakes with earth-tides can be explained if local heterogeneities are amplifying the magnitude of the tidal stresses.

The results indicate that more detailed work should be carried out with particular attention being paid to the geodynamical implications.

Acknowledgments

We would like to thank to the bilateral cooperation between Belgium and Romania within the framework of European Project CIPA-CT-93-186 for allowing us to optimise the conditions in which we could finalize our work. This project would not have been possible without their kind support.

References

- Bazaciu, O., Radulian, M., 1999. Seismicity Variations in Depth and Time in the Vrancea (Romania) Subcrustal Region. *Natural Hazards* 19, 165-177.
- Cochran, E.S., Vidale, J.E., Tanaka Sachiko, 2004. Earth Tides can trigger shallow thrust fault earthquakes. *Science*, vol.306, pp 1164-1166.
- Constantinescu, L., Enescu, D., 1984. A tentative approach to possibly explaining the occurrence of Vrancea earthquakes. *Rev. Roum. Geol., Geophys., Geogr., Geophys.* 28.
- Csontos, L., 1995. Tertiary tectonic evolution of the Intra-Carpathian area: a review. *Acta Vulcanol.* 7, 1 – 13.
- De Becker M., Ducarme B., Melchior P., Poitevin C., Van Ruymbeke M., 1987. Correlation between earth tide anomalies and tectonic features through heat flow. *Int. Meeting on Geothermic and Geothermal Energy. Guarujá-SP, Brasil. August 10-14, 1986 Rev. Brasileira de Geofísica*, 5, 197-203.
- Diaconescu, C., Knapp, J., Keller, G., Stephenson, V., Mocanu, V., Raileanu, V., Mațenco, L., Prodehl, C., Hauser, F., Dinu, C., Wenzel, F., Harder, S., Intermediate depth seismicity in the Vrancea Zone of Romania: a geodynamic paradox, *Eos, Trans.-Am. Geophys. Union* 82 (2001) F912.
- Dieterich, J.H., 1986. Nucleation and triggering of earthquake slip: effect of periodic stresses. *Tectonophysics* 144 (1–3), 127– 139.
- De Freitas S.R.C., Van Ruymbeke M., Ducarme B., 1991. Software to model the tidal triggering for volcanic and seismic activities. *Proc. of the Workshop Geodynamical Instrumentation Applied to Volcanic Areas, Walferdange, oct.1-3, 1990. Cahiers du Centre Européen de Géodynamique et de Séismologie*, vol 4, pp 353-361

- De Freitas S.R.C., Van Ruymbeke M., Ducarme B., Assumpcao M., 1991. Correlation between earth gravity tides and seismic activity at João Câmara, Brazil. Proc. Workshop on Geodynamical Instrumentation Applied to Volcanic Areas, Walferdange, oct.1-3, 1990. Cahiers du Centre Européen de Géodynamique et de Séismologie, vol 4, pp 363-378.
- Delcourt-Honorez M., Ducarme B., Van Ruymbeke M, 1993. Earth Tides as Related to Groundwater and Barometric Pressure. Proc. of the XIIth Int. Symp. on Earth Tides, Beijing, August 4-7, 1993. Science Press Beijing, New York., pp 169-180
- Enescu, D., Enescu, B.D., 1999 Possible Cause-effect Relationships between Vrancea (Romania) Earthquakes and some Geophysical Phenomena. Natural Hazards 19 pp.233-245
- Girbacea, R., Frisch, W., 1998. Slab in the wrong place: lower lithospheric mantle delamination in the last stage of the Eastern Carpathians subduction retreat. Geology 26, 611–614.
- Gutenberg, B., Richter, C.F., 1954. Seismicity of the Earth, 2nd ed. Princeton Univ. Press, Princeton, N.J.
- Hauser, F., Raileanu, V., Fielitz, W., Bala, A., Prodehl, C., Polonic, G., Schulze, A., 2001. VRANCEA99—the crustal structure beneath the southeastern Carpathians and Moesian Platform from a seismic refraction profile in Romania. Tectonophysics 340, 233–256.
- Ismail-Zadeh, A., Muller, B. and Wenzel, F., 2003, Modelling of descending slab evolution beneath the SE-Carpathians: implications for seismicity, Seventh Workshop “Non-Linear Dynamics and Earthquake Prediction” 29 September to 12 October 2003.
- Landes, M., W. Fielitz, F. Hauser, M. Popa, CALIXTO Group, 2004, 3-D upper crustal tomographic structure across the Vrancea seismic zone, Romania, Tectonophysics 382 (2004) 85–102.
- Melchior, P., 1978 The Tides of the Planet Earth, Pergamon Press, New York
- Nemcok, M., Pospisil, L., Lexa, J., Donelick, R.A., 1998. Tertiary subduction and slab break-off model of the Carpathian–Pannonian region. Tectonophysics 295, 307–340.
- Oncescu, M.C., Bonjer, K.-P., Rizescu, M., 1998. Weak and strong ground motion of intermediate depth earthquakes from the Vrancea region. In: Wenzel, F., Lungu, D., Novak, O. (Eds.), Vrancea Earthquakes: Tectonics, Hazard and Risk Mitigation. Kluwer Academic Publishing, Dordrecht, Netherlands, pp. 27–42.
- Romanian Earthquake Catalogue ROMPLUS*, Catalogue under continuous update, first published as: Oncescu, M.C., Marza, V.I, Rizescu, M., Popa, M., 1999, The Romanian Earthquake Catalogue between 984-1997, in Vrancea Earthquakes: Tectonics, Hazard and Risk Mitigation, F. Wenzel, D. Lungu (eds.) & O. Novak (co-ed), pp. 43-47, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Netherlands.
- Stavinschi, M., Souchay, J., 2003 Some correlations between Earthquakes and Earth Tides. Acta Geod. Geoph. Hung., Vol. 38(1), pp.77-92
- Trifu, C.I. and Radulian, M., 1991a, Frequency magnitude distribution of earthquakes in Vrancea: relevance for a discrete model, J.Geophys.Res.96, 4301-4311.
- Trifu, C.I. and Radulian, M., 1991b, A depth-magnitude catalogue of Vrancea intermediate depth microearthquakes (1974-1991), Rev.Roum.Geol.Geophys.Geogr., Ser.Geophys.35, 31-45.

Tshibangu, J-P., van Ruymbeke, M., Vanduycke, S., Quinif, Y., Camelbeeck, T., 2004 Studying underground motions in the Ramioul's cave. Proceedings of the Congress Eurengo, Springer Verlag, Liege pp614-623

Van Ruymbeke, M., Beauducel, F., Somerhausen, A., 2001 The Environmental Data Acquisition System (EDAS) developed at the Royal Observatory of Belgium. Journal of the Geodetic society of Japan Vol. 47 (1) pp40-46.

Van Ruymbeke, M., Howard, R., Pütz, P., Beauducel, F., Somerhausen, A., Barriot, J-P., 2003. *An Introduction to the use of HICUM for signal analysis*. BIM 138 pp 10955-10966

Van Ruymbeke M., Ducarme B., De Becker M., 1981. Parameterization of the tidal triggering of earthquakes. B.I.M. n° 86 décembre pp 5521-5544

Van Ruymbeke M., Ducarme B., De Becker M., 1983. 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

Van Ruymbeke M., Ducarme B., De Becker M., 1983. 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

Van Ruymbeke M., Somerhausen A., 1991. Some reflections about tidal triggering in volcanic zones. Proc. of the Workshop Geodynamical Instrumentation Applied to Volcanic Areas, Walferdange, Oct. 1-3, 1990. Cahiers du Centre Européen de Géodynamique et de Séismologie, vol. 4, pp 387-390.

ZUGRĂVESCU Dorel, Ileana Fatulescu, Dumitru Enescu, Dorina Danchiv and Octav Haradja (1989), *Peculiarities of the correlation between gravity tides and earthquakes*, Revue Roumaine de Geologie, Geophysique et Géographie, Serie de Géophysique, Tome 33, pp.3-11.

Anexa B

Articol: *Very Weak Signals (VWS) detected by stacking method according to different astronomical periodicities (HiCum)*

VAN RUYMBEKE M., P. ZHU, N. CADICHEANU, AND S. NASLIN
Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 7, 651–656, 2007

Very Weak Signals (VWS) detected by stacking method according to different astronomical periodicities (HiCum)

M. van Ruymbeke¹, P. Zhu¹, N. Cadicheanu², and S. Naslin¹

¹Royal Observatory of Belgium, Belgium

²Institute of Geodynamics of Romanian Academy, Bucharest, Romania

Received: 20 July 2007 – Revised: 18 October 2007 – Accepted: 22 October 2007 – Published: 12 November 2007

Abstract. A stacking method to detect very weak signals is introduced in this paper. This method is to stack observed data in different well known periodicities according to the astronomical clock since majority geophysical observations are time based. We validated this method by applying it in four different cases. Interactions behind the observed parameters become obviously after it is stacked in two diurnal and semidiurnal tidal periodical waves. Amplitude and phase variations will be also measurable when a sliding windows stacking is used. This could be an important reference to find precursors before some earthquakes and volcanic events, corresponding to attenuations of medium patterns.

1 Introduction

The new development of HiCum stacking method (Histogram Cumulating) is introduced in this paper (van Ruymbeke et al., 2003). Detect different periodical signals is an important issue in nature science, especially in the geophysical domain. Periodicities of signals have been widely studied since Fourier transform algorithm was published. However, in our study, we are more focused on the properties of different signals inside the pre-defined periodicities. Earth is continuously moving inside the gravitational gradient induced by the Moon and Sun. The orbital parameters of the motion are strictly defined by the celestial mechanics so that the reaction of the Earth to each outside body produces many periodical signals and most of them could be separated using stacking method if long enough time series are available. For instance, the lunar and solar semidiurnal wave could be separated with one month data. But, the ultimate purpose of the method is not only to separate the period signal of observed parameters, but also to detect the signal's amplitude and phase variations

in time domain and to connect them with past events such as earthquakes and volcanic events. For example, small variations of amplitude distribution before a strong earthquake have been found when it is used to investigate the relation between tidal stress and Vrancea seismic zone (Cadicheanu et al., 2007¹).

Multi-parameters approach is required for the monitoring of complex interactions induced by tectonic activities in seismic, volcanic, geochemical areas, hydrology, land-slide zones. To illustrate local inter-activity between parameters, we analyzed four situations with HiCum, The barometric pressure induced on tidal gravity field variations in Membach (Belgium), sensor recording sea level in a lava tube in Lanzarote (Spain), monitoring of strain, pressure and temperature in underground cave at Rochefort (Belgium), and ground water level inside boreholes plunging in three aquifers at Uccle (Belgium). All of the examples show how the method works on each geophysical experiment.

2 Description of “HiCum” stacking method

Stacking data has been used for many decades in the meteorological fields (Bartels, 1938). In fact, as early as 19th century Darwin firstly used similar method to observe the sea tides cycle. Following that idea, Doodson further promoted the work and built the precisely sea tides forecast “Doodson-Légé” machine, which was in daily use since 1948 until it was superseded by the electronic computer during 1960s. The stacking method introduced here is based on similar principle; it separates observed signals according to pre-defined periodicities. Time based observation is a combination of periodical signals with nonlinear factors, so that main frequencies of the contained signal could be localized by the

Correspondence to: P. Zhu
(zhooping@gmail.be)

¹Cadicheanu, N., van Ruymbeke, M., and Zhu, P.: Tidal Triggering evidence of intermediate depth earthquakes in the Vrancea zone (Romania), Nat. Hazards Earth Syst. Sci., in review, 2007.

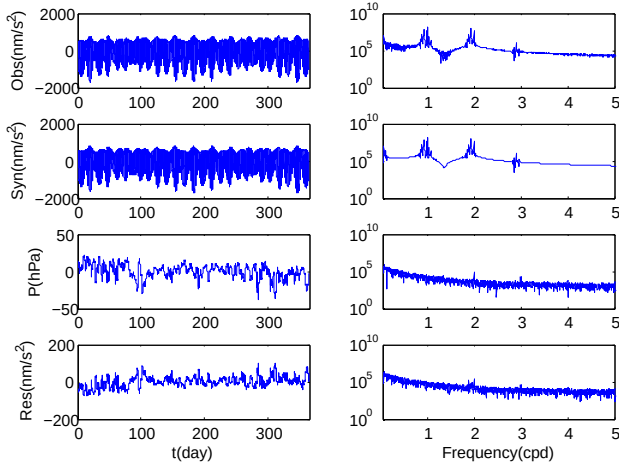


Fig. 1. (a) 365 days SG data Membach (Belgium), Synthetic tides, Gravity residuals, Barometric Pressure and (b) their corresponding Fourier spectrum.

Fourier Transform, an important hypothesis for the HiCum method being that the period is precisely priori defined. A periodical signal could be expressed as:

$$f(t) = \frac{1}{Ns} \sum_{i=1}^{Ns} \sum_{j=1}^T y(t_j) + \varepsilon$$

$$i = 1, T, 2T, \dots, Ns \quad j = 1, 2, 3, \dots, T \quad (1)$$

$$T = \frac{2\pi}{\omega} \quad (2)$$

where $f(t)$ represents averaging stacking results, t the time, $y(t)$ the observed data, Ns the stacking times, T the period, ω : the angular speed and ε the uncertainties and errors. The precision of the stacking results is closely related with the data length n , the stacking period T , and the sampling interval dt . Then stacking results can be fitted by a sinusoidal function.

$$s(t) = A \sin(\omega t_j + \alpha) \quad (3)$$

where A is the amplitude and α the phase

$$A = \sqrt{\sum_{j=1}^T ((f(t_j) \sin(\omega t_j))^2 + (f(t_j) \cos(\omega t_j))^2)} \quad (4)$$

$$\alpha = \tan^{-1} \left(\frac{\sum_{j=1}^T f(t_j) \sin(\omega t_j)}{\sum_{j=1}^T f(t_j) \cos(\omega t_j)} \right) \quad (5)$$

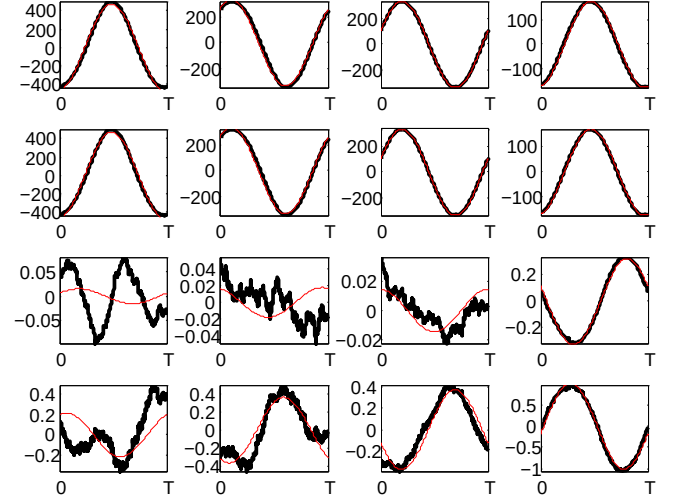


Fig. 2. HiCum Staking results of K1, O1, M2, S2 periods applied to the four channels which are observed tides, synthetic tides, gravity residuals and barometric pressure.

The goodness of the fit could be valued by root mean square error RMS

$$\text{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \sum_{j=1}^T (f(t_j) - s(t_j))^2} \quad (6)$$

For instance, if one year gravity records with minute sampling is stacked in the lunar period M2 (central frequency 1.9504 cycle per day, corresponding to 745 min the period), the M2 wave could be separated by 705 (365.15 day * 1440 min / 745 min) times stacking and the mean square error will be reduced about $\sqrt{Ns}$ times (this example is $\sqrt{705} = 26$ times). Sometimes, for a high quality data bank with high sampling rate compare to the signal's period, the signal could be easily separated by several stacks. It provides a possibility to check the amplitude and phase variation for the signal in an approximated time interval. It is an important approach for the stacking method because, in the tidal triggering evidence of earthquakes and volcanic events studies, the amplitude and phase distribution changes in the tidal period could be a possible precursor for the forecasting of these events (Tanaka et al., 2006; Nicoleta et al., 2007). So that, the static stacking function is developed into a dynamic one by a sliding windowed stacking function:

$$f_w(t) = \sum_{k=1}^N f(t) \quad (7)$$

$$f_w(t) = \sum_{k=1}^N \left[\frac{1}{Ns} \sum_{i=1}^{Ns} \sum_{j=1}^T y(t_j) + \varepsilon \right] \quad k=1, w, 2w, 3w, \dots, N \quad (8)$$

where $f_w(t)$ is a windowed stacking result, N the number of the windows, w the sliding window length and $w \geq T$.

Table 1. Selected astronomical periodicities and corresponding gravitational tides amplitudes for Belgium.

Symbol	Period T(Min)	Amplitude (nm/s ²)	Origin
K1	1436	431.2255	Lunar & Solar declinational wave
O1	1549	306.6215	Lunar principal wave
M2	745	314.8163	Lunar principal wave
S2	720	146.4691	Solar principal wave

Through Eqs. (1), (3), (6), we can build up a matrix **E** with the stacking times *Ns* and its corresponding stacking results errors RMS

$$\mathbf{E} = \begin{pmatrix} Ns \\ \text{RMS} \end{pmatrix} \tag{9}$$

The minimum stacking times *Ns* could be determined by optimizing the RMS value. So a long series record could be divided into *N* continuous sliding windowed stacking, once the stacking time *Ns* fixed. Sliding stacking results give the amplitude and phase variation at approximated time interval *w*.

3 Membach superconducting gravimeter record (SGs)

We firstly selected a one year record of the Superconducting Gravimeter installed in the Membach station (Belgium). This station (50.6092° N, 6.0067° E, altitude 250 m) is among the best Belgian seismic stations and is usual as the reference point for the Belgian gravity network. It consists of a 130 m long gallery excavated in low-porosity argillaceous sandstone with quartzite beds.

We compared separately results of Fourier spectrum and HiCum stacking on 365 days data of theoretical tides, gravity residuals and barometric pressure (Fig. 1a). The synthetic tides was calculated by Tsoft with a local mode adjusted by long term SGs observations (Van Camp and Vauterin, 2005). The gravity residuals are directly computed by subtraction of the theoretical value from the observed tide. Diurnal, semi-diurnal and ter-diurnal energies appear obviously in the spectrum of observed and synthetic tides. There are very small peaks in the semi-diurnal and ter-diurnal frequency band of the residuals and barometric Fourier spectrum (Fig. 1b.) by which it's difficult to figure out the barometric pressure effect on the SGs record. However, the pressure effect becomes very clear in the S2 period (Table 1) stacking results when the same data set is stacked in by HiCum. We selected the four waves which share 70% total energy of gravity tides coming from lunar and solar attraction (Table 1). K1 is the strongest wave and the barometric and ocean loadings have the minimum effect on O1 wave nearby Membach station (Melchior, 1978). Two main semidiurnal waves M2 and S2 are analyzed too (Fig. 2). The linear regression between the

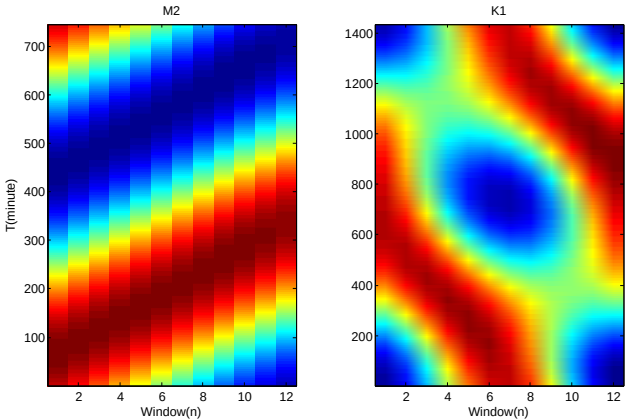


Fig. 3. Sliding windows stacking on K1 and M2 period, the beat effect from gravitational force appeared in K1, and lunar node effect could be observed in M2.

HiCum stacking results on four periods, confirms the quality of the synthetic mode adjustment with differences to the ideal unity (1 nm/s²) factor smaller than 0.1% except for S2 which could be more perturbed by the main tidal component existing in the barometric spectrum. We compare the atmospheric pressure record and HiCum stacking residuals. Correlation appears clearly for the K1 and S2 component. There is very small barometric effect on M2 but it is well correlated with the residuals, the slope of best fit S2 wave is 2.829950 nm/s²/hPa which is very near the global mode (3.0 nm/s²/hPa) for correction barometric pressure on SGs record (Table 2).

The sliding approach is applied on the K1 and M2 period. One year SGs records are stacked in a 30 days window and the window slided with 30 days step. For each window, we applied sliding stacking for the K1 and M2 periodicities (Fig. 3). The sequenced outputs show the change of the two periodicity waves in time domain. For M2 which is the main lunar principle wave, its amplitude should be nearly constant (Melchior, 1978). The 30 days windows allow separating the M2 component of the solar S2 one. The lunar orbit node is about 27.32 days which appears in the sliding stacking as a phase shift. The K1 period is totally different because it contains the action of solar and lunar declinations, so that appears the beat effect inside the K1 periodicity (Fig. 3).

Table 2. Linear regressions between observed and synthetic tides, between residuals and barometric pressure.

	Linear regression between observed tides and synthetic tides ($y=ax+b$)				Linear regression between residuals and barometric pressure ($y=ax+b$)			
	a	b	R^2	rms	a	b	R^2	rms
K1	1.0003	−0.000628	0.999998	0.467	−2.756	−0.000866	0.895025	0.155
O1	0.9991	0.009490	1.000000	0.019	−3.215	0.006789	0.116549	0.224
M2	0.9992	0.003947	1.000000	0.131	−6.633	−0.004588	0.930038	0.063
S2	1.0017	0.000701	0.999971	0.668	−2.830	0.000100	0.987746	0.077

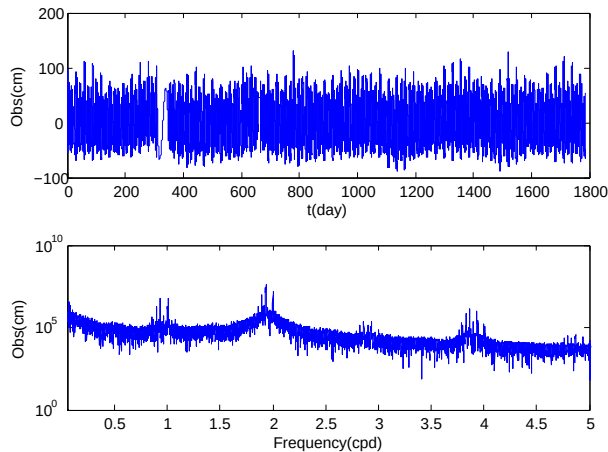


Fig. 4. (a), Jameos del Agua Sea-level sensor record on 5 years interval and (b) its Fourier Spectrum which confirms the non-linearity pattern with existing peaks between the fundamental diurnal periods until the fifth harmonic.

We can conclude from this example: the goodness of the synthetic tides mode and the barometric effect on gravimeter could be found after staking in four periods and the lunar orbit node effect are obviously in the sliding stack results.

4 Lanzarote sea gauge

The next example is an EDAS sea-level monitoring station ,set-up at Lanzarote Island (Spain) which is the most north-eastern island of the Canarian Archipelago (van Ruymbeke, 2001) . The landscape of Lanzarote is dominated by numerous volcanoes. The site of observation named “Jameos del Agua” is located in a lava tunnel of the quaternary volcano La Corona (609 m). The geometry of this tunnel consists in a series of small lakes interconnected by passages for water. This tunnel is plunging into the sea for more than one and half kilometers. Oceanic tidal there could reach few meters. The level depends continuously of the water flow in the tunnel which is function of the passage section. This is a typical situation of non linearity with transfer function influenced by the signal itself.

A sea gauge sensor records the sea level in the first open lake of the lava tunnel. Very smooth motion appears due to the filtering of short period sea waves through the few openings existing between the open-sea and the tunnel. Fourier spectrum confirms the nonlinearity of the water motion inside the lava tunnel (Fig. 4b).
The HiCum is applied to five years records. M2 amplitude is 40.528 cm of sinusoidal fit with RMS error 0.8261 and S2 amplitude 4.972 cm of sinusoidal fit with RMS error 0.2132. It shows the efficiency of stacking to separate harmonic components on long registrations (Fig. 5).

5 Rochefort strain meter

This example concerns the detection of very weak signals (VWS) in a nosing signal of a strain meter. The instrument is located in the Rochefort karstic cave built-up by the erosion of the Lomme River (Belgium). The monitoring is assumed with several EDAS sensors. We apply the HiCum analysis on a file covering 800 day’s records with four channels. The first channel is a glass stain meter RA1 located on a vertical crack. The second and the third channels are two thermometers monitoring temperature of the surface rock and environment in the gallery nearby the strain-meter. The fourth channel is a barometer (Fig. 6a) (van Ruymbeke et al., 2004).
The spectral analysis of the four channels shows different peaks in diurnal, semi-diurnal and ter-diurnal frequency bands (Fig. 6b).
For the strainmeter, diurnal and semi-diurnal activities appear clearly without harmonics. Contrarily for rock temperature and barometric pressure, semi-diurnal and ter-diurnal peaks exist and seem to be correlated. We subtract the raw dada with a third degree polynomial function to eliminate long term instrument drift before stacking the data (Fig. 7).
The length of strain meter is only 15 cm. We observe that the HiCum for the strainmeter on M2 and S2 are very well determined. The amplitudes reach about 20 nanometers with a noise level of only a few nanometers! On the 4th channel, HiCum confirms a significant S2 barometric component with a negligible M2 one. The air thermometer HiCum on S2 is like the derivative of the barometric modulation, confirming

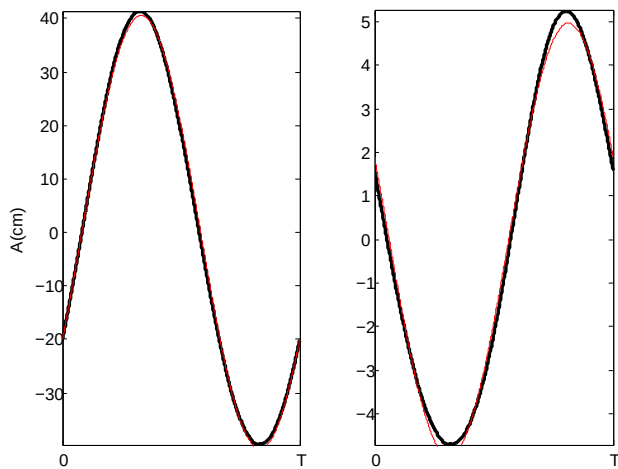


Fig. 5. HiCum of Jameos J31 sea gauge. HiCum results on M2 and S2 periods.

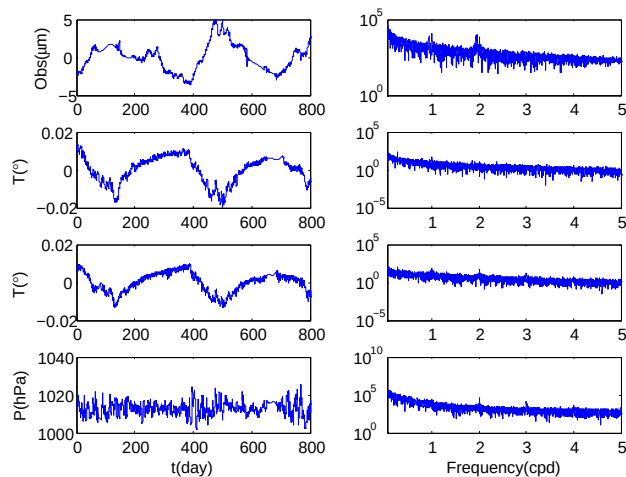


Fig. 6. (a) Four channels recording signals from strain-meter, air thermometer, rock thermometer and barometer. (b) Corresponding Fourier spectrum.

the induction process found with spectral analysis (Rasson and van Ruymbeke, 1977).

No significant effect appears for M2. For rock thermometer, only residual effects exist which could be related to evaporation of water flowing through cracks which could influence the strain-meter record.

These graphs illustrate the interests of the HiCum stacking method for problems with complex interactions. The records of strain-meter are very noisy with a lot of irregularities. However, HiCum on long time interval permits to extract clear information with sufficiently large dynamics to validate physics models.

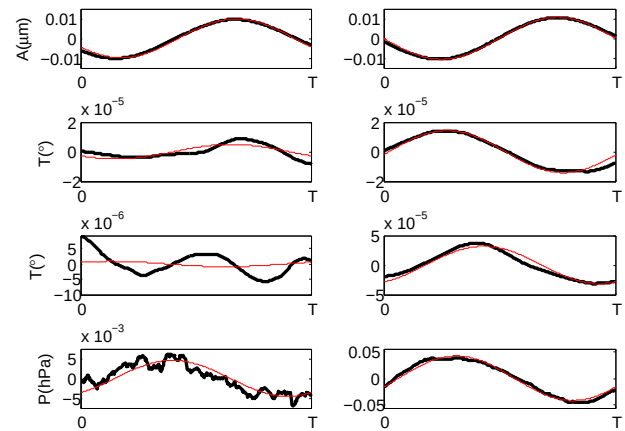


Fig. 7. HiCum applied to the raw data of four channels (strain-meter, rock thermometer, air thermometer and barometer) for lunar M2 period and solar S2 period.

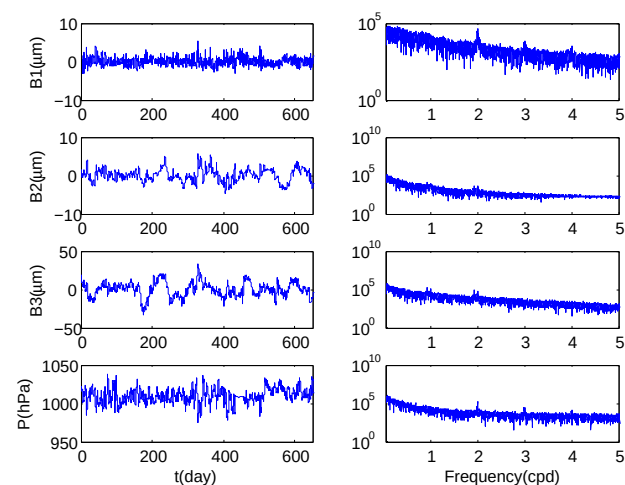


Fig. 8. (a) The four channels show the signals of the three boreholes water levels and, barometric pressure. (b) the corresponding Fourier spectrum.

6 Ucci boreholes water levels

We illustrate a medium interaction of actions by analyzing a borehole ground water level station located at the Royal Observatory of Belgium. It records the change of the water levels in three tubes plunging separately in three independent aquifers located at different depths (B1: –35 m, B2: –64 m, B3: –95 m). The upper aquifer is an opened one, the second a semi-confined, and the third a confined one (Fig. 8a) (van Ruymbeke and Delcourt, 1985). The original records were pre-treated with the same procedure as the previously studied Rochefort one. Main conclusions from the spectral analysis concern interaction of water levels with simultaneous atmospheric pressure and tidal gravity changes. However the signal to noise ratio for spectrums is too low for understanding the relations between these two effects (Fig. 8b).

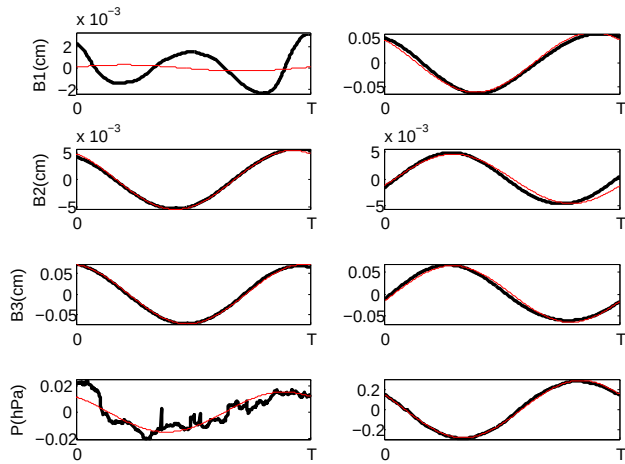


Fig. 9. HiCum with lunar M2 and solar S2 period graphs applied to the four channels (water levels B1, B2 & B3 and barometer).

We apply the HiCum method on same series of data. For the first borehole and the barometric channel, HiCum shows a common large amplitude S2 and negligible modulations on M2. The gravitational effect appears on the B3-aquifer and smoothly on B1. Induction of atmospheric pressure looks negligible for the B2 and B3 boreholes. It is another example of this method to compare by stacking, two kinds of actions by the influences detected in reactions (Fig. 9).

7 Discussion

This paper has introduced a stacking method (HiCum) which could transform time based observation into different periodical based signals by stacking. One important issue in Earth science is to find periodical phenomena and to explain the physical meanings behind it. HiCum stacking method is another way to precisely study the performance of different signals in the frame of a known period T . The synthetic tide mode accuracy and barometric effect on gravimeter could be determined when the signals are stacked in four periods. Sliding stacking shows the well known lunar node effect in the form of phase shift inside each window. In the sea gauge observations, the main semidiurnal lunar and solar tides signals could be subtracted and separated; for the strain meter records, very small tidal inductions can be detected even if the record is largely polluted by moisture, pressure and temperature. In the borehole water level monitoring stations, the semidiurnal tides signals are detected in the two deepest aquifers. Above all, these examples are just illustrating how the stacking method works. However, several aspects of the method still need to be investigated specially: its performance on short period signal studies and its adaptabilities in other domains.

Acknowledgements. The authors are grateful to all people who participate in EDAS projects; we thank particularly M. van Camp and M. Hendrickx for giving the Membach SG data, and E. de Kerchove correcting manuscript. The experiments in Lanzarote were organized with the support of R. Vieira and his colleagues; Local facilities are purchased by the Casa de los Volcanoes belongs to the Cabildo Insular de Lanzarote. G. Tuts has prepared the data files. The project in Rochefort was supported by Y. Quinif and Th. Camelbeeck. This research is financially supported in part by the Action 2 contract from the Belgian Ministry of Scientific Politics. We deeply appreciate the comments from B. Meurers and anonymous reviewer that served improves significantly the original manuscript.

Edited by: P. F. Biagi

Reviewed by: B. Meurers and another anonymous referee

References

- Bartels, J. : Random Fluctuations, Persistence and Quasi-persistence in Geophysical and Cosmical Periodicities , *Terr. Magn. Atmos. Electricity*, 40, 1, 1–60, 1938.
- Melchior, P.: *The Tides of the Planet Earth*, Pergamon Press, London, 1978.
- Rasson, J. and van Ruymbeke, M.: Underground meteorology at the underground Laboratory of Geodynamics at Walverdange, in: *VIIIth Symp. on Earth Tides*, Bonn, 1977.
- 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.
- van Camp, M. and Vauterin, P.: Tsoft: graphical and interactive software for the analysis of time series and Earth tides, *Comput. Geosci.*, 31(5) 631–640, 2005.
- van Ruymbeke, M., Howard, R., Pütz, 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.: Projects of the Royal Observatory of Belgium (ROB) at the Lanzarote Geodynamical Laboratory (LGL), *J. Geodetic Society of Japan*, 47, 463–469, 2001.
- van Ruymbeke, M. : The Environmental Data Acquisition System(EDAS) developed at the Royal Observatory of Belgium, *J. Geodetic Society of Japan*, 47, 40–46, 2001.
- van Ruymbeke, M. and M. Delcourt : A capacitive transducer for water level, *International Symposium on Earth Tides*, Consejo Superior de Investigaciones Científicas, Madrid, 95–103, 1985.
- van Ruymbeke, M., Beauducel, M. Fr., and Somerhausen, A.: The Environmental Data Acquisition System(EDAS). Developed at the Royal Observatory of Belgium, in: *Short thermal and hydrological signatures related to tectonic activity*, *Cahier du Centre Européen de Géodynamique et de Séismologie*, 14, 163–174, 1997.
- 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.

Anexa C

Articol: *Tidal triggering evidence of intermediate depth earthquakes in the Vrancea zone (Romania)*

CADICHEANU N., M. VAN RUYMBEKE, AND P. ZHU

Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 7, 733–740, 2007

Tidal triggering evidence of intermediate depth earthquakes in the Vrancea zone (Romania)

N. Cadicaneanu¹, M. van Ruymbeke², and P. Zhu²

¹Institute of Geodynamics of the Romanian Academy, 19-21, Jean-Louis Calderon St., Bucharest-37, 020032, Romania

²Royal Observatory of Belgium, 3, Avenue Circulaire, 1180- Brussels, Belgium

Received: 15 June 2007 – Revised: 19 June 2007 – Accepted: 19 June 2007 – Published: 30 November 2007

Abstract. Tidal triggering evidence of intermediate earthquakes in the Vrancea region (Romania) is investigated. The Vrancea seismic zone is located in the bend region of the South-Eastern Carpathians (45°–46° N, 25.5°–27.5° E) and is known as one of the most active seismic zones in Europe. We selected earthquakes occurred between 1981 and 2005 from the RomPlus catalog provided by the Institute of Earth Physics of Bucharest with $M_w \geq 2.5$ and focal depths between 60 and 300 Km.

We assigned a tidal component phase angle for each event which is computed from the earthquake occurrence time. Then the phase angle distribution was obtained by stacking every angle value in a 360 degree coordinate. Main lunar and solar semidiurnal tidal components M_2 and S_2 are considered. The phase angle distributions are tested by Permutation test which are introduced for the first time to a tidal triggering study. We compared results with classical Schuster's test. Both tests produce one value, p_p for Permutation test and p_s for Schuster's test, which represent the significance level for rejecting the null hypothesis that earthquakes occur randomly irrespective of tidal activities M_2 and S_2 phase distribution are random for the complete data set. However, when we set up a one year window and slide it by 30 d step, significant correlations were found in some windows. As a result of the sliding window, data set systematic temporal patterns related to the decrease of the p_p and p_s values seem to precede the occurrence of larger earthquakes.

1 Introduction

Although the amplitude of the tidal stress change is two or three orders smaller than the stress drop of earthquakes, the tidal stress rate could be comparable to the tectonic stress rate and generally larger than this. It is reasonable to expect tidal triggering of an earthquake when the stress in the focal area is near the critical level (Tanaka et al., 2006).

At the intermediate seismic focal depth levels (60 km < focal depth < 300 km), the gravitational force is the main outside force which could affect the dynamic process of the inner Earth. Its systematic variations are controlled by the lunar-solar attraction forces on each terrestrial point. It can be calculated through the precisely defined periods of the earth tides that vary from few hours (e.g. diurnal and semi-diurnal waves) to years (Melchior, 1978). Earth tides are deeply modulated signals which depend on the Sun and Moon's orbital parameters. For the main position on orbits, declination, ellipticity, and positions of the nodes, each is related to the absolute sidereal reference. Local and regional heterogeneities lead to a different response from one zone to another in accordance with the geological and tectonic background and it could also be influenced by the regional characteristics of the mantle-crust interface with a viscous coupling mechanism.

In summary, the response of a seismic zone to tidal periodicities depends on its specific geology, tectonic history and stress accumulation mechanisms in this region. The tidal modulation tendencies in seismic activity could help explain some aspects of the physical mechanism of rupture forming. A remarkable number of studies have been devoted to the possibility of triggering of earthquakes by earth tides. Most have reported negative conclusions about the correlation between the earth tide and earthquake occurrence (Schuster, 1897; Knopoff, 1964; Simpson, 1967; Shudde and Barr, 1977; Heaton, 1982; Curchin and Pennington, 1987; Rydelek et al., 1992; Vidale et al., 1998). However, many

Correspondence to: N. Cadicaneanu
(cadichian.nicoleta@yahoo.fr)

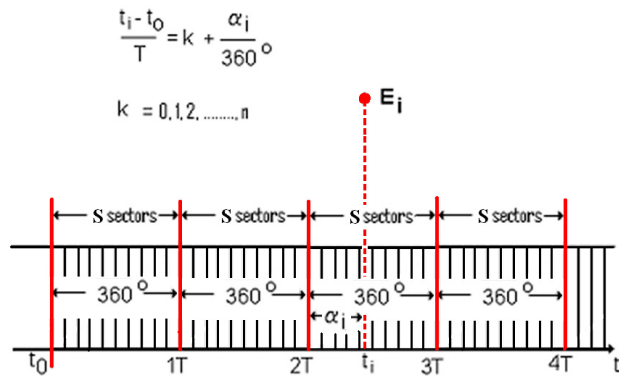


Fig. 1. Time series partition into selected time period T . An event E_i occurring at time t_i will be defined by an angle α_i .

Table 1. Earth tide components and their periodicities.

Earth tide component	Doodson argument	Angular frequency ($^{\circ}/h$)	Periodicity (h)	Amplitude (microgal)
S_2	273.555	30.000000	12.000000	42.286
M_2	255.555	28.984104	12.421000	90.812

recent papers have indicated positive correlations (Enescu and Enescu, 1999; Stavinschi and Souchay, 2003; Stroup, 2007; Tsuruoka et al., 1995; Tolstoy et al., 2002; Tanaka et al., 2002, 2006; Zugravescu et al., 1985, Zugravescu et al., 1989; Wilcock, 2001). Based on the recent positive studies by Tanaka et al. (2002, 2006) we reinvestigated the role of the earth tides on triggering earthquakes in Vrancea area, one of the most active seismic zones in Europe (Knapp et al., 2005). In this paper, we statistically test the significance level of the effect of the two semidiurnal components on intermediate depth earthquakes in Vrancea (Table 1).

We applied the same Schuster's statistical test which has been widely used in tidal triggering studies (Tanaka et al., 2002, 2006). A different approach based on the Permutation test was also introduced. It could extend statistical studies where Schuster's test is not adequate. Validation of the conclusions becomes more robust if both tests show similarities.

2 Method of analysis

A stacking analysis method named HiCum (Histogram Cumulating) (van Ruymbeke et al., 2003, 2007, Cadicheanu et al., 2006), is applied to compute the tidal potential phase angles of earthquakes. First, time based events are divided into a series of intervals with a priori selected constant periods T which could be any tidal component. This time period T is represented by an interval 1° – 360° . Then the time base for each period is normalized as shown in Fig. 1. For

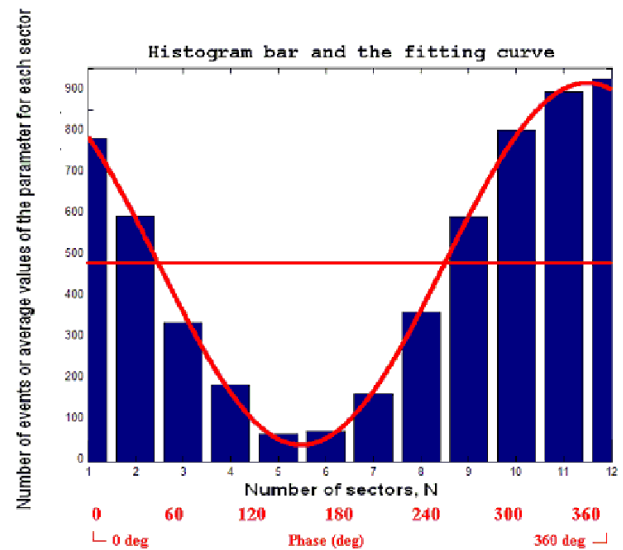


Fig. 2. A histogram bar model with 12 sectors, representing the distribution of the seismic activity or the average value of the parameter for each sector and the corresponding sinusoidal fitting curve.

each component, the original phase is fixed from astronomical data. The event E_i occurred at time t_i was characterized by the phase α_i . For the selected tidal period T a histogram of events is established as a function of the α_i . We divide histogram into S sectors with length equal to $360^{\circ}/S$. The value of S is selected when a significant number of events in each sector could be obtained.

We modelled the interactions of tidal components and earthquake with a cosine function adjusted to the histogram. The amplitude and phase of the cosine show the links, in terms of modulation, between the stacked events and the chosen tidal components (Fig. 2). Two main tidal components were selected for this research: the solar semidiurnal wave S_2 and the lunar semidiurnal wave M_2 .

3 Statistical tests

3.1 Schuster's test

To begin, we statistically investigate the correlation between the tidal components and earthquake occurrences using Schuster's test. This test is a classical approach, which has been applied in past (Heaton, 1975, 1982; Tsuruoka et al., 1995; Tanaka et al., 2002, 2006).

In Schuster's test, each earthquake is represented by a unit length vector in the direction defined by its tidal phase angle α_i which was introduced in the Fig. 1.

The vectorial sum D is defined as:

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

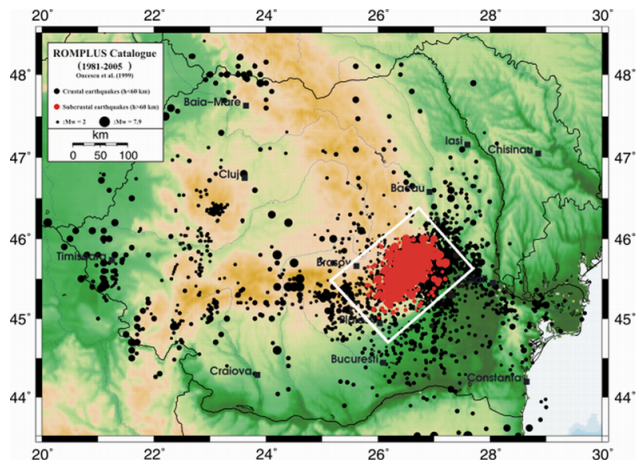


Fig. 3. The Vrancea earthquakes epicentres distribution (1981–2005) from RomPlus Catalog provided by Institute of the Earth Physics of Bucharest.

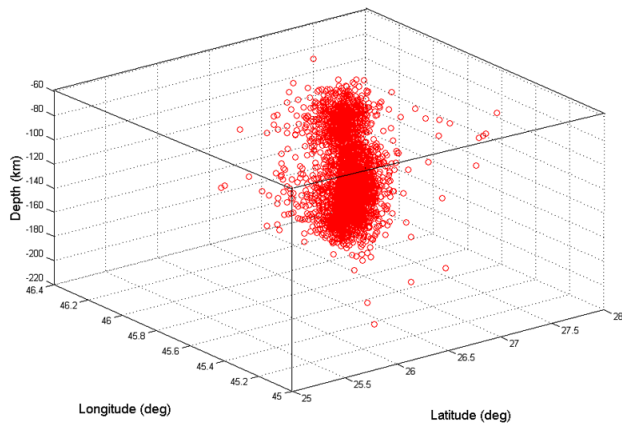


Fig. 4. Vrancea intermediate-depth seismic activity from 1981 to 2005 (a 3-D view of the hypocenter distribution).

where N is the number of earthquakes. When the α_i is distributed randomly, the probability that the length of a vectorial sum is equal to or larger than D is given by Eq. (2):

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

Thus, $p_s < 5\%$ represents the significance level at which the null hypothesis that the earthquakes occurred randomly with respect to the tidal phase is rejected.

To avoid the risk of spurious conclusions, which Schuster's test could induce, we must confirm the conclusions' robustness by a different approach. Thus, we introduce another statistical test.

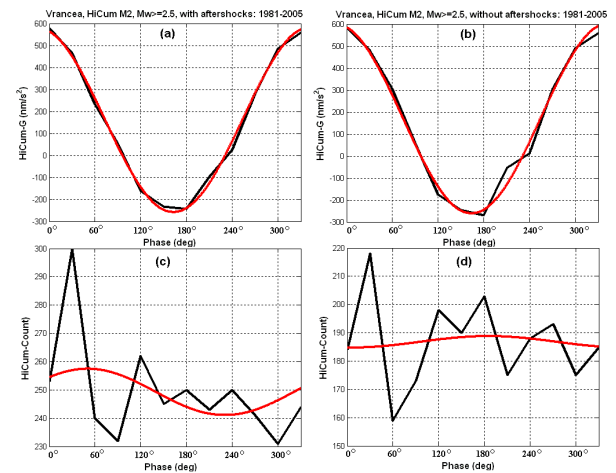


Fig. 5. Gravity theoretical values, (a) and (b), and the number of earthquakes distributions, (c) and (d), as a function of $M2$ phase angle (black curves). The presence of aftershocks is tacked in account only in (a) and (c) cases. The fitting curves corresponding to each distribution are in red colour.

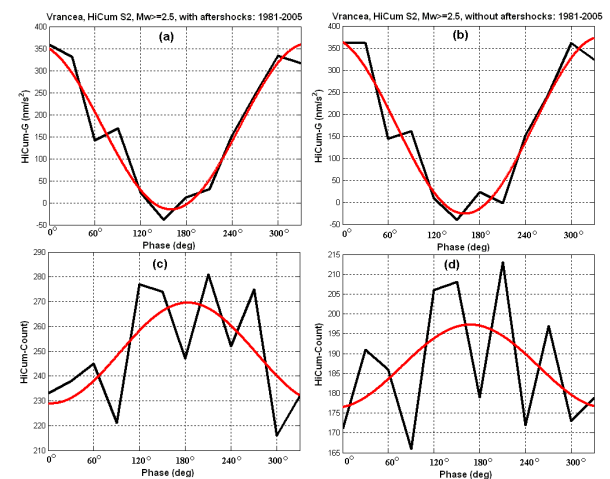


Fig. 6. Gravity theoretical values, (a) and (b), and the number of earthquakes distributions, (c) and (d), as a function of $S2$ phase angle (black curves). The presence of aftershocks is tacked in account only in (a) and (c) cases. The fitting curves corresponding to each distribution are in red colour.

3.2 Permutation tests

We choose the permutation test which is well-known among biologists and geneticists because it is always free to choose the statistic which best discriminates between hypothesis and alternative. Permutation tests also allow for calculating the probability (p_p) of the significance level to reject the null hypothesis in which the distribution is random.

It is also called a randomization test, re-randomization test, or an exact test; it is one type of statistical significance test in which a reference distribution is obtained by

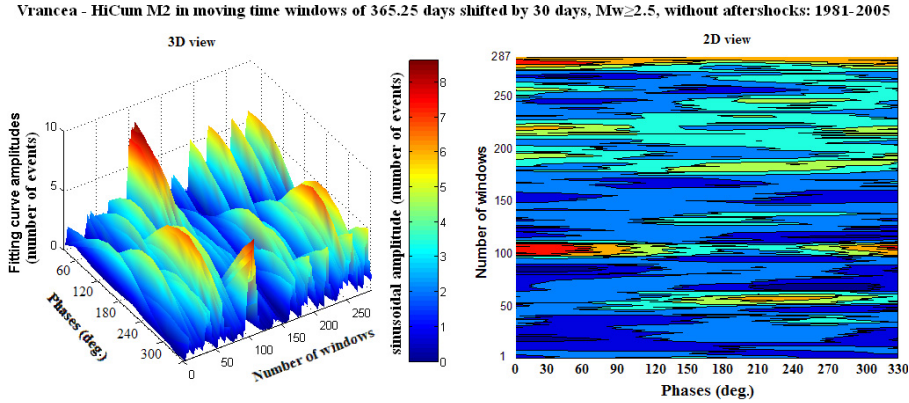


Fig. 7. The 3-D distribution of the HiCum fitting curves amplitudes expressed as the number of seismic events, and their corresponding 2-D view. For the HiCum analysis the M_2 wave period in sliding windows of one year, shifted by 30 days.

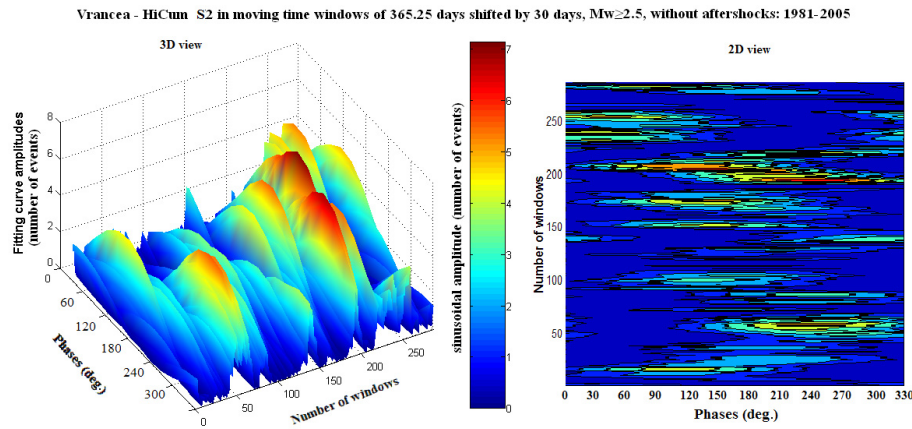


Fig. 8. The 3-D distribution of the HiCum fitting curves amplitudes expressed as the number of seismic events, and their corresponding 2-D view. For the HiCum analysis the M_2 wave period was used in sliding windows of one year, shifted by 30 days.

calculating all possible values by rearranging the labels on the observed data points.

In other words, the method is allocated to subjects in an experimental design that is mirrored in the analysis of that design. If the labels are exchangeable under the null hypothesis, then the resulting tests yield the exact significance levels. Then confidence intervals can be derived from the tests. The theory has evolved from the work of R. A. Fisher and E. J. G. Pitman (R. A. Fisher, 1935; E. J. G. Pitman, 1938). Permutation distribution is given by Eq. (3):

$$p_p = \left(\sum_{l=0}^m A_l \right) / r \quad (3)$$

Amplitude A_0 was obtained by a co-sinusoidal function which was fit to the distribution of HiCum stacking results after we produce r random permutations distributions. We apply the HiCum on each permutation distribution and select only those that are significant according to amplitudes $A_i > A_0$ ($i=0, 1, 2, \dots, m$ where $m \leq r$).

If $p_p < 5\%$, it represents the significance level at which reject the null hypothesis, i.e. that the earthquakes occur randomly with respect to the tidal phase angle.

Both tests are applied on the entire earthquake catalogue and on the one year windowed data (sliding by one month) from 1981 to 2005. The p_s and p_p -values are evaluated and compared.

4 Vrancea seismic zone

Earthquakes used in this study were selected from the RomPlus catalogue provided by the National Institute of Earth Physics, Bucharest. It contains nearly 3000 intermediate-depth earthquakes ($M_w \geq 2.5$) since 1981 to 2005 (Onicescu et al., 1999) (Fig. 3).

All epicentres are mainly located in a very narrow zone in the South-Eastern Carpathians (45° – 46° N, 25.5° – 27.5° E) at the intra-continental collision between the East European plate, Intra-alpine, and Moesian micro-plates (Ardeleanu,

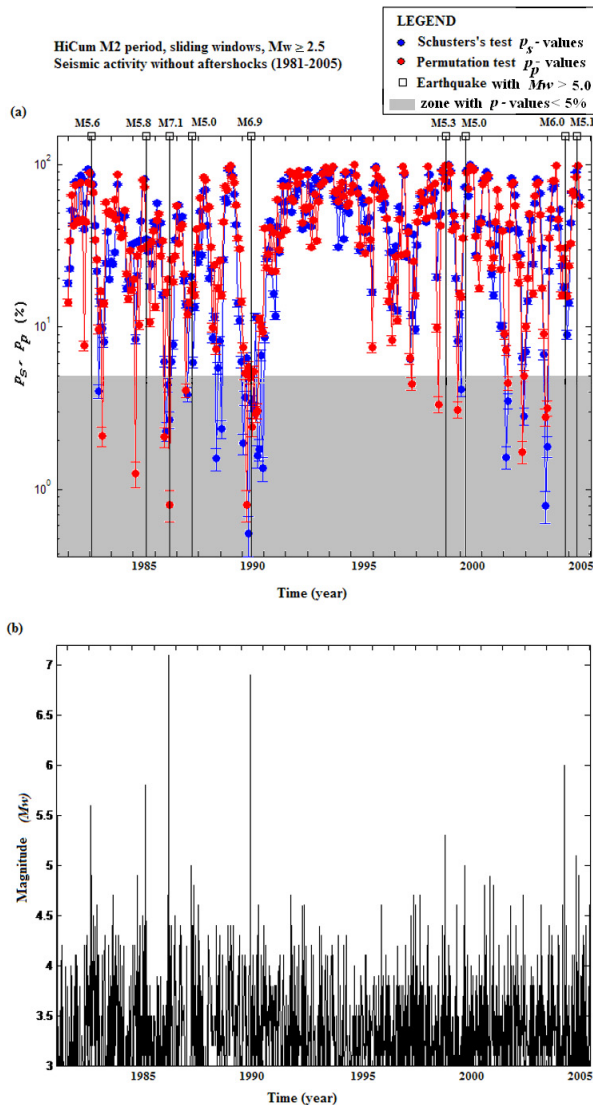


Fig. 9. (a) Temporal variation of the p_s -value (blue) and p_p -value (red) in every sliding window for HiCum with an $M2$ period. The vertical bar represents the standard deviation of the p_s and p_p -values. (b) Magnitude-time plot of the earthquake occurrences ($M_w \geq 3.0$). The aftershocks sequence was eliminated using the Kossobokov-Romashkova method.

1999). It is characterized by a prevailing intermediate depth seismicity which is in distinct confined volume (Bazaciu et al., 1999) (Fig. 4).

Important historical earthquakes happened on 10 November 1940 ($h=150$ km, $M_w=7.7$), 4 March 1977 ($h=94$ km, $M_w=7.4$), 30 August 1986 ($h=131$ km, $M_w=7.1$), and 30 May 1990 ($h=91$ km, $M_w=6.9$). These earthquakes reflect a predominantly compressive stress regime at this subcrustal range. The compressive tendency is becoming stronger with depth (Bala et al., 2003).

Earthquakes with $M_w \geq 5.0$ from 1981 to 2005 are given

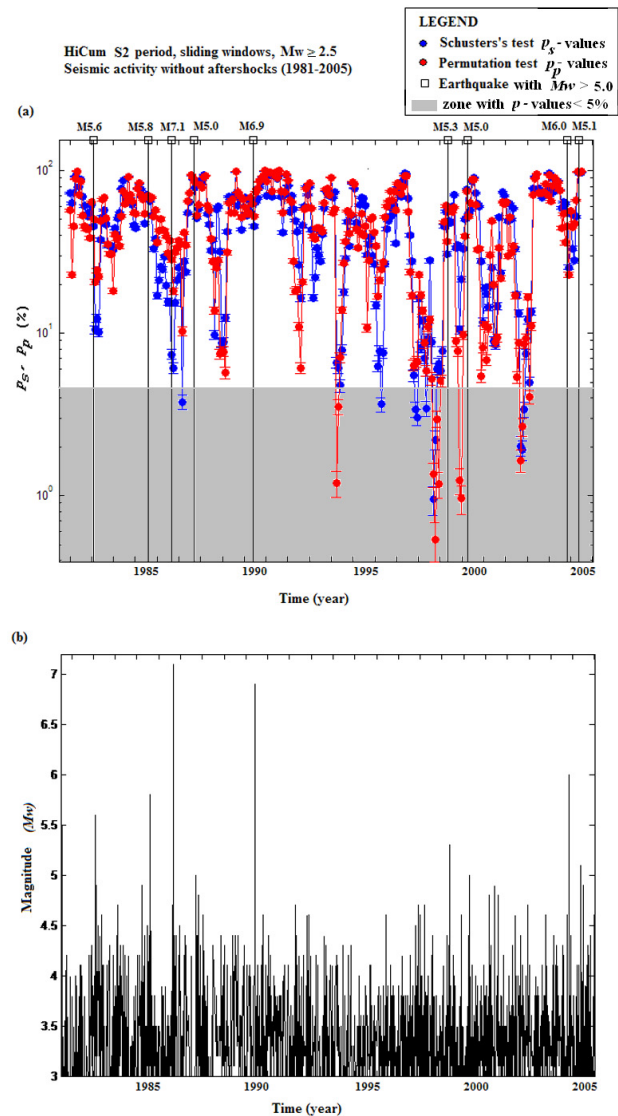


Fig. 10. (a) Temporal variation of the p_s -value (blue) and p_p -value (red) in every sliding window for HiCum with $S2$ period. The vertical bar represents the standard deviation of the p_s and p_p -values. (b) Magnitude-time plot of the earthquake occurrences ($M_w \geq 3.0$). The aftershocks sequence was eliminated using the Kossobokov-Romashkova method.

in Table 2. The aftershocks sequence was eliminated by the Kossobokov-Romashkova method¹. This method proposed a new way to characterize aftershocks according to a systematic analysis of the earthquakes. It defined all quakes, which occurred in the following 2 d as aftershocks after an earthquake with M_w from 2.5 to 5.0, 4 d for M_w from 5.0 to 5.5,

¹Kossobokov, 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.

Table 2. Intermediate–depth earthquakes in the Vrancea zone with $Mw \geq 5.0$ (1981–2005).

Year	Month	Day	Hour	Min	Sec	Lat.(deg)	Long. (deg)	Depth (km)	Mag.(Mw)
1981	7	18	0	2	59	45.69	26.42	166.1	5.5
1983	1	25	7	34	50	45.75	26.64	149.8	5.6
1985	8	1	11	17	36	45.79	26.77	118.6	5.2
1985	8	1	14	35	4	45.73	26.62	93.5	5.8
1986	8	30	21	28	37	45.52	26.49	131.4	7.1
1987	9	4	1	40	30	45.68	26.43	160.2	5.0
1990	5	30	10	40	6	45.83	26.89	90.9	6.9
1990	5	31	0	17	48	45.85	26.91	86.9	6.4
1999	4	28	8	47	56	45.49	26.27	151.1	5.3
2000	4	6	0	10	39	45.75	26.64	143.4	5.0
2004	10	27	20	34	36	45.78	26.73	98.6	6.0
2005	5	14	1	53	22	45.68	26.54	148.3	5.1

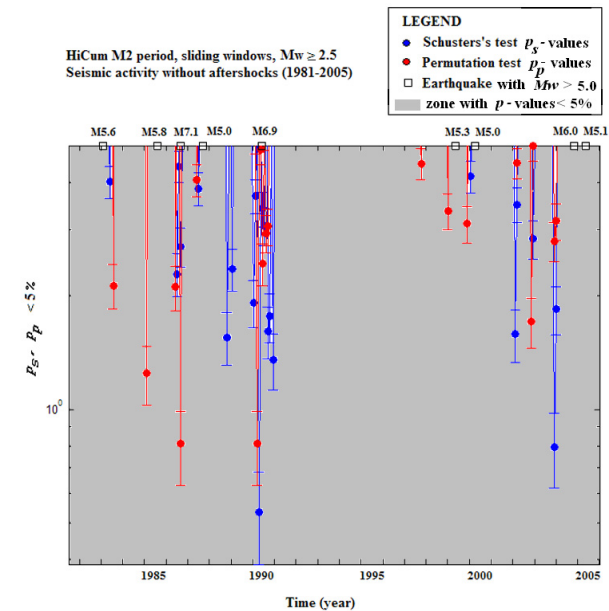


Fig. 11. HiCum $M2$ period: sliding windows in which p_s and p_p –values are 5% (18 values for p_p coefficient and 20 values for p_s coefficient).

8 days for Mw from 5.5 to 6.0, 16 d for Mw from 6.0 to 6.5, 32 d for Mw from 6.5 to 7.0 and 64 d from 7.0 to 9.0.

After we analyzed the semidiurnal tidal effect on both cases with aftershocks ($N=2992$) and without aftershocks (2242), we found some larger aftershocks series could induce bias peaks in the distribution. To avoid this, we decided to consider the cases without aftershocks.

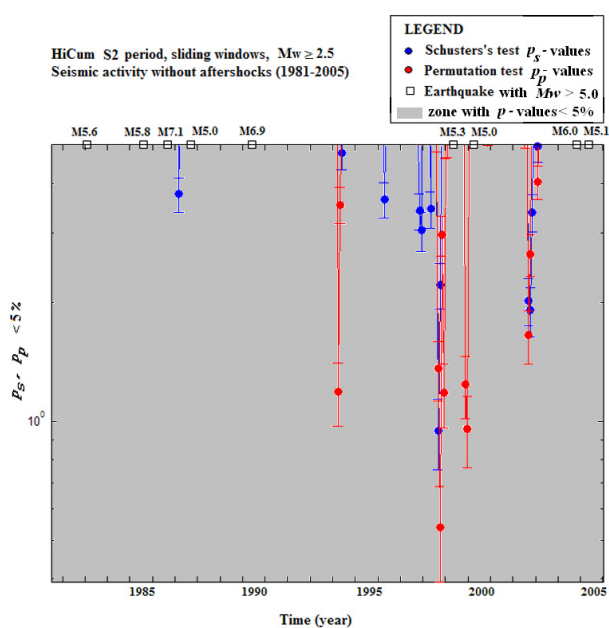


Fig. 12. HiCum $S2$ period: sliding windows in which p_s and p_p –values are $<5\%$ (11 values for p_p coefficient and 12 values for p_s coefficient).

5 Application and results

We studied mainly the semidiurnal tidal components because the gravitational tidal forcing is a force, which could affect the dynamic processing at such depths. In the tidal potential, $M2$ is the lunar principal wave with 12.42 h period and its amplitude is two times larger than the $S2$ which is the solar principal wave having a 12 h period.

We computed the $M2$ and $S2$ tidal phase angle of each earthquake ($Mw \geq 2.5$, focal depth >60 km) and attribute gravity values at the moment of earthquake occurrence which

Table 3. Results of Schuster’s and permutation tests applied on the all sets of earthquakes.

Wave	With aftershocks		Without aftershocks	
<i>M2</i>	$p_s=79.46\%$	$p_p=79.48\%$	$p_s=66.77\%$	$p_p=70.88\%$
<i>S2</i>	$p_s=0.86\%$	$p_p=3.54\%$	$p_s=15.78\%$	$p_p=10.22\%$

was calculated from a local model by Tsoft (Van Camp and Vauterin, 2005). We obtained the distribution of gravity values and earthquake numbers as a function of tidal phase angle. The dynamic patterns of tidal components were compared with the tendency of earthquake occurrence.

The same tendencies in the two cases are observed even if the aftershocks change the phase and the amplitude of the fitting curves (Figs. 5 and 6). This also changes the results of the two significance tests for a threshold at 5% (Table 3). There is one exception (*S2* wave with aftershocks not eliminated), the p_s and p_p -values are much greater than 5%. In these cases, the event distributions should be considered as random. It means that the processes induced by tidal triggering have a non repetitive long term pattern. In order to evaluate the possible correlations between earthquake occurrence and the semidiurnal tidal wave in a shorter time interval, a sliding window algorithm was developed. We calculate the distribution of all events in the *M2* and *S2* cycles for a series of sliding windows with one year length where the sliding step is 30 d. There are 287 set distributions (Figs. 7 and 8) covering the entire sets of data (1981 to 2005).

Each distribution was evaluated by Shuster’s and Permutation tests. Figure 9 and Fig. 10 show that the p_s and p_p value for the two test results are very similar. The hypothesis becomes more convincing because the same conclusion is confirmed by two independent statistical methods.

When the p_s and p_p values are plotted in real time, a spatial pattern could be found both at the *M2* and *S2* cycle (Figs. 11 and 12), but obvious in *M2* cycle (Fig. 11). The p_s and p_p values are decreasing until a large earthquake occurs. After that, the values go up, and then decrease before another large event happens. Similar phenomena were also reported in the study of the Tokai region earthquakes (Tanaka et al., 2006).

Future studies should focus on p value criteria, on the relation between spatial and magnitude patterns and the quake occurrence. It could be useful for detecting potential precursors for earthquake forecasting.

6 Conclusions

We analyzed the correlation between the main semidiurnal tidal waves and the earthquake occurrence. Two different statistical tests were applied on the *M2* and *S2* tidal phase angles’ distribution calculated from each event. The conclusion

regarding robustness of the tidal triggering effect obtained with Schuster’s test is strengthened by the Permutation complementary test.

When we test the distribution determined from all phase angles of earthquakes, no correlation has been found by either tests. However, when we selected a series of one year length sliding window with a 30 days moving step, there is significant correlation between the tidal potential and earthquake occurrence for some windows.

A systematic temporal pattern related to the decrease of the p -values precedes the occurrence of larger earthquakes in the Vrancea seismic region. This pattern could be considered as a kind of precursor. The possible physical consequences of the tidal effect could constrain the research on the seismic source characteristics and their dynamical patterns.

We could imagine that for seismic zones, tidal modulation of fluid pressure is acting before the rupture process.

Acknowledgements. We thank M. Radulian and M. Popa, the National Institute for Earth Physics for providing the ROMPLUS catalogue. We are very grateful P. Hodor for the very useful discussions on the permutation test and on the software implementation. We would like to thank to the bilateral cooperation between Royal Observatory of Belgium and the Institute of Geodynamics of the Romania Academy for allowing us to optimize the conditions in which we could finalize our work. Thanks a lot to all the colleagues for their kind support to our project. We are grateful for the anonymous reviewers for helpful comments, and English improvement by T. van Dam. Thanks M. Everaerts for his contributions.

Edited by: : M. Contadakis
Reviewed by: two anonymous referees

References

Ardeleanu, L.: Statistical Models of the Seismicity of the Vrancea Region, Romania, *Natural Hazards*, 19, 151–164, 1999.
Bala, A., Radulian, M., and Popescu, E.: Earthquakes distribution and their focal mechanism in correlation with the active tectonic zones of Romania, *J. Geodyn.*, 36, 129–145, 2003.
Bazaciu, O. and Radulian, M.: Seismicity Variations in Depth and Time in the Vrancea (Romania) Subcrustal Region, *Natural Hazards*, 19, 165–177, 1999.
Cadicheanu, N., van Ruymbeke, M., Zugravescu, 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.
Curchin, J. M. and Pennington, W. D.: Tidal triggering of intermediate and deep focus earthquakes, *J. Geophys. Res.* 92, 13 957–13 967, 1987.
Enescu, D. and Enescu, B. D.: Possible cause – effect relationships between Vrancea (Romania) earthquakes and some global geophysical phenomena, *Natural Hazards*, Kluwer Academic Publishers, 19, 233–245, 1999.
Fisher, R. A.: *The Design of Experiment*, New York: Hafner, 1935.
Heaton, T. H.: Tidal triggering of earthquakes, *Geophys. J. R. Astron. Soc.*, 43, 307–326, 1975.

- Heaton, T. H.: Tidal triggering of earthquakes, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 72, 2181–2200, 1982.
- Knapp, H. J., Knapp, C., Raileanu, V., Matenco, L., Mocanu, V. and Dinu, C.: Crustal constraints on the origin of mantle seismicity in the Vrancea Zone, Romania: The case for active continental lithospheric delamination, *Tectonophysics*, 410, 311–323, 2005.
- Knopoff, L.: Earth tides as a triggering mechanism for earthquakes, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 54, 1865–1870, 1964.
- Melchior, P.: *The Tides of the Planet Earth*, Pergamon Press, New York, 1978.
- Oncescu, M. C., Marza, V. I., Rizescu, M., and Popa, M.: The Romanian Earthquake Catalogue between 984–1999, in *Vrancea Earthquakes: Tectonics, Hazard and Risk Mitigation*, edited by: Wenzel, F. and Lungu, D., and Novak, O., 43–47, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Netherlands, 1999 (Catalogue under continuous update).
- Fisher, R. A.: *The Design of Experiment*, New York: Hafner, 1935.
- Pitman, E. J. G.: Significance tests which may be applied to samples from any population, Part III: The analysis of variance test, *Biometrika*, 29, 322–335, 1938.
- 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.
- Shudde, R. H. and Barr, D. R.: An analysis of earthquake frequency data, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 67, 1379–1386, 1977.
- Schuster, A.: On lunar and solar periodicities of earthquakes, *Proc. R. Soc. Lond.*, 61, 455–465, 1897.
- Simpson, J. F.: Earth tides as a triggering mechanism for earthquakes, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 2, 473–478, 1967.
- Stavinschi, M. and Souchay, J.: Some correlations between Earthquakes and Earth Tides, *Acta Geod. Geoph. Hung.*, 38(1), 77–92, 2003.
- Stroup, D. F.: Pulse of the seafloor: Tidal triggering of microearthquakes at 9°50' N East Pacific Rise, *Geophys. Res. Lett.*, 34(15), 2007.
- 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, 2002.
- 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.
- Tolstoy, M., Vernon, F. L., Orcutt, J. A., and Wyatt, F. K.: Breathing of the seafloor: tidal correlations of seismicity at Axial volcano, *Geology*, 30, 503–506, 2002.
- 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., 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, <http://www.nat-hazards-earth-syst-sci.net/7/651/2007/>.
- van Ruymbeke, M., Howard, R., Pütz, P., Beauducel, F., Sommerhausen, A. and Barriot, J.-P.: An Introduction to the use of HICUM for signal analysis, *BIM* 138, 10 955–10 966, 2003.
- Vidale, J. E., Agnew, D. C., Johnston, M. J. S., Oppenheimer, D. H.: Absence of earthquake correlation with earth tides: an indication of high preseismic fault stress rate, *J. Geophys. Res.*, 103, 24 567–24 572, 1998.
- Zugravescu, 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, 1985.
- Zugravescu, D., Fatulescu, I., Enescu, D., Danchiv, D., and Haradja, O.: Peculiarities of the correlation between gravity and earthquakes, *Rev. Roum. Geophys.*, 33, 3–10, 1989.
- Wilcock, W. S. D.: Tidal triggering of microearthquakes on the Juan de Fuca Ridge, *Geophys. Res. Lett.*, 28, 3999–4002, 2001.

Anexa D

Articol: *Spatial and temporal variations of the correlation coefficient between M2 and S2 earth tides components and earthquake occurrences for the intermediate-depth seismic activity zones*

NICOLETA CADICHEANU, PING ZHU, MICHEL VAN RUYMBEKE

Acta Geodaetica et Geophysica Hungarica, Special issues,
Vol. 43, No. 2-3 (June), pp.131-144, 2008

SPATIAL AND TEMPORAL VARIATIONS OF THE CORRELATION COEFFICIENT BETWEEN M2 AND S2 EARTH TIDES COMPONENTS AND EARTHQUAKE OCCURRENCES FOR THE INTERMEDIATE-DEPTH SEISMIC ACTIVITY ZONES

N CADICHEANU¹, PING ZHU², M VAN RUYMBEKE²

¹Institute of Geodynamics “Sabba S. Ștefănescu” of the Romanian Academy,
Str. Jean-Louis Calderon 19–21, R-020032 Bucharest-37, Romania,
e-mail: cadichian_nicoleta@yahoo.fr

²Royal Observatory of Belgium, Avenue Circulaire 3, 1180-Brussels, Belgium,
e-mail: m.vanruymbeke@oma.be

The correlations between seismic activities and tidal periodicities are investigated at three seismic zones: Vrancea (Romania), Bucaramanga (Colombia) and Hindu Kush (Afghanistan). The epicenter of earthquake nests distribution is characterized by intermediate-depth. In this paper, we study the influences of the principal lunar and solar semidiurnal tidal components M2 and S2 on seismic activities. The tidal phase is determined by HiCum stacking method according to the earthquake occurrence time and location. The stacking function could be shifted in time and space domain which provides the possibility to evaluate the seismic activities and tidal periodicities at both. The tidal phase distribution was tested by two independent methods Schuster and Permutation. The null hypothesis between seismic activities and selected tidal periodicities is rejected when the statistical p -values obtained by the two tests reach less than 5% level. As a result of the shift stacking function in time axis, a systematic temporal pattern related to the decrease of the p -values seems to be preceding occurrence of the larger earthquakes. A “tidal tomography” map is obtained when stacking function is shifted in 3D geometry following the epicenters distribution.

Keywords: earth tide; HiCum; seismic zone; tidal tomography



Fig. 1. Geographical position of the three seismic zones: Bucaramanga (Colombia), Vrancea (Romania) and Hindu Kush (Afghanistan) (GMT site)

1. Introduction

The three well known intermediate depth nests in the world (Fig. 1) are the Bucaramanga nest (5.0°N – 9.5°N , 72.5°W – 74.5°W) in Colombia (Pulido 2003), Vrancea nest (45.0°N – 46.0°N , 26.0°E – 27.0°E) in Romania (Radu and Polonic 1982), and the Hindu Kush nest (30.0°N – 42.0°N , 68.0°E – 78.0°E) in Afghanistan (Pegler and Das 1998). The seismicities of these zones presents a real interest among scientists because of their common feature related to the nest distribution of the hypocenters (Besutiu and Cadicheanu 2003, 2006, Ismail-Zadeh et al. 2005, Zarifi and Havskov 2003, etc.). Our goal in this paper is to introduce new results of the correlation between earth tides and earthquakes at three regions.

Although the amplitude of the tidal stress change is two or three orders smaller than the stress drop of earthquakes, the tidal stress rate could be comparable to the tectonic stress rate and generally larger than this (Stavinschi and Souchay 2003) with its important variability in short time. It is reasonable to expect tidal triggering of an earthquake when the stress in the focal area is near the critical level (Tanaka et al. 2006).

At the depth of intermediate ($60\text{ km} < \text{focal depth} < 300\text{ km}$) and deep (focal depth $> 300\text{ km}$) earthquakes, the gravitational force is the main outside force which could affect the dynamic process of the inner Earth. Its systematic variations are controlled by the lunar-solar gravitational forces on each terrestrial point which could be calculated through the precisely defined periods of the earth tides that vary from few hours (e.g. diurnal and semi-diurnal waves) to years (Melchior 1978). Earth tides are deeply modulated signals and depended on the solar and lunar orbital parameters.

Corresponding to Earth's position at orbits, declination, ellipticity, and nodes phenomenon are clarified by absolute sidereal reference.

Local and regional heterogeneities lead to different responses from one zone to another in accordance with the geological and tectonic background and it could also be influenced by the regional characteristics of the mantle-crust interface with a viscous coupling mechanism (Cadicheanu et al. 2007).

In summary, the response of a seismic zone to tidal periodicities depends on its specific geological structure, tectonic history and stress accumulation mechanisms. The tidal modulation tendencies on seismic activities could help explaining some aspects of the physical mechanism of rupture forming. A remarkable number of studies have been devoted to the possibility of tidal triggering earthquakes. Most have reported negative conclusions about the correlation between the earth tide and earthquake occurrence (Schuster 1897, Knopoff 1964, Simpson 1967, Shudde and Barr 1977, Heaton 1982, Curchin and Pennington 1987, Rydelek et al. 1992, Varga 2008, etc.). However, many recent papers have indicated correlations (Enescu and Enescu 1999, Stavinschi and Souchay 2003, Stroup 2007, Tsuruoka et al. 1995, Tolstoy et al. 2002, Tanaka et al. 2002, 2006, Zugravescu et al. 1985, Wilcock 2001). Based on the recent positive studies by Tanaka et al. (2002, 2006), the role of the earth tides on triggering earthquakes was reinvestigated at Vrancea area, one of the most active seismic zone in Europe. We also found tidal triggering evidence (Cadicheanu et al. 2006, 2007),

In this paper, we statistically test the significance level of the two semidiurnal components on intermediate depth earthquakes in Vrancea, Bucaramanga and Hindu Kush nests. We applied the same Schusters statistical test which has been widely used in tidal triggering studies. An alternative approach based on the Permutation test was also introduced. Validation of the conclusions becomes more robust if both tests show similarities.

2. Data banks

We selected 2242 events from 1981 to 2005 at Vrancea seismic zone from ROMPLUS catalog provided by National Institute of Earth Physics Bucharest, 1082 events at Bucaramanga and 3377 events at Hindu Kush from International Seismological Center (ISC) catalog.

Larger aftershocks series could induce bias peaks in the tidal phase distribution. To avoid this fact, the aftershocks sequence was eliminated using the Kossobokov-Romashkova method¹. This method proposed a way to characterize aftershocks according to a systematic analysis of the earthquakes. It defined all quakes, which occurred in the following 2 days as aftershocks after an earthquake with M_w from 2.5 to 5.0, 4 days for M_w from 5.0 to 5.5, 8 days for M_w from 5.5 to 6.0, 16 days for M_w from 6.0 to 6.5, 32 days for M_w from 6.5 to 7.0 and 64 days M_w from 7.0 to 9.0.

¹Kossobokov 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.

3. Description of “HiCum” stacking method

Stacking data has been used for many decades in the meteorological fields (Bartels 1938). In fact, as early as 19th century Darwin firstly used similar method to observe the sea tide cycles. The stacking method introduced here is based on similar principle (van Ruymbeke et al. 2003, Cadicheanu et al. 2006, 2007); it extracts observed signals in different components according to predefined periodicities. Time based observation is a combination of periodical signals with eventuality nonlinear factors. Main frequencies of the contained signal could be localized by the Fourier Transform. An important hypothesis for the HiCum method consists of the period is precisely priori defined. A periodical signal could be expressed as (van Ruymbeke et al. 2007):

$$f(t) = \frac{1}{Ns} \sum_{i=1}^{Ns} \sum_{j=1}^T y(t_j) + \varepsilon \quad i = 1, T, 2T, \dots Ns \quad j = 1, 2, 3, \dots T \quad (1)$$

$$T = \frac{2\pi}{\omega}, \quad (2)$$

where $f(t)$ represents averaging stacking results, t the time, $y(t)$ the observed data, Ns the stacking times, T the period, ω : the angular speed and the uncertainties and errors. The precision of the stacking results is closely related with the data length n , the stacking period T , and the sampling interval dt . Then stacking results can be fitted by a co-sinusoidal function.

$$s(t) = A \cos(\omega t_j + \varphi), \quad (3)$$

where A is the amplitude and φ the initial phase.

4. Statistical tests

4.1 Schuster's test

Firstly, we statistically investigate the correlation between tidal components and earthquake occurrences by Schuster's test applied to the histogram resulting from the stacking.

In the Schuster's test (Heaton 1975, 1982, Tsuruoka et al. 1995, Tanaka et al. 2002, 2006), each earthquake is represented by a unit length vector in the direction defined by its tidal phase angle α_i introduced in the Eq. (3).

N is number of earthquakes and the vectorial sum $\mathbf{D}$ can be obtained from Eq. (4):

$$\mathbf{D}^2 = \left(\sum_{i=1}^N \cos \alpha_i \right)^2 + \left(\sum_{i=1}^N \sin \alpha_i \right)^2. \quad (4)$$

Here α_i is tidal phase angle of each event. When α_i distribute randomly, the probability that length of a vectorial sum is equal to or larger than $\mathbf{D}$ is

given by Eq. (5):

$$p_s = \exp\left(-\frac{\mathbf{D}^2}{N}\right). \quad (5)$$

Thus, $p_s < 5\%$ represents the significance level to reject the null hypothesis that the earthquakes occurred randomly respecting to the tidal phase. But it is suitable to strength the robustness of the conclusion by an alternative approach with another statistical test.

4.2 Permutation test

We choose the Permutation test which is well-known among biologists and geneticists, to calculate the probability p_p of the significance level to reject the null hypothesis in which the earthquakes distribution is random.

It is also called a randomization test, re-randomization test, or an exact test; it is one type of statistical significance test in which a reference distribution is obtained by calculating all possible values by rearranging the labels on the observed data points.

In other words, the method is allocated to subjects in an experimental design that is mirrored in the analysis of that design. If the labels are exchangeable under the null hypothesis, then the resulting tests yield exact significance levels. Then confidence intervals can be derived from the tests. The theory has evolved from the works of R A Fisher and E J G Pitman (Fisher 1935, Pitman 1938). The Permutation distribution is given by Eq. (6):

$$p_p = \left(\sum_{l=0}^m A_l\right) / r. \quad (6)$$

Amplitude A_0 was obtained by a co-sinusoidal function fitting the distribution of HiCum stacking results. We produce r random permutations distribution, apply the HiCum on each permutation distribution, and select only the corresponding amplitudes $A_l > A_0$ ($l = 0, 1, 2, \dots, m$, where $m \leq r$).

If $p_p < 5\%$, it represents the significance level to reject the null hypothesis that the earthquakes occurred randomly respecting to the tidal phase angle.

Both tests coefficients p_s and p_p -values are compared.

5. Time sliding windows

We study the main components of earth tides which could affect the dynamic process at intermediate-seismic depths (Table I). These components are induced by the displacement of the analysed area in the attraction of the lunar and solar gradients.

The seismic catalog is stacked with selected tidal period in twelve sectors and then the distributions are fitted by a co-sinusoidal function. For each fitted histogram, we calculate the p_s and p_p values to evaluate the probability of correlation between the earth tide component and seismic activity.

Table I. Semidiurnal principle components

Earth tide component	Doodson argument	Angular frequency °/h	Periodicity h
S2	273.555	30.000000	12.000000
M2	255.555	28.984104	12.4210601

When we stack the global file includes all the earthquakes, the p_s and p_p values are much larger than 5% at each seismic zone. This indicates that no correlations exist between the earth tide and earthquake occurrence. The correlations are detected only when the tidal phases are tested in the time sliding windows. The process is that an initial window is fixed from the first events with a constant length the window itself is moving by an equal step. In our case, we set the window length as 300 days and then it is slide by 50 days step.

The statistical validation of the windows with p_s and p_p values less than 5% was realized using random data. For each correlated window, we generate 1000 time series of random events with the amount of earthquakes as original window. The same procedure is applied for every random series, retaining the number of cases (n_{syn}) in which p_s and p_p is less than 5%. The $n_{syn}/1000$ ratio will be large if the correlation between earth tide and earthquake occurrence is not valid in this window.

5.1 Vrancea seismic zone

At the Vrancea seismic zone, the selected catalog includes earthquakes ($M_w \geq 2.5$) occurred from 1981 to 2005. The tidal phase distribution is calculated at a 300 days window since first event and then it is shifted by 50 days step. The Fig. 2 shows the Vrancea seismic zone results for the 174 analysed windows on M2 and S2 periodicities.

Among the 174 p_s and p_p values, 15 cases indicate a high correlation with M2 tidal wave and 9 cases a high correlation with S2 tidal wave.

The test with synthesized random earthquake data confirm the correlation of all sliding windows in which p_s and p_p values $< 5\%$ for M2 and S2 wave cases. The worst case indicates a sliding window in which the ratio $n_{syn}/1000$ is equal with only 6.2% for S2 wave period.

5.2 Bucaramanga seismic zone

A similar algorithm was applied for Bucaramanga seismic zone. A time window of 300 days is shifted by 50 days from 1973 to 2005. For each time window, HiCum analysis was applied. 230 windows were analysed. The Fig. 3 shows the results for the two characteristic periods of M2 and S2 waves for Bucaramanga seismic zone.

Among the 230 p -values, 12 cases indicate a good correlation (p_s and p_p values $< 5\%$) with M2 tidal wave and 11 cases a good correlation with S2 tidal wave.

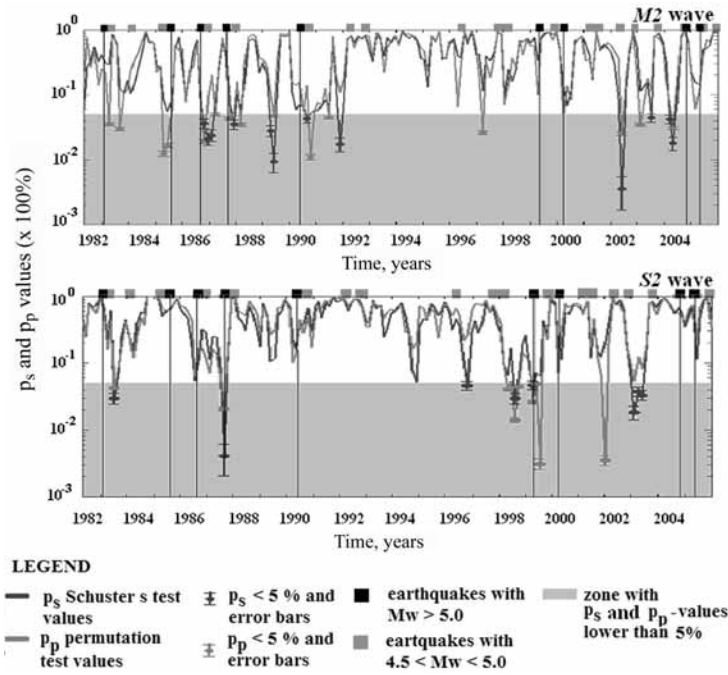


Fig. 2. Temporal variation of p_s and p_p values (Schuster's test in black color, permutation test in gray color) for the cases of M2 (above) and S2 (bottom) components for Vrancea seismic zone. A time window of 300 days is shifted by 50 days. The earthquakes with $M_w \geq 5.0$ are represented by black squares and the earthquakes with magnitude $4.5 \leq M_w < 5.0$ are represented by gray squares. Zones with p_s and p_p values $< 5\%$ are colored in gray

The test with synthesized random earthquake data confirm also the correlation of all sliding windows in which p_s and p_p values $< 5\%$ for M2 and S2 wave cases. The worst case indicates a sliding window in which the ratio $n_{syn}/1000$ is equal with only 6.3% for S2 wave period.

5.3 Hindu Kush seismic zone

Figure 4 shows the time evolution of p -values for the two characteristic periods of M2 and S2 in Hindu Kush seismic zone. A time window of 300 days is shifted by 50 days from 1973 to 2005. For each time window, HiCum analysis was applied. 230 windows were analysed also.

Among the 230 p -values, 9 cases indicate a good correlation (p_s and p_p values $< 5\%$) with M2 tidal wave and 7 cases a good correlation with S2 tidal wave.

Also the test with synthesized random earthquake data confirm the correlation of all sliding windows in which p_s and p_p values $< 5\%$ for M2 and S2 wave cases.

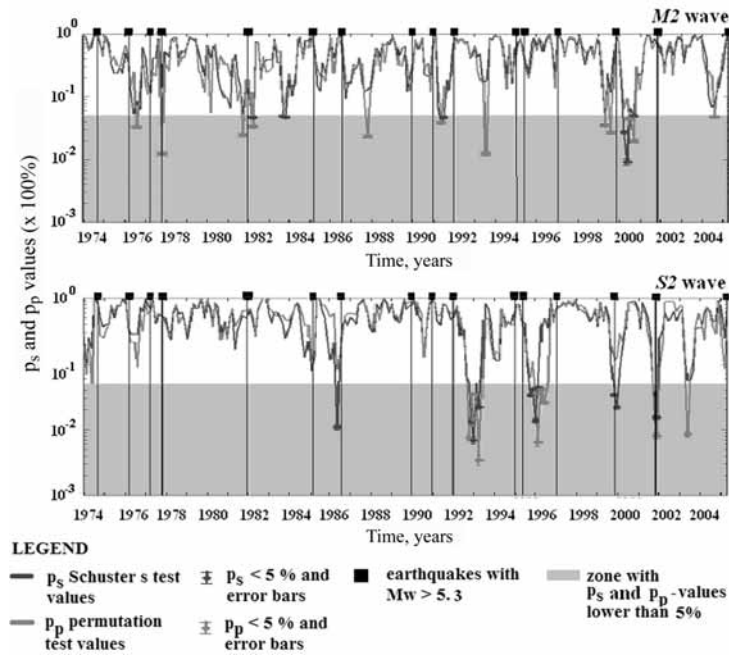


Fig. 3. Temporal variation of p_s and p_p values (Schuster's test in black color, permutation test in gray color) for the cases of M2 (above) and S2 (bottom) waves for Bucaramanga seismic zone. A time window of 300 days is shifted by 50 days. The earthquakes with $M_w \geq 5.3$ are represented in black squares. Zones with p_s and p_p values $< 5\%$ are colored in gray

5.4 Common results for the three seismic zones

The p_s and p_p values show that there are no correlations between earth tides and earthquake occurrences when we test the global data set at three seismic zones.

However, when the earthquake occurrences are tested in sliding windows, correlations is founded at three zones and a p_s and p_p values decrease pattern before large earthquakes could be observed in the sliding windows which confirm similar results reported by Tanaka's study at Tokai region (Tanaka 2006).

For S2 wave we observe a relatively large interval in which only a few windows of correlation or even no correlations (e.g., Vrancea between 1987 and 1997; Bucaramanga between 1974 and 1993 (excepting for 1986); Hindu Kush between 1975 and 1991 (excepting for 1988)).

The comparison of M2 and S2 statistical test value p_s and p_p distributions (Figs 2, 3 and 4) show some common and different patterns. We compare the p_s and p_p evolution in space to investigate possible relation between earth tide and geometrical characteristics.

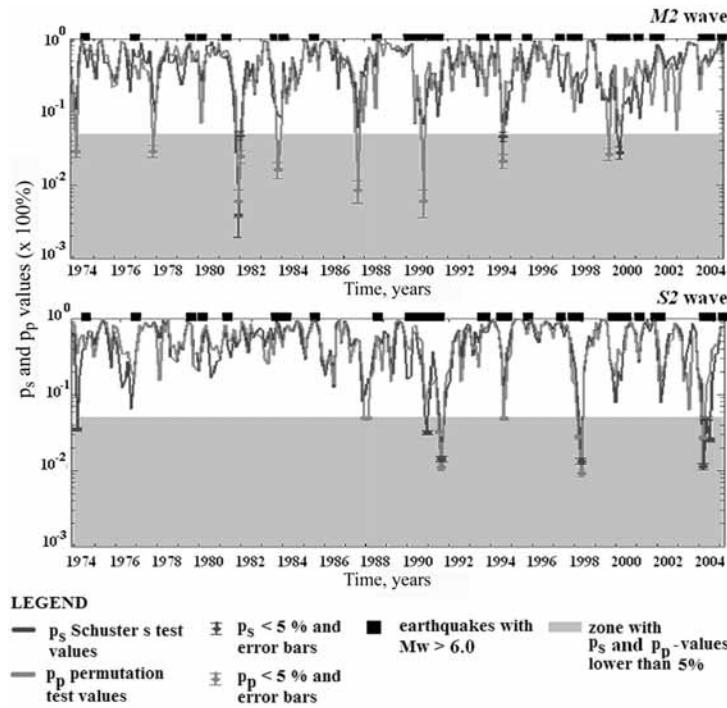


Fig. 4. Temporal variation of p_s and p_p values (Schuster's test in black color, permutation test in gray color) for the cases of M2 (above) and S2 (bottom) waves for Hindu Kush seismic zone. A time window of 300 days is shifted by 50 days. The earthquakes with $M_w \geq 6.0$ are represented in black squares. Zones with p_s and p_p values $< 5\%$ are colored in gray

6. Spatial 3D-sliding windows

The idea of evaluating spatial distribution of p_s and p_p is origin from the seismic tomography; here the differences are that the p_s and p_p is set up as the factor to construct the 3D map which reveals the possible to detect local geometric reactions to tidal effects at spatial domain.

For this purpose, we calculate the correlation coefficient for a series of events included in a space sliding volumes defined by its surface and height. Each layer is equal in volume with same thick and height. For every cells in which the p_s and p_p values are less than 5% we valid like before by the help of 1000 random synthetic time series of events.

6.1 Vrancea seismic zone

The spatial moving window is a volume element with a square surface of 11 km $\times$ 11 km and height of 20 km. The HiCum is applied in every cell if the number of seismic events is greater or equal than 20. The cells are shifted by 4 km both in the north-south and east-west directions between 45°N–46°N latitude and 26°E–27°E longitude and also downwards with 10 km between 60 km and 220 km depth.

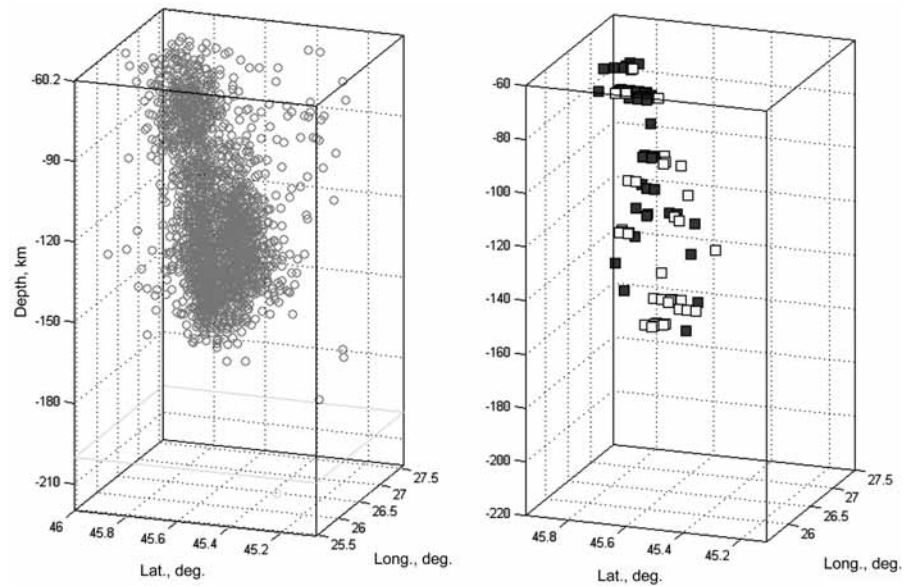


Fig. 5. Vrancea seismic zone (left). Distribution of intermediate-depth seismicity (gray circles). Distribution of the correlation cells (p_s and p_p values $< 5\%$) for M2 lunar wave (black cells) and S2 solar wave (white cells) (right)

It appears clearly a surprising result that the reaction of different layer to earth tide effect is varying. Significant number of cells with p_s and p_p values $< 5\%$ are mainly situated from 60 km and 90 km in the case of M2 lunar wave and from 140–180 km for S2 solar wave (Fig. 5).

The cell correlated with M2 lunar wave characterizes the upper part of the Vrancea slab between 70 km and 90 km depth. The lower part of the seismic zone is correlated with S2 solar wave from 140 km to 160 km depth which gives the similar pattern with classical seismic tomography (Radulian et al. 2008) (Fig. 5).

6.2 Sliding space windows for Bucaramanga seismic zone

The spatial moving window was defined like a volume element with a square surface of $11 \text{ km} \times 11 \text{ km}$ and the height of 20 km. The HiCum is applied in every cell if the number of seismic events is greater or equal 20.

The cells are shifted by 4 km both in the east-west and north-south directions, between 72°W – 74.5°W longitude and 5.0°N – 9.5°N latitude and also downwards with 10 km between 60 km and 265 km depth (Fig. 6).

All cells with p_s and p_p values $< 5\%$ between 160 km and 180 km for case of M2 wave and between 170 and 190 km for S2 solar wave (Fig. 6).

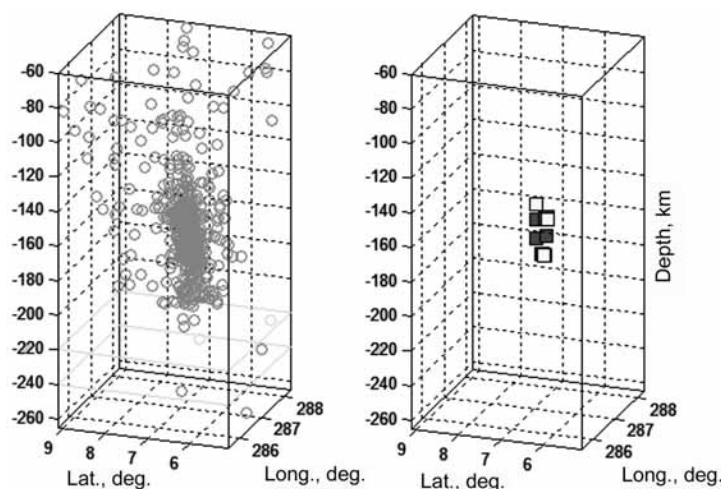


Fig. 6. Bucaramanga seismic zone. Distribution of intermediate-depth seismicity (gray circles) — left part of the figure. Distribution of the correlation cells (p_s and p_p values $< 5\%$) for M2 lunar wave (black cells) and S2 lunar wave (white cells) — right part of the figure

6.3 Hindu Kush seismic zone

With the same procedure we investigate the spatial distribution of p_s and p_p values smaller than 5% characterizing the correlation between M2 lunar wave, respectively S2 solar wave and earthquake occurrence for Hindu Kush seismic zone. The spatial moving window is a volume element with a square surface of $30 \text{ km} \times 30 \text{ km}$. Its height is of 30 km. The HiCum is applied in every cell if the number of seismic events is greater or equal like 20.

The cells are shifted by 10 km both in the north-south and east-west directions between 30°N – 42°N latitude and 68°E – 78°E longitude and also downwards with 10 km between 60 km and 370 km depth (Fig. 7).

The correlation between the both M2 and S2 tidal waves is confirmed with the help of 1000 random synthetic time series events for the space sliding windows from 100 to 130 km and 210–240 km in depth.

7. “Tidal tomography” — a new concept

Seismic tomography is mainly built up with the inversion of seismic rays travel in the earth. It is the most efficient way to obtain geophysical information about the interior of the Earth. Earthquakes only can provide a sufficient quantity of energy to the generated waves to arrive from a deep and very deep source to the surface without be completely attenuated (Popa et al. 2005, Ivan 2006).

Tidal tomography is constructed by the correlation parameter of earth tide and earthquake occurrence which allows studying the tidal effect in a locked zone both in time and space, inversely; it also could help understanding the structure of the hypocenters.

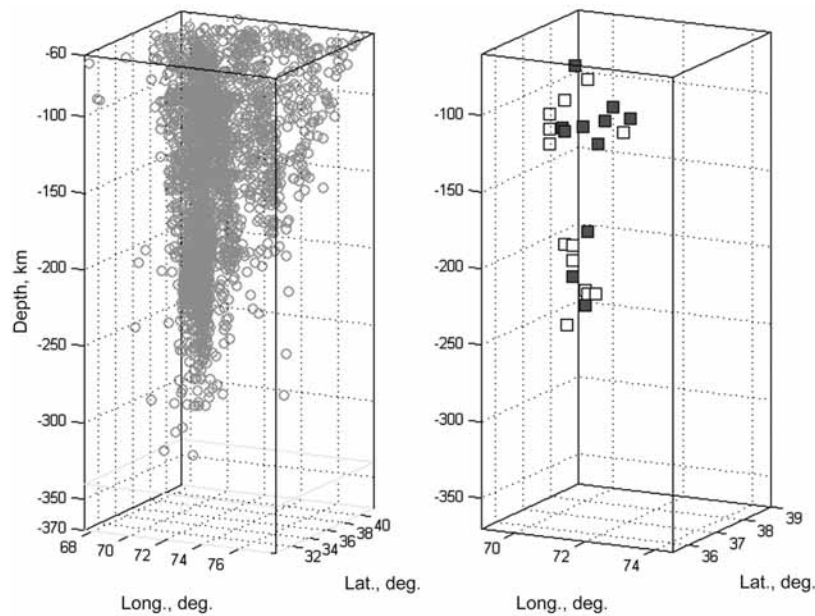


Fig. 7. Hindu Kush seismic zone. Distribution of intermediate-depth seismicity (gray circles) — left part of the figure. Distribution of the correlation cells (p_s and p_p values $< 5\%$) for M2 wave (black cells) and S2 wave (white cells) — right part of the figure

Our results presented in Section 6 shows that the correlations between two components of earth tides and earthquake occurrences could obtain additional information about the seismic zones. For the analysed zone, a 3D-view integrates the evolution of the p_s and p_p values at each scanned layer in time and space. The tidal tomography will be further more compared and analyzed with the seismic tomography results.

8. Conclusions

1. We applied the HiCum stacking method on the earthquake catalog of the Vrancea, Bucaramanga and Hindu Kush. The modulation tendencies of the seismic activity produced by the two principal earth tide periodicities, S2 and M2, are founded at each zone.
2. The results of the Schuster's test (p_s) and Permutation test (p_p), validated systematically by with synthesized random earthquake data. It confirms a significant correlation between M2, respectively S2 semidiurnal waves, and intermediate-depth seismic activity for some temporal windows, as a rule in the vicinity of strong events.
3. The p_s and p_p values decrease in the vicinity of a large earthquake, after it goes up then decreases before another large event happens. Similar phenomena were also reported in the study of the Tokai region earthquakes (Tanaka et al. 2006). This pattern could be considered as possible precursor. The physical

consequences are the tidal effect, which could constrain the research on the seismic source characteristics and their dynamical patterns.

4. We introduce tidal tomography maps of three intermediate-depth seismic zones. The patterns of the tidal tomography partly represent reaction of regional tectonic structure to the earth tide. Especially at Vrancea, the tidal tomography of M2 and S2 waves gives the similar pattern with classical seismic tomography (Radulian et al. 2008). This fact confirms the potentiality of our method to complete other geophysical techniques in the rheological pattern determination.

Acknowledgements

We thank M Radulian and M Popa, the National Institute for Earth Physics for providing the ROMPLUS catalogue. We would like to thank to the bilateral co-operation between Royal Observatory of Belgium and the Institute of Geodynamics of the Romanian Academy for allowing us to optimize the conditions in which we could finalize our work. Partial support for this research came from Romanian Ministry of Education and Research, National Authority for Scientific Research (National Excellence Research Program, Project CEEEX 726/2006).

References

- Bartels J 1938: *Terr. Magn. Atmos. Electricity*, 40, 1, 1–60.
- Besutiu L, Cadicheanu N 2003: In: Abstracts Book. D Ioane ed., The Fourth Stephan Muller Conference of the European Geosciences Union, Geodynamic and Tectonic Evolution of the Carpathian Arc and Its Foreland: Environmental Tectonics and Continental Topography, Retezat Mts – Southern Carpathians, Romania
- Besutiu L, Cadicheanu N 2006: In: Monograph compiled in the frame of the Project CERGOP-2/Environment, Reports on Geodesy, No. 6 (81).
- Cadicheanu N, van Ruymbeke M, Zugravescu D, Everaerts M, Howard R 2006: *Rev. Roum. Geophysique*, 50, 31–57.
- Cadicheanu N, van Ruymbeke M, Zhu P 2007: *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 7, 733–740.
- Curchin J M, Pennington W D 1987: *J. Geophys. Res.*, 92, 13 957–13 967.
- Enescu D, Enescu B D 1999: *Natural Hazards*, 19, 233–245.
- Fisher R A 1935: *The Design of Experiment*. Hafner, New York
- Heaton T H 1975: *Geophys. J. R. Astron. Soc.*, 43, 307–326.
- Heaton T H 1982: *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 72, 2181–2200.
- Ismail-Zadeh A T, Mueller B, Schubert G 2005: *Phys. Earth Planet. Int.*, 149, 81–98.
- Ivan M 2006: *J. Seismology*, <http://dx.doi.org/10.1007/s10950-006-9038-7>.
- Knopoff L 1964: *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 54, 1865–1870.
- Melchior P 1978: *The Tides of the Planet Earth*, Pergamon Press, New York
- Oncescu M C, Marza V I, Rizescu M, Popa M 1999: In: *Tectonics, Hazard and Risk Mitigation*, F Wenzel, D Lungu, O Novak eds, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Netherlands, (Catalogue under continuous update), 43–47.
- Pegler G, Das S 1998: *Geophys. J. Int.*, 134 (2), 573–595.
- Pitman E J G 1938: *Biometrika*, 29, 322–335.

- Popa M, Radulian M, Grecu B, Popescu E, Placinta A O 2005: *Tectonophysics*, 410, 235–249.
- Pulido N 2003: In: Bulletin of the International Institute of Seismology and Earthquake Engineering, Special Edition, 69–76.
- Radu C, Polonic G 1982: The earthquake of March 4, 1977 (in Romania). Ed. Acad., 75–136.
- Radulian M, Popa M, Cărbunar O, Rogozea M 2008: *Acta Geod. Geoph. Hung.* (present issue)
- Rydelek P A, Sacks I S, Scarpa R 1992: *Geophys. J. Int.*, 109, 125–137.
- Schuster A 1897: *Proc. R. Soc. Lond.*, 61, 455–465.
- Shudde R H, Barr D R 1977: *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 67, 1379–1386.
- Simpson J F 1967: *Earth Planet. Sci. Lett.*, 2, 473–478.
- Stavinschi M, Souchay J 2003: *Acta Geod. Geoph. Hung.*, 38, 77–92.
- Stroup D F 2007: *Geophys. Res. Lett.*, 34(15).
- Tanaka S, Ohtake M, Sato H 2002: *J. Geophys. Res.*, 107(5B10), 2211, doi: 10.1029/2001JB001577
- Tanaka S, Sato H, Matsumura S, Ohtake M 2006: *Tectonophysics*, 417, 69–80.
- Tolstoy M, Vernon F L, Orcutt J A, Wyatt F K 2002: *Geology*, 30, 503–506.
- Tsuruoka H, Ohtake M, Sato H 1995: *Geophys. J. Int.*, 122, 183–194.
- van Ruymbeke M, Howard R, Putz P, Beauducel F, Somerhausen A, Barriot J-P 2003: *BIM*, 138, 10 955–10 966.
- van Ruymbeke M, Zhu P, Cadicheanu N, Naslin S 2007: *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 7, 651–656.
- Varga P 2008: *Acta Geod. Geoph. Hung.* (present issue)
- Wilcock W S D 2001: *Geophys. Res. Lett.*, 28, 3999–4002.
- Zarifi Z, Havskov J 2003: *Adv. Geophys.*, 46, 237–278.
- Zugravescu D, Enescu D, Delion D, Fatulescu I, Dorobantu R 1985: *Rev. Roum. Geophys.*, 29, 1–34.

B

REFERINȚE BIBLIOGRAFICE

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

ADUSHKIN, V.V. and SPIVAK, A.A., Microseismicity and intensity of relaxation processes in the earth's crust, *Doklady Earth Sciences, Volume 408, Number 4, May, p.671-673, 2006.*

ATANASIU, I., Cutremurele de pământ din România, *Ed. Acad. Rep. Pop. Rom., 1961.*

APOSTOL, B.-F., Statistical distributions of earthquakes and related non-linear features in seismic waves, *Romanian Reports in Physics, Vol. 58, No. 2, P. 195–210, 2006*

AKI, K., A probabilistic synthesis of precursor phenomena, *Earthquake Prediction—An international review* (edited by Simpson and Richard), Washington D C: AGU, 566-574, 1981.

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

BARTELS, J.: Random Fluctuations, Persistence and Quasipersistence in Geophysical and Cosmical Periodicities, *Terr. Magn. Atmos. Electricity*, 40, 1, 1–60, 1938.

BÅTH, M., *Introduction to Seismology*, Birkhäuser Verlag, 370 p, 1973.

BAZACLIU, O., RADULIAN, M.: Seismicity Variations in Depth and Time in the Vrancea (Romania) Subcrustal Region. *Natural Hazards* 19, 165-177, 1999.

BĂLAN, ȘT., CRISTESCU, V., CORNEA, I., (coordonatori), *Cutremurul de pământ din România de la 4 martie 1977*, 515 p., Ed. Academiei Române, 1982.

BALA A., RADULIAN M., POPESCU E., Earthquakes distribution and their focal mechanism in correlation with the active tectonic zones of Romania, *Journal of Geodynamics* 36, 129–145, 2003.

BENDAT, J. and A. PERSOL, *Random Data: Analysis and Measurement Procedures*. Wiley-Interscience, 1986.

- BERNARD, P., Earthquake precursors and crustal transients, in Nature Debates, <http://helix.nature.com/debates/25> February 1999
- BERNARD, P., PINETTES, P., HATZIDIMITRIOU, P.M., SCORDILIS, E.M., VEIS, G., MILAS, P., From precursors to prediction: A few recent cases from Greece. *Geophys. J. Int.* 131, 467 – 477, 1997.
- BERNARD, P., From the search of ‘precursors’ to the research on ‘crustal transients’, *Tectonophysics*, **338**, 225–232, 2001.
- BEȘUȚIU, L., Vrancea active seismic area. Evidence towards a continental unstable triple junction. 3rd Balkan Geophysical Congress and Exhibition, 24-29 June 2002, Sofia.
- BEȘUȚIU L., CADICHEANU NICOLETA, Comparative analysis on the space-time dynamics of the Vrancea (Romania) intermediate-depth seismicity and seismicity within Bucaramanga (Columbia) and Hyndu Kush (Afganistan). Abstracts Book, pp.34-37, Editor Dumitru Ioane, The Fourth Stephan Muller Conference of the European Geosciences Union, Geodynamic and tectonic evolution of the carpathian arc and its foreland: environmental tectonics and continental topography, Retezat Mts – Southern Carpathians, Romania, May 31-June 05, 2003.
- BESUTIU, L. and ZUGRAVESCU, D., Geophysical considerations on Black Sea opening and its seismo-tectonic consequences, *Rev. Roum. Géophysique*, 48, p. 3-13, 2004.
- BESUTIU, 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.
- BLOOMFIELD, P., *Fourier Analysis of Time Series: an Introduction*. Wiley, New York, 1976.
- BOBRINSKY, V.M., MAKARESCU, V.S., POLIATA, I.A., Gheodinamiceskaia priroda promejutocinih seismiceskih ociagov zonî Vrancea – Vostocinîh Karpatî. *Gheotektonika*, 2, 63-79, 1990.
- BOUROUIS, SEID; BERNARD, PASCAL, Evidence for coupled seismic and aseismic fault slip during water injection in the geothermal site of Soultz (France), and implications for seismogenic transients, *Geophysical Journal International*, Volume 169, Number 2, pp. 723-732(10) , May 2007.
- BRODSKY, E. E., E. ROELOFFS, D.WOODCOCK, I. GALL, and M. MANGA, A mechanism for sustained groundwater pressure changes induced by distant earthquakes, *J. Geophys. Res.*, 108(B8), 2390, doi:10.1029/ 2002JB002321, 2003.
- CADICHEANU NICOLETA, DOREL ZUGRĂVESCU -The possible triggering function of the gravity tides in the Vrancea seismic zone, The XVII-th Symposium of Earth's Physics and Applied Geophysics, Bucharest: Romanian Academy and Romanian Society of Geophysics, November 24-26, 1994
- CADICHEANU, N., VAN RUYMBEKE, M., EVERAERTS, M. and HOWARD, R., Tidal and Non-Tidal Influences on Seismic Activity in Romania, *Bulletin de l'Institut de Geodynamique de l'Academie Roumaine* Vol.16, fasc.4, 2005

CADICHEANU, N., VAN RUYMBEKE, M., ZUGRAVESCU, 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., ANDRIESSEN, 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.

COCHRAN, E.S., VIDALE, J.E., TANAKA SACHIKO, Earth Tides can trigger shallow thrust fault earthquakes. *Science*, vol.306, pp 1164–1166, 2004.

CONSTANTINESCU, L., CONSTANTINESCU, P., CORNEA, I., LĂZĂRESCU, V., Recent seismic information on the lithosphere in Romania. *Rev.roum.géol., géophys., géogr.*, ser. *Géophys.*, 20, 33–40, 1976.

CONSTANTINESCU, L., ENESCU, D., A tentative approach to possibly explaining the occurrence of Vrancea earthquakes. *Rev.Roum. Geol., Geophys, Geogr., Geophys.* 28, 1984.

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

CORNEA, I., RADU, C., (editori), *Cercetări seismologice asupra cutremurului din 4 martie 1977*, CSEN, ICEFIY, CFPS, București, VIII-774p., 1978

CORNEA, I., ONCESCU, M., MĂRMUREANU, GH., BĂLAN, F., *Introducere în mecanica fenomenelor seismice și inginerie seismică*, Editura Academiei Române, 1987.

CSONTOS, L., Tertiary tectonic evolution of the Intra-Carpathian area: a review. *Acta Vulcanol.* 7, 1 – 13, 1995.

CURCHIN, J. M. and PENNINGTON, W. D.: Tidal triggering of intermediate and deep focus earthquakes, *J. Geophys. Res.* 92, 13 957– 13 967, 1987.

DAVISON, A. C., HINKLEY, D. V. and WORTON, B. J.. Bootstrap likelihoods. *Biometrika* 79 113–130, 1992.

DE BECKER M., DUCARME B., MELCHIOR P., POITEVIN C., VAN RUYMBEKE M., Correlation between earth tide anomalies and tectonic features through heat flow. *Int. Meeting*

on Geothermic and Geothermal Energy. Guarujá-SP, Brasil. August 10-14, 1986 Rev. Brasileira de Geofísica, 5, 197-203, 1987.

DEBORAH L. KANE, DEBI KILB, ARTHUR S. BERG, and VLADISLAV G. MARTYNOV, Quantifying the remote triggering capabilities of large earthquakes using data from the ANZA Seismic Network catalog (southern California), Journal of Geophysical Research, VOL. 112, B11302, doi:10.1029/2006JB004714, 2007

DE FREITAS S.R.C., VAN RUYMBEKE M., DUCARME B., Software to model the tidal triggering for volcanic and seismic activities. Proc. of the Workshop Geodynamical Instrumentation Applied to Volcanic Areas, Walferdange, oct.1-3, 1990. Cahiers du Centre Européen de Géodynamique et de Séismologie, vol 4, pp 353-361, 1991.

DE FREITAS S.R.C., VAN RUYMBEKE M., DUCARME B., ASSUMPCAO M., Correlation between earth gravity tides and seismic activity at João Câmara, Brazil. Proc. Workshop on Geodynamical Instrumentation Applied to Volcanic Areas, Walferdange, oct.1-3, 1990. Cahiers du Centre Européen de Géodynamique et de Séismologie, vol 4, pp 363-378, 1991.

DELCOURT-HONOREZ M., DUCARME B., VAN RUYMBEKE M., Earth Tides as Related to Groundwater and Barometric Pressure. Proc. of the XIIth Int. Symp. on Earth Tides, Beijing, August 4-7, 1993. Science Press Beijing, New York., pp 169-180, 1993.

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

DIACONESCU, C., KNAPP, J., KELLER, G., STEPHENSON, V., MOCANU, V., RAILEANU, V., MAȚENCO, L., PROEDEHL, C., HAUSER, F., DINU, C., WENZEL, F., HARDER, S., Intermediate depth seismicity in the Vrancea Zone of Romania: a geodynamic paradox, Eos, Trans.-Am. Geophys. Union 82 (2001) F912.

DICICCIO, THOMAS J. and EFRON BRADLEY, Bootstrap Confidence Intervals, Statistical Science, Vol. 11, No. 3, 189, 228, 1996.

DIETERICH, J.H., Nucleation and triggering of earthquake slip: effect of periodic stresses. Tectonophysics 144 (1–3), 127– 139, 1986.

DING, Z., J. JIA, and R. WANG, Seismic triggering effect of tidal stress. Tectonophysics, **93**, 319-335, 1983.

DOODSON, A.T., The Harmonic Development of the Tide-generating Potential. Proc. Roy. Soc. A 100, pp. 305-329, 1921.

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

EMTER, D., Tidal triggering of earthquakes and volcanic events. In Tidal Phenomena, Lect. Notes Earth Sci., vol.66, edited by H. Wilhelm, W. Zürn, and H.-G. Wenzel, (Springer-Verlag, New York, 1997), pp. 293-309.

ENESCU, D., , Phase change – a possible process involved in preparing the occurrence of Vrancea earthquakes, Rev. Roum. Géol., Géophys., Géogr. Ser. Géophys. 29, 15-21, 1985.

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

ENESCU, D., ENESCU, D.B., Focal mechanism, global geophysical phenomena and Vrancea (Romania) earthquake prediction. A model for predicting these earthquakes, *Revue Roumaine de Geophysique*, Tome 40, p 11-31, 1996.

ENESCU, D. and ENESCU, B. D.: Possible cause – effect relationships between Vrancea (Romania) earthquakes and some global geophysical phenomena, *Natural Hazards*, Kluwer Academic Publishers, 19, 233–245, 1999.

ENESCU, D., Contributions to the understanding of the directivity of Vrancea earthquake foci. Considerations on some results of seismic tomography performed in Romania, *Rom. J. Physics* 48, 953-969, 2003.

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.

FUCHS, K., BONJER, K.-P., BOCK, G., CORNEA, I., RADU, C., ENESCU, D., JIANU, D., NOURESCU, A., MERKLER, G., MOLDOVEANU, T. and TUDORACHE, G., The Romanian earthquake of March 4, 1977, II, Aftershocks and migration of seismic activity, *Tectonophysics* 53, 225-247, 1979.

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.

GOMBERG, J., and P. JOHNSON, Dynamic triggering of earthquakes, *Nature*, 437, 830, doi:10.1038/437830a., 2005.

GVIRTZMAN, Z., Partial detachment of a lithospheric root under the southeast Carpathians: toward a better definition of the detachment concept. *Geology*, 30, 51–54, 2002.

GUTENBERG, B., RICHTER, C.F., *Seismicity of the Earth*, 2nd ed. Princeton Univ. Press, Princeton, N.J. 1954.

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.

HAMILTON, W. L., Tidal cycles of volcanic eruptions: fortnightly to 19 yearly periods, *J. geophys. Res.*, 78, 3363-3375, 1973.

HARRIS, F., On the use of windows for harmonic analysis with the discrete Fourier transform, *Proceedings of the IEEE*, 66, 51-83, 1978.

HARRIS, R., A. Introduction to special section: Stress triggers, stress shadows, and implications for seismic hazard, *J. Geophys. Res.*, 103, 24,347–24,358, 1998.

HARTZELL, S., HEATON, T., The fortnightly tide and the tidal triggering of earthquakes. *Bull. Seismol. Soc. Am.* 79, 1282-1286, 1989.

- HAUSER, F., RAILEANU, V., FIELITZ, W., BALA, A., PRODEHL, C., POLONIC, G., SCHULZE, A., VRANCEA99—the crustal structure beneath the southeastern Carpathians and Moesian Platform from a seismic refraction profile in Romania. *Tectonophysics* 340, 233–256, 2001.
- HEATON, T. H.: Tidal triggering of earthquakes, *Geophys. J. R. Astron. Soc.*, 43, 307–326, 1975.
- HEATON, T. H., Tidal triggering of earthquakes. *Bull. Seism. Soc. Am.*, **72**, 2181-2200, 1982.
- HILL, D. P., F. POLLITZ, and C. NEWHALL, Earthquake-volcano interactions, *Phys. Today*, 55, 41–47, 2002.
- IMOTO M. and HURUKAWA, N., Assessing potential seismic activity in Vrancea, Romania, using a stress-release model, *earth Planet Space*, 58, 1511-1514, 2006.
- ISMAIL-ZADEH, A.T., V.I. KEILIS-BOROK, A.A. SOLOVIEV, Numerical modelling of earthquake flow in the southeastern Carpathians Vrancea : effect of a sinking slab, *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 111, pp. 267–274, 1999.
- ISMAIL-ZADEH, A., MULLER, B. and WENZEL, F., 2003, Modelling of descending slab evolution beneath the SE-Carpathians: implications for seismicity, Seventh Workshop “Non-Linear Dynamics and Earthquake Prediction” 29 September to 12 October 2003.
- 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.
- KE, S. M., Research on percolation model and criticality of seismicity, *Acta Seismologica Sinica*, 21 (4), 379-386, 1999.
- KHAIN, V. E., and LOBKOVSKY, L. I., Conditions of Existence of the Residual Mantle Seismicity of the Alpine Belt in Eurasia, *Geotectonics* 3, 12-20, 1994.
- KILB, D., J. GOMBERG, and P. BODIN, Earthquake triggering by dynamic stresses, *Nature*, 408, 570–574, 2000.
- KILSTON, S. and KNOPOFF, L., Lunar-solar periodicities of large earthquakes in southern California, *Nature* 304, 21-25, 1983.
- KLEIN, F. W., Earthquake swarms and the semidiurnal solid earth tide. *Geophys. J. R. Astr. Soc.*, **45**, 245-295, 1976.

- KNAPP, J. H., KNAPP, C., RAILEANU, V., MATENCO, L., MOCANU, V., DINU, C., Crustal constraints on the origin of mantle seismicity in the Vrancea Zone, Romania: The case for active continental lithospheric delamination, *Tectonophysics* 410, 311–323, 2005.
- 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.
- KÜMPEL, HANS-J, Evidence for Self-Similarities in the Harmonic Development of Earth Tides, in *Fractals and Dynamic Systems in Geoscience*, Jörn H.Kruhl Editor, Springer-Verlag, pp.213-220, 1994.
- LAMMLEIN, D. R., G. V. LATHAM, J. DORMAN, Y. NAKAMURA, and M. EWING, Lunar seismicity, structure and tectonics. *Rev. Geophys.*, 12, 1-21, 1974.
- 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.
- LI, Q. and G. M. XU, Evolution of chaotic multifractal characteristics for water level and its application in earthquake prediction, *Earthquake*, 19 (3), 274-280, 1999.
- LIN C. H., YEH Y. H., CHEN Y. I., LIU J. Y. and CHEN K. J., Earthquake Clustering Relative to Lunar Phases in Taiwan, *TAO*, Vol. 14, No. 3, 1-10, September 2003
- LIN, C. H., Y. H. YEH, and Y. B. TSAI, Determination of regional principal stress directions in Taiwan from fault plane solutions. *Bull Inst. Earth Sci.*, 5, 105-107, 1985.
- LINDE, A. T., and I. S. SACKS Triggering of volcanic eruptions, *Nature*, 395, 888– 890, 1998.
- LINZER, H.-G., Kinematics of retreating subduction along the Carpathian arc. *Geologz*, 24, 167-170, 1996.
- LINZER, H.-G., FRISCH, W., ZWEIGEL, P., GÎRBACEA, R., HANN, H.-P., MOSER, F., Kinematic evolution of the Romanian Carpathians. *Tectonophysics* 297, 133– 156, 1998.
- LOCKNER, D.A., N.M., BEELER, Premonitory slip and tidal triggering of earthquakes, *JGR*, 104, 20, 133-20, 151, 1999.
- LOMB, N., Least-squares frequency analysis of unequally spaced data. *Astrophysics and Space Science*, 39, 447-462, 1976.
- LONGMAN, I.M., Formulas for computing the tidal accelerations due to the moon and sun, *J. geophys. Res.*, 64, 2351, 1959.
- MAIN, I., Earthquakes: A hand on the aftershock trigger, *Nature*, 441, 704–705, 2006.
- MANDRESCU, N., RADULIAN, M., Macroseismic field of the Romanian intermediate-depth earthquakes. In: Wenzel, F., Lungu, D., Novak, O. (Eds.), *Vrancea Earthquakes: Tectonics, Hazard and Risk Mitigation*. Kluwer Academic Publishers, pp. 163–174, 1999.

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.

MARTIN S. and RIETBROCK A., Guided waves at subduction zones: dependencies on slab geometry, receiver locations and earthquake sources, *Geophys. J. Int.*, **167**, 693–704, 2006b

MARINE, I.W., Water level fluctuations due to earth tides in a well pumping from slightly fractured crystalline rock, *Water Resour. Res.*, **11**, 165-173, 1975.

MCKENZIE, D. P. (1970), Plate Tectonics of the Mediterranean Region, *Nature* **226**, 239-243.

MCKENZIE, D. P. (1972), Active Tectonics of the Mediterranean Region, *Geophys. J. R. Astron. Soc.* **30**, 109-185.

MCNUTT, S. R., and R. J. BEAVAN, Volcanic earthquakes at Pavlof Volcano correlated with the solid earth tide. *Nature*, **294**, 615-618, 1981.

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.

MOLNAR, P. AND OLIVER, J., Lateral variations of attenuation in the upper mantle and discontinuities in the lithosphere, *J. geophys. Res.*, **74**, 2648-2682, 1969.

MORGAN, W.J., J.O. STONER, and R.H. DICKE, Periodicity of earthquakes and the invariance of the gravitational constant, *J. Geophys. Res.*, **66**, 3831-3843, 1961.

NAGASAWA, K., The Correlation between the Earthquake Occurrence and Positions of Moon and Sun, *Journal of the Geodetic Society of Japan*, vol.19, no.4, pp. 179-189, 1973.

NECOVETICS, O., Periodicity of the release of seismic energy and the anomalistic great cycle of the moon, *Acta Geodaet., Geophys. Et Montanist. Hung.*, volume 19 (3-4), pp. 249-266, 1984.

NEMCOK, M., POSPISIL, L., LEXA, J., DONELICK, R.A., Tertiary subduction and slab break-off model of the Carpathian– Pannonian region. *Tectonophysics* **295**, 307–340, 1998.

NIKOLAYEV, V.A., Relation de la seismicite avec les phases des ondes de maree individuelles, *B.I.M.*, **126**, pp.9638-9642, 1997.

NIKOLAYEV, V.A., Implication des phases de marees terrestres pour les seismes forts, *B.I.M.*, **126**, pp.9643-9653, 1997.

- OIKE, K., and K. TANIGUCHI, The relation between seismic activities and Earth tides in the case of the Matsushiro earthquake swarm, *Bull. Disaster Prev. Res. Inst. Univ. Kyoto*, 38, 17–28, 1988.
- 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.
- ONCESCU, M. C., BURLACU, V., ANGHEL, M., and SMALBERGHER, V. (1984), Three-dimensional P-wave Velocity Image under the Carpathian Arc, *Tectonophysics* 106, 305–319.
- ONCESCU, M.C., BONJER, K.-P., RIZESCU, M., Weak and strong ground motion of intermediate depth earthquakes from the Vrancea region. In: Wenzel, F., Lungu, D., Novak, O. (Eds.), *Vrancea Earthquakes: Tectonics, Hazard and Risk Mitigation*. Kluwer Academic Publishing, Dordrecht, Netherlands, pp. 27–42, 1998.
- ONCESCU, M. C., MARZA, V. I., RIZESCU, M., and POPA, M.: The Romanian Earthquake Catalogue between 984–1999, in *Vrancea Earthquakes: Tectonics, Hazard and Risk Mitigation*, edited by: Wenzel, F. and Lungu, D., and Novak, O., 43–47, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Netherlands, 1999 (Catalogue under continuous update).
- PALUMBO, A., Lunar and solar tidal components in the occurrence of earthquakes in Italy. *Geophys. J. R. Astr. Soc.*, **84**, 93–99, 1986.
- PĂTRAȘCU, ȘT., *Magnetism terestru și gravimetrie. Partea a II-a. Gravimetrie Aspecte generale*. Litografia Universității din București, 1981.
- PEGLER, G., DAS, S., An enhanced image of the Pamir-Hindu Kush seismic zone from relocated earthquake hypocentres, *Geophysical Journal International* 134 (2), 573–595, 1998.
- PITMAN, E. J. G.: Significance tests which may be applied to samples from any population, Part III: The analysis of variance test, *Biometrika*, 29, 322–335, 1938.
- 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.
- RASSON, J. and VAN RUYMBEKE, M., Underground meteorology at the underground Laboratory of Geodynamics at Walverden, in: VIIIth Symp. on Earth Tides, Bonn, 1977.
- REES, D.G., Foundations of statistics, Chapman and Hall Ltd., London, 1987.
- RIZNICHENKO, Yu. V., DRUMYA, A. V., STEPANENKO, N. YA., and SIMONOVA, N. A., Seismicity and seismic risk of the Carpathian region. In The 1977 Carpathian Earthquake and its Impact (ed. Drumya, A. V.) (Nauka, Moscow 1980) pp. 46-85, 1980.
- ROGOZEA, M., ENESCU, B., BAZACLIU, O., POPA, M., RADULIAN, M., Seismicity characteristics in the particular case of Vrancea (Romania) intermediate-depth earthquakes, International Symposium on Strong Vrancea Earthquakes and Risk Mitigation Oct. 4-6, Bucharest, Romania., 2007.
- ROMAN, C., Seismicity in Romania – Evidence for the sinking lithosphere. Nature, 228, 1176-1178, 1970.
- RUDDIMAN, W.F., Tectonic Uplift and Climate Change, Springer, p.558, 1997.
- 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., P. M. DAVIES, and R. Y. KOYANAGI, Tidal triggering of earthquake swarms at Kilauea Volcano, Hawaii. J. Geophys. Res., **95**, 4401-4411, 1988.
- 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.
- RYKUNOV, A.L., and V.B. SMIRNOV, Variations in seismicity under the influences of lunar-solar tidal deformations, Izv. Acad. Sci. USSR Phys. Solid Earth Ser., 21, 71-75, 1985.
- SANDI, H., Hazard și risc implicate de activitatea zonei seismogene Vrancea, St.cerc. GEOFIZICĂ, vol. 39, p.85+110, București, 2001.
- SANDULESCU, M., Geotectonica Romaniei. Editura Tehnica, Bucharest, 1984.
- SAUCK, W. A., The Brawley, California, earthquake swarm of January, 1975, and triggering by earth tides. Geophys. Res. Lett., **2**, 506-509, 1975.
- SCHOLZ, C.H., SYKES, L.R. AND AGGARWAL, Y.P., Earthquake prediction: A physical basis, Science, 181, 803, 1973.
- SCHUSTER, A.: On lunar and solar periodicities of earthquakes, Proc. R. Soc. Lond., 61, 455–465, 1897.
- SEGHEDI, I., BALINTONI, I., SZAKACS, A., Interplay of tectonics and Neogene post-collisional magmatism in the intra-Carpathian region. Lithos 45, 483–497, 1998.

- SHAW, H.R., Earth tides, global heat flow, and tectonics, *Science*, 168, 1084-1087, 1970.
- SHCHYUKIN, YU. K., and DOBREV, T. D., Deep geological structure, geodynamics and geophysical fields of the Vrancea region. In *The 1977 Carpathian Earthquake and its Impact* (ed. Drumya, A. V.) (Nauka, Moscow 1980) pp. 7-40, 1980.
- SHIRLEY, J. H., Lunar and solar periodicities of large earthquake: Southern California and Alaska-Aleutian islands seismic region. *Geophys. J.*, **92**, 403-420, 1988.
- SHLIEN, S., Earthquake-tide correlation, *Geophys. J. R. astr. Soc.*, 28, 27-34, 1972.
- SHUDDE, R. H. and BARR, D. R.: An analysis of earthquake frequency data, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 67, 1379-1386, 1977.
- SIMPSON, J. F.: Earth tides as a triggering mechanism for earthquakes, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 2, 473-478, 1967.
- SNEDECOR, G. W., and W.G. COCHRAN, *Statistical methods* (Eighth Edition), Ames, Iowa: Iowa State Press, 1989.
- SPERNER, B., LORENTZ, F., BONJER, K.P., HETTEL, S., MULLER, B., WENZEL, F., Slab break-off — abrupt cut or gradual detachment? New insights from the Vrancea region (SE-Carpathians, Romania). *Terra Nova* 13, 172- 179, 2001.
- 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.
- SOURIAU, M., A. SOURIAU, and J. GAGNEPAIN, Modeling and detecting interactions between earth tides and earthquakes with application to an aftershock sequence in the Pyrenees. *Bull Seism. Soc. Am.*, **72**, 165-180, 1982.
- 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
- STEACY, S., J. GOMBERG, and M. COCCO Introduction to special section: Stress transfer, earthquake triggering, and time-dependent seismic hazard, *J. Geophys. Res.*, 110, B05S01, doi:10.1029/2005JB003692, 2005.
- STERN, S.D., *Digital Signal Analysis*, Hayden Book Co., Inc., New Jersey, 1975.
- STEJSKAL, V., SKALSKÝ, L. and KAŠPÁREK, L., Results of two-years' seismo-hydrological monitoring in the area of the Hronov-Poříčí fault zone, western sudetes, *Acta Geodyn. Geomater.*, Vol. 4, No. 4 (148), 1-18, 2007
- STROUP, D. F.: Pulse of the seafloor: Tidal triggering of microearthquakes at 9°50' N East Pacific Rise, *Geophys. Res. Lett.*, 34(15), 2007.
- SUDHAUS, H. AND RITTER, J.R.R., High-resolution measurement of the seismic attenuation across the Vrancea region, Romania, *Geophys. Res. Lett.*, **32**, 10301, 2005.

SUN, S. A. and M. Y. JIA, The change characters of gravity field in the Xianshui River fracture zone, *Crust Deformation and Earthquake*, 21 (1), 72-78, 2001.

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.

TODORAN,I., Răspunsuri posibile : corelație și prognoză, Editura Dacia, Cluj-Napoca, 222 p, 1989.

TOLSTOY, M., VERNON, F. L., ORCUTT, J. A., and WYATT, F. K.: Breathing of the seafloor: tidal correlations of seismicity at Axial volcano, *Geology*, 30, 503–506, 2002.

TURCOTTE D.L. and SCHUBERT G., *Geodynamics, Applications of Continuum Physics to Geological Problems*, John Wiley and Sons, New York, 1982.

TRIFU, C.-I., and RADULIAN, M. (1989), Asperity Distribution and Percolation as Fundamentals of Earthquake Cycle, *Phys. Earth Planet. Inter.* 58, 277-288.

TRIFU,C.I. and RADULIAN,M., Frequency magnitude distribution of earthquakes in Vrancea: relevance for a discrete model, *J.Geophys.Res.*96, 4301-4311, 1991a.

TRIFU,C.I. and RADULIAN,M., A depth-magnitude catalogue of Vrancea intermediate depth microearthquakes (1974-1991), *Rev.Roum.Geol.Geophys.Geogr., Ser.Geophys.*35,31-45, 1991b.

TSHIBANGU, J-P., VAN RUYMBEKE, M., VANDYCKE, S., QUINIF, Y., CAMELBEECK, T., Studying underground motions in the Ramioul's cave. *Proceedings of the Congress Eurengeo*, Springer Verlag, Liege pp614-623, 2004.

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.

- ULBRICH, U., AHORNER, L., EBEL, A., Statistical investigations on diurnal and annual periodicity and on tidal triggering of local earthquakes in central Europe. *J. Geophys.* 61, 150-157, 1987.
- 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., Projects of the Royal Observatory of Belgium (ROB) at the Lanzarote Geodynamical Laboratory (LGL), *J. Geodetic Society of Japan*, 47, 463–469, 2001.
- 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., SOMERHAUSEN A., Some reflections about tidal triggering in volcanic zones. Proc. of the Workshop Geodynamical Instrumentation Applied to Volcanic Areas, Walferdange, Oct. 1-3, 1990. Cahiers du Centre Européen de Géodynamique et de Séismologie, vol. 4, pp 387-390, 1991.
- VAN RUYMBEKE, M., BEAUDUCEL, F., SOMERHAUSEN, A., The Environmental Data Acquisition System (EDAS) developed at the Royal Observatory of Belgium. *Journal of the Geodetic society of Japan* Vol. 47 (1) pp40-46, 2001.
- 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.
- VAROTSOS, P., ALEXOPOULOS, K., NOMICOS, K., Seven-Hour Precursors to Earthquakes Determined from Telluric Currents, *Praktika of the Academy of Athens*, 56, 417, 1981.

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

VIDALE, J. E., D. C. AGNEW, M. J. S. JOHNSTON, and D. H. OPPENHEIMER, Absence of earthquake correlation with Earth tides: an indication of high preseismic fault stress rate. J. Geophys. Res., **103**, 24, 567-24,572, 1998.

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.

WEIDLE, C., WENZEL, F. and ISMAIL-ZADEH, A., t —an unsuitable parameter to characterize anelastic attenuation in the Eastern Carpathians, Geophys. J. Int. 170, 1139–1150, 2007.

WENZEL, F., LORENZ, F., SPERNER, B. and ONCESCU, M., Seismotectonics of the Romanian Vrancea Area. In: F. Wenzel (Editor), *Vrancea Earthquakes: Tectonics, Hazard and Risk Mitigation*. Kluwer, Bucharest, 1999.

WILCOCK, W. S. D.: Tidal triggering of microearthquakes on the Juan de Fuca Ridge, Geophys. Res. Lett., 28, 3999–4002, 2001.

WORTEL, R., SPAKMAN, W., Subduction and slab detachment in the Mediterranean–Carpathian region. Science 290, 1910– 1917, 2000.

WYSS, M., Towards a physical understanding of the earthquake frequency distribution, Geophys. J. R. astr. Soc., 31, 341, 1973.

YOUNG, D., ZURN, W., Tidal triggering of earthquakes in the Swabian Jura? J. Geophys. 45, 171-182, 1979.

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, D., L. FĂTULESCU, I., 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, D., Observatoarele de geodinamică din România, St.cerc.geol.,geofiz.,geogr., Geofizică, Tom 23, pp 3-11. 1985a

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

ZUGRĂVESCU D., FĂTULESCU, I., ENESCU, D., DANCHIV, D., and HARADJA, O., 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.