

## Anexa nr. 9 la Contract nr. 21N/2016

**Contractor: Institutul National C-D pentru Fizica Pamantului**

**Cod fiscal : 5495458** (Anexa la procesul verbal de avizare interna nr. )

De acord,

**DIRECTOR GENERAL**

**Dr.ing. Constantin Ionescu**

Avizat,

**DIRECTOR DE PROGRAM**

**Prof. Gheorghe Marmureanu**

### **RAPORT DE ACTIVITATE AL FAZEI**

**Contractul nr.:** PN 16 35 01 08

**Proiectul: Parametrizarea surselor seismice in cazul seismicitatii grupate in crusta si manta**

**Faza:** 2. Aplicarea algoritmului de calcul pentru studii de caz

**Termen: 20.03.2017**

1. **Obiectivul proiectului:** Combinarea algoritmilor de corelatie incrucisata cu algoritmi de deconvolutie relativa (rapoarte spectrale si functii Green empirice) in scopul optimizarii constrangerii parametrizarii si scalarii sursei in cazul secventelor crustale si subcrustale.
2. **Rezultate preconizate pentru atingerea obiectivului:** Evaluarea parametrilor de sursa seismica prin combinarea algoritmilor de corelatie incrucisata cu algoritmi de deconvolutie relativa pentru cutremure crustale si subcrustale; obtinerea relatiilor de scalare pentru parametrii de sursa estimati; corelarea caracteristicilor gruparilor seismice din crusta si manta cu proprietatile seismotectonice ale zonelor seismogene in care au fost generate.
3. **Obiectivul fazei:** Scopul acestui studiu este analiza parametrilor de sursa si a legilor de scalare ai acestora pentru cutremurele de adancime intermediara vranceane. Pentru parametrizarea sursei seismice s-au folosit metodele relative ale rapoartelor spectrale si deconvolutiei cu functii Green empirice.
4. **Rezultate preconizate pentru atingerea obiectivului fazei:**

Proprietatile de scalare ale sursei seismice sunt elemente esentiale in intelegerea modelului de sursa si a proceselor tectonice responsabile de generarea cutremurelor intr-un astfel de volum litosferic limitat.

Rezultatul preconizat pentru aceasta faza a lucrarii este determinarea parametrilor de sursa si a legilor lor de scalare pentru cutremurele subcrustale din zona Vrancea. Am luat in considerare toate informatiile disponibile din investigatiile anterioare precum si date noi, prelucrate de noi, pentru 161 de cutremure vranceane. Valorile caderii de tensiune estimate din raza sursei folosind metoda rapoartelor spectrale sau spectrele de deplasare ale sursei prezinta o dispersie/imprastiere foarte mare, intre 0,1-1.000 MPa.

Analizand procesul de rupere in cazul evenimentelor subcrustale vranceane, ajungem la o concluzie importanta: procesul de rupere pentru cutremurele din Vrancea este rapid si eficient atat pentru cutremurele moderate cat si pentru cele mari, ceea ce implica valori mari ale caderii de tensiune dinamice si respectiv valori mici ale dimensiunii sursei.

#### **5 Rezumatul fazei:**

**Parametrizarea si scalarea sursei seismice a cutremurelor subcrustale din zona Vrancea**

Zona seismică Vrancea este un caz distinct de seismicitate grupată la adâncimi intermediare. Proprietățile de scalare ale sursei seismice sunt elemente esențiale în înțelegerea și modelarea proceselor tectonice responsabile de producerea cutremurelor într-un volum litosferic atât de limitat.

Scopul acestui studiu este analiza parametrilor de sursă și a legilor de scalare ai acestora pentru cutremurele de adâncime intermediară vrancea. Pentru parametrizarea sursei seismice s-au folosit metodele relative ale rapoartelor spectrale și deconvoluției cu funcții Green empirice, metode folosite pe larg în studiile de sursă seismică.

Sunt luate în considerare rezultatele obținute anterior în diverse lucrări împreună cu noile determinări, rezultând astfel o bază de date extinsă (314 evenimente în total, dintre care 161 evenimente noi), care acoperă un interval de magnitudine ( $M_w$ ) de la 2.8 la 7.7 (evenimentul major din 1940). Pentru cele mai multe cutremure de magnitudine moderată, rezultatele evidențiază o funcție de timp a sursei simplă, care corespunde unui model cu sursă circulară și proces de rupere omogenă. Scalările momentului seismic cu raza sursei și cu căderea de tensiune par să fie similare pe întregul interval de magnitudine al setului de date considerat ( $2.8 \leq M_w \leq 7.7$ ) și sunt în concordanță cu scalarea teoretică pentru modelele de sursă adoptate în general în studiile sursei seismice. Valorile mari ale căderii de tensiune pentru cutremurele moderate și mari indică un proces de rupere rapid și eficient la diferite scări, explicat probabil prin procese de topire prin forfecare care se propagă rapid pe planul de falie.

Cuibul seismic din Vrancea este un caz distinct, neobisnuit de seismicitate grupată la adâncimi intermediare. Sunt evidențiate două caracteristici pregnante ale regimului seismic din această regiune: (1) restrângerea în spațiu a localizării hipocentrelor, cu o împrăștiere într-un plan vertical îngust, aproape de planul geometric vertical (Cărbunar and Radulian, 2011) (2) rata de producere persistentă și aproape invariabilă a seismicității de fond ( $10 \pm 5$  evenimente de magnitudine locală mai mare ca trei pe lună). În ceea ce privește cele mai mari cutremure, rata seismicității estimată din secolul XV până în prezent este de  $3 \pm 1$  de cutremure de magnitudine peste 7 pe secol.

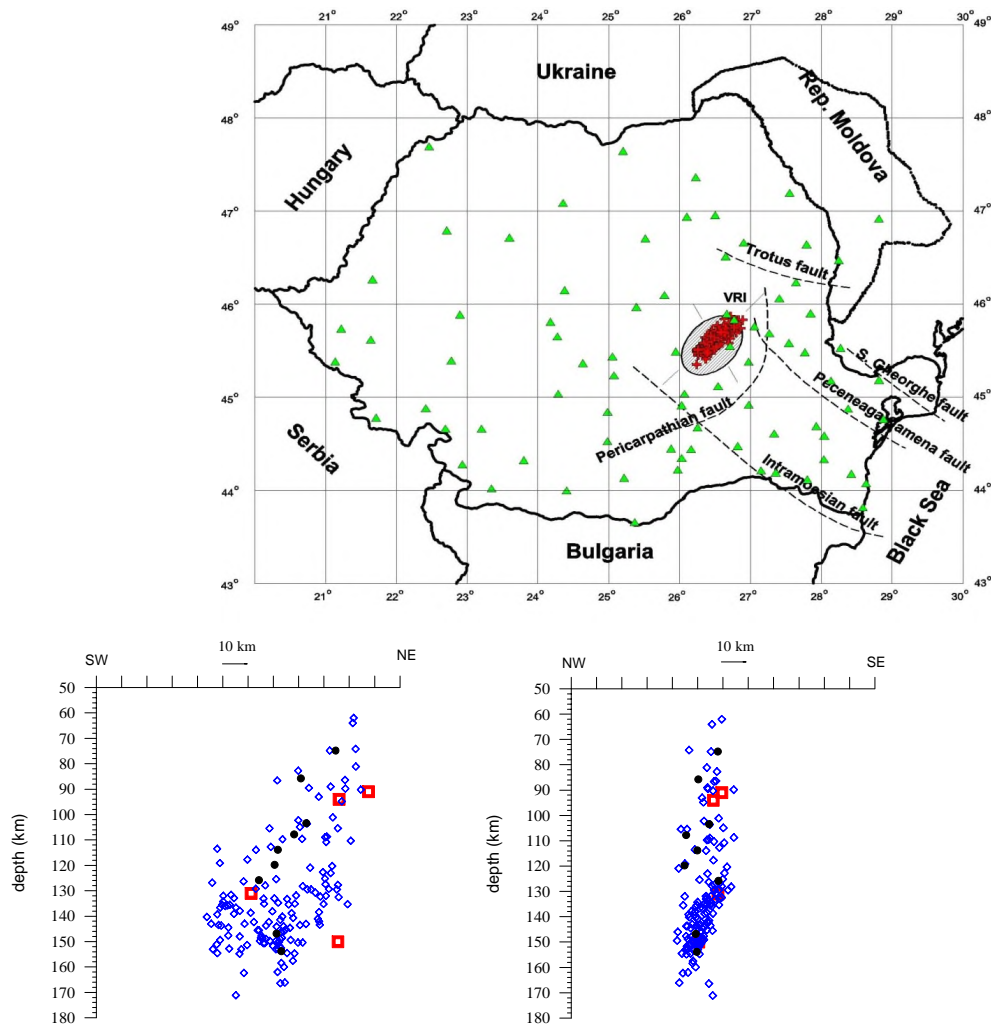
Cantitatea mare de forme de undă pentru cutremurele vrancea de adâncime intermediară înregistrate digital de către Institutul Național pentru Fizica Pamântului (INCDFP) oferă posibilitatea de evaluare, în mod sistematic, a proprietăților sursei individuale și proprietăților colective de scalare, cu scopul de a înțelege procesul global de seismogeneza din această zonă geotectonică particulară. O provocare esențială pentru acest tip de abordare este separarea diferiților factori care intervin și modifică semnalul înregistrat la suprafață: sursa, propagarea, amplasamentul și răspunsul instrumentului. Acest lucru este dificil pentru regiunea Vrancea, unde există neomogenități laterale puternice de structură, atât în crustă cât și în manta (Ismail-Zadeh et al., 2012).

Metodele relative ale rapoartelor spectrale și deconvoluției cu funcții Green empirice permit eliminarea efectelor de parcurs, amplasament și instrument pentru evenimentele principale, prin deconvoluarea din formulele de undă ale acestora a formelor de undă ale cutremurelor de magnitudine mai mică asociate, considerate funcții Green empirice. Cele două metode se aplică perechilor de cutremure localizate aproximativ în același loc și înregistrate de aceleași stații seismice (Popescu, 2010). În metoda deconvoluției cu funcția empirică Green, evenimentele mai mici dintr-un set de cutremure co-localizate acționează ca funcții medii de transfer. Acestea descriu în mod empiric efectele de parcurs, amplasament și instrument asupra formei de undă (Bakun și Bufe, 1975; Frankel, 1982; Mueller, 1985; Mori Frankel, 1990; Hough et al., 1991). În metoda rapoartelor spectrale (Lindley, 1994; Jack, 2015) cerințele sunt mai puțin restrictive în ceea ce privește dimensiunea relativă a evenimentelor din setul de date.

În acest studiu am aplicat metodele relative ale rapoartelor spectrale și deconvoluției cu funcții Green empirice pe un set de 161 evenimente vrancea de adâncime intermediară care îndeplinesc condițiile cerute de metodele relative (Tabelul 1 din Anexa).

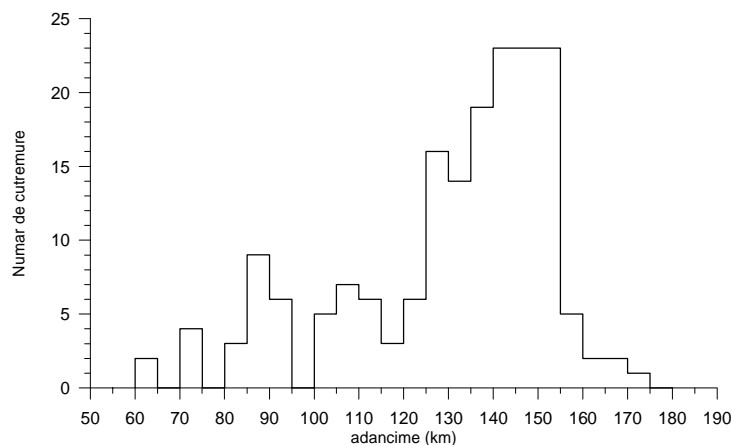
Rezultatele obținute în acest raport au fost analizate împreună cu rezultatele obținute în studiile anterioare de către Radulian și Popa (1996) și Oth et al. (2007), care au aplicat tehnica deconvoluției cu funcții Green empirice pentru evaluarea parametrilor sursei seismice și a proprietăților lor de scalare pentru un număr limitat de evenimente vrancea (8 și respectiv 9 evenimente) și cu rezultatele obținute utilizând tehnici spectrale relative cu rezultate similare obținute de Oncescu et al. (1998) și Gusev et al. (2002), folosind tehnica spectrală absolută. Estimările parametrilor de sursă pentru ultimele cutremure majore (1940, 1977, 1986, 1990) au fost, de asemenea, incluse în studiu, cu scopul de a extinde intervalul de magnitudine folosit la relațiile de scalare.

In figura 1 este prezentata distributia spatiala a evenimentelor analizate in acest studiu. Cele doua sectiuni transversale verticale reprezinta proiectiile hipocentrelor pe cele doua plane perpendiculare reprezentate pe harta. Localizarile evenimentelor majore din 1940, 1977, 1986 si 1990 si localizarile evenimentelor investigate de Radulian si Popa (1996) sunt incluse in figura 1. Pentru toate evenimentele s-au folosit localizarile din Romplus, localizari facute in mod curent cu ajutorul software-ului Hypoplus (Oncescu et al., 1999). Hipocentrele sunt situate într-un volum focal limitat, situat între 62 si 171 km adancime, orientat pe directia NE-SV si inclinat de la NE la SV, tangential la curbura Arcului Carpatic. Cu exceptia evenimentelor majore din 1940, 1977, 1986 si 1990, fiecare eveniment are cel putin un eveniment co-localizat. Aparent, hipocentrul evenimentului major din 1940 este in afara clusterului analizat in această lucrare, dar exista indoieli cu privire la pozitia reala a focarului (de exemplu, adancimea acestui eveniment este 133 km in Oncescu, 1987 si 124 km in Hurukawa et al., 2008).

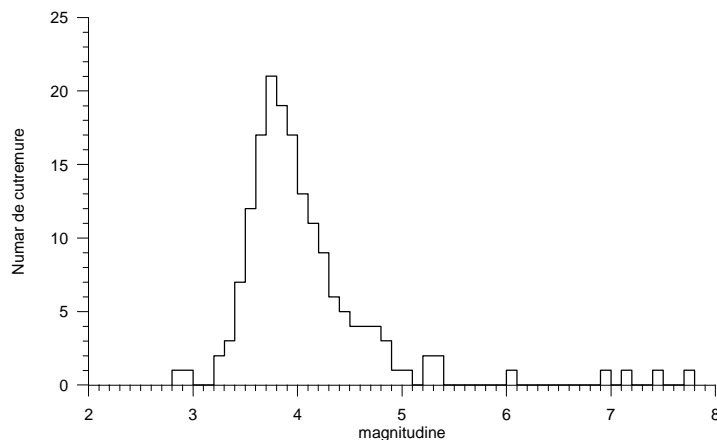


**Fig. 1.** Distributia epicentrelor evenimentelor analizate si a statiilor seismice ale Institutului National pentru Fizica Pamantului (sus) si proiectia hipocentrelor pe doua sectiuni verticale marcate pe harta (jos). Romburile albastre reprezinta evenimentele analizate in acest studiu, cercurile negre sunt evenimentele analizate de Radulian si Popa (1996) si patratele rosii reprezinta evenimentele majore.

Figurile 2 si 3 reprezinta distributia evenimentelor in functie de adancime si magnitudine. De observat cresterea volumului seismic activ in segmentul inferior al zonei Vrancea. Aceasta crestere pare a fi o caracteristica generala a modelelor de seismicitate din domeniul subcrustal vrancean (de exemplu, Radulian et al., 2007).



**Fig. 2** Distributia evenimentelor in functie de adancime.



**Fig. 3** Numarul de evenimente in functie de magnitudine.

### Parametrii de sursa

Pentru setul de date analizat in acest studiu am determinat parametrii de sursa prin aplicarea tehnicilor relative: rapoarte spectrale si deconvolutie cu functii Green empirice. Cutremurele moderate ( $M_w$  mai mic de 5.6 si un singur eveniment cu  $M_w = 6.0$ ) au fost considerate evenimente principale. In toate cazurile, consideram un proces de rupere circulara, ipoteza rezonabila pentru cutremure mici si moderate. De asemenea, consideram un proces de rupere simpla, ca o caracteristica generala a cutremurelor vranceane de magnitudine mica pana la moderata (Popescu et al, 2003; 2007).

Aplicarea metodei rapoartelor spectrale si a deconvolutiei cu functii Green empirice elimina efectele de parcurs, amplasament si instrument atunci cand sunt aplicate perechilor de evenimente co-localizate, cu acelasi mecanism focal si care sunt inregistrate de acelasi tip de instrument la aceleasi statii. Pentru cutremurele mai recente (dupa 2009), putem gasi perechi de evenimente inregistrate la aproximativ 15 statii comune. In acelasi timp, pentru multe dintre evenimentele principale putem selecta mai multe functii Green empirice.

Pentru un model de sursa cu rupere uniforma si cadere spectrala la frecvente mari de tip  $\omega^{-2}$ , raportul spectral poate fi aproximat prin functia teoretica:

$$R(f) = \frac{\Omega_0^P [1 + (f/f_c^G)^{2\gamma}]^{1/2}}{\Omega_0^G [1 + (f/f_c^P)^{2\gamma}]^{1/2}} \quad (1)$$

unde  $\Omega_0^P$ ,  $\Omega_0^G$  sunt palieretele de frecventa joasa ale spectrelor de amplitudine ale deplasarii cutremurelor mai mare si respectiv mai mic, iar  $f_c^P$ ,  $f_c^G$  sunt frecventele de colt ale cutremurelor care formeaza perechea.

Printr-o procedura de regresie neliniara, se cauta functia (1) care aproximeaza cel mai bine raportul spectral observat. Parametrii liberi in procesul de aproximare sunt: raportul momentelor seismice (proportional cu raportul palieretelor de frecventa joasa din spectrul de deplasare al evenimentelor co-localizate care formeaza o pereche) si frecventele de colt ale evenimentelor pereche si sunt date pentru fiecare pereche de cutremure ( $f_c^G$ -frecventa de colt a evenimentului Green,  $f_c^M$  - frecventa de colt a cutremurului principal).

Un puls clar al functiei de timp a sursei indica faptul ca evenimentul considerat functie Green empirica este bun. In majoritatea cazurilor, sunt obtinute amplitudini si durate similare pentru pulsurile sursei si pentru rapoartele spectrale, independent de pozitia statiei. Acest lucru indica faptul ca efectele de directivitate a sursei sunt, practic, absente si ca evenimentul considerat functie Green empirica este selectat in mod adecvat in raport cu evenimentul principal, atat ca localizare cat si ca model de radiatie. Durata sursei este estimata din functia de timp a sursei rezultata din aplicarea deconvolutiei cu functii Green empirice. Un exemplu tipic de rapoarte spectrale si functii de timp ale sursei pentru o pereche de cutremure intermediare vranceane este prezentat in Figura 4.

Frecventa de colt este determinata ca media aritmetica a tuturor valorilor obtinute pentru componente diferite, statii diferite si pentru diferite functii Green empirice (doar pentru evenimentele principale). Desigur, durata sursei se poate calcula doar pentru evenimentele principale, si este de asemenea, determinata ca medie aritmetica a tuturor valorilor disponibile. Atat frecventa de colt cat si durata sursei evidentiaza o masura a dimensiunii sursei.

Pentru un model de sursa circulara, raza sursei este direct corelata cu frecventa de colt conform relatiei (Madariaga, 1976):

$$r = k \beta / f_c \quad (2)$$

unde  $r$  este raza echivalenta a sursei,  $k$  este o constanta ( $k = 0.32$  pentru undele P si  $k = 0.21$  pentru undele S),  $f_c$  este frecventa de colt si  $\beta$  este viteza undelor S in focar.

Echivalent, raza sursei se calculeaza folosind durata sursei, conform relatiei (Boatwright, 1980):

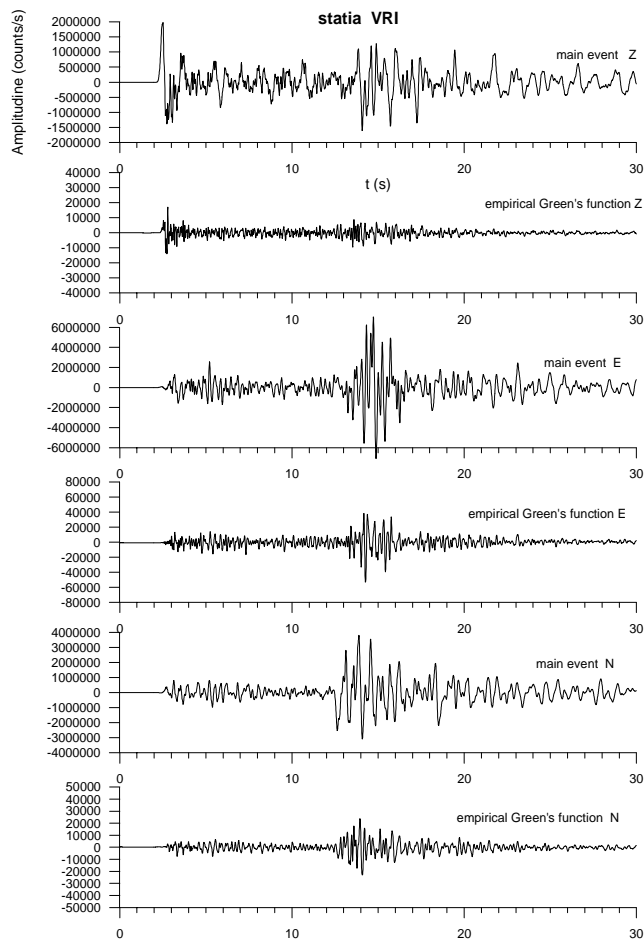
$$r = (\tau_{1/2} v) / (1 - v / \alpha \sin \theta) \quad (3)$$

unde  $\tau_{1/2}$  este timpul de crestere (pentru cutremurele moderate este luat ca jumatate din latimea pulsului obtinut prin deconvolutie),  $v$  este viteza de rupere in sursa (am considerat  $v = 0.9\beta$ , cu  $\beta$ - viteza de propagare a undelor S la adancimea sursei seismice),  $\alpha$  -viteza de propagare a undelor P in sursa si  $\theta$  este unghiul dintre normala la falie si directia de iesire a undelor P din focar (am luat in acest caz  $\theta = 45^\circ$ ). S-a obtinut valoarea medie a timpului de crestere pentru fiecare pereche ca medie aritmetica a valorilor obtinute pentru fiecare statie. In cazul fiecarui eveniment principal, daca am avut la dispozitie mai multe functii Green, timpul de crestere este media tuturor valorilor  $\tau_{1/2}$  obtinute (diferite functii Green si diferite statii).

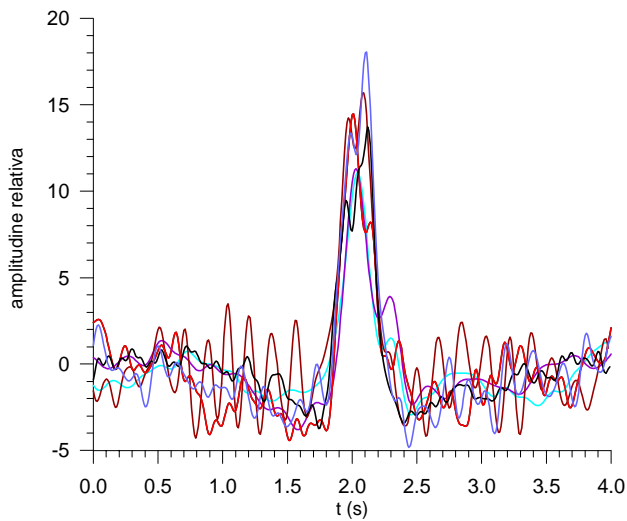
Tehnicile relative de deconvolutie ofera doar o masura relativa a momentului seismic. Pentru evaluarea valorii absolute a momentului seismic folosim relatia (Brune, 1970):

$$M_0 = (4\pi\rho\alpha^3\Omega_0R)/(FR_{\theta\phi}) \quad (4)$$

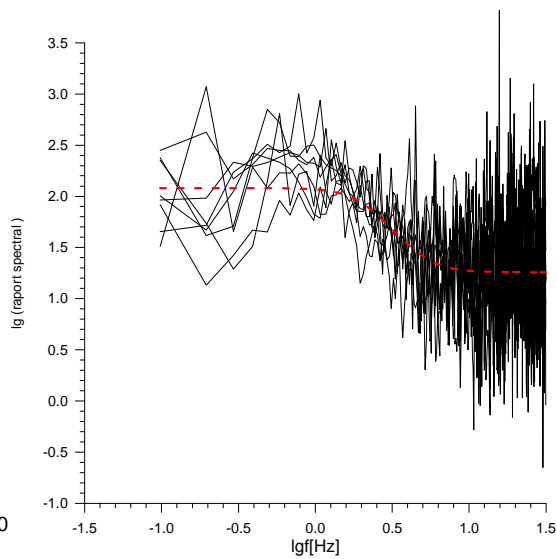
unde,  $\rho$  este densitatea la adancimea sursei,  $\alpha$  este viteza undelor P la adancimea sursei,  $\Omega_0$  este nivelul de joasa perioada al spectrului de deplasare,  $R$  este distanta hipocentrala,  $F$  este parametrul suprafetei libere ( $F=2$ ) si  $R_{\theta\phi}$  este modelul de radiatie al sursei (valoarea medie de 0.52 pentru unde P si 0.63 pentru unde S, in acord cu Aki si Richards, 1980). Pentru parametrii de structura din ecuatia (5) am folosit model de viteza adoptat de INCDFP in localizarile de rutina, model care include informatii din profilele de refractie si reflexie (Zaharia et al., 2009 si referintele de aici).



a.



b.



c.

**Fig. 4.** Exemplu de pereche eveniment principal - functie Green empirica. a) Formele de unda inregistrate la statia VRI pentru evenimentul din 25 aprilie 2009, ora 17:18,  $M_w=5.2$  (eveniment principal) si evenimentul din 26 aprilie 2009, ora 23:19,  $M_w=3.8$  (functia Green empirica); b) exemple de functii de timp ale sursei si c) rapoartele spectrale obtinute. Linia punctata reprezinta raportul spectral teoretic care fiteaza cel mai bine curbele obtinute pentru opt statii.

Caderea de tensiune este estimata in functie de momentul seismic si raza sursei, conform relatiei: (Eshelby, 1957):

$$\Delta\sigma = \frac{7M_0}{16r^3} \quad (5)$$

### Relatiile de scalare

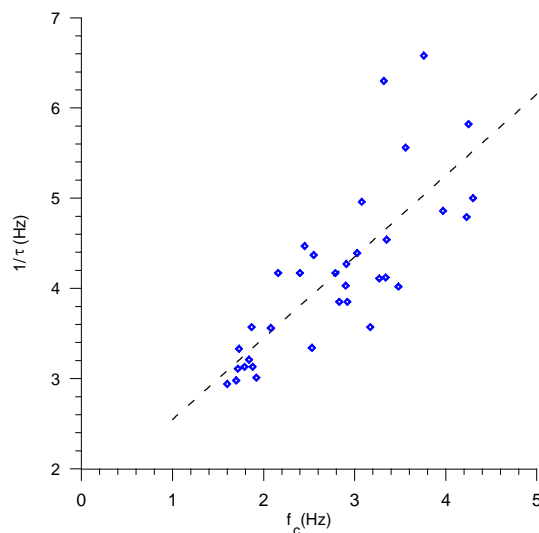
Frecventele de colt pentru undele P si S obtinute in studiul nostru pentru perechi de evenimente colocalizate au valori apropiate (raportul  $f_c^P/f_c^S \sim 1$ ). De obicei frecventele de colt ale undelor P sunt în mod sistematic mai mari decât cele ale undelor S pentru acelasi cutremur (Molnar et al., 1973; Abercrombie si Leary, 1993; Prieto et al., 2004). In modelul circular al lui Madariaga (1976) raportul  $f_c^P/f_c^S$  are o valoare medie de 1.5. Un raport  $f_c^P/f_c^S \sim 1$  a fost obtinut de Viegas (2012) si Radulian et al. (2014) pentru cutremurele crustale mici si moderate de tip intra-placa. In astfel de cazuri, presupunem ca frecventa de colt este controlata mai mult de timpul de crestere (propagarea ruperii) care este aceeaasi atat pentru undele P cat si pentru undele S, decat de dimensiunea sursei, care produce diferente între  $f_c^P$  si  $f_c^S$ , deoarece interferenta undelor produsa de dimensiunea limitata a sursei difera pentru undele P si pentru undele S. Dupa cum este de asteptat, efectele datorate dimensiunii finite a sursei devin mai importante pe masura ce cutremurul este mai mare si ca urmare raportul  $f_c^P/f_c^S$  se apropie de valoarea teoretica 1.5, dupa cum au aratat Gusev et al. (2002).

Relatia de scalare dintre durata sursei si frecventa de colt (Figura 5) are o corelatie liniara cu panta apropiata de 1 ( $f_c \sim 1 / \tau$ ), in concordanta cu relatia de scalare obtinuta de Gusev et al. (2002), atat in domeniul timp cat si in domeniul spectral, din analizele inregistrarilor digitale pe banda larga pentru 16 cutremure subcrustale vranceane.

Relatia de scalare dintre raza sursei (estimata doar din rapoarte spectrale deoarece doar prin aceasta metoda se pot estima frecventele de colt pentru ambele evenimente, eveniment principal si functie Green empirica) si magnitudinea din moment (Figura 6) prezinta o scalare cu cadere de tensiune constanta cu panta apropiata de valoarea teoretica -3 (Brune, 1970). Dreapta de regresie este data de ecuatie:

$$\lg M_0 = (2.87 \pm 0.13) \lg r + (7.41 \pm 0.33) \quad (6)$$

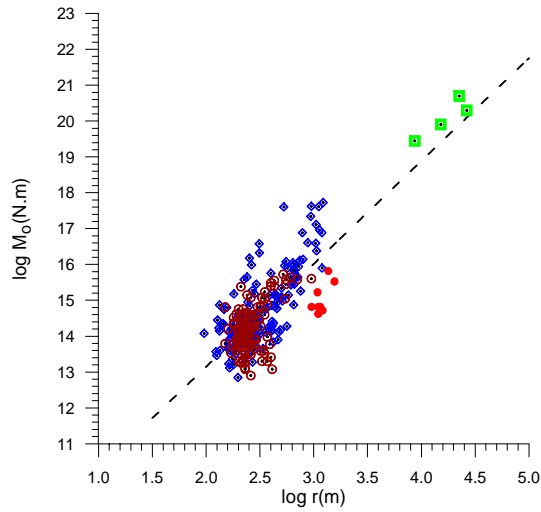
cu un coeficient de corelatie de 0.80 si deviatia standard 0.67.



**Fig. 5.** Relatia de scalare durata sursei-frecventa de colt pentru evenimentele principale din Talelul 1a. Linia punctata este linia de panta 1.

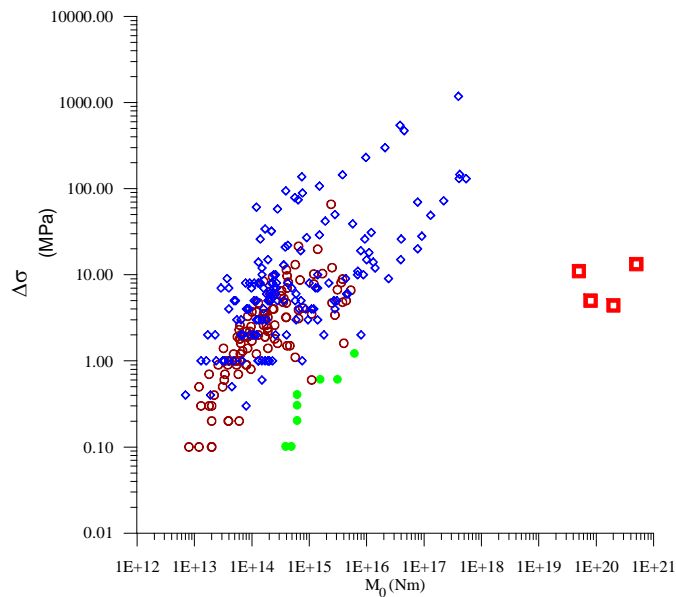
In analiza noastra am considerat si rezultatele anterioare obtinute de Oncescu (1986), Radulian si Popa (1996) precum si parametrii de sursa pentru cele patru evenimente majore. De asemenea, am comparat frecventele de colt obtinute in studiul nostru cu valorile obtinute de Oth et al. (2007) pentru evenimentele urmatoare: 1999/11/08 19:22 ( $M_w$  4.6), 1999/11/14 09:05 ( $M_w$  4.6), 2000/04/06 00:10 ( $M_w$  5.0), 2002/09/06 05:04 ( $M_w$  4.1), 2002/11/03 20:30 ( $M_w$  4.0) si 2004/10/27 20:34 ( $M_w$  6.0). Daca pentru evenimentul din 2004

frecventele de colt sunt identice, pentru celelalte evenimente estimările facute de Oth et al. (2007) sunt mai mari decat estimările noastre cu un factor de 1.5.



**Fig. 6.** Relatia de scalare moment seismic - raza sursei. Romburile reprezinta evenimentele din acest studiu; cercurile rosii preprezinta evenimentele analizate de Radulian si Popa (1996); patratele verzi reprezinta cele patru evenimente majore; cercurile maro reprezinta evenimentele analizate de Onescu (1986).

Relatia de scalare dintre caderea de tensiune si momentul seismic este reprezentata in Figura 7.



**Fig. 7.** Relatia de scalare cadere de tensiune – moment seismic. Romburile albastre reprezinta evenimentele din acest studiu; cercurile pline verzi reprezinta evenimentele analizate de Radulian si Popa (1996); patratele rosii reprezinta cele patru evenimente majore; cercurile maro reprezinta evenimentele analizate de Onescu (1986).

Pentru setul de date analizat în această lucrare, raza sursei a fost estimată prin metoda rapoartelor spectrale prin aproximarea observatiilor cu o functie teoretica ca cea din relatia (1). Am considerat valorile medii pentru toate estimările disponibile (componente, statii si functii Green empirice diferite). Onescu (1986) a obtinut raza sursei prin simpla analiza a spectrelor de deplasare, in timp ce pentru evenimentele majore s-au folosit estimările obtinute din distributia in spatiu a replicilor (Radulian si Popa, 1996).



Imprastierea valorilor caderii de tensiune este mare, dupa cum rezulta din relatia (5), avand in vedere erorile inerente in estimarea razei si variabilitatea datorata parametrilor impliciti, cum ar fi viteza de rupere sau geometria sursei. In plus, este important modul in care definim caderea de tensiune: eliberarea medie de tensiune pe intreaga suprafata a sursei (valoarea statica) sau eliberarea de tensiune, atunci cand se rupe o zona de rezistenta mare in interiorul sursei (valoarea dinamica). Caderea de tensiune aparenta are o tendinta de crestere cu cresterea momentului seismic pentru evenimente mai mici (pana la magnitudinea 6) iar aceasta tendinta poate fi datorata latimii limitate a benzii de frecventa a instrumentului (de exemplu, Hardebeck si Aron, 2009, Ide si Beroza, 2001; Abercrombie, 2015) precum si raportului semnal / zgomot scazut la frecvente inalte care conduce la o subestimare a frecventei de colt pentru cutremure mai mici.

## Bibliografie

- R.E. Abercrombie, P.C. Leary, Source parameters of small earthquakes recorded at 2.5 km depth, Cajo Pass, southern California: implications for earthquake scaling, *Geophys. Res. Lett.* **20**, 1511–1514 (1993)
- R.E. Abercrombie, Investigating uncertainties in empirical Green's function of earthquake source parameters, *Journal of Geophysical Research* (2015). doi:10.1002/2015JB011984
- K. Aki, P.G. Richards, *Quantitative Seismology* (Freeman and Co., N.Y., 1980)
- W.H. Bakun, C.G. Bufe, Shear-wave attenuation along the San Andreas Fault zone in Central California, *Bull. Seismol. Soc. Am.* **65**, 439–460 (1970)
- J. Boatwright, A spectral theory for circular seismic sources: simple estimates of source duration, dynamic stress drop, and radiated energy, *Bull. Seismol. Soc. Am.* **70**, 1–28 (1980)
- J.N. Brune, Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from earthquakes. *J. Geophys. Res.* **75**, 4997–5009 (1970)
- O.F. Cărbunar, M. Radulian, Geometrical constraints for the configuration of the Vrancea (Romania) intermediate-depth seismicity nest, *Journal of Seismology*, **15**, 579–598 (2011)
- J.D. Eshelby, The determination of the elastic field of an ellipsoidal inclusion and related problems. *Procc. of the Royal Society of London*, A 241, 376–396 (1957)
- A. Frankel, Precursors to a magnitude 4.8 earthquake in the Virgin Islands: spatial clustering of small earthquakes, anomalous focal mechanisms, and earthquake doublets, *Bull. Seismol. Soc. Am.* **72**, 1277–1294 (1982)
- A. Gusev, M. Radulian, M. Rizescu, G.F. Panza, Source scaling for the intermediate-depth Vrancea earthquakes, *Geophys. Int. J.* **151**, 879–889 (2002)
- J.L. Hardebeck, A. Aron, Earthquake stress drops and inferred fault strength on the Hayward Fault, east San Francisco Bay, California, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, **99**, 1801–1814 (2009)
- S.E. Hough, L. Seeber, A. Lerner-Lam, G. Armbruster, H. Guo, Empirical Green's function analysis of Loma Prieta aftershocks, *Bull. Seismol. Soc. Am.* **81**, 1737–1753 (1991)
- N. Hurokawa, M. Popa, M. Radulian, Relocation of large intermediate-depth earthquakes in the Vrancea region, Romania, since 1934 and a seismic gap, *Earth Planets Space*, **60**, 565–572 (2008)
- S. Ide, G.C. Beroza, Does apparent stress vary with earthquake size?, *Geophys. Res. Lett.* **28**, 3349–3352, (2001). doi:10.1029/2001GL013106
- A. Ismail-Zadeh, L. Maţenco, M. Radulian, S. Cloetingh, G.F. Panza, Geodynamics and intermediate-depth seismicity in Vrancea (The South-Eastern Carpathians): Current state-of-the art, *Tectonophysics*, **530**, 50–79 (2012)
- G.T. Lindley, Source parameters of the 23 April 1992 Joshua Tree, California earthquake, its largest foreshock and aftershocks. *Bull. Seism. Soc. Am.* **84**, 1051–1057 (1994)
- R. Madariaga, Dynamics of an expanding circular crack, *Bull. Seismol. Soc. Am.* **66**, 639–666 (1976)
- P. Molnar, B.E. Tucker, J. Brune, Corner frequencies of P and S wave and models of earthquake sources, *Bull. Seismol. Soc. Am.* **63**, 2091–2104 (1973)
- J. Mori, A. Frankel, Source parameters for small events associated with the 1986 North Palm Springs, California earthquake determined using empirical Green functions, *Bull. Seism. Soc. Am.* **80**, 278–285 (1990)
- C.S. Mueller, Source pulse enhancement by deconvolutions with empirical Green's function, *Geophys. Res. Lett.* **12**, 33–36 (1985)
- M.C. Oncescu, Some source and medium properties of the Vrancea seismic region, Romania. *Tectonophysics* **126**, 245–258 (1986)

- M.C. Oncescu, On the stress tensor in Vrancea region, *J. Geophys.* **62**, 62-65 (1987)
- M.C. Oncescu, V. Mârza, M. Rizescu, M. Popa, *The Romanian earthquakes catalogue between 984 and 1997*. In: *Vrancea Earthquakes: Tectonics, Hazard and Risk Mitigation*, edited by F. Wenzel, and D. Lungu, (Kluwer Academic Publishers, pp. 43–47) (continuously updated) (1999)
- A. Oth, F. Wenzel, M. Radulian, Source parameters of intermediate-depth Vrancea (Romania) earthquakes from empirical Green's functions Modeling, *Tectonophysics* **438**, 33-56 (2007)
- E. Popescu, M. Popa, M. Radulian, Efficiency of the spectral ratio method to constrain the source scaling properties of the Vrancea (Romania) subcrustal earthquakes. *Rom. Rep. Phys.* **55**, 149-169 (2003)
- E. Popescu, M. Radulian, M. Popa, A.O. Plăcintă, D. Ghica, I.A. Moldovan, Vrancea seismic source calibration using a small-aperture array, *Romanian Reports in Physics* **59**, 147-164 (2007)
- G.A. Prieto, P.M. Shearer, F.L. Vernon, D. Kilb, Earthquake source scaling and self-similarity estimation from stacking P and S spectra, *J. Geophys. Res. B Solid Earth Planets* **109**, no. B0, 8310 (2004). doi: 10.1029/2004JB003084.
- M. Radulian, M. Popa, Scaling of source parameters for Vrancea (Romania) intermediate depth, *Tectonophysics* **261**, p. 67-81(1996)
- M. Radulian, K.P. Bonjer, M. Popa, E. Popescu, Seismicity patterns in SE Carpathians at crustal and subcrustal domains: tectonic and geodynamic implications, *Proc. CRC-461 International Symposium on Strong Vrancea Earthquakes and Risk Mitigation*, (MATRIX ROM), Bucharest, p.93-102 (2007)
- M. Radulian, E. Popescu, F. Borleanu, M. Diaconescu, Source Parameters of the December 2011 - January 2012 Earthquake Sequence in Southern Carpathians, Romania, *Tectonophysics* **623**, 23-38 (2014)
- C.H. Scholz, [Scaling laws for large earthquakes: consequences for physical models](#), *Bulletin of the Seismological Society of America*, **72**, 1-14 (1982)
- C. H. Scholz, Size distribution for large and small earthquakes, *Bulletin of the Seismological Society of America* **87**, 1074-1077 (1997)
- G.L. Viegas, Source parameters of the 16 July 2010  $M_w$  3.4 Germantown, Maryland, earthquake, *Seism. Res. Lett.* **83**, 933-944 (2012)
- C.I. Trifu, M. Radulian, Frequency - magnitude distribution of earthquakes in Vrancea: relevance for a discrete model, *J. Geophys. Res.* **96**, 4301-4311 (1991)
- B. Zaharia, B. Enescu, M. Radulian, M. Popa, I. Koulakov, S. Parolai, Determination of the lithospheric structure from Carpathians Arc bend using local data, *Romanian Reports in Physics*, Vol. **61**, No. 4, P. 748–764 (2009)
- J.H. Wang, S.S. Ou, On scaling of earthquake faults. *Bull. Seism. Soc. Am.* **88**, 758-766 (1998)

## Anexa

**Tabelul 1a.** Parametrii hipocentrali si parametrii de sursa pentru evenimentele principale

Nr	Data	hh:mm	Lat (°N)	lon (°E)	H (km)	$M_w$	$f_c$ (Hz)	$r_{sr}^*$ (m)	$\tau_{1/2}$ (s)	$r_{rt}^*$ (m)	$\Delta\sigma_{sr}$ * (MPa)	$\Delta\sigma_{rt}$ * (MPa)	$M_0$ (Nm)
1	1997/10/11	19:00	45.77	26.76	113	4.5	3.35	571	0.110	729	19	9	$7.9 \times 10^{15}$
2	1997/11/18	11:23	45.76	26.71	123	4.7	2.53	742	0.150	952	14	7	$1.3 \times 10^{16}$
3	1997/12/30	04:39	45.54	26.32	139	4.6	3.56	536	0.090	595	26	19	$9.3 \times 10^{15}$
4	1998/01/19	00:53	45.64	26.67	105	4.0	4.25	440	0.086	564	8	4	$1.5 \times 10^{15}$
5	1998/03/13	13:14	45.56	26.33	155	4.7	2.40	795	0.120	793	12	12	$1.4 \times 10^{16}$
6	1998/07/27	15:02	45.63	26.52	134	4.4	2.83	712	0.130	846	6	3	$4.5 \times 10^{15}$
7	1999/03/22	19:25	45.52	26.33	145	4.4	2.79	687	0.120	787	6	4	$4.7 \times 10^{15}$
8	1999/04/28	08:47	45.47	26.28	158	5.3	1.84	1051	0.156	1015	49	54	$1.3 \times 10^{17}$
9	1999/04/29	18:44	45.63	26.40	145	4.0	4.30	443	0.100	653	7	4	$1.4 \times 10^{15}$
10	1999/06/29	20:04	45.60	26.49	133	4.2	3.08	635	0.101	659	5	5	$3.0 \times 10^{15}$
11	1999/11/08	19:22	45.52	26.38	132	4.6	2.91	639	0.117	766	18	11	$1.1 \times 10^{16}$
12	1999/11/14	09:05	45.49	26.29	127	4.6	3.03	658	0.114	745	15	11	$1.0 \times 10^{16}$
13	2000/03/08	22:11	45.87	26.72	71	4.4	2.55	756	0.115	755	2	2	$1.8 \times 10^{15}$
14	2000/04/06	00:10	45.76	26.66	137	5.0	1.88	1044	0.160	1047	15	15	$3.9 \times 10^{16}$
15	2000/05/10	04:27	45.57	26.51	134	4.1	3.32	581	0.080	504	3	5	$1.4 \times 10^{15}$
16	2001/03/04	15:38	45.51	26.27	156	4.8	1.79	1196	0.160	1065	2	3	$8.0 \times 10^{15}$
17	2001/05/24	17:34	45.64	26.46	154	4.9	1.73	1131	0.150	967	28	44	$9.1 \times 10^{16}$
18	2001/07/20	05:09	45.74	26.77	133	4.8	1.87	1063	0.140	918	9	14	$2.4 \times 10^{16}$

19	2001/10/17	13:01	45.62	26.55	92	4.2	2.90	649	0.124	808	11	5	7.0x10 <sup>15</sup>
20	2002/05/03	18:31	45.57	26.33	162	4.6	2.45	663	0.112	731	10	8	6.9x10 <sup>15</sup>
21	2002/09/06	05:04	45.61	26.45	101	4.1	3.76	501	0.076	498	8	8	2.2x10 <sup>15</sup>
22	2002/11/30	08:15	45.62	26.54	166	4.7	1.92	937	0.166	1087	72	55	2.2x10 <sup>17</sup>
23	2003/10/05	21:38	45.58	26.45	146	4.6	3.27	552	0.122	795	31	10	1.2x10 <sup>16</sup>
24	2004/02/07	11:58	45.68	26.62	144	4.4	3.17	590	0.140	848	9	3	4.3x10 <sup>15</sup>
25	2004/07/10	00:34	45.69	26.57	150	4.3	2.92	661	0.130	878	4	2	2.8x10 <sup>15</sup>
26	2004/09/27	09:16	45.65	26.51	152	4.6	2.16	882	0.120	782	26	37	4.0x10 <sup>16</sup>
27	2004/10/27	20:34	45.78	26.73	99	6.0	1.60	1222	0.170	1140	130	160	5.4x10 <sup>17</sup>
28	2005/05/14	01:53	45.66	26.52	146	5.2	1.72	1190	0.161	1052	20	23	7.7x10 <sup>16</sup>
29	2009/04/25	17:18	45.68	26.62	110	5.2	1.70	782	0.168	985	70	35	7.7x10 <sup>16</sup>
30	2013/10/06	01:37	45.67	26.58	135	5.3	2.08	528	0.149	845	1180	292	4.0x10 <sup>17</sup>
31	2013/10/15	19:33	45.62	26.55	142	4.6	3.34	312	0.122	689	298	28	2.1x10 <sup>16</sup>
32	2013/11/21	06:38	45.76	26.71	89	4.2	4.30	240	0.125	680	144	6	4.5x10 <sup>15</sup>
33	2014/01/23	06:15	45.47	26.26	143	4.6	4.23	252	0.105	593	470	31	1.5x10 <sup>16</sup>
34	2014/03/26	19:46	45.68	26.55	141	4.2	4.91	226	0.113	638	145	6	3.8x10 <sup>15</sup>
35	2014/03/29	19:18	45.63	26.47	138	4.8	3.48	311	0.125	706	545	47	3.8x10 <sup>16</sup>
36	2014/04/03	12:38	45.48	26.39	136	4.4	3.97	264	0.103	584	230	21	9.7x10 <sup>15</sup>
37	2016/09/23	23:11	45.70	26.60	95	5.6	1.92	1111	0.176	1215	131	100	4.1x10 <sup>17</sup>
38	2016/12/27	23:20	45.70	26.60	99	5.3	2.28	948	0.168	1150	146	81	2.8x10 <sup>17</sup>

\* $r_{sr}$ ,  $\Delta\sigma_{sr}$  – raza sursei si caderea de tensiune obtinute din rapoarte spectrale

\* $r_{rt}$ ,  $\Delta\sigma_{rt}$  – raza sursei si caderea de tensiune obtinute folosind timpul de crestere

**Tabelul 1b.** Parametrii hipocentrali si parametrii de sursa pentru evenimentele considerate functii Green empirice

Nr	Data	hh:mm	lat ( <sup>0</sup> N)	Lon ( <sup>0</sup> E)	h (km)	M <sub>w</sub>	M <sub>0</sub> (Nm)	f <sub>c</sub> (Hz)	r (m)	$\Delta\sigma$ (MPa)
1	1997/03/19	20:51	45.56	26.39	151	3.8	1.1x10 <sup>14</sup>	6.82	290	2
2	1997/07/14	00:37	45.76	26.76	130	4.2	1.3x10 <sup>15</sup>	4.19	443	7
3	1997/11/11	23:06	45.84	26.88	65	3.5	2.43x10 <sup>13</sup>	8.24	224	1
4	1997/12/18	23:21	45.52	26.26	136	3.9	5.9x10 <sup>14</sup>	5.30	350	6
5	1998/01/14	05:01	45.71	26.60	143	4.0	2.3x10 <sup>14</sup>	9.01	234	8
6	1998/01/31	21:14	45.47	26.30	136	3.6	2.3x10 <sup>14</sup>	7.61	258	6
7	1998/02/19	14:34	45.70	26.73	132	3.7	1.3x10 <sup>14</sup>	4.71	397	1
8	1998/03/06	20:28	45.62	26.41	149	3.7	1.8x10 <sup>14</sup>	6.02	308	3
9	1998/06/06	20:34	45.69	26.57	147	3.5	1.9x10 <sup>13</sup>	6.90	269	0.4
10	1998/08/24	23:27	45.57	26.49	141	3.8	4.9x10 <sup>13</sup>	11.60	160	5
11	1998/09/21	13:49	45.73	26.66	141	3.8	1.9x10 <sup>14</sup>	7.47	264	5
12	1998/11/14	11:15	45.70	26.65	140	3.7	2.4x10 <sup>14</sup>	7.53	252	7
13	1998/12/12	10:55	45.40	26.30	147	3.5	5.7x10 <sup>14</sup>	5.65	361	5
14	1998/12/17	19:15	45.72	26.73	127	3.4	3.3x10 <sup>13</sup>	10.45	189	1
15	1998/12/28	21:50	45.64	26.60	141	3.5	7.0x10 <sup>12</sup>	9.65	197	0.4
16	1999/01/06	21:28	45.49	26.30	117	3.5	7.8x10 <sup>13</sup>	11.52	162	8
17	1999/01/09	0:04	45.48	26.41	140	3.5	8.9x10 <sup>13</sup>	9.16	215	4
18	1999/01/23	17:01	45.63	26.55	138	4.1	2.0x10 <sup>14</sup>	7.40	259	5
19	1999/03/09	17:51	45.66	26.56	153	3.6	7.0x10 <sup>13</sup>	7.14	261	2
20	1999/03/17	07:01	45.62	26.48	153	3.8	1.8x10 <sup>14</sup>	6.49	286	3
21	1999/03/23	09:11	45.66	26.55	150	4.0	1.2x10 <sup>15</sup>	3.88	491	4
22	1999/04/04	01:21	45.63	26.55	150	3.7	3.6x10 <sup>14</sup>	8.13	233	13
23	1999/04/15	02:21	45.83	26.84	88	3.7	1.4x10 <sup>14</sup>	9.11	200	8
24	1999/04/30	22:32	45.53	26.24	143	3.7	1.1x10 <sup>14</sup>	5.57	277	2
25	1999/05/05	16:21	45.67	26.56	142	3.5	4.0x10 <sup>13</sup>	6.72	277	1
26	1999/06/06	12:01	45.51	26.32	136	3.4	1.32x10 <sup>13</sup>	11.23	165	1
27	1999/06/22	08:02	45.67	26.46	153	3.7	3.6x10 <sup>14</sup>	6.57	310	5
28	1999/07/15	7:36	45.58	26.46	145	3.7	1.3x10 <sup>14</sup>	5.26	353	1
29	1999/10/12	23:48	45.67	26.41	154	3.7	1.7x10 <sup>14</sup>	7.34	374	1
30	1999/11/24	03:57	45.74	26.78	103	3.5	1.47x10 <sup>14</sup>	10.94	186	10
31	1999/12/17	16:06	45.74	26.72	75	3.5	2.7x10 <sup>14</sup>	8.12	242	8
32	2000/05/13	23:36	45.62	26.79	89	3.8	2.3x10 <sup>14</sup>	7.70	259	6
33	2000/05/28	19:08	45.79	26.64	81	3.2	4.0x10 <sup>13</sup>	10.62	166	4
34	2000/07/01	20:50	45.81	26.80	64	3.4	1.5x10 <sup>15</sup>	6.88	283	29
35	2000/07/27	02:39	45.77	26.74	136	3.7	4.8x10 <sup>13</sup>	7.70	302	1
36	2000/08/06	05:09	45.54	26.36	148	3.9	9.3x10 <sup>13</sup>	6.33	299	2
37	2000/10/12	14:56	45.66	26.59	141	3.9	4.0x10 <sup>14</sup>	7.06	217	2
38	2000/12/19	15:29	45.48	26.36	143	3.8	1.5x10 <sup>14</sup>	3.91	489	0.6
39	2000/12/28	00:17	45.73	26.73	130	3.6	8.0x10 <sup>13</sup>	3.94	466	0.3
40	2001/01/17	19:32	45.70	26.46	158	3.9	2.0x10 <sup>14</sup>	4.74	407	1
41	2001/02/03	20:56	45.74	26.67	143	3.8	8.40x10 <sup>13</sup>	10.22	204	4

42	2001/02/27	19:19	45.67	26.46	164	3.8	6.5x10 <sup>13</sup>	8.14	237	2
43	2001/03/18	06:33	45.51	26.21	157	4.1	8.7x10 <sup>14</sup>	4.64	452	4
44	2001/03/28	22:07	45.77	26.80	136	4.3	5.0x10 <sup>14</sup>	5.91	315	7
45	2001/05/20	03:59	45.59	26.45	154	4.2	1.4x10 <sup>15</sup>	5.10	390	10
46	2001/07/06	15:50	45.53	26.28	160	3.9	1.2x10 <sup>14</sup>	5.91	320	2
47	2001/07/23	19:58	45.82	26.81	145	3.8	6.8x10 <sup>13</sup>	4.74	422	1
48	2001/07/29	00:30	45.58	26.54	137	3.6	6.6x10 <sup>13</sup>	8.34	240	2
49	2001/09/25	18:04	45.48	26.32	151	3.8	1.9x10 <sup>14</sup>	3.56	562	1
50	2001/09/28	07:36	45.70	26.64	89	3.4	1.5x10 <sup>14</sup>	10.40	178	12
51	2001/10/17	15:35	45.69	26.51	160	3.9	5.7x10 <sup>15</sup>	5.90	400	39
52	2001/12/14	11:38	45.79	26.74	69	3.5	1.7x10 <sup>13</sup>	11.27	162	2
53	2002/01/25	10:06	45.62	26.72	129	4.0	2.0x10 <sup>14</sup>	4.81	406	1
54	2002/03/16	22:39	45.55	26.46	143	4.3	2.7x10 <sup>15</sup>	3.50	615	5
55	2002/05/15	04:26	45.55	26.36	153	4.0	2.6x10 <sup>14</sup>	5.83	299	10
56	2002/05/26	00:24	45.73	26.79	118	3.3	2.3x10 <sup>13</sup>	10.31	176	2
57	2002/06/14	23:49	45.64	26.57	133	4.0	2.8x10 <sup>14</sup>	7.10	301	5
58	2002/07/14	20:18	45.52	26.43	126	3.9	1.8x10 <sup>14</sup>	8.21	235	6
59	2002/08/04	06:25	45.66	26.49	158	3.9	1.5x10 <sup>14</sup>	4.61	406	1
60	2002/08/05	21:02	45.53	26.47	139	3.8	2.1x10 <sup>14</sup>	6.42	262	5
61	2002/08/16	08:18	45.53	26.52	129	3.7	2.4x10 <sup>14</sup>	8.61	216	10
62	2002/08/27	06:46	45.60	26.43	149	4.0	1.2x10 <sup>14</sup>	9.04	225	5
63	2002/09/10	15:09	45.73	26.81	129	4.0	1.3x10 <sup>14</sup>	4.27	474	1
64	2002/11/03	20:30	45.74	26.86	90	4.0	9.0x10 <sup>14</sup>	7.77	244	27
65	2002/11/27	18:56	45.55	26.49	146	3.6	2.1x10 <sup>14</sup>	7.33	258	5
66	2002/12/15	13:37	45.74	26.70	109	3.6	1.9x10 <sup>14</sup>	10.33	178	15
67	2002/12/23	19:32	45.56	26.46	114	3.5	3.7x10 <sup>13</sup>	14.72	123	9
68	2002/12/30	15:41	45.69	26.57	153	4.1	2.8x10 <sup>15</sup>	6.31	292	50
69	2003/01/03	03:05	45.48	26.29	139	3.7	1.3x10 <sup>14</sup>	7.08	269	3
70	2003/01/05	04:27	45.80	26.73	95	3.7	3.8x10 <sup>14</sup>	9.30	200	21
71	2003/04/06	06:02	45.59	26.51	142	3.8	8.4x10 <sup>13</sup>	9.50	207	4
72	2003/05/02	20:34	45.63	26.49	152	3.8	1.5x10 <sup>14</sup>	7.27	288	3
73	2003/05/19	08:38	45.64	26.51	148	3.9	2.3x10 <sup>14</sup>	4.62	423	1
74	2003/05/26	12:36	45.73	26.67	138	3.8	1.3x10 <sup>14</sup>	9.76	191	8
75	2003/08/02	01:32	45.59	26.47	149	4.1	5.9x10 <sup>14</sup>	4.15	455	3
76	2003/08/27	13:15	45.61	26.46	151	3.8	2.6x10 <sup>14</sup>	4.94	410	2
77	2004/01/21	05:49	45.52	26.46	118	4.1	7.1x10 <sup>14</sup>	7.21	254	19
78	2004/02/13	17:48	45.68	26.67	134	3.8	2.0x10 <sup>14</sup>	8.24	246	6
79	2004/03/17	23:42	45.63	26.62	146	4.1	9.5x10 <sup>14</sup>	3.80	509	3
80	2004/04/02	03:21	45.68	26.59	147	3.8	3.1x10 <sup>13</sup>	7.77	239	1
81	2004/04/04	06:41	45.68	26.50	150	4.3	6.6x10 <sup>14</sup>	4.39	435	4
82	2004/04/06	22:35	45.64	26.55	141	3.9	6.5x10 <sup>13</sup>	8.93	211	3
83	2004/04/15	00:54	45.60	26.57	101	3.2	1.6x10 <sup>13</sup>	10.66	179	1
84	2004/04/22	16:08	45.44	26.39	124	3.7	8.1x10 <sup>13</sup>	8.73	215	4
85	2004/06/03	21:43	45.79	26.84	62	2.9	2.9x10 <sup>13</sup>	14.50	125	7
86	2004/07/02	01:38	45.68	26.81	108	3.8	1.6x10 <sup>14</sup>	9.48	219	7
87	2004/09/12	04:26	45.47	26.33	145	3.2	1.9x10 <sup>14</sup>	6.45	409	1
88	2004/10/24	19:56	45.44	26.39	153	4.4	7.5x10 <sup>14</sup>	2.85	651	1
89	2004/11/17	11:31	45.72	26.73	131	4.4	1.9x10 <sup>15</sup>	7.04	270	42
90	2005/01/10	10:05	45.75	26.79	112	3.5	1.3x10 <sup>14</sup>	10.41	189	8
91	2005/01/10	12:08	45.67	26.60	99	3.7	4.2x10 <sup>14</sup>	8.93	202	22
92	2005/01/29	01:34	45.62	26.38	76	3.4	2.8x10 <sup>14</sup>	14.35	128	58
93	2005/02/17	07:06	45.57	26.59	110	3.7	3.6x10 <sup>14</sup>	8.30	229	13
94	2005/03/06	22:32	45.63	26.52	155	4.3	1.1x10 <sup>15</sup>	3.94	493	4
95	2005/03/07	20:48	45.63	26.50	125	3.5	2.2x10 <sup>14</sup>	12.91	144	32
96	2005/04/15	19:58	45.62	26.52	144	3.7	4.5x10 <sup>13</sup>	5.83	337	0.5
97	2005/05/09	06:53	45.50	26.28	143	4.1	4.2x10 <sup>14</sup>	6.93	286	8
98	2005/05/14	06:36	45.65	26.49	147	4.2	7.2x10 <sup>14</sup>	4.86	405	5
99	2009/04/26	23:19	45.69	26.64	104	3.8	1.6x10 <sup>14</sup>	4.92	270	4
100	2013/04/21	08:09	45.67	26.59	132	3.9	1.45x10 <sup>15</sup>	5.86	181	107
101	2010/05/08	00:22	45.70	26.56	92	3.5	2.7x10 <sup>14</sup>	8.12	260	7
102	2010/08/06	15:55	45.69	26.58	88	3.5	2.6x10 <sup>14</sup>	7.86	268	6
103	2013/04/25	17:12	45.51	26.27	144	3.6	5.63x10 <sup>14</sup>	7.24	146	79
104	2013/06/23	06:16	45.50	26.32	136	3.2	1.24x10 <sup>14</sup>	10.93	96	61
105	2013/07/12	18:02	45.52	26.37	137	3.6	6.38x10 <sup>14</sup>	7.14	156	74
106	2013/09/20	18:08	45.74	26.6	94	3.3	1.09x10 <sup>14</sup>	8.28	255	3
107	2013/10/22	07:16	45.75	26.69	132	3.4	2.21x10 <sup>14</sup>	7.81	140	32
108	2013/11/07	14:34	45.75	26.67	135	3.7	7.37x10 <sup>14</sup>	8.01	133	137
109	2013/12/27	07:58	45.74	26.65	93	3.5	3.87x10 <sup>14</sup>	8.65	122	94
110	2014/03/31	15:48	45.60	26.45	151	3.3	1.73x10 <sup>14</sup>	8.71	131	34

111	2014/04/07	12:59	45.51	26.26	119	3.7	7.61x10 <sup>14</sup>	7.73	155	89
112	2014/06/29	14:38	45.64	26.54	144	3.3	1.38x10 <sup>14</sup>	7.90	133	26
113	2014/08/02	16:59	45.73	26.62	102	3.3	1.22x10 <sup>14</sup>	9.40	224	5
114	2014/09/23	05:57	45.73	26.57	91	3.3	1.05x10 <sup>14</sup>	11.99	177	8
115	2015/01/09	08:19	45.72	26.63	102	3.4	2.16x10 <sup>14</sup>	9.31	227	8
116	2015/01/24	07:55	45.70	26.57	88	4.5	8.80x10 <sup>15</sup>	2.94	722	10
117	2015/06/16	05:54	45.71	26.58	88	3.2	9.79x10 <sup>13</sup>	11.58	185	7
118	2015/09/15	21:56	45.72	26.62	98	3.2	9.20x10 <sup>13</sup>	12.44	171	8
119	2016/03/11	22:00	45.70	26.59	93	3.0	5.17x10 <sup>13</sup>	12.96	164	5
120	2016/09/20	12:34	45.77	26.69	79	3.3	1.34x10 <sup>14</sup>	12.99	163	14
121	2016/09/20	12:37	45.77	26.70	76	3.1	5.46x10 <sup>13</sup>	10.96	193	3
122	2016/10/14	12:45	45.70	26.58	98	2.8	3.95x10 <sup>13</sup>	15.79	134	7
123	2017/01/11	03:17	45.72	26.67	87	3.2	1.05x10 <sup>14</sup>	9.94	212	5

## **6 Rezultate, stadiul realizării obiectivului fazei, concluzii și propuneri pentru continuarea proiectului**

### **Rezultate**

Pentru parametrizarea sursei seismice vrancene am aplicat metodele relative ale rapoartelor spectrale și deconvoluției cu funcții Green empirice pe un set de 161 evenimente vrancene de adâncime intermediară care îndeplinesc condițiile cerute de metodele relative (Tabelul 1 din anexa conține toți parametrii de sursă calculați).

Principalul obiectiv al acestui studiu constă în analiza proprietăților de scalare ce caracterizează sursa subcrustală vranceană prin integrarea unui set extins de date, practic, toate datele pe care le avem din studiile anterioare împreună cu datele prelucrate în cadrul acestui studiu.

Se evidențiază că procesul de rupere pentru cutremurele din Vrancea este rapid și eficient, atât pentru socurile moderate cât și pentru cele mari, conducând la valori mari ale căderii de tensiune dinamice și la valori mici ale dimensiunilor sursei.

Unul dintre cele mai importante rezultate ale analizei noastre se referă la faptul că relațiile de scalare moment seismic - magnitudine, moment seismic - raza sursei și moment seismic - cadere de tensiune par a fi auto-similare pe toată gama de magnitudine a setului de date analizat ( $2.8 \leq M_w \leq 7.7$ ).

### **Articole publicate (6)**

1. Emilia Popescu, Anica Otilia Placinta, Mircea Radulian, Felix Borleanu, Mihail Diaconescu, Source parameters of the earthquake sequence occurred close to the BURAR array (Romania) between 24 June and 1 July, Acceptata în *Annals of Geophysica*, 2017.

2. I.-A. Moldovan, D. Toma-Danila, A. P. Constantin, A.O.Placinta, E. Popescu, C. Ghita, M. Diaconescu, T. Moldoveanu, C. M. PAERELE - Seismic Risk Assessment for Large Romanian Dams on Bistrita and Siret Rivers and their Tributaries, în *STUDIA UNIVERSITATIS BABEȘ-BOLYAI. AMBIENTUM*, 1-2, pp. 57-73.

3. Paulescu D., Rogoza M., **Radulian M.**, Popa M., Digitized database of old seismograms recorded in Romania, *Acta Geophysica*, vol. 64 (4), 963-977, 2016.

### **Articole trimise spre publicare**

1.Mircea Radulian, Emilia Popescu, Anica Otilia Placinta, Iren Adelina Moldovan, Application of empirical Green's function deconvolution for the largest Vrancea intermediate –depth earthquakes occurred in the last ten years (publicata în revistele anunțate de **ELSEDIMA**, Cluj-Napoca, 2016).

2.Angela Petruta Constantin, I.-A. Moldovan, F. Lavigne, D. Grancher, R. Partheniu, Perception AND preparedness of the tsunami risk within the Black Sea (Romania), *Proc. of SGEM 2017*, Albena, Bulgaria.

3.M. Diaconescu, G.M. Craiu, E. Oros, A. Craiu, E. G. Constantinescu, Seismicity of Strei-Hateg basin, *Proc. of SGEM 2017*, Albena, Bulgaria.

## Prezentari la confrunte:

### ESC 35th Gen. Assembly, Trieste, Italia, 4 – 11 septembrie 2016

1. E. Popescu, A. O. Placinta, F. Borleanu, M. Radulian, I. A. Moldovan, A. Coman, Scaling source properties of the earthquake sequence triggered on 22 November 2014 in the South-Eastern Carpathians foredeep area (Romania), ESC2016-118.
2. M. Radulian, E. Popescu, A. O. Placinta, F. Borleanu, Source scaling in the Vrancea subcrustal nest (Romania): an overview over the last 75 years, ESC2016-121.
3. **Ardeleanu L.**, The high frequency waveform inversion – an adequate tool for estimating the focal mechanism of the weak crustal earthquakes of Vrancea region (Romania).
4. Bălă A., Tătaru D., Grecu B., Models of crustal structure in western part of Romania using joint inversion of Green functions and receiver functions, ESC2016-78.
5. Oros E., M. Popa, C. Ghita, M. Rogozea, A. Rau, C. Neagoe, Catalog of focal mechanism solutions for crustal earthquakes. Intra-Carpathian region of Romania, ESC2016-142 (poster)
6. N. Poiata, D. Tataru, B. Grecu, M. Radulian, M. Popa, Anatomy of 2013 Galati seismic swarm in southeastern Romania – implications for understanding the triggering mechanism, ESC2016-542
7. F. Borleanu, A. O. Placinta, M. Rogozea, M. Popa, M. Radulian, Multi-Channel correlation analysis for November, 2014 South-Eastern Carpathians (Romania) sequence, ESC2016-596.
8. F. Borleanu, L. De Siena, C. Thomas, M. Popa, M. Radulian, Spatial distribution of scattering and absorption features revealed by coda waves from intermediate depth earthquakes in the Vrancea region (Romania), ESC2016-594.

### 2. 25 Noiembrie 2016- GEO 2016, Bucharest

1. Diaconescu M., Oros E., Craiu A., Seismicity of southern Apuseni Mountains.

### 3. ACADEMIA ROMÂNĂ Secția de Științe Geomice Comitetul National "Terra în Viitor: Cercetări pentru Dezvoltarea Durabilă Globală"

### Evaluarea integrată a riscurilor naturale din România – 40 de ani de la cutremurul din 4 martie 1977 – 4 martie 2017.

1. Prof. M. Radulian, *Sursa seismică vrânceană: evolutia cunoasterii de la 1977 până în prezent-prezentare orală.*

### 4. EGU2017-23-28 April, Vienna, Austria

#### EGU2017-11793

1. M. Radulian, E. Popescu, A.O. Placinta, Source scaling properties in upper segment of the Vrancea subcrustal nest (Romania), 23-28 April, Vienna, Austria.  
E. 2. Oros, M. Popa, M. Diaconescu, M. Radulian, Active stress field and seismotectonic features in Intra-Carpathian region of Romania, 23-28 April, Vienna, Austria.

### 5.17 th International Multidisciplinary Scientific Geoconference SGEM 2017, Albena, Bulgaria.

1. E.G. Constantinescu, M. Diaconescu, B. Grecu, Geotectonic setting of some seismological observatories from the eastern part of Romania, SGEM 2017, 27 June- 6 July, Albena, Bulgaria.
2. A. Bala, D. Toma-Danila, B. Grecu, D. Tataru, Assessing the crustal model and geodynamics behavior in western part of Romania, SGEM 2017, 27 June- 6 July, Albena, Bulgaria.

### 6. CNISS-14-17 June 2017

1. M. Radulian, How predictable are Vrancea large earthquakes?
2. M. Radulian, E. Popescu, A. O. Plăcintă, M. Popa, Seismicity and source properties investigation since the Vrancea earthquake of 4 March 1977 to the present.

## **Stadiul realizării obiectivului fazei**

Obiectivul fazei a fost realizat integral.

### **Concluzii**

Principalul obiectiv al acestei lucrari consta in analiza proprietatilor de scalare ce caracterizeaza sursa subcrustala vranceana prin integrarea unui set extins de date, practic, toate datele pe care le avem din studiile anterioare impreuna cu datele prelucrate in acestui studiu. Cele mai multe dintre evenimentele din setul de date analizat sunt de magnitudine mica pana la moderata. Pentru astfel de evenimente, de obicei se considera acceptabil un model cu rupere circulara.

O problema esentiala in investigarea proprietatilor de scalare a sursei seismice intr-o anumita zona seismogena este intervalul de magnitudine pentru care sunt definite in mod corespunzator legile de scalare. De exemplu, au existat discutii si controverse cu privire la schimbarea legilor de scalare pentru cutremure mici pana la moderate si cutremure mari din crusta (Scholz, 1982, 1997 si Wang si Ou, 1998). Unul dintre cele mai importante rezultate ale analizei noastre este extinderea legilor de scalare pe intreaga gama de magnitudine, de la cutremure mici si moderate până la cutremure majore. Aceasta extindere nu este triviala daca avem in vedere faptul ca sunt presupuse clase diferite de modele de seismogeneza in sursa vranceana pe domenii diferite de magnitudine. De exemplu, se presupune existenta unui salt de la procese de rupere de tip fisura la procese de rupere de tip asperitate la scara cutremurelor mici si moderate si a unui salt la procese de rupere de tip percolatie la scara cutremurelor majore (Trifu si Radulian, 1991). Cu toate acestea, relatiile de scalare moment seismic - magnitudine, moment seismic - raza sursei si moment seismic- cadere de tensiune indica o auto-similaritate pe toată gama de magnitudine a setului de date analizat ( $2.8 \leq M_w \leq 7.7$ ).

Valorile caderii de tensiune estimate din raza sursei folosind metoda rapoartelor spectrale sau spectrele de deplasare ale sursei prezinta o dispersie foarte mare, intre 0,1-1.000 MPa. Cu toate acestea, daca luam in considerare erorile inerente si sistematice in special pentru cutremurele mici (subestimarea frecventei de colt care duce la scaderea caderii de tensiune) si erorile cauzate de variatiile parametrilor de sursa care au fost considerate similare in lucrarea noastra (viteza de rupere sau geometria sursei), putem spune ca avem un model cu o cadere de tensiune constanta, cu o valoare medie in jurul valorii de 10 MPa. Aceasta este cel mai probabil o valoare caracteristica pentru o cădere de tensiune statica.

Cu toate acestea nu putem exclude ca unele valori ale caderii de tensiune sunt mai degraba dinamice decat statice pentru evenimentele moderate daca presupunem ca eliberarea de tensiune a fost cauzata, in principal, de ruperea unei singure asperitati. Intr-adevar, parametrii obtinuti de Gusev et al. (2002) folosind date inregistrate pe un domeniu larg, regionale si teleseime (de la sute la mii de km) pentru 12 cutremure moderate si mari din Vrancea sunt sistematic mai mici (frecventa de colt) si respectiv mai mari (durata sursei) decat in cazul determinarilor din studiul nostru. Estimările parametrilor de sursa bazate pe analiza spectrala a sursei pentru formele de unda in camp indepartat sunt, in principal, controlate de aria intregii surse, in timp ce metoda EFG este mai sensibila la asperitatile majore locale care actioneaza in procesul de rupere. Pe aceasta cale putem explica valorile caderilor de tensiune neobisnuit de mari pentru cutremurele de marime moderata din analiza noastra (pana la sute de MPa dupa cum se vede in Fig.7).

Oth et al. (2007) au estimat valorile dinamice ale caderii de tensiune pentru cutremurele majore din Vrancea, valori care sunt de aproximativ zece ori mai mari decat valorile statice pe care le folosim in lucrarea noastra (Figura 7). Daca analizam toate aceste aspecte, ajungem la o concluzie importanta, cu o semnificatie speciala in evaluarea riscului seismic si a caracteristicilor miscarii solului: procesul de rupere pentru cutremurele din Vrancea este rapid si eficient atat pentru cutremurele moderate cat si pentru cele mari, ceea ce implica valori mari ale caderii de tensiune dinamice si respectiv valori scăzute ale dimensiunii sursei.

Responsabil proiect

Dr. Emilia Popescu, CS gr.I