

Contractor:

Cod fiscal : (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: 1. Optimizarea tehnicilor de calcul pentru determinarea parametrilor de sursa

Termen: 15.08.2016

1. **Obiectivul proiectului:** Combinarea algoritmilor de corelatie incrucisata cu algoritmi de deconvolutie relativa (rapoarte spectrale si functii Green empirice) in scopul optimizarii constrangerii proprietatilor de sursa in cazul secventelor crustale si subcrustale.
2. **Rezultate preconizate pentru atingerea obiectivului:** Se vor evalua parametrii sursei seismice ai cutremurelor din crusta si mantaua terestra folosind tehnicile de corelare incrucisata a formelor de unda si astfel abaterile heterogenitatilor vitezei de-a lungul parcursului razelor au acelasi efect asupra formelor de unda si abaterea in citirea fazelor poate fi corelata; 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:** Parametrizarea sursei cutremurelor secventei seismice de la Marasesti din noiembrie 2014-ianuarie 2015: studiu de caz; corelarea proprietatilor parametrilor de sursa ai gruparilor seismice cu seismotectonica zonei in care acestea sunt generate;
4. **Rezultate preconizate pentru atingerea obiectivului fazei:** Utilizarea metodelor de corelatie si a tehnicilor relative pentru estimarea parametrilor de sursa ai cutremurelor secventei de la Marasesti din noiembrie 2014-ianuarie 2015; relatiile de scalare ale parametrilor de sursa si incadrarea lor in tendintele generale ale scalarilor din alte zone din Romania si din intreaga lume.
5. **Rezumatul fazei:**

Estimarea parametrilor de sursa in cazul secventei de la Marasesti din noiembrie 2014-ianuarie 2015 si a zonelor adiacente

Seismicitatea crustala din zona avanfosei Carpatilor este dispersata pe intreaga suprafata dintre falia Trotusului si falia Intramoiesica. Cutremurele crustale sunt generate de variate tipuri de structuri cu cinetica diferita (Matenco et al, 2007). Ca o consecinta, mecanismele focale nu evidentiaza un regim de tensiune consistent: falierea normala predomina pe flancurile de est si de sud ale Bazinului Focsani, falierea inversa in zona adiacenta cutremurelor subcrustale vrancene iar falierea de tip alunecare in directie este observata catre margine.

Aliniamentul Galati-Marasesti-Braila este unul dintre cele mai importante aliniamente seismice active, situat in fata curbii Carpatilor Orientali; aici se produc relativ frecvent cutremure slabe si moderate, care depasesc rar magnitudinea 4 (Raileanu et al., 2009). Cutremurele sunt mai mult sau mai putin grupate de-a lungul faliei Peceneaga-Camena si a satelitelor ei, care delimiteaza marginea dintre Platforma Moesica si Orogenul Dobrogei de Nord (Polonic, 1986).

O secventa majora a fost generata in partea de nord-vest a aliniamentului Marasesti-Galati-Braila incepand cu 22 noiembrie 2014. Socul major al secventei produs in 22 noiembrie 2014 (ora 19:14, $M_L = 5.7$, $h = 41$ km) este cel mai mare eveniment inregistrat in zona, atat in perioada istorica cat si in cea instrumentala. Exista unele sugestii (Mitrofan et al. 2014) ca evenimentul din 1943 (28 aprilie) care in catalogul Romplus (Oncescu et al, 1999) este considerat ca eveniment subcrustal (100 km adancime, magnitudine 5,9), este de fapt un eveniment generat in crusta (~ 40 km adancime, magnitudine ~ 5), aproape de epicentrul evenimentului din 2014. In favoarea acestei ipoteze este localizarea neobisnuita a epicentrului (decalaj cu mai mult de 40 km la est fata de zona epicentrala a cutremurelor subcrustale din Vrancea precum si distributia intensitatii macroseismice (Petrescu 1943, 1944).

Secventa din noiembrie 2014-ianuarie 2015 din zona crustala Marasesti

Secventa seismica crustala care a inceput cu socul principal generat in 22 noiembrie 2014 (19:14, $h=39$ km, $M_L=5.7$, 45.86, 27.16) s-a produs la marginea nord-vestica a aliniamentului Mărășești-Galați-Brăila. Evenimentul principal a fost urmat de nenumarate replici pana in ianuarie 2015. Cele mai mari replici au fost inregistrate in 22 noiembrie 2014 ($M_L=3.1$), 7 decembrie 2014 ($M_L=4.5$) si 19 ianuarie 2015 ($M_L=3.8$). Harta din **Fig. 1** prezinta epicentrele cutremurelor secventei de la Marasesti (cluster 1) impreuna cu evenimentele zonei adiacente (cluster 2 si cluster 3) considerate in acest studiu.

Scopul studiului este acela de determinare a parametrilor sursei seismice in cazul a 15 cutremure semnificative (cele mai mari) cu forme de unda bine inregistrate in cazul secventei de la Marasesti si in cazul a doua evenimente produse in afara secventei la sud (cutremurul produs in 12 ianuarie 2015 cu trei evenimente co-localizate) si la nord (cutremurul produs in 29 iunie 2015 cu un evenimente co-localizat). Evenimentele selectate sunt trecute in **Tabelul 1**.

Coordonatele hipocentrale pentru 15 cele mai mari evenimente ale secventei precum si pentru 6 cutremure din zona adiacenta s-au determinat cu un program de localizare în grup, folosind corecțiile la stații calibrate pe un set de 50 de cutremure crustale produse în regiunea Râmnicu Sărat. Aria replicilor este alungita pe directia NV-SE urmarind directia planului de falie din mecanismul focal (**Fig. 2**).

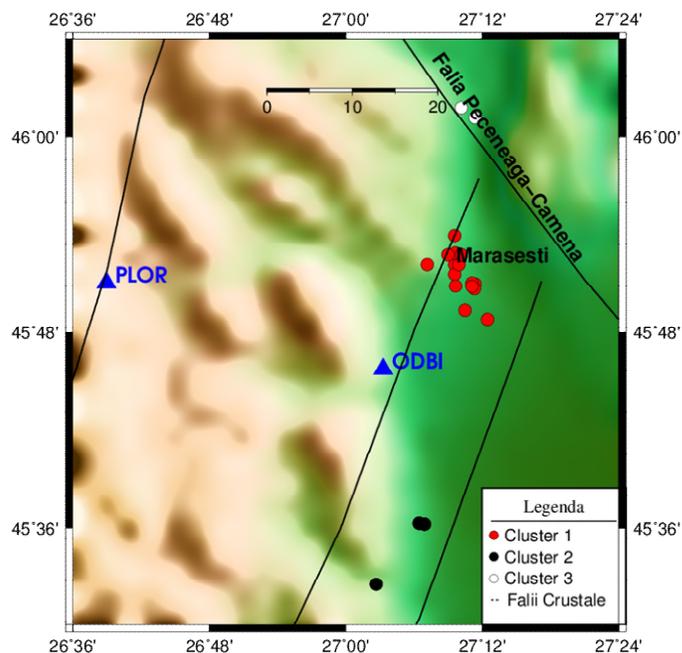


Fig. 1. Distributia epicentrelor evenimentelor studiate (*Tabelul 1*) impreuna cu statiile seismice (apartinand Retelei Seismice Nationale) apropiate. Liniile negre reprezinta falii crustale majore.

Tabelul 1 Parametrii hipocentrali ai cutremurelor studiate. Cu caractere ingrosate sunt indicate cutremurele principale

| No | An/luna/zi | hh:mm:ss | Lat (⁰ N) | Lon (⁰ E) | h (km) | M _L /M _w |
|-----------|-------------------|-----------------|-----------------------|-----------------------|-----------|--------------------------------|
| 1 | 2014/11/22 | 19:14:17 | 45.8700 | 27.1600 | 39 | 5.7/5.4 |
| 2 | 2014/11/22 | 19:27:39 | 45.8700 | 27.1200 | 40 | 2.1/2.1 |
| 3 | 2014/11/22 | 20:24:47 | 45.8600 | 27.1600 | 34 | 2.8/2.6 |
| 4 | 2014/11/22 | 20:30:56 | 45.8500 | 27.1900 | 36 | 3.1/2.7 |
| 5 | 2014/11/23 | 01:14:39 | 45.8819 | 27.1600 | 35 | 2.5/2.4 |
| 6 | 2014/11/23 | 02:21:05 | 45.8509 | 27.1852 | 34 | 2.5/2.4 |
| 7 | 2014/11/23 | 04:01:58 | 45.8230 | 27.1750 | 31 | 2.6/2.5 |
| 8 | 2014/11/23 | 05:27:58 | 45.8450 | 27.1889 | 35 | 2.4/2.3 |
| 9 | 2014/11/23 | 10:16:14 | 45.8137 | 27.2083 | 30 | 2.7/2.5 |
| 10 | 2014/11/23 | 23:22:49 | 45.8477 | 27.1852 | 33 | 2.3/2.3 |
| 11 | 2014/11/24 | 00:45:06 | 45.8700 | 27.1660 | 34 | 2.4/2.3 |
| 12 | 2014/11/25 | 01:52:25 | 45.8480 | 27.1612 | 39 | 3.2/2.8 |
| 13 | 2014/12/07 | 21:04:05 | 45.8800 | 27.1700 | 40 | 4.5/3.4 |
| 14 | 2015/01/19 | 23:53:07 | 45.8800 | 27.1500 | 40 | 3.8/3.1 |
| 15 | 2015/01/20 | 02:52:47 | 45.8900 | 27.1600 | 34 | 2.2/2.2 |

| No | An/luna/zi | hh:mm:ss | Lat (⁰) | Lon (⁰ E) | h (km) | M _L /M _w |
|-----------|-------------------|-----------------|----------------------|-----------------------|-----------|--------------------------------|
| 16 | 2014/12/14 | 17:24:47 | 45.6050 | 27.1080 | 14 | 3.1/2.7 |
| 17 | 2014/12/14 | 18:24:34 | 45.6040 | 27.1160 | 16 | 2.6/2.5 |
| 18 | 2015/01/12 | 06:08:31 | 45.5420 | 27.0448 | 19 | 4.2/3.3 |
| 19 | 2015/01/18 | 22:41:40 | 45.4962 | 27.0243 | 31 | 1.8/2.0 |
| | | | | | | |
| No | An/luna/zi | hh:mm:ss | Lat (⁰) | Lon (⁰ E) | h (km) | M _L /M _w |

| | | | | | | |
|----|------------|-------|---------|---------|----|---------|
| 20 | 2015/06/29 | 22:20 | 46.0300 | 27.1700 | 21 | 4.0/3.2 |
| 21 | 2015/07/01 | 04:34 | 46.02 | 27.1900 | 17 | 3.2/2.8 |

Solutia de mecanism focal a socului principal al secventei obtinuta pe baza a 52 de semne ale primelor sosiri ale undelor P (**Fig. 2**) indica un mecanism focal de tip faliere normala. Axa comprimării este aproape verticala si axa dilatarii aproape orizontala. Planele nodale sunt orientate NV-SE si ambele sunt orientate pe directia aliniamentului Marasesti-Galati-Braila (MGB) (Havskov, J., Ottemöller, L., 2001).

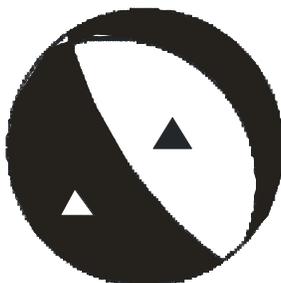


Fig. 2. Solutia de plan de falie a socului principal ($M_L=5.7$) al secventei de la Marasesti

Descrierea metodelor relative

Parametrii de sursa (*momentul seismic, raza sursei, durata ruperii, timpul de crestere, caderea de tensiune*) sunt obtinuti prin modelarea spectrelor de acceleratie/viteza si prin aplicarea metodelor relative de analiza.

Unele dintre metodele folosite pe larg în analiza spectrelor de acceleratie sunt metodele relative ale rapoartelor spectrale și deconvoluției cu funcții Green empirice. Această clasă de metode permite eliminarea efectelor de parcurs, amplasament și instrument pentru evenimentele principale prin deconvoluarea din formele de undă ale acestora a formelor de undă ale cutremurelor de magnitudine mai mică asociate, considerate funcții Green empirice. Cele două metode se aplică la perechi de cutremure localizate aproximativ în același loc și înregistrate de aceeași stații seismice. Condițiile pe care trebuie să le îndeplinească perechile șoc principal-funcție Green empirică sunt urmatoarele:

- să aibă forme de undă similare, deci mecanisme de producere asemănătoare;
- să aibă focarele cât mai apropiate;
- diferența dintre magnitudinea evenimentului principal și a evenimentului funcție Green să fie de cel puțin o unitate de magnitudine;
- lățimea pulsului funcției Green empirice să fie suficient de mică în raport cu lățimea pulsului cutremurului principal pentru ca evenimentul Green să poată fi aproximat cu o funcție de tip delta.

Analiza de corelație a formelor de undă

Pentru identificarea perechilor de cutremure înregistrate la statii comune a fost aplicat algoritmul de corelare al formelor de unda. Acesta consta in determinarea coeficientului de corelare pentru înregistrările diferitelor evenimente la aceeași stație seismică. Conform lui Kearey et al., 2002, considerand doua forme de unda de o lungime finita in timp, x_i si y_i ($i=1,2,..n$), functia de corelare este data de:

$$\varphi_{xy}(\tau) = \sum_{i=1}^{n-\tau} x_{i+\tau} y_i \quad (-m < \tau < +m) \quad (1)$$

unde τ reprezinta decalajul iar m este valoarea decalajului maxim al functiei.

Distributia epicentrelor evenimentelor utilizate in studiu impreuna cu amplasarea statiilor seismice sunt reprezentate in **Fig. 1**. Conform parametrilor hipocentrali prezentati in **Tabelul 1** se pot diferentia 3 grupuri (cluster) de evenimente. Primul grup (evenimentele 1-15) apartin secventei seismice produse in perioada 22 noiembrie 2014 – 31 ianuarie 2015 in apropiere de orasul Marasesti. In afara socului principal a carui magnitudine a fost determinata ca fiind $M_w=5.4$ restul evenimentelor sunt caracterizate in general de magnitudini (M_w) mici, cuprinse intre 2.1 si 3.4, conform catalogului de cutremure Romplus (Oncescu si altii 1999). Cel de-al doilea grup (evenimentele 16-19) localizat la sud de orasul Marasesti cuprinde evenimente produse in perioada 14 decembrie 2014 – 18 ianuarie 2015 cu magnitudini cuprinse intre 2.0 si 3.3. Ultimul grup (evenimentele 20-21) este localizat la nord de orasul Marasesti, pe falia Peceneaga-Camena (magnitudini M_w de 3.2 respectiv 2.8).

Pentru determinarea gradului de similaritate intre evenimentele selectate in **Tabelul 1** au fost calculati coeficientii de corelare ai formelor de unda inregistrate la statii seismice comune. Mai jos sunt prezentate valorile coeficientilor de corelare impreuna cu formele de unda inregistrate de doua statii seismice, Odobesti (ODBI) si Plostina (PLOR) aflate in apropierea zonei epicentrale (**Fig. 3**). Statia seismica Odobesti este amplasata la o distanta aproximativa de 15.5 km fata de primul grup, la 18 km fata de cel de-al 2 lea si la 29 km fata de ultimul grup. Formele de unda inregistrate pentru evenimentele din **Tabelul 1** sunt caracterizate in general de valori ridicate ale raportului semnal-zgomot. **Fig. 3** prezinta formele de unda filtrate utilizand filtru trece Banda intre 0.5 si 15.0 Hz, inregistrate pe componenta verticala a statiei ODBI in ordinea inregistrarilor din **Tabelul 1**.

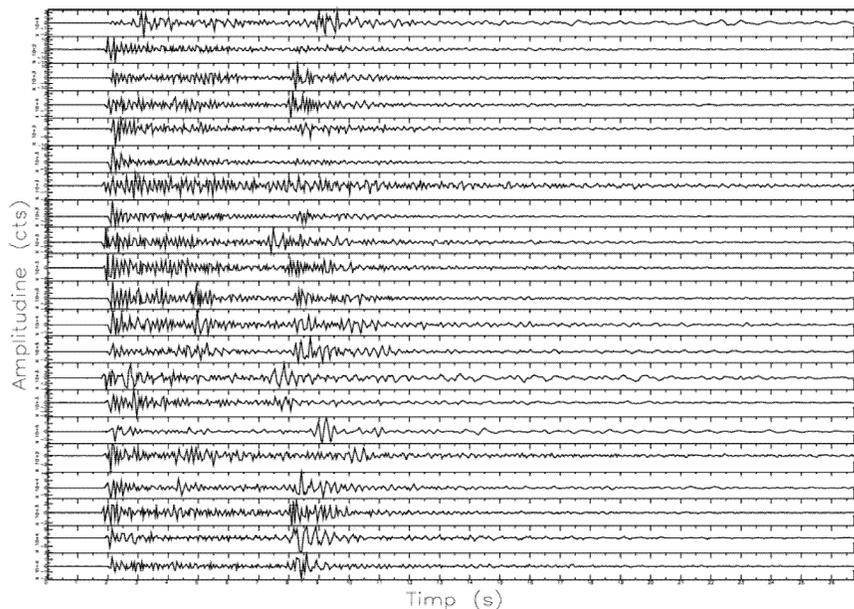


Fig. 3. Formele de unda (filtrate cu un filtru trece banda intre 0.5 si 15 Hz) inregistrate de componenta verticala a statiei ODBI pentru evenimentele din **Tabelul 1**.

Deși epicentrele primului grup (1-15-**Tab. 1**) sunt relativ apropiate in spatiu, formele de unda variaza vizibil de la un eveniment la altul. Variatiile pot fi puse pe seama diferentelor de localizare, neomogenitatilor laterale ale structurii sau diferentelor in procesul de rupere. Din aceasta cauza avem situatii diferite in procesul de deconvolutie: a) evenimente colocalizate dar corelarea este slaba - au fost obtinute functii de timp ale sursei numai pentru unele statii seismice in cazul evenimentelor principale 1, 4, 13 si 18 (**Fig 8a**); b) evenimente colocalizate cu

coeficienti de corelare mari - s-au obtinut functii de timp ale sursei foarte bune si la toate statiile in cazul evenimentelor principale 14 si 20 si functiile Green 15 si respectiv 21 (**Fig. 8b**).

Coeficientii de corelare au fost calculati pentru o fereastra de 15 s incepand cu o secunda inainte de timpul de sosire al undei P si aplicand un filtru trece banda intre 1 si 3 Hz. Reprezentarea coeficientilor de corelare este reprezentata in **Fig. 4** sub forma unei matrici de corelare. Rezultatele evidentiaza faptul ca evenimentul principal din 22 noiembrie 2014 prezinta un grad de similaritate scazut comparativ cu restul evenimentelor ($CC < 0.5$). Acest lucru este evidentiat chiar si la o examinare vizuala a formelor de unda din **Fig. 3**. Miscarea P in cazul socului principal incepe cu o faza de amplitudine mai mica care nu pare sa fie prezenta in formele de unda ale evenimentelor Green asociate. Corelatii cu $CC > 0.7$ sunt in general putine.

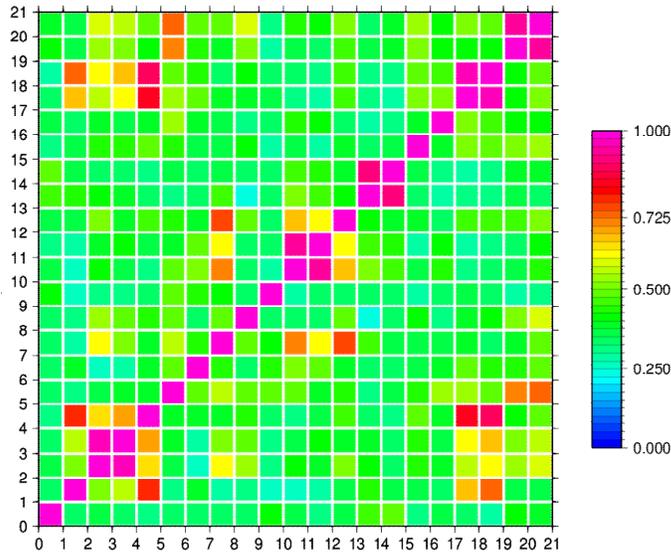


Fig. 4. Reprezentarea coeficientilor de corelare calculati la statia ODBI pentru evenimentele selectate in **Tabelul 1**.

Statia seismica Plostina este amplasata la o distanta aproximativa de 40 km fata de primul grup, si la 45 km fata de celelalte doua cluster. Formele de unda inregistrate pentru evenimentele din **Tabelul 1**, similar cazului precedent, sunt caracterizate in general de valori ridicate ale raportului semnal zgomot. **Fig. 5** prezinta formele de unda (filtrate utilizand filtru trece banda intre 0,5 si 15,0 Hz) inregistrate pe componenta verticala a statiei PLOR in ordinea inregistrarilor din **Tabelul 1**.

Pentru statia PLOR, coeficientii de corelare au fost calculati pentru o fereastra de 21 s incepand cu o secunda inainte de timpul de sosire al undei P si aplicand un filtru trece banda intre 1.0si 3.0 Hz. Matricea coeficientilor de corelare este reprezentata in **Fig. 6**. Se observa o tendinta de scadere a coeficientilor de corelare comparativ cu cei obtinuti la statia ODBI. Totusi, evenimentele ale caror forme de unda inregistrate de statia ODBI erau caracterizate de un grad mare de similaritate isi manifesta aceeasi tendinta si pentru inregistrările statiei PLOR (evenimentele 3 si 4, de exemplu).

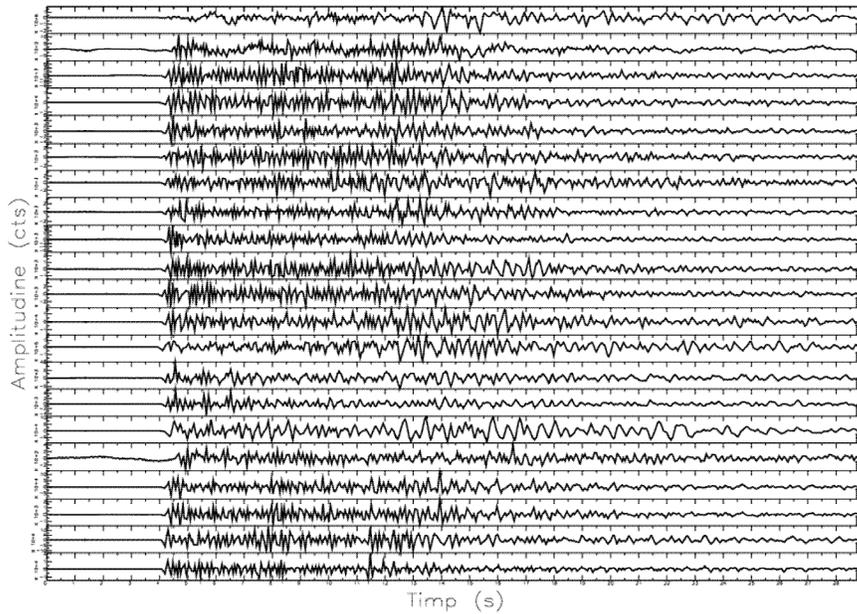


Fig. 5. Formele de unda (filtrate cu un filtru trece banda între 0.5si 15.0 Hz) înregistrate de componenta verticala a statiei PLOR pentru evenimentele din *Tabelul 1*.

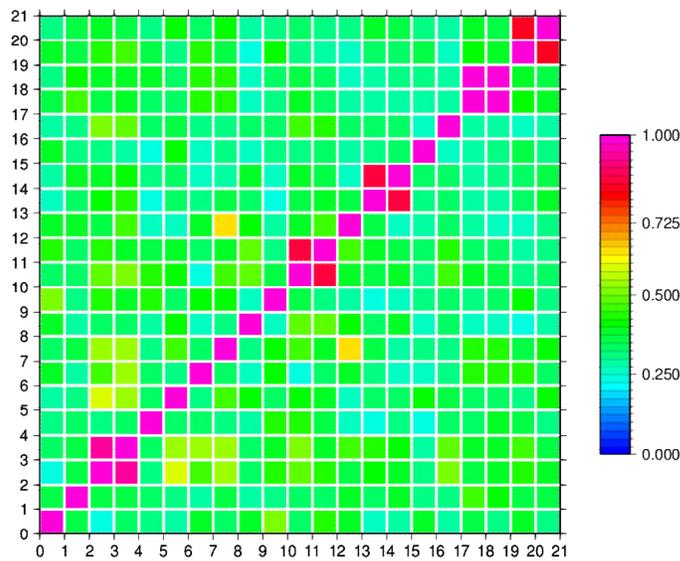


Fig. 6. Reprezentarea coeficientilor de corelare calculati la statia PLOR pentru evenimentele selectate in *Tabelul 1*.

Estimarea parametrilor sursei seismice

Pentru a testa eficienta metodelor relative in parametrizarea sursei seismice am folosit ca baza de date formele de unda ale cutremurelor secventei crustale la Marasesti (15 seisme) si 6 evenimente crustale din zona adiacenta (*Tabelul 1*) cu magnitudinile în domeniul $1.8 \leq M_L \leq 5.7$. Am aplicat metoda rapoartelor spectrale în cazul perechilor formate de cele 6 evenimente principale (1, 4, 13, 14, 18 si 20) cu evenimentele functii Green empirice prezentate în *Tabelul 1*.

In ceea ce priveste raportul observat, pentru fiecare pereche eveniment principal –functie Green empirica, s-au suprapus rapoartele spectrale la toate statiile, atat pentru undele P cat si

pentru undele S si aceste suprapuneri au fost aproximate cu o functie teoretica, operatie in urma careia s-au estimat rapoartele asimptotelor de frecventa joasa, “ a ”, frecventa de colt a cutremurului principal f_c^P precum si frecventa de colt a evenimentului functie empirica Green, f_c^G . Am determinat parametrii “ a ”, f_c^P , f_c^G pentru toate cazurile studiate (cele 6 evenimente principale precum si functiile empirice Green).

Evident, nivelul de joasa frecventa, a , si frecventa de colt, f_c^G , a EGF depind de perechea particulara de cutremure, in timp ce frecventa de colt a cutremurului principal, f_c^P , nu depinde daca efectul de directivitate al sursei este neglijabil.

Am aplicat acelorași perechi selectate pentru metoda rapoartelor spectrale și metoda deconvoluției cu funcții Green empirice și am obținut durata sursei τ si timpul de crestere $\tau_{1/2}$, pentru evenimentul principal, pentru mai multe stații și pentru toate perechile de cutremure colocalizate. Functia de timp a sursei este de tip unipuls in cazul celor 6 cutremure principale, fapt care vine in sprijinul ipotezei ca modelul de rupere este unul omogen in cele 6 cazuri, iar duratele ruperii sunt de P1= 0.37 s, P4=0.1614s si P13=0.26s, P14= 0.18s, P18=0.23s, P20=0.22s.

Exemple de rapoarte spectrale calculate si functii de timp ale sursei obtinute in cazul perechilor de cutremure formate de evenimentele principale cu evenimentele co-localizate sunt prezentate in **Fig. 7-8**.

Bazandu-ne pe marimile deja estimate, moment seismic, frecventa de colt si durata sursei, am determinat cu formulele cunoscute aria sursei si caderea de tensiune.

Parametrii de sursa calculati pentru cele 21 cutremure sunt prezentati in **Tabelul 2**. Razele surselor s-au calculat din frecventele de colt atat conform modelului Madariaga cat si modelului Brune, ca medii ale estimarilor pentru undele P si S.

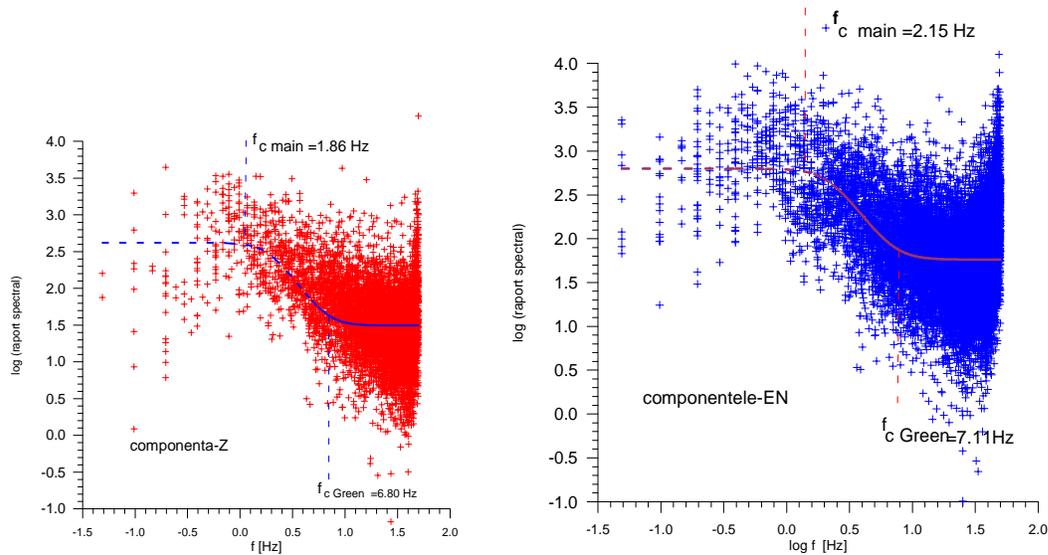


Fig 7. Rapoarte spectrale obtinute in cazul perechii cutremurului principal din 22 noiembrie 2014 ora 19:14 si functia empirica Green din 22 noiembrie ora 20:30 ($M_L=3.1$).

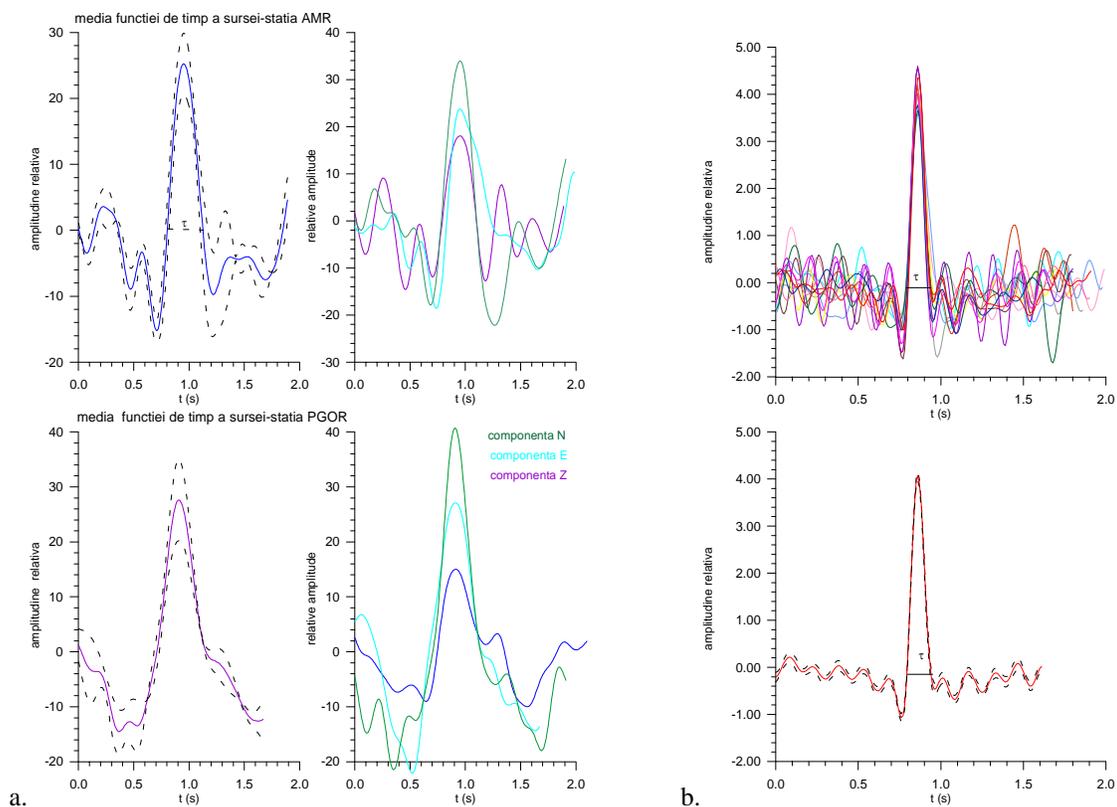


Fig. 8. Funcția de timp a sursei pentru cutremurul din 22 noiembrie 2014, ora 19:14 obținută prin deconvoluția cu funcția Green empirică din 22 noiembrie 2014, ora 20:30 la stațiile AMR –sus și PGOR-jos. Liniile întrerupte reprezintă eroarea standard; b) funcțiile de timp ale sursei pentru cutremurul din 19 ianuarie 2015, ora 23:53 obținute prin deconvoluția funcția Green empirică din 20 ianuarie 2015, ora 02:52 la toate stațiile–sus și media acestor pulsuri-jos. Liniile întrerupte reprezintă eroarea standard.

Tabelul 2. Parametrii de sursa ai celor 21 de cutremure analizate prin metode relative

| | an/luna/zi | hh:mm | M_w | M_L | M_0 (Nm) | f_c - raza sursei - unde P | | f_c - raza sursei - unde S | | Cadere de tensiune | |
|-----------|-------------------|--------------|------------|------------|-----------------|------------------------------|-------------|------------------------------|------------|---------------------------|---------------------------|
| | | | | | | f_c^P | r_p | f_c^S | r_s | $\Delta\sigma_P$ (MPa) | $\Delta\sigma_S$ (MPa) |
| 1 | 2014/11/22 | 19:14 | 5.4 | 5.7 | 1.76e+17 | 1.915 | 1236 | 2.035 | 914 | 41 | 101 |
| 2 | 2014/11/22 | 19:27 | 2.1 | 2.1 | 1.80e+13 | 16.435 | 144 | 17.980 | 88 | 2.6 | 11.6 |
| 3 | 2014/11/22 | 20:24 | 2.6 | 2.8 | 5.92e+13 | 10.07 | 215 | 8.620 | 168 | 2.6 | 5.5 |
| 4 | 2014/11/22 | 20:30 | 2.7 | 3.1 | 1.14e+14 | 9.245 | 234 | 8.715 | 166 | 3.5 | 11 |
| 5 | 2014/11/23 | 01:14 | 2.4 | 2.5 | 4.63e+13 | 11.14 | 194 | 8.86 | 163 | 2.8 | 4.7 |
| 6 | 2014/11/23 | 02:21 | 2.4 | 2.5 | 3.11e+13 | 11.75 | 184 | 10.12 | 143 | 2.2 | 4.7 |
| 7 | 2014/11/23 | 04:01 | 2.5 | 2.6 | 4.23e+13 | 9.21 | 213 | 8.96 | 147 | 1.9 | 5.8 |
| 8 | 2014/11/23 | 05:27 | 2.3 | 2.4 | 3.93e+13 | 11.47 | 189 | 10.97 | 132 | 2.5 | 7.5 |
| 9 | 2014/11/23 | 10:16 | 2.5 | 2.7 | 2.78e+13 | 8.92 | 220 | 10.08 | 130 | 1.14 | 5.5 |
| 10 | 2014/11/23 | 23:22 | 2.3 | 2.3 | 2.14e+13 | 15.00 | 144 | 10.61 | 136 | 3.13 | 3.72 |
| 11 | 2014/11/24 | 00:45 | 2.3 | 2.4 | 2.48e+13 | 11.15 | 194 | 12.08 | 120 | 1.49 | 6.28 |
| 12 | 2014/11/25 | 01:52 | 2.8 | 3.2 | 2.21e+14 | 6.48 | 303 | 6.79 | 193 | 3.46 | 13.45 |
| 13 | 2014/12/07 | 21:04 | 3.4 | 4.5 | 2.39e+15 | 3.805 | 622 | 3.979 | 397 | 4.35 | 16.7 |
| 14 | 2015/01/19 | 23:53 | 3.1 | 3.8 | 7.55e+14 | 5.674 | 417 | 5.382 | 294 | 4.56 | 13.00 |
| 15 | 2015/01/20 | 02:52 | 2.2 | 2.2 | 5.12e+13 | 15.83 | 137 | 14.91 | 97 | 8.71 | 24.5 |

| | | | | | | | | | | | |
|-----------|-------------------|--------------|------------|------------|-----------------|--------------|------------|--------------|------------|-------------|--------------|
| 16 | 2014/12/14 | 17:24 | 2.7 | 3.1 | 1.30e+14 | 8.25 | 236 | 6.10 | 213 | 4.33 | 5.89 |
| 17 | 2014/12/14 | 18:24 | 2.5 | 2.6 | 4.83e+13 | 7.30 | 266 | 9.69 | 134 | 1.12 | 8.78 |
| 18 | 2015/01/12 | 06:08 | 3.3 | 4.2 | 7.43e+14 | 4.463 | 402 | 4.690 | 256 | 5 | 19.4 |
| 19 | 2015/01/18 | 22:41 | 2.0 | 1.8 | 8.71e+12 | 17.06 | 115 | 16.45 | 80 | 2.5 | 7.4 |
| 20 | 2015/06/29 | 22:20 | 3.2 | 4.0 | 4.28e+14 | 5.13 | 366 | 5.20 | 241 | 3.81 | 13.38 |
| 21 | 2015/07/01 | 04:34 | 2.8 | 3.2 | 6.24e+13 | 7.20 | 249 | 6.80 | 176 | 1.76 | 5.00 |

Relatii de scalare ale parametrilor sursei seismice

Parametrii de sursa estimati in acest proiect impreuna cu relatiile lor de scalare sunt investigate ca indicatori ai particularitatilor geotectonice ale avafosei carpatice. Studii similare au mai fost făcute anterior pentru activitatea seismică de secvente și roiuri din întreaga lume și din vecinatatea zonei de adancime intermediara Vrancea, din apropierea orasului Tg-Jiu, in zona adiacenta statiei BURAR, Depresiunea Hateg, Depresiunea Caras-Severin (Popescu, 2000; Popescu și Radulian, 2001; Popescu et al., 2003; Popescu et al., 2011; 2012; Radulian et al., 2014; Abercrombie, 2015, Popescu et al.; 2016, Placinta et al., 2016).

Scalarea momentului seismic M_0 cu magnitudinea locala M_L este reprezentată în **Fig. 9**. Datele sunt bine approximate (coeficientul de corelatie 0.97) de regresia liniară:

$$\text{Log } M_0 = (0.97 \pm 0.06) M_L + (11.11 \pm 0.19) \quad (2)$$

$$R = 0.97, \sigma = 0.25$$

Relatia (2) arata tendinta de supraestimare a marimii M_L pentru cutremure moderate și mari și pentru subestimare in cazul cutremurelor mici.

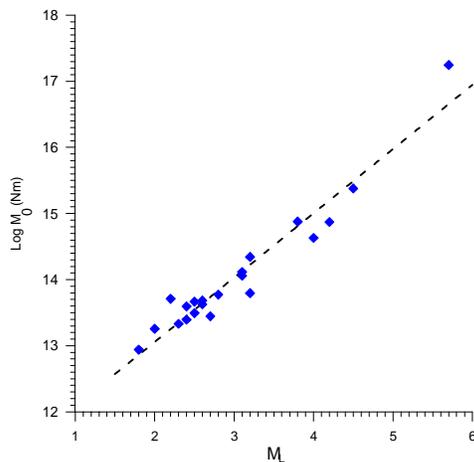


Fig. 9. Moment seismic-magnitudine locala

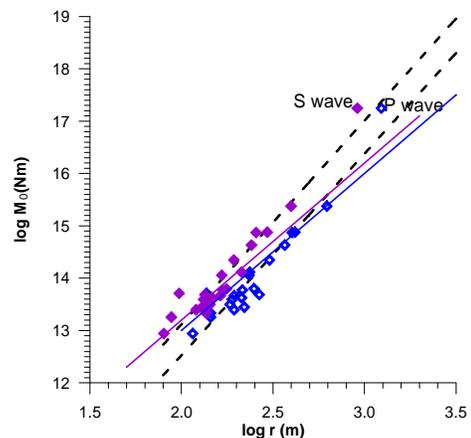


Fig. 10. Scalarea momentului seismic cu raza sursei pentru secventa de la Mararesti-razele au fost determinate atat cu modelul lui Madariaga cat și cu modelul lui Boatwright.

Scalarea momentului seismic cu raza sursei (**Fig. 10**) este aproximata prin dreapta de regresie:

$$P- \text{Log } M_0 = (3.85 \pm 0.26) \log r_P + (4.83 \pm 0.642) \quad (3)$$

$$R = 0.96, \sigma = 0.27$$

$$S- \text{Log } M_0 = (3.89 \pm 0.24) \log r_S + (5.354 \pm 0.565) \quad (3')$$

$$R = 0.96, \sigma = 0.26$$

Panta dreptei de regresie este mai mare (+3.85 si 3.89) fata de valoarea teoretica (+3.00 pentru scalarea sursei seismice cu proces de rupere omogen). Diferenta dintre panta teoretica si cea estimata se datoreaza, probabil, subestimarii frecventei de colt a cutremurelor mai mici. Inevitabil, la frecvente inalte erorile sunt mai mari datorita zgomotului din cadrul rapoartelor spectrale. O abatere relativ mare de la scalarea $M_0 \sim f_c^{-3}$ au gasit si R. Tajima si F. Tajima (2008) in cazul secventei seismice din 2007 de la Off Mid Niigata si au concluzionat ca se poate datora fluidului identificat de studiile de tomografie in zona sursei si concentratiei sursei stresului tectonic.

Analiza scalării căderii de tensiune în funcție de mărimea cutremurului (**Fig. 11**) indică o scalare cu cădere de tensiune crescătoare pe întregul interval de magnitudine. Valorile căderii de tensiune sunt cuprinse între 1MPa si 41 MPa in cazul undelor P si între 4 MPa si 101 MPa in cazul in cazul undelor S. Pentru secventa de la Marasesti caderea de tensiune pare sa creasca cu marimea cutremurelor pentru domeniul de magnitudine $M_L 1.8- M_L 5.7$, abatandu-se astfel de la un model cu cadere de tensiune constanta pe falie (ecuatia 4). Aceasta comportare este frecvent constatata in cazul cutremurelor moderate si mici (Popescu 2000; Popescu et al., 2001; Radulian et al., 2014; Placinta et al., 2016).

$$P- \text{Log } \Delta\sigma_P = (0.28 \pm 0.05) \log M_0 - (3.46 \pm 0.67) \quad (4)$$

$$R=0.80, \sigma=0.20$$

$$S- \text{Log } \Delta\sigma_S = (0.28 \pm 0.04) \log M_0 - (2.99 \pm 0.63) \quad (4')$$

$$R=0.82, \sigma=0.19$$

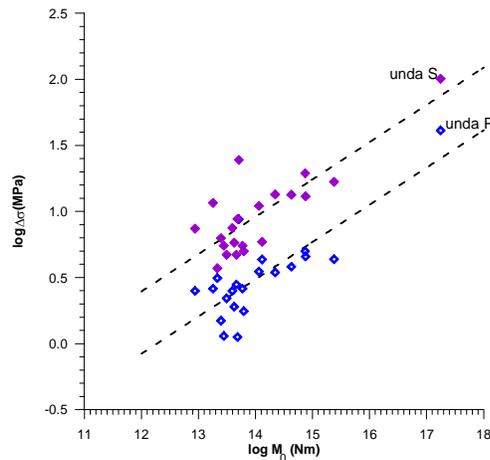


Fig.11. Scalarea caderii de tensiune cu momentul seismic pentru secventa de la Marasesti

Bibliografie

Abercrombie, R. E. (2015), Investigating uncertainties in empirical Green's function analysis of earthquake source parameters, *J.G.R. Solid Earth*, 1-15.

Aki, K., and P. Richards, Quantitative Seismology: theory and methods, Freeman, San Francisco, 932 pp., 1980.

Boatwright, J., 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.

Brune, J. N., Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from earthquakes, *J. Geophys. Res.*, 75, 4997-5009, 1970.

Frankel, A., J. Flechter, F. Vernon, L. Haar, J. Berger, Hanks, T., Brune, J., Rupture characteristics and tomography source imaging of $M_L = 3$ earthquakes near Anza, Southern California, *J. Geophys. Res.* 91, 12633-12650, 1986.

Havskov, J., Ottemöller, L., SEISAN: The Earthquake Analysis Software, Version 7.2, *University of Bergen, Norway*, 256 p., 2001.

Hough, S.E., Jacob, K., Busby, R., Ground motions from a $M=3.5$ earthquake near Massena, New York: Evidence for the poor resolution of corner frequency from small events, *Seismol. Res. Lett.*, 60, 95-99, 1989.

Kearey P., Brooks M., Hill I An Introduction to Geophysical Exploration, 2002, Blackwell Science Ltd.

Lindley, G. T., Source parameters of the 23 April 1992 Joshua Tree, California earthquake, its largest foreshock and aftershocks. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 84, 1051-1057, 1994.

Madariaga, R: Dynamics of an expanding circular crack, *Bull. Seismol. Soc. Am.* 66, 639-666,(1976).

Matenco, L., Bertotti, G., Leever, K., Cloetingh, S., Schmid, S.M., Tărăpoancă, M., Dinu, C. (2007). Large-scale deformation in a locked collisional boundary: Interplay between subsidence and uplift, intraplate stress, and inherited lithospheric structure in the late stage of the SE Carpathians evolution, *Tectonics*, 26, doi: 10.1029/2006TC001951.

Mitrofan H., Chitea F., Anghelache M.-A., Vişan M., Possible triggered seismicity signatures associated with the Vrancea intermediate-depth strong earthquakes (Southeast Carpathians, Romania), *Seismological Research Letters*, 85 (2), 314-323, 2014.

Mori, J., Frankel, A., 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.

Mueller, C. S., Source pulse enhancement by deconvolution of an empirical Green's function, *Geophys. Res. Lett.* 12, 33-36, 1985.

Oncescu, M.C., V. Mârza, M. Rizescu, M. Popa, 1999, The Romanian earthquakes catalogue between 1984 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).

Petrescu, G. (1943). Study of the Earthquake Occurred on 28 April 1943, *Observatorul din Bucureşti*, 11 pp(in Romanian).

Petrescu, G. (1944). Tremblement de terre du 28 avril 1943. Étude microséismique, *Bulletin de la Section Scientifique de l'Académie Roumaine* 27, no. 4, 223-229.

Placinta, A.O, E. Popescu, F. Borleanu, M. Radulian, M. Popa, Analysis of source properties for the earthquake sequences in the South-Western Carpathians (Romania), *Romanian Reports in Physics*, acceptata spre publicare in 2016.

Polonic, G., Structure of the crystalline basement in Romania, *Rev. Roum. Geophysique*, 40, 57-69, Bucharest, 1996.

Popescu, E., Complex study of the earthquake sequences on the Romanian territory, *PhD Thesis*, 281p, Institute of Atomic Physics, Bucharest, 2000 (in Romanian).

Popescu, E., Radulian, M., Source characteristics of the seismic sequences in the Eastern Carpathians foredeep region (Romania), *Tectonophysics*, 338, 325-337, 2001.

Popescu E., Popa M., Radulian M., 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.

Popescu E., Neagoe C., Rogozea M., Moldovan I. A., Borleanu F., Radulian M., Source parameters for the earthquake sequence occurred in the Ramnicu Sarat area (Romania) November-December 2007, *Rom. Journ. Phys.* 56, 265-278, 2011.

Popescu E., Borleanu F., Rogozea M., Radulian M., Source analysis for earthquake sequence occurred in Vrancea (Romania) region on 6 to 30 September 2008, *Romanian Report Phys.*, vol. 64, No. 2, 2012.

Popescu, E., M. Radulian, A.O. Placinta, Source scaling properties for the Vrancea subcrustal earthquakes: an overview, Simpozionul national 75 ani de la cutremurul vrancean din 10 noiembrie 1940, 2015, Bucuresti (publicata in *Natural Hazards* 2016).

Radulian, M., E. Popescu, F. Borleanu, M. Diaconescu (2014), December 2011 – January 2012 seismic sequence in Southern Carpathians, Romania, *Tectonophysics*, 623, 23-38, 2014.

Răileanu V., Dinu C., Ardeleanu L., Diaconescu V., Popescu E., Bălă A., Crustal seismicity and associated fault systems in Romania, Proceedings of the 27th ECGS Workshop: Seismicity Patterns in the Euro-Med Region, Luxembourg, 17-19 Nov.2008, in “Cahiers du Centre Europeen de Geodynamique et de Seismologie”, 153-159, 2009.

Răileanu, V., Tătaru D. Grecu B., Crustal models in Romania – I. Moesian platform, *Romanian Report Phys.*, vol. 64, No., 2012.

Tajima R. si F. Tajima (2008), Seismic scaling relation of the 2007 Off Mid Niigata, Japan, earthquake (M_w 6.6) sequence in comparison with two other earthquake (M_w 6.6) sequences, *Earth Planets Space*, **60**, 1137–1141.

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

Rezultate

Scopul proiectului este evaluarea parametrilor sursei seismice ai cutremurelor secvenței crustale din 22 noiembrie 2014–ianuarie 2015, care a generat socul principal ce se constituie în cel mai mare eveniment înregistrat în zona ($M_L=5.7$), folosind combinarea tehnicilor de corelare încrucișată a formelor de undă cu metodele relative de deconvoluție.

Estimarea relațiilor de scalare a parametrilor de sursă (moment seismic, raza sursei, caderea de tensiune) analizați și încadrarea lor în tendințele generale ale scalării sursei din România și din întreaga lume.

Determinarea soluției de plan de falie a socului principal al secvenței din 52 de semne ale primelor sosiri ale undelor P și încadrarea ei în seismotectonica din zona aliniamentului Marasesti-Galati-Braila (MGB) (Havskov, J., Ottemöller, L., 2001).

Articole publicate (7)

1.E. Popescu, M. Radulian, A.O. Placinta, Source scaling properties for the Vrancea subcrustal earthquakes: an overview, Simpozionul national 75 ani de la cutremurul vrancean din 10 noiembrie 1940, 2015, Bucuresti (publicata in **Natural Hazards** 2016).

2.A.O. Placinta, **E. Popescu**, F. Borleanu, M. Radulian, M. Popa, Analysis of source properties for the earthquake sequences in the South-Western Carpathians (Romania), *Romanian Reports in Physics*, trimisa spre publicare in 2016.

3. Input Parameters for the Probabilistic Seismic Hazard Assessment in the Eastern Part of Romania and Black Sea Area, I.A. Moldovan, M. Diaconescu, E. Popescu, M. Radulian, D. Toma-Danila, A.P. Constantin, A.O. Placinta, *Acceptata Romanian Journal of Physics* (2016).

4. M.Diaconescu, A. Craiu. D. Toma-Danila, M. Craiu, The main characteristics of the seismicity from the north-western part of Romania, *Procc. of Conference, 16th International*

Multidisciplinary Scientific Geoconference SGEM2016, 30 June-6July, 2016, Albena, Bulgaria, pp.655.

5. M.Diaconescu, M. Craiu, A. Craiu, The seismological features of the contact between Moesian Platform and intersection of southern Carpathians with Eastern Carpathians, Proc. of Conference, *16th International Multidisciplinary Scientific Geoconference SGEM2016, 30 June-6July, 2016, Albena, Bulgaria, pp.695.* .

Articole trimise spre publicare in revistele anuntate de **ELSESEDIMA**, Cluj-Napoaca, 2016.

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.

2. Rogozea Maria, Radulian Mircea, Toma-Danila Dragos re-evaluating macroseismic data for October 26, 1802 Vrancea earthquake.

Prezentari la conferinte:

1.European Geosciences Union General Assembly, EGU, Viena, Aprilie 2016:

1.Earthquake sequence in East Vrancea crustal region (Romania): source characteristics and seismotectonics by Emilia Popescu et al.

accepted in Session SM2.2/NH4.13, identification number EGU2016-15381.

2.Seismic hazard and risk assessment for large Romanian dams situated in the Moldavian Platform by Iren-Adelina Moldovan et al. submitted to NH9.8, identification number EGU2016 13750.

3. Seismic activity monitoring in the Izvorul Muntelui dam region by Felix Borleanu et al.
accepted in Session SM1.3, identification number EGU2016-17365.

2. 11th International Conference on „Environmental Legislation, Safety Engineering and Disaster Management” ELSESEDIMA, 26-28 May, 2016, Cluj –Napoca, Romania

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.

2. Rogozea Maria, Radulian Mircea, Toma-Danila Dragos re-evaluating macroseismic data for October 26, 1802 Vrancea earthquake.

3.Alexandra Muntean¹, Mihaela Popa¹, Mircea Radulian¹, Eduard Nastase¹, Hazard analysis in areas with anthropic activities. Study cases: Galati region and Petrosani mining area (Romania).

4. Besutiu I., M. Diaconescu, L. Zlagnean, A. Craiu, Structural and geodynamic consideration on the Galati-Izvoarele seismic-prone area.

4. The 8-th International Symposium on Geography, Ladsapes: perception, knowledge, awareness and action, 24-26 June, 2016, Bucharest

1.Earthquakes swarm from NW Galati area, M. Diaconescu, A. Craiu.

5.16th International Multidisciplinary Scientific Geoconference SGEM2016, 30 June-6 July, 2016, Albena, Bulgaria

1. The main characteristics of the seismicity from the north-western part of Romania, M.Diaconescu, A. Craiu. D. Toma-Danila, M. Craiu.

2. The seismological features of the contact between Moesian Platform and intersection of southern Carpathians with Eastern Carpathians, M.Diaconescu, M. Craiu,A. Craiu.6.

16th International Balkan Workshop on Applied Physics and Materials Science IBWAP 2016 (7-9, July, 2016)

1. The Modeling Of The Macroseismic Field Associated With Romanian Normal And Intermediate Depth Earthquakes, Iren-Adelina Moldovan, Raluca Partheniu, Cristian Ghita, Angela Petruta Constantin, Dragos Toma Danila
2. Testing The Macroseismic Intensity Attenuation Laws On The Romanian Crustal Seismic Events, Angela Petruta Constantin, Iren-Adelina Moldovan
3. Testing The Macroseismic Intensity Attenuation Laws On The Vrancea (Romania) Subcrustal Seismic Events, Maria Rogozea, Iren-Adelina Moldovan¹, Angela Petruta Constantin¹, Liviu Manea.
4. Burst of seismicity in the Mărășești – Focșani region in 2014-2015 E. Popescu, F.Borleanu, A.O. Placinta, M. Popa, M. Radulian, A. Coman.

Stadiul realizării obiectivului fazei

Obiectivul fazei a fost realizat integral.

Concluzii

Producerea secvenței de cutremure începând cu 22 noiembrie 2014 în partea de nord-vest a aliniamentului Marasesti-Galati-Braila a oferit posibilitatea evaluării parametrilor de sursă și ai mecanismului focal pentru cel mai mare eveniment înregistrat în zona, atât în perioada istorică cât și în cea instrumentală ($M_L=5.7$).

Soluția de plan de falie a socului principal s-a obținut pe baza a 52 de polarități ale primelor sosiri ale undelor P (**Fig. 2**) și indică un mecanism focal de tip falie normală cu axa comprimării aproape verticală și axa dilatării aproape orizontală, în concordanță cu seismotectonica flancurilor de est și de sud ale Bazinului Focșani. Ambele plane nodale sunt orientate NV-SE pe direcția aliniamentului Marasesti-Galati-Braila.

Distribuția epicentrală a replicilor, determinată prin metoda localizării în grup (JHD), indică o tendință de aliniere pe direcția planelor nodale ale socului principal (**Fig. 1**).

Aplicând tehnicile de corelație încrucișată cu algoritmi de deconvoluție relativă (rapoarte spectrale și funcții Green empirice) s-au determinat parametrii de sursă ($8.7 \times 10^{12} \text{Nm} \leq \text{momentul seismic} \leq 1.8 \times 10^{17} \text{Nm}$, $97 \text{m} \leq \text{dimensiunea sursei} \leq 1075 \text{m}$ și $3 \text{MPa} \leq \text{caderea de tensiune} \leq 71 \text{MPa}$) pentru 15 cutremure ale secvenței din 22 noiembrie 1914 ($2.0 \leq M_L \leq 5.7$) și pentru 6 cutremure produse în primele 6 luni ale anului 2015 ($1.8 \leq M_L \leq 4.2$) (**Tabelul 2**).

Relațiile de scalare dintre parametrii de sursă estimați sunt compatibile cu relațiile de scalare caracteristice pentru alte zone crustale din lume și cu scalarile specifice altor secvențe crustale localizate în Depresiunea Getică, Depresiunea Hateg, Depresiunea Caras-Severin ca și în partea de est a Carpatilor Meridionali (Popescu, 2000; Popescu și Radulian, 2001; Popescu 2011; 2012; Radulian et al., 2014; Popescu et al.; 2016 Placinta et al., 2016).

Testele efectuate arată că parametrii de sursă cei mai bine constrânși se obțin în cazurile în care coeficienții de corelație pentru perechile de forme de undă înregistrate la stații comune au valori suficient de mari ($CC > 0.7$). În aceste cazuri, rapoartele spectrale și funcțiile de timp ale sursei determinate pentru diferite stații (apropiate și departate) sunt bine definite și în concordanță unele cu altele, conducând implicit la micșorarea erorilor de calcul.

Optimizarea aplicării tehnicilor de deconvoluție relativă prin combinarea cu tehnicile de corelare va fi utilizată în continuare la modelarea proprietăților specifice secvențelor seismice din alte zone seismogene ale țării (Vrancea, Fagaras-Campulung, Maramures) care sunt de un interes deosebit atât din punct de vedere teoretic, cât și pentru aplicații practice, cum ar fi determinarea hazardului seismic.

Responsabil proiect
Dr. Emilia Popescu