

**Contractor: Institutul Național de Cercetare-Dezvoltare pentru Fizica Pământului  
(INCDFP)**

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

**De acord,  
DIRECTOR GENERAL  
Dr. Ing. Constantin Ionescu**

**Avizat,  
DIRECTOR DE PROGRAM  
Prof. Dr. Gheorghe Mărmureanu**

## **RAPORT DE ACTIVITATE AL FAZEI**

**Contractul nr.: 21N/2016**

**Proiectul: Aplicarea corelării formelor de undă pentru îmbunătățirea monitorizării și localizărilor evenimentelor seismice produse pe teritoriul României și zonele adiacente (PN 16 35 03 07)**

**Faza II: Corelarea formelor de undă utilizând înregistrările array-urilor, respectiv a stațiilor Rețelei Seismice Naționale. Analiza roiului seismic, produs în perioada septembrie - noiembrie 2013, în regiunea Izvoarele (Galați).**

**Termen: 11 octombrie 2017**

1. Obiectivul proiectului: Aplicarea și dezvoltarea tehnicilor de corelare avansate a formelor de undă în vederea îmbunătățirii detecției și localizării evenimentelor seismice.
2. Rezultate preconizate pentru atingerea obiectivului: Vor fi implementate /dezvoltate programe de estimare a similarității formelor de undă înregistrate de stațiile seismice cu 3 componente, respectiv de stațiile de tip array. Acestea vor fi utilizate pentru creșterea eficienței procesului de detecție și estimare a parametrilor de sursă a evenimentelor seismice.
3. Obiectivul fazei: Îmbunătățirea detecției evenimentelor seismice prin algoritmul de corelare al formelor de undă provenite de la stațiile seismice de tip array instalate

temporar în regiunea Galați și estimări ale structurii de viteze prin aplicarea metodei dublei diferențe.

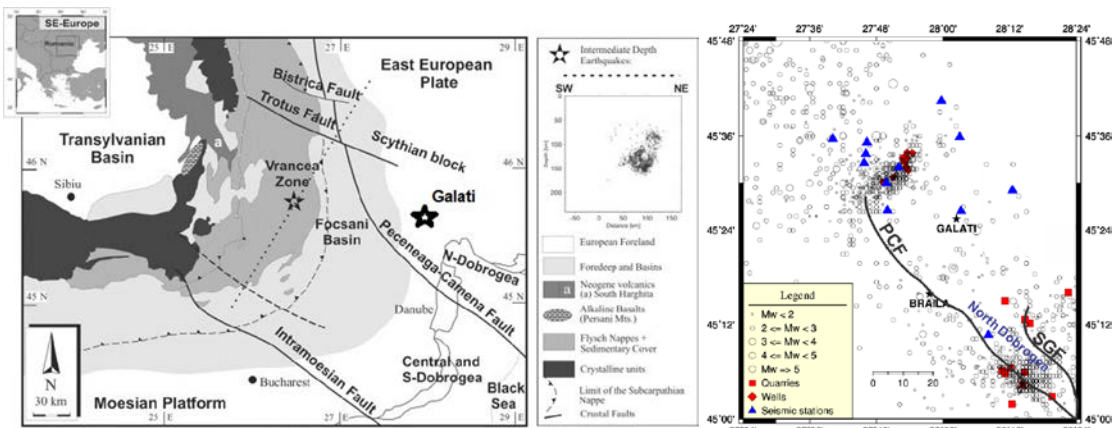
4. Rezultate preconizate pentru atingerea obiectivului fazei:

Cresterea numărului de evenimente seismice detectate, evidențierea existenței diferitelor grupări de evenimente (clustere) pe baza similarității formelor de undă și determinarea structurii de viteze pentru regiunea studiată.

5. Rezumatul fazei: (maxim 5 pagini)

În perioada august - noiembrie 2013 în partea de SE a României, în apropierea orașului Galați s-a produs un număr însemnat de cutremure care a dus la importante daune materiale și a creat panică în rândul locuitorilor din regiune. Cu toate că această zonă este traversată de importante falii active (din punct de vedere seismic), conform catalogului de cutremure românești ROMPLUS (*Oncescu și alții 1999*), actualizat permanent de către personalul Institutului Național de Cercetare Dezvoltare pentru Fizica Pământului (INCDFP-[www.infp.ro](http://www.infp.ro)), a fost pentru prima dată când un număr semnificativ de evenimente seismice s-a produs într-un interval de timp atât de redus. Evenimentele înregistrate au avut magnitudini moderate (6 evenimente cu magnitudinea moment situată între 3,0 și 3,2) și mici, nefiind evidențiată existența unui șoc principal. O astfel de activitate este specifică roiurilor seismice (*Popescu, 1999*). În aceste circumstanțe, INCDFP a instalat în regiune un număr de 5 stații seismice având caracter temporar. Datele seismice înregistrate de aceste stații au jucat un rol semnificativ atât pentru detecția evenimentelor seismice, cât și pentru creșterea preciziei de localizare. În Figura 1 sunt prezentate caracteristicile tectonice ale regiunii de studiu (*după Săndulescu 1984*), distribuția faliilor principale, a stațiilor seismice (permanente și temporare), a carierelor, a sondelor petroliere existente (identificate cu aplicația Google Earth) respectiv seismicitatea din perioada 2013-2016.

Ținând cont de cantitate semnificativă de date seismice existente, în cadrul acestei etape au fost aplicate metode de analiză specifice în vederea: A) îmbunătățirii detecției evenimentelor seismice, B) evidențierii grupării evenimentelor seismice, C) determinării structurii de viteze din regiunea studiată.

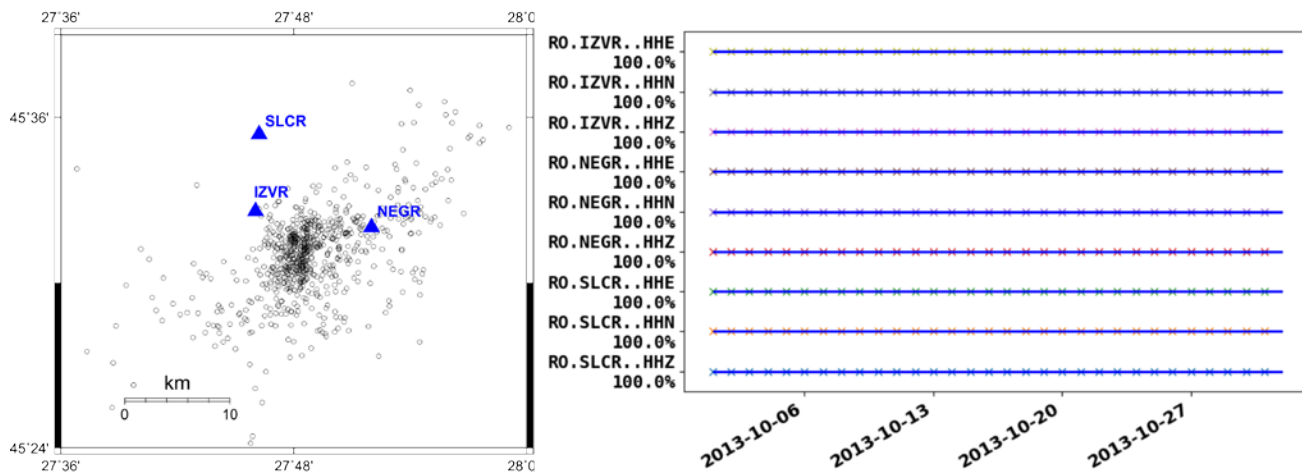


**Figura 1** Caracteristicile tectonice (stânga) ale zonei de interes (*după Săndulescu 1984*) distribuția faliilor pricipale, a stațiilor seismice (permanente și temporare) a carierelor, sondelor de petrol existente (identificate cu aplicația Google Earth) respectiv seismicitatea din perioada 2013-2016 (dreapta)

### A. Îmbunătățirea detecției evenimentelor seismice

Pentru detecția evenimentelor seismice a fost utilizat algoritmul recent implementat în cadrul institutului care se bazează pe corelari multiple ale formelor de undă, propus de *Wagner și Owens (1996)*, respectiv *Wiechecki și alții (2000)*. Metoda constă în utilizarea unor evenimente “model” pentru care sunt deja cunoscuți parametrii de sursă. Se analizează corelația formei de undă pentru fiecare dintre aceste evenimente “model” pe ferestre de timp fixate cu forma de undă continuă înregistrată de stație în intervalul de timp studiat. Analiza se face pe fiecare componentă a stației seismice utilizând ferestre de timp fixe pentru care se realizează corelația respectiv ferestre de timp mobile pentru calcularea coeficientului maxim de corelație, iar eficiența comparării să fie de asemenea maximă. În final metoda evidențiază noi detecții care au asociate timpul la origine, coeficientul de corelare (CC) și Z-statis. Z-statis reprezintă numărul de abateri standard pentru care detecția identificată prin corelare este mai mare decât valorile de fond ale coeficienților de corelare.

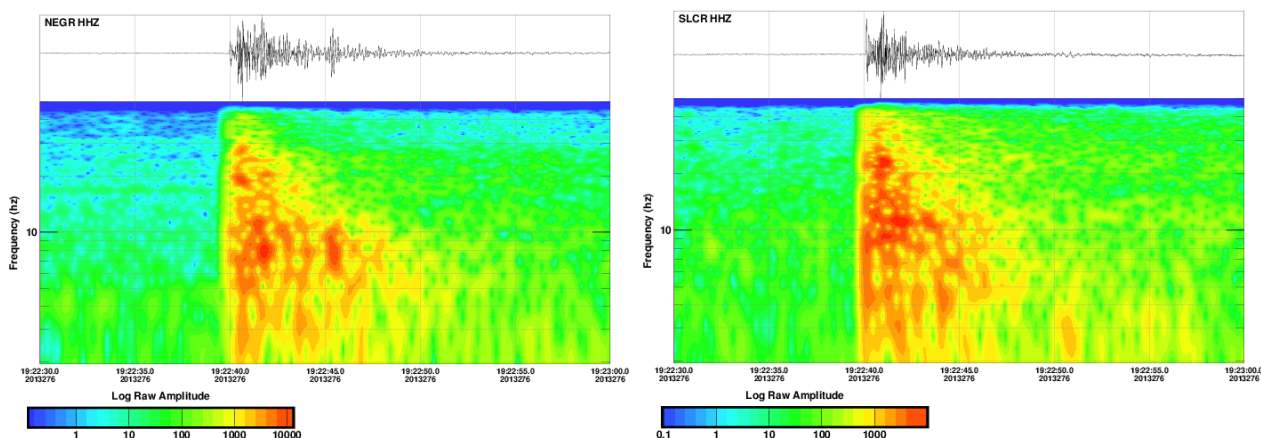
Metoda a fost aplicată în această etapă pe formele de undă înregistrate în perioada 1 – 31 octombrie 2013 de 3 stații seismice IZVR, NEGR și SLCR (Izvoarele, Negrea și Slobozia Conachi) instalate temporar de către INCDFP în regiunea epicentrală. Datele provenite de la stațiile selectate au fost analizate similar cu cele ale unui array seismic, considerând astfel un array temporar cu o apertură medie (9,5 km). Geometria array-ului împreună cu disponibilitatea datelor aferenta fiecărei stații sunt prezentate în Figura 2.



**Figura 2** Reprezentarea stațiilor seismice selectate ce formează array-ul temporar, distribuția epicentrelor aferente evenimentelor seismice cu  $M_w > 2,0$  produse în regiunea Galați, începând cu 2013 până în prezent (stânga) și disponibilitatea datelor pentru fiecare din stațiile array-ului în perioada selectată (1 – 31 octombrie 2013)

Fiecare linie orizontală din Figura 2 reprezintă disponibilitatea datelor seismice aferente componentelor (HHZ, HHN, HHE) fiecărei stații. Observăm că, în perioada analizată, array-ul seismic a funcționat impecabil, procentul datelor disponibile fiind de 100%.

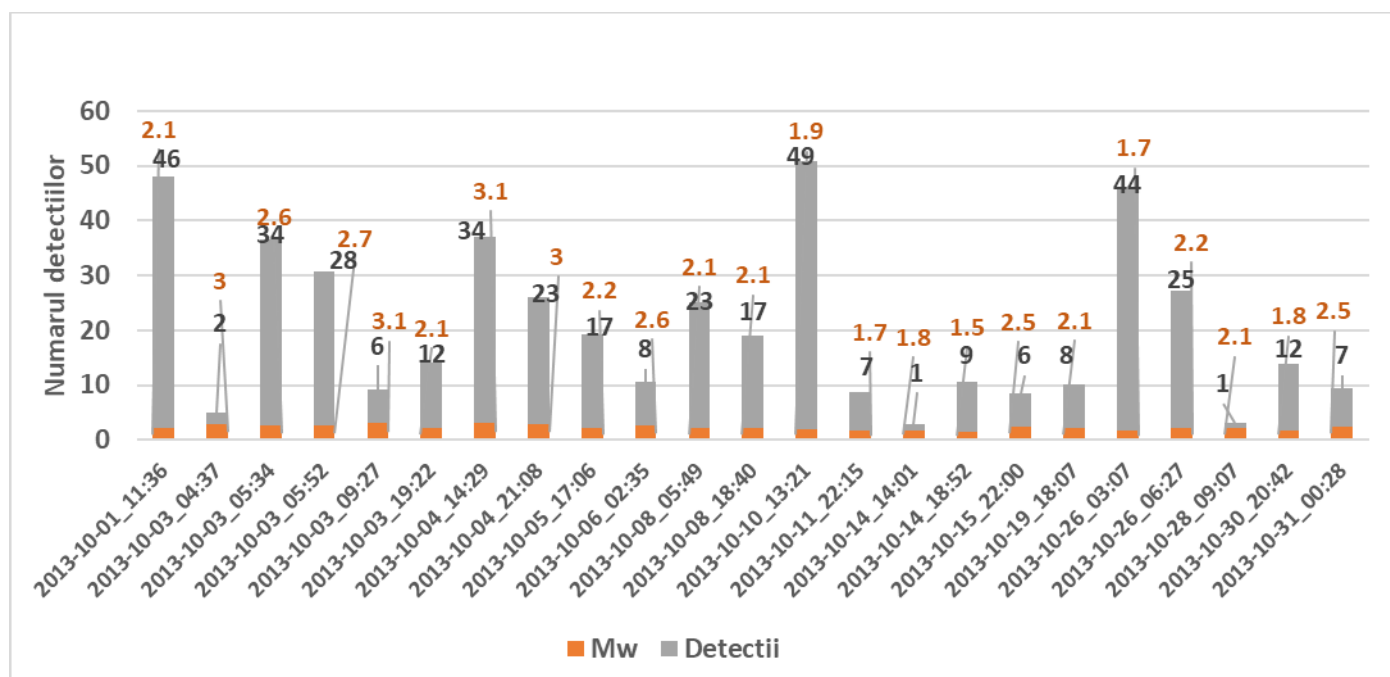
Pentru aplicarea detectorului de corelare multicanal au fost selectate un număr de 23 evenimente "model" având raportul semnal zgomot (SNR) mai mare ca 10, măsurat pe forma de undă înregistrată la stația cea mai apropiată de epicentru. Pentru stabilirea nivelului optim de filtrare a formelor de undă în vederea aplicării algoritmului au fost calculate spectrogramele evenimentelor model. Două spectrograme calculate pentru evenimentul din 03.10.2013, 19:22; utilizând formele de undă înregistrate pe componenta verticală a stațiilor NEGR și SLCR sunt prezentate în Figura 3.



**Figura 3** Spectrogramele calculate utilizând formele de undă înregistrate de componenta verticală a stațiilor NEGR (stânga) respectiv SLCR (dreapta) pentru evenimentul seismic produs în data de 03.10.2013; 19:22

Prin inspecția vizuală a spectrogramelor calculate pentru înregistrările celor 2 stații, am apreciat că banda de frecvențe cea mai eficientă pentru filtrarea formelor de undă în vederea aplicării algoritmului de detecție, a fost estimată între 2,0 și 10,0 Hz.

În urma analizării rezultatelor obținute s-a observat că această metodă a identificat un număr de 419 detecții care s-au produs în perioada de timp selectată, comparativ cu un număr de 394 detecții identificate manual (conform buletinelor seismice, raportate de către Centrul Național de Date al INCDFP). Rezultatele obținute într-o astfel de analiză depind în mod direct de numărul evenimentelor alese ca "model". Astfel, crescând numărul de evenimente "model" va crește de asemenea numărul evenimentelor detectate. Totodată, numărul detecțiilor variază de asemenea cu numărul stațiilor/componentelor care au fost utilizate în analiză, astfel un număr de stații mai ridicat va duce cu siguranță la creșterea numărului de evenimente detectate. În Figura 4 sunt reprezentate numărul evenimentelor detectate (notate cu negru) în funcție de evenimentul considerat "model" și magnitudinea acestuia (notate cu portocaliu).

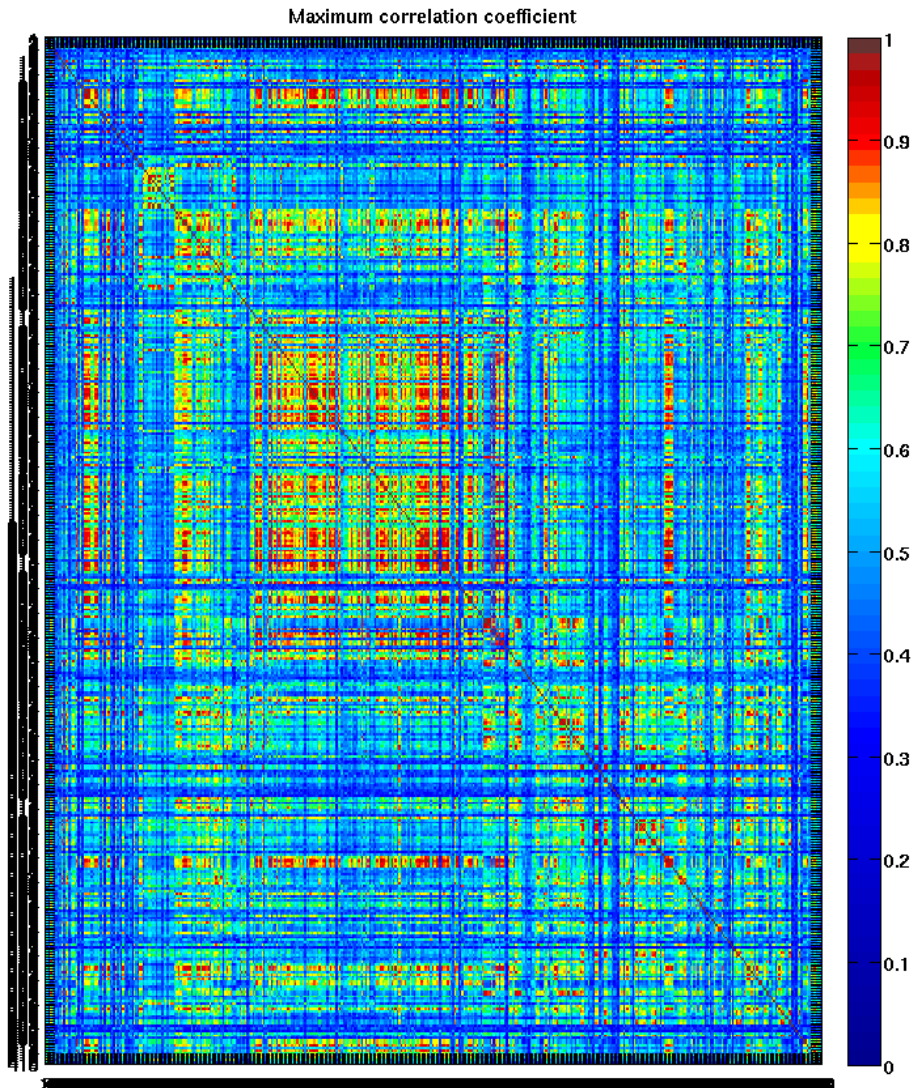


**Figura 4** Reprezentarea detecțiilor determinate pe baza noului algoritm în funcție de evenimentul "model" și magnitudinea acestuia (Mw)

Este de remarcată tendința evenimentelor caracterizate de magnitudini mai scăzute de a identifica un număr mai ridicat de evenimente.

## B) Evidențierea grupărilor de evenimente seismice (clustere) prin determinarea gradului de similaritate al formelor de undă

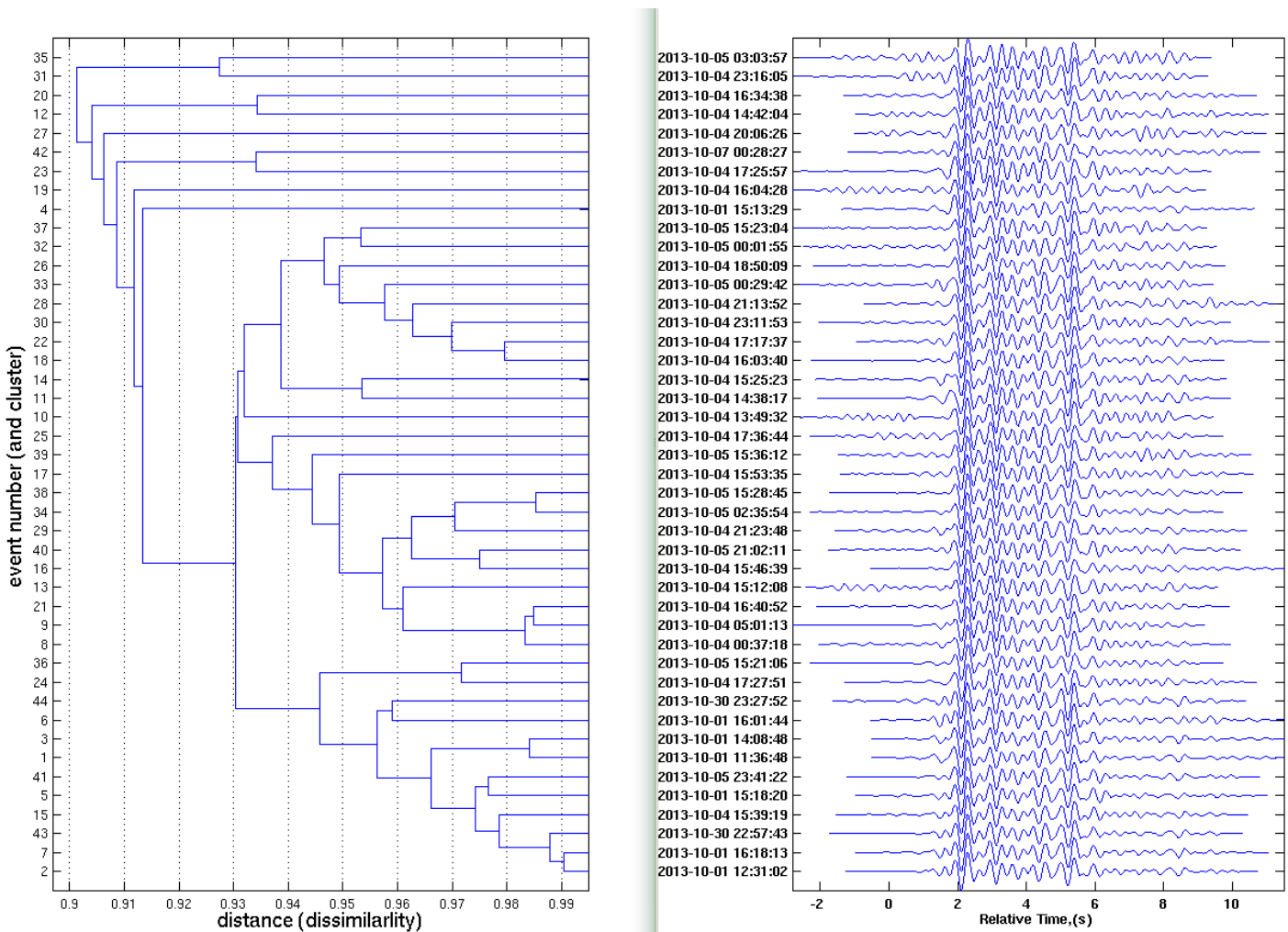
Pentru determinarea gradului de similaritate al evenimentelor seismice detectate anterior au fost calculați coeficienții de corelare ai formelor de undă (înregistrate la stația IZVR) utilizând pachetul de programe GISMO (Glenn Thompson, 2010) dezvoltat de Universitățile din Florida respectiv Alaska (SUA) și implementat la INCDFP în cadrul prezentului proiect. Coeficienții de corelare au fost calculați utilizând formele de undă filtrate cu ajutorul unui filtru de tip “trece - bandă” între 1,5 și 3,5 Hz respectiv ferestre de timp fixe de 12s în jurul timpilor de sosire ai undelor primare (P). Rezultatele obținute sunt reprezentate în Figura 5 sub forma unei matrici de corelare.



**Figura 5** Matricea de corelare formată din CC determinați pentru evenimentele seismice detectate utilizând algoritmul descris anterior. CC au fost calculați utilizând formele de undă filtrate (înregistrate la stația IZVR) cu ajutorul unui filtru de tip “trece-bandă” între 1,5 și 3,5 Hz respectiv ferestre de timp fixe de 12s în jurul timpilor de sosire ai undelor primare (P).

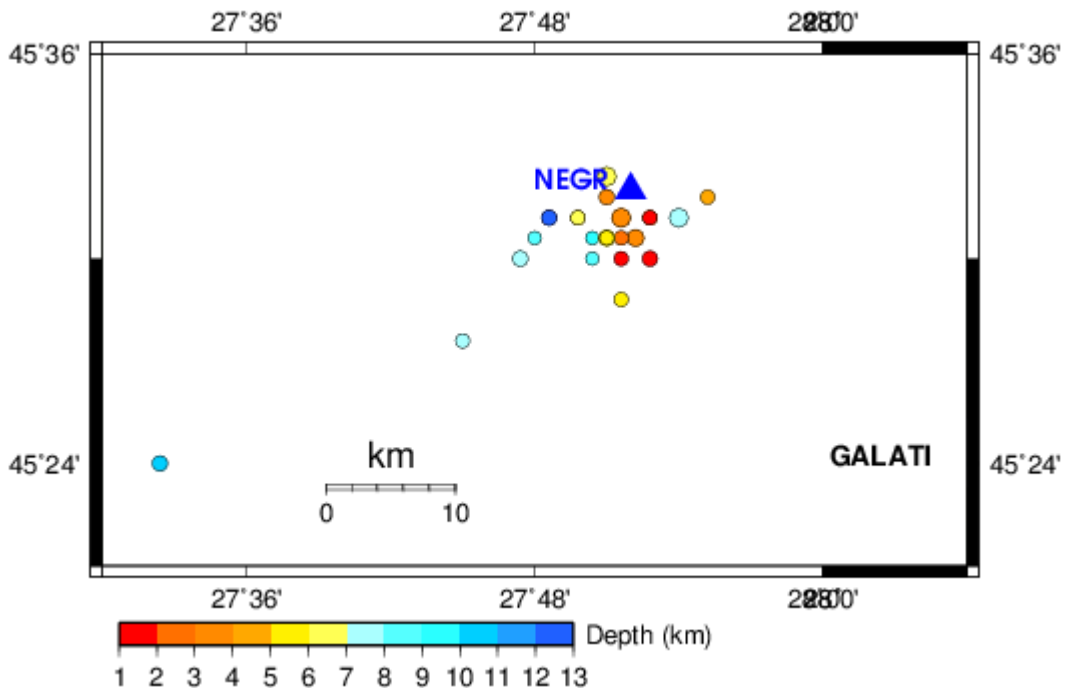
Pe abcisă și ordonată sunt numerotate în ordine cronologică evenimentele detectate utilizând algoritmul de corelare. Coeficienții de corelare sunt colorați diferit în funcție de valoare, culorile calde exprimând valori ridicate ale CC în timp ce culorile reci exprimă valori reduse ale CC. Se poate observa din matricea de corelare existența unor grupări de evenimente seismice caracterizate printr-un grad ridicat de similaritate al formelor de undă. Astfel, prin aplicarea algoritmului de corelare s-a reușit identificarea unui număr de peste 30 de clustere de evenimente (formate fiecare din cel puțin 2 evenimente seismice) care sunt caracterizate de  $CC > 0,89$ . Acest lucru indică pe de o parte faptul că aceste evenimente sunt localizate practic în același loc iar pe de altă parte existența în regiune a unor surse seismice repetitive.

În Figura 6 am determinat dendograma și am reprezentat formele de undă asociate pentru cel mai mare cluster (conținând 44 de evenimente) caracterizat de  $CC > 0,89$ .



**Figura 6** Reprezentarea dendrogramei (stânga) ce prezintă gradul de similaritate al evenimentelor seismice ce formează cel mai mare cluster (având  $CC > 0,89$ ) și a formelor de undă (înregistrate de stația IZVR) filtrate utilizând un filtru de tip trece-bandă între 1,5 și 3,5 Hz (dreapta).

Dendrograma este practic o diagramă ramificată reprezentând relațiile de similaritate între un grup de entități (evenimente seismice în cazul nostru). Înălțimea ramurilor indică cât de asemănătoare sau diferite sunt evenimentele între ele: cu cât este mai mare înălțimea ramurilor, cu atât mai mare este diferența (<http://www.wheatoncollege.edu/lexomics/files/2012/08/How-to-Read-a-Dendrogram-Web-Ready.pdf>). Observăm atât din reprezentările dendogramei cât și din seismogramele prezentate în Figura 6, gradul ridicat de similaritate al formelor de undă aferente evenimentelor care formează acest cluster. Ținând cont de aceste informații noi, am căutat evenimentele care formează acest cluster în catalogul ROMPLUS, reușind identificarea unui număr de 26 evenimente. Cunoscând astfel localizările evenimentelor seismice am reprezentat în Figura 7 distribuția epicentrelor (conform catalogului de cutremure ROMPLUS) asociate evenimentelor identificate (din cadrul acestui cluster) în funcție de adâncime și magnitudine (Mw).



**Figura 7** Distribuția epicentrelor în funcție de adâncime (culori diferite) și magnitudine (mărimea simbolurilor rotunde) aparținând clusterului (cu  $CC > 0,89$ ) identificate în catalogul de cutremure ROMPLUS.

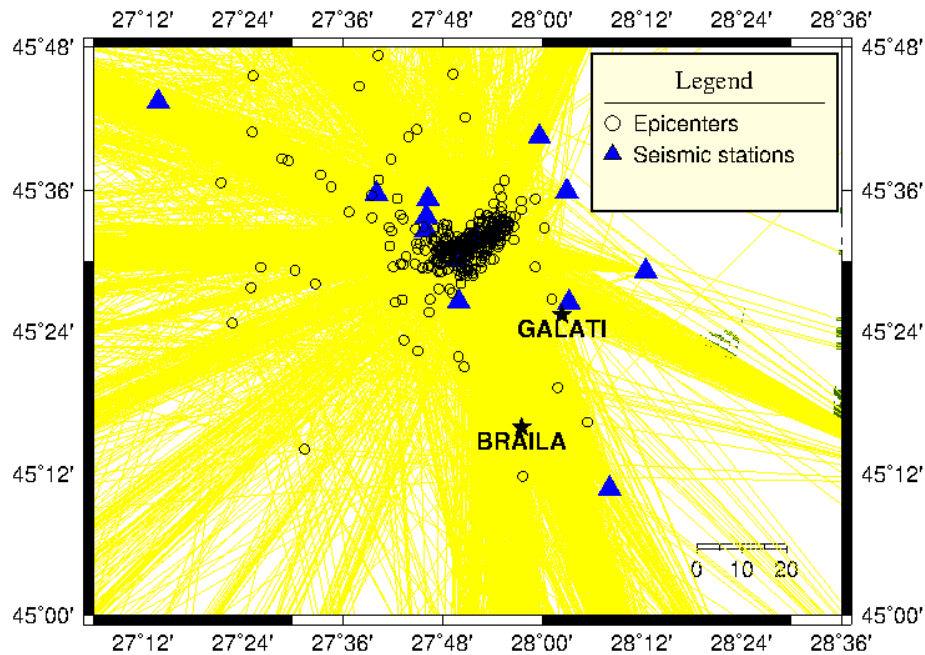
Figura 7 indică faptul că există o limitare, fie a mijloacelor de localizare rutiniere existente în cadrul INCDFP respectiv a modelului de viteze utilizat în procesul de localizare, fie o acoperire insuficientă cu stații seismice. Aceste cauze au dus la erori în localizările acestor evenimente de peste 30 km între epicentrele selectate respectiv de până la 10 km privind adâncimea determinată. O altă caracteristică notabilă a acestor evenimente o reprezintă intervalul de magnitudine al acestor evenimente, care are o variație relativ redusă.



### C) Determinări ale structurii de viteze în regiunea Izvoarele (Galați)

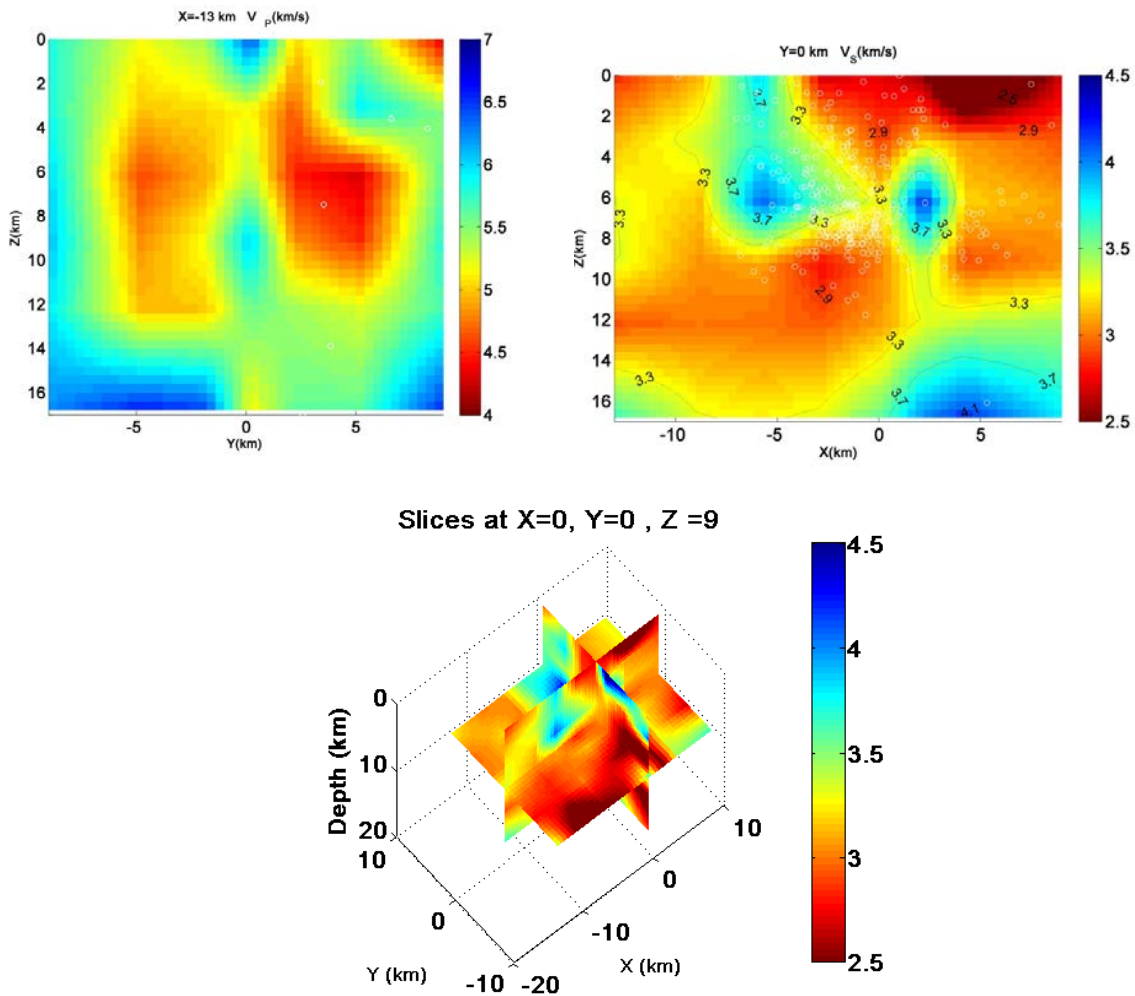
Pentru determinarea structurii de viteze din regiunea de studiu a fost utilizat algoritmul de tomografie bazat pe metoda dublei diferențe tomoDD (*Zhang și Thurber, 2003*). Această metodă rezolvă simultan determinarea structurii de viteze și relocalizarea evenimentelor selectate prin utilizarea diferențelor timpilor de parcurs respectiv dintre maximumul funcției de corelare de la perechi de evenimente înregistrate la stații comune. Algoritmul utilizează atât timpii de sosire relativi cât și pe cei absoluți, reducând în acest mod posibilele erori sistematice. Metoda a fost aleasă pentru că are o precizie mai ridicată atât în localizarea evenimentelor cât și în estimarea structurii de viteze în apropierea regiunii sursă, comparativ cu tomografia standard, care utilizează numai timpii de sosire absoluți (*Zhang și Thurber, 2003, 2005; Zhang et al., 2004*).

Setul de date folosit constă din timpii de sosire ai undelor P respectiv S preluați din buletinele seismice pe baza cărora se actualizează permanent catalogul de cutremure ROMPLUS (*Oncescu et al, 1999*). Evenimentele selectate s-au produs în perioada 2013-2017, fiind înregistrate la cel puțin 8 stații seismice, numărul final de evenimente fiind de 267 cu magnitudinea moment mai mare de 2,0. Eroarea medie de localizare a evenimentelor selectate este de 0,62s. Stațiile care au înregistrat cel puțin unul dintre aceste evenimente sunt în număr de 80. Acoperirea cu raze a zonei studiate, stațiile instalate în apropiere și distribuția epicentrelor evenimentelor selectate sunt reprezentate în Figura 8. Datele diferențiale obținute au constat dintr-un număr de 100125 timpii de sosire respectiv de corelare relativi și 7564 timpii de sosire absoluți ai undelor P, respectiv S.



**Figura 8** Distribuția razelor seismice din zona de studiu, a stațiilor seismice instalate în apropiere și a epicentrelor selectate pentru aplicarea algoritmului de inversie.

Modelul de viteze unidimensional folosit inițial a avut la bază modelul lui Răileanu și alții (2009) estimat pentru stația TUDR (Tudor Vladimirescu) aflată în imediata apropiere a regiunii epicentrale. Gridul de inversie are o lungime de 30 km pe axa x (orizontală), excluzând marginile care au rolul de a prelua datele și de la stațiile situate în afara gridului și de 20 km pe axa y (verticală), excluzând de asemenea marginile. Centrul grilei a fost fixat în punctul de coordonate (46,50N, 27,85E). Secțiuni cu rezultatele obținute sunt prezentate în Figura 9.



**Figura 9** Secțiune transversală rezultată pentru vitezele undelor primare ( $V_p$ ) obținută pentru punctul gridului amplasat la 13 km spre vest relativ la origine (stânga sus), secțiune transversală rezultată pentru vitezele undelor secundare ( $V_s$ ) obținută pentru punctul din centrul (0) de latitudine al gridului (dreapta sus), secțiune transversală rezultată pentru vitezele undelor secundare ( $V_s$ ) din centrul gridului pentru adâncimea de 9km (imaginea de jos). Cercurile albe reprezintă hipocentrele relocalizate pe baza modelului de viteze 3-D obținut (imaginea de jos).

Imaginile obținute prin inversie tomografică reprezintă rezultatele preliminare ale studiului punând în evidență neomogenități laterale semnificative în special în partea superioară a crustei. O caracteristică notabilă dezvăluită în acest stadiu o reprezintă existența unor viteze ridicate ale undelor P în aceleași regiuni în care au fost evidențiate viteze reduse ale undelor S. Acest lucru ar putea fi asociat cu prezența lichidelor și/sau existența unor falii verticale. Cele mai multe evenimente s-au produs la limita dintre straturile de viteză mare și cele cu viteză redusă. Aceste tranziții reprezintă o altă indicație privind existența diferitelor discontinuități. Hipocentrele sunt deviate spre adâncimi superficiale evidențiind o aliniere NE-SV, ceea ce este în concordanță cu rezultatele anterioare obținute de Popa și alții (2016).

#### **BIBLIOGRAFIE SELECTIVĂ:**

Oncescu, M. C., Marza, V. I., Rizescu, M., și Popa, M.: The Romanian Earthquake Catalogue between 984–1997, in: Vrancea Earthquakes, Tectonics, Hazard and Risk Mitigation, edited by:Wenzel, F., Lungu, D., and Novak, O., Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Netherlands, 1999.

Popa, M., Oros, E., Corneliu, D., Radulian, M., Borleanu, F., Rogozea, M., Munteanu I., Neagoe C., The 2013 Earthquake Swarm in the Galati Area: First Results for a Seismotectonic Interpretation, The 1940 Vrancea Earthquake. Issues, Insights and Lessons Learnt, Springer Natural Hazards, pp 253 - 265

Răileanu, V., 2009. Caracterizarea geologică și parametrii elastici ai amplasamentelor stațiilor seismologice și de accelerometre din rețeaua INCD Fizica Pământului, program NUCLEU 2006 - 2008 "Cercetări avansate privind managementul dezastrelor generate de cutremurele românești", tema 06-31 0201, ed. Thenopress, cap .7, pag 297-359.

Wagner, G.S., 1996, Signal detection using multi-channel seismic data, Bull., Seism. Soc. Am. 86(1A), 221-231,1996

Wiechecki S. Gray H. L. Woodward W.A. Statistical Developments in Support of CTBT Monitoring, Technical report 98/07/15 - 00/05/16

Zhang, H. J. și Thurber, C. H., 2003 Double-difference tomography: the method and its application to the Hayward fault, California," Bulletin of the Seismological Society of America, vol. 93, no. 5, pp. 1875–1889

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

În această etapă s-a continuat implementarea respectiv testarea algoritmilor de corelare a formelor de undă înregistrate de stațiile seismice cu 3 componente sau/și de array-urile seismice în vederea îmbunătățirii detecțiilor și localizărilor evenimentelor seismice. A fost de asemenea utilizat algoritmul de tomografie locală bazat pe metoda dublei diferențe propus de *Zhang și Thurber, (2003)*.

Rezultatele obținute în cadrul acestei etape au evidențiat:

- Capacitate superioară a algoritmului de detecție propus, comparativ cu mijloacele rutiniere folosite în cadrul INCDFP.
- Existența unor grupări de evenimente caracterizate de un grad de similaritate ridicat al formelor de undă ( $CC > 0,89$ ).
- Existența unor limitări privind localizările efectuate cu tehnicile rutiniere aplicate în cadrul institutului.
- Model de viteze 3-D preliminar pentru regiunea studiată.
- Existența unor regiuni unde vitezele ridicate ale undelor P sunt suprapuse peste vitezele reduse ale undelor S. Acest lucru ar putea fi asociat cu prezența lichidelor și/sau existența diferitelor falii verticale.

Rezultatele obținute în cadrul acestei etape au fost prezentate în cadrul a 3 conferințe internaționale astfel:

Felix Borleanu, Maria Rogozea, Anca Placinta, Mihaela Popa, and Mircea Radulian, Seismotectonics of Marasesti region (Eastern Romania) revealed by earthquake relocations and moment tensor determinations prezentare poster în cadrul conferinței European Geosciences Union General Assembly 2017 desfășurată în Viena, Austria.

Felix Borleanu, Maria Rogozea, Manea Liviu, Mihaela Popa, and Mircea Radulian, Use of Double Difference techniques to reveal seismicity and crustal structure patterns in the Galati region (SE part of Romania), prezentare poster în cadrul conferinței European Geosciences Union General Assembly 2017 desfășurată în Viena, Austria.

Maria Rogozea, Felix Borleanu, Mircea Radulian, Mihaela Popa, Eduard Ghiorghiu, Use of cross-correlation techniques to enhance micro-seismicity monitoring and events location in the north-western part of Romania, prezentare poster în cadrul conferinței World Multidisciplinary Earth Science Symposium 2017 desfășurată în Praga, Cehia.

Responsabil proiect

Felix Borleanu