

Contractor: Institutul Național de Cercetare Dezvoltare pentru Fizica Pământului
Cod fiscal: 5495458 (anexa la procesul verbal de avizare interna nr.)

De acord,
DIRECTOR GENERAL
Dr. ing. Constantin Ionescu

Avizat,
DIRECTOR DE PROGRAM
Dr. ing. Gheorghe Mărmureanu

RAPORT DE ACTIVITATE AL FAZEI

Contractul nr.: 21/11.03.2016

Proiectul: PN 16 35 03 03

Identificarea și caracterizarea surselor seismo-acustice antropogene și naturale de tip impulsiv: explozii accidentale/chimice, industriale (detonări în mine și cariere), explozii de meteoriți, furtuni puternice, utilizând măsuratori ale senzorilor de infrasunete și seismici

Faza: II/2017

Constituirea și analiza seismo-acustică a setului de evenimente de referință identificate ca provenind de la sursele geofizice naturale și antropogenice cu caracter impulsiv (explozii chimice, detonări, bolizi, furtuni). Valorificarea rezultatelor pentru discriminarea evenimentelor seismice: cutremure naturale și explozii de carieră.

Termen: 20.11.2017

1. Obiectivul proiectului:

Studierea aprofundată a fenomenelor seismo-acustice prin analiza unor instrumente performante și unice (array-ul infrasonic IPLOR) în țara noastră, pe baza aplicării unor tehnici avansate de prelucrare a datelor, cu eficiență superioară în extragerea semnalelor utile din microbarograme (înregistrările stației de infrasunete) și seismograme.

2. Rezultate preconizate pentru atingerea obiectivului:

- Metode optime de prelucrare și analiza datelor înregistrate cu stația IPLOR pentru extragerea eficientă și caracterizarea cât mai precisă a semnalelor infrasonice coerente, utile în detectarea și monitorizarea surselor seismo-acustice de interes în evaluarea hazardului geofizic.
- Set de evenimente de referință, provenite de la surse naturale și antropogenice (locale și regionale), cu caracter impulsiv (explozii chimice, detonări, bolizi, furtuni) și care au generat semnale înregistrate cu senzorii de infrasunete ai stației IPLOR și seismometrele Rețelei Seismice Naționale (RSN) și analiza seismo-acustică a evenimentelor componente ale acestui set.
- Procedură de discriminare a evenimentelor seismice din catalogul ROMPLUS actualizat (*Oncescu et al., 1999*) (distingerea dintre cutremure naturale și explozii de carieră) elaborată pe bază aplicării rezultatelor obținute din analiza seismo-acustică.

3. Obiectivul fazei:

Stabilirea și analiza seismo-acustică a unui set de evenimente de referință, provenite de la surse naturale și antropogenice (locale și regionale), cu caracter impulsiv (explozii chimice, detonări, bolizi, furtuni) și care au generat semnale înregistrate cu senzorii de infrasunete ai stației IPLOR și seismometrele RSN. Valorificarea rezultatelor obținute din analiza seismo-acustică în vederea aplicării lor pentru elaborarea unei proceduri de discriminare a evenimentelor seismice, respectiv distingerea dintre cutremure naturale și explozii de carieră.

4. Rezultate preconizate pentru atingerea obiectivului fazei:

- Crearea unui set de evenimente de referință, provenite de la surse naturale și antropogenice, locale și regionale, cu caracter impulsiv (explozii chimice, detonări, bolizi, furtuni) și care au generat semnale înregistrate cu senzorii de infrasunete ai stației IPLOR și seismometrele RSN.
- Obținerea și sintetizarea de informații complete privind caracteristicile „semnăturilor” infrasonice și seismice ale evenimentelor de referință, prin analiza seismo-acustică a semnalelor generate de acestea.
- Elaborarea unei proceduri unificate de discriminare a evenimentelor seismice (cutremure naturale/tectonice și explozii de carieră), prin valorificarea rezultatelor obținute din analiza lor seismo-acustică.
- Obținerea și oferirea de informații valoroase privind seismicitatea României, într-o manieră modernă și ușor accesibilă, integrând rezultatele unor metode, instrumente și sisteme avansate pentru monitorizare seismo-acustică.
- Evaluarea posibilității extinderii acestei analize seismo-acustice propuse în proiect pentru identificarea și caracterizarea altor evenimente de tip impulsiv/exploziv ce apar în amplasamente cu hazard geofizic ridicat (uzine chimice, centrale termice și nucleare, rafinării, mine), în vederea monitorizării eficiente a riscurilor generate de acestea ca surse antropogenice de poluare.

5. Rezumatul fazei:

I. Stația de măsurare a infrasunetelor instalată la Ploștina (IPLOR)

1.1. Amplasare

Institutul Național de Cercetare-Dezvoltare pentru Fizica Pământului (INCDFP) a instalat, operează și întreține singura (până în prezent) stație de măsurare a infrasunetelor din România – IPLOR. Această stație este un sistem de tip array desfășurat pe o suprafață cu apertură de aproximativ 2,5 km, în zona centrală a României, la Ploștina, județul Vrancea.

Dezvoltarea stației IPLOR a început în anul 2009, ca parte integrantă a unui sistem complex de monitorizare amplasat în zona epicentrală Vrancea, conținând și alte tehnologii avansate: stație seismică de tip array (conținând seismometre de bandă largă) (PLOR), accelerometre, senzori de măsurare a câmpului magnetic (magnetometre) și a câmpului electric (electrometru), echipament

de măsurare a temperaturii solului, precum și o stație meteorologică. Datele colectate sunt înregistrate continuu și transmise în timp real la Centrul Național de Date (CND), de la INCDFP, din Măgurele, unde sunt prelucrate, stocate și arhivate.

1.2. Configurație și instrumentație

În prima perioadă de funcționare (2009 – 2010), array-ul IPLOR a avut în componența sa trei elemente: IPH4, IPH5 și IPH6. În anul 2010, a fost adăugat cel de-al patrulea element (IPH7), iar apoi, pe parcursul anului 2012, au mai fost instalați încă doi senzori de infrasunete, în locațiile IPH2 și IPH3. În prezent configurația stației este compusă din 6 elemente (**figura 1**).

Toate cele 6 elemente ale stației IPLOR care funcționează în prezent sunt echipate cu microfoane (microbarometre) Chaparral Physics model 25 și sunt echipate cu digitizoare Quanterra 330 (Kinemetrics) cu precizie de 24-biți. Rata de eșantionare aplicată datelor înregistrate cu senzorii de infrasunete Chaparral este de 20 eșantioane/sec, comună pentru acest tip de date.

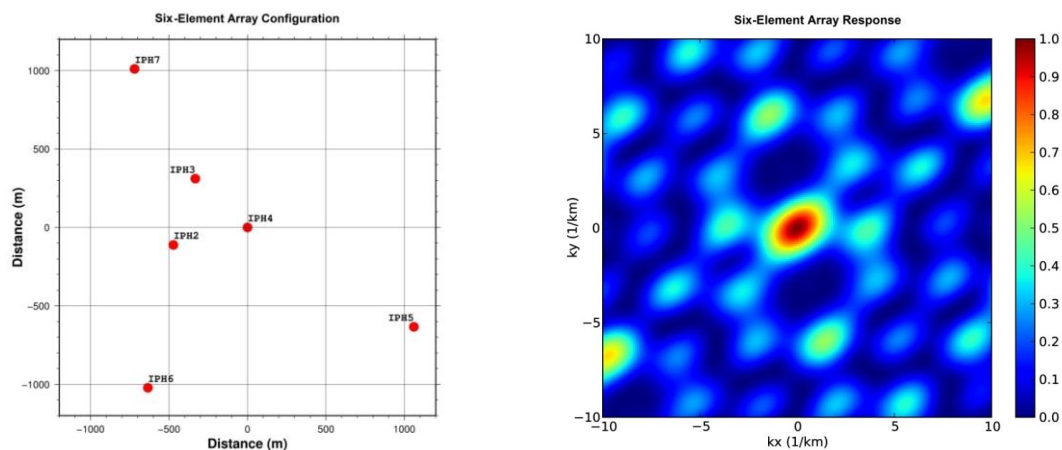


Figura 1. Configurația actuală stației de măsurare a infrasunetelor de la Ploștina (stânga: geometria array-ului; dreapta: răspunsul array-ului ca funcție de număr de undă k [1/km])

2. Metode optime de prelucrare și analiză a datelor înregistrate cu stația IPLOR, pentru monitorizarea surselor de tip exploziv, inclusiv a celor seismo-acustice

2.1. Caracteristici generale ale sistemului de măsurare în contextul atingerii obiectivului fazei

După cum s-a evidențiat în faza anterioară a proiectului, pe baza prelucrării a unei cantități semnificative de date înregistrate (mai mult de 6 ani), stația IPLOR s-a dovedit eficientă în special în observarea semnalelor acustice produse de surse specifice de tip impulsiv (cu conținut de frecvențe mai mari): explozii accidentale și controlate, erupții vulcanice, meteoriți, furtuni etc. Acest fapt este rezultatul firesc al caracteristicilor sistemului instalat, respectiv al (1) capabilităților senzorilor infrasonici – domeniul optim de măsurare a semnalului util este între 0,1 și 200 Hz și al (2) aperturii array-ului, care este una medie (2,5 km), cu distanțe inter-senzori care variază între 450 și 1240 m (**figura 1**).

În plus, în contextul existenței sistemului complex de monitorizare de la Ploștina, array-ul infrasonic se poate utiliza cu succes pentru evaluarea importanței amplasării comune a senzorilor seismici și acustici, prin monitorizarea seismică și acustică a evenimentelor locale și regionale, respectiv prin detectarea semnalelor infrasonice produse de explozii, detonări în mine și în cariere, care prezintă interes în evaluarea hazardului geofizic.

În vederea extragerii și caracterizării cât mai eficiente a informației de interes din cadrul acestei faze, respectiv a semnalelor infrasonice generate de surse naturale și antropogenice (locale și regionale) cu caracter impulsiv (explozii chimice, detonări, bolizi, furtuni), s-a urmărit adoptarea unui sistem adecvat de prelucrare și analiză a datelor înregistrate cu array-ul de infrasunete IPLOR. Metodele de extragere eficientă a semnalelor infrasonice coerente și de caracterizare cât mai precisă a acestor surse au fost selectate pe baza investigării amănunțite a caracteristicilor stației IPLOR (tip de senzori, configurație, nivel de zgomot de fond) și de coerența semnalului detectat.

2.2. Programele utilizate pentru prelucrarea și analiza datelor IPLOR

2.2.1. Metoda generală

Pentru prelucrarea datelor înregistrate cu stația IPLOR, în vederea extragerii și caracterizării semnelor infrasonice utile, s-au aplicat tehnicile specifice array-urilor acustice, bazate pe aplicarea metodei de corelare încrucișată (cross-correlation) a formelor de undă, respectiv algoritmul PMCC (Progressive Multi-Channel Correlation – corelare multi-canal progresivă) (*Cansi, 1995; Cansi și Klinger, 1997*). Această metodă specifică array-urilor a fost inițial dezvoltată pentru prelucrarea datelor seismice, dovedindu-se eficientă în identificarea semnalelor coerente de amplitudine mică din zgomotul incoerent.

Principiul de funcționare și modul de prelucrare a semnalelor înregistrate de o stație infrasonică cu un software specializat care folosește acest tip de algoritm (dezvoltat la IDC – Centrul Internațional de Date) al CTBTO (Organizația Tratatului de Interzicere Totală a Experiențelor Nucleare) a fost prezentat pe larg de *Brachet et al., 2010*. Acest sistem realizează detectarea automată a semnalelor infrasonice, clasificarea și identificarea celor mai semnificative detecții ca faze (spre deosebire de zgomot), în vederea grupării acestor faze pentru a constitui evenimente acustice.

2.2.2. Sistemul actual implementat la CND

În prezent, pentru prelucrarea și analiza datelor acustice înregistrate de stația IPLOR, la CND se folosește un grup de două aplicații software orientate spre detectarea semnalelor de infrasunete, care a fost dezvoltat recent de către Departamentul de analiză, supraveghere și mediu al Comisariatului de Energie Atomică din Franța (CEA/DASE – Commissariat à l'Énergie Atomique/Département analyse, surveillance, environnement): DTK-GPMCC and DTK-DIVA. Aceste aplicații au fost integrate în pachetul standard extins de programe (NDC-in-a-BOX) dezvoltat în cadrul IDC al CTBTO pentru a oferi Centrelor Naționale de Date capacitatea de a recepționa, prelucra și analiza datele înregistrate de rețeaua de monitorizare a IMS.

Acest pachet, cu capacități extinse de detectare și analiză a semnalelor infrasonice, a fost definitivat și distribuit pe parcursul desfășurării prezentului proiectului, el începând să fie folosit la CND din a doua parte a anului 2016.

Prin utilizarea combinată a celor două aplicații se poate realiza:

- configurarea algoritmului PMCC de detecție a semnalelor de infrasunete și studierea detaliată a acestor detecții (programul DTK-GPMCC)
- întocmirea de statistici referitoare la performanța stației la detectarea surselor de infrasunete și la efectele de propagare (condițiile meteorologice locale, sursele de zgomot, transportul de mase de aer în stratosferă) (programul DTK-DIVA)
- identificarea parametrilor care influențează capacitatea de detecție a stației

3. Analiza seismo-acustică a evenimentelor de referință generate de surse de tip impulsiv, observate cu stația IPLOR

3.1. Setul de evenimente de referință

Acest set de evenimente de referință a fost constituit pe baza evenimentelor de interes observate în urma prelucrării cantității importante de date înregistrate de stația IPLOR. Ele au fost selectate astfel încât să acopere tipurile de surse acustice, respectiv naturale și antropogenice, locale și regionale, cu caracter impulsiv și care au generat semnale înregistrate cu senzorii de infrasunete ai stației IPLOR, array-ul seismic PLOR și seismometrele RSN.

Lista evenimentelor de referință care au fost analizate în cadrul acestei faze a proiectului este dată în **tabelul 1** și reprezintă tipuri importante de surse observabile frecvent cu stațiile de monitorizare a infrasunetelor: explozii chimice (accidentale sau controlate), detonări în cariere, bolizi (explozii ale meteoriților în atmosferă), furtuni locale puternice, boom-uri sonice (provocate de experimente geofizice sau de deplasarea avioanelor supersonice). Evenimentele au fost listate în ordine cronologică.

Sursele de validare ale evenimentelor de referință provin din diferite surse, precum:

- buletinele revizuite (LEB), conținând localizări ale evenimentelor acustice, realizate la IDC și la care CND are acces securizat
- catalogul de cutremure ROMPLUS (*Oncescu et al., 1999*) actualizat
- rapoarte ale altor instituții asupra exploziilor chimice (Bulgaria, Israel) și bolizilor (ROSA – Romanian Space Agency/Agenția spațială română)
- înregistrările stațiilor Rețelei Seismice Naționale (RSN) operată de INCDFP
- înregistrările atmosferice și de câmp electric ale stației meteo și electrometrului din cadrul sistemului complex de monitorizare de la Ploștina
- mijloace mass-media (MM)

Pentru aceste evenimente de referință s-au s-au estimat:

- distanța epicentrală (distanța eveniment – stație)
- azimutul invers (BAZ) teoretic (azimutul stație – eveniment, măsurat în sens orar dinspre nord)
- viteza orizontală teoretică („celerity”), calculată pe baza unei proceduri utilizate la IDC (*IDC/OPS/SOP/301/Rev.1*), conform căreia propagarea undei infrasonice este caracterizată prin trei modele constante de viteză („celerity”) (330m/s, 295m/s și 303m/s), dependente de distanța epicentrală și fără aplicarea unei corecții de azimut datorate vânturilor atmosferice
- timpul (UTC) teoretic (probabil) de sosire la stație, calculat ca raport dintre distanța epicentrală și viteza orizontală teoretică

Tabelul 1. Setul de evenimente de referință generate de surse geofizice acustice de tip impulsiv și observate în înregistrările stației IPLOR

Tip eveniment	Data Ora UTC	Amplasare/descriere eveniment	Stații	Surse validare
Explozie experimentală (controlată)	26.08.2009 06:31:54	Deșertul Negev, poligonul militar Sayarim, Israel	IPLOR	Geophysical Institute of Israel, LEB
Detonare în carieră	20.01.2011 09:10:11	Nordul Dobrogei, România	IPLOR, stații RSN	Romplus
Explozie accidentală	11.07.2011 02:50	Baza navală Evangelos, Cipru (explozie containere cu explozivi)	IPLOR	MM, LEB
Furtună locală puternică	18-19.05.2012	Zona Vrancea - Ploștina, România	IPLOR, PLOR	Observații locale, măsuratori câmp electric
Detonare în carieră	23.05.2012 13:55:35	Dobrogea, România	IPLOR, stații RSN	Romplus
Explozie accidentală	05.06.2012 11:30	Depozit de muniție în apropierea orașului Sliven, sud-estul Bulgariei	IPLOR	MM, LEB
Boom-uri sonice produse la distanță locală	04.07.2013	Platforma continentală a Mării Negre - prospecțiuni seismice 3D (OMV) prin detonare puști (generatoare) cu aer comprimat de pe nava de achiziție	IPLOR, stații RSN	Romplus, raport OMV (internet)
Explozie accidentală	01.10.2014 14:00	Fabrica de explozibili Videx, în apropierea orașului Gorni Lom, nord-vestul Bulgariei	IPLOR	MM
Bolid (explozie meteorit)	07.01.2015 01:05	Zona Vrancea - Ploștina, România	IPLOR, PLOR, stații RSN	ROSA, LEB
Boom-uri sonice produse la distanță regională	08.02.2017	Zona Mării Nordului – activitate constantă și intensă a aeronavelor supersonice	IPLOR	LEB
Explozie accidentală	10.12.2016 03:37	Tren cisternă cu gaz petrolier în stația Hitrino, nord-estul Bulgariei	IPLOR	MM
Explozii accidentale repetate	26-27.09.2017 19:00	Depozit de muniție în apropierea orașului Kalynivka, regiunea Vinnytsia, centrul Ucrainei	IPLOR, PLOR	LEB

3.2. Procedura de configurare a programului GPMCC pentru prelucrarea datelor seismo-acustice

3.2.1. Datele acustice (array-ul IPLOR)

Așa cum s-a precizat anterior, pentru obținerea detecțiilor provenite de la evenimentele de referință din **tabelul 1** și investigarea caracteristicilor acestora s-a utilizat programul DTK-GPMCC, forma GPMCC a algoritmului PMCC. Pentru configurarea benzilor de frecvență folosite în prelucrarea datelor IPLOR, s-a aplicat o metodă dezvoltată recent în vederea îmbunătățirii detectorului PMCC de infrasunete de către La *Pichon et al., 2010*. Pentru fiecare dintre acestea, parametrii PMCC au fost optimizați astfel încât să se obțină un echilibru între scăderea nivelului de detecție și reducerea numărului de detecții false. Aceasta s-a făcut prin intermediul mărimii ferestrei de timp în care se face detecția și care se translatează peste datele înregistrate, precum și prin lungimea benzii de frecvențe care se aplică pentru filtrarea semnalelor.

În funcție de tipul evenimentelor analizate, au fost adoptate două variante de configurare: (1) un sistem cu 15 benzi de frecvență spațiate logaritmice pe domeniul 0,1 – 5,0 Hz și cu lungimi ale ferestrei de timp care are o distribuție de tip $1/f$ (f – frecvența), și (2) un sistem cu 10 benzi de frecvență spațiate logaritmice pe domeniul 1,0 – 5,0 Hz și cu lungime constantă (30s) a ferestrei de timp.

3.2.2. Datele seismice (array-ul PLOR)

Programul DTK-GPMCC s-a aplicat și în cazurile evenimentelor în care s-a observat că array-ul seismic PLOR, instalat în același amplasament cu array-ul infrasonic IPLOR, a detectat semnale acustice generate de sursa respectivă. În această situație au fost două evenimente pentru care s-a aplicat programul GPMCC, fiecare având o configurare specifică a benzilor de frecvență: (1) sistem cu 10 benzi de frecvență spațiate logaritmice pe domeniul 1,5 – 5,0 Hz și cu lungime constantă (30s) ale ferestrei de timp (furtuna locală, 18-19.05.2012), și (2) sistem cu 10 benzi de frecvență spațiate logaritmice pe domeniul 0,3 – 5,0 Hz și cu lungime constantă (30s) ale ferestrei de timp (explozia meteoritului, 07.01.2015).

3.3. Aplicarea programului GPMCC pentru prelucrarea datelor seismo-acustice și analiza rezultatelor

Detectorul GPMCC, configurat în modul prezentat anterior, a fost aplicat pentru prelucrarea datelor înregistrate de stațiile IPLOR și PLOR în cazul evenimentelor de referință din **tabelul 1**, urmărindu-se extragerea și caracterizarea semnalelor infrasonice utile.

În **tabelul 2** sunt prezentate caracteristicile de identificare a evenimentelor de referință punctuale (explozii), respectiv originea și localizarea geografică, precum și rezultatele obținute atât din calculul de estimare a parametrilor conecși (distanță epicentrală, valoarea teoretică a azimutului invers, viteza teoretică) cât și din aplicarea programului GPMCC (valorile observate ale azimutului invers, frecvențele medii și viteza fazelor acustice detectate) pentru prelucrarea datelor IPLOR.

Tabelul 2. Caracterizarea evenimentelor acustice de referință cu stația IPLOR

Data	Ora	Latitudine (°N)	Longitudine (°E)	Distanță (km)	BAZ		Vit. obs. (km/s)	Frecvență (Hz)	Regiune
					Exp.	Obs.			
26.08.2009	06:31:54	30.0006	34.8135	1897.8	155.2	156.9	0.355	1.2	Israel (Sayarim)
20.01.2011	09:10:11	45.1400	28.2600	148.6	121.6	123.6	0.343	1.6	Dobrogea Nord
11.07.2011	02:50:00	34.7281	33.2855	1356.9	153.2	158.2	0.352	1.0	Cipru
23.05.2012	13:55:35	44.2300	28.3100	222.9	143.4	144.4	0.332	2.5	Dobrogea
05.06.2012	11:30:00	42.6471	26.6689	356.1	179.7	184.2	0.364	1.5	Bulgaria Sud-Est
01.10.2014	14:00:00	43.4834	22.7419	406.3	231.0	231.3	0.334	1.3	Bulgaria Nord-Vest
10.12.2016	03:37:00	43.4260	26.9090	270.4	175.5	186.2	0.361	1.4	Bulgaria (Hitirino)
26.09.2017	19:02:00	49.4058	28.4999	418.9	18.7	18.6	0.347	1.5	Ucraina (Kaliniwka)

Distanță – distanța epicentrală eveniment-stație

BAZ exp. – azimut invers teoretic (așteptat)

BAZ obs. – azimut invers observat (valoare medie)

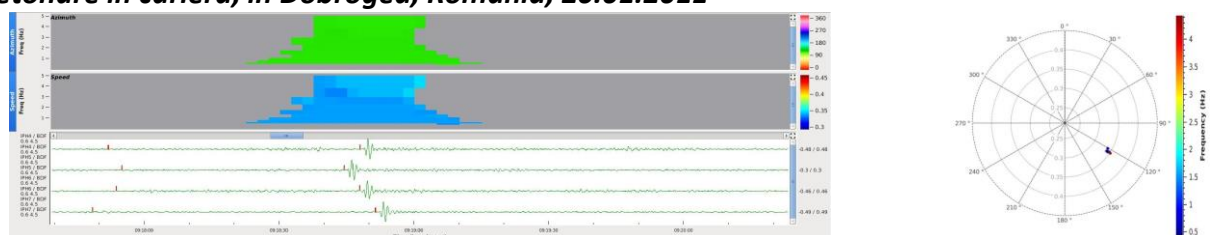
Vit. obs. – viteza calculată a semnalului acustic observat la stația IPLOR

În continuare, sunt prezentate trei dintre reprezentările grafice ale rezultatelor obținute din identificarea semnalelor infrasonice la stația IPLOR ca provenind de la evenimentele de referință listate în **tabelul 2**. Restul de evenimente sunt prezentate în forma in-extenso a raportului.

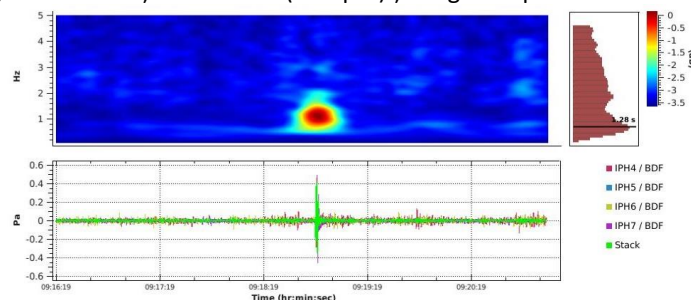
Sau adăugat în plus informații care să completeze caracterizarea tipului de eveniment, precum:

- rezultate obținute din identificarea semnalelor infrasonice la stația seismică PLOR (în cazul furtunii locale și a bolidului)
- rezultatul aplicării unui program de raytracing 2D pentru descrierea teoretică a „canalului infrasonic” de propagare a semnalului între sursă și stație (*Assink și Smets, 2017*). Acest program folosește un model atmosferic simplificat (*Lingevitch & Collins, 1999* și *Waxler et al. , 2015*).
- forme de undă seismo-acustice înregistrate de stațiile IPLOR și PLOR și stațiile RSN
- rezultatele ale măsurătorilor de câmp electric din amplasamentul IPLOR

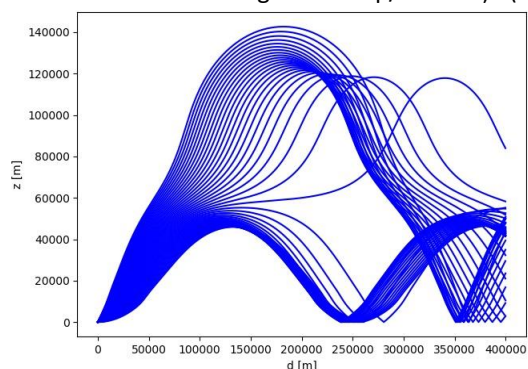
1. Detonare în carieră, în Dobrogea, România, 20.01.2011



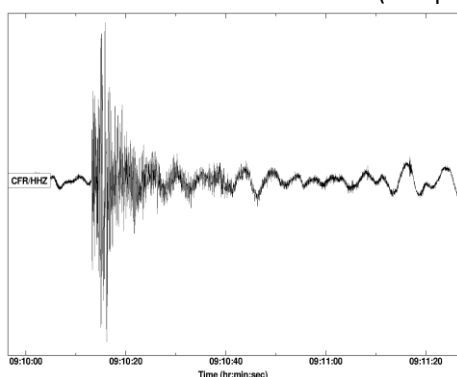
Panoul grafic al detecțiilor GPMCC (dreapta) și diagrama polară a acestora (stânga)



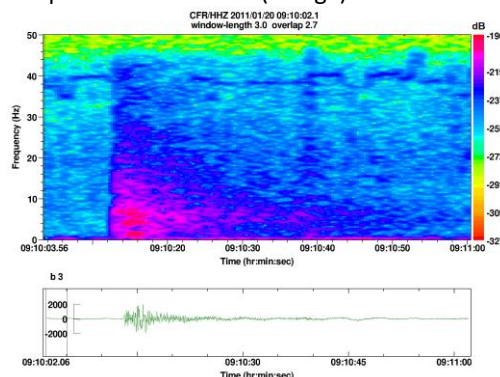
Transformata wavelet a diagramei timp/frecvență (sus) a formei de beam a înregistrărilor elementelor IPLOR (jos)



Rezultatul aplicării programului de raytracing 2D: reprezentarea grafică (distanță vs. altitudine) în secțiune transversală azimutală a razelor (dreapta) și viteza aparentă pentru fiecare rază (stânga)



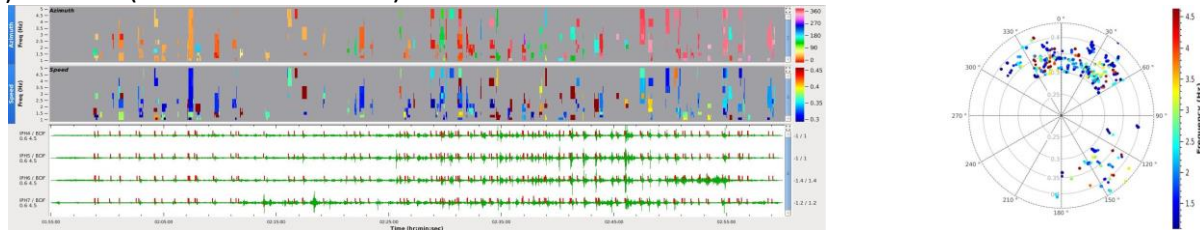
Formă de undă înregistrată de stația seismică CFR (canal vertical) – distanță epicentrală 10 km



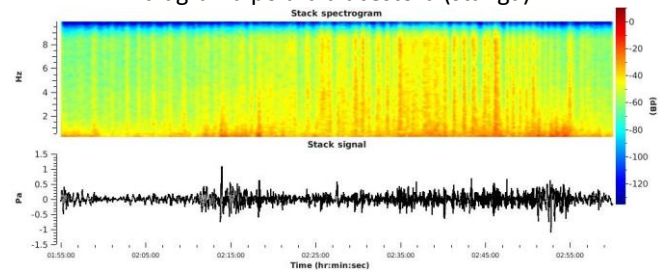
Spectrograma înregistrării calculată pentru o fereastră de 60s (canal vertical)

2. Furtună locală puternică în zona Vrancea - Ploștina, România, 18-19.05.2012

• Stația IPLOR (date de infrasunete)

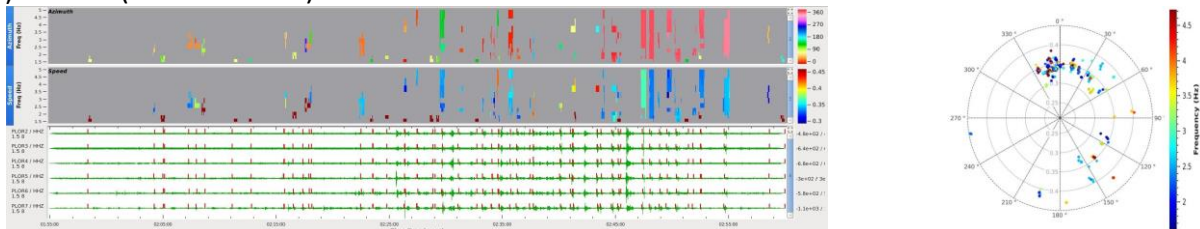


Panoul grafic al detecțiilor GPMCC pentru o fereastră de timp de 3900 s selectată în ziua de 19.05.2012 (dreapta) și diagrama polară a acestora (stânga)

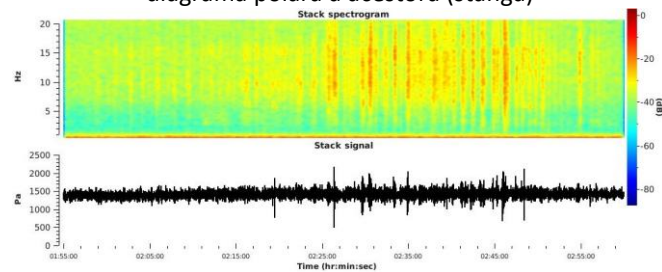


Spectrograma sumei formelor de undă selectate mai sus

• Stația PLOR (date seismice)

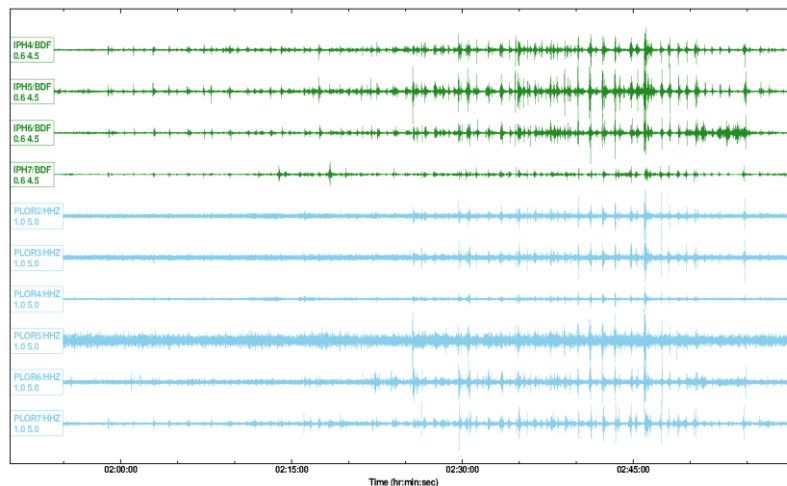


Panoul grafic al detecțiilor GPMCC pentru o fereastră de timp de 3900 s selectată în ziua de 19.05.2012 (dreapta) și diagrama polară a acestora (stânga)

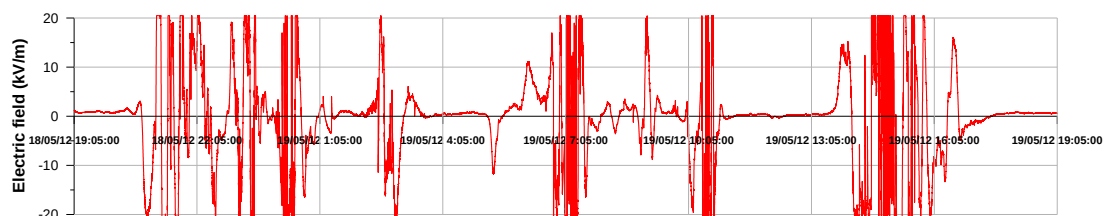


Spectrograma sumei formelor de undă selectate mai sus

• Forme de undă seismo-acustice înregistrate de stațiile IPLOR și PLOR și măsurători de câmp electric în amplasament

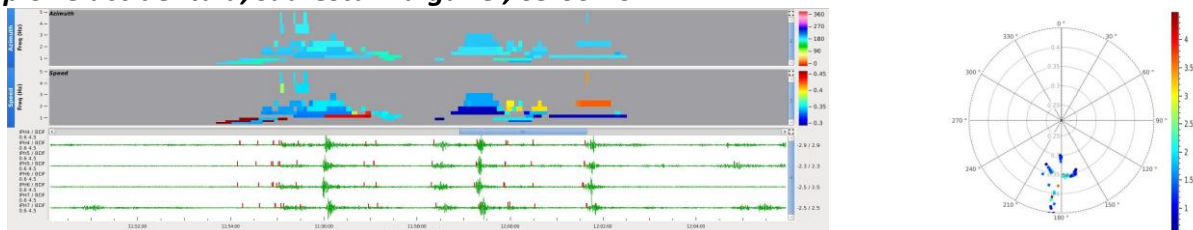


Seismogramele înregistrate cu stațiile IPLOR (cu verde) și PLOR (cu albastru) pentru o fereastră de timp de 3900 s selectată în ziua de 19.05.2012

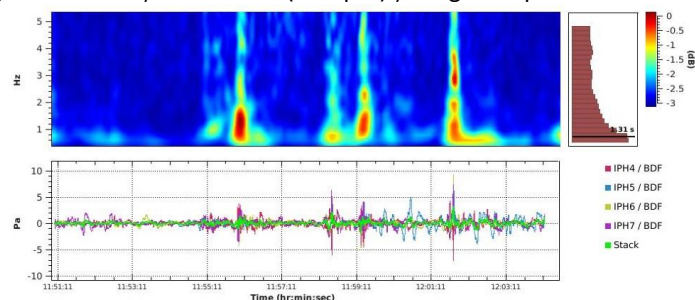


Reprezentarea grafică a variației câmpului electric măsurat în amplasamentul IPLOR cu sistemul EFM-100 Boltek

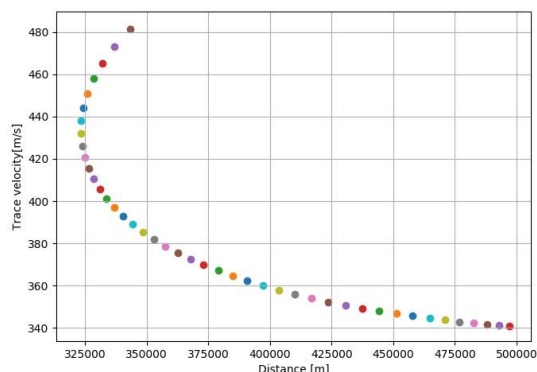
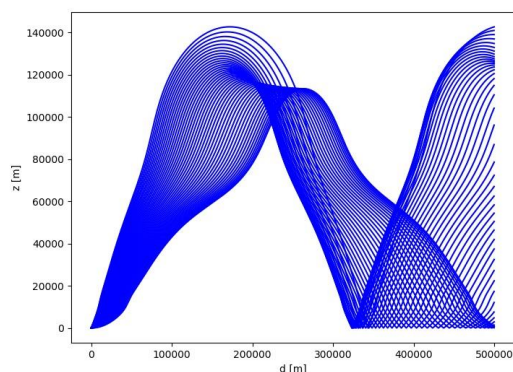
3. Explozie accidentală, sud-estul Bulgariei, 05.06.2012



Panoul grafic al detecțiilor GPMCC (dreapta) și diagrama polară a acestora (stânga)



Transformata wavelet a diagramei timp/frecvență (sus) a formei de beam a înregistrărilor elementelor IPLOR (jos)



Rezultatul aplicării programului de raytracing 2D: reprezentarea grafică (distanță vs. altitudine) în secțiune transversală azimutală a razelor (dreapta) și viteza aparentă pentru fiecare rază (stânga)

3.4. Concluzii

În urma prelucrării datelor înregistrate de stația IPLOR de măsurare a infrasunetelor în cazul evenimentelor de referință, s-a observat că aceasta este eficientă în observarea semnalelor acustice produse de surse specifice de tip impulsiv (cu conținut de frecvențe mai mari): explozii accidentale și controlate, bolizi, furtuni, boom-uri sonice. Această observație este în concordanță cu caracteristicile senzorilor instalați la array-ului de Ploștina (răspuns în frecvență, domeniu dinamic etc.) și apertura destul de mare a acestuia.

În plus, array-ul de la Ploștina se poate utiliza pentru evaluarea importanței amplasării comune a senzorilor seismici și acustici, prin monitorizarea seismică și acustică a evenimentelor locale și regionale, respectiv prin detectarea semnalelor infrasonice produse de explozii, detonări în mine și în cariere.

Capacitatea de detecție a stației IPLOR prezintă o comportare sezonier alternantă, deoarece modul de propagare a undelor prin „canalele infrasonice” este puternic influențat de direcția și viteza vânturilor stratosferice, care se modifică bianual: propagare spre vest, pe timpul verii și spre est, pe durata iernii. În general, se observă că detecția semnalelor de frecvență relativ înaltă (peste

1 Hz) predomină în înregistrările IPLOR. În plus, semnalele infrasonice sunt influențate de profilele atmosferice de temperatură și vânt, viteza efectivă de undă a semnalelor infrasonice depinzând atât de altitudine cât și de distanța la care se propagă acestea. În încercarea de descriere a căilor directe de propagare a infrasunetelor și de validare preliminară a modului în care stația IPLOR detectează anumite tipuri de evenimente (caracterizate prin distanța la care se produc și amplitudinea lor), s-a aplicat un program de *raytracing 2D*, urmărindu-se pentru descrierea teoretică a „canalului infrasonic” (raze de propagare, viteză aparentă a acestora).

4. Procedură de discriminare a evenimentelor seismice: distingerea dintre cutremure naturale și explozii de carieră (regiunea Dobrogea)

Această procedură urmărește valorificarea rezultatelor obținute din analiza seismo-acustică prezentată anterior, în vederea aplicării lor pentru „rafinarea” catalogului ROMPLUS actualizat, elaborat la CND. S-a avut în vedere extragerea din acesta a evenimentelor de tip explozie (generatoare și de semnal acustic, nu numai seismic) și păstrarea doar a cutremurelor tectonice (înregistrate cu stațiile seismice). Studiul s-a făcut pentru zona Dobrogea, avându-se în vedere că amplasarea acesteia față de stația IPLOR (distanță între 100 și 250 km) oferă posibilitatea observării destul de frecvente a semnalelor de infrasunete produse în cazul detonărilor în cariere (surse repetitive de evenimente seismo-acustice). În acest sens, datele acustice înregistrate cu IPLOR au fost combinate cu observațiile seismice ale stațiilor RSN.

4.1. Cutremurele dobrogene

4.1.1. Seismicitatea Dobrogei

Situată în partea de sud-est a României, între fluviul Dunărea și Marea Neagră, Dobrogea reprezintă una dintre zonele epicentrale care caracterizează seismicitatea României, fiind caracterizată printr-o activitate seismică moderată (cutremure crustale cu magnitudine mică, în general, $M_w \leq 5.3$), concentrate în partea de nord a Depresiunii Predobrogene (*Radulian et al., 2000*). Cutremurele prezintă o orientare generală NV-SE și sunt localizate în special pe teritoriul Dobrogei de Nord și la limita dintre Dobrogea Centrală și de Sud. Direcțiile de aliniere a epicentrelor pun în evidență două caracteristici distincte: una pentru zona Dobrogei de Nord și cealaltă pentru Dobrogea Centrală și de Sud. În Dobrogea de Nord, epicentrele sunt mult mai numeroase și se aliniează oarecum paralel la tectonica cunoscută, iar la sud de Falia Peceneaga-Camena se observă o distribuție a seismicității care urmărește atât direcția faliilor Palazu și Horia-Pantelimonul de sus cât și o direcție SV-NE transversală la acestea două. În plus, se păstrează tendința de orientare NV-SE și în zona continentală a Mării Negre (după *Diaconescu și Malița, 2011*).

4.1.2. Carierele amplasate în zona Dobrogei

Pe lângă seismicitatea naturală, Dobrogea este afectată și de surse antropice reprezentate de exploziile controlate de derocare efectuate frecvent pentru exploatarea carierelor din zonă. Existența acestor cariere îngreunează semnificativ obținerea unei distribuții epicentrale reale pentru cutremurele produse pe teritoriului dobrogean.

Până la începutul anilor 1990, pentru a se evita introducerea în catalogul de cutremure a unor explozii, se menținea legătura telefonică permanentă cu carierele, astfel încât, în cazul producerii unei explozii de exploatare, erau comunicate ora și coordonatele acesteia, precum și cantitatea de dinamită folosită, în vederea localizării evenimentului și evaluării magnitudinii acestuia. După anii 1990, când această comunicare nu a mai fost posibilă, identificarea exploziilor de carieră din zonă în vederea discriminării lor de cutremurele naturale s-a făcut în special prin metode bazate pe teoria cunoscută în domeniu, ținându-se cont că:

- forțele care acționează într-o sursă de tip explozie au caracteristici foarte diferite de cele apărute în cazul unui cutremur natural
- cutremurele naturale apar de obicei la adâncime

- exploziile industriale sunt controlate astfel încât energia să fie eliberată într-un interval de timp mai mare (detonare progresivă a explozibilului), aceste particularități observându-se în semnalul seismic înregistrat

În prezent, pe teritoriul Dobrogei, a fost identificat un număr de peste 60 de cariere (unele dintre ele probabil inactive acum), reprezentând surse controlate de detonări care, în mod frecvent, pe baza înregistrărilor stațiilor RSN, sunt detectate și identificate la CND ca evenimente seismice mici. Prin urmare, cele două tipuri de surse seismice localizate în Dobrogea – naturale și antropice – se regăsesc împreună în catalogul de cutremure ROMPLUS actualizat, astfel încât, contaminarea acestuia cu evenimente artificiale putând induce erori în estimarea seismicității regiunii.

În acest context, scopul prezentei proceduri este investigarea semnalelor infrasonice în asociere cu detecțiile seismice în vederea identificării exploziilor de cariere din catalogul ROMPLUS. Analiza s-a făcut pentru doi ani (ianuarie 2011 – decembrie 2012). În **figura 2** este prezentată amplasarea carierelor identificate în Dobrogea, în contextul distribuției epicentrale a evenimentelor ROMPLUS din perioada analizată în regiune, al sistemului de falii (*Răileanu, 2008*) și al amplasării stațiilor seismologice instalate în regiune (după *Ghica et al., 2016*).

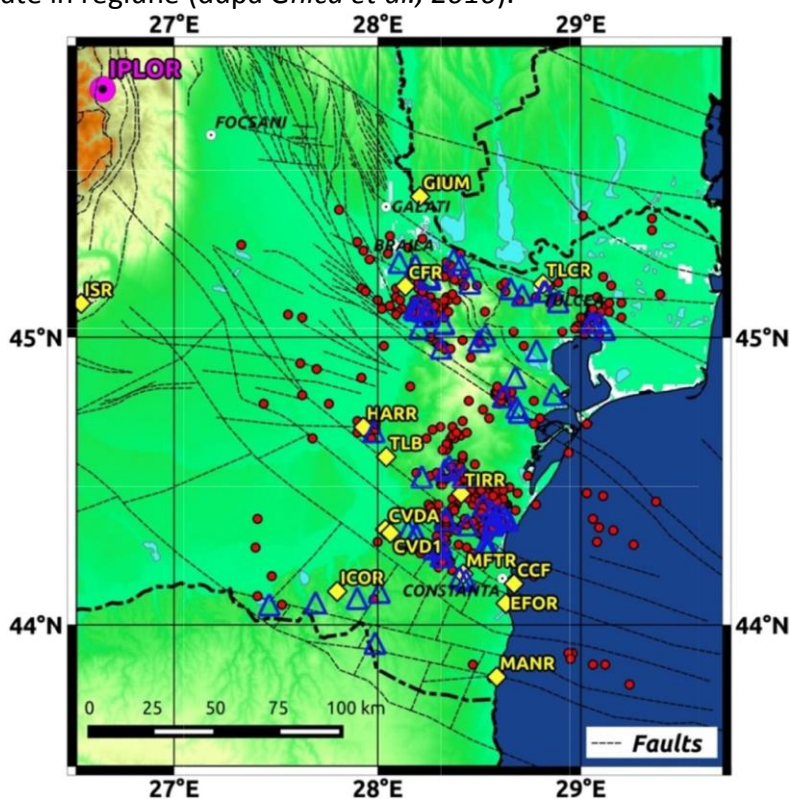


Figura 2. Seismicitatea regiunii Dobrogea în perioada 2011 – 2012 (cu cercuri roșii) și sistemul de falii.

Amplasamentele carierelor sunt marcate cu triunghiuri albastre, iar celor ale stațiilor RSN cu romburi galbene. Stația IPLOR este reprezentată în colțul din stânga, sus (după *Ghica et al., 2016*).

4.1.3. Activitatea seismică (cutremure/explozii) în regiunea Dobrogea

În intervalul de timp de doi ani considerat, în catalogul ROMPLUS actualizat au fost identificate 520 de evenimente localizate în regiunea Dobrogea. În vederea evaluării globale a acestei activități seismice observate, s-au analizat trei tipuri de statistici:

(1) Distribuția diurnă a evenimentelor (**figura 3**), în care se observă un vârf semnificativ în mijlocul zilei, corespunzător orelor de lucru (între 09 și 17, ora locală). Peste 90% din numărul total de evenimente localizate în ROMPLUS au fost observate în acest interval de timp, acest fapt indicând o importantă contribuție a activității industriale din zonă, respectiv detonări repetate și/sau mici explozii în cariere/mine.

(2) Distribuția lunară a evenimentelor (**figura 4**), în care se observă o variație sezonieră cauzată de activitățile industriale, cu un maxim pe perioada verii (aprox. 35 evenimente/lună) și un minim în timpul iernii (aprox. 15 evenimente/lună).

(3) Distribuția în funcție de magnitudine (M_w) a evenimentelor (**figura 5**), în care se observă că în afară de trei cazuri, evenimentele localizate în regiunea Dobrogea în cei doi ani au $M_w \leq 2,8$. Domeniul îngust de magnitudine (95%) observat ($M_w = 1,9 \div 2,3$) este comparabil cu o situația unei energii eliberate în cazul unor explozii de suprafață de aprox. 1 tonă de TNT (*Bormann et al., 2002*). Acest fapt sugerează încă o dată existența unui număr important de evenimente artificiale în catalogul ROMPLUS.

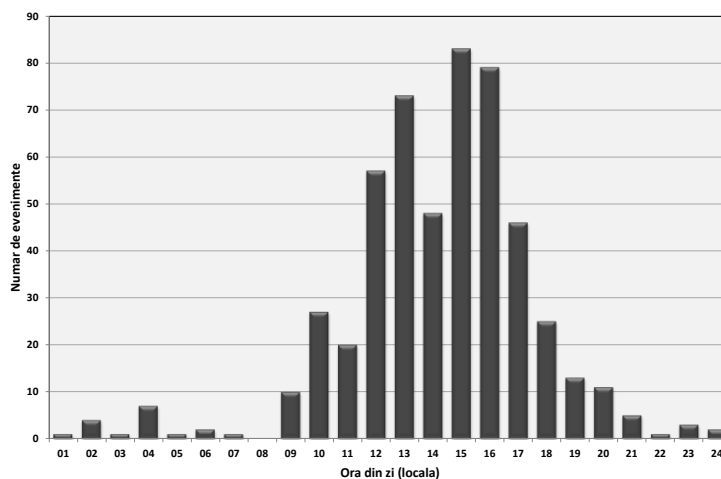


Figura 3. Distribuția diurnă a evenimentelor seismice localizate în Dobrogea observate în catalogul ROMPLUS în perioada 2011-2012

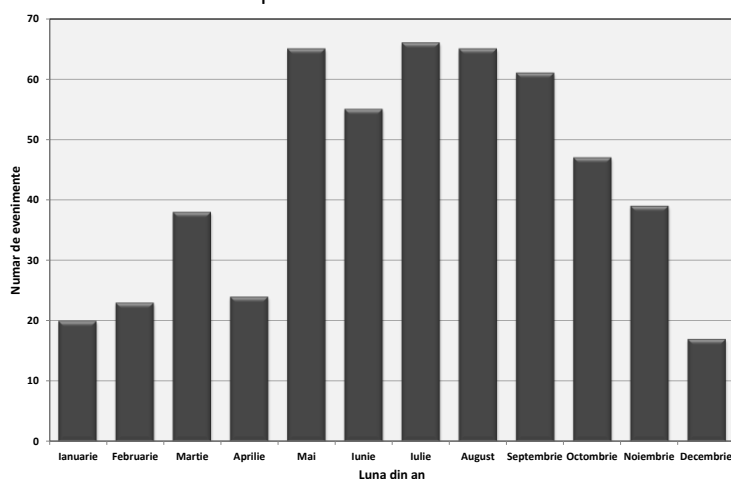


Figura 4. Distribuția lunară a evenimentelor seismice localizate în Dobrogea observate în catalogul ROMPLUS în perioada 2011-2012

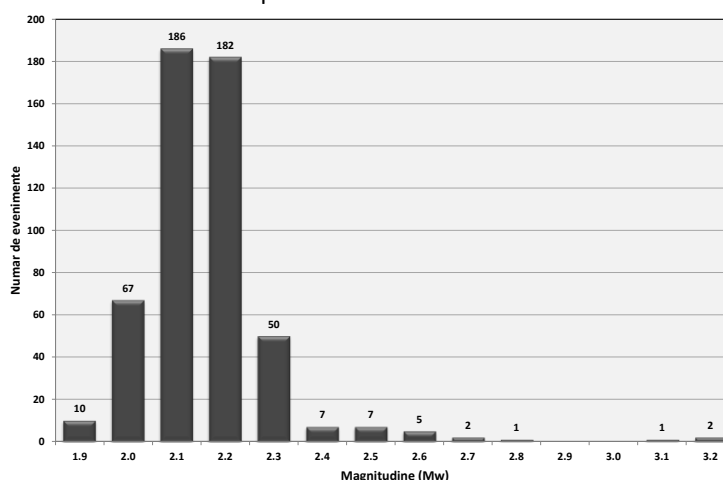


Figura 5. Distribuția în funcție de magnitudine M_w a evenimentelor seismice localizate în Dobrogea observate în catalogul ROMPLUS în perioada 2011-2012. Calculul valorii M_w s-a făcut pe baza unei scheme de conversie adoptate pentru catalogul român de cutremure (*Oncescu et al., 1999*)

Histogramele prezentate în **figurile 3, 4 și 5** au rolul de a demonstra din punct de vedere statistic prezența exploziilor de carieră în catalogul ROMPLUS, printre evenimentele seismice localizate în regiunea Dobrogea.

4.2. Prelucrarea și analiza datelor

Ținând cont de caracteristicile seismice ale surselor explozive, prin procedura prezentă se urmărește detectarea semnalelor infrasonice care pot fi asociate cu epicentrele evenimentelor listate în ROMPLUS pentru regiunea Dobrogea. Datele înregistrate cu stația IPLOR în perioada 2011 – 2012 au fost prelucrate prin rularea în mod automat a programului PMCC integrat în software-ul CEA/DASE WinPMCC (*Le Pichon și Cansi, 2003*), în vederea obținerii buletinelor zilnice de detecții. Aceste buletine au fost supuse apoi unei analize interactive cu scopul extragerii caracteristicilor specifice semnalelor infrasonice și care au fost utilizate ulterior în procedură: timpul de detecție, direcția (azimutul invers – BAZ), viteza orizontală a fazei, conținutul de frecvență.

Pentru fiecare dintre evenimentele extrase astfel, presupunând că acestea ar putea fi surse de semnale infrasonice (explozii), care să fi detectate cu rețeaua locală IPLOR, s-au estimat: distanța epicentrală (distanța între stație și eveniment), azimutul invers teoretic (BAZ) și timpul teoretic (probabil) de sosire (UTC) a eventualelor faze infrasonice la stația înregistratoare, calculat pe baza unei viteze acustice prestabilite (în acest caz, s-a considerat o valoare de $v = 0,34$ km/s).

În **figura 6** este prezentată distribuția orară a azimutului (BAZ) „așteptat” (teoretic) la stație calculat pentru fiecare eveniment seismic din lista analizată. Se observă o concentrare a evenimentelor în intervalul de timp din mijlocul zilei și după două direcții predominante (BAZ = 120° și 140°), care corespund localizărilor a două grupuri de cariere active: unul în partea de nord a Dobrogei, iar celălalt în centrul regiunii (**figura 2**).

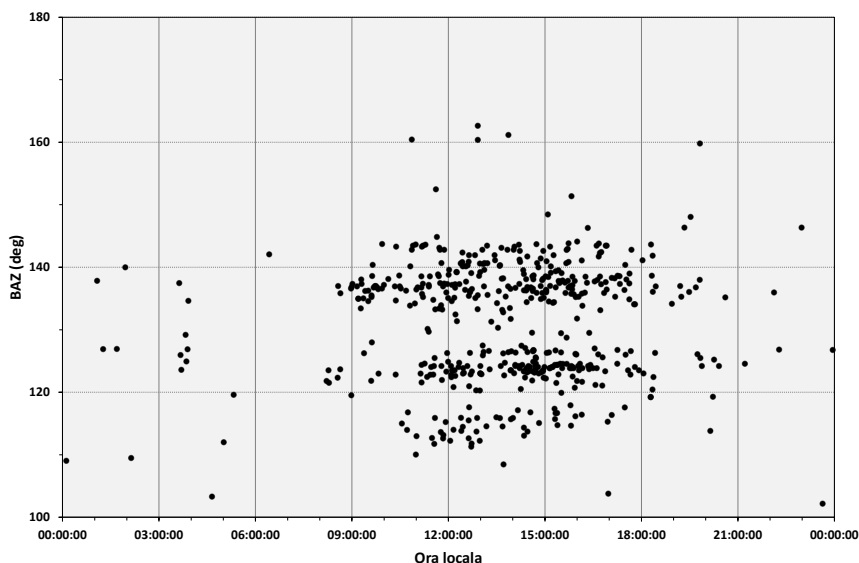


Figura 6. Distribuția orară a azimutului invers calculat pentru stația IPLOR (s-a folosit ora locală)

Din cauza faptului că viteza de propagare a unui semnal acustic în atmosferă este de aproximativ 10 ori mai mică decât cea a undei seismice, semnalele infrasonice ajung în amplasamentul IPLOR mai târziu. Prin urmare, pentru ca un eveniment seismic prezent în catalogul ROMPLUS să fie considerat de natură explozivă (detonare în carieră), este necesar ca lui să i se poată asocia un semnal acustic care îndeplinește două criterii (considerate ca acceptabile prin această procedură):

- (1) Valoarea măsurată a azimutului (BAZ) observat la stația IPLOR să aibă o deviație de maxim $\pm 20^\circ$ față de valoarea teoretică, estimată pentru localizarea din catalog.
- (2) Diferența dintre timpul de sosire observat la stația IPLOR a semnalului infrasonic și timpul teoretic (probabil) de sosire calculat să fie de maxim 10 min. Având în vedere complexitatea modelului de propagare a undei acustice, s-a preferat acceptarea acestei diferențe de timp în cazul stației IPLOR. În consecință, primul criteriu (azimutal) va prevala în analiză.

În completare, pe lângă prelucrarea datelor de infrasunete, s-au analizat și date seismice înregistrate cu stațiile RSN (date de bandă largă provenite de la canalele verticale), în vederea extragerii caracteristicilor utile ale acestora, precum: forma înregistrării, lungimea și conținutul de frecvențe (perioada). În acest scop s-a folosit analiza spectrală, spectrogramele calculate pentru formele de undă acustice și seismice reprezentând un instrument eficient pentru examinarea conținutului de frecvențe și energiei generate de o sursă explozivă, ca elemente utile în procesul de discriminare.

4.3. Rezultate și concluzii

În urma aplicării criteriilor descrise prin prezenta procedură, 104 evenimente localizate în regiunea Dobrogea în catalogul ROMPLUS între anii 2011 – 2012 au putut fi asociate cu semnale infrasonice detectate de stația IPLOR. Prin urmare, aceste evenimente seismo-acustice au fost identificate ca explozii de suprafață, produse în carierele din zonă. Aceste evenimente se caracterizează prin valori ale distanței epicentrale față de stația IPLOR între 110 și 230 km și un interval ale azimutului invers între 110° și 160° .

În **figura 7** este pus în evidență numărul de evenimente identificate ca explozii în contextul distribuției lunare (desfășurate pe cei doi ani analizați) a evenimentelor localizate în ROMPLUS.

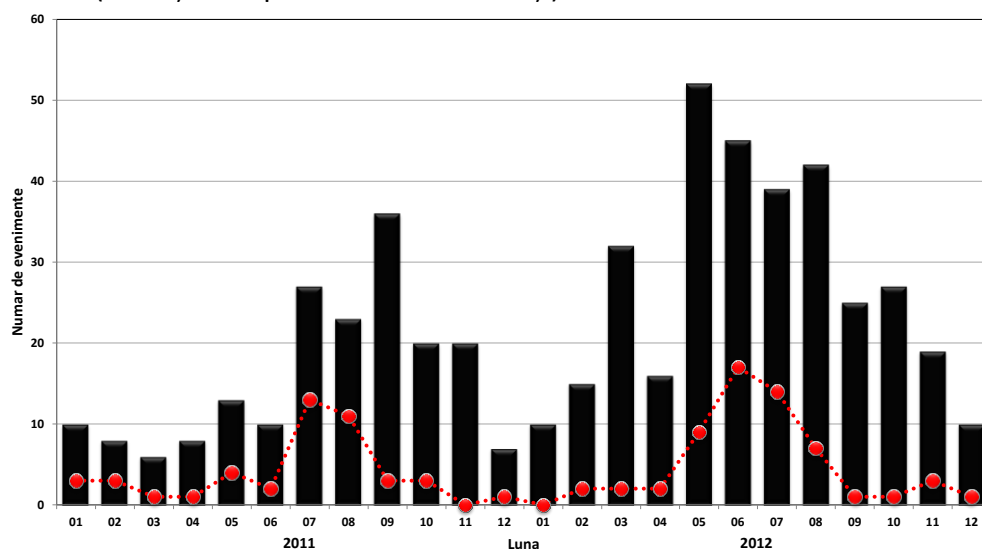
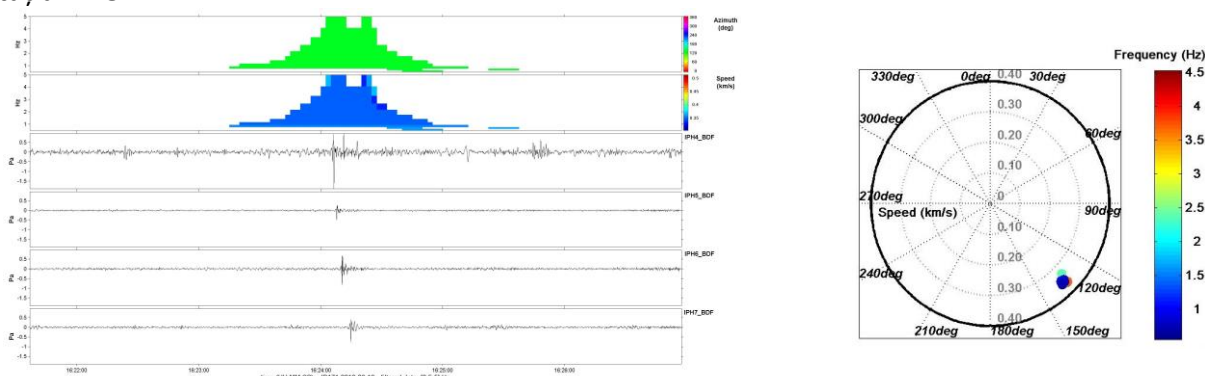


Figura 7. Distribuția lunară a evenimentelor seismice localizate în regiunea Dobrogea în perioada 2011 – 2012: pentru întregul catalog (cu negru) și pentru evenimentele identificate ca explozii (cu roșu)

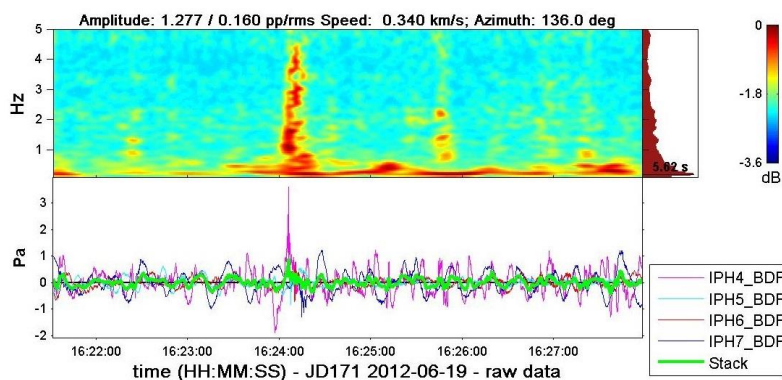
În continuare este prezentat un exemplu de eveniment seismo-acustic identificat din setul de date analizat utilizând procedura descrisă. Evenimentul a fost localizat în partea centrală a Dobrogei în data de 19 iunie 2012. Distanța sursei față de stația IPLOR este 200 km.

Sunt prezentate rezultatele obținute din prelucrarea datelor infrasonice: (1) stația IPLOR (200 km distanță epicentrală), și (2) a celor seismice – stația seismologică TIRR, inclusă în RSN (8 km distanță epicentrală).

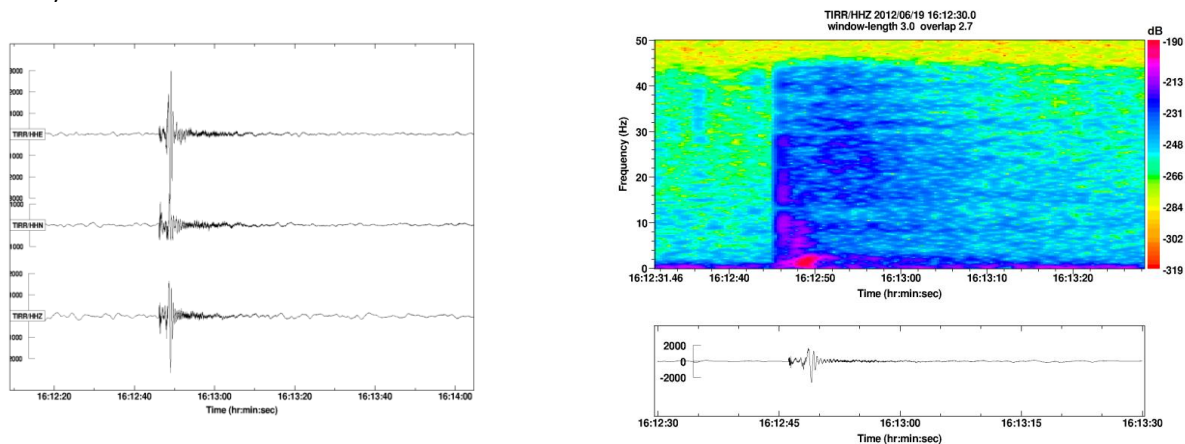
(1) Stația IPLOR



Panoul grafic al detecțiilor WinPMC (dreapta) și diagrama polară a acestora (stânga)



Transformata wavelet a diagramei timp/frecvență (sus) a formei de beam a înregistrărilor elementelor IPLOR (jos)
(2) Stația seismică TIRR



Formele de undă înregistrate de stația seismică triaxială TIRR (stânga) și spectrograma calculată pentru o fereastră de timp de 60s extrasă din înregistrarea canalului vertical

În concluzie, se poate afirma că prin analiza combinată a datelor infrasonice și seismice, se poate obține un instrument util de discriminare a evenimentelor seismice produse la distanță locală. Eficiența acestui instrument depinde de capacitatea array-ului de infrasunete de a detecta semnale acustice generate de sursa studiată. Această capacitate este influențată puternic și de transportul sezonier al vânturilor stratosferice. Eficacitatea acestei metode se poate spori în condițiile adăugării de informații suplimentare în procesul de discriminare, respectiv utilizarea de date înregistrate cu un al doilea array infrasonic amplasat convenabil în raport cu sursa analizată.

În absența unor informații pertinente asupra detonărilor controlate efectuate în cariere sau mine, precum timpul la origine, localizarea, cantitatea de exploziv folosită, asocierea semnalelor infrasonice observate cu cele seismice reprezintă o metodă utilă de identificare a surselor explozive într-un catalog seismic și prin urmare, de distingerea lor de cutremurele naturale.

În plus, această procedură a permis și observarea posibilelor erori ale parametrilor mășurați pentru caracterizarea semnalelor utile (azimut invers, viteza medie acustică aparentă), a variațiilor temporale și spațiale ale pragurilor de detecție în funcție de evoluția geometriei array-ului și de condițiile dinamicii stratosferei. Estimăm că prin extinderea acestei analize seismo-acustice propuse în prezenta procedură se vor putea identifica și caracteriza și alte evenimente de tip impulsiv/exploziv ce apar în amplasamente cu hazard geofizic ridicat (uzine chimice, centrale termice și nucleare, rafinării, mine), contribuind astfel la o mai eficientă monitorizare a riscurilor generate de acestea ca surse antropogenice de poluare.

Bibliografie selectivă

Cansi Y (1995) An automatic seismic event processing for detection and location: The P.M.C.C. method. *Geophys Res Lett* 22:1021–1024

de Groot-Hedlin CD, Hedlin MAH, Drob DP (2010) Atmospheric variability and infrasound monitoring., In: A. Le Pichon et al. (eds.), *Infrasound Monitoring for Atmospheric Studies*, , Chapter 15, pp. 469–504, © Springer Science + Business Media B.V. 2010

Ghica DV, Grecu B, Popa M, Radulian M (2016) Identification of blasting sources in the Dobrogea seismogenic region, Romania using seismo-acoustic signals, *Physics and Chemistry of the Earth* (2016), <http://dx.doi.org/10.1016/j.pce.2016.04.006>

Le Pichon, A and . Cansi (2003) PMCC for Infrasound Data Processing, NewsLetter 2, <http://inframatics.org>

Pichon, A, Matoza, RS Brachet N, Cansi Y (2010) Recent Enhancements of the PMCC Infrasound Signal Detector, Inframatics Newsletter, <http://www.inframatics.org/>

Oncescu MC, Marza VI, Rizescu M, Popa M (1999) The Romanian Earthquake Catalogue between 984-1997, in Vrancea

Radulian, M, Măndrescu, N. Panza, GF, Popescu, E, and A Utale (2000) Characterization of Seismogenic Zones of Romania, *Pure appl. geophys.* 157, 57-77

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

Rezultate

- S-au selectat metodele optime de prelucrare și analiză a datelor înregistrate cu stația IPLOR, pentru monitorizarea surselor de tip exploziv, inclusiv a celor seismo-acustice, prezentându-se:
 - caracteristicile generale ale sistemului de măsurare în contextul atingerii obiectivului fazei
 - programele utilizate pentru prelucrarea și analiza datelor IPLOR (metoda generală și sistemul actual implementat la CND)
- S-a realizat analiza seismo-acustică pe un set de evenimente de referință generate de surse de tip impulsiv, observate cu stația IPLOR, prin atingându-se următoarelor obiective:
 - constituirea setului de evenimente de referință, provenite de la surse naturale și antropogenice, locale și regionale, cu caracter impulsiv (explozii chimice, detonări, bolizi, furtuni) și care au generat semnale înregistrate cu senzorii de infrasunete ai stației IPLOR și seismometrele RSN
 - stabilirea procedurii de configurare a programului GPMCC pentru prelucrarea datelor acustice (IPLOR) și seismice (PLOR)
 - aplicarea programului GPMCC pentru prelucrarea datelor seismo-acustice și analiza rezultatelor și obținerea și sintetizarea de informații complete privind caracteristicile „semnăturilor” infrasonice și seismice ale evenimentelor de referință, prin analiza seismo-acustică a semnalelor generate de acestea
- S-a elaborat procedura de discriminare a evenimentelor seismice pentru distingerea dintre cutremure naturale și explozii de carieră în regiunea Dobrogea, prin valorificarea rezultatelor obținute din analiza lor seismo-acustică; în acest context, s-a realizat:
 - descrierea cutremurelor dobrogene, prezentându-se seismicitatea Dobrogei, carierele amplasate în zona Dobrogei și activitatea seismică (cutremure/explozii) în regiune
 - prelucrarea și analiza datelor în vederea obținerii detecțiilor de semnale infrasonice și asocierea lor cu epicentrele evenimentelor seismice listate în catalogul românesc de cutremure ROMPLUS
 - obținerea unui instrument util de discriminare a evenimentelor seismice produse la distanță locală prin analiza combinată a datelor infrasonice și seismice prin integrarea rezultatelor unor metode, instrumente și sisteme avansate pentru monitorizare seismo-acustică
 - evaluarea posibilității extinderii acestei analize seismo-acustice propuse în proiect pentru identificarea și caracterizarea altor evenimente de tip impulsiv/exploziv ce apar în amplasamente cu hazard geofizic ridicat (uzine chimice, centrale termice și nucleare, rafinării, mine), în vederea monitorizării eficiente a riscurilor generate de acestea ca surse antropogenice de poluare

Stadiul realizării obiectivului fazei

Obiectivul a fost realizat integral.

Concluzii și propuneri pentru continuarea proiectului

Pe baza rezultatelor obținute, se poate concluziona ca s-a reușit atingerea cu succes a obiectivelor propuse pentru prezenta fază și anume:

- Creșterea semnificativă a gradului de înțelegere a fenomenelor seismo-acustice și a nivelului cunoștințelor dobândite, cu grad ridicat de noutate din domeniile seismologiei și dinamicii atmosferei
- Stabilirea și analiza seismo-acustică a unui set de evenimente de referință, provenite de la surse naturale și antropogenice (locale și regionale), cu caracter impulsiv (explozii chimice, detonări, bolizi, furtuni) și care au generat semnale înregistrate cu senzorii de infrasunete ai stației IPLOR și seismometrele RSN
- Studiarea aprofundată a fenomenelor seismo-acustice de tip impulsiv prin analiza înregistrărilor combinate și elaborarea unei proceduri de discriminare a evenimentelor seismice de tip tectonic de cele artificiale, de tip exploziv
- Integrarea și corelarea unor largi seturi de date diferite (infrasunete și seismice) pentru observarea și analizarea surselor reale seismo-acustice de tip impulsiv cu impact direct asupra hazardului care afectează permanent mediului înconjurător
- Valorificarea rezultatelor obținute din analiza seismo-acustică în vederea aplicării lor pentru elaborarea unei proceduri de discriminare a evenimentelor seismice din catalogul ROMPLUS actualizat: distingerea dintre cutremure naturale și explozii de carieră.
- Valorificarea accesului la o cantitate mare de informație seismologică și acustică, performantă, pe baza prelucrării ei unificată prin unor tehnici specifice, de înaltă rezoluție, folosite la nivel mondial

Rezultatele obținute în prezenta fază vor fi aplicate în continuarea proiectului pentru:

- identificarea surselor infrasonice industriale de tip detonări în mine și cariere în vederea discriminării exploziilor de cutremure tectonice folosind procedura de analiza seismo-acustică a evenimentelor pentru întreg teritoriul al României
- determinarea unui model de propagare atmosferică a semnalelor de infrasunete radiate de surse explozive antropogenice de tip detonări în mine și cariere pentru diferite regiuni ale României
- stabilirea unui set evenimente de referință (Ground Truth Events) cunoscute ca provenind de la antropogenice de tip explozii în cariere/mine) care sunt determinate precis din punct de vedere seismic și asocierea lor cu semnalele infrasonice detectate cu stațiile de infrasunete din România
- elaborarea unui catalog de evenimente seismo-acustice pentru teritoriul României
- compararea continuă a semnalelor infrasonice observate cu stațiile de monitorizare cu detecțiile teoretice în vederea monitorizării cât mai precise a surselor de hazard antropogenic ridicat (uzine chimice, centrale termice și nucleare, rafinării, mine)

Responsabil proiect,

Dr. Daniela Veronica Ghica